中学教师继续教育丛书

初中物理问题分析

黄迪兴　关　堰　主编

高等教育出版社

（京）112号

内容简介

本书是我社出版的《中学教师继续教育丛书》中的一本．

本书紧扣九年制义务教育初中物理教学大纲和现行的初中物理教材，结合初中物理教学的实际，围绕知识的重点和难点，从较高的层次上，深入浅出地对物理问题加以分析讨论．全书语言流畅，分析透彻，便于自学．本书内容包括：力学、热学、电磁学、光学、能源共五篇．

本书可作为中学物理教师继续教育教学用书，也可作为高等师范院校的学生和中学生的参考书．

中学教师继续教育丛书

初中物理问题分析

黄迪兴　关　堰　编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

高等教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168　1/32　印张 8.5　字数 220 000

1994 年 6 月第 1 版　1994 年 6 月第 1 次印刷

印数 0 001—1 950

ISBN7—04—004592—3/O・1294

定价 4.70 元

前　言

为适应现代科技和教学改革形势的发展，广大教师都亟待继续学习，以期充实提高，因而迫切需要有一套好的继续教育教材．为此，1991 年 10 月在高等教育出版社召开的中学教师继续教育教材建设座谈会上，确定编写一套《中学教师继续教育丛书》．本书就是这套丛书之一．

本书取材范围以九年制义务教育初中物理教学大纲和新编初中物理教科书为依据，围绕重点知识，结合初中物理教学的实际，有针对性地提出问题，站在较高的层次上分析论证；深入剖析每个概念和基本理论的物理实质；揭示知识内涵的现代物理思想、观点和方法；力求体现启示性、时代性，有所拓宽和提高；并结合讨论过程，充分阐明研究物理问题的科学方法和逻辑规律，以期从根本上提高读者的专业素质和教学能力．

鉴于中学教学的特点，本书在编写上侧重于物理实质的讨论，而不受羁于繁杂的数学过程；对有关课题的分析，物理内涵上达到经典物理学的相应层次，同时在可能范围内尽量与现代物理学的原理和观点相联系，但力求做到深入浅出，显明易懂，以利于自学．本书既可供教育学院作继续教育教材，也可供广大在职中学物理教师、高等师范院校学生以及学有余力的中学生参考．

本书由黄迪兴、关堰主编．参加编写的有黄迪兴（绪论、力学一二和五六、热学）、关堰（电磁学六至八、能源）、高怀纯（电磁学一至五）、俞旭昶（力学三、四）、赵虎城（光学）．

本书由山西师范大学田世昆教授主审，中国电视师范学院李小林同志也审阅了全书，他们的工作对本书的最后完成起到了很大的作用，在此向他们表示衷心的感谢．

由于编写继续教育教材是个新课题，我们既无经验，又无蓝本可作借鉴，加之水平有限，书中难免有不少缺点和错误．恳切地希望使用本书的教师和读者批评指正．

编写组

1992年9月

目　录

绪　论

0.1　物理学的任务和方法…… 1
0.2　物理量和物理规律…… 3

第一篇　力　学

一、质量和密度 …… 9
1.1　质量的物理实质是什么？ …… 9
1.2　“质量”和“物质的量”，这两个物理量的区别和联系是什么？ …… 15
1.3　怎样建立密度这个物理量？密度与质量的实质区别是什么？ …… 17
1.4　怎样正确理解“质量是物体的质量，密度是物质的密度”…… 19
〔思考题〕…… 22
二、机械运动 …… 23
1.5　质点运动学的任务是什么？它研究的基本课题有哪些？ …… 23
1.6　怎样正确理解运动本身的绝对性和描述的相对性？ …… 24
1.7　路线、路程和位移三者的区别和联系是什么？ …… 25
1.8　“时间”和“时刻”的区别是什么？“瞬时 t”与“时刻 t”相同吗？ …… 28
1.9　从匀速直线运动的速度，到平均速度和瞬时速度的内在逻辑联系是什么？ …… 29
〔思考题〕…… 33
三、力 …… 34
1.10　何谓力的“一个本质、两种效果、三个特性”？ …… 34
1.11　地球的引力、重力、重量，这三者有区别吗？ …… 36

1.12 物重和质量的联系和区别是什么？ …… 41
1.13 摩擦力是怎样形成的？它总是起阻力作用吗？ …… 43
〔思考题〕…… 45
四、力和运动 …… 46
1.14 牛顿第一定律的实质意义是什么？它在力学发展史上有何重要意义？ …… 46
1.15 “物体作变速运动时失去了惯性”、“物体的速度越大，惯性也越大”，这些说法正确吗？ …… 48
1.16 在匀速直线行驶的列车中，某人手中释放一物体，将落在何处？为什么 …… 50
1.17 一对平衡力跟一对作用力和反作用力的实质性区别表现于哪些方面？ …… 53
1.18 雨滴从高空落下的过程中作什么运动？ …… 55
〔思考题〕…… 56
五、压强和浮力 …… 57
1.19 压强的物理实质是什么？能否说压强也是一种力？ …… 57
1.20 液体内产生压强的宏观机制和微观本质是什么？ …… 58
1.21 盛水容器底面所受的压力远大于容器中的水所受的重力，这有可能吗 …… 64
1.22 气体压强的微观机理和大气压的成因 大气层总质量的估算 …… 66
1.23 阿基米德定律和浮沉条件 …… 69
1.24 只有弹簧秤、烧杯和水，能测定固体和液体的密度吗？ …… 72
〔思考题〕…… 73
六、功 机械能 …… 75
1.25 怎样正确理解功的定义？ …… 75
1.26 正功和负功的物理实质是什么？ …… 79
1.27 平均功率、瞬时功率、额定功率和实际功率 …… 81
1.28 怎样定义动能？如何理解“动能是物体运动状态的单值函数”？ …… 83
1.29 功和能的内在联系和本质区别是什么？ …… 85

1.30 怎样定义势能？势能区别于其它能量的主要特征是什么？ …… 87
1.31 机械能转化和守恒定律 …… 90
〔思考题〕 …… 92

第二篇 热 学

一、温度和温标 …… 93
2.1 温度的热力学定义和微观本质是什么？ …… 93
2.2 温标 建立温标的三要素 …… 97
2.3 热力学温标和国际实用温标 …… 101
〔思考题〕 …… 104
二、内能和热量 …… 106
2.4 内能的热力学定义和微观本质是什么？ …… 106
2.5 怎样正确理解“热量”的物理涵义？“热量是物体内能的量度”，这话对吗？ …… 109
2.6 怎样确切理解内能、热量跟温度的联系和区别？ …… 111
2.7 热和功的异同 热力学第一定律 …… 114
〔思考题〕 …… 117
三、物态变化 …… 118
2.8 怎样从微观本质上解释晶体的宏观特征？ …… 118
2.9 影响熔点的因素是什么？0℃是纯水温度的下限吗？ …… 121
2.10 怎样从宏观现象和微观本质上说明蒸发和沸腾的特点？高山上煮不熟饭是因为水不易烧开吗？ …… 123
2.11 露、霜、云、雨、雪是怎样形成的？ …… 127
〔思考题〕 …… 130

第三篇 电 磁 学

一、电流 …… 131
3.1 从微观机构看什么是电流 …… 131
3.2 为什么发电厂送电闸刀一合，远近用户的电灯立刻就亮？ … 133
3.3 怎样理解电流的方向？电流〔强度〕是矢量还是标量？ …… 134

3.4 电解液是怎样导电的？ …… 135
3.5 为什么串联电路电流〔强度〕处处相等，并联电路干路上的电流〔强度〕等于各支路电流〔强度〕之和？ …… 137
二、电压 …… 139
3.6 电压是电的压力吗？ …… 139
3.7 为什么串联电路两端的总电压等于各部分电路两端电压的和，并联电路各支路两端的电压相等？ …… 142
3.8 电源的作用 …… 142
3.9 单靠电源两极上的电荷，能在外电路中维持稳恒电场吗？ … 145
三、电阻 …… 148
3.10 电阻、电阻率及其微观实质 …… 148
3.11 电阻是怎样随温度变化的？ …… 151
〔思考题〕 …… 152
四、欧姆定律 …… 154
3.12 欧姆定律的物理意义是什么？ …… 154
3.13 从微观机构上怎样解释欧姆定律？ …… 155
3.14 欧姆定律成立的条件 …… 156
3.15 用伏安法测电阻时，根据什么选择内接法或外接法？ …… 159
3.16 为什么能用水流比喻电流？ …… 161
五、电功 电功率 …… 163
3.17 电流作功的物理本质是什么？ …… 163
3.18 $P=IU$、$P=I^2R$、$P=\frac{U^2}{R}$三式，任何情况下都等效吗？ …… 164
3.19 用电器的额定功率和实际功率 …… 166
3.20 电路中是怎样传输能量的？ …… 167
〔思考题〕 …… 169
六、磁场 …… 170
3.21 物质为什么有磁性？磁单极子存在吗？ …… 170
3.22 不同物质磁化时显示的磁性有何差异？为什么会有这些差异？ …… 174
3.23 如何运用磁极概念来处理问题？ …… 177
3.24 怎样用力线描述场？使用力线对研究物理有何重要意

义？ …… 179
3.25 电磁起重机、电磁继电器和电话耳机，它们所用电磁铁的铁心是一样的吗？ …… 182
3.26 怎样认识磁场力的特性？ …… 183
〔思考题〕 …… 185
七、电磁感应现象 …… 186
3.27 电磁感应现象中，感应电流产生的条件是怎样探求到的？ …… 186
3.28 用楞次定律确定感应电流方向时，"阻碍"之意如何理解？ …… 188
3.29 电磁感应现象中，电源作用是如何实现的？ …… 189
3.30 对比分析动生感应电流的产生和磁场对通电导体的作用两种电磁现象 …… 192
3.31 电磁感应现象中机械能是怎样转化为电能的？ …… 195
3.32 通电导体在磁场中运动时，电能是怎样转化为机械能的？ …… 197
3.33 磁和电之间有哪些联系？二者是一回事吗？ …… 199
3.34 交流电是怎样产生的？它有哪些基本性质？ …… 201
八、电磁波 …… 205
3.35 电磁波的本质是什么？ …… 205
3.36 电磁波有哪些基本性质？ …… 206
3.37 电磁波是怎样产生的，又是如何传播的？ …… 208
〔思考题〕 …… 210

第四篇 光 学

一、光的传播 …… 211
4.1 光总是沿直线传播的吗？ …… 211
4.2 光通过不同媒质的界面时是如何传播的？ …… 212
4.3 光在不均匀媒质中是如何传播的？ …… 214
4.4 光的传播速度 …… 215
二、光路控制和成像 …… 217

4.5 人们是如何按照自己的意愿控制光的传播方向的？ …… 217
4.6 什么是像？ …… 222
4.7 如何观察物体所成的像？ …… 224
三、颜色之谜 …… 232
4.8 单色光的“单色”有何含义？ …… 232
4.9 色光的五光十色是怎样产生的？ …… 232
4.10 物体的颜色和颜料的颜色是怎样形成的？ …… 234
四、大气中的光现象 …… 236
4.11 为什么天空呈蔚蓝色？ …… 236
4.12 海市蜃楼是怎样形成的？ …… 236
4.13 霓虹现象是如何形成的？ …… 237
五、光源 …… 239
〔思考题〕 …… 240

第五篇 能 源

一、中学物理教学中对能量认识的发展 …… 243
5.1 能量概念有何重要意义？ …… 243
5.2 在力学、热学的学习中，是怎样认识机械能和内能的？ …… 244
5.3 在电磁学学习中，是怎样认识电磁能的？ …… 247
5.4 对原子核能应该如何认识 …… 249
二、能量的利用 …… 252
5.5 内能的利用具有什么特点？ …… 252
5.6 与电能利用有关的几个问题 …… 253
5.7 核电站的反应堆会像原子弹那样爆炸吗？ …… 256
三、能源与社会发展 …… 257
5.8 能源是怎样分类的？ …… 257
5.9 能源对社会发展的影响 …… 258
〔思考题〕 …… 259
主要参考书目 …… 260

绪　论

0.1　物理学的任务和方法

世界是物质的．一切物质都在空间和时间的长河中永不间断地运动着、变化着．列宁说过："世界上除了运动着的物质，什么也没有，……"．[①] 而物质的运动形式是多种多样的．从单纯的位置移动，到发热、发光、电磁现象、化合、化分，直至生物的生命现象和思维活动等，都是物质运动的不同形态．它们既服从共同的普遍规律，又各有其不同于其它运动形式的独特规律．人们对各种不同的物质运动形式的研究，形成了自然科学的各个分科．

物理学研究的是物质运动最基本最普遍的形式，包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内的运动等，以及它们之间的相互联系、相互转换．

物理学所研究的各种物质运动变化的现象，统称为物理现象．由于物理现象是最基本的物质运动形式，它普遍地存在于其它较高级较复杂的物质运动形式之中．任何其它自然现象的发生发展都必然同时伴随着物理现象．例如：化学反应过程中总是伴随着吸热、放热，乃至发光、形成电流等现象；生物的生长总是需要水份养料的输送、血液的循环、阳光雨露的作用和保持一定温度的生长环境等．物理学所研究的某些物理规律具有极大的普遍性．如物理学所确定的能量守恒定律，适用于自然界的一切变化过程，无论是化学的、生物的或具有其他特殊性质的过程，都遵从这一定

① 列宁著，中共中央编译局译．《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社，1960年第4版，第169页．

律。所以说，其它自然科学的研究都离不开物理知识，物理学是自然科学中的一门基础科学．

物理学研究物理现象的目的，就是要认识和掌握物质系统在运动变化和相互作用过程中，所体现出来的物理属性和运动变化的规律．而这种“属性”和“规律”都是不以人们的意志为转移而客观存在的．因此，物理学最基本的研究方法就是观察和实验．观察是对自然界自发产生的现象，在不改变自然条件的情况下对它进行观测和分析，借以发现自然现象的客观规律．例如，对天体运动、大气现象等问题，都需采用观察的方法去研究．有时对周围常见的现象进行精心观察，也会导致物理学的新发现，如伽利略还在学生时代，由于精心观察教堂顶上悬挂着的油灯的摆动，从中发现了摆的等时性．可是自然界物质的运动变化是相互联系、错综复杂的，单靠对自然界自发现象的观察往往不足以得出精确的结论，所以物理学研究中更需要用人为控制的方法，排除或减低次要因素的干扰，使需要深入研究的现象在简化了的条件下重复发生，以便反复地仔细地观察、测量和分析，这就称之为实验．可以说物理学的每一个概念、每一条定律都是在观察和实验的基础上建立起来的．

当然，观察和实验必须跟正确的分析、抽象、概括和严密的逻辑推理、数学论证相结合，这是物理学研究的基本特点．没有正确的分析、抽象和概括，就不可能通过观察和实验建立起物理概念和定律；而物理学的各个分科的理论体系，都是从为数不多的几条基本定律和原理出发，通过对许许多多有关物理现象的研究，用严密的逻辑推理和数学论证的方法，进行更加广泛的抽象和概括而逐步形成、逐步完善起来的．严谨的理论不仅能说明一定范围内的各种物理现象，并且还能预言某些未知现象的存在．例如，麦克斯韦的电磁场理论，不仅精辟地解释了当时已知的各种电磁现象，而且预言了电磁波的存在及其传播速度．最终为实验所证实．

物理学研究中，为了化繁为简，以利于问题的讨论和解决，还

常常暂时撇开一些次要的局部的因素，突出主要矛盾，对考察对象进行科学的抽象，建立理想化的物理模型．如力学中的质点、刚体，热学中的理想气体等，都是这样一种科学抽象的理想模型．这类模型的引入，使所研究的问题大为简化，而所得的结论，在一定的领域中仍然是相当精确地普遍适用的．所以说，建立理想模型是物理学中研究问题的一种重要的科学方法．

假说是物理学研究中又一种重要方法．所谓假说，就是在观测到的新的实验事实的基础上，为了寻找事物的新规律，对有关现象的本质提出一些未成熟的说明方案或基本论点．根据这种假说对有关问题进行分析、解释和推论，并用进一步的实验去验证．经过不断的考验和修正，若在一定范围内证明这种假说是正确的，最后就上升为理论，形成新的学说或定律．例如，现代量子力学理论，就是从量子假说开始，经过量子理论的演变逐步发展形成的．

上述观察、实验、抽象概括、理想模型、假说、逻辑推理和数学论证等都是物理学的重要研究方法．中学物理教学的任务，不仅仅是传授物理知识，还应该充分重视结合知识讲授过程，阐明分析问题研究问题的科学方法和逻辑规律，启示学生逐步培养起研究物理问题的正确观点和方法．

0.2 物理量和物理规律

研究物理现象的规律，首先必须对被研究的物质系统在运动变化和相互作用过程中所体现的各种各样的属性，及其运动状态和运动过程的特征，给出确切的描述和量度．所谓物理量，就是物理学中用来表示和量度一个物体或系统在物理现象中所体现的各种物理性质、状态特征或过程特征的量．

根据各种物理量的不同特点，可以从不同的角度适当分类．固此，除了物理学的各个分科——力学、热学、电学、光学等，分别根据需要先后引入的一些物理量，称之为力学量、电学量等外，还可以对所有的物理量按其本身的特性，从以下几方面作出区别：

［Ⅰ］ **矢量和标量**：若一个物理量既有量值大小，又有方向性，并且它们的合成和分解遵循平行四边形法则，这种量叫做**矢量**．如力、速度、电场强度等都是矢量．若一个量只有量值大小，没有方向，如质量、温度等，或者虽有方向，但是它们相加减时不遵循矢量运算的平行四边形法则，如电流、电动势等，这类量都叫做**标量**．

［Ⅱ］ **广延量和强度量**：凡是与系统的摩尔数[①]或体积成比例关系的量，叫做**广延量**，也叫**可加量**．如质量、内能等都是可加量．譬如说，若干零件组成一台机器，那么整个机器的质量等于各个零件的质量之和；反之，凡是与系统的摩尔数或体积无关的量，叫做**强度量**，也叫**不可加量**．如温度、密度、电场强度等都是不可加量．例如：两小杯 40℃ 的温水合并成一大杯，其温度仍然是 40℃．如果一个物体的温度不均匀，即内部各点的温度不相同，则这种各点温度的差别反映了物体内部各处分子热运动的强度不相同．我们决不能说“整个物体的温度等于内部各点温度之和”．

［Ⅲ］**状态量和过程量**：凡是只决定于被考察对象所处的运动状态，而与运动、变化的具体过程无关的量，叫做**状态量**，也叫**态函数**．如动能、温度、内能等都是状态量．譬如，放在恒温环境中的一个物体，必有确定的温度和内能，而与它曾经经历过什么样的物理过程完全无关．另外，物理学中还引入了一些专门用来描述考察对象所经历的物理过程的特征量，叫做**过程量**．如功和热量就是过程量．[②]

了解上述物理量的各种特性的区别，对正确建立物理量，澄清物理概念是很重要的，教学中应给予足够重视．

综上所述，建立一个物理量一般应搞清下述四个方面：第一、物理意义，即物理学为什么要引入这个物理量，它是用来描述或表

---

① 参看本书 1.2.

② 详见本书 1.31 和 2.5.

征考察系统的何种属性、何种状态特征或过程特征的？第二、定义，即唯一确定地规定“什么什么叫做××”，一个正确的定义不允许含有任何模棱两可的用词；第三、特性，即搞清该物理量是矢量还是标量，是广延量还是强度量，是状态量还是过程量等等；第四、量纲[①]和单位．

初中物理教学中，鉴于学生的智力水平和知识基础，不可能对每个物理量都按上述四方面作全面严密的分析，一般应侧重于搞清所学物理量的物理意义，而不一定下完整的严格的定义．在不违背科学性的前提下，可以用通俗易懂的语言阐明物理量某个侧面的特征来代替它的定义．初中物理教材中常用的讨论方式有两种：一种是拿一个物理量的数值表示法代替它的定义．譬如说，“某种物质单位体积的质量，叫做这种物质的密度”；另一种是把一个物理量意义的表述当作定义．如讲动能时说：“水、子弹是由于运动而能够做功的，它们具有的能叫做动能”．初中物理教材对大部分问题的讨论，逻辑上都有这种类似的特点．教师应把握好初中物理教学的特点，正确处理好教学过程，做到深浅适度，简明易懂，不要过分强调定义的完整和严密．

物理学的规律包括定律、定理、原理、法则、定则和在一定范围内普遍适用的基本方程等．概括地说，它们都反映了有关物理现象之间客观的内在的必然联系，并且具体表示为相关物理量之间实际存在的确定的关系．

所谓定律，就是从观察和实验所观测到的大量事实中，经过分析、抽象而概括出来的对某种客观规律的表达．定律的正确性，是根据它的各种结论是否与实验事实相一致而进行验证的．所以说，每条定律的建立都是来自实践和实验，又为实践和实验所证实，它具有极大的可靠性和普遍性．由于定律所反映的是物理现象中客观存在的规律，所以我们毋需要、也不可能对定律作出“为

① 量纲的表示法参看本书 1.3.

什么"？的解释．譬如说，牛顿第二定律表明"物体获得的加速度跟所受的合外力成正比"，这就是客观存在的规律，不存在"为什么？"的问题．因此，人们常说物理学的基本定律是"没道理"的大道理．物理学的每个分科都只有为数不多的几条基本定律，而整个理论体系正是从这几条基本定律出发，用严密的逻辑推理的方法，对相应的物理现象进行广泛的研究而逐步形成的．中学物理教学中很有必要使学生懂得这些道理，逐步养成正确的思想方法．

由已知的基本定律出发，结合有关现象进行分析推理，导出在一定范围内具有普遍意义的结论，这就构成定理或基本方程．如力学中的动能定理、热学中的气态方程、卡诺定理等．当然，定理或基本方程的正确性也是受实验和实践检验的．然而它们的建立不是实验事实的直接结果，而是根据已知实验定律导出的．所以教学中对定理、和基本方程的讲授就需要阐明"根据什么？""为什么？"

原理，通常指某一分科中，具有普遍意义的基本规律，它是从大量实践中概括出来的，其正确性，是根据由它所推出的各种结论，为实践所验证，而不是由其它定律所论证的，如功能原理．

法则和定则也是实验事实的概括，它们跟定律的区别就在于考察对象和适用范围不同．一般地说，法则或定则是用来表征某一类或某一种物理现象的固有特征的．法则是规律的一种方法性表述，如所有矢量的合成和分解都遵从平行四边形法则．

定则是为帮助理解记忆，用以表达事物内在联系，所公认的一种方法，如左、右手定则等．对这类问题的研究，唯一有效的方法就是做好实验，从实验中概括出结论．

应当指出，对任何一条物理规律的讨论，不能仅仅停留在内容的表述上，还应该确切阐明下述两个方面：第一、物理实质．即搞清该定律、定理或法则反映了何种特定的客观规律？第二、适用条件．即明确指出所讨论的定律或定理，在什么样的领域中和什么

样的条件下成立？为何种考察系统所遵从？举例说，讨论牛顿定律时，应强调指出牛顿运动定律仅仅适用于惯性参考系和宏观常速系统．

初中物理教学以定性分析为主，课本中只有很少几条形式简单的定律给出了数学表达式．教师在教学过程中应掌握好深广度和方式方法，侧重于定性分析，在不失科学性和逻辑性的前提下，尽量体现教学的可接受性原则，做到深入浅出，通俗易懂．

第一篇　力　　学

一、质量和密度

1.1　质量的物理实质是什么?

质量的科学定义是在建立牛顿第二定律的逻辑过程中给出的．讨论步骤如下:

(1) 实验指出:同一物体的加速度跟所受的合外力成正比,加速度的方向与合外力的方向相同,即

$$\boldsymbol{a} \propto \boldsymbol{F} \tag{1-1}$$

(2)实验证明,在同样的力作用下,不同的物体产生的加速度不相同,这表明不同物体的惯性大小不相同．在同样的力作用下,若物体产生的加速度小,说明它的惯性较大;反之,若产生的加速度较大,则表明它的惯性较小．于是物理学中为了量度物体的惯性大小就引入了一个新的物理量——质量,表作 m．并且规定:各物体的质量和它们在同样大小的力作用下所获得的加速度成反比,即

$$m \propto \frac{1}{a} \tag{1-2}$$

请注意:这里说的"质量和加速度成反比",并不是实验获得的结果,而是对质量大小的量度的定义．因而对质量的完整定义可表述如下:质量是物体惯性大小的量度,各物体质量的量值和它们在同样大小的力作用下获得的加速度成反比,即

$$\frac{m_2}{m_1}=\frac{a_1}{a_2} \tag{1-3}$$

根据上式，只要选定某个物体的质量作为质量的单位，那么任意选定的另外一个物体的质量大小也就确定了．

按上述逻辑定义质量后，则综合(1－1)、(1－2)式，可以概括出结论：

$$\boldsymbol{a}=k\frac{\boldsymbol{F}}{m}$$

再选取适当的单位，令 $k=1$，即得牛顿第二定律表达式

$$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a} \tag{1-4}$$

大多数普通物理教材都是按这样的逻辑定义质量和建立牛顿第二定律的[①]．这样定义的质量叫做惯性质量．

另外，在万有引力定律中也引入了质量，即

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2} \tag{1-5}$$

这个定律表明任何物体都是引力场的源泉，并通过引力场对置于场中的其它物体产生吸引力．显然，公式中的 m_1 和 m_2 分别表征了两个物体各自产生引力场的本领的大小，所以它们是物体的又一种普遍属性——引力性质的量度．物理学中称之为引力质量．

那么惯性质量和引力质量有什么关系呢？很容易证明同一物体的惯性质量和引力质量严格成正比例关系．为此，让我们用牛顿第二定律和万有引力定律同时考察一个物体作自由落体运动的过程．为了方便起见，把考察地点放在地极处．设物体的惯性质量为 $m_{惯}$，当地在重力加速度为 g，那么根据牛顿第二定律，该物

---

① 参看：复旦大学、上海师大物理系编，《物理学》(力学)，上海科技出版社，1978年9月，第1版，第88至93页；

北京大学物理系编，《普通物理学》(力学部分)，人民教育出版社，1961年7月，第1版，第27页至31页．

体在重力 P 作用下作自由落体运动时，应满足关系式

$$P = m_{惯} g$$

同时设该物体的引力质量为 $m_{引}$，地球的引力质量为 $M_{引}$，地球极半径为 R，则根据万有引力定律，物体受地球的引力为

$$F = G\frac{M_{引} m_{引}}{R^2}$$

在地球两极处，物体所受的重力就是地球对它的引力，即 $P = F$，故有

$$m_{惯} g = G\frac{M_{引} m_{引}}{R^2}$$

即得

$$\frac{m_{惯}}{m_{引}} = \frac{GM_{引}}{R^2 g} = 常量 \qquad (1-6)$$

可见，任何一个物体的惯性质量和引力质量之比是常量也就是说惯性质量和引力质量成严格的正比例关系(这个结论还得到许多特殊设计的高精度的实验所证实)．

既然引力质量与惯性质量成严格的正比例关系，则选择适当的单位就可以使两者在数值上相等．在国际单位制中，引力质量和惯性质量都以“国际千克原器”的质量为单位，叫做“千克”．相应地根据牛顿第二定律定义力的单位叫“牛顿”．然后用实验确定万有引力恒量 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 牛顿·米^2/千克^2．按照这样的规定，任何物体的引力质量和惯性质量的数值都相等．正因为这样，在实用中没有必要再区分引力质量和惯性质量，通常就统称为质量．我们用天平测得的质量实际上是引力质量，然而根据上述理由，也就同时把它当作惯性质量．

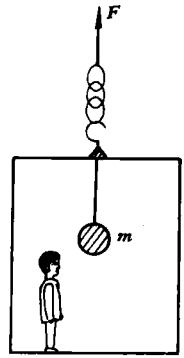


图 1-1

从现代物理学的观点来看，惯性质量和引力质量的等同并非偶然的，其中包含着更深刻的物理意义．爱因斯坦所著的《相对论浅释》中，举了一个有趣的假想比喻：设想在远离星球的无引力场的太空中，有一只长方形大盒，某甲居于盒中．盒顶外侧系一铁索，如图 1－1 所示．我们假想有一足够大的恒力 $\boldsymbol{F}$ 作用于铁索，使方盒以恒定的加速度 g 沿力的方向（如图所示）作匀加速直线运动，g 的数值正好等于地面上的重力加速度．那么某甲在盒中所观察到的一切物理现象将跟在地面上所见到的完全相同．若他放开手中所拿的物体，则物体就以加速度 g 往下落，跟地面上的自由落体运动完全一样．因此，某甲将认为自己是处在与地面上相同的引力场中．若在盒顶内侧用绳子悬挂一个铁球 m，则他将认为绳的张力大小决定于铁球的引力质量．但是站在盒外空中的人看来，显然，绳的张力大小决定于铁球的惯性质量，因为他看到的是悬绳牵动着铁球随同方盒作匀加速直线运动。可见某甲在盒中观察到的物体的引力性质的表现，实际上就是物体的惯性的表现．所以，从某种角度说，我们可以把由于参考系的加速运动所形成的引力场，与静止物体产生的引力场相类比，从而可以认为惯性质量与引力质量相等同．爱因斯坦就是从惯性质量和引力质量的等同作为出发点，建立了广义相对论．而这一理论又导致物体的惯性和引力性质同出于一源的结论．因为在广义相对论中有一些参量，一方面体现了物体的惯性，另一方面又自然地表现为引力场的源泉．所以按现代物理学的观点看，惯性和引力性质无非是物体同一种更深刻的属性在不同方面的表现，完全可以用同一个物理量——质量来量度，而毋需再区别惯性质量和引力质量．

牛顿自己在建立第二运动定律和万有引力定律时，对两个定律中引入的质量也未加区别．但是牛顿的观点与上述现代物理学的观点并不相同．牛顿并不是把质量作为惯性和引力性质的量度引入物理学的，而是先把质量看作是“物质的量”，尔后应用它建

立牛顿第二定律和万有引力定律．当然，进入这两个定律后的质量，客观上就跟物体的惯性和引力性质联系在一起了，表明了它也是惯性和引力性质的量度．但是，问题在于牛顿把质量看作是“物质的量”时，究竟是如何理解一个物体含有的物质多少的呢？怎样比较不同物质组成的物体谁含的物质较多呢？对此，还没有发现牛顿本人对这个问题的直接解释．在他的著名著作《自然哲学的数学原理》中，第一节“定义”里的八个定义中，居于首位的就是质量．牛顿写道：“所谓物质的量，是用它的密度和体积的乘积所给出的物质的测度”．这个定义显然是一个循环定义．事实上，牛顿本人在为撰写《原理》而作的笔记中曾说，密度是[物质的量]/[体积]①．所以说，这个定义只能表明牛顿所说的“物质的量”确实是指物质多少的测度，然而并没有表明牛顿究竟是怎样理解物体含有的物质多少的．从逻辑上说，若脱离开物体的力学属性，能直接比较不同物体含有的物质多少，那除非是一切物体都是由同一种“物质基元”（或说原始的“物质微粒”）所组成的，所谓谁含的物质多，就是指它含有的“物质基元”的数目大．然而这是与辩证唯物主义的观点相违背的，完全不符现代科学揭示的客观事实．因为物质世界是多种多样的，不可穷尽的．目前已经发现的基本粒子就有百余种，而且基本粒子也不是绝对不可分割的，它们内部可能仍然存在着更深的物质层次．正如列宁指出的：“电子和原子一样，也是不可穷尽的；自然界是无限的，而且它无限地存在着”．②所以说，企图用一种所谓统一的“物质基元”的数目，去量度一个物体含有的物质多少是不可能的．质量只能是物体的固有属性——惯性和引力性质的量度，而不能看作是由物体含有的

---

① 参看：[日]广重彻著，《物理学史》，李醒民译，求实出版社，1988年5月第1版，第86页．

② 列宁著，中共中央编译局译，《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社，1960年第4版，第262页．

“物质基元”多少来表示的“物质的量”的量度．

现行中学物理教材对质量的定义和建立牛顿第二定律的逻辑，仍然沿用了牛顿的方法．在初中物理学中也是先把质量定义为“物体中含有物质的多少”，并确定了它的单位和测量方法．到高中讨论牛顿第二定律时，把质量作为已知量，通过实验证明，质量大的物体惯性大，质量小的物体惯性小．于是再赋予质量新的物理意义——质量是物体惯性大小的量度．这就给教学带来了一个问题：怎样把质量的这两方面意义统一起来呢？对此，首先必须强调指出，通过任何物理过程和测量仪表所测定的质量，本身只能是物体所体现的固有属性——惯性和引力性质的量度、中学物理课本之所以也把质量看作是物体含有物质的多少，并非是要回到牛顿的观点上去，即脱离开物体的固有属性，笼统地说质量表示了“物质的量”的大小．实际上，目前是基于这样一种看法：既然惯性和引力性质都是物质的普遍属性，而且现代物理学已表明，可以认为这两种 属性可能起源于物质的同一种更为深刻的普遍属性。因而我们有理由认为一个物体的这种固有属性的大小本身就体现了它含有的物质的多少．这就是中学物理教材定义质量具有两方面意义的内涵逻辑．

应当指出，目前物理学界对于用惯性和引力性质的大小去标志物体含有物质的多少的问题，尚未取得统一的认识．既有人肯定了这种观点，也有人认为这样做是没有根据的，只是一种无法证实的主观臆想．现行中学物理课本之所以没有回避这种有争议的观点，主要是考虑到学生的年龄特征和智力水平．事实上在初中物理教学中根本不可能直接把质量定义为物体惯性大小的量度，而只能从学生的生活经验入手，根据“一把铁锤比一个铁钉含的铁多”、“一条木船比一把木椅含的木材多”等具体事例，概括出“不同的物体含有的物质多少不相同”的问题，于是引入质量这个物理量用来量度物体含有物质的多少．这对初中学生来说才是可以接受的．到高中讨论牛顿第二定律时，再进一步赋予质量以

新的物理意义——质量是物体惯性大小的量度．物理学界对中学物理教材采用这样的逻辑体系，并无二见．事实上，这样做也不会妨碍学生在未来进一步学习和研究中，充分发挥自己的独立思考和见解．

1.2 “质量”和“物质的量”，这两个物理量的区别和联系是什么？

国际单位制中选定了七个基本量，它们的单位称之为基本单位．详见表1－1．此表表明质量和物质的量都是国际单位制中七个基本量之一，它们是两个完全不相同的量．那么什么是物质的量呢？请注意，它跟牛顿所说的“物质的量”是完全不同的两回事．作为现代物理学的一个基本量，物质的量是一个用来表示被考察系统含有的基本单元数目多少的物理量．这里所说的“基本单元”是指组成各个具体系统的最小的物质单元，它可以是原子、分子、离子、电子或其它粒子．譬如，对氢气而言，它的基本单元就是氢分子(H_2)；对铜块而言基本单元就是铜原子(Cu)．这跟前面提到的物质世界统一的“物质基元”根本不是一回事，读者务必注意这一点．

表1－1 SI基本单位

基本量的名称	单位名称	单位符号
长　度	米	m
质　量	千克(公斤)	kg
时　间	秒	s
电　流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

那么怎样拿物质的量去量度一个系统含有的基本单元数的多少呢？为此，国际单位制中规定了物质的量的单位，叫做“摩尔”．摩尔的定义是：系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳－12 的原子数目相等，则该系统的物质的量为 1 摩尔．符号为“mol”．

1 摩尔物质含有的基本单元的数目叫做阿伏伽德罗常量，其数值为

$$N_A = (6.0221367 \pm 0.0000036) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$$

通常取作 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$．这就是说 1 摩尔的水或 1 摩尔的铜，分别含有 6.022×10^{23}个水分子或铜原子．

国际单位制中定义“摩尔”时，还明确指出：在使用摩尔时，基本单元应予指明．这就是说具体表示一个系统的物质的量时，应该指明是几摩尔什么原子、什么分子或什么离子等等，而不能笼统地说成几摩尔物质．因为物质的量并不是一个物质世界统一的“物质的量”的量度，而只是对具体考察系统含有的某种具体物质的基本单元数目的量度．

显然，系统含有的摩尔数多少，就是该系统物质的量的大小．因此，通常也把物质的量称为“摩尔数”．

可见，物质的量和质量是两个迥然不同的量．从实质上说，质量是物体的固有属性——惯性和引力性质大小的量度．1.1 中已阐明，由于惯性和引力性质是一切物质普遍具有的属性，因而人们认为可以拿这种属性的大小去衡量物体含有的物质的多少．从这种意义上说，质量也是物体含有的物质多少的量度．但是请注意：这里所说的用质量去量度的“物质的多少”，是指物质世界统一的物质的量的大小，而不是指某种具体物质的基本单元——分子、原子、离子或其它粒子数目的多少；与此正好相反，物质的量所量度的恰恰是被考察系统所含有的某种物质的基本单元数目的多少，而不是指统一的物质的量的大小．事实上，物质的量（摩尔数）相同而材料不同的物体，它们的质量并不相同．例如，1 摩尔氢气的质量是 0.002 千克，1 摩尔水的质量是 0.018 千克．所以说，质量

和物质的量是有实质性区别的两个物理量．

通常把1 摩尔某种物质的质量，叫做这种物质的摩尔质量，表作“μ”．设系统的摩尔数为ν，则该系统的质量为

$$m = \nu\mu \tag{1-7}$$

上式表明，对同种物质组成的系统而言，它的质量 m 与摩尔数ν成正比．这就是质量与物质的量之间的联系．除此之外，这两个量之间不存在其它必然联系．

1.3 怎样建立密度这个物理量？密度与质量的实质区别是什么？

总论中曾指出，建立一个物理量，一般说来应搞清四方面的问题．现在就以密度为例具体说明一下这个问题：

(1) 物理意义：密度是一个用来描述物质的一种固有性质的物理量．这种性质表现为：在体积相同的情况下，不同的物质具有的质量不相同．

(2) 定义：某种物质组成的物体的质量，跟它的体积之比，叫做这种物质的密度．表作 ρ，即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-8}$$

这种用两个或两个以上的已知物理量的比值来定义一个新的物理量，是物理学中常用的逻辑方法．这个定义唯一确定地回答了什么是密度，而且正确地反映了上述密度的物理意义．同时(1-8)式单值地规定了密度的量值：某种物质的密度，数值上等于这种物质单位体积中含有的质量．

(3) 特性：密度是标量：对于一个均匀物质系统密度的量值是唯一的，与系统含有的摩尔数多少无关，所以密度是不可加量(强度量)．对于不均匀的物质系统(如大气层)，内部各处的密度不相同，彼此不能替代或相加．

(4) 量纲和单位：在 1.2 中已提到，国际单位制中选定了七个

基本量和基本单位，其它物理量都称为导出量．导出量的单位可以利用基本单位通过有关定义式或定律表达式导出来，称之为导出单位．物理学中把导出量是由基本量如何组合而成的表达式，亦即导出单位随基本单位改变而改变的依从关系式，叫做该导出量的量纲式．在力学范围内，长度、质量和时间是三个基本量．用 L、M、T 表示之，则其它力学量 Q 都可以按下列形式表示出来：

$$[Q]=L^pM^qT^r \qquad (1-9)$$

上式就是力学导出量的量纲表达式．指数 p、q、r 分别称为物理量 Q 对长度、质量、时间的量纲．

根据(1－9)式可得出密度的量纲式为

$$[\rho]=\left[\frac{m}{V}\right]=\frac{M}{L^3}=L^{-3}M \qquad (1-10)$$

根据量纲式(1－10)就可以写出密度的单位：

千克/米^3($kg\cdot m^{-3}$)

或　　克/厘米^3($g\cdot cm^{-3}$)

以上几方面，完整地表达了密度的概念．

然而在初中物理教学中，限于学生的智力水平，不宜按上述诸方面全面讨论密度的概念，主要应阐明密度的物理意义、量值表达式，以及它与质量的联系和区别．

教学中首先可通过实例分析，使学生认识到体积相同的不同物质，它们的质量不相等．为了表示不同物质的这种性质区别，物理学中需要引入一个新的物理量，这个物理量就是密度．当学生接受了这一点，也就是初步理解了密度的物理意义．进而提出：如何表示不同物质的密度大小？并将学生的思路引向用单位体积中含有的质量多少去作比较．最后用密度的量值规定法代替密度的定义就行了．亦即指出："某种物质单位体积的质量叫做这种物质的密度"．并根据这一表述写出密度的量值表达式 $\rho=\frac{m}{V}$，实际上就是给出了密度的定义式．

然后通过对一些具有启发性趣味性的问题的讨论，使学生进

一步搞清质量与密度的区别和联系，借以澄清和巩固对这两个概念的理解．举例说：

①“密度与质量成正比”，这话对吗？

对此，主要应引导学生根据定义式 $\rho=\frac{m}{V}$ 进行分析．指出对于同种物质组成的物体来说，如果质量 m 大了，那么它的体积 V 一定也较大，而两者的比值 ρ，即密度的大小并不改变．可见，每种物质的密度都是唯一确定的，它反映了物质自身的一种固有性质．某种物质的密度不会因它制成质量不同的物体而发生改变．所以“密度与质量成正比”的说法是错误的．

②“体积大的物体质量也较大”，这话正确吗？

对此，应引导学生对密度的变形公式 $m=\rho V$ 进行分析．指出质量总是指一个具体物体的质量，而物体的质量既与它的体积有关，也与构成它的材料的密度有关．比较两个物质的质量，即不能只看体积，也不能只看材料的密度，而必须比较两者的体积和材料密度的乘积孰大孰小．例如，1 升水银的质量要比 2 升水的质量大得多．所以说“体积大的物体质量也较大”的说法是错误的．同理，如果说成“密度大的物体质量大”，也是错误的．

初中物理教学中虽然没有给出密度的严格定义，然而通过这类问题的讨论，仍然可以使学生确切理解密度的本质涵义及其与质量的联系和区别．

1.4 怎样正确理解“质量是物体的质量，密度是物质的密度”？

回答这个问题，首先应搞清“物质”与“物体”的区别．

列宁对物质给出了唯一科学的定义：“物质是标志客观实在的哲学范畴，这种客观实在是人感觉到的，它不依赖于我们的感觉而

存在，为我们的感觉所复写、摄影、反映”.[①] 这个定义告诉我们：第一、物质是不依赖于人们的感觉而存在着的客观实在；第二、这种客观实在——物质都是可以认知的，能为我们的感觉所复写、摄影、反映。这就是跟唯心主义和不可知论根本相对立的辩证唯物主义的物质观．

按照列宁的定义，在物理教学中可以通俗地说，凡是在自然界客观地存在着的，并且人们通过感官可以直接或间接感觉到它们存在的东西，都是物质．这就是说，不仅人们见得到、摸得着的东西是物质，而且像电场、磁场、引力场等无色无形的东西，虽然人们无法通过感官直接感觉到它们的存在，但是通过仪表的检测可以间接地证明它们确实也是实实在在地存在于自然界的客观实在，因而也是物质．

那么“物体”与“物质”有何区别呢？当然，任何一个物体本身就是客观存在的物质．事实上，自然界某种物质的存在，都是由这种物质构成的具体物体的存在而体现出来的．譬如说，离开铝锅、铝壶、铝盒、铝块等各种铝构成的物体外，谁还见到过不是物体的“铝”呢？物理学中通常所说的“物质”，就是狭义地指存在于自然界的某一类性质完全相同的物质的总称．如金、银、铜、铁、铝、水、氧气、氢气等等．然而物体不是指一般物质，而还有其特定的涵义：所谓物体总是指具有某种形状和大小的具体物质对象．宇宙中大到一个星球，小到一粒砂子，一颗露珠等，都是这样一种有形状和大小的具体物质对象，都叫做物体．而脱离开具体对象的抽象的物质概念就不是物体．例如，当我们说“水”时，指的就是存在于自然界的一种物质，而不是物体；当我们说“荷叶上的一颗水珠”、“桌子上的一杯水”时，指的就是具体物体了．

所谓物体的属性就是指一个物体借以跟其它物体相区别的各

---

① 列宁著，中共中央编译局译，《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社，1960年4月，第4版，第120至121页．

种性质．例如，不同的物体具有不同的惯性、占有大小不同的空间、打击时发出不同的声音……等等．为了描述物体这些属性的差别，就需要引入一些物理量．质量就是一个用来描述物体惯性大小的物理量．每个物体都具有确定的质量，而不同的物体，一般说来质量各不相同，即使是同种物质构成的不同物体，质量也有大有小．所以说，质量总是指某个具体物体的质量，而不是指某类物质的质量．

那么什么是物质的属性呢？物理学中所说的物质的属性，不是指物质是“标志客观实在”的这一基本属性，而是指各类物质所具有的各种具体属性．物理学中凡是说到“物质的属性”，都是指同一类物质所共有的，同时又是区别于其它物质所特有的性质．密度就是这样一个用来表示物质属性的物理量．如前所述，不同的物质有不同的密度，而同一种物质不管构成什么样的物体，其密度是确定不变的．所以说，密度总是指某种物质的密度，而不是指某个具体物体的密度．然而应当注意：由于某种物质的存在，总是体现为由这种物质构成的各种各样物体的存在，因此，在日常用语中，除了说“铁的密度”、“铝的密度”外，有时也往往说成“铁桶的密度”、“铝锅的密度”等．对此，应透过语言的形式，看其问题的实质．实际上所谓“铁桶的密度”、“铝锅的密度”都是指构成这个“桶”或“锅”的材料的密度．事实上，把“铁桶的密度”这句话，去掉“桶”字，变成“铁的密度”，意义不变；若去掉“铁”字，变成“桶的密度”，就完全丧失了意义．可见，密度只能是物质的密度，而不是物体的密度．

应当指出，物质的密度与所处的状态有关，它是随压强和温度的改变而改变的．不过固体和液体的压缩系数和热膨胀系数都很小，常温常压下密度的变化甚小．课本密度表中给出的固体和液体的密度数据，就是指常温常压下的密度．而气体的密度随压强和温度的变化十分显著，密度表中的数据都是严格地指标准状态(0℃，标准大气压)下的气体密度．

[思考题]

(1) 天平测得的质量，明明是物体引力性质的量度，为什么说“质量是物体惯性大小的量度”呢？

(2) 有人认为“凡是用来描述各种物质的属性差别的量都是强度量；凡是用来描述物体属性的量都是广延量”. 这种说法正确吗？

(3) 已知一件工艺品是由铜和金制成的 . 测得它的质量是 10 千克，体积是 9.0×10^{-4} 米^3. 试求它含有金和铜各多少千克？如果这个工艺品是由金、银、铜三种材料制成的，那么同样测出它的质量和体积，也能确定三种材料的含量各多大吗？为什么？

二、机械运动

1.5 质点运动学的任务是什么？它研究的基本课题有哪些？

物体之间相对位置的变化称为机械运动．这是最简单最基本，然而也是最普遍的物质运动形式．任何一个机械运动都可以看作是平动和转动的组合．然而在许多情况下，我们所关心的只是物体整体的位置移动，而不需要考虑它内部各点之间相对方位的改变，亦即可以忽略它的转动，如讨论汽车、火车的行驶，行星的公转等问题时就是如此．因此，物理学中在研究这类机械运动时引入了一个理想化模型——质点，即用一个“有质量的点”的运动来代替物体的运动．质点突出了“具有质量”和“占有有空间位置”这样两个物体在机械运动中所体现的主要力学因素，而忽略了物体的形状和大小．于是研究质点的机械运动时，毋需考虑转动和形变等问题，使课题得到了简化．当然，一个物体是否可以看作质点是有条件的．通常有两类物体的运动可以当作质点处理：第一、物体作单纯的平动．如从斜面上滑下的木块、在直线传送带上动行的物体等；第二、物体的体积和线度比起与运动相关的距离来小得可以忽略不计．如飞行着的子弹、滚动着的足球、行驶着的汽车、火车等．

质点运动学的任务，就是研究被抽象为质点的物体的运动状态随时间变化的规律．基于这一任务，质点运动学包含两大课题．

[Ⅰ] 如何描述质点的运动状态？所谓“运动状态”就是指运动质点在任一给定时刻所处的位置和运动的快慢与方向．为此，运动学引入了位矢（或位置坐标）、位移、速度和加速度等物理量．

[Ⅱ] 如何表达一个质点的运动状态随时间变化的规律？这

个课题的内容实质上就是讨论两个问题:第一、运动质点的位置是怎样随时间变化的,即要求找出质点的位置坐标或位移随时间变化的函数关系,借以确定运动质点每时每刻所处的位置;第二、怎样确定任一时刻运动质点的速度大小和方向,即要求找出质点的速度随时间变化的函数关系.例如,对于匀变速直线运动的研究,最终就在于找出反映它运动规律的两个基本方程:$S = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, $v = v_0 + at$. 显然,有了这两个方程,只要知道质点的初始位置加速度 a 和初速度 v_0,就可以唯一地确定任一时刻 t 质点所处的位置和速度.

初中物理教材虽然没有提出质点的概念,然而实际上对机械运动的讨论,仅仅涉及质点运动学的一些简单的基本知识,所有被考察的物体都是作为质点处理的.教材中确切的定量描述只限于质点作匀速直线运动的情况,对于变速运动只是用平均速度作了近似的讨论,内容比较简单、浅近.但是讨论问题的思想方法都是相同的,教学中仍应体现上述质点运动学的基本逻辑和方法.

1.6 怎样正确理解运动本身的绝对性和描述的相对性?

正如绪论中指出的,宇宙间一切物质都在空间和时间的长河中永不间断地运动着、发展着、变化着.所以就物质运动的"本身"而言是普遍的、绝对的,自然界不存在绝对静止不动的物体.但是正因为一切物体都在运动着,因而要想"描述"某个物体是如何运动的,只有相对的意义.也就是说对于任何一个具体物体的运动状态的考察,只能先假定另一个物体为不动(实际上也是运动着的),然后才有可能相对于这个被假定为不动的物体,来描述被考察的物体是如何运动的.这就是所谓运动"描述"的相对性.通常说"静止是相对的",实际上静止的相对性,无非是从一个特例体现了运动描述的相对性.

只要理解了这个运动的“本身”和“描述”的区别，懂得了运动“本身的绝对性”和“描述的相对性”这一辩证关系，也就懂得了描述机械运动时为什么必须先选定参考物的道理．所谓参考物，就是在描述机械运动时，事先被假定为不动的那个用来作参考的物体．显然，如果事先不选定参考物，那么任何一个物体的运动状态都是不确定的．譬如，矗立在地面上的楼房，相对于地面是静止的，相对于太阳是运动着的．

原初中物理教材给出了机械运动的确切定义：“一个物体相对于别的物体的位置改变叫做机械运动”．这个定义体现了上述运动描述的相对性．义务教育初中物理课本的提法有所改变，开始是说“物体位置的变化叫做机械运动”教学中要注意处理好这个问题．特别要防止学生形成“绝对空间”的错误观念，即把“位置变化”错误地理解为物体在一个固定的“绝对空间”中的移动．其实教材开始时暂时不提运动描述的相对性，是出于对学生实际的考虑．按习惯在地面上考察物体的运动时，通常就是以地面或固定在地面上的物体为参考物的，而无需说明．如课本列举的“飞舞的流萤、奔驰的骏马……”，都是相对于地面而言的．课本的逻辑是在此基础上进一步深入，再举例阐明选取不同的参考物时，同一物体的机械运动状态不相同，使其进一步认识到机械运动的描述是相对的，任何一个物体的位置变化都是指相对于某个指定的物体——参考物而言的．

1.7 路线、路程和位移三者的区别和联系是什么？

对此，应阐明两个问题：

1．路线和路程的区别和联系

所谓机械运动就是一个物体相对于参考物的位置的改变．而物体的位置改变总是沿着空间彼此紧密相邻的一个又一个位置连续移动的．物理学中把作机械运动的物体，在运动过程中依次所经历的所有彼此邻接的位置所连成的线，叫做物体经过的路线（也

叫径迹或轨迹). 物体在一段时间内实际经过的路线的长度, 叫做它在这段时间内通过的路程.

以上表述表明, 路线和路程是两个有实质区别的概念. 路线是借以描述物体所经历的机械运动的情况和特征的一种物理图象. 通常把质点的机械运动分成直线运动和曲线运动两大类, 曲线运动又分成圆周运动、抛物线运动等, 都是以运动物体经历的路线形状为依据的. 而路程是一个用来量度一段时间内运动物体实际经过的路线长短的物理量, 它并不反映机械运动的任何其它情况和性质. 譬如说, 速率相同的两个运动物体在相同时间内通过的路程相同, 而经历的路线可以截然不同. 初中物理教学中阐明路线和路程的这种实质区别是很有必要的, 对初中学生思想方法的培养就是从这类问题开始的.

2. 路程和位移的区别和联系

(1) 位移和路程物理意义上的区别: 位移是描述物体位置变化的物理量, 它是矢量, 其大小等于物体运动的始点和终点之间的直线距离, 方向由始点指向终点. 位移反映了物体经过一个运动过程后实际位置变化的总效果, 而并不反映物体通过的实际路线的长度. 例如, 汽车从南门开出, 到达北门, 其位移的大小就是南门至北门的直线距离, 方向由南指向北. 这个位移明确地表示了汽车实际位置的变化, 但并不表明汽车终究是经过什么样的路线到达北门的, 这条路线有多长. 路程恰恰是用来量度物体在运动过程中实际经过的路线长短的一个物理量. 一般地说, 路程并不反映物体位置改变的实际情况. 譬如, 汽车同样从南门开出, 经过的路程都是 5 千米, 但位置的变化可以完全不同, 它也许沿环城公路到达了西门, 也许到达了东门, 还可能沿其它公路驶向别处.

(2) 位移和路程的性质和运算法则的区别: 位移是矢量, 既有大小, 又有方向. 同一物体前后两个位移的迭加遵从矢量加法的平形四边形法则; 路程是标量, 只有大小, 没有方向. 物体在若干段时间内通过的总路程, 等于各段时间内通过的路程的算术和.

在直线运动中位移的方向只有正反两种情况，因此可以用带有正负号的代数量 S 来表示．如图 1－2 所示：取质点运动的始点 O 为原点，沿质点运动的直线作坐标轴 Ox．并取向右为正方向．若质点先向右运动 300 米到 A 点（$x_A = 300$ 米），再向左运动 400 米到 B 点（$x_B = -100$ 米），那么质点的总位移为

$$S = S_1 + S_2 = (x_A - x_O) + (x_B - x_A)$$
$$= (300 - 0) + (-100 - 300) = -100(\text{米})$$

这个结果表明质点的最终位置在始点 O 的左侧 100 米处．

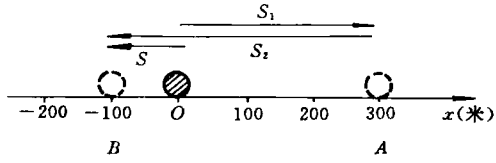


图 1－2

再计算路程：质点先向右运动通过的路程为 $S'_1 = 300$ 米，再向左运动通过的路程为 $S'_2 = 400$ 米，总路程为

$$S' = S'_1 + S'_2 = 300 \text{ 米} + 400 \text{ 米} = 700 \text{ 米}$$

这个结果表明质点先后经过的路线实际长度为 700 米．显然，这个结果并不反映质点位置变化的真实情况．因为事实上质点的最终位置离开始点的距离是 100 米，而不是 700 米．

从上述物理意义和性质的差别来看，位移和路程是两个有本质区别的物理量，一般地说两者不存在什么必然的直接联系．只有在单向直线运动中，物体的路程就等于位移的大小．而且由于单向直线运动物体移动的方向是唯一的，于是用路程就可以反映出物体位置变化的情况．所以在这种特殊情况下，没有位移的概念也能对物体的运动过程作出完全的描述．正是出于这一理由，初中物理课本没有引入位移的概念，因为初中运动学的讨论范围基本上局限于单向直线运动的情况（对汽车、火车等物体的运动的

讨论，也近似模拟为单向直线运动）．不过教学中还是要注意，应该强调出路程的实质是物体经历的路线长短的量度，而不要直接跟物体位置变化的总效果相联系，避免到高中学习位移时发生混淆．

1.8 “时间”和“时刻”的区别是什么？“瞬时 t”与“时刻 t”相同吗？

掌握时间和时刻的概念是讨论运动学问题的前提．对此，关键在于吃透“时刻”的涵义．时刻是事物运动、发展、变化过程中所经历的各个状态先后顺序的标志，它只有“先”与“后”、“早”与“迟”之别，而无大小、长短之分．譬如“6 点 30 分起床，8 点上课”，这句话中的“6 点 30 分”和“8 点”就是指两个时刻．我们只能说前者比后者早一个半小时，而不能说前者比后者小一个半小时．并且时刻具有单向发展、连续变动、不可重复的特性，每个时刻都是一去不复返的；所谓时间就是两个时刻之间的间隔，它是用来量度事物运动、发展、变化所经历的过程历时长短的尺度．所以时间是用长短或大小来表达的，它本身不包含先后或迟早的涵义．只有在应用事件发生的始末两个时刻来表示时间长短的情况下，才能同时反映出事件发生的迟早．

任何物体的运动总是在空间和时间中进行的．每个时刻，运动物体必占有空间的某一位置（也只能占有一个位置），所以“时刻”是跟运动物体的“位置”相对应的；当物体从一个位置变到另一位置时，中间必经历了一段时间，所以物体的任何一段“位移”或“路程”，总是与一段“时间”相对应的。

“瞬时”是指“一刹那”，本质上是一段无限小的时间，而不是一个时刻．所以“瞬时 t”与“时刻 t”在物理涵义上是有区别的．从原则上说，每个“瞬时”仍然是含有无数多时刻的一段极短的时间．然而“瞬时 t”与“时刻 t”又是不可分割的，两者是唯一相对应的．因为“瞬时 t”中虽然可以包含许多时刻，但是其中只有一个时

刻“t”是确定的，任何另外一个确定的时刻都不可能再包含在“瞬时 t”之中了．例如，“1 秒末的瞬时”(即“1 秒到 $1+\Delta t$ 秒，$\Delta t \to 0$”的瞬时)，它只与一个确定的时刻“1 秒末”相对应，而不再含有任何其它确定的时刻了．比方说，$(1+10^{-100})$秒这样一个如此接近于 1 秒末的具体时刻也不能进入“1 秒末的瞬时”中，因为“瞬时”是个无限小量，它将小于任何一个给定的微小量，故必有 $\Delta t < 10^{-100}$秒，因而$(1+10^{-100})$秒这个具体时刻虽然如此接近 1 秒末，但也并不包含在“1 秒末的瞬时”中．所以说，每个瞬时只能与一个具体的确定时刻相对应，“瞬时 t”就是包含“时刻 t”的一刹那．正因为如此，在日常物理术语中，往往把“瞬时 t”与“时刻 t”不加区别地应用．譬如，把瞬时速度、瞬时电流等瞬时量，往往称之为某一时刻的速度、某一时刻的电流．

1.9 从匀速直线运动的速度，到平均速度和瞬时速度的内在逻辑联系是什么？

所谓质点的运动状态就是指任一时刻质点所处的位置和运动的快慢和方向．在 1.7 中已说明，若已知质点初始时刻 t_0 的位置，则任一时刻 t 的位置由 $\Delta t = t - t_0$ 这段时间内所发生的位移 $\Delta \boldsymbol{S}$ 所决定．进一步的问题就是如何描述质点在时刻 t 的运动快慢和方向，这就需要引入速度这个物理量．通常对速度的讨论分下述三步进行：

1．匀速直线运动的速度

匀速直线运动中，质点的位移($\Delta \boldsymbol{S}$)跟发生这个位移的时间(Δt)之比，叫做质点运动的速度．表作

$$\boldsymbol{v} = \frac{\Delta \boldsymbol{S}}{\Delta t} \tag{1-11}$$

这个定义确切地反映了速度的物理意义．因为在匀速直线运动中，这个位移跟时间的比值是唯一确定的，它的量值越大，表明该质点运动得越快．并且 $\boldsymbol{v}$ 的方向就是位移 $\Delta \boldsymbol{S}$ 的方向，也就是质

点运动的方向．

2．平均速度

在变速运动中，由于每段位移跟所用的时间的比值并不是确定不变的，它不能反映整个运动过程的快慢程度和方向．于是物理学中又引入了“平均速度”的概念，它的定义是：在变速运动中，运动质点的位移和所用的时间之比，叫做这段时间内的平均速度．表作

$$\bar{v}=\frac{\Delta S}{\Delta t} \qquad (1-12)$$

对这个概念的理解，应抓住两个要点：

(1) 任何一个平均速度总是跟“一段时间”或“一段位移”唯一对应的，所以叫做这段时间内的平均速度．而且它只能适用于该段时间内的整个运动过程，它既不能用于这段时间之外的运动过程，也不能用于这段时间之内的某一小段时间中的运动过程．例如，木块从光滑斜面上滑下，头 2 秒内的平均速度只适用于这 2 秒内的整个运动过程．它不但不能用于 2 秒后的任何一段时间里的运动，而且也不适用于第 1 秒内或第 2 秒内的运动过程．因为木块的速度是由零逐渐增大的，事实上第 1 秒内的平均速度小于头 2 秒内的平均速度，而第 2 秒内的平均速度大于头 2 秒内的平均速度．

(2) 一段时间内的平均速度只是近似地反映这段时间里质点运动的快慢程度和方向，而并不表明质点在各个时刻的真实运动状态．而且用平均速度对一般变速运动的近似描述，也只有在时间较短，运动路线没有发生显著弯曲或反向运动的条件下才有一定的意义．对有些变速运动取较长时间内的平均速度，有时甚至是毫无意义的．譬如，作圆周运动的物体回转一周的过程中，或上抛一个物体，从抛出至回落到原点的全过程中，由于它们的总位移等于零，所以平均速度也等于零，根本反映不了任何问题．

所以说，虽然(1－11)式和(1－12)式的形式相同，但两者所定

义的匀速直线运动的速度和变速运动的平均速度，无论在物理涵义上或适用条件上都存在着差别．

3．瞬时速度（也叫即时速度）

如上所述，当考察的时间取得较短时，平均速度近似地反映了质点在 t 到 $t+\Delta t$ 这段时间内运动的快慢程度和方向．显然，Δt 取得越小，平均速度 $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 的大小和方向越接近质点在 t 时刻的真实运动情况．当 Δt 达到足够小时，它就趋向于某个固定的数值和方向．也就是说，即使取更小的 Δt 来计算 $\left|\frac{\Delta S}{\Delta t}\right|$ 的量值也不会再发生明显的改变．实际上这样一个具有确定值的极限矢量已超越了平均速度的范畴，变成为一个真实地反映质点在时刻 t 的运动快慢和方向的物理量，这个物理量称之为时刻 t 的瞬时速度．它的具体定义可应用数学中极限的概念来表述，即：当 Δt 趋近于零时，那么在时刻 t 到 $t+\Delta t$ 时间内的平均速度的极限叫做时刻 t 的瞬时速度．表作

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta S}{\Delta t} \tag{1-13}$$

这个定义本身就体现了瞬时速度与平均速度的逻辑联系．时刻 t 的瞬时速度实际上就是含有时刻“t”的一段无限小时间内的平均速度．所以说，平均速度是定义瞬时速度的逻辑过程中不可缺少的过渡性概念．这就是物理学中引入平均速度这个量的主要意义所在．

由平均速度转化到瞬时速度，体现了事物发展由量变到质变的辩证规律．瞬时速度已成为实质上区别于平均速度的一个新的物理量，它精确地描述了质点的运动状态，某个时刻的瞬时速度确切地反映了该时刻质点运动的快慢和方向．

初中物理课本对速度这个课题的讨论作了以下简化：

（1）鉴于初中物理教学的程度，没有引入位移的概念，也就不强调速度的矢量性，只要求用速度的大小去描述物体运动的快

慢．因而用路程代替位移定义了匀速直线运动的速度和变速运动的平均速度．把(1－11)式和(1－12)式表作 $v=\frac{S}{t}$、$\bar{v}=\frac{S}{t}$.

这样定义的 v 和 $\bar{v}$ 实际上是速率和平均速率，而不是速度和平均速度．然而人们在日常用语中，习惯于用“速度”表示物体运动的快慢，譬如，人们总是说“汽车的速度比自行车的速度大”，而不说成“汽车的速率比自行车的速率大”．一般说来，初中学生都已经有用“速度”表示物体运动快慢的经验和习惯．因此，在初中物理教学中既然不能同时引入速度和速率的概念(因为要区别两者的不同，必须先有位移的概念，并强调出速度的矢量性)，那就只能适应学生的实际，先把 v 和 $\bar{v}$ 称之为速度和平均速度(实际上是速率和平均速率)，到高中进一步学习时再去区别速度和速率的概念．

(2) 由于匀速直线运动各个时刻的瞬时速度都相同，可以统称为匀速直线运动的速度．对于变速运动，初中物理只要求用平均速度进行近似的讨论，不要求精确描述物体各个时刻的真实运动状态．所以初中物理教材没有引入瞬时速度的概念．教学中只要使学生确切掌握匀速直线运动的速度($v=\frac{S}{t}$)及其运动规律($S=vt$)，并能用平均速度讨论单向变速运动的问题就行了．

应当指出，一般曲线运动的平均速度的大小并不等于平均速率．例如，作变速圆周运动的物体，若运转一周的时间为 t，那么它在这段时间内的平均速度等于零，而平均速率为 $\bar{v}=\frac{2\pi r}{t}$．只有在单向直线运动中平均速度的大小等于平均速率．初中物理课本中所讨论的变速运动实际上都模拟成单向直线运动了，教学中就当作单向直线运动去处理，不要提速度方向变化的问题．或者说，把课本中的“平均速度”当作平均速率去应用就是了．

[思考题]

(1)“物体在空间的位置变化叫做机械运动”,你认为这样的表述正确吗?为什么?

(2)考察下列运动时,哪些物体可以看作是质点?①地球的自转;②卫星的运行;③陀螺的旋转;④雪撬的滑行;⑤重锤打击下木桩的移动;⑥心脏的跳动;⑦汽缸中活塞的往复运动;⑧钟摆的摆动.

(3)“54次列车,发车的时间提前了”,从物理学的观点看,这句话确切吗?

(4)“位移的大小等于路程”,这句话的成立与否有条件吗?初中物理没有引入位移的概念,为什么单纯用路程也能对所讨论的简单机械运动作出完全的描述?

(5)质点运动学的两大基本课题是什么?若以匀速直线运动为例,那么$v=\frac{S}{t}$和$S=vt$,是同一基本课题的内容吗?

(6)试推证下述结论正确与否:①把一段路程分成相等的若干段,那么各小段路程上的平均速度的平均值等于全段路程上的平均速度;②把一段时间分成相等的若干段;那么各小段时间里的平均速度的平均值等于全段时间里的平均速度.

三、力

1.10 何谓力的“一个本质、两种效果、三个特性”?

“物体之间的相互作用叫做力”,这就是力的科学定义．这个定义本身就反映了力的本质——力是物体对物体的作用．现在的问题是如何确切理解物体对物体的“作用”．这个问题的实质就是要搞清力的效果和特性．

1．力的作用效果

人们之所以能够认识到力的发生和存在,就是由于任何力的作用都要产生出效果．力的效果最先为人们所觉察的就是引起肌肉的紧张．譬如,用手提起一桶水,就会感到手的肌肉紧张了．再通过长期的生活、生产实践和科学实验,人们逐步认识到任何物体对物体的作用,都能产生跟人对物体进行提、推、拉等相类似的作用效果,所以说任何物体对物体的作用都是力．并且一切力的作用效果都可以归结为两个方面:第一、使被作用物体的运动状态发生改变,亦即产生加速度;第二、使被作用物体发生形变．事实上,对任何一个力的考察和量度都是(也只能是)通过对它的作用效果的观测来反映的．例如:用弹簧秤测定一个力的大小,就是以这个力引起的弹簧伸长量的大小来量度的;观察一个物体所受的合外力是否等于零或量值有多大,就是由这个物体的加速度是否等于零或它的加速度和质量的乘积有多大来表示的．进一步分析可知,力的两种效果也并不是彼此孤立的,往往是两者同时产生的．具体地说:①当物体所受的合外力不为零时,将引起运动状态的变化,即产生加速度．如此同时,物体也必然发生了形变．举例说,用一水平力牵动一根弹簧的前端,使其沿光滑水平面作直线加速运动．这时不仅弹簧的整体将按牛顿运动定律获得一定的加速度,而且必然同时发生了伸长形变．事实上,从弹簧的前端到后

端，依次连接的各个小段，正是由于形变而产生的弹性应力，依次牵动着各个小段作直线加速运动．所谓质点和刚体都是理想化的物理模型，无非是为了简化问题，暂时忽略了它们的形变．实际上，无论是质点还是刚体所代表的运动物体，由于受力而产生加速度时，必然同时发生了形变；②物体受平衡力作用时保持静止或匀速直线运动状态，这时物体将产生形变，而不改变宏观运动状态．但是形变的本身就意味着构成物体的各个部分之间发生了相对位移，从而也必然影响到内部微观粒子——分子、原子等的运动状态．

以上分析表明，任何两个物体相互作用过程中，彼此作用的力都将使受力一方发生运动状态的改变和形变．任何一个力的存在都是由受力物体所产生的这种效果所体现的．

2．力的基本特性

根据力的本质和作用效果分析，力有以下基本特性：

(1) 力是发生在物体与物体(一部分物质与另一部分物质)之间的一种物理现象，力不可能脱离开物质而独立地产生和存在，但是，力也不是物质所固有的属性．我们既不能脱离开物质凭空谈力的作用，也不能说某个物体具有多少“力”．任何一个力的产生必有客观存在的一个“施力者”和一个“受力者”，而且必在受力物体身上体现其作用效果．然而任何两个曾经相互作用的物体，当它们彼此“隔离”(既不接触，各自也不在对方的力场中)，互不作用时，它们之间曾经产生的力也就不复存在．

(2) 力的作用总是相互发生的．所谓“相互”，就是指甲给乙一个作用力，乙必然同时给甲一个反作用力．对于前一个力，甲是施力者，乙是受力者；对于后一个力，乙是施力者，甲是受力者．作用力和反作用力遵从牛顿第三定律：大小相等、方向相反，作用在一条直线上．并且作用力与反作用力总是性质相同的力，两者同时存在、同时消失．

(3) 力是矢量，力的作用效果不仅决定于它的量值大小，而且

还决定于它的作用方向和作用点．所以确切地描述一个力的特征，必须同时表示出它的大小、方向和作用点，通常称之为力的三要素．

综上所述，关于力的科学概念，可以概括为“一个本质、两种效果、三个特性”．力的本质就是物体对物体的作用；力的两种效果就是使受力物体发生运动状态的改变和形变；力的三个特性是：物质现象性（力是一部分物质与另一部分物质之间相互作用的现象，力不能脱离开物质而独立发生和存在，但也不是物质的固有属性）、相互作用性、矢量性．

1.11 地球的引力、重力、重量，这三者有区别吗？

对重力、重量的定义，国内外历来的物理教材有不同的处理方式，较普遍的做法有两种：

［Ⅰ］把地球对地面附近物体的引力．称之为重力，也叫重量．按此定义，重量就是重力，它们指的都是地球对物体的引力，三者是一回事．但由于地球的自转，自由落体运动中使物体获得重力加速度的力，或用弹簧秤测得物体的重量（亦即与弹簧秤对物体的支持力相平衡的力），并不等于地球对物体的引力．因此，为了把两者区别开来，又引入了“视重”的概念．即把使物体产生重力加速度的力，或用弹簧秤测得的重量，叫做物体的视重量，简称视重．如 C.Э. 福里斯等著的《普通物理学》，F.W. Sears［美］著的《大学物理学》就是这样处理的．

［Ⅱ］把自由落体运动中使物体产生加速度的力，或相对于地面静止的物体所受的跟支持力相平衡的力，定义为重力，也叫重量（有些教材把重力的大小叫重量）．由这样定义的重力或重量，实际上就是上面所说的“视重”，因而不再引入“视重”的概念．按此定义，重力或重量跟地球对物体的引力就区别开了，由于地球自转，我们在地面上按牛顿定律的原理观测到的物体所受的重力，其大小、方向跟地球对物体的引力均有差别．然而地球自转对物体

重力的影响甚微，当精确度要求不高时，可近似地认为重力就是地球对物体的引力，目前国内大多数力学教材都是按这种观点处理的．例如：北京大学物理系编的《普通物理学》（力学部分）当不考虑地球自转的影响时，就把地球对物体的引力称作重力，但当考虑地球自转的影响时，就利用图 1－3 分析，指出“地球上的观察者看到物体静止时，就认为‘重量’G 和 N（支持力）平衡．而 G 即为 F（地球的引力）与 f'（惯性离心力）的合力．因为我们在地球上用牛顿定律的原理来称物体的重量或测重力加速度时，都是以地球为参照系的，所以测得的结果都是 G”．①

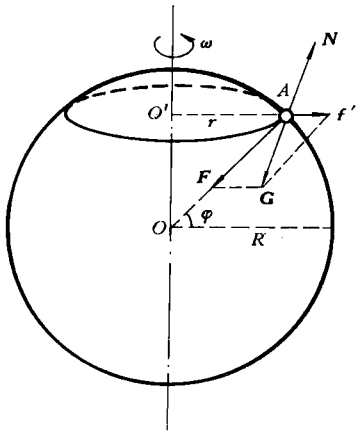


图 1－3

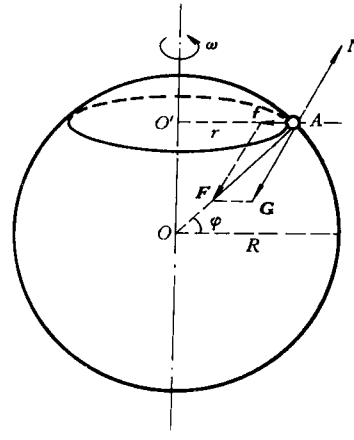


图 1－4

中学物理教材前后使用的版本，对重力、重量的概念，虽在具体表述上有所差别，但实质不变，都是按上述第［Ⅱ］种观点处理的．1983年以前出版的全日制高中物理课本说的是：“重力就是重

① 北京大学物理系普物教研室编，《普通物理学》（力学部分），人民教育出版社，1961 年，第 1 版，51～52 页．引文中括号内的注释是编者加的，图中诸力的符号也有所改变．

量，是由于地球的吸引而使物体受到的力”.1983 年以后出版的高中物理甲种本、乙种本和初中物理课本，对重力和重量的表述与此基本相同．所有这些课本的说法都表明：第一、重量就是重力；第二、重力是由于地球的吸引而产生的，但是并非就是地球对物体的引力；第三、课文虽然没有给出重力的确切定义，但在应用牛顿定律讨论自由落体运动时，以及阐明用弹簧秤测重量的原理时，实际上已表明重力就是使物体获得重力加速度的力，或静止物体所受的与支持力相平衡的力．

1987 年以后出版的高中物理课本和义务教育初中物理课本，只表述了重力的概念，而没有引入“重量”的概念．这种变化并非是出于编者要把“重力”和“重量”作为两个不同的物理量区别开来，而只是考虑到按我国法定计量单位，在人民生活和贸易中，习惯上把物体的质量称为重量，因此，为了避免混淆，不再把重力叫做重量．但为叙述简便，通常把物体受到的重力简称为物重．义务教育初中物理课本对重力的表述也有所改变，写作“地球对地面附近物体的引力叫做重力”．对此，编者的意图也并非要把重力的定义改变到前述第[Ⅰ]种观点上去，而完全是出于对初中学生年龄特征的考虑，认为过去课本的说法学生不易理解，这样改变后学生容易接受．虽这样的定义不够严格，但在忽略地球自转影响的情况下仍然是成立的，不会给学生以后进一步的学习造成障碍．

对重力这个课题的进一步深入讨论，着重应搞清影响重力变化的因素．

1．重力随纬度的变化

这又有两个方面的原因：

(1) 地球是一个南北稍扁的椭球，其赤道半径大于极半径，所以由赤道向两极，随着纬度的增大，地球对物体的引力有所增大．

(2) 由于受地球自转的影响，物体所受的重力并不等于地球的引力．如前所述，重力是地球引力与因地球自转而引起的惯性离心力的合力，而它是随着地域纬度 φ 的改变而改变的．

在初等物理中，为了避免引入惯性力，也可以用以下方法讨论：以地心为原点，建立一个不随地球自转的惯性参考系，那么物体 A 相对于这个惯性参考系是在支持力 $\boldsymbol{N}$ 和地球引力 $\boldsymbol{F}$ 的作用下绕地轴作匀速圆周运动，如图 1－4 所示．由图示可知，与 $\boldsymbol{N}$ 平衡的重力 $\boldsymbol{G}$ 实际上仅是引力 $\boldsymbol{F}$ 的一个分力，或者说，物体的重力是地球的引力 $\boldsymbol{F}$ 跟它绕地轴作匀速圆周运动所需的向心力 $\boldsymbol{f}$ 的矢量差，即

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{F} - \boldsymbol{f}$$

由于向心力的大小 $f = m\omega^2 R\cos\varphi$，按图示应用余弦定理，应有

$$\begin{aligned} G^2 &= F^2 + f^2 - 2Ff\cos\varphi \\ &= F^2 + m^2\omega^4 R^2\cos^2\varphi - 2Fm\omega^2 R\cos^2\varphi \end{aligned}$$

因地球自转的角速度 ω 甚小，略去高次项后得

$$G = F\left(1 - \frac{2m\omega^2 R\cos^2\varphi}{F}\right)^{\frac{1}{2}}$$

对上式应用二项式定理，略去高次项，即得

$$G = F - m\omega^2 R\cos^2\varphi \qquad (1-14)$$

可见物体所受的重力，随地域纬度 φ 的增大而增大，在两极处重力最大，在赤道上重力最小．然而由于 ω 甚小，上式表明重力随纬度的变化是很微小的．

2．重力随高度的变化

若以 R_0、M、g_0 分别表示地球的半径、质量和地面上的重力加速度，在不计地球自转影响的情况下，那么根据万有引力定律和牛顿运动定律来考察自由落体运动应有：

$$F = G\frac{Mm}{R_0^2} = mg_0$$

得

$$g_0 = \frac{GM}{R_0^2} \qquad (1-15)$$

同理可得离地面 h 高处的重力加速度为

$$g_h = \frac{GM}{(R_0 + h)^2} \qquad (1-16)$$

(1－16)式与(1－15)式相比，得

$$g_h = \frac{R_0^2}{(R_0+h)^2} g_0 \qquad (1-17)$$

可见重力加速度以及相应的重力随高度的增大而减小．改写(1－17)式

$$g_h = \frac{1}{1+\frac{2h}{R_0}+\left(\frac{h}{R_0}\right)^2} g_0 \qquad (1-18)$$

当 h 远小于 R_0 时，$\left(\frac{h}{R_0}\right)^2$ 可忽略不计，则

$$g_h = \frac{1}{1+\frac{2h}{R_0}} g_0 = \frac{1-\frac{2h}{R_0}}{\left[1-\left(\frac{2h}{R_0}\right)^2\right]} g_0$$

故有

$$g_h = \left(1-\frac{2h}{R_0}\right) g_0 \qquad (1-19)$$

已知地球半径约为 $R_0 = 6370$ 千米，由上式可知，从海平面算起，每升高千米，重力加速度将减小$\frac{2}{6370}$倍．在 6370 米高的山顶上，其重力加速度比地平面上约减小千分之二．

3．地壳密度的不均匀性对重力的影响

由于地壳的构造不同，使有的地方密度较大，有的地方密度较小，从而也影响到不同地方的重力加速度有差别．例如，某一地区地下蕴藏着大量的铁矿，使它的地壳层密度显著大于周围地区的密度，于是该地区的重力加速度将发生突变，不再按纬度的递增而依次变化，而是比周围其他地区的重力加速度都要大一些．这种现象在技术上还可以用来勘探矿藏，这就是重力勘探法所依据的原理．

综上所述：使物体获得重力加速度的力，或静止物体所受的与支持力相平衡的力，叫做重力．地面上观测得到的物体的重力一

般不等于地球的引力，而只是地球引力的一个分子(另一个分力构成物体随地球自转而作匀速圆周运动所需的向心力)；或者说重力等于地球引力与因地球自转而引起的惯性离心力的矢量和．同时，重力的变化与地域纬度、物体离地面高度、地壳密度的分布等因素有关．

1.12 物重和质量的联系和区别是什么?

在中学物理教材中把物体受到的重力简称物重，它和质量是两个迥然不同的物理量．两者的区别可从以下几方面说明：

(1) 物理实质不同：质量是物体的惯性和引力性质大小的量度，同时也表示了物体含有物质的多少．它是物体自身所固有的属性的表现．在经典力学范围内，同一物体的质量是唯一确定的，与所处的地理位置、运动状态均无关；物重即物体受到的重力，实质上是地球对物体的引力和一个因地球自转而引起的惯性离心力的合力(或说是地球对物体的引力的一个分力)，所以它不仅决定于物体自身的性质，而且还决定于地球的性质和物体跟地球之间的相对位置，同一物体的所受到的重力随所处的地域纬度和海拔高度的改变而改变(详见 1.11)．

(2) 量的特征不同：质量是标量；重力是一种力，是一个既有大小，又有方向的力矢量．

(3) 量度方法不同：实用上质量是用天平(或杆秤)测定的，严格地说质量不能用弹簧秤去测量；反之，物重可以用弹簧秤来测定，而不能用天平去测量．

(4) 量纲和单位不同：在国际单位制中质量是基本量，以“国际千克原器”的质量为单位，叫做“千克”；物重的单位就是力的单位，其量纲式由牛顿定律确定：

$$[G]=[mg]=LMT^{-2}$$

它的国际制单位就是“牛顿”，即 1 牛顿 = 1 千克·米/秒^2.

物重和质量既有上述区别，又有内在的必然联系．用天平测

量质量的原理正是以两者的这种内在联系为依据的．

如果用 G、m、g 分别表示物体受到的重力、质量和重力加速度，那么用牛顿第二定律考察物体从空中自由落下的过程，应有

$$G = mg \qquad (1-20)$$

实验证明，在同一地点，一切物体作自由落体运动的加速度 g 都相同．于是(1－20)式表明，在同一地点，物体的质量和所受的重力成严格的正比例关系．正因为质量和物重之间存在着这种严格的比例关系，所以可以用天平来测定物体的质量．因为天平是根据杠杆的平衡原理制成的．事先标定了砝码的质量，那么当被测物体与砝码分别放在天平的两端达到平衡时，表明两者所受的重力相等，即 $G_{物} = G_{码}$，而 $G_{物} = m_{物}g$、$G_{码} = m_{码}g$，故有 $m_{物} = m_{码}$，所以被测物体的质量等于砝码的质量．

那么为什么不能用天平测定物重呢？这是因为同一物体在不同地点受到的重力不同，设在甲地的物重为 G，在乙地的物重为 G'，则一般地说 $G \neq G'$．因而当放在天平两端的物体和砝码达到平衡时，只能表明物体和砝码受到的重力相等，即 $G_{物} = G_{码}$，但不能直接确定这个重力的大小究竟是多少．除非已知当地的重力加速度 g 的准确值，则可应用测得的质量值，根据(1－20)式计算出物重．一般情况下若精确度要求不高，则可以忽略各地重力加速度的微小差异，都近似地取作 $g = 9.80$ 米/秒^2，那么由(1－20)式可得，质量为 1 千克的物体，其物重 $G = 9.80$ 牛顿．

工程单位制中，力是基本量，规定以国际千克原器在纬度 45° 海平面上受到的重力为力的单位，叫做“千克力”．已知纬度 45°海平面上的重力加速度 $g = 9.80665$ 米/秒^2，所以千克力与牛顿的换算关系是

$$1 \text{ 千克力} = 9.80665 \text{ 牛顿}$$

为计算方便，通常就取 1 千克力 = 9.80 牛顿．显然，如果忽略各地重力加速度的微小差别，都取作 $g = 9.80$ 米/秒^2，那么任何物体，以千克为单位的质量跟以千克力为单位的物重，数值相等．正

因为质量和物重存在着这种关系，人们在日常生活和贸易中往往把“重量”当作质量的同义词使用，习惯地把质量称为“重量”．我们在1.11中曾指出，新编物理教材中为了避免概念的混淆，不再把重力称为“重量”，就是这个道理．然而事实上学生在阅读课外书籍时不可避免地还会接触到重量的概念，所以教师在教学中还是应该指出过去书本中提到的重量就是重力（或重力的大小），亦即现在所说的物重，并阐明它与质量的实质区别．

1.13 摩擦力是怎样形成的？它总是起阻力作用吗？

对此，首先必须明确什么是摩擦力，它有何特点？

两个相互接触的物体发生相对运动或有相对运动的趋势时，在它们的接触面上会产生一种阻碍相对运动的力，这种力叫做摩擦力．

分析这一定义，可知摩擦力具有以下几个特点：第一、摩擦力总是发生在两个物体的接触表面上的；第二、“相互接触”是发生摩擦力的必要条件，但不是充分条件．只有当相互接触的两物体发生相对运动或存在相对运动的趋势时，才能形成摩擦力；第三、摩擦力的效果总是阻碍物体相对运动的进行，或阻止相对运动的发生．所以摩擦力的方向总是跟相对运动或发生相对运动的趋势方向相反的，且在接触面的切线方向上．

那么，为什么两物体发生相对运动或有相对运动趋势时，接触面上要产生阻碍相对运动的摩擦力呢？这个问题人们至今还没有完全搞清楚．目前较常见的理论解释有两种：

（1）凹凸啮合说：认为摩擦力的产生是由于物体接触表面凹凸不平所致．当两个物体接触且挤压时，其接触面上很多凹凸部分就相互啮合．如果物体沿接触表面滑动，两个面上的凸起部分即发生相互碰撞，结果就会产生断裂、磨损，这样就形成了阻碍相对运动的摩擦力．

(2) 分子粘合说:认为物体在相互挤压时,只有少数凸出点的相互接触起着主要作用,若把这些相互接触的面积加起来,也只不过是物体表观接触面积的几百分之一到几万分之一,因此在凸出的接触点上的压强可以达到非常大,这时,已远远超过了"弹性限度",在这些接触处将产生塑性流动,致使各凸出点被压成平顶.这时,接触处的分子间距离已经小到分子引力的作用范围以内,于是两个紧压着的接触面上就产生了分子(或原子)性的粘合,好似真的出现了金属之间的瞬时熔接,如图 1-5 所示的各个小接触面 S 处.如果要使乙物体沿箭头方向滑动,必须拉断粘合部分,这就形成了阻碍相对滑动的摩擦力.

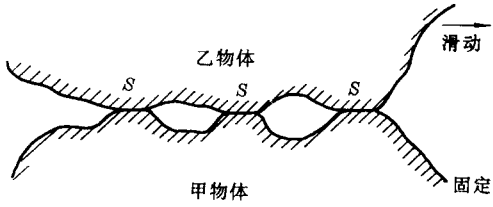


图 1-5

其实,上述两种理论解释并不彼此排斥,而是互相补充的.分子粘合说并不否定表面凹凸不平对摩擦的影响.通过实验分析,肯定这两者都是形成摩擦力的重要因素.并且它们对摩擦所起的作用孰大孰小,也要根据不同情况作具体分析.例如,对于金属表面的摩擦,主要因素是分子粘合作用;而对于木材表面的摩擦来说,凹凸啮合作用是主要的.

上述定义和成因,都表明了摩擦力总是起着阻碍相对运动的作用.然而应当指出,这里所说的相对运动是指相互摩擦的两物体,彼此都以对方为参考物所描述的运动.可是通常人们在地面上考察物体的运动,往往是以地面为参考物的,所谓一个物体处于静止或运动状态,都是相对于地面而言的.因而习惯上把推动物

体相对于地面作加速运动的力称为动力;反之,对于物体相对于地面的运动起阻碍作用的力叫做阻力．所以物体所受的摩擦力究竟是阻力还是动力,必须看这个摩擦力对于物体相对于地面的运动所起的作用是什么,不能笼统地说摩擦力都是阻力．事实上,在许多情况下摩擦力往往表现为推动物体相对于地面作加速运动的动力．例如:放在汽车底板上的木箱,随汽车一起作加速运动时,汽车作用于木箱的静摩擦力,一方面阻碍了木箱相对于汽车的滑动,而另一方面,正是靠这个静摩擦力的作用带动了木箱随同汽车作加速运动,所以它对木箱的运动来说是动力,而不是阻力．当汽车的加速度达到足够大时,木箱跟汽车间将出现相对滑动,但是这时木箱相对于地面仍在作向前的加速运动(只不过它的加速度小于汽车的加速度),所以木箱所受的滑动摩擦力仍然是使木箱获得加速度的动力．可见,无论是静摩擦力还是滑动摩擦力,都有可能成为推动物体相对于地面作加速运动的动力．

[思考题]

(1) 根据什么判断两个物体之间是否存在相互作用力?“两个相互接触的物体必有相互作用力”,这话对吗?

(2) 试判别下列说法哪些是正确的:①我们根据力的效果可以感知力的存在,所以力也是客观存在的物质;②力是物质的现象,而不是物质本身;③一个大力士身上具有很大的力;④力的相互作用性,只体现在物体与物体之间,不适用于力场(如电场)和受力物体(如带电体)之间．

(3) 物理学中是怎样定义重力的?重力与地球对物体的引力有何联系和区别?它的大小与哪些因素有关?

(4) 试根据重力的定义进行分析,“超重”和“失重”的实质是什么?(**提示**:在一个竖直方向上有加速度的系统中,按牛顿定律的原理和重力的定义观测到的物体的“重量”,往往大于或小于在地面上观测到的物重)

(5) 试说明摩擦力的产生条件和特点,以及形成摩擦力的机制．有人说:“一对相互作用的摩擦力,必然是一个起动力作用,一个起阻力作用”,这话对吗?

四、力和运动

1.14 牛顿第一定律的实质意义是什么？它在力学发展史上有何重要意义？

牛顿第一牛顿的一般表述是："任何物体都保持静止的或匀速直线运动的状态，直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止"．这里所说的"其他物体的作用"指的就是外力，因而目前多数力学教材都直接把它表述为"外力"，中学物理教材就是如此．如高中物理课本第一册(必修)的表述是："一切物体总保持匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止"．九年制义务教育初中物理课本中的表述语言稍有改变，说的是："一切物体在没有受到外力作用的时候，总保持静止状态或匀速直线运动状态"，语言显得较通俗易懂．所有这些表述，内容的实质都是相同的．

对牛顿第一定律的讨论，除了掌握定律本身的物理内容外，还应该进一步明确它的实质意义和在力学中的地位．对此，着重应搞清以下几点：

第一、牛顿第一定律的实质意义在于揭示了物质的一种重要的基本属性——惯性．所以牛顿第一定律也叫惯性定律．所谓惯性，就是指物体本身所固有的那种要保持原有的静止或匀速直线运动的状态不变的性质．一切实验事实证明，惯性是物质的普遍属性，不仅由原子、分子组成的实物具有惯性，而且另一种形式的物质——场(引力场、电磁场等)也具有惯性．

第二、牛顿第一定律确定了力的科学含义，它科学地指出了力的作用效果是改变物体的运动状态，而不是维持物体的运动状态．这是力学发展史上的一个划时代的论断．远在古代希腊，哲学家亚里士多德(公元前 384—322)就认为静止是物体的自然状态，必须有力作用在物体上，物体才能运动．根据所谓"马不拉车，

车不走”等直觉经验，认定力是维持物体运动的原因．在以后漫长的岁月中，亚里士多德的观点一直被许多哲学家和物理学家所接受．直到十七世纪初，伽利略（公元1564—1642）通过对小球从光滑斜面上滚到水平面上继续运动的这一实验现象的观察和分析，才指出亚里士多德的观点是错误的．他从实验中发现，同一物体以同样的初速度在不同的平面上滑动时，平面越光滑，小球滑过的路程越长．于是合乎逻辑地作出科学的推论：在没有摩擦阻力的理想情况下，物体必将以恒定的速度持续运动．可见力不是维持运动的原因，而是迫使物体改变运动状态的外部条件．牛顿接受了并发展了伽利略的观点，且用概括的语言把它表达出来，建立了牛顿第一定律．这个定律的建立打破了亚里士多德的那种维持两千年之久的错误观点，第一次赋予力以真正科学的含义，于是开创了力学研究的新时代．使得人们从寻找“运动的原因”这一自然哲学的困境中摆脱出来，转变到研究“在力作用下物体运动状态变化的规律”这一科学的课题上来．所以说，牛顿第一定律的建立是近代经典力学的起点．

第三、牛顿第一定律是独立于牛顿第二定律的一条普遍的实验定律，并且是建立牛顿第二定律的前提和基础．虽然，单纯从数量关系上说，似乎牛顿第一定律可以看作是牛顿第二定律的一个特例，因为根据牛顿第二定律，当物体所受的合外力等于零时，加速度等于零，于是就得出与牛顿第一定律的内容完全相同的结论，即物体将保持静止或匀速直线运动的状态不变．但是，读者必须注意：牛顿第二定律代替不了第一定律．因为牛顿第一定律的实质意义在于揭示了物体的一种重要的基本属性——惯性．正因为牛顿第一定律揭示了物体的惯性，才有必要和可能进一步定量地讨论物体的惯性、物体间的相互作用，跟物体运动状态变化缓急程度的关系．而牛顿第二定律的任务就是具体地揭示出力、质量（惯性大小的量度）和加速度之间的定量联系．所以说第一定律是第二定律的基础，第二定律是第一定律的深化．两者既是相互联系

不可分割的整体，又是不可相互替代的，各自具有普遍意义的、独立的力学基本定律．它们跟牛顿第三定律一起构成了一个完整的理论体系，奠定了整个经典力学的基础．

1.15 “物体作变速运动时失去了惯性”、“物体的速度越大，惯性也越大”，这些说法正确吗？

由于牛顿第一定律与人们的直觉经验不一致，以致在这个定律建立以前，亚里士多德的错误观点持续了两千多年；这个定律建立以后，人们仍然受一些前科学概念的影响，往往对惯性的理解产生这样那样的错误观念．所谓“物体作变速运动时失去了惯性”、“物体的速度越大，惯性也越大”等说法，都是出于对惯性的错误理解．

惯性是物体自身的固有属性，在经典力学范围内，同一物体的惯性大小是唯一确定的，跟它的速度大小，以及是否由于受力而作变速运动均无关．

当物体处于静止或匀速直线运动的状态时，固然能表现出惯性，即维持它原有的静止或匀速直线运动状态不变的性质；当物体受到外力的作用而处于变速运动的状态时，它同样也表现出具有惯性．这种表现可以从两方面来说明：第一、物体表现出具有反抗外力的作用而维持其原有运动状态不变的趋向．具体地说，外力要“打破物体原有的运动状态”，而物体的惯性要反抗外力的作用而“维持它原有的运动状态”．正是由于这一对矛盾的存在决定了物体运动状态的变化是受一定规律制约的，而不是任意的．在同样大小的力作用下，有的物体运动状态变化比较快，有的则比较慢．这就具体反映了不同物体抵抗外力作用而维持它原有运动状态的能力不同，亦即惯性大小不同．可见物体在外力作用下作变速运动时，不仅惯性没有消失，而且正是在这样的过程中才反映出物体惯性的大小，于是使得惯性是可以量度的．物理学中就是根据这样的事实，引入了“质量”这个物理量，用来量度物体惯性的大

小;第二、作变速运动的物体虽然每时每刻速度都在变化,可是在任何时刻物体都表现出要维持它这一时刻的即时速度不变的性质,只不过由于外力的存在不断地打破这种"企图",以致速度继续发生变化.如果某一时刻外力突然撤消,物体立刻就"维持住"该时刻的即时速度作匀速直线运动.这就充分反映了作变速运动的物体仍然具有要维持它每时每刻的运动状态不变的性质,即惯性.所以说,物体的惯性不会因它作变速运动而消失."变"是外力作用的表现,变得"有节制"、"有规律",正是物体自身惯性的体现.

物体的惯性不仅不会消失,而且在经典力学范围内它的量值也是唯一确定的,不会随运动状态的改变而改变.有人往往根据一些表观现象,如高速行驶着的火车或汽车,很难在短时间内把车刹住,于是就认为物体的速度越大,惯性也越大.其实他们的论断恰恰犯了逻辑上的错误.事实上,正是因为火车或汽车等物体,高速状态与低速状态时的惯性大小相同,所以高速运行时就比低速运行更难刹住.如前所述,一个物体惯性的大小具体表现在运动状态改变的难易程度上,所谓惯性大,就是指要改变它的运动状态较困难,亦即在同样的力作用下,在相等的时间内速度的改变量较小.对于同一物体来说,由于惯性的大小是一定的,因而不管物体原来的速度多大,在同样的力作用下,在相同时间内它的速度改变量总是相同的.正因为这样,用一个同样大小的力去阻止高速运动着的物体就需要经过较长的时间才能使它停下来.举例说:设列车在制动力 f 作用下,可获得大小为 1 米/秒^2 的加速度,亦即每秒钟可使它的速度减小 1 米/秒,那么当列车以 5 米/秒的速度运行时,开始制动后的 5 秒末就可以把它刹住.可是当列车以 25 米/秒的高速运行时,如果用同样大小的制动力 f 来制动,那么正因为它的惯性大小不变,获得的加速度相同,每秒钟的速度减小量仍为 1 米/秒,于是需要经过 25 秒钟才能使列车停下来.可见,根据列车的速度越大,越难制动等事实,得出物体的速度越大,惯性也越大的结论,是完全错误的.

物体的惯性与运动速度无关的事实，还可以结合动量定理和动能定理，通过实验来证明：设质量为 m 的物体，以速度 v 在水平面上作直线运动时，由于受到一个恒定的阻力 f 的作用，于是经历时间 Δt，并通过路程 s 后停住，那么根据动量定理和动能定理，应有

$$f\Delta t = m\Delta v = mv \quad 即 \Delta t = \frac{mv}{f} \tag{1-21}$$

$$fs = \frac{1}{2}mv^2 \qquad S = \frac{mv^2}{2f} \tag{1-22}$$

实验证明，如果使物体的初速度增大到 $v' = 2v$，那么在同样的阻力 f 作用下，物体作减速运动的时间和通过的路程，将分别增大为 $\Delta t' = 2\Delta t$、$S' = 4S$. 这个结果表明，物体的速度增大时，(1-21)(1-22)二式中用来表示惯性大小的质量 m 并不改变，亦即物体的惯性是唯一确定的，与它的速度大小无关．实际上，当物体的速度增大时，要想阻止它的运动之所以变得困难了，并非是由于惯性变大了，而是因为它的动量和动能增大了．(1-21)(1-22)二式表明，运动物体所受的阻力 f 一定时，它能够继续作减速运动的时间 Δt 和通过的路程 S，分别与它原有的动量（mv）和动能（$\frac{1}{2}mv^2$）成正比．

1.16 在匀速直线行驶的列车中，某人手中释放一物体，将落在何处？为什么？

若站在较高的层次上作分析，这是一个体现力学相对性原理的问题．为此，我们先介绍一下什么是力学相对性原理．

讨论“机械运动”时已指出，具体描述一个物体的运动必须先选定参考系．从运动学的角度说参考系的选择是任意的，可根据所讨论的问题的特点择其方便而定．但是在动力学中应用牛顿定律时情况就不同了，并非对任何参考系牛顿定律都是适用的．例如：如图 1-6 所示，在车厢里的平滑桌面上放一小球 A. 当车厢

相对于地面由静止开始，以加速度 a 向右运动时，站在地面上的人来看，由于小球所受的合外力为零，没有跟车厢一起向右运动，相对于地面仍保持静止不动，所以以地面为参考系时是符合牛顿第一定律的；但车厢中的乘客以车厢为参考系来观察，小球所受的合外力仍为零，却以加速度 $-a$ 向左后退．因此，以车厢为参考系考察小球的运动，牛顿第一定律就不成立了．可见，牛顿运动定律不是对任何参考系都是适用的．物理学中把能够适用牛顿第一定律的参考系叫做惯性参考系，简称惯性系；反之，凡是对牛顿第一定律不能成立的参考系叫做非惯性系．如上例中加速运行的车厢就是一个非惯性系．

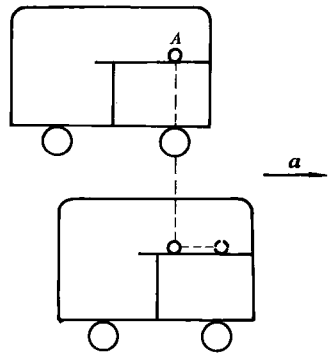


图 1－6

惯性参考系的存在是经典动力学的一个基本假设．通过大量观测和实验证明，以太阳为原点，引向某一恒星的直线为坐标轴所构成的坐标系，就是一个相当精确的惯性参考系．可以证明，相对于一个已知惯性系作匀速直线运动的其它参考系，必然也是惯性系．推证如下：

设 S 系是一个惯性参考系，而另一参考系 S' 相对于 S 系以速度 v_0 作匀速直线运动．如果有一物体在 S' 系中以速度 v' 运动，那么根据经典的速度合成法则——绝对速度等于相对速度与牵连

速度的矢量和，该物体相对于 S 系的运动速度为

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{v}_0 \tag{1-23}$$

将上式对时间 t 求导，且考虑到 $\boldsymbol{v}_0$ 是常量，故有

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}'}{\mathrm{d}t}$$

即

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' \tag{1-24}$$

以上二式表明，虽然同一物体相对于 S 系和 S' 系的速度不相同，但发生的加速度总是相同的．因此，当一个物体不受外力作用时，相对于惯性系 S 将作匀速直线运动，即加速度 $\boldsymbol{a} = 0$，那么由于 $\boldsymbol{a}' = \boldsymbol{a} = 0$，该物体相对于 S' 系也必然作匀速直线运动，这就表明牛顿第一定律对 S' 系也成立，所以 S' 系也是惯性系．可见，相对于已知惯性系作匀速直线运动的一切参考系，都是惯性系．

由于地球相对于太阳在进行公转和自转，所以严格说来地球不是一个精确的惯性系．然而地球的公转和自转的向心加速度都很微小，因而在地面上考察一般物体的运动时，可以近似地把地球看作是一个惯性参考系．相应地凡是相对于地面作匀速直线运动的物体，也可以看作是惯性参考系．

在经典力学范围内物体的质量 m 是与速度无关的恒量．所以根据(1－24)式，当牛顿第二定律 $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ 在上述 S 系中成立时，则 $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}'$ 在 S' 系中也必然成立．可见，在一切惯性系中牛顿第二定律的数学表达式具有相同的形式．这就是说：一切惯性系中物体遵从的力学规律都相同，因而在一个惯性系内部做任何力学实验都不可能确定该系统相对于其他惯性系是否在运动．这个结论就叫做力学的相对性原理．伽利略最先阐明了这个原理，所以也叫伽利略相对性原理．这个原理表明，从力学的观点看，一切惯性系都是等价的，无所谓那个是基本的惯性系．我们只能假定其中任意一个是静止的，相对于被假定为静止的惯性系去决定其它惯性系的运动速度．

现在回过头来看前面所提出的问题：在匀速直线行驶的列车

中,某人手中释放一物体,将落在何处?显然,相对于地面作匀速直线运动的列车也是一个惯性系.因此,根据力学相对性原理,在此列车中所观察到的一切力学现象必跟在地面上看到的力学现象完全相同.某人手中释放一物体,则物体必在重力作用下相对于车厢竖直向下作自由落体运动.因而物体的着地点必在下落点的正下方,决不会偏向车尾的一方.

不过在中学物理教学中对学生解释这类问题时,当然不能直接应用力学相对性原理去讨论,而应该应用惯性运动的概念去分析,阐明物体运动的具体物理过程.按习惯,仍以地面为参考系进行考察,那么物体离手之前,也随同车厢作匀速直线运动,所以它所受的合外力为零,此时手对物体的作用力只有一个竖直向上的支持力,与物体的重力相平衡.放开手后,由于物体的惯性,在水平方向上仍然保持原有的速度作匀速运动;同时由于物体失去了手对它的支持力,于是在重力作用下使它获得一个竖直向下的重力加速度 g. 因此,物体离手后的运动是一个水平方向的匀速直线运动和一个竖直向下的自由落体运动的合运动(即平抛运动).经过一段时间物体将落到地板上.在这段时间内列车继续以原来的速度匀速前进着,而物体由于惯性的作用,在水平方向上也保持原来的速度继续向前作匀速运动.所以两者在水平方向上通过的距离是相同的.因而物体的着地点必在下落点的正下方.

1.17 一对平衡力跟一对作用力和反作用力的实质性区别表现于哪些方面?

牛顿第一定律表明,物体不受外力作用时,总是保持静止或匀速直线运动状态.然而事实上,绝对不受外力作用的孤立物体是不存在的.我们在实际问题中,往往把物体所受合外力为零的状态等价于物体不受力的状态,并把这样的状态称之为平衡状态.物体在平衡状态下所受的力称之为平衡力.物体所受的平衡力可以是两个以上的多个外力所组成.但在质点力学范围内这些力都

可以看作是共点的，并且将这些力进行适当的分解和合成，最后总可以归结为二力相平衡．所以研究二力平衡的条件是质点静力学的基本课题，也是初中物理教学的重点之一．

实验证明，作用于同一物体的二力平衡的条件是：大小相等、方向相反，并且作用在同一直线上．

由于一对平衡力和一对作用力与反作用力都有“大小相等、方向相反，作用在同一直线上”的特点，所以初学者在分析具体力学问题时往往使两者互相混淆，教学中特别要强调出它们的实质性区别．着重应阐明以下几点：

(1) 一对平衡力必定是作用在同一物体上的两个力，之所以说二者平衡，就是因为它们在同一物体上产生的动力学效果正好互相抵消；而作用力和反作用力是作用在两个不同物体上的力，每个力各自在被作用的物体上产生其效果，不能相互抵消．

(2) 一对平衡力是由两个不同的施力物体同时作用于同一物体的，这两个力的性质可以相同，也可以不同．譬如，用电线悬挂一盏电灯，则电灯受到一个重力和一个电线拉力的作用而处于平衡，其中重力是引力，拉力是弹性力；而作用力和反作用力总是同一性质的力，如上例电灯拉电线的力和电线拉电灯的力，或地球吸引电灯的力(重力)与电灯吸引地球的力，就是两对作用力和反作用力．前一对都是弹性力，后一对都是引力．

(3) 一对平衡力，彼此是独立发生的，其中任意一个都可以单独产生或撤消，而不影响另一个力的存在或消失．如上例，电灯原先受重力和电线拉力这一对平衡力的作用，若突然剪断电线，拉力立即消失，而作用于电灯的重力并不消失，电灯将在这个重力作用下自由落下；而作用力和反作用力总是同时产生、同时消失的，彼此互为存在的前提．如上述剪断电线时，电线对电灯的拉力和电灯对电线的拉力，这对作用力和反作用力就同时消失．

显然，一对平衡力的动力学效果等于零，被作用物体的运动状态不变，即保持静止或匀速直线运动的状态．然而物体在平衡力

作用下必将发生形变，所以不能笼统地说平衡力的作用效果等于零．

1.18 雨滴从高空落下的过程中作什么运动?

物体作什么性质的运动，既与它原有的运动状态有关，又取决它受力的情况．而运动物体所受的外力，往往是由不平衡到平衡，或由平衡到不平衡，不断地转化着的．雨滴从高空落下的过程就是如此．如果忽略重力加速度随高度变化的微小差别，也不计空气浮力的作用，那么可以认为雨滴是在一个恒定的重力和一个空气的阻力共同作用下作竖直向下的运动．流体力学表明，流体对运动物体的阻力，除了与流体性质、物体表面状况及其形状大小等因素有关外，还与相对速度有关．实验证明，空气对运动物体的阻力，在相对速度不是太大的范围内，近似地与相对速度成正比，即

$$f = -kv$$

当相对速度较大时，阻力将与相对速度的平方成正比，即

$$f = -kv^2$$

式中负号表示 f 与 v 方向相反，阻力系数 k 与物体的形状大小和表面状况有关．根据以上两式分析，雨滴从高空落下的全过程，可分为三个性质不同的运动阶段：①开始落下时由于速度较小，所受空气的阻力甚小，所以可以看作是自由落体运动，犹如从悬在天花板上的漏壶中滴落的水滴的运动那样；②随着速度的增大，空气的阻力越来越大，雨滴就越来越显著地作变加速运动，其加速度不断减小，然而下降的速度仍在继续增大；③直到雨滴的速度达到某个极限值，相应地空气的阻力增大到跟重力的大小相等，于是阻力与重力相平衡，雨滴开始做竖直向下的匀速直线运动．这个速度叫做极限速度，也叫收尾速度．

飞行员利用降落伞可以安全着落，其原理就是如此．设跳伞时空气对人的阻力为 $f = -kv^2$，则由 $mg = kv^2$，可得收尾速度为

$v=\sqrt{\frac{mg}{k}}$. 可见收尾速度由阻力系数 k 和人与伞的总质量 m 所决定．而 k 与物体的形状大小关系很大．若不打开降落伞的话，k 约为 0.2 千克/米，设 $m=80$ 千克，则得 $v=\sqrt{\frac{80\times 9.8}{0.2}}\approx 63$ 米/秒．这相当于人从 200 米高处自由跳下时的着地速度，这当然是不行的；若打开降落伞，k 值约为 20 千米/米，则不管开始速度如何，其收尾速度 $v=\sqrt{\frac{80\times 9.8}{20}}=6.3$ 米/秒．这相当于从 2 米高处跳下一样，人将安全着落．

[思考题]

(1) 有的学生往往认为牛顿第一定律只不过是第二定律的一个特例，你该怎样向他们解释这种观点是不适当的？

(2) 以加速度 a 作匀变速直线运动的列车中，一位旅客，手伸出窗外释放一物体．那么以下说法哪些是错误的：①站在路边的人看到物体作平抛运动，着地时正好在旅客手掌的正下方；②旅客看到物体作自由落体运动；③路边的人看到物体作平抛运动，着地时已经落后于旅客；④旅客观察到物体作向后的平抛运动．

(3) 当轮船平稳地沿直线匀速航行时，某人在甲板上用相同的力抛扔一物体，那么向船头或向船尾抛扔，物体被抛出的距离有无差别。若轮船作匀加速直线运动，那么能否在船舱中 借助于力学实验来确定轮船的加速度？

(4) 质量分别为 m_1 和 m_2 的两个小球，连接在一个轻弹簧的两端．再用一条轻绳与 m_1 相连，把该装置悬挂在天花板下．试分析：① m_1、m_2、弹簧、绳子，各受哪些力的作用？各对其它物体施加了哪些力？②所有这些力当中，哪些互为平衡力？哪些互为作用力和反作用力？

(5) 一粒子弹以一定的初速度竖直向上发射，到达最高点后又沿相反方向落下．设空气阻力与速度成正比($f=-kv$)．已知子弹质量为 m，阻力系数为 k．问：子弹在整个运动过程中，何时加速度的量值为最大？子弹回落过程中可能达到的最大速度是多少？

五、压强和浮力

1.19 压强的物理实质是什么？能否说压强也是一种力？

物体单位面积上受到的压力叫做压强．压强是一个用来描述受力面上压力分布状况的物理量，受力面上各点的压强大小分别反映了各点附近受到的压力作用的强弱，而并不反映整个受力面所受压力的总情况．举例说，若干吨重的拖拉机压在地面上，履带对地面的压强为几万帕斯卡，而手指用力按图钉，在图钉尖下就能产生几亿帕斯卡的压强．小小的图钉作用于受力面一点的压强，比庞大的拖拉机压在地面上的压强还要大几万倍；又如，水库拦水坝所受的压力，是指整个拦水坝与水的接触面上受到的水的垂直作用力，这个压力既决定于水的深度，又决定于坝的总长度．而拦水坝上各点的压强大小不同，每一点的压强只决定于该点离水面的深度，越深的地方压强越大．这两个事例清楚地表明了压强和压力是两个有实质性区别的物理量：压力是指垂直作用于物体表面的一种力，它跟别的力一样，具有力的三要素和力的作用效果；压强是一个描述受力面上各点压力分布状况的物理量，各点的压强大小体现了各点附近压力作用的强弱．

进一步分析可知，压强不仅仅反映了两个物体接触面上压力分布的状况，而且也标志着被考察系统所处的力学状态．例如：气体的压强是描述系统状态的独立参量之一．对于一个定质量气态系统，当体积一定时，压强的大小就唯一地确定了系统所处的状态，它反映了气体分子的数密度和热运动强度的总状况（详见1.22）；液体内部各点的压强实质上决定于内部分子间的平均距离的分布状况，也是内部力学状态的反映（详见1.20）；由于固体不仅能承受压缩形变，而且还能承受拉伸形变和切变．因此，固体内

部的力学状态需要用压应力、张应力和切应力等来描述．然而当固体仅受压力的作用而被压缩时，内部的压应力——相邻物质层之间的推斥力，反映到表面层上就表现为跟所接触的其他物体相互挤压的压强，所以接触面上的压强大小实际上也间接地反映了内部的压应力状态——被压缩的紧张程度．

综上所述：压强是一个用来描述受力面上压力分布状况的物理量，它反映了受力面各点受到的压力作用的强弱，同时也直接或间接地标志着被考察系统自身所处的力学状态．所以说，用压力与受力面积之比($\frac{F}{S}$)所定义的压强，已成为实质上有别于压力的一个新物理量，因此不能认为压强也是一种力．

1.20 液体内产生压强的宏观机制和微观本质是什么？

对这个问题应着重阐明三点：第一、液体内部压强的定义及其特征；第二、液体内压强的分布规律；第三、形成液体压强的微观本质．分述如下：

1．静止液体内的压强

如图 1－7，过静止液体内任一点 C，取一面元 ΔS．如果我们设想把 ΔS 一侧的液体移去，那么由于液体的流动性，另一侧的液体必向这一侧的真空区流动，因而不能保持平衡．可见，ΔS 两侧的液体之所以能保持平衡，必然是由于彼此产生了一种相互“抵挡”的作用力．显然，这种力只能是一种垂直作用于面元 ΔS 上的压力．因为液体没有切变弹性，如果存在着沿面元 ΔS 的切向分力，则必将引起液体的流动，不可能保持平衡．现在假定平衡时，ΔS 一侧的液体以一个压力 ΔF 垂直作用于面元，借以挡住另一侧液体的流动，如图 1－7 所示．那么 $\frac{\Delta F}{\Delta S}$ 就表示了面元 ΔS 上的平均压强．我们把 ΔS 趋近于零时，这个平均压强的极限



图 1－7

值定义为 C 点的压强，即

$$p = \lim_{\Delta S \to O} \frac{\Delta F}{\Delta S} \tag{1-25}$$

由于 ΔS 是任意选取的，压强 p 的指向随面元的方位改变而改变，不是唯一确定的．然而可以证明，C 点的压强大小与所取的面元 ΔS 的方位无关，即液体内部同一点指向各个方向的压强大小均相同．为此，我们在 C 点附近隔离出一个无限小的三棱柱，其截面平行于 Oxy 坐标面，如图 1－8 所示．设 x 方向和 y 方向的边长分别为 Δx、Δy，斜边长为 ΔL，厚度为 d．用 ΔF_x、ΔF_y、ΔF_l 分别表示周围液体作用于该三棱柱三个侧面上的压力，用 p_x、p_y、p_l 表示各个侧面上压强的大小．三棱柱所受的重力为 $G = \frac{1}{2}(\Delta x \Delta y d)\rho g$．那么根据力的平衡条件，应有

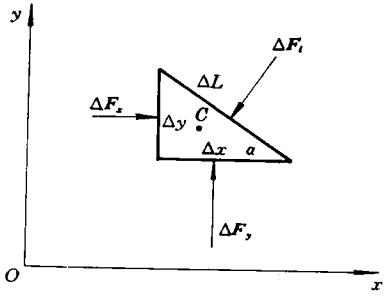


图 1－8

$$\Delta F_x - \Delta F_e \sin\alpha = 0$$

$$\Delta F_y - \Delta F_e \cos\alpha - \frac{1}{2}(\Delta x \Delta y d)\rho g = 0$$

式中 $\Delta F_x = p_x \Delta y d$、$\Delta F_y = p_y \Delta x d$、$\Delta F_l = p_l \Delta L d$，且 $\Delta x = \Delta L \cos\alpha$、$\Delta y = \Delta L \sin\alpha$，故有

$$p_x \Delta y d = p_l \Delta L d \sin\alpha = p_l \Delta y d$$

$$p_y \Delta x d = p_l \Delta L d \cos\alpha + \frac{1}{2}(\Delta x \Delta y d)\rho g = p_l \Delta x d + \frac{1}{2}(\Delta x \Delta y d)\rho g$$

即得　　$p_x = p_l$，$p_y = p_l + \frac{1}{2}\Delta y\rho g$

因 Δy 是无穷小量，$\frac{1}{2}\Delta y\rho g$ 与 p_l 相比可忽略不计，故得

$$p_x = p_y = p_l \tag{1-26}$$

由于棱柱体是无限小的，所以 p_x、p_y、p_l 都是 C 点处的压强大小．这就证明了：静止液体内任意一点 C 处对应于不同方向的压强大小均相等，亦即压强的大小与考察面元的方位无关．

以上论述也适用于气体，气体内部同样存在着由(1－25)式定义的压强，且任意一点处指向各个方向的压强大小都相同．

2．静止液体内部压强的分布

这个问题可分两步讨论：

(1)比较液体内同一水平面上任意两点 A 和 B 的压强：为此，在液体内部取一截面积为 $\Delta S(\Delta S \to 0)$的柱形液体，轴线呈水平方向，使左右两个端面积分别包含 A 点和 B 点，如图 1－9(a)所示．设 A、B 两点的压强为 p_A、p_B，则根据液柱的平衡条件，应有

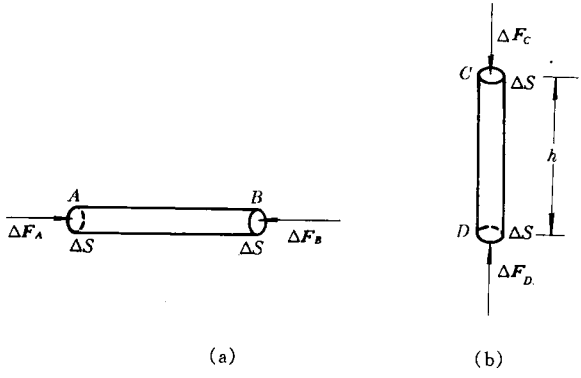


图 1－9

$$p_A\Delta S = p_B\Delta S$$

即　　$p_A = p_B$　　(1－27)

上式表明静止液体中同一水平面上各点的压强相等．

(2)比较液体内竖直高度差为 h 的任意两点的压强：为此，取一个以竖直线为几何轴、截面积为 $\Delta S(\Delta S \to 0)$ 的液柱，上下两个端面积分别包含 C 点和 D 点，如图 1－9(b)所示．则根据液柱的平衡条件，应有

$$p_D \Delta S = p_C \Delta S + \rho g h \Delta S$$

式中 $\rho g h \Delta S$ 是液柱重，故得

$$p_D - p_C = \rho g h \qquad (1-28)$$

(1－28)式表明，静止液体内部同一竖直线上，高度差为 h 的任意两点的压强差为 $\rho g h$．由于(1－27)式已表明了同一水平面上各点的压强相同，因而这个结论可以推广为：液体内部竖直高度差为 h 的任何两点的压强差都等于 $\rho g h$．

若液面上所受的外加压强为 p_0，那么由(1－28)式可知，离液面的深度为 h 的一点的压强为

$$p = p_0 + \rho g h \qquad (1-29)$$

该式具体反映了液体内部压强的分布规律．(1－28)式和(1－29)式表明，从宏观的角度看，液体内部各点的压强差是由液体自身所受的重力形成的，而某点的压强大小等于该点上方截面为单位面积、高为离液面深度的一段液柱所受重力的大小 $\rho g h$ 与外加压强 p_0 之和．

3．液体内部压强的微观本质

我们利用图 1－7 定义液体内一点 C 的压强时，认为包含 C 点的面元 ΔS 两侧的液体存在着相互作用的压力 ΔF，那么这种压力是怎样产生的呢？它的微观实质是什么？这个问题要从分子

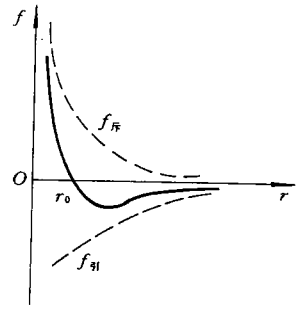


图 1－10

间的相互作用力的规律谈起．

分子运动论表明，一切宏观物体都是由大量分子(或原子)组成的；所有分子都在永远不停地作着无规则的运动；分子间存在着相互吸引和相互排斥的作用力．而分子间的斥力和引力都是随距离的减小而增大的，但是斥力随距离的变化要比引力快得多．图 1－10 的图线描述了分子间的作用力随距离变化的规律．图线表明：当两分子十分靠近时，斥力远大于引力，总的表现为斥力；随着距离的增大，斥力和引力同时减小，但斥力减小得较快，当达到某个距离 r_0 时，斥力和引力大小恰好相等，其合力为零(图中实线为合力曲线)，这个距离通常叫平衡距离，它的数量级为 10^{-10} 米；两分子间的距离再增大，使 $r > r_0$，则将变成引力大于斥力，总的表现为引力．若距离继续增大，直至超过 10^{-9} 米，这时引力和斥力都小得可以忽略不计了．

根据分子运动论的观点，不难说明物质以三种不同聚集态——固态、液态和气态存在的条件．由于物质的分子间都存在着相互作用力，于是有使分子聚集起来，形成某种有序的规则分布的趋向；同时由于物质分子具有永远不停地作无规则运动的特性，于是又产生了破坏分子的有序排列而向外扩散开来的趋向．正是由于分子热运动的这一对内在矛盾的存在，决定了物质形态变化的条件．当温度较低时，分子无规则运动的剧烈程度较低，于是由于分子间的相互作用力的存在，促使分子有序地排列起来的趋向占主导地位，所有分子将被束缚在各自的平衡位置附近作无规则的微小振动，从而呈现为固态；当温度逐渐升高，分子的无规则运动不断加剧，分子间的平均距离随之增大，达到某种程度时，分子间的作用力就不能再把分子束缚在固定的平衡位置附近作微小振动，于是分子就可以脱离开平衡位置在其他分子之间移动，但这时分子无规则运动的剧烈程度还没有大到足以完全克服分子力的作用，而彼此分散远离出去，因而表现为液态，即没有固定的形状，具有流动性，而仍保持一定的体积；当温度再升高，分子的无规则运

动再加剧，达到一定的程度时，分子力的作用已不足以再使分子之间维持一定的平均距离，于是各个分子将可以不断地分散远离，这时便呈现为气态，既没有一定的形状，也没有固定的体积．

根据上述液体分子热运动的特点，我们首先设想，一个温度较低的液态系统，处在既没有外加压强，也不受重力作用的环境中（如把装在真空容器中的液体，携到远离星球的无引力场的太空中），这时液体的所有分子必将聚集在一个大小一定的自由体积内（不计饱和汽压的作用），既不会自动膨胀，也不会自动收缩．此时在液体内任取一个面元 ΔS，则任何时刻，ΔS 两侧的分子层通过面元相互吸引的分子力的总和跟相互排斥的分子力的总和，必将大小相等，总的表现为既不相互推斥，也不相互拉引，从而使整个系统保持一定的自由体积不变；若给液态系统施加一个外压强，如图 1－11 所示那样，推动活塞 D，给密封在容器 A 中的液体施加一个压强，则液体被压缩，内部分子间的平均距离将有所减小．现在在液体内任取一面元 ΔS 进行考察，两侧的分子层通过 ΔS 相互作用的斥力和引力，都将比自由态时有所增大，而斥力比引力增大得更快，于是原先的平衡被打破，通过面元 ΔS 的所有分子斥力的总和将大于引力的总和，总的表现为一个相互推斥的力，这个推斥力宏观上就体现为图 1－7 中所示的压力 ΔF．而通过面元单位面积上的推斥力 $\frac{\Delta F}{\Delta S}$ 就表现为面元上一点的压强．这就是液体内部产生压强的微观本质．

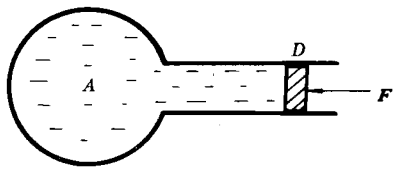


图 1－11

由于液体只能承受压缩体变，没有长变和切变，所以当密封在

容器中的液体，任何一部分接触面上受到外加压强时，必使整个液体均匀压缩，于是液体内各点的压强必然同时增大，这就是帕斯卡定律的微观本质，即加在密闭液体上的压强，能够大小不变地被液体向各个方向传递．

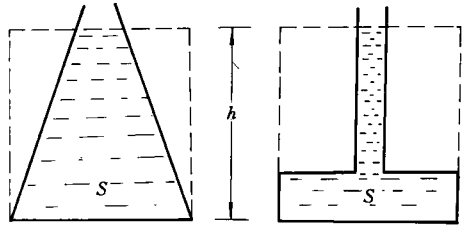
地面上敞开的容器中的液体，除了液面上受到大气压强 p_0 的作用外，还受重力的作用．从微观上说，所有液体分子由于受地球的吸引，都有向下密集的趋势，而分子间的作用力阻止着这种密集的趋势．正是由于受这一对内在矛盾的制约，液体分子既不能保持均匀分布，也不会无限止向下密集，而是按一定的规律形成上疏下密的分子分布状态，于是根据上述液体内部压强的微观本质可知，离液面较深的液体层，由于分子分布较密，分子间的平均相对距离较小，所以压强就较大，这就是液体内部的压强随深度 h 的增大而增大的道理．

这个问题也可以用宏观和微观相结合的方式讨论：从宏观上说，下层液体由于受到上层液重所造成的压力作用，因而被压缩；再从微观上说，由于下层液体被压缩，分子间的平均距离比起上层液体来有所缩小，于是压强有所增大，从而表现为液体内部离液面越深的地方压强越大．根据这个道理，也就不难理解液体中 h 深处一点的压强跟液面处的压强之差，等于该点上方截面为单位面积的一段液柱所受重力的大小 ρgh.

1.21 盛水容器底面所受的压力远大于容器中的水所受的重力，这有可能吗？

这个问题的答案是肯定的．譬如，图 1－12 所示的两个盛水容器的底面所受的压力就是如此．设两容器的底面为圆形，面积大小都是 S，水面离底面的竖直高度为 h，水的密度为 ρ. 那么两底面上水的压强都是 $p=\rho gh$，水对容器底面的压力都是 $F=pS=\rho ghS$. 这个压力的大小就等于底面积为 S、高为 h 的一个圆柱形水柱所受的重力大小．这个圆柱形水柱的体积就是图中用虚线

围成的柱形体积．显然，容器中实际所盛的水的体积远小于这个圆柱形水柱的体积．所以说，容器底面受到水的压力要比实际所盛的水所受的重力大得多．



(a)　　(b)

图 1－12

但是，这个结论并非所有学生都是容易接受的，往往有人认为这里有两点说不通：第一、若水对底面的压力大于它所受的重力，那么超过水重那部分压力是没有来源的，凭空产生的；第二、底面对水的支持力大小等于水对底面的压力大小，若它大于水所受的重力，那就违背了二力平衡的条件．其实这两点是很容易说通的，他们的差错就在于分析问题不全面，他们只考虑到水与底面之间的相互作用力和重力，而忽视了容器四周侧壁和上壁对水的作用力．如对图 1－12(a)所示的情况来说，水除了受重力和底面的支持力外，还受到四周侧壁的斜向压力的作用．设想在侧壁上对称地取两块等大的面元 ΔS 和 $\Delta S'$，如图 1－13 所示．这两块器壁面元分别给水施加了斜向压力 ΔF 和 $\Delta F'$．显然，这两个压力的水平分量 ΔF_1 和 $\Delta F_1'$，大小相等．方向相反，恰好相互平衡，而它们的竖直分量 ΔF_2 和 $\Delta F_2'$ 都是向下的．整个侧壁上所有面元对水的压力的竖直分量的总和，构成了侧壁对水的一个

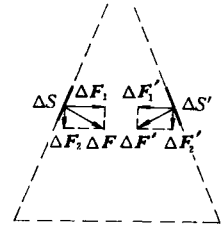


图 1－13

竖直向下的压力 F. 正是由于这个压力的作用传递到底面，使得底面所受的压力大于水重；同时，对水而言，它就是在这个竖直向下的压力和重力，跟竖直向上的底面的支持力共同作用下处于平衡的，所以底面对水的支持力大于水所受的重力 .

图 1－12(b)所示的情况跟图(a)的情况，原理是相同的，请读者自己分析 .

1.22 气体压强的微观机理和大气压的成因 大气层总质量的估算

气体和液体都是具有流动性的流体，它们内部压强的定义及其特点完全相同，同一点处向各个方向的压强大小都相等(证明见 1.20).

但是气体和液体的分子热运动状况不相同，因而形成压强的微观机理有所差别 . 如前所述，液体内的每个分子可以在其他分子间移动，而不能脱离开其他分子的作用而自由离散出去，因而在一定的环境下分子之间具有一定的平均距离 . 液体内部某点的压强大小主要决定于该点附近分子间的平均距离 . 当液体受外压强的作用而被压缩时，分子间的平均距离有所减小，以致内部任意取定的一个面元 ΔS，两侧的分子层通过 ΔS 相互作用的斥力将大于引力，总的表现为相互推斥，于是宏观上体现出压强 . 而气体分子间的距离较大，分子间的相互作用力已不足以使它们聚集起来维持一定的平均距离 . 如果不受容器的阻挡和外力场的作用，所有分子都可以无限止地离散出去 . 所以气体没有固定的体积，可以充满容积任意大小的容器，盛在容器中的气体，由于分子的热运动将永远不停地持续地碰撞器壁 . 当然，单个分子碰撞器壁的冲力是断续的不均匀的，然而大量作无规则运动的气体分子不断地对器壁进行碰撞的结果，就表现为给予器壁一个均匀的持续的平均冲力，犹如密集的雨点打到伞上时，使人感到雨伞受到一个均匀的持续的压力一样 . 所以说，所谓气体的压强，实际上就是作无

规则运动的大量气体分子持续碰撞器壁的结果，其大小就等于气体分子在单位时间内作用于单位面积器壁上的平均冲量．显然，这个“平均冲量”，即压强的大小决定于气体分子分布的数密度和平均动能．因为数密度越大，即单位体积内的分子数越多，那么单位时间内碰撞单位面积器壁的分子数就越多；平均动能越大，意味着分子运动的速度越大，那么分子每次碰撞器壁，给予器壁的冲量就越大，而且分子的速度大了，单位时间内碰撞单位面积器壁的分子数也就更多了．气体动理论通过严密的论证，证明了理想气体的压强跟分子数密度(n)和平均平动动能($\overline{\omega}$)之间的定量关系是

$$p=\frac{2}{3}n\overline{\omega} \tag{1-30}$$

上式称之为理想气体压强公式．这个公式定量地表达了理想气体的压强与分子热运动的微观量的统计平均值之间的关系，从而揭示了压强的微观本质．

从(1－30)式表示的压强公式出发，结合理想气体状态方程

$$pV=\upsilon RT \tag{1-31}$$

很容易证明分子平均平动动能的大小宏观上就体现为温度的高低．为此，消去(1－30)(1－31)二式中的压强 p，即得

$$\overline{\omega}=\frac{3}{2}\frac{\upsilon RT}{Vn} \tag{1-32}$$

上式中的 $Vn=N$ 就是被考察气体的总分子数．用摩尔数 υ 除以总分子数就是阿伏伽德罗常数 $N_A\left(=\frac{N}{\upsilon}=\frac{Vn}{\upsilon}\right)$，所以(1－32)式可表作．

$$\overline{\omega}=\frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T \tag{1-33}$$

因 R 和 N_A 都是常数，两者的比值仍是常数，我们把它表作 k，并称之为玻尔兹曼常数，则得

$$\overline{\omega}=\frac{3}{2}kT \tag{1-34}$$

上式表明气体分子的平均平动动能只与温度有关，并与绝对温度(T)成正比．这个结论揭示了温度的微观本质，一个系统温度的高低直接标志着内部分子热运动的剧烈程度，温度愈高，分子的平均平动动能愈大，表明分子的热运动愈强烈．

将(1－34)式代回(1－30)式，即得

$$p = nkT \tag{1-35}$$

可见，气体的压强直接决定于分子的数密度和以温度为标志的分子热运动的强度．

地球周围的大气层是一个自然存在的庞大的气态系统．它跟其它气体一样，必然也要对与其接触的物体的表面施加压强，这就是所谓大气压强．形成大气压强的微观机理跟其他气体的压强相同，也是决定于考察点附近空气分子的数密度和以温度为标志的分子热运动强度．然而大气层是一个只受重力作用，而不受容器限制的系统，所以大气压强的分布有其特定的规律．这种规律可以用两种不同的方法去讨论：

(1)空气分子由于自身的无规则运动，有逐渐脱离地球无限止地向太空扩散出去的趋向；可是另一方面地球吸引着空气分子，有把所有空气分子吸向地面的趋向，正是在这样一对内在矛盾的制约下，使得空气分子既不会脱离开地球飞向太空，也不会因地球的吸引而密集于地面，而是按一定的规律分布，形成一个上疏下密的厚厚的不均匀的大气层．越接近地面，空气分子的密度越大，压强也越大；离地面越远的高空，空气越稀薄，分子密度越小，压强也越小．根据统计物理学的推证，如果不计大气层上下温度的差别，那么大气压强随高度(z)的变化遵从下式表达的规律：

$$p = \frac{Nmg}{S} e^{-\mu gz/RT} = p_0 e^{-\mu gz/RT} \tag{1-36}$$

式中 p_0 表示地面上的大气压强，μ 是空气的平均摩尔质量，R 是气体普适常数．该式表明：在等温条件下，大气压强随高度的增大而按指数规律减小．上式还表明 $p_0 = \frac{Nmg}{S}$，其中 S 是被考察的

一个无限高空气柱的底面积，N 是该空气柱的总分子数，m 是空气分子的平均质量．这就是说，地面上的大气压强的大小，实际上就等于底面积为单位面积的一个无限高空气柱所受的重力大小．

(2)空气分子也受重力的作用，它们就是由于受地球吸引而聚集在地球周围形成一个大气层．所以从宏观上说，也可以认为大气压强是由于空气自身受到重力而形成的，厚厚的一个大气层压在地面上，使地球表面受到应有的压力，因而产生大气压强，犹如湖水压在湖底上，使湖底受到一定的压强一样．根据这种观点，越接近地面处大气压强越大；海拔越高的地方，压在上边的空气层厚度就越小，所以大气压强相应变小，而且大气层的疏密分布是不均匀的，越往上升，不仅上方空气层的厚度减小，而且密度也变小，因而大气压强减小得越快．这些推论都跟(1－36)式表达的统计物理学的结论相一致．所以说，这种观点无论在逻辑上和实践上都是成立的．

根据上述观点，由地面上的大气压强和地球的表面积大小，就可以近似地估算出大气层的总质量．已知地球的半径约为 6.37×10^6 米，若以标准大气压当作地球表面的平均大气压，即 $p_0=1.01\times10^5$ 帕斯卡，那么大气层对地球表面的总压力约为

$$F=p_0S=1.01\times10^5\times4\pi(6.37\times10^6)^2=5.15\times10^{19}(\text{牛顿})$$

这就相当于整个大气层空气受到的重力 G，因而大气层空气的总质量约为

$$m=\frac{G}{g}=\frac{5.15\times10^{19}\text{牛顿}}{9.8\text{ 米/秒}^2}=5.25\times10^{18}\text{千克}$$

1.23 阿基米德定律和浮沉条件

阿基米德定律的内容是：浸在液体里的物体受到一个向上的浮力，浮力的大小等于它排开的液体受到的重力．

教学中建立这条定律的基本方法就是实验，做好演示实验是使教学成功的关键．然而阿基米德定律也适用于气体的事实，在

中学教学中是无法用实验直接证明的．因此，为了使学生加深理解，还是有必要引导学生，根据重力场中的流体内部压强随深度变化的规律，阐明浸在流体中的物体要受到浮力作用的道理，并证明浮力的大小等于它排开的流体所受到的重力．

初中教材的推理方法分两步：第一步、设想在静止液体中隔离出一个立方体液柱作为考察对象．由于上表面处的压强小，下表面处的压强大，因而周围液体作用于该液柱下表面的向上压力 F_1，大于作用于上表面的向下压力 F_2（如图 1－14）两者之差就是这个立方形液柱所受的浮力，即 $F_{浮}=F_1-F_2$．而该液柱就是在这个浮力 $F_{浮}$ 和重力 $G_{液}$ 共同作用下处于平衡状态的，故有 $F_{浮}=G_{液}$；第二步、设想用任意材料构成的一个等大的立方体物体去取代被隔离的立方体液柱，那么由于周围液体作用于立方体表面的压力跟它本身是什么材料构成的并不相关，所以它所受的浮力 $F'_{浮}$ 与原先被隔离的立方体液柱所受的浮力 $F_{浮}$ 应该相等，故有 $F'_{浮}=F_{浮}=G_{液}$．

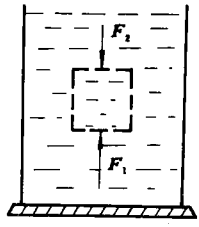


图 1－14

只要引导得法，这种“取代法”的推理过程，初中学生是可以接受的，也有利于逻辑思维的培养．

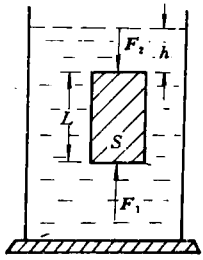


图 1－15

进一步讨论，还可以直接应用液体内部的压强公式 $p=\rho gh$，导出阿基米德定律的结论．如图 1－15 所示：若用细绳挂住一个密度大于液体的圆柱形物体，使其浸在液体中．设柱形横截面积为 S、高为 L，物体上表面离液面的距离为 h，液体的密度为 $\rho_{液}$．那么物体上下表面处的压强分别是 $p_{上}=\rho_{液}gh$、$p_{下}$

$= \rho_{液} g(h + L)$，而物体所受的浮力应等于上下表面所受的压力之差，即

$$\begin{aligned} F_{浮} &= F_1 - F_2 = p_{下} S - p_{上} S \\ &= \rho_{液} g(h + L)S - \rho_{液} ghS \\ &= \rho_{液} gLS \end{aligned}$$

上式表明物体受到的浮力 $F_{浮}$ 等于它所排开的液体所受的重力 $G_{液} = \rho_{液} SLg = \rho_{液} V_{排} g$，以上推论还表明了物体所受的浮力跟它所处位置的深度 h 无关．h 大了，上下表面处的压强都增大了，因而并不改变上下表面所受压力之差，亦即不改 变浮力的大小．

关于浮力的应用，关键是掌握物体浮沉的条件．总的说，凡是浸没在液体中的物体，如果受到的浮力大于它所受的重力，物体就上浮；如果浮力小于重力，物体就下沉；如果浮力等于重力，物体就可以悬浮在液体里任何深度的地方．根据这个道理，我们可以找出判别物体浮沉的具体条件．

假定把密度为 $\rho_{固}$、体积为 $V_{固}$ 的固体，浸没在密度为 $\rho_{液}$ 的液体中，那么根据阿基米德定律可知，固体所受的浮力为 $F_{浮} = \rho_{液} V_{固} g$，而该固体受到的重力是 $G = \rho_{固} V_{固} g$，两者之比为

$$\frac{F_{浮}}{G} = \frac{\rho_{液}}{\rho_{固}} \tag{1-37}$$

根据上式和上述物体浮沉条件，可得以下结论：

(1)当 $\rho_{固} < \rho_{液}$ 时，$\frac{F_{浮}}{G} > 1$，即 $F_{浮} > G$，则该固体上浮；

(2)当 $\rho_{固} > \rho_{液}$ 时，$\frac{F_{浮}}{G} < 1$，即 $F_{浮} < G$，则该固体下沉．

(3)当 $\rho_{固} = \rho_{液}$ 时，$\frac{F_{浮}}{G} = 1$ 即 $F_{浮} = G$，则该固体将悬浮在液体中．

由此可见，一种固体浸在某种液体中是沉还是浮，是由这种固体和液体的密度决定的．譬如，铁块在水中是下沉的，而在水银中是上浮的，原因就在于铁的密度比水的密度大，而比水银的密度

小;石蜡可以悬浮在浓度适当的酒精中,就是因为这种酒精的密度正好等于石蜡的密度.

但要注意,上述结论只是对均匀的实心固体而言的,如果用某种固体构成一个空心物体(如铁桶、轮船等),或由几种不同物质组成不均匀物体(如鸡蛋等),这样情况就不一样了.讨论这类问题,就要看空心物体在不漏入液体的条件下可能排开的液体受到的重力,能否超过它自身所受的重力;或者用物体的平均密度去和液体的密度相比较,看孰大孰小.

生活和生产实践中对浮力的应用,都可以归结为改变物体的排水条件和平均密度的大小,借以调节物体所受的重力和浮力的关系,按需要控制它保持漂浮、下沉或悬浮的状态.

1.24 只有弹簧秤、烧杯和水,能测定固体和液体的密度吗?

根据密度的定义式 $\rho=\frac{m}{V}$,要测定某种物质的密度就需要测量由这种物质构成的一个物体的质量和体积,通常用天平测质量、用量筒测体积较为方便.现在只有弹簧秤和烧杯,怎样测定一种固体或一种液体的密度呢?对此,只要能灵活应用阿基米德定律,问题是可以解决的.

(1)测定固体的密度:把被测固体挂在弹簧秤下,测出它所受的重力 G,再把固体浸入盛在烧杯里的水中,读出此时弹簧秤的示数 G',那么固体所受的浮力是 $F_{浮}=G-G'$.然而根据阿基米德定律 $F_{浮}=\rho_{水}V_{固}g$,即得

$$V_{固}=\frac{F_{浮}}{\rho_{水}g}=\frac{G-G'}{\rho_{水}g}$$

而固体的质量是 $m=\frac{G}{g}$,所以固体的密度为

$$\rho_{固}=\frac{m}{V_{固}}=\frac{G/g}{\frac{G-G'}{\rho_{水}g}}=\frac{G}{G-G'}\rho_{水}$$

水的密度 $\rho_{水}$ 为已知，G 和 G' 是直接测定量，按上式就可以计算出被测固体的密度．

(2)测液体的密度：先按上法测出一个任意固体的体积 $V_{固}=\frac{G-G'}{\rho_{水}g}$，再把这个固体挂在弹簧秤下浸入被测液体中，读出此时弹簧秤的示数 G''，那么该固体在被测液体中所受的浮力为 $F'_{浮}=G-G''$．再根据阿基米德定律，有

$$F'_{浮}=\rho_{液}V_{固}g$$

所以被测液体的密度为

$$\rho_{液}=\frac{F'_{浮}}{V_{固}g}=\frac{G-G''}{\frac{G-G'}{\rho_{水}g}\cdot g}=\frac{G-G''}{G-G'}\rho_{水}$$

[思考题]

(1)物理学中引入“压强”的意义何在？它是一个什么性质的量？(矢量或标量、强度量或广延量、状态量或过程量)

(2)气体和液体相比，内部压强的宏观特征和微观机理有何共同点和差别？为什么湖水里的压强随深度的变化显著，而温度的影响可不计，然而钢瓶中气体的压强随温度的变化显著，而与考察点位置无关？

(3)相对于地面以很大速度运动着的一瓶氧气，突然停住时，则氧气的压强将有所增大，这是为什么？

(4)两瓶不同种类的气体，它们的温度、压强和体积都相同．问：①单位体积中分子数是否相同？②气体分子的总平动动能是否相同？(**提示**：根据 $p=nkT$、$\overline{\omega}=\frac{3}{2}kT$ 讨论)

(5)“桌上放一盛水容器，桌面对容器的支持力大小，必等于水对容器底面的压力与容器所受重力之和”，这话正确吗？

(6)帕斯卡定律表明：加在密闭液体上的压强，能够大小不变地被液体向各个方向传递．因此有人认为：“密闭液体内部的压强处处相等”，这话对吗？

(7)漂浮在水槽中的一个塑料盒，内装木块、冰块和铁块各一个，若分别把其中一个拿出盒外，放入水中，那么这三种情况下，水槽中的液面高低会发

生变化吗?

(8)水银槽中漂浮着一个体积为 V_0 的铁球,若再向槽内注入水,浸没整个铁球．问:注入水时铁球的位置是升高还是降低?在水和水银分界面以下部分的球体积是多少?(需用的密度值,查密度表)

六、功　机械能

1.25　怎样正确理解功的定义?

各种力学教材中功的定义式是一致的,即

$$W = FS\cos\alpha \tag{1-38}$$

或表作

$$W = \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{S} \tag{1-39}$$

但不同的教材对功的物理表述不一样,大体上可分两种:

第一种,把式中的"S"表述为"力的作用点的位移大小". 如程守洙等主编的《普通物理学》,功的定义是:"力对物体所作的功等于力在作用点位移方向的分量和作用点位移大小的乘积".

第二种,把表式中的"S"表述为被力 F 所作用的"物体的位移大小". 如顾建中编的《力学教程》,功的定义是:"物体(质点)所受的力在物体位移方向上的射影与该位移大小的乘积,称为该力在该位移过程中对运动物体所做的功". 也有人把 S 表述为"物体沿力方向移动的距离";[①] 或把 S 表述为"物体在力方向上移动的路程".[②]

这两种表述实际上是一致的,问题在于弄清(1-38)式所定义的功的实质涵义. 为此,应明确以下两点:

(1)由(1-38)式所表达的功的定义是一个质点力学的课题,它的考察对象是一个已经被抽象为质点的物体. 同时力的作用点必须是也只能是被作用物体身上的一个宏观物质点,决不能脱离开被作用物体本身而抽象地凭空命定一个力的作用点. 因此,功的定义式中的力 $\boldsymbol{F}$ 的作用点必须是它所作用的物体身上的一个物质点. 而这个物体已被抽象为"质点",显然,这个"被力 $\boldsymbol{F}$ 作用

---

① 复旦大学、上海师大编,《物理学》,上海科技出版社,1978 年版,162 页.

② 南京工学院等七院校编,《物理学》,人民教育出版社,1977 年版,54 页.

的质点"和"力 $\boldsymbol{F}$ 的作用点"必然是重合的．所以公式中的 S 既可以看作是被 $\boldsymbol{F}$ 作用的质点(代表被作用的物体)的位移大小，也可以看作是 $\boldsymbol{F}$ 的作用点的位移大小，两者是一致的．

(2)由(1－38)式所定义的功，是指恒力对作直线运动的一个质点作的功．[①] 式中的 S 表示作直线运动的质点的位移(或说"移动的距离"、"移动的路程")；式中 F 是指物体在发生这段位移过程中所受的恒力．只有满足这种条件的作功过程才能直接用(1－38)式进行计算．而作直线运动的质点(或说作直线平动的物体)的位移大小也就等于移动的距离或路程．所以，以上各种表述实质上都是一致的．

然而，平时实际遇到的往往是物体在变力作用下做曲线运动的情况，这种变力作的功就不能直接用(1－38)式进行计算，而需要用积分的方法去计算．具体地说，就是要把物体所经历的路径分割成无数多段足够小的位移 Δs_i，使得在每小段位移中物体所受的作用力 F_i 的大小和方向，都可以看作是不变的，于是力 F_i 在这段位移 ΔS_i 上所作的元功 ΔW_i 就可以用(1－38)式来表出，即

$$\Delta W_i = F_i \Delta S_i \cos\alpha_i \qquad (1-40)$$

功是标量，得出了力在每小段位移上的元功，那么该变力在全过程中所作的总功就等于所有各小段位移上的元功的代数和，即

$$W = \Sigma \Delta W_i = \Sigma F_i \Delta S_i \cos\alpha_i \qquad (1-41)$$

当 $\Delta S_i \to 0$ 时，以上两式就成为功的微分形式和积分形式：

$$\mathrm{d}W = F\cos\alpha \,\mathrm{d}S \qquad (1-42)$$

$$W = \int \mathrm{d}W = \int_a^b F\cos\alpha \,\mathrm{d}S \qquad (1-43)$$

这就是变力作功的计量公式，它是从恒力对作直线运动的质点所作之功的定义式(1－38)出发推导来的．

---

① 有些力学教材定义功时，直接指出是"恒力对质点直线运动作的功"，如：梁绍荣等主编．《物理学》(力学)，北师大出版社，1985 年第 1 版，109 页；

蔡伯濂编著，《力学》，湖南教育出版社，1985 年第 1 版，151 页．

举例说，一个质量为 m 的人造地球卫星沿椭圆轨道运行时，所受地球的引力大小和方向都是变化着的，卫星从轨道上的一点 a 运行到另一点 b 的过程中，地球引力所作的功就必须根据(1－43)式去计算．如图 1－16 所示：在轨道上任一点 C 附近取卫星的元位移 dS．地球 M 对卫星的引力大小为 $f_{引} = G\dfrac{Mm}{r^2}$；引力 $f_{引}$ 与元位移 dS 的夹角为 α．根据(1－43)式，即得引力在该位移元上的元功为

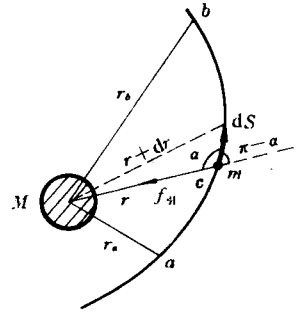


图 1－16

$$\begin{aligned} dW &= f_{引}\cos\alpha dS \\ &= G\frac{Mm}{r^2}[-\cos(\pi-\alpha)dS] \\ &= -G\frac{Mm}{r^2}dr \end{aligned}$$

卫星由 a 点运行到 b 点的过程中，它与地心的距离由 r_a 变到 r_b，故引力作的功为

$$W = \int_{r_a}^{r_b}(-G\frac{Mm}{r^2})dr = -GMm(\frac{1}{r_a}-\frac{1}{r_b}) \quad (1-44)$$

上式表明，当 $r_b > r_a$ 时，引力作负功；当 $r_b < r_a$ 时，引力作正功．

中学物理教学中不能用积分法去计算，所以不讨论一般变力作功的问题．但常常遇到这样一种特殊变力作功的问题：力的大小恒定不变，而方向始终沿着运动物体径迹曲线的切线方向．譬如，汽车在大小不变的牵引力作用下沿环城公路运行，起重螺旋或辘轳的摇把在一个大小恒定、方向始终沿圆周切线方向的力作用下转动，等等．关于这类变力作的功，当然不能用力和位移大小的乘积去计算，因为汽车或摇把运转一周时的总位移等于零，而牵引

力或推力作的功决不等于零．这种变力作的功原则上仍应根据(1－43)式去计算．现以手推螺旋起重器的手柄运转一周的过程为例来讨论：设推力 F 大小不变，方向总是沿手柄上着力点转动的圆周切线方向，着力点离转轴的距离为 L，那么推力 F 作的功为

$$W=\int_0^{2\pi L} F\cos\alpha\,\mathrm{d}S=F\int_0^{2\pi L}\mathrm{d}S=2\pi LF$$

可见这个推力作的功就等于力的大小和手柄移动的路程的乘积．这个结论对所有这类变力——大小恒定、方向始终沿径迹曲线切线方向的力所作之功，都是适用的．通常我们就直接利用这个结论去计算这类变力所作的功．

上述变力作功的事实，还反映了功的一个基本特性，即从变力作功的全过程而言，功的量值大小决定于力在运动轨迹切线方向上的分量和物体通过的路程大小，从这个意义上说，定义力对运动物体所作的功时，不用“位移”，而用“移动的距离”或“路程”，更能反映功的本性．

然而，目前多数力学教材在定义恒力的功时，把表达式中的“S”表述为“位移的大小”．但这并不意味着把“S”表述为“位移的大小”比表述为“移动的距离”或“路程”更确切些．其实这多半是出于数学描述上的方便．因为用“位移”来表达，从数学上说就可以把(1－38)式表作力 $\boldsymbol{F}$ 和位移矢量 $\boldsymbol{S}$ 的标积，即(1－39)式

$$W=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{S}$$

对于(1－42)式表示的微小过程的元功，也可表作

$$\mathrm{d}W=\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

显然，这在数学形式上既简便又明了．然而这并不改变问题的实质，因为实际问题中仍然要用(1－43)式去计算变力的功，亦即任何一个有限过程的功仍然是力对物体移动的路径的线积分．所以，从实质上说功反映了力对空间路径的累积效应．

归结以上讨论，中学物理教学中应明确以下两点：

第一、(1－38)式是直线运动中恒力的功的定义式，式中的

“S”既可以表述为“位移的大小”，也可以表述为物体“移动的距离”或“路程”，两者是一致的．现行初中物理课本表述为“在力的方向上通过的距离”；高中课本(必修)表述为“在力的方向上发生的位移”，实质意义是相同的，不必强调两者的差别．重要的是应当明确(1－38)式只适用于直线运动中恒力作功的情况．

第二、构成作功的过程必须具备两个因素：其一是有力的作用；其二是受力物体在力的方向上发生于位移，或说移动了一段距离．而这两个因素是否具备，又可以根据定义式 $W = FS\cos\alpha$，归结为三个条件：①$F \neq 0$，即必须有力的作用；②$S \neq 0$，即物体在力作用下发生了移动；③$\cos\alpha \neq 0$ 或 $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$，即力和物体移动的方向不成90°的角．以上三点，缺一就不能构成作功的过程．初中物理教学中只讨论力的方向和物体移动方向一致的情况，所以只需强调出构成作功过程的两个因素就行了．

1.26 正功和负功的物理实质是什么？

由功的表达式 $W = FS\cos\alpha$ 可知：

①当 $0° \leqslant \alpha < 90°$ 时，$FS \geqslant W > 0$，力对运动物体作正功；

②当 $\alpha = 90°$ 时，$W = 0$，即当力和物体位移的方向垂直时，不作功；

③当 $90° < \alpha \leqslant 180°$ 时，$0 > W \geqslant -FS$，力对运动物体作负功．

于是自然地引入了正功和负功的概念．那么如何理解正功和负功的物理意义呢？对此可从以下几方面说明：

[Ⅰ]从动力学的效果看问题，凡是对物体作正功的力总是起着动力的作用，凡是对物体作负功的力总是起着阻力的作用．因为通常都是以地面为参考系考察物体的运动的，一个力对物体作正功，意味着力(或力的一个分量)与物体相对于地面的移动方向一致，必将推动物体运动；反之，一个力对物体作负功，意味着力与物体移动的方向相反，必将阻止物体的运动．

[Ⅱ]从能量的角度看问题，正功和负功标志着能量转移的特征．动能定理表明，外力对物体作正功，物体的动能就增大，外力对物体作负功，物体的动能将减小．所以任何作功过程都是能量的传递和转化的过程．正功和负功标志着被作功物体能量的输入或输出．

[Ⅲ]从物理学的方法看问题，正功和负功是从两个不同的侧面对物理过程的描述．因为力总是成对发生的，当物体 A 以一个力作用于物体 B 时，物体 B 必然同时给予 A 一个反作用力，两者大小相等、方向相反．因此，两个物体之间的接触力形成作功过程时，往往同时发生正功和负功，对这种作功过程的描述，既可以说是甲对乙作了多少正功，也可以说是乙对甲作了多少负功，反映的事实相同．正功和负功往往是从不同角度对同一物理过程的描述．通常对一个具体作功过程，既可以从作正功一方来表述，也可以从作负功一方来表述．譬如，关于汽车滑行的过程，既可以说“摩擦阻力对汽车作了多少负功”，也可以说“汽车克服摩擦阻力作了多少(正)功”，两种说法，一个意思，反映的是同一回事．而人们习惯上往往只从作正功一方来表述，并在习惯用语中常常省略了这个“正”字，说“谁做了功”，指的就是“谁做了正功”．例如，描述马拉车行进的过程，总是说“马在对车作(正)功”，而不说“车在对马作负功”．

然而引用“负功”的概念并非是多余的，事实上它不仅为讨论多个力对同一物体作功的问题提供了表述和运算的方便，而且是表达动能定理、功能原理等规律时不可缺少的概念．如果离开负功的概念，那么动能定理、功能原理以及热学中的热力学第一定律等等，就难以用数学公式来表达．

还有两点值得读者特别注意：

第一、表述作功过程时必须指明是“谁对谁作功”，是什么力对什么物体作功．每个力所作的功必在被作功的物体身上产生其效果，被作正功的物体能量必增大，被作负功的物体能量必减

小.

第二、功是标量,没有方向．功的“正”、“负”并非表示功的方向．而且功的“正”、“负”也不是表示数量上的正与负．我们既不能说“正功与负功方向相反”,也不能说“正功大于负功”．如前所述,正功和负功是从两个不同的侧面对作功过程的描述,同时反映了两种相反的作功效果——推动了还是阻碍了物体的运动;使被作功的物体的能量增大还是减小．

1.27 平均功率、瞬时功率、额定功率和实际功率

功率是用来描述物体作功快慢程度的物理量．它的定义式是

$$P=\frac{W}{t} \tag{1-45}$$

即功率等于物体所作的功跟完成这些功所用的时间之比．量值上等于单位时间里完成的功．把 $W=FS$ 代入(1－45)式,可得

$$P=\frac{FS}{t}=Fv \tag{1-46}$$

上式表明,功率等于力和物体运动速度的乘积．(1－46)式是由(1－45)式出发导出的,这本身就反映了两者的本质联系．但(1－46)式在实用上有不同于(1－45)式的重要意义,具体反映在对平均功率和瞬时功率、额定功率和实际功率的讨论和计算上．分述如下:

1．平均功率和瞬时功率

一台机器作功快慢往往是不均匀的,有时快而有时慢,平均功率是用来描述机器在某段时间内,平均地说作功快慢的情况,所以称之为某段时间内的平均功率．而瞬时功率是反映每个时刻机器作功的真实快慢程度的．

平均功率的计算可以用(1－45)式,也可以用(1－46)式．若已知某段时间 Δt 内,机器所作的功为 ΔW,那么这段时间内的平均功率就是

$$\overline{P}=\frac{\Delta W}{\Delta t} \tag{1-47}$$

如果发动机发出的动力或牵引力 F 是恒力(或可以用 F 表示平均牵引力),且已知机器运行的平均速率 $\overline{v}$,则机器的平均功率为

$$\overline{P}=F\overline{v} \tag{1-48}$$

所以说,计算平均功率时,可以根据命题给定的条件任意选择(1-45)式和(1-46)式,并表作(1-47)式和(1-48)式.

计算瞬时功率,从原则上说也可以从(1-45)式出发,经过平均功率的表式过渡到瞬时功率.某一时刻 t 的瞬时功率,就是当 $\Delta t\to 0$ 时,由时刻 t 到 $t+\Delta t$ 这段时间内的平均功率的极限值,即

$$P=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta W}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \tag{1-49}$$

但是实用上这是不方便的.因为功是过程量,不是态函数.很难把某个具体过程中的功表成一个确定的"功函数 $W(t)$".譬如,要想把火车从北京开到上海的这段时间内,机车所作的功是如何随时间的改变而改变的,表成一个确定的"功函数",这是根本办不到的,也是无意义的.实际上(1-49)式只不过是用两个微变量——无限小过程中的元功 $\mathrm{d}W$ 和完成这个元功的一段无限小时间 $\mathrm{d}t$ 的商,借以表达出瞬时功率的概念,而并非是什么"功函数 $W(t)$"的导数.所以实用上是无法直接用(1-49)式计算瞬时功率的.然而从(1-49)式出发推论,可得

$$P=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta W}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{F\Delta S}{\Delta t}=F\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta S}{\Delta t}=Fv \tag{1-50}$$

式中 $v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 就是瞬时速率.可见瞬时功率就是机器运行过程中,任一时刻发出的动力或牵引力 F 跟该时刻的瞬时速率的乘积.根据这个结论可以很方便地确定机器运行过程中每时每刻的瞬时功率.所以说,(1-46)式和(1-50)式虽然是根据(1-45)式或(1-49)式导出的,但是前者具有后者不可替代的重要意义.

2. 额定功率和实际功率

我们说某台机器的功率，通常是指它的额定功率．额定功率就是机器正常工作时能够并且允许输出的最大功率．但是，机器工作时，发动机所发出的实际功率不一定达到额定功率，而是在等于或小于额定功率的范围内变化着的．由公式 $P = Fv$ 可知，当车辆牵引力一定时，发动机输出的实际功率随速率的增大而增大；当速率一定时，发动机的实际功率随牵引力的增大而增大．但是最大都不允许超过发动机的额定功率．例如：一辆汽车，在平坦的马路上以较小的牵引力和一定的速率行驶时，发动机输出的实际功率就较小(用较小的油门供油)；当它驶入粗糙不平的路面时，为了克服路面较大的摩擦力，必须增大牵引力，如果汽车保持原来的速率不变，则发动机的输出功率必须相应增大(即增大油门)；当汽车遇到上坡路时，就需要更大的牵引力，如果 汽车原来输出的实际功率已接近额定功率，不能再靠增大输出功率来提高牵引力，则汽车的速率必须减小，使实际输出功率不致于因牵引力的增大而超过额定功率．所以一般说来，汽车上坡时必须换档减速，而在平直公路上可以快档行驶．

那么根据 $P = Fv$，对有确定的额定功率的机器来说，当外界阻力很小时，则运行的速率是否可以无限增大呢？反之，当机器以很小的速率运行时，是否就能发出无限大的牵引力呢？实际上这是不可能的．因为任何机器都要受到运转机构的构造材料的性能以及其他方面条件的限制，并且不可避免地要受到内部摩擦阻力的作用．因此，它可能达到的运行速度和最大牵引力都是有限度的．

1.28 怎样定义动能？如何理解“动能是物体运动状态的单值函数”？

初中物理教材没有给出动能的定义式，只是分三步定性地阐述了动能的初步概念：第一步，先给出能的初步概念，指出“一个物

体能够做功，就说它具有能”；第二步，通过大量实例，说明运动着的物体都具有作功的本领，亦即都具有能，于是指出“物体由于运动而具有的能叫做动能”；第三步，讨论物体的动能大小与哪些因素有关．对此，同样是通过实例分析，得出定性的结论：“运动物体的速度越大，质量越大，动能就越大”．

物理学的进一步研究表明：动能是物体运动状态的单值函数．它的定义式是

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1-51)$$

那么怎样正确理解“动能是物体运动状态的单值函数”呢？这个问题的实际涵义就是“为什么物体动能的定义式是 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$，而不能取其它形式？”只要回答了这个问题，也就说明了动能是物体运动状态的单值函数．因为宏观物体的质量 m 是恒定不变的，因而该定义式本身就表明了，每对应于物体速度为 v 的一个运动状态，就有一个（也只有一个）唯一确定的动能值，所以说动能是物体的以速率 v 为参量的运动状态的单值函数．

那么如何证明动能的量值就是（也只能是）“$\frac{1}{2}mv^2$”呢？让我们通过以下实例来分析：质量为 m 的汽车，以速率 v_1 在平直公路上行驶．关闭油门后，汽车滑行距离 S，速度减为 v_2．那么在此过程中汽车克服摩擦阻力所作的功，跟它的运动状态的变化存在怎样的关系呢？对此，可推证如下：

因汽车作减速运动，设它加速度的绝对值为 a，则

$$v_2^2 - v_1^2 = -2aS, \text{即 } a = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2S}$$

再根据牛顿第二定律和功的定义式，汽车克服摩擦阻力所作的功为

$$W = FS = maS = m\left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2S}\right)S$$

即 $$W=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_2^2 \qquad (1-52)$$

上式表明,汽车作功的过程是与一个以速率 v 为参量的运动状态函数——$\frac{1}{2}mv^2$ 的变化直接相关的,汽车对外界作了多少功,这个状态函数的量值就相应地减小多少.

汽车是任意选定的一个物体,所以(1-52)式适用于任何其它物体的作功过程.若使质量为 m,速度为 $v_1=v$ 的物体对外作功,直至它完全丧失作功的能力——速度变到 $v_2=0$ 为止,那么由(1-52)式可知,这个物体能够作的功就是

$$W=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_2^2=\frac{1}{2}mv^2 \qquad (1-53)$$

于是我们就合乎逻辑地得出了求证的结论:一个质量为 m 的物体由于运动而具有的作功本领,即动能的大小为 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$. 显然这个结论是客观存在的反映,不是人为规定的,我们不能用任何其它形式的"运动状态函数"(譬如$\frac{1}{2}mv$ 或 mv^3 等)来代替这个动能的量值.所以动能是由(1-51)式所表示的物体运动状态的单值函数,它标志着一个物体由于运动而具有的作功本领的大小.

1.29 功和能的内在联系和本质区别是什么?

汽车克服摩擦阻力作功的过程,实际上就是摩擦阻力对汽车作负功的过程.如果从摩擦阻力作负功的角度讨论问题,无非是使1.28中(1-52)式给出的结果变个符号而已.即根据 $W_{阻}=f_{阻}S\cos\alpha$,而 $\alpha=\pi$,$\cos\alpha=-1$,摩擦阻力的大小 $f_{阻}=ma$,a 是加速度的**绝对值**,即 $a=\frac{v_1^2-v_2^2}{2S}$,故有

$$W_{阻}=-f_{阻}S=-m(\frac{v_1^2-v_2^2}{2S})S=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2 \qquad (1-54)$$

式中 $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$ 是动能的增量．所以说摩擦阻力对汽车所作的功等于汽车动能的增量．因 $v_2 < v_1$，这个增量具有负值（$\Delta E_k < 0$），表明摩擦阻力对汽车作负功，汽车的动能减小了．

如果外加动力对物体作正功，那么同样可以根据牛顿第二定律和功的定义式进行推论．注意到动力的方向与位移方向相同，加速度具有正值，即 $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2S}$，故有

$$W_{动} = F_{动} S = maS = m\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2S}\right)S = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{1-55}$$

得到的结论，同样是动力所作的正功等于物体动能的增量．若动力是变力，结果也相同，只不过要用积分的方法去计算变力的功，即

$$W_{动} = \int_s F_{动} \cos\alpha \, dS$$

式中 $F_{动}\cos\alpha$ 就是动力的切向分量 F_t，按牛顿第二定律应有 $F_t = ma_t = m\frac{dv}{dt}$，所以 $F_{动}\cos\alpha dS = m\frac{dv}{dt}dS = mvdv$，故有

$$W_{动} = \int_s F_{动}\cos\alpha dS = \int_{v_1}^{v_2} mvdv = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{1-56}$$

以上推论表明，无论外力对物体作正功还是作负功，外力的功都等于物体动能的增量．实际过程中，往往是既有作正功的外力，也有作负功的外力，如车辆正常运行时，牵引力对车辆作正功，摩擦阻力对车辆作负功．这种情况下，合外力的功就等于各个分力所作之功的代数和．于是可以归结为一个结论：一切外力对物体所作的总功，等于物体动能的增量，即

$$W = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{1-57}$$

这个结论就叫做动能定理，它揭示了功和能的内在的本质联系．

通过动能定理可以使我们进一步认识到功的物理实质．物体动能的变化是通过作功的过程来实现的，功是使物体能量发生变化的原因或手段．而且动能定理定量地表明了“功”和“能量变化”的必然关系．合外力对物体作多少正功，物体的动能就增大多少，合外力作多少负功，动能就减小多少．所以功的大小直接标志着物体能量改变的多少．同时，作功过程中物体动能的变化总是跟其它形式的能量的转化相联系的．譬如，电动机带动机械作功时，使电能转化为机械的动能；机械克服摩擦阻力而作功，又使机械的动能转化为热能，如此等等．所以说，动能定理从本质上揭示了功的物理意义：功是能量转化的量度．

这里特别要注意“转化”两个字，应当强调指出，功是过程量，功只能用来量度物体受外力的作用且发生了位移的物理过程中，物体的能量改变了多少（或说有多少动能与其它形式的能量相转化），而不能用来量度物体在一定的状态下具有多少能量．

1.30 怎样定义势能？势能区别于其它能量的主要特征是什么？

正确建立势能的概念，必须先明确保守力作功的特点．

在1.25中，我们已经计算出质量为 m 的物体，在地球引力场中由 a 点运行到 b 点的过程中，引力对物体所作的功由(1－44)式所确定，即

$$W_{引} = -GMm\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right)$$

上式表明，引力作的功只决定于运动物体始末两态所处的位置，而与中间经历的具体路径无关．物理学中把具有这样一种作功特点的力称之为保守力．很容易证明，重力、弹簧的弹力等都是保守力．物体在重力场中由离地面 h_a 高处移到 h_b 高处的过程中，重力作的功为

$$W_{重} = mgh_a - mgh_b \qquad (1-58)$$

弹簧的伸长量由 x_a 变到 x_b 的过程中，弹力作的功为

$$W_{弹}=\frac{1}{2}kx_a^2-\frac{1}{2}kx_b^2 \tag{1-59}$$

以上两式表明重力或弹力作的功，都只是决定于物体的始态和末态，而与其他条件无关，所以都是保守力．

由于功是能量转化的量度，则根据上述保守力作功的特点可以肯定，物体在保守力场中由一点 a 移到另一点 b 时，必有某种能量发生了变化，而且这种能量的改变量只决定于物体移动的始点和终点的位置，而与移动的具体路径无关．物理学中把这种决定于相互作用着的物体之间(或物体内部各部分之间)的相对位置配置状态的能量，叫做势能．这就是势能的一般定义．若保守力是重力、弹力或引力，则相关的势能分别叫做重力势能、弹性势能或引力势能．

势能的改变总是与保守力作的功严格相联系的．以重力系统为例来分析：如果规定物体在地面上的重力势能为零，那么外力将质量为 m 的物体匀速地从地面举高到 h 高处，则外力克服重力作的功为 $W_{外}=mgh$，这表明物体的重力势能由零开始增大了 mgh．可见质量为 m 的物体处于离地面竖直高度为 h 处的重力势能为

$$E_p=mgh \tag{1-60}$$

这就是重力势能的表达式．用同样的方法推理，如果规定弹簧处在自由长度时的势能为零，那么当它的伸长量为 x 时的弹性势能为

$$E_p=\frac{1}{2}kx^2 \tag{1-61}$$

用(1-58)式和(1-60)式同时去考察一个物体由低处 a 点移到高处 b 点的过程，则可以肯定重力对物体作了负功，而物体的势能增大了，且有

$$\left.\begin{aligned}W_{重}&=mgh_a-mgh_b<0\\ \Delta E_p&=mgh_b-mgh_a>0\end{aligned}\right\}W_{重}=-\Delta E_p$$

反之，若物体由高处 b 点移到低处 a 点，则有

$$\left.\begin{aligned} W'_{重} &= mgh_b - mgh_a > 0 \\ \Delta E'_p &= mgh_a - mgh_b < 0 \end{aligned}\right\} W'_{重} = -\Delta E'_p$$

可见，重力作的功恒等于重力势能增量的负值．

用同样方法讨论弹性势能、引力势能的变化过程，都可以得出相同的结论．总的可以概括为一条：一个系统的保守内力所作的功恒等于相关势能的增量的负值，即

$$W_{保} = -(E_{p2} - E_{p1}) \tag{1-62}$$

这是势能区别于其它形式的能量的一个最基本的特征．

对势能的全面理解，还应搞清下述两个问题：

(1)势能的归属问题：势能总是属于具有保守内力的力学系统所有的，而不是属于某个单一物体的．例如，重力势能是属于重物和地球所组成的重力系统所有的，并非属于重物单方面所有的．事实上，一个物体在重力场中某个位置时之所以具有势能，亦即具有作功的本领，就是因为它与地球之间存在着相互吸引力．如果地球不吸引物体，显然该物体就丧失了“作功的本领”，于是也就不存在势能了．所以说，重力势能是属于物体和地球这个重力系统所有的．通常人们直接用“物体的势能”这句话来代替“物体和地球组成的重力系统的势能”，完全是出于叙述的方便和习惯，读者必须明确这一点．

正因为如此，凡是用到重力势能讨论问题时，不管指明不指明，事实上已经把地球包括在考察系统之内了，重力已成为这个系统的保守内力，而不再是外力了．

(2)势能的相对性：前面已阐明，保守内力所作的功恒等于相关势能的增量的负值，即 $W_{保} = -(E_{p2} - E_{p1})$．而保守力的功又仅仅决定于系统始末两状态，与过程的具体路径无关，亦即系统由状态Ⅰ变到状态Ⅱ，保守力作的功 $W_{保}$ 是唯一确定的，因而两态之间的势能差 $(E_{p2} - E_{p1})$ 也是唯一确定的．可见系统两态的势能差具有绝对的意义．然而系统处于状态Ⅰ或状态Ⅱ时的势能值

究竟是多少，却要取决于零势能状态的选择，而不是唯一确定的．只有事先规定某一状态的势能为零，所考察的其它各个状态才有确定的势能值，即某个状态的势能等于系统由该状态变到零势能状态的过程中保守力所作的功．譬如，我们说质量为 m 的物体距地面高度为 h 时具有的重力势能 $E_p = mgh$，乃是以规定物体在地面上时的势能等于零为前提的．实际上这个高度“h”并没有绝对的意义，它只是相对于零势能位置的高度差而言的．

1.31 机械能转化和守恒定律

动能和势能统称为机械能．显然，保守力作功的过程必将引起机械能的转化．例如，物体从空中落下时，重力对物体作正功，使物体势能减小而动能增大；物体上抛时，重力作负功，势能增大而动能减小．实验证明：一个物体系，如果只有重力、弹力等保守内力作功，而没有外力和非保守内力作功，那么物体系的动能和势能可以相互转化，但机械能的总和保持不变．这个结论叫做机械能转化和守恒定律．

通过动能定理 $W = E_{k2} - E_{k1}$ 和势能特征公式 $W_{保} = -(E_{p2} - E_{p1})$ 作进一步分析，我们还可以从理论上得出机械能守恒定律成立的条件．

将上述质点的动能定理应用于质点组中的各个质点，那么对每个质点都可以列出一个方程

$$W^i = E^i_{k2} - E^i_{k1} \tag{1-63}$$

式中 W^i 是作用于第 i 个质点的所有力所作之功的代数和，其中包括质点组内部其他质点作用于第 i 个质点的力（对系统来说是内力）所作之功．若质点组含有 n 个质点，就可以列出与(1-63)式相同的几个方程．把它们累加起来，即得

$$W_{总} = \sum_{i=1}^{n} W^i = \sum_{i=1}^{n} E^i_{k2} - \sum_{i=1}^{n} E_{k1} \tag{1-64}$$

这就是质点组的动能定理表达式．它表明作用于质点组的一切外

力所作之功，和质点组内部质点之间相互作用的所有内力所作之功的总和，等于质点组的总动能的增量．我们可以把式中的总功 $W_{总}$ 分为三个具体部分：①系统以外的物体作用在系统内各个物体上的外力所作之功的总和 $W_{外}=\sum_i W_{外}^i$；②系统内的各个物体相互作用的保守内力所作之功的总和 $W_{保内}=\sum_i W_{保内}^i$；③系统内的各个物体相互作用的非保守内力(如内摩擦力等)所作之功的总和 $W_{非保内}=\sum_i W_{非保内}^i$．于是有

$$W_{总}=W_{外}+W_{保内}+W_{非保内} \tag{1-65}$$

再把系统初态和末态的总动能分别表作

$$E_{k1}=\sum_i E_{k1}^i E_{k2}=\sum_i E_{k2}^i \tag{1-66}$$

将(1-65)(1-66)式代入(1-64)式，得

$$W_{外}+W_{保内}+W_{非保内}=E_{k2}-E_{k1} \tag{1-67}$$

再将势能特征公式 $W_{保内}=-(E_{p2}-E_{p1})$ 代入上式，即得

$$W_{外}-(E_{p2}-E_{p1})+W_{非保内}=E_{k2}-E_{k1}$$

于是有

$$W_{外}+W_{非保内}=(E_{k2}+E_{p2})-(E_{k1}+E_{p1}) \tag{1-68}$$

上式右端 $(E_{k2}+E_{p2})$、$(E_{k1}+E_{p1})$ 分别是系统末状态和初状态的机械能．该式表明：系统机械能的增量等于外力所作之功和非保守内力所作之功的总和，这个结论叫做功能原理．

根据功能原理很容易得出机械能守恒的条件．即当 $W_{外}=0$、$W_{非保内}=0$，则由(1-68)式可得

$$E_{k2}+E_{p2}=E_{k1}+E_{p1} \tag{1-69}$$

这就是机械能守恒定律的表达式．由上述推论可知，要使一个系统机械能守恒必须满足两个条件：第一、没有任何外力对考察系统作功；第二、系统内部只有(也必有)重力、弹力或引力等保守内力作功，而没有内摩擦力和任何其它非保守内力作功．力学中通常把具备这种条件的系统叫做“保守力学系统”．于是机械能转化和守恒定律可一般地表述如下：“在保守力学系统中，物体的动能和

势能可以相互转化，但转化过程中系统的总机械能保持不变．”

应用机械能守恒定律讨论力学问题时，关键的一步就是要善于正确判别所考察的系统，是否是一个满足上述条件的保守力学系统．这里有两点特别值得读者注意：①机械能守恒定律要求的是“没有任何外力对考察系统作功”，而不是要求“合外力等于零”．譬如，绳子拴着物体在光滑水平面上作匀速圆周运动时，物体所受的合外力并不等于零，但这个合外力——绳子提供的向心力始终与物体运动的速度相垂直，不对物体作功，所以若不计空气阻力，物体的机械能守恒；②由于机械能包括势能，而势能是属于具有保守力的力学系统的．所以重力、弹力等是考察系统的保守内力，而不是外力，它们所作的功只是引起动能和势能的转化，而并不改变系统的机械能．机械能守恒定律对内力的要求是没有任何会引起发热、发光或化学变化等非力学现象的其它内力作功．

[思考题]

(1)功的表达式 $W = FS\cos\alpha$ 中的“S”，为什么既可表述为“力的作用点的位移”，也可以表述为被力 F 作用的“物体的位移”？用这两种表述法去分析滑动摩擦力的作功情况时是否完全一致？试讨论之．(**提示**：应把滑动摩擦力作用点的“连续变换”和“位移”相区别)

(2)如何理解功的正负？以下说法哪些是正确的：①1 焦耳正功比 1 焦耳负功大 2 焦耳；②发动机的牵引力对汽车恒作正功；③摩擦力对运动物体恒作负功；④物体系的内摩擦力所作之功的代数和恒为零．

(3)一辆汽车在倾角为 θ 的斜坡向上行驶，速度由 v_1 增加到 v_2，又由 v_2 增加到 v_3，且 $v_3 - v_2 = v_2 - v_1$．如果在这两种情况下牵引力和摩擦力均相同，那么发动机作的功是否相同？

(4)弹性势能的零势能状态，能不能任意选取？弹性势能是否能出现负值？

(5)机械能守恒定律成立的条件是什么？一根弹簧上端顶着一木板，下端固定于地面．若有一块油泥从空中落下打在木板上，与木板一起振动．那么全过程中整个系统机械能是否守恒？

第二篇　热　　学

一、温度和温标

2.1　温度的热力学定义和微观本质是什么？

初中物理教材给出的温度的初步概念是："物体的冷热程度叫温度"，即热的物体温度高，冷的物体温度低．这与人们的生活经验是相符的．但是"冷"与"热"的感觉毕竟是与人们的主观因素相联系的，并非完全客观的．当科学地定量研究热学问题时，这种以主观感觉为基础所定义的温度概念就显得不够了，应该完全立足于客观事实给温度下一个严格的科学定义，并给出客观地量度温度的方法．

温度的热力学定义是建立在热力学第零定律基础上的．热力学第零定律是从以下实验事实中概括出来的关于宏观热现象的一个普遍结论：

事实之一：如图 2-1 所示，设有两个热力学系统 A 和 B，原先各自处于一定的平衡态．[①] 若让 A 和 B 相互热接触，则一般地说，两者之间将通过热传递而进行能量交换，从而破坏了它们原先的

① 平衡态的定义：在不受外界影响的条件下，系统内部各个部分所有可观测的宏观性质都不随时间变化的状态，叫做平衡态．所谓一个系统处于平衡态，其实质就是指该系统与外界或系统内部各部分之间，都不发生任何能量或物质的宏观输运过程．

平衡态，两者将分别发生状态变化．但经过一定时间后，两系统之间的热传递将终止，各自达到了新的平衡态．再把两者分开，它们的状态都保持不变；然后又使两系统接触，事实证明，此时两者并不再次发生热传递，而仍然保持第一次接触后达到的平衡态．可见，两系统热接触后，最后达到的平衡态具有一种共同的宏观热性质，亦即两者处于一种共同的宏观热状态．我们把处于这样一种共同的宏观热状态的系统，叫做彼此达到了热平衡．上述事实表明，两个已经达到热平衡的系统，无论接触与否，都将各自保持原有的平衡态不变，彼此不发生热传递．



图 2－1

事实之二：如图 2-2 所示，让两个互相隔离的系统 B 和 C，同时与系统 A 相接触，经过一段时间后，系统 A 和 B 以及 A 和 C 都将达到热平衡；再将三者分开，然后让系统 B 和 C 相接触，事实证明，B 和 C 仍然保持原有的平衡态不变，这表明 B 和 C 也已经达到了热平衡，可见，当系统 A 与 B、A 与 C 同时处于热平衡时，则系统 B 与 C 也彼此处于热平衡．

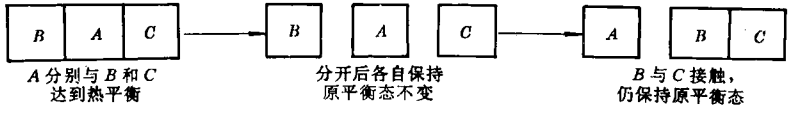


图 2－2

由以上事实得出一个重要的结论:如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统的同一热状态处于热平衡,则这两个热力学系统彼此也一定处于热平衡.这个结论就叫做热力学第零定律.

由热力学第零定律可知,如果若干个系统分别与某一系统的同一热状态处于热平衡,那么所有这些系统都彼此处于热平衡,它们所处的平衡态都具有一种共同的宏观热性质,物理学中为了描述物质系统的这样一种宏观热性质,引入了温度这个物理量,它的定义是:处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有一个共同的宏观物理性质,表征热力学系统的这样一种宏观热性质的物理量叫做温度,它的特征是一切互为热平衡的系统都具有相同的温度.这就是温度的热力学定义.

利用温度的概念就可以简单明了地阐明热平衡现象:温度相同的物体彼此处于热平衡,具有共同的宏观热性质,若让它们接触,不会改变各自原来的平衡态;温度不同的物体处于不同的热状态,互相接触时将引起热传递,直至温度相同,达到彼此热平衡为止.

确切理解温度的概念,还应搞清以下几点:

第一、温度相同的系统,无论接触后分开,或分开后再接触,都将各自保持原来的热平衡态不变.可见,系统的温度完全决定于自身的热运动状态.实质上温度反映了系统内部微观粒子热运动的特征.我们在 1.22 中讨论气体压强的微观本质时,曾给出了气体分子的平均平动动能公式(1-34),即

$$\overline{\omega}=\frac{3}{2}kT$$

统计物理学的进一步研究还表明,任何处于温度为 T 的热平衡的经典物质系统内部,一个微观粒子的能量表达式中,每个独立平方

项的统计平均值都等于$\frac{1}{2}kT$.[①] 而在三维空间内运动的任何粒子的平动动能都含有三个独立平方项，即$\overline{\omega}=\frac{1}{2}m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)=\frac{p_x^2}{2m}+\frac{p_y^2}{2m}+\frac{p_z^2}{2m}$，因而其平均平动动能都是$\frac{3}{2}kT$. 所以(1-34)式对任何系统的微观粒子都是适用的．可见，温度的高低直接标志着系统内部微观粒子热运动的平均平动动能的大小，亦即标志着系统内部大量微观粒子无规则运动的剧烈程度，这就是温度的微观本质．

第二、既然系统的温度决定于自身的热运动状态，因而它也是一个系统的状态函数，每对应于系统的一个平衡态，都有一个唯一确定的温度值．那么当系统处于非平衡态时，温度的概念是否还有意义呢？显然，对非平衡态系统不能用一个确定的温度值来反映整个系统的热状态．但是，我们总可以设想把系统分割成无数多个足够小的局部区域，简称局域．那么对于每一个足够小的局域来说，仍然可以看作是平衡的，它仍然具有确定的温度值，只不过对整个处于非平衡态的系统来说，内部各点的温度不相同．

第三、温度是个强度量(不可加量)，它只决定于系统内部微观粒子热运动的状态，而与系统的体积、摩尔数、质量等并不直接相关．若把两个彼此处于热平衡的同种物质系统合并成一个，那么

---

① 这个结论叫做能量均分定理．通常有 r 个自由度的微观粒子，其运动状态由 r 个广义动量 p_i 和 r 个广义坐标 $q_i(i=1,2,\cdots r)$ 所描述．而粒子的能量总可以由若干个广义动量和广义坐标的独立平方项来表出．例如，现想固体的爱因斯坦模型，认为组成固体的离子实排列成空间点阵，每个离子实都可以看作是在平衡位置附近振动的三维谐振子，其能量的表达式为 $\varepsilon=\frac{1}{2m}(p_x^2+p_y^2+p_z^2)+\frac{1}{2}m\omega^2(x^2+y^2+z^2)$ 前三个平方项就是粒子振动的平动动能，后三个平方项就是粒子振动的势能．按能量均分定理，每个粒子的平均总能量为 $\overline{\varepsilon}=\frac{1}{2}kT\times 6=3kT$. 其中平均平动动能和平均势能各为 $\frac{3}{2}kT$.

其总质量和总体积就等于两者的质量或体积之和，然而该系统的温度值不变，并非等于两者的温度相加．对于一个非平衡态系统来说，内部各点的温度各不相同，它们分别反映了各个局部区域的分子热运动的强度，既不能逐个相加，也不能互相替代．

2.2 温标 建立温标的三要素

要定量地测定物体的温度，首先必须确定温度的数值表示法，温度的数值表示法叫做温标．任何温度计都是根据某一种温标制成的．

建立一种温标，一般地说应具备三个基本要素．下面我们结合摄氏温标的定义阐明建立温标的三要素：

[Ⅰ] 选定测温物质和测温属性．

由热力学第零定律可知，凡是与同一系统的同一热状态处于热平衡的系统都具有相同的温度．因此，我们可以选择一个适当的系统作为标准系统制成温度计，让它与被测物体相接触，当达到热平衡时，温度计的温度就是被测物体的温度．并且可以用同一温度计去测得不直接接触的不同物体的温度，借以比较它们温度的异同．这就是热力学第零定律给出的测温原理．这种被选定作为温度计标准系统的一定质量的物质，我们把它叫做测温物质．测温物质应具有某些随着温度的改变而改变的宏观属性，譬如，液体或定压气体的体积，定容气体的压强，热电偶的电动势，金属丝的电阻等等，都是(有规律地)随着温度的改变而改变的．因此，选定测温物质后，再选定它的某种属性作为测温的依据，就可以根据它的这种属性的改变来反映温度的变化．例如，水银温度计就是以水银为测温物质，以水银的体积(表现为水银柱的长度)随温度变化的性质为依据来测量温度的．

[Ⅱ] 选定测温固定点，并规定其温度值．

要定量地比较不同物体温度的异同，或同一物体在不同状态下的温度差别，就得选定某种物质的特定状态作为标准点，并规定

标准点的温度值．通常把这些选定的标准点称之为测温固定点．例如：摄氏温标的定义中，规定水的冰点（纯冰和纯水在一个标准大气压下达到平衡的温度）为零度，水的汽点（纯水与一个标准大气压下的水蒸气达到平衡的温度）为 100 度．

［Ⅲ］ 规定测温属性随温度的变化关系．

规定了测温固定点的温度值后，就可以通过实验在温度计上标出固定点的刻度．但温度计上其它温度值的刻度必须依据测温属性随温度的变化关系来确定．然而在测温标准尚未建立起来以前，任何一种测温属性随温度的变化关系实际上是未知的，要定量地建立两者数值上的关系只能人为地作出规定．譬如，按照摄氏温标对固定点的规定，就可以通过实验，在水银温度计上准确地标定零度和 100 度这两个刻度．然而除此之外其它温度值如何标定呢？50 度的刻度是否应标在零度和 100 度两个刻度的正中间呢？显然，这是未知的．要标定水银温度计上的其它温度值，只能是人为地先规定水银柱的长度随温度的变化关系．摄氏温标的定义中，就规定了测温物质的测温属性是随温度作线性变化的．设以 t 表示摄氏温度，以 L 表示反映测温属性的状态参量（如液柱的长度、定容气体的压强、金属丝的电阻等），且当测温泡跟水的冰点和汽点热平衡时，温度计所对应的参量值为 L_0 和 L_{100}，那么，若温度计与被测物体接触且达到热平衡时，其参量值变为 L_x，则被测物体的温度 t_x 应满足关系式

$$\frac{t_x - 0}{100 - 0} = \frac{L_x - L_0}{L_{100} - L_0}$$

即
$$t_x = \frac{100}{L_{100} - L_0} L_x - \frac{100 L_0}{L_{100} - L_0} = aL_x + b \tag{2-1}$$

凡是按上述摄氏标度法制作的温度计都叫摄氏温度计．根据摄氏温标确定的温度叫做摄氏温度，其值表作“t”，单位叫摄氏度，符号为“℃”．

由于摄氏温标规定测温属性是随温度作线性变化的，所以摄

氏温度计的刻度是均匀的，即在两个固定点 0℃和 100℃的刻度之间 100 等分，每一等分表示 1℃．

客观上不同物质的不同属性随温度的变化关系并不是完全相同的．因此，用各种不同物质制成的摄氏温度计测量同一对象时，除了 0℃和 100℃两个固定点的温度都相同以外，一般地说测得的温度值并不严格一致．举例说：以氢定容温度计为标准进行比较，它测得某物体的温度为 50℃，那么，若用水银温度计去测该物体的温度，所得的读数将要低 0.1℃，约为 49.9℃；若用铂电阻温度计去测该物体的温度，将要低 0.36℃，约为 49.64℃．可见，用不同测温物质的测温属性所建立的摄氏温标存在着明显的差异．通常把这种有赖于具体物质的具体属性所建立的温标叫做经验温标．

要使温度的测量达到统一，就需要建立一种不依赖于具体测温物质和测温属性的标准温标．为此，计温学中建立了理想气体温标．理想气体温标的三要素可表述如下：

(1) 以理想气体为测温物质，以理想气体的定容压强或定压体积随温度的变化关系作为测温依据．①

(2) 选定水的三相点(纯水、纯冰与纯水蒸气平衡共存的状态)为唯一测温固定点，并严格规定它的温度为 273.16 度，单位叫做“开尔文”，简称“开”，符号为“K”．1K 的大小为水的三相点温度 T_{tr} 的 273.16 分之一，即 $1\mathrm{K}=\dfrac{T_{tr}}{273.16}$．

(3) 规定理想气体的测温属性(定容压强 p 或定压体积 V)与温度成正比例关系，即

$$\left.\begin{aligned} &T(p)=\alpha p \\ \text{或}\quad &T(V)=\beta V \end{aligned}\right\} \tag{2-2}$$

① 所谓理想气体就是指完全遵从玻意耳定律的气体，即当温度不变时，一定质量的气体的压强与体积成反比($pV=C$)．实际气体的压强越小，就越接近于理想气体．这里实际上是指测温泡中的气体压强趋于零的极限情况．

式中的常数可以根据测温固定点的规定来确定:设温度计中的理想气体在水的三相点时的定容压强为 p_{tr} 或定压体积为 V_{tr},即么按测温固定点的规定,并依据(2-2)式,应有

$$\left.\begin{aligned} &273.16\mathrm{K}=\alpha p_{tr},\text{即}\quad \alpha=\frac{273.16\mathrm{K}}{p_{tr}}\\ \text{或}\quad &273.16\mathrm{K}=\beta V_{tr},\text{即}\quad \beta=\frac{273.16\mathrm{K}}{V_{tr}}\end{aligned}\right\}\tag{2-3}$$

将(2-3)式代入(2-2)式,即得

$$\left.\begin{aligned} &T(p)=273.16\mathrm{K}\cdot\frac{p}{p_{tr}}\\ \text{或}\quad &T(V)=273.16\mathrm{K}\cdot\frac{V}{V_{tr}}\end{aligned}\right\}\tag{2-4}$$

然而,事实上任何一种实用气体温度计,测温泡中的气体并不是真正的理想气体,而总是具有有限压强值的某种实际气体．因此,按(2-4)式标定的各种气体温度计,除了测得水的三相点温度都是 273.16K 以外,其它温度值并不严格一致．不过实验证明,各种气体温度计测温泡中的气体都变得极为稀薄,即压强与零值接近时,这种差异也逐渐减小到接近于零．于是由此外推,若各种气体温度计测温泡中的气体压强都趋于零时,则测得的同一对象的温度值将趋于一个共同的极限值．所谓理想气体温标实际上就是这样一种在气体压强趋于零的极限情况下所建立的理想温标．因此,从实用气体温度计出发的理想气体温标的数学定义式是

$$\left.\begin{aligned} &T=\lim_{p_{tr}\to 0}T(p)=273.16\mathrm{K}\lim_{p_{tr}\to 0}\frac{p}{p_{tr}}\\ \text{或}\quad &T=\lim_{p\to 0}T(V)=273.16\mathrm{K}\lim_{p\to 0}\frac{V}{V_{tr}}\end{aligned}\right\}\tag{2-5}$$

上述理想气体温标,最早是由英国物理学家开尔文提出来的,所以也叫开氏温标．按这种温标确定的理想气体温度,也叫开氏温度,或叫绝对温度．理想气体温标不依赖于任何一种气体的个性,根据(2-5)式,使用任何气体温度计通过实验与外推相结合的

方法，测得的理想气体温度都是唯一确定的．于是达到了温度测量的统一，解决了经验温标测温不一致的问题．

2.3 热力学温标和国际实用温标

由于理想气体温标不依赖于任何一种气体的个性，所以在可以用气体温度计实现的范围内，理想气体温标达到了温度测量的统一．但理想气体温标仍有其局限性：第一、它虽然不依赖于气体的个性，但仍有赖于气体的共性，在极高极低的温度下这种温标就不适用了．因为在 1K 以下任何气体都已经液化，所以在理想气体温标中，低于 1K 的温度是没有物理意义的．再说理想气体温标的定义式本身就不能包含绝对零度的定义，因为在任何情况下，测温泡中气体的压强或体积不可能等于零；第二、理想气体温标虽然可以用气体温度计通过实验和外推相结合的方法去实现，但实用上显然是不方便的．

为了进一步克服理想气体温标的局限性，计温学中又建立了热力学温标和国际实用温标．热力学温标是建立在热力学第二定律基础上的一种理论温标，这里不准备详细讨论，只是简要地说明一下定义热力学温标的思路．

根据由热力学第二定律所证明的卡诺定理：工作于两个恒温热源之间的一切可逆卡诺热机的效率（$\eta = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}$）都相等，与工作物质的性质无关，只决定于两个热源的温度．这就是说，可逆热机的效率是两个热源温度的函数．于是通过严密的逻辑推理可以证明：工作物质在循环一周的过程中，从高温热源吸收的热量 Q_1 和释放给低温热源的热量 Q_2 之比，只决定于两个热源温度的普适函数 $\varphi(\tau_1)$和 $\varphi(\tau_2)$的关系，而与工作物质的性质无关，即

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\varphi(\tau_2)}{\varphi(\tau_1)} \tag{2-6}$$

式中 τ_1、τ_2 是任意温标确定的两个热源的温度，$\varphi(\tau)$是温度的普

适函数，其具体形式只与温标的选择有关．开尔文建议引进一种新的温标，用 T 表示，令 $T\propto\varphi(\tau)$，于是(2-6)式可表作

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{T_2}{T_1} \tag{2-7}$$

这样规定的温标称为热力学温标，由这种温标确定的温度称为热力学温度．由(2-7)式可知，两热源的热力学温度的比值，定义为在两个热源之间工作的可逆热机与热源所交换的热量的比值．由于可逆热机的效率($\eta=1-\frac{Q_2}{Q_1}$)与工作物质的性质无关，因此该温标也就与测温物质的性质无关．而且(2-7)式所定义的范围原则上包括由零度到无穷大的所有温度值，不受任何限制．可见热力温标完全克服了前述理想气体温标第一项局限性，在理论上完善了温标的定义．

热力学温标的测温固定点、单位名称和大小，都与理想气体温标相同，即规定水的三相点温度为 $T_{tr}=273.16\mathrm{K}$，$1\mathrm{K}=\frac{T_{tr}}{273.16}$．并且可以证明，在理想气体温标能够实现的温度范围内，由热力学温标与理想气体温标所确定的温度值完全相等，两者是一致的．事实上热力学温标只是一种理论温标，实际应用中它仍然需要通过理想气体温标去实现．

如前所述，理想气体温标是利用气体温度计通过实验并外推的方法去实现的．而气体温度计设备复杂，复现困难，测温范围受限制，所以不能满足现代科技发展的需要．于是国际上决定采用国际实用温标来逼近热力学温标，使得温度的测量既在理论上达到完善和统一，又在实践上做到方便和可行．

国际温标是 1927 年开始制订的，后来经过几次修正，现在正式采用的“国际实用温标-1968”，代号 IPTS-68，是 1968 年国际计量委员会决定实施的(我国从 1971 年 1 月 1 日开始采用“IPTS-68”计温)．

国际实用温标以热力学温标为基本温标，再作三方面规定：

(1) 给出 13 个固定点的指定温度值(详见表 2-1,其中氩三相点和锡凝固点是 1975 年补充的);

(2) 给出各温度范围所使用的标准计温仪器;

(3) 规定与标准计温仪器相对应的计温插补公式:

(i)13.81K(氢三相点)至 903.89K(630.74℃,锑凝固点)温度段,用铂电阻温度计.测温插补公式为

$$R = R_3(1 + At + Bt^2)$$

式中 R_3 是铂电阻温度计在水三相点时的电阻值,A、B 为常数,可根据已知固定点去确定 A、B 值.

(ii)630.74℃ 至 1064.43℃(金凝固点)温度段,用铂-铂铑热电偶温度计,测温插补公式为

$$\mathscr{E} = a + bt + ct^2$$

常数 a、b、c,也是根据固定点去确定的.

(iii)1064.43℃以上温度段,采用光学高温计.

目前除了普遍采用国际实用温标外,人们按习惯还广泛应用着摄氏温标.为了更好的统一计温标准,国际计量大会还作出了决定,重新以基本的热力学温标来定义摄氏温标,其定义式是

$$t = T - 273.15$$

根据这个新的定义,包括水的三相点(0.01℃)在内的国际实用温标的 13 个固定点的摄氏温度值是准确的,而水的冰点和汽点并不严格等于 0℃ 和 100℃,应根据定义式由热力学温度 T 的测量值来确定.不过,实验证明其差别甚小,一般仍然可以认为水的冰点和汽点是 0℃ 和 100℃.

表 2-1　国际实用温标(68)的固定点

物质	平衡态	温度指示值	
		K	℃
氢	三相点	13.81	-259.34
	在 25/76atm 下液、气二相平衡	17.042	-256.108
	沸点	20.28	-252.87
氖	沸点	27.102	-246.048
氮	三相点	54.361	-218.789
氩	三相点	83.798	-189.352
氧	沸点	90.188	-182.962
水	三相点	273.16	0.01
	沸点	373.15	100
锡	凝固点	505.1181	231.9681
锌	凝固点	692.73	419.58
银	凝固点	1235.08	961.93
金	凝固点	1337.58	1064.42

注:表中的沸点和凝固点都是指在 1atm 下的值．

[思考题]

(1)用定容气体温度计实现理想气体温标的外推法,可简述如下,给温度计测温泡装入一定质量的气体,设它在水的三相点时的压强 p_{tr1},用它测得某系统的温度为 $T_1(p)$;然后从测温泡中抽去一部分气体,使它在水三相点时的压强减为 p_{tr2},并用它测得同一系统的温度值为 $T_2(p)$．按相同的步骤重复测量,依次得到对应于 p_{tr1}、p_{tr2}、p_{tr3}……的一组温度测定值 $T_1(p)$、$T_2(p)$、$T_3(p)$……．那么以 $T(p)$为纵坐标,以 p_{tr}为横坐标,作出直角坐标系,就可以根据测得的一组 $T_1(p)$、$T_2(p)$……数据,在这个坐标系上绘出一条实验曲线．于是根据这条曲线的变化趋向外推到 $p_{tr}=0$ 的情况,亦即把该图线延长到与纵坐标相交,则这个交点所确定的温度值就是满足理想气体温标定义式的极限值,也就是被测系统的理想气体温度值．现用某种定容气

体温度计，使其测温泡的三相点压强 p_{tr} 分别取下表第一项数值，去测同一系统的未知温度，则测温泡对应的气压 p 如下表第二项所示．试确定该被测系统的理想气体温度值．

p_{tr} mmHg	100	200	300	400	500	600
p mmHg	175.2	351.0	527.4	704.4	882.0	1060.2

(2)有些国家，人们生活中还沿用一种华氏温标．华氏标度法的规定是：测温物质的测温属性(X)随华氏温度(t_F)作线性变化，即 $t_F = aX + b$．且规定水的冰点为 32 度，汽点为 212 度．华氏温度的单位叫华氏度，符号为℉，试确定华氏温度 t_F 与摄氏温度 t 的数值关系．

二、内能和热量

2.4 内能的热力学定义和微观本质是什么?

实验证明,要使某系统由温度 T_1 的平衡态,改变到温度为 $T_2(T_2>T_1)$的平衡态,既可以通过对系统加热,也可以通过对系统作功的办法来实现.譬如,量热器中装着一定质量的水,我们既可以对水加热,使它的温度由 10℃ 升高到 12℃;也可以不加热,而只是通过对水作功(如用搅拌器对水连续搅动),同样可以使水温由 10℃ 升高到 12℃.物理学中,把凡是在系统与外界没有任何热交换的条件下,所发生的状态变化过程,都称之为绝热过程,绝热过程中作的功叫做绝热功.

大量实验证明,在绝热条件下,通过作功使被考察系统从某一确定动态Ⅰ,改变到确定的终态Ⅱ,那么不管具体作功的方式如何,外界对系统所作绝热功的数值总是相同的.也就是说,绝热功的大小与实施绝热过程的具体途径无关,而只决定于系统的初态和终态.例如,通过作功要使一定质量的水,由温度 t_1℃ 升高到 t_2℃,我们既可以直接用搅拌器搅动而作机械功使水升温;也可以通过特制的装置,利用电磁感应现象,先对装置作机械功,使其产生感应电流,再通过电流的电功使水升温(这是著名的焦耳实验之一),等等.所有这些实验都证明,只要系统的初、终两态是确定的,那么绝热功的数值都相同,与作功的具体途径无关.

我们知道,功是系统能量转化的量度,外界绝热地对系统作功,必然引起了系统某种能量的改变,那么这种被改变的能量与机械能、电能等形式的能有何区别呢?如何定义这种能量呢?在力学中我们曾经碰到过类似的情况,重力场中物体由某一确定的位置移到另一确定的位置时,重力对物体所作的功,与物体移动的具体途径无关,只与物体的初、终两位置有关.只要物体的初、终位

置是确定的，重力对物体所作的功也就唯一确定．由此，我们引入了重力势能这个状态函数．重力势能的增量恒等于重力所作之功的负值(见本书 1.30)．同样，在绝热过程中外界对系统所作的绝热功，只与系统的初、终状态有关，而与中间所经历的具体过程无关．由此可见，任何一个处于平衡态的系统，必然存在着一个标志某种形式的能量的态函数，这个态函数的量值变化严格地与绝热过程中外界对系统所作的功 W_a 相联系．物理学把这样一个态函数定义为内能，表述如下：任何一个处于平衡态的系统，都存在着一个确定的态函数，它的量值的改变与绝热过程的功严格相联系，这个态函数叫做系统的内能，表作 E．当系统由某一个初态，经过一个绝热过程变化到另一终态时，系统内能的增量恒等于在此过程中外界对系统所作的绝热功，即

$$E_2 - E_1 = W_a \tag{2-8}$$

这就是内能的热力学定义式．

(2-8)式表明，系统内能的增量可以用绝热过程中外界对系统所作的功来量度．因此，只要知道在绝热过程中外界对系统作了多少功，就能确定它始末两态的内能差．但是绝热功不能确定系统任一状态的内能值．这种情况也与重力势能相似，要确定一个物体在某一位置时的重力势能，必须先选定一个参考点并规定其重力势能的值．譬如规定物体在地面上的势能为零，那么物体在任一位置的势能，就等于将物体从该位置移到地面上的过程中重力所作的功．同样，要想确定系统在任一状态的内能值，也必须先选定某一状态为参考态并规定其内能值．当参考态的内能值确定了，那么其它状态的内能也就由(2-8)式完全确定了．但需要指出的是，在实际应用中，重要的具有实际意义的是系统内能的变化，即系统两态之间的内能差．在热力学所讨论的问题中，实际上都只是涉及系统内能的变化，而毋需计算某一状态的内能值．

关于内能的意义还需阐明两点：

(1)内能的微观本质：所谓内能，广义地说，就是系统内部所有

微观粒子本身所具有的能量和它们之间相互作用能的总和．具体地说，包括：系统内所有分子无规则运动的动能，分子之间的相互作用势能，分子、原子内部的能量，原子核内部的能量等能量的总和．但在热力学中，我们所关心的只是系统在状态变化过程中内能的改变，而热力学所讨论的一般状态变化的过程，原子和原子核内部的能量并不发生变化，因而这些能量可以不计入内能之中．所以说，热力学所定义的内能就是指：系统内所有分子(泛指系统中参与热运动的一切微观粒子，包括自由电子、离子等)无规则运动的动能和分子间相互作用势能的总和．应当指出：热力学系统具有内能的同时，还具有宏观的机械能，内能不包括与系统的宏观位移和宏观速度相联系的机械能．

(2)内能是广延量(可加量)：若把一个系统看作是若干小部分组成的，每个小部分分别具有内能 E'、E''、……，那么整个系统的内能为 $E = E' + E'' + \cdots\cdots$．正因为这样，对一个既定的系统，当它处于非平衡态时仍具有一定的内能．虽然这时不能把整个系统的内能表作几个独立状态参量的确定的函数，但我们总可以把系统分割成无数多足够小的局域，通常称之为子系统，那么对每个足够小的子系统来说仍然可以看作是平衡的，它们分别具有确定的状态参量和态函数内能．而所有子系统的内能的总和，再加上子系统之间的相互作用能就等于整个系统的内能．

现行初中物理教材，只是从微观本质的意义上定义了内能．并且考虑到初中学生的实际，回避了分子间相互作用势能的概念，把定义表述为："物体内部大量分子做无规则运动所具有的能的总和，叫做物体的内能"．这个表述虽然没有提出分子间的势能，但并不损害科学性，因为"大量分子做无规则运动所具有的能"，本身包含了分子的动能和势能．初中暂时这样表述，无碍于学生以后进一步学习提高．但教师应当注意，不要把定义中的"能"，随意说成"动能"．

2.5 怎样正确理解“热量”的物理涵义？“热量是物体内能的量度”，这话对吗？

经验表明，当两个温度不同的物体相互接触时，温度高的物体要变冷，温度低的物体要变热，最后两者达到热平衡具有相同的温度．以这种现象为基础人们引入了“热量”的概念，认为在这种过程中有热量从高温物体传给低温物体．那么热量的本质是什么呢？历史上对此经历了长期探索和争论的发展过程．

18 世纪有人提出了“热质说”，认为热是一种看不见的没有质量的物质，叫做热质．物体的冷热程度决定于它所含的热质的多少．热质既不能产生，也不能消灭，只能从较热的物体传到较冷的物体，在热传递过程中热质守恒．由于用热质说很容易解释各种热传递以及物态变化中吸热放热等现象，所以曾得到广泛的承认．当时的量热学就是根据这种观点定义热量的，即认为热量就是在热传递过程中被传递的热质多少的量度．并规定了热量的单位“卡”，符号为“cal”，1 卡等于使 1 克纯水在一个标准大气压下温度由 14.5℃升到 15.5℃时所吸收的热量．

然而另一方面，“热运动论”远在 17 世纪就萌芽，玻意耳、牛顿、胡克等人都是热运动论的支持者．在 18 世纪，欧勒和罗蒙诺索夫也倡导热运动论．1745 年，罗蒙诺索夫在他的论文《关于冷热原因的考察》中，叙述了以下想法：因为构成物体的微粒极小，所以用肉眼看不见微粒本身的运动，但是它们的运动却在无数的现象中表现出来．热不外乎是微粒的运动．[①] 但是当时的热运动论都停留在定性的考察上，缺乏定量的实验根据，得不到普遍的承认．从 18 世纪到 19 世纪初期，热质说一直在物理学中占主流地位．18 世纪末，伦福德首先基于摩擦生热的实验事实，揭示了“热质”并不守恒．他把金属柱与镗孔装置浸入水中，进行镗孔作业，发现只要钻头不停地工作，就会不断地生热，最终能使水持续沸腾，可

① ［日］广重彻著，李醒民译，《物理学史》，求实出版社，1988 年版，224 页．

见摩擦生热是没有止境的．然而物体不可能无限地放出热质．所以他认为热只能看作是一种运动的表现，而不是什么“热质”．伦福德的观点得到戴维等人的支持，并且他们通过更广泛的实验事实论证了热运动论．尤其是到19世纪中期，英国物理学家焦耳，深信热是物体中大量微观粒子无规则运动的宏观表现．他主张以确凿的科学实验为基础来建立新的量热学理论．按照热运动论，功和热量应该是等当的，两者之间必然存在着当量关系．为此，他从1840年到1878年，在近40年的时间里用各种各样的装置做了大量实验，精心测定热功当量．在误差范围内他所做的实验都得到了一致的结果，证明热功当量是一个恒量，它等于4.18焦耳/卡．焦耳的工作无可争辩地证实了传递热量和作功的等当性，于是深刻地揭示了热量的本质：“热”是组成物体的大量微观粒子作无规则运动的宏观表现，热量是传递着的能量，而不是传递着的“热质”．热量和功一样也是能量变化的一种量度．显然，这里所说的能量就是指物体内大量分子无规则运动所具有的能量，即物体的内能．

根据上述热运动论的观点，就可以给热量下一个科学的定义：热量是热传递过程中物体内能改变的量度．

根据这一定义，对热量的物理涵义的理解着重应搞清以下两点：

第一、热量是过程量，它是在物体之间发生热传递的物理过程中用来量度物体内能改变多少的物理量，离开热传递的物理过程就无所谓存在“热量”．我们只能说，在某一热传递过程中甲物体放出了多少热量，乙物体吸收了多少热量，而决不能说“某物体在某一状态下具有多少热量”．譬如，如果有人说“温度为10℃的10克纯水具有100卡热量”，那是极大的错误．因为温度为10℃的10克纯水究竟能放出多少热量是不可确定的．我们只能肯定10克纯水由温度10℃下降到0℃的过程中将放出100卡热量．然而0℃的水结成0℃的冰时将继续放出热量，且0℃的冰温度再下降

时还要放出热量．可见“温度为 10℃ 的 10 克纯水具有 100 卡热量”的说法是完全错误的．热量总是指某个具体热传递过程中物体所吸收或放出的热量，任何脱离开热传递的过程谈热量的多少是毫无意义的．

第二、特别要注意定义中“改变”二字的意义，热量只能用来量度在热传递过程中相关物体的内能改变了多少，而不能用来量度一个物体在某一状态下具有多少内能．事实上，虽然一个物体在某一状态下具有唯一确定的内能，但是这个内能的具体数值是不可计量的．单就内能所包含的分子势能来说，我们要想具体测定如此众多的分子之间的势能显然是不可能的事．因此，物理学中根本不存在拿一个什么物理量去量度物体具有多少内能的问题．我们引入热量这个物理量的目的只是(也只能)用来量度热传递过程中物体内能改变的多少．如果有人说成“热量是物体内能的量度”，那是极其错误的．内能是状态量(态函数)，热量是过程量．一个过程量只可能作为有关过程中某个状态量的改变量的量度，而不是该状态量本身的量度．

由于热量和功是等当的，它们都是系统能量变化的量度，所以热量和功的单位都与能量的单位相同，在国际单位制中三者的单位都是焦耳．然而由于历史和习惯的原因，人们计算热量时还在沿用“卡”．但现在已不把它理解为使 1 克纯水的温度从 14.5℃ 上升到 15.5℃ 时所需要的热量了，而只是把它当作能量和热量的一个辅助单位使用，并严格规定：1 热化学卡 = 4.184 焦耳．

2.6 怎样确切理解内能、热量跟温度的联系和区别？

内能、热量和温度是热学中三个最基本的概念，切实掌握它们的物理实质是学好整个热学的重要基础．为此，在分别掌握三者的物理涵义和特征的同时，还必须搞清它们之间的内在联系和本质区别，借以澄清概念，避免混淆，防止产生这样那样的科学性、逻

辑性的错误．譬如，往往有人认为“温度越高的物体含有的热量越多”、“温度高的物体内能大”、“系统的温度不变内能也不变”等等．其实这些说法都是错误的，或不确切的．错在哪里？只要真正搞清了内能、热量和温度之间的联系和区别，问题也就一目了然了．

内能与热量的关系，在2.5中已阐明，下面我们进一步分析一下内能、热量跟温度之间的关系．

1．内能和温度的联系和区别

内能和温度都是状态量．一个系统在既定的状态下，既有确定的内能，又有确定的温度．因此，两者必然存在着某种内在的联系．具体地说，物体的内能是内部所有分子无规则运动的动能和分子间的势能的总和，而温度是分子热运动的平均平动动能的标志，温度越高，分子的平均动能越大．因此，对同一物体来说，温度高了，内能就较大．这就是同一物体的温度与内能的联系．

但是温度和内能又是本质上完全不同的两个物理量：

(1) 从物理实质上说，内能是一种能量，它跟其它形式的能量一样，反映了物体具有作功本领的大小．譬如，蒸汽机、内燃机等热机，就是先让燃料的化学能转化为蒸汽或燃气的内能，然后再利用蒸汽或燃气的内能去作功；而温度是一个反映物体内部分子热运动剧烈程度的物理量，是分子热运动的平均平动动能的标志．温度的高低不能用来比较不同物体内能的大小．譬如说，一滴开水可以烫痛人的手背，而一盆温水只会给人以温暖，而不会烫人的手．这就是因为前者温度高，内部分子的热运动较剧烈，接触手背时能给予皮肤强烈的刺激．然而一滴开水的内能显然不比一盆温水的内能大．因此，决不能笼统地说“温度高的物体内能大”．初中物理教材中指出：“物体的内能跟物体的温度有关．温度越高，物体 内部分子的无规则运动越激烈，物体的内能就越大”．这仅仅是对同一物体的温度与内能的关系而言的．而且按习惯，这里说的“物体”一般是指有一定体积形状的固体或液体．读者应当注

意这一点．

进一步分析，由于系统的内能包括所有分子无规则运动的动能和分子间的势能，而物体的温度却与分子的势能完全无关，仅仅决定于分子的平均平动动能．因此，当系统的体积发生显著变化时(如气体的膨胀或压缩)，系统的内能并非单纯随温度的改变而改变，而且跟体积的变化有关．例如，实际气体的等温膨胀就是一个明显的例子．在等温膨胀过程中，气体一面吸热，一面对外界作功，然而总的效果是：虽然温度不变，分子的平均平动动能未变，可是由于体积膨胀，气体分子间的势能改变了，所以内能也相应地改变了．所以不能说“系统的温度不变，内能也不变”．温度和内能不仅物理意义不同，而且两者在量值上也并不存在普遍的必然联系．

(2) 从物理量的特征来说二者也不同，内能是广延量，温度是强度量．譬如，甲、乙两物体的内能各为 E_1 和 E_2，那么若把这两个物体组成一个系统，则该系统的内能就是 $E = E_1 + E_2$；然而这两个物体的温度 t_1 和 t_2，各自反映了它们内部分子热运动的剧烈程度，显然，这种分子热运动的“烈剧程度”是不能彼此相加的，我们决不能说这两个物体的“总温度”是 $t = t_1 + t_2$．

2．热量和温度的区别和联系

热量和温度的区别集中表现在它们的性质特征上：温度是状态量，热量是过程量．物体对应于每个热平衡态都具有一个确定的温度值，它标志着物体在该状态下内部分子热运动的平均平动动能的大小；然而热量是在热传递过程中对物体内能改变的一种量度．在 2.5 中曾阐明，我们只能说在一个具体热传递过程中，某物体吸收或放出了多少热量，而决不能说一个物体在某一状态下具有多少热量．任何脱离开热传递的物理过程谈热量将是毫无意义的．所以说物体在每个确定状态下的温度是一个与“热量”毫无干系的物理量．

事实上，即使在物体的状态发生变化的过程中，温度的改变量

与被传递的热量之间也并不存在必然的联系．举例说：通过作功而不给物体传热，也可以引起物体温度的变化，如气体绝热压缩时温度升高；反之，物体吸热或放热，也可能温度保持不变，如熔化、凝固、沸腾等物态变化的过程就是如此．热量和温度的确定联系仅仅表现在不发生物态变化的热传递过程中，同一物体吸收或放出的热量跟温度的变化量成正比，即

$$Q = cm(t_2 - t_1) \tag{2-9}$$

除此之外，温度与热量并不存在其它必然的确定的联系．

2.7 热和功的异同 热力学第一定律

关于热和功的关系，着重应搞清两个方面：

1．热传递和作功两种过程的实质性区别

前面已阐明，要改变一个物体的内能，既可以通过热传递，也可以用作功的办法去实现．但是从过程的发生和进行的特征来说，热传递和作功是有实质性区别的两种不同的物理过程．

两物体之间之所以发生热传递，是由于两者之间存在着温度差，即它们内部分子热运动的剧烈程度不相同，当两者接触时，接触面两侧的分子在相互碰撞过程中就要发生分子热运动的动能的传递．温度高的物体分子的平均动能将减小，温度低的物体分子的平均动能将增大，即有一部分内能由高温物体传递给低温物体，直至两者的温度相同，即达到热平衡，两物体内部分子的平均平动动能趋于一致时才停止热传递．可见单纯的热传递过程与物体的宏观位移或微观粒子的定向运动均无关，在热传递过程中只是一部分内能——分子无规则运动的动能，由高温物体转移到低温物体，而不改变任何一个物体的机械能或其它形式的能量，即不发生不同形式的能量的转化．

作功过程总是与物体的宏观位移或微观粒子的定向移动（如通电导体中自由电荷的定向移动）相联系的，并且任何作功过程必然引起机械能、电能等其它形式的能量转化为内能，或在两物体之

间传递机械能．譬如，一个运动物体与一个静止于地面的物体相碰撞时，如果地面是光滑的，碰撞是完全弹性的，那么由于碰撞过程中两物体彼此作了正功和负功，使前者的一部分机械运动的动能传递给后者，前者的动能减小了，后者的动能增大了，而总机械能保持不变；如果碰撞是非弹性的，那么碰撞过程中，二者之间在发生动能传递的同时，将有一部分动能（机械能）转化为物体的内能，以致碰撞后两物体发热．实际上，任何摩擦生热现象，其实质都是通过作功使机械能转化为内能．同理，通电导体的发热现象，就是通过电流（具有定向速度的电荷流）作功的过程使电能转化为内能．

综上所述，虽然通过传递热量或作功，都可以达到改变物体内能的目的，但是两者又是有实质性区别的不同的物理过程．热传递的过程只是使温度较高的物体把一部分内能转移给另一个温度较低的物体，而并不引起不同形式的能量的转化；用作功的办法去改变物体的内能，实质上都是使机械能、电能等其它形式的能量跟物体的内能发生相互转化的过程．

2．热量和功的等当性，热力学第一定律

尽管热传递和作功是两种不同的物理过程，但是它们的效果都是使物体的能量发生改变或转化，热量和功就是在这两种过程中物体能量的改变或转化的量度，因而两者又是等当的．我们既可以给某个物体传递一定数值的热量 Q，使它由温度为 t_1 的状态变到温度为 t_2 的状态；也可以不给物体传递热量，而对它作一定数量的功 W，同样使该物体由温度为 t_1 的状态变到温度为 t_2 的状态．这就是说给物体传递一定数值的热量 Q 和作一定数量的功 W，对于改变这个物体的内能来说是等效的．正是从这个意义上说，“功”和“热量”是等当的．

在 2.5 中我们曾指出，焦耳首先通过大量实验的测定，确立了热量和功之间的当量关系．在当时的实验技术误差范围内，焦耳准确地测定了热功当量的数值．焦耳的工作为人们最后确认热现

象的本质和建立能量守恒定律奠定了实验基础．

热力学第一定律，就是能量守恒定律在与热现象相关的物理过程中的具体表达形式．它的内容是：当热力学系统由某一平衡态经过任意过程到达另一平衡态时，系统内能的增量等于在这个过程中系统所吸收的热量和外界对系统所作之功的总和．其数学表达式为

$$\Delta E = Q + W \tag{2-10}$$

应当指出，热力学第一定律是具有普遍意义的实验定律．(2-10)式中系统内能的增量 ΔE，可根据 2.4 中(2-8)式给出的内能定义式 $E_2 - E_1 = W_a$ 来测量，即只要测出使系统由初态Ⅰ绝热地变到终态Ⅱ的过程中，外界对系统所作的绝热功 W_a，也就是测得了 ΔE；式中 Q 和 W，分别是使系统由初态Ⅰ变到终态Ⅱ的任意一个过程中，系统吸收的热量和外界对系统所作的功，它们都是可以直接测定的．大量实验证明，在一切与热现象相关的物理过程中，热力学第一定律都是普遍成立的．

显然，外界对系统作了多少功，意味着参与作功的其它物体消耗了多少机械能、电能等其它形式的能量；外界传给系统多少热量，意味着其它物体减少了多少内能．而这两者之和等于系统内能的增量，这就反映了在此物理过程中系统和外界的总能量是守恒的．所以说，热力学第一定律就是在与热现象相关的物理过程中能量守恒定律的具体形式．如果把热力学第一定律所考察的能量推广到系统所具有的一切能量(内能、机械能、电磁能等等)，相应地式中的功 W 包括外界对系统所作的一切形式的功的总和，那么热力学第一定律就推广为能量守恒定律，即：自然界中一切物质都具有能量，能量具有各种不同的形式．各种形式的能量都能从一种形式转化为另一种形式，由一个系统传递给另一个系统，而在转化和传递过程中总能量是守恒的．

能量守恒定律的确立是在生产实践和科学实验的长期发展中形成的．这个定律自从建立以来，直到目前，不但没有发现过任何

违背这一定律的事实，而且大量新的实践不断证明着它的正确性，丰富着它所概括的内容．

[思考题]

(1)试分析以下说法是否正确？

①一个固体，50℃时含有的热量一定多于30℃时的热量．

②1摩尔某种实际气体，温度为20℃时的内能一定比10℃时的内能大．

③由于理想气体的微观模型，不计分子间的相互作用力，因而一定质量的理想气体等温膨胀时内能不变，绝热压缩时温度不变．

④原来与真空区隔开的气体，突然抽掉隔板，使气体向真空区膨胀的过程叫做自由膨胀．理想气体自由膨胀时温度不变；实际气体自由膨胀时温度降低．

(2)试讨论热力学第一定律 $\Delta E = Q + W$ 中三个量，在理想气体实施的下列过程中，哪个量是正？哪个量是负？①等容加热或冷却；②等压膨胀或压缩；③等温膨胀或压缩；④绝热膨胀或压缩．

三、物态变化

2.8 怎样从微观本质上解释晶体的宏观特征?

固体分晶体和非晶体两大类．晶体与非晶体相比具有下述三方面宏观特征:

[Ⅰ]晶体具有规则的几何外形,而非晶体没有确定的规则外形．

[Ⅱ]晶体具有各向异性的特征,而非晶体各向同性．所谓晶体各向异性,是指它在各个方向上的物理性质不同．例如:云母的结晶薄片在外力作用下很容易沿薄片的平行面裂开,若要使其沿垂直于薄片平面的方向断裂则相当困难;岩盐晶体受打击时,总是沿着相互垂直的三条棱的方向碎裂成小立方体．晶体的这种易于劈裂的平面称为解理面．显露在晶体外表面的晶面往往是一些解理面．解理面的存在说明晶体在不同方向上具有不同的力学性质．而非晶体各向同性,不存在解理面,碎裂时其碎片的形状完全是任意的．此外,如云母晶体在各方向上的导热系数不同,石英晶体在不同方向上的热膨胀系数和电阻率不同,冰洲石晶体在不同方向上的光速不同,等等．所有这些均表明晶体具有各向异性的特征．

[Ⅲ]晶体在一定的压强下具有确定的熔点,而非晶体没有确定的熔点．

如果整个固体就是一个晶体,能体现出上述三方面宏观特征,这样的固体叫做单晶体;如果整个固体由许许多多杂乱无章地排列着的小晶体(晶粒)所组成,这样的固体叫做多晶体．如常见的金属材料就是多晶体．多晶体的每个晶粒都是一个小单晶体,同样具有上述晶体的三方面宏观特性．但是由于多晶体内部的无数多晶粒是杂乱无章地排列着的,所以整个多晶体不再呈现出规则

的几何外形和各向异性，只是仍然具有一定的熔点．

晶体的上述宏观特性是由它们内部的微观结构所决定的．早在19世纪中期就有人提出一种设想，认为晶体内部的粒子是规则地排列而成的．1912年劳埃首先利用 X 射线衍射现象，证实了晶体内部粒子规则排列的假设是正确的．目前已经能直接用电子显微镜对晶体的内部结构进行观察和照相．对晶体内部微观结构的研究已经达到相当深入的程度，形成了一门内容丰富的学科——晶体结晶学．

晶体中粒子的规则排列有两个特点：一是周期性；二是对称性．为了描述晶体内部粒子规则排列的具体情况，人们从实际晶体中抽象出一种理想模型——晶体的空间点阵．即用“点”表示晶体内部粒子（分子、原子、离子或原子集团）的质心，这些“点”所在的空间位置叫做结点．由于晶体中的粒子是有规则地、周期性地排列着的，因而代表粒子质心位置的所有结点将按照一定的规律在空间排列成整齐的行列．这种所有结点所排列成的行列的总体称之为空间点阵．

所谓空间点阵的周期性，是指从点阵中任何一个结点出发，向任何方向延伸，如果经过一段距离后，遇到另一个结点，则经过相同距离后，必然会遇到第三个结点，如此类推，如图2-3所示．这种距离称为平移周期．晶体的点阵在不同的方向上有不同的平移周期．

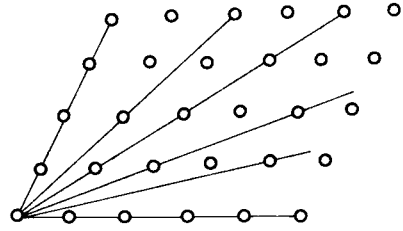


图2-3

晶体的宏观特性，都可以根据上述内部微观粒子排列的规则性来解释：

(1) 晶体有规则的几何外形，显然是由于内部粒子的规则排列所形成的．由于各种晶体的空间点阵有不同的排列方式，所以不同的晶体有不同的形状．

(2) 晶体的各向异性，可以根据晶体点阵在不同方向上粒子的排列情况不同和平移周期不同来说明．譬如，图 2-4 所示的岩盐晶体的空间点阵中，*AB* 和 *CD* 两平行平面上粒子的排列情况相同，都是一个钠离子(黑点表示)和一个氯离子(圆圈表示)相间排列的．而 *EF* 和 *GH* 两平行平面上粒子的排列情况就不同了，*EF* 面上都是纳离子，*GH* 面上都是氯离子；而且 *AB* 和 *CD* 两平行平面间的距离大于 *EF* 和 *GH* 两平面间的距离．因此，*EF* 和 *GH* 面上的粒子之间的相互作用力，截然不同于 *AB* 面与 *CD* 面上粒子之间的作用力．显然，在同样大小的外力作用下，岩盐晶体容易沿 *AB*、*CD* 等平行平面分离，而不容易沿 *EF*、*GH* 等平行平面分离．所以捶碎的岩盐总是呈小立方体形．这就是岩盐晶体有解理面的原因，它反映了晶体力学性质的各向异性．关于晶体导热、导电等性质的各向异性，可以用晶体点阵各方向上的平移周期不同去说明．由于晶体点阵各方向的平移周期不同，因而沿不同方向的等大距离上所排列的粒子数目不同，有的方向上粒子的排列较密，有的方向上较疏，于是造成不同方向上导热、导电等性质的不同．

(3) 晶体有一定的熔点的特性，也是由它空间点阵的微观结构所决定的．在晶体中维持微粒规则排列的是微粒之间的相互作用力，通常称之为结合力，它使粒子不能脱离开平衡位置，而只能在平衡位置附近做无规则的振动．给晶体加热时，晶体从热源获得的热量，主要用来增加粒子振动的平均动能，使晶体温度升高，粒子的热运动加剧．当温度升高到一定值时，一部分粒子具有了足够的动能，能够克服粒子间的结合力而离开平衡位置，使点阵结

构破坏，晶体便开始熔化．这时的温度就是熔点．在熔化过程中晶体继续吸热，获得的能量用来不断地破坏点阵结构，使粒子间的势能增大，而平均动能并不改变．所以在熔化过程中，晶体的温度保持在熔点不变，直到内部的点阵结构全部被破坏，晶体完全熔化成液体．当晶体全部熔化后，如果热源继续供给热量，则液体的温度将继续升高．

以上就是晶体宏观特征的微观解释．

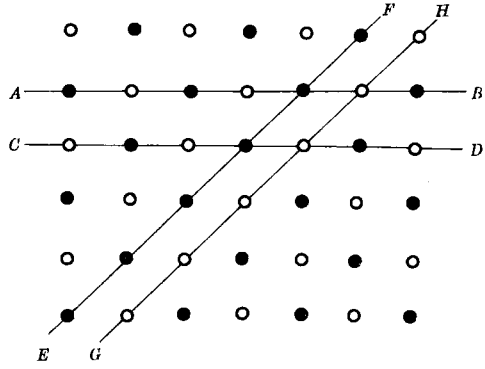


图 2－4

2.9 影响熔点的因素是什么？0℃是纯水温度的下限吗？

物质从固态变成液态的过程叫做熔化，从液态变成固态的过程叫做凝固．2.8 中已阐明晶体具有一定的熔点以及晶体熔化的微观机理．凝固是熔化的逆过程，所以液体的凝固也有一定的凝固点，且同种物质的熔点和凝固点相同．

那么有哪些因素会影响物质的熔点高低呢？实验证明，熔点的高低决定于：第一、物质本身的性质；第二、外加压强的大小．第一条因素是显而易见的，毋需解释．我们着重讨论一下第二条．实验和热力学的理论都表明，压强对熔点的影响，是与熔化时体积

的变化直接相关的．对于熔化时体积膨胀的物质来说，增大压强时熔点将升高；对于熔化时体积缩小的物质来说，增大压强时熔点将降低．这是为什么呢？对此，可定性地简要说明如下：

当晶体的温度升高时，内部构成空间点阵的粒子，平均动能将增大，热运动将加剧，粒子间的平均距离随着增大，宏观上表现为晶体的体积膨胀．这就是熔化前的热胀冷缩现象．当温度升高到熔点时，粒子间的平均距离相应增大到一定程度．这时由于粒子间的平均距离增大了，相互作用力减弱了，而粒子的热运动加剧了，平均动能变大了，如果继续吸热，点阵就开始崩溃，即晶体开始熔化．对大多数物质来说，在熔化过程中由于要使粒子脱离开点阵的束缚，在更大的范围内运动，粒子间的平均距离必定还要增大，于是表现为熔化时体积膨胀．如果这时外界压强增大，阻碍晶体体积的膨胀，以致在同样温度下，粒子间的平均距离未能增大到熔化时应该达到的程度，于是阻碍了熔化过程的进行．那么只有继续加热，使晶体温度再升高，热运动再加剧，才能克服外加压强的作用，使粒子间的平均距离扩大到熔化过程必须达到的程度，使其开始熔化，所以说，对这类晶体加大压强时，熔点将升高．

另外也有少数物质，如冰、铋、灰铸铁等，熔化时体积反而缩小，对这类物质来说，当它们所受的压强增大时，客观上促使它体积缩小，于是将促进熔化过程的进行，从而使其熔点降低．例如，当外加压强大于一个标准大气压时，冰的熔点将低于0℃．实验证明，在130个大气压下，冰的熔点将降低到－1℃．所以说，0℃并非是纯水温度的下限．那么如何解释这种现象呢？对此，首先需要弄清的问题是为什么这类物质熔化时体积反而缩小，凝固时体积反而增大？这个问题可初浅地说明如下：这类物质的一个重要特点是，在凝固前随着温度的下降，液体内部的分子往往先一群一群地聚集成较大结晶结构的“分子团”．也就是说原先一个个单独行动的微粒，慢慢形成由许多粒子结合起来的较大的“颗粒”．而这种较大的“颗粒”之间必有较大的空隙，因而体积反而增大了．

打个比方说：把一升小米，粘结成一块块的小米糕，再放入容器中，总体积必将超过一升．水在0℃与4℃之间表现出冷胀热缩的现象，就是这个道理．当这样的液体温度继续下降、达到凝固点时，由这些不断增长着的“分子团，按一定的规则“堆积”起来，凝固成晶体，以致体积进一步增大．这就是这类物质凝固时体积膨胀的原因．因此，当外界加大压强时，由于这类物质凝固时体积的膨胀趋势受到阻碍，于是凝固点有所降低．而同种物质的熔点和凝固点相同，凝固点的降低也就是熔点的降低．

总之，固体熔点的高低首先决定于物质自身的性质，如在标准大气压下，金的熔点高达1064.43℃，而汞的熔点是－39℃；其次，外加压强是直接影响固体熔点高低的因素．对于熔化时体积增大（或减小）的物质来说，增大压强将使其熔点升高（或降低）．

2.10 怎样从宏观现象和微观本质上说明蒸发和沸腾的特点？高山上煮不熟饭是因为水不易烧开吗？

物质从液态变成气态的过程叫做汽化；从气态变成液态的过程叫做液化，也叫凝结．汽化有两种方式：蒸发和沸腾．

蒸发和沸腾在宏观现象上的区别可以概括为两点：

第一、蒸发是发生在液体表面的汽化过程；沸腾是在液体表面和内部同时进行的汽化过程．

第二、蒸发可以在任意温度下进行；而在一定的外界压强下，沸腾只能在某一特定温度下进行，沸腾过程中温度不变，这个温度叫做液体在该压强下的沸点．

下面我们运用分子运动论的观点分别分析一下蒸发和沸腾的主要特点：

1．蒸发现象

液体里的分子都在不停地做着无规则运动，任意时刻各个分子运动的速度和动能不相同，有的速度大，有的速度小．当处于液面附近的某些分子的动能，大于它逸出液面时克服液体内部分子

的引力所需要作的功时，这些分子就可能逸出液面成为汽分子．这就是蒸发现象的微观机理．

由于分子的运动是无规则的，液体在任何温度下内部总有一些速度和动能比较大的分子，当这些分子处于液体表面附近时就有可能逸出液面而汽化．所以液体在任何温度下都能蒸发．

根据上述蒸发现象的微观机理，很容易说明：为什么温度越高、液体表面积越大、液面上空气流动越快，蒸发就越快？为什么液体蒸发能致冷？这里我们就不准备讨论了，请读者自己分析．对初中物理教学来说，蒸发快慢条件和蒸发致冷现象也是重点课题之一，教师应该重视对这个课题的教学．尤其要多设计一些简易直观的演示实验，使学生在接受事实的基础上自觉地去寻求理论解释．

2．沸腾现象

在外界压强一定的条件下，对液体加热，当达到某一温度时，液体内部和器壁上涌现出大量包含蒸气的气泡，整个液体上下翻滚，剧烈汽化，这种现象称为沸腾．沸腾时由于汽化的剧烈进行，外界供给的热量全部用于液体的汽化上，所以液体的温度保持不变，直到液体全部变成气体为止，这个温度就叫做液体在相应压强下的沸点．

实验证明，同种液体在不同压强下的沸点不同．液体的沸点随外加压强的增大而升高．这是为什么呢？对这个问题的解释首先要搞清饱和蒸气压的概念．

大家知道，盛在密闭容器中的液体，虽然液面上也在蒸发，但永远不会干涸．这是因为在液体蒸发的同时，液面上的汽分子由于无规则运动也在不断地碰撞液面而被液化．当液面上汽分子的数密度大到一定程度时，使得单位时间内液体蒸发出去的分子数等于从蒸气里回到液体被液化的汽分子数，于是达到动态平衡，宏观上表现为蒸发停止了，汽分子的数密度不再改变．这种与液体保持动态平衡的蒸气叫做饱和蒸气（或饱和汽），相应的压强叫做

饱和蒸气压(或饱和汽压). 这种二相[①] 平衡共存的状态叫做饱和状态. 如果敞开液面上方的蒸气,或密闭容器中的单相气体,其气压小于该温度下的饱和蒸气压,则这种气体叫做未饱和汽.

饱和汽与未饱和汽的区别集中反映在压强的变化规律上. 未饱和汽的压强随温度和体积的变化近似遵从气体定律. 而饱和汽压首先与物质的性质有关,在相同的温度下容易蒸发的液体饱和气压大,不容易蒸发的液体饱和汽压小. 例如,同样在 0℃ 时,乙醚的饱和汽压是 185mmHg;酒精的饱和汽压是 12mmHg;水的饱和汽压是 4.6mmHg. 同一种液体的饱和汽压随温度和体积变化的规律也完全不同于气体定律,分述如下:

(1) 饱和汽压随温度的升高而显著增大. 这有两方面的原因:一是温度升高时单位时间内逸出液面的分子数增多了,达到动态平衡时的饱和蒸气的分子数密度增大了;二是由于温度升高,汽分子的热运动加剧了,亦即汽分子的平均速度和平均动能增大了. 这两方面的因素都使得在单位时间内碰撞单位面积器壁的汽分子数增多了,而且汽分子每次碰撞器壁作用于器壁的冲量增大了,从而使饱和汽压显著增大.

(2) 饱和汽压与体积的变化无关,只要容器中还有液体存在,改变容器的容积大小,液面上方的饱和蒸气压将保持不变. 这是因为温度一定时,单位时间内从液面上逸出的分子数是确定不变的,所以要维持动态平衡,单位时间内从液面上跑回到液体中去的汽分子数也不能变,于是要求蒸气的分子数密度不变. 当蒸气体积缩小时,刚开始由于汽分子密度有所增大,则单位时间内跑回到液体中去的分子数将增多,宏观上就表现为一部分蒸气液化,直到蒸气的分子数密度仍然减小到原来的数值,重新达到动态平衡为止,于是饱和汽压保持不变. 当蒸气的体积扩大时道理也一样,结

---

① 物理学中通常把物质系统中物理性质均匀的一种聚集态称为一个相. 如水是液相,冰是固相,水蒸气是气相,等等.

果只是使一部分液体汽化，而饱和汽压仍保持不变．

液体的沸腾是与液体内部及器壁上留存的小气泡密切相关的，这些小气泡起着汽化核的作用．由于这些小气泡是出现在液体内部的，所以泡内的气体主要是空气和液体的饱和蒸气，泡内的压强等于空气的压强 p_a 和液体的饱和蒸气压 p_s 之和，这个合压强（$p_a + p_s$）有使气泡胀大的趋向．同时气泡的外侧受到液体内部静压强的作用，它的大小等于液面上的外加压强 p 与液体自身受到重力所形成的压强 ρgh 之和．这个外压强（$p + \rho gh$）及气泡表面张力引起的附加压强 p'，有使气泡缩小的趋向．一般情况下，ρgh 和 p' 跟外加压强 p 相比均可忽略不计．于是讨论气泡内外压强的平衡条件时，只需考虑气泡内的总压强（$p_a + p_s$）跟外加压强 p 的关系．即当

$$p_a + p_s = p \tag{2-11}$$

时，就可以认为气泡满足了力学平衡条件，不会继续胀大．如前所述，液体的饱和蒸气压 p_s 是随着温度的升高而增大的．然而只要 p_s 还小于外加压强 p，(2-11)式总是能够满足的，亦即气泡总是能够维持平衡的．因为气泡内的空气压强 p_a 是随着气泡的胀大而减小的，所以即使当 p_s 增大到接近于 p（但仍小于 p），以致 $p_a + p_s > p$ 时，虽然气泡将有所胀大，但随着气泡的增大而 p_a 相应减小，所以最终仍将使气泡满足(2-11)式而维持平衡．可见，当 $p_s < p$ 时液体不会发生沸腾现象．只有当温度继续升高，直至液体的饱和汽压等于外加压强（$p_s = p$）时，则气泡内的总压强（$p_a + p_s$）总是大于外界压强 p，于是气泡无论怎样胀大也不能再维持平衡．此时气泡将骤然胀大，并在浮力作用下迅速上升，把泡内的饱和蒸气带出液面．于是整个液体的表面和内部都剧烈汽化，即形成了沸腾现象．沸腾过程中温度不变，这个温度就是沸点．

以上分析表明，液体沸腾的条件是：液体的饱和蒸气压达到跟外界压强相等．而液体的饱和蒸气压是随着温度的变化而变化的，所以液体的沸点也随外加压强的改变而改变．外界加在液面

上的压强越大，沸点就越高．

沸点随外界压强变化的规律，在生活和生产上都具有重要的意义．譬如，高山上气压低，所以水的沸点较低，如珠穆朗玛峰顶上的大气压强仅为 250mmHg，水的沸点约为 72℃ 左右．这就是说，在那里把水烧到 72℃ 左右就开了，再继续加热，只能使水不断汽化，而温度不再升到，所以难以把饭煮熟．可见，高山上煮不熟饭，不是因为水不容易烧开，而是由于水在 100℃ 以下就开了，水温不能再升高．因此，高山上做饭需要采用高压锅．高压锅中的蒸气压强可以达到几个大气压，使水的沸点大于 100℃，于是更容易把食物煮熟．

2.11 露、霜、云、雨、雪是怎样形成的？

上面已阐明，未饱和汽与饱和汽的性质有很大差异，但两者在一定的条件下是可以相互转化的．把未饱和汽转化为饱和汽的途径有两条：

第一、压缩体积，增大压强．因为在温度不变的条件下，这样做可以增大汽分子的密度，当汽分子密度增大到等于该温度下饱和汽的分子密度时，原先的未饱和汽就转变成饱和汽了．若再压缩，汽分子就开始液化，而密度和压强不再增大．

第二、降低温度．因为饱和汽的密度和压强是随着温度的降低而减小的，而在体积不变的情况下，未饱和汽的密度不变，因此，当温度降低到某个值，使得该温度下的饱和汽密度就等于原先的未饱和汽密度时，那么原先的未饱汽就变成饱和汽了．如果再降低温度，汽分子就开始液化．

反之，增大容器的体积，或升高温度，使共存的液体全部汽化后，若再增大汽的体积或升高汽的温度，就可以使饱和汽变成未饱和汽．

进一步分析，饱和汽压不仅与温度有关，而且跟液体的表面形状有关．如图 2-5(a)所示：在凹液面的表面上取一分子 A．以 A

为中心，以分子间的有效作用距离为半径，作一个分子作用球，在这个作用球范围内的其它液体分子对 A 都具有作用力．显然，与平液面的情况相比，在凹液面内部多了一部分液体分子对 A 分子产生作用力(图中画着竖线的部分)．所以，分子 A 逸出凹液面时克服内部液体分子的引力而需要作的功，将比逸出平液面时需要作的功大一些，亦即分子逸出凹液面要比逸出平液面更困难．因而，单位时间内逸出凹液面的分子数将比平液面的情况少一些，从而凹液面上的饱和蒸气压比平液上的小．

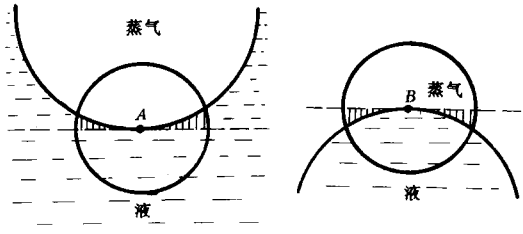


图 2－5

同样道理，按图 2-5(b)分析可知，凸液面上的一个分子 B 要逸出液面时，内部吸引它的液体分子数要比平液面的情况少一些，所以需要作的功较小，亦即分子逸出凸液面比逸出平液面容易些．因而达到动态平衡时凸液面上方的蒸气密度要比平液面上的大，也就是说凸液面上方的饱和蒸气压大于平液面上的饱和蒸气压．

由于分子间的引力有效作用距离很短，在气液分界面的曲率半径不太小的情况下，液面的弯曲对饱和蒸气压的影响很小，只有形成小液滴或小气泡时这种影响才会显示出来．据理论推算，在室温下凝结成水滴时，如果水滴的半径 $r=10^{-5}$cm，则其饱和汽压比平液面时约增加 1%；但当水滴半径 $r=10^{-7}$cm 时，则其饱和汽压约为平液面时的三倍．

利用以上饱和汽与未饱和汽及其相互转化的知识，可以解释露、霜、云、雨、雪的成因：

(1) 秋夏之交，白天气温较高，大地河湖草木等都在蒸发，空气中存在着一定密度的未饱和水蒸气，到深夜凌晨，气温下降，使空气中原来未饱和的水蒸气达到饱和状态，于是就凝结成水滴，形成花草禾叶上的露珠．通常，由于温度下降，刚刚能使空气中的未饱和水汽达到饱和状态的那个温度，叫做露点．这个“露点”的命名，实际上就是来自人们生活经验中“露”的概念．

(2) 寒冬的晴朗天气，空气中同样存在着一定的未饱和水汽．也是由于气温低，大地的蒸发量小，空气中水蒸气的密度较小，有时低于0℃时的水的饱和蒸气压．到凌晨气温骤降到0℃以下，不仅使空气中的水蒸气达到了饱和，而且由于气温低于水的凝固点，于是使空气中的水蒸气直接凝华为冰晶，从而在地上形成一层霜．农民为了防止寒霜冻坏庄稼，常常在夜间到田坎地边，燃烧秸杆草木等散放浓烟，其目的就是利用浓烟中的“微粒”作为凝结中心，促使空气中达到饱和状态的水蒸气在空中凝结，形成一层雾，覆盖住庄稼，防止在庄稼上结霜．

(3) 水蒸气和空气中总是充满着尘埃、杂质、带电粒子等微粒，水汽分子很容易依附在微粒的表面上或受带电粒子的静电吸引而聚集在它们的周围，形成具有一定半径的小液滴，这时凝结就很容易发生．一般说来，只要周围的水汽压超过平液面上的饱和水汽压1%左右，凝结就能进行，使小液滴逐渐增大．地球周围大气层的厚度约为1000公里，按高度可分为对流层、同温层、电离层、逃逸层．其中对流层厚度约为6～8公里．各种气象变化都发生在对流层内．大气的温度随高度的升高而降低，大约每上升100米降低0.6℃．所以在地面附近的未饱和水蒸气，上升到高空就会达到饱和，而凝结成无数多大小不同的水滴而形成云．在高空，由0℃以上的水滴构成的云称为暖云．在暖云中有大小水滴共存时，由于它们对应的饱和蒸气压不同，不能维持平衡．较大的

水滴由于表面曲率半径大，对应的饱和蒸气压小，周围的小蒸气对它们来说可能是过饱和的，于是水蒸气将在这些较大的水滴上继续凝结，使它们不断增大；原来的小水滴表面曲率半径小，对应的饱和蒸气压大．由于周围的水蒸气在大水滴上凝结时，使水蒸气的密度趋向变小，以致对这些小水滴来说将成为未饱和的，因而它们将蒸发为水汽而消失．就这样，原来的小水滴在不断蒸发以至消失，而大水滴却越来越大，最后就落到云外而形成雨．温度低于0℃时云中的水滴形成冰晶，这种云称为冷云．但往往还有一部分水滴未凝固而与冰晶共存，这种云称为混合云．同样道理，在冷云和混合云中，由于冰晶大小不同，且冰晶上的饱和蒸气压小于水滴上的饱和蒸气压，有些冰晶不断长大，最后落到云外就形成雪和雨．

[思考题]

(1)气温在0℃以下的寒冬，一根铁丝两端悬挂重物，横跨在一个冰块上，时隔一夜，铁丝嵌入冰块中，而上方冰块仍然完整无缝，这是为什么？

(2)水的三相点温度(273.16K)为什么高于冰点？

(3)什么叫饱和状态？饱和蒸气压由哪些因素所决定？跟哪些量的变化无关？

(4)试估算100℃时饱和水蒸气的比容(每千克水蒸气的体积)(**提示**：饱和水蒸气可以看作理想气体，满足 $p = nkT$．$k = 1.380 \times 10^{-23}\mathrm{J \cdot K^{-1}}$)

(5)有时天空中有大量云层，云很低而不下雨．为了达到人工降水的目的，可把干冰(固态二氧化碳)和碘化银粉末引入云中，促使其降雨．这是为什么？

(6)当水处在三相点时，在下列情形下物态将如何变化？①绝热压缩；②绝热膨胀；③降低温度．

第三篇　电　磁　学

一、电　　流

3.1　从微观机构看什么是电流

水的定向移动形成水流，与这相似，电荷的定向移动形成电流．那么，电荷的定向移动又是怎么形成的呢？我们以金属导体为例，用经典电子论的观点来描述电流的微观图象．

1．电子的热运动不能形成电流

金属的原子容易失去最外层电子成为原子实，它是由原子核和剩下电子组成的，具有完整而稳定的结构；失去的电子叫自由电子．金属中含有大量的自由电子，它们的整体常称为电子气．固态金属的原子实排列成空间点阵，并在点阵上的平衡位置附近做不停的热振动．点阵间隔对于电子来说是很大的空间，自由电子可以在其中跑来跑去，做无规热运动，并不时地彼此碰撞或与点阵上的原子实碰撞，其轨迹是一条折线(如图 3－1)．

在通常温度下，电子热运动的平均速率 $\bar{v}$ 很大，其数量级是 10^5 米/秒．但是热运动的方向杂乱无章，从宏观上看，自由电子的无规热运动没有集体定向的效果，因此并不能形成电流．

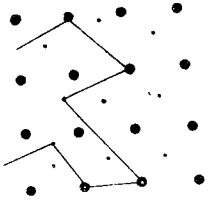


图 3－1

2．电场是维持电流的原因

通常情况下，导体内部原子实和自由电子是均匀分布的，处处呈中性，没有电

场，也没有电流．如果导体内存在电场，电子就一方面做无规则热运动，另一方面，在电场力作用下，逆电场方向做加速运动．前者对电子的宏观定向移动仍无贡献，后者因为是所有电子都要做的同方向运动，因而能形成电子整体上的宏观定向移动，即产生电流．

由于与晶体点阵的碰撞，自由电子定向速度的增加受到了限制，电子与晶体点阵碰撞后将沿什么方向散射，具有很大的偶然性．可以假设电子碰撞后散射的速度沿各方向的概率相等，电子完全丧失了定向运动的特征．以后重新开始新的历程，重复上一历程中的经历．事实上，自由电子的轨迹将沿着电场的反方向漂移，正是这种宏观上的漂移形成了宏观上的电流．各个电子的移动速率不尽相同，定向移动平均速率用 $\bar{u}$ 表示．在通常温度下，一般导线中的电子定向移动平均速率 $\bar{u}$ 的数量级是 10^{-4} 米/秒，远远小于它的热运动平均速率 $\bar{v}$［可根据(3－2)式估算 $\bar{u}$，见下面思考题(1)］．

3．电流［强度］的微观表达式

在导体内作底面为 S、高为 $\bar{u}t$ 的直圆柱体，t 表示时间，让底面与电子移动方向垂直(如图 3－2 所示)．设金属中自由电子的数密度是 n，则柱内自由电子的总电量 $q = nes(\bar{u}t)$，其中 e 是电子电量的绝对值．这些电量在 t 时间内通过 S 面．根据电流［强度］I 的定义，它是单位时间内通过导体横截面的电量，即 $I = \frac{q}{t}$，可以得到电流［强度］的微观表达式：

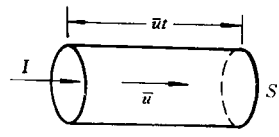


图 3－2

$$I = neS\bar{u} \qquad (3-1)$$

这个式子表明了金属导电时，电流［强度］和自由电子平均定向移动速率之间的关系．

如前所述，电子的定向移动平均速率受到电场力以及电子与点阵碰撞这两个对立因素的支配，而平均定向移动速率是对大量电子的定向移动的速率求平均，所以从(3－1)式可以看出金属导体中电流的微观实质：它是自由电子在电场力作用下，克服与晶体点阵的碰撞，做定向移动的平均效果．

3.2 为什么发电厂送电闸刀一合，远近用户的电灯立刻就亮？

原来，形成电流时的传导速率与电子的平均定向移动速率($\overline{u}$的数量级只有10^{-4}米/秒)不是一回事，二者之间没有关系．闸刀未合时，处于静电平衡状态的导线内部没有电场，电子没有定向移动，导线中无电流．但是导线外部空间有电场，它的分布情况由导线表面电荷和闸刀以及和其他电路元件上的电荷分布情况决定．为了形成电流，需要在导线中建立电场，这个电场是以电磁波的形式从导线外部传入的．所以，电流的传导速率，就是电磁波的传播速率这个速率等于光速，约是3.0×10^{8}米/秒．具体过程如下：闸刀一合，在闸刀闭合处电荷分布发生改变，就有电流出现，同时附近的电场改变，产生磁场，而这个磁场也是变化的．这就是说，闸刀闭合处出现了电磁扰动．电磁扰动以电磁波的形式迅速向远处传播，而导线能把电磁能引向导线内部，使导线内迅速建立起电场，驱动着导线内各处的电子定向移动，于是迅速在全电路形成电流．而闸刀的闭合保证了电路的畅通，使整个电路上持续通过电流．由此可见，电流的迅速传导并非是合上闸刀后，电子立即从发电厂跑到用户电灯那里了，也不是电子间依次碰撞迅速传递定向运动的结果．打个比方说：操场上排着一列长队．司令员在排尾处发出“起步走”的口令，全队几乎同时起步，立即形成从排尾到排头的“人流”．显然，这个“人流”的迅速形成，既不是排尾的人立即跑到了排头处，也不是由排尾到排头的队员依次推动的结果，而是由于声波传播了口令，所有队员都闻声而动，形成了“人流”．所以

这个“人流”的“传导”速率就等于声波的传播速率，而不是队员的行走速率．电流的传导速率与电子的平均定向速率的区别，跟这个“人流”的“传导”速率与队员的行走速率的区别是很相似的(当然，两者的物理实质不同)．

3.3 怎样理解电流的方向？电流〔强度〕是矢量还是标量？

电流有大小、有方向，其大小用电流〔强度〕表述；方向规定为正电荷移动的方向．实际问题中，既有正电荷移动形成的电流，也有负电荷移动形成的电流．例如电解液中正、负离子导电，半导体中空穴和电子导电等．因为负电荷移动可以等效地看作是正电荷的反向移动，所以这个规定并不影响我们研究电流的有关问题．既然电流有大小、有方向，那么电流是矢量吗？

我们知道，电荷的定向移动形成电流，这是对电流概念的原始表述，它本身并不构成物理量，正如振动的传播形成波，波不是物理量一样．从这个意义上看，谈电流是否是矢量是没有意义的．

电流的大小用电流〔强度〕描述．电流〔强度〕是电量标量与时间标量的商，所以它也是标量，不是矢量．实际上，电流〔强度〕只是在整体上反映电荷流经导体某横截面的情况，其量值等于单位时间内通过该横截面的电量，它是一个借以描述电路中电流强弱的物理量．电流〔强度〕的定义中并没有规定方向，但是在实际问题中利用电流〔强度〕讨论电路中的电流状况时，必须考虑电流的方向．

电流〔强度〕不能细致地描述电流在导体内各点的分布状况，它不是空间点函数．为此，电磁学中又引入了一个矢量点函数——电流密度 $\boldsymbol{j}$．导体中某点 $\boldsymbol{j}$ 的大小等于过该点并与电流方向垂直的单位面积上的电流〔强度〕．根据(3－1)式，可得电流密度大小的微观表达式：$j = ne\bar{u}$．$\boldsymbol{j}$ 的方向规定为正电荷移动的方向，与前述电流方向的规定一致．因此可以写出金属导体中电流密

度矢量的微观表达式：

$$\boldsymbol{j} = -ne\boldsymbol{u}^* \tag{3-2}$$

其中 $\boldsymbol{u}^*$ 是自由电子平均定向移动速度．负号表示 $\boldsymbol{j}$ 与 $\boldsymbol{u}^*$ 的方向相反．

虽然电流密度和电流〔强度〕都是描述电流的物理量，但两者的涵义和特性迥然不同．电流密度 $\boldsymbol{j}$ 是一个矢量点函数，它细致地描述了导体中各点电流的分布状况，(3－2)式表明某点的电流密度确切地反映了电荷流经该点时的快慢程度和方向(因式中 ne 是定值，$\boldsymbol{j}$ 体现了 $\boldsymbol{u}^*$)；电流〔强度〕I 只是从总体上描述了通过导体横截面的电流强弱和流向．一段电路中电流的方向，亦即电流〔强度〕的方向只有两种可能的情况：不是从这一端流向另一端，就是从另一端流向这一端，而跟导线的弯曲状况完全无关．讨论复杂电路中的电流时，往往需要先规定电路绕行的正方向，凡是流动方向与电路绕向相同的电流取正值，反之则取负值．当若干支路的电流汇集于同一段电路时，则总电流〔强度〕就等于从各支路上流入的电流〔强度〕的代数和(不是矢量和)．我们在绪论 0.2 中曾指出：若一个物理量虽有大小和方向，但是它们相加减时并不遵循平行四边形法则，那么这个量仍然是标量，而不是矢量．电流〔强度〕就是属于这一类标量．

3.4 电解液是怎样导电的？

电解质溶液和熔融状态下的电解质统称电解液，它们是不同于金属的另一类导体．金属靠自由电子导电，称为第一类导体；电解液靠离子导电，称为第二类导体．金属导电时只产生焦耳热，不发生化学变化．电解液导电时，总是伴随着某种化学反应，产生新物质．干电池、蓄电池等化学电源就是靠电解液导电的．

电解液导电的微观机制可简述如下：如果电解液中无电场，液体中正负离子做无规则热运动，不能形成电流．若有电场，正负离子在其热运动上分别迭加了一个顺着和逆着电场方向的加速运

动，同时又因为不时发生碰撞而受到阻力，限制了离子定向速率的增大．稳定时，正负离子各自以一定的匀速率向正负极定向移动．电解液中的电流密度就是正负离子电流密度的矢量和，而通过某截面的电流〔强度〕就是单位时间内通过该截面的正负离子的电量的绝对值之和．

值得注意，关于电解液导电存在着一个很容易搞错的问题．如图 3－3 所示：假定导线中的电流〔强度〕是 I，在 t 时间内通过导线上任一截面的电量 $q = It$，对应地通过了 N 个电子．电解槽里的电解液是中性的，正负离子都显一价，于是在 t 时间内到达两极的离子数各是 N．有人据此得出结论：通过电解液中任一横截面的正负离子总数是 $2N$，这就是说，电解液中的电流〔强度〕是导线中电流的两倍．

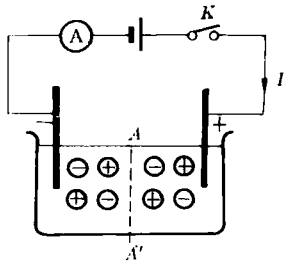


图 3－3

显然，这个结论是错误的．错在何处？分析如下：

电键 K 接通前，液体中正负离子可以看作是均匀分布的．接通 K，正离子向负极迁移．于是从负极到正极，正离子浓度逐渐减小．这个浓度梯度使正离子向正极扩散，与迁移方向相反．对负离子可以作类似的分析．扩散与迁移平衡时，正负离子各自均匀分布．在电解液中任取横截面 AA'，不妨假定 AA' 在槽宽的中间．由于离子均匀分布，AA' 两边各有 $\frac{N}{2}$ 个正离子和 $\frac{N}{2}$ 个负离子．t 时间内，AA' 左边的 $\frac{N}{2}$ 个负离子向右通过 AA' 移向正极，AA' 右边的 $\frac{N}{2}$ 个正离子向左通过 AA' 移向负极，合起来，通过 AA' 的离子总数是 N．另外，AA' 左边原来还有 $\frac{N}{2}$ 个正离子，右边

原来还有$\frac{N}{2}$个负离子，它们分别直接移向负极和正极，无须通过AA'，于是到达任一极的离子总数也都是N. 即通过液体中任一横截面的离子总数都等于导线中通过的电子数，它们的电流〔强度〕都相等．

3.5 为什么串联电路电流〔强度〕处处相等，并联电路干路上的电流〔强度〕等于各支路电流〔强度〕的和？

首先需要指出，这个结论是对稳恒电流得出的．

所谓稳恒电流是指导体内各点的电流密度不随时间变化．如前所述，电流密度不过是单位面积上的电流〔强度〕，所以，对于稳恒电流，导体任一截面上的电流〔强度〕也不随时间变化．电场是维持电流的原因，稳恒电流需要稳恒电场维持，而稳恒电场要求导体内以及电源上的电荷分布，即各处的净电荷（正负电荷代数和）的密度不随时间变化，因而任一物理小体积内的电量不随时间变化．

在稳恒电路中，任取电路的两个横截面S_1和S_2，它们与电路的侧面组成一个封闭面，如图3－4所示．因为电流不能流到电路外边去，侧面上没有电流．电流只能从S_1流进，从S_2流出．因为封闭面内的电量不随时间变化，根据电荷守恒，从S_1流进封闭面的电流〔强度〕I_1一定等于从S_2流出封闭面的电流强度I_2. 因为横截面S_1和S_2是在电路中任意选取的，所以串联电路中电流〔强度〕处处相等．

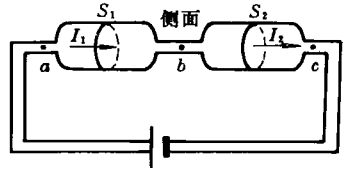


图3－4

在图 3－4 中想象地让 S_2 顺着电流方向绕行到 S_1 处与 S_1 贴合，仍然有 $I_1 = I_2$ 成立，这就是说，稳恒电流一定形成闭合电路．

对于并联电路，譬如说，三段电路连在一起．在各段电路中任取横截面 S、S_1 和 S_2，连同电路的侧面组成一个封闭面，如图 3－5 所示．于是，类似于上面的分析，从 S 流进封闭面的电流〔强度〕I 一定等于从 S_1、S_2 流出封闭面的电流〔强度〕I_1、I_2 的和，即并联电路干路上的电流〔强度〕等于各支路电流〔强度〕的和．

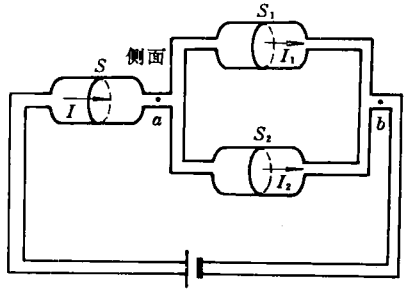


图 3－5

把图 3－4 和图 3－5 所示的电路想象为水管，其中的电流想象为水流，那么就能对本问题有一个更直观的理解．

二、电　　压

3.6　电压是电的压力吗?

教学中常做这样的比喻:如果在水管两端加上水压,管中就产生水流,如果在导体两端加上电压,导体内就产生电流,那么,电压是电的压力吗?这个问题的回答是否定的．对此,要从描述电场的基本概念说起．

1．电场强度和电势

我们知道,静电场可以用电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$ 描述,它的定义式是:

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q} \tag{3-3}$$

上式表明电场中某点电场强度的大小等于单位正电荷在场中该点受到的电场力,它只是给定场中位置的函数,与放入场中的电荷 q 无关．计算电场力 $\boldsymbol{F}$ 对放入场中电荷作的功,结果表明:静电场作的功与电荷移动的路径无关,只与起点和终点的位置有关,所以静电场是保守场,因而可以引进电势能和电势的概念．电势的定义是:电荷在电场中某点具有的电势能($\boldsymbol{\varepsilon}$)跟它的电量(q)之比,叫做电场在该点的电势,表作 U,即

$$U=\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{q} \tag{3-4}$$

同电场强度一样,在给定的电场中,电势只是场中位置的函数,与放入场中的电荷无关．

场强和电势是描述电场的两个基本物理量,它们分别从力和能的角度描述了电场的性质,彼此间存在确定的关系．由于静电场作功与路径无关,是保守场,当电荷 q 从起点 a 沿任一路径 L 移至终点 b 时,电场力做的功 W_{ab} 可以写成

$$W_{ab} = \int_a^b q\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{3-5}$$

另一方面，这个功又等于电荷电势能的减少，即

$$W_{ab} = \varepsilon_a - \varepsilon_b \tag{3-6}$$

式中 ε_a 和 ε_b 分别是电荷在起点和终点的电势能．利用(3－4)式，可以把(3－6)式换用起点和终点的电势 U_a、U_b 表示，即

$$W_{ab} = q(U_a - U_b) \tag{3-7}$$

由(3－5)式和(3－7)式可以得到场强和电势的积分关系：

$$U_{ab} = U_a - U_b = \int_a^b \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{3-8}$$

这个式子表明：只要空间两点存在电势差，这两点间必有电场，而电势差就是场强从一点沿任一路径到另一点的空间累积；反之，若两点间无电场，这两点一定等势．

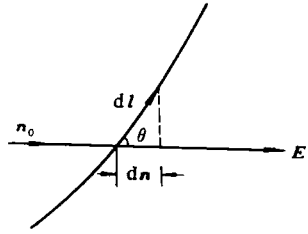


图 3－6

实际上，可以把(3－8)式中的 $\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 写成 $-\mathrm{d}U$．这就是说，场中两点之间的电压即电势差是从一点到另一点一系列元电势降落积累起来的．如图 3－6 所示，$-\mathrm{d}U = \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = E\mathrm{d}l\cos\theta = E\mathrm{d}n$，即

$$E = -\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}n} \tag{3-9}$$

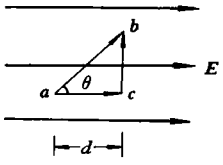


图 3－7

式中的 $\mathrm{d}n$ 是 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 在场方向投影的长，它恒为正，所以 E 的符号总与 $\mathrm{d}U$ 相反：$E>0$，$\mathrm{d}U<0$；$E<0$，$\mathrm{d}U>0$．这就是说，场强的方向指向电势降低的方向，而场强的大小等于沿场方向单位长度上的电压降，或者说场强等于电势沿场方向降落的梯度，这就是场强和电势的微分关系．就特例言之，在匀强电

场中，设 a、b 两点的电势差是 U_{ab}，a、b 间距离在场强方向的投影长是 d（图 3－7），则有 $E=\dfrac{U_{ab}}{d}$，这个式子表明：在匀强电场中，场强的大小等于沿场强方向单位距离上的电势差．

2．电压不是电的压力

静电场中两点电势之差即电势差，又叫做电压．由(3－7)式可知：

$$U_{ab}=\frac{W_{ab}}{q} \tag{3-10}$$

这个式子表明，场中 a、b 两点之间的电压就等于单位正电荷从一点 a 移动到另一点 b 时，电场力作的功．而电场力作功总是使正电荷向低电势的地方移动，使负电荷向高电势的地方移动．也可以把(3－10)式中的功 W_{ab} 换用电势能的减少 $\varepsilon_a-\varepsilon_b$ 表示，于是

$$U_{ab}=\frac{\varepsilon_a-\varepsilon_b}{q} \tag{3-11}$$

即场中 a、b 两点间的电压等于单位正电荷从一点 a 移到另一点 b 时其电势能的变化．由上所述可知，电压的概念本来是和电势能概念联在一起的，它本身不是力．

当然，场中两点存在电压时，其间必有电场，电场会对电荷产生作用力，但这力不是压力．什么叫压力？力学中对压力的定义是垂直作用在物体表面的力，这个表面是物体与物体的接触面，所以压力属接触力．而电场力无需接触，即使电荷与场源分开一段距离，电场力依然存在①．

最后，如前所述，稳恒电流需要稳恒电场维持，稳恒电场要求

---

① 现代物理学按力的基本性质区分，归结为四类，即：引力相互作用、电磁力相互作用、强相互作用和弱相互作用．所谓物体之间的接触力（压力、拉力、摩擦力等），从实质上说都是接触面上大量分子、原子等微观粒子之间的电磁相互作用的宏观表现，归根结底都是场力．但在讨论宏观力现象时，简单地区分接触力和场力，对问题的描述往往是十分方便的，所以人们仍然使用着“接触力”的概念．

电荷的分布不随时间改变．从这个意义上说，稳恒场与静电场相同，是保守场，因而可以引进电势能、电势、电势差即电压的概念．

3.7 为什么串联电路两端的总电压等于各部分电路两端电压的和，并联电路各支路两端的电压相等？

例如在图 3－4 所示的串联电路中，分布着稳恒电场，a、c 两点之间的电压就是它们之间的电势差．这个电势差等于 a、b 两点的电势差加上 b、c 两点的电势差，即 $U_a - U_c = (U_a - U_b) + (U_b - U_c)$．也可以这么说，电荷 q 从 a 经 b 移到 c 时，电场力做的功是 $q(U_a - U_c)$，它应该等于电场力在 a、b 之间做的功 $q(U_a - U_b)$ 加上在 b、c 之间做的功 $q(U_b - U_c)$，因而得出同样的结论．

对于并联电路，例如图 3－5．因为两支路的一端在 a 点联结，电势相等；另一端在 b 点联结，电势也相等，所以这两个支路两端的电势差相等，即电压都等于 $U_a - U_b$．也可以这么说，稳恒电场中，电场力作功与路径无关，只与起点和终点的位置有关．假定电荷从 a 点经过第一条支路到达 b 点时电场力作功是 qU_{ab1}，从 a 点经过第二条支路到达 b 点时电场力作功是 qU_{ab2}，由 $qU_{ab1} = qU_{ab2}$，得到 $U_{ab1} = U_{ab2}$，即这两条支路两端的电压都是 U_{ab}．

如果把图 3－4 和图 3－5 中的电路想象成水管，一端水位较高，另一端水位较低，用水位差比喻电势差，将有助于对本问题的理解．

3.8 电源的作用

我们先来考察两个无电源电路的例子．

设想导体的一端 A 带正电荷，电势较高；另一端 B 带负电荷，电势较低．于是导体内有一个电势梯度，即产生了静电场．在电场力作用下，正电荷向 B 端移动，负电荷反向移动，导体中产生电流．但是随着电荷的移动，A 端电势降低，B 端电势升高，最

后，两端电势相平，导体内电场消失，电流为零．

再假设有一闭合电路，如图 3－8 所示，设路中电流稳恒，假定路中只有静电场，那么沿着电流方向电势必然越来越低．想象某观察者从闭合电路的某点 A 出发，沿电流方向运动并测量各点的电势．当它运动一周回到出发点 A 时，必然发现 A 点的电势比它出发时所测数值要小，这与静电场中一个确定的点只能有一个电势的事实相矛盾．明言之，闭合电路中电流稳恒时，不可能只存在静电场．

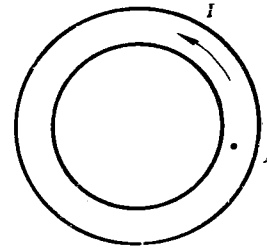


图 3－8

这两个例子说明同一个道理：单凭静电场不可能维持稳恒电流．为了维持稳恒电流，需要电源，日常经验也告诉我们这一点．那么，具体地说，电源的作用是什么呢？

1．电源——稳恒电场的维持者

从力的角度看，电源是提供非静电力的装置．

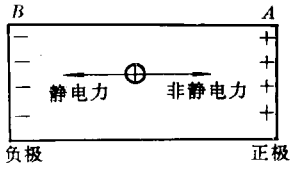


图 3－9

先考虑电源不接外电路的状态（即开路状态，见图 3－9）．假定电源内的正电荷受到从 B 指向 A 的非静电力，它就要从 B 向 A 移动；等效地，负电荷从 A 向 B 移动．一旦 A、B 分别出现正、负电荷，电源内就产生静电场，方向从 A 指向 B．静电力对抗非静电力，阻碍电荷的继续移动，平衡时，A、B 分别带有一定的正、负电荷，呈现出一定的电势差．一般把开路时电势高的一端（A 端）叫做电源的正极，低的一端（B 端）叫负极．

现在用导体把电源两极接通形成外电路（如图 3－10），两极上的正、负电荷便在导体内产生静电场．在静电力作用下，导体内

的正电荷沿外电路移向负极，负电荷反向移动．于是正极电势降低，负极电势升高；电源内部因静电场减弱非静电力又驱动正、负电荷分别向正、负两极移动．

就这样，在外电路，静电力使电流从正极流向负极，在内电路，非静电力对抗静电力，使电流从负极流向正极，静电力和非静电力共同作用，使电路中电场保持稳恒，电流沿闭合电路稳恒流动．

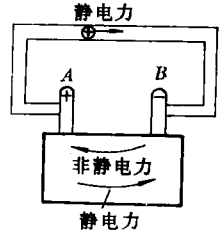


图 3－10

2．电源——电路中电能的来源

在电源内部，非静电能(例如化学电池中的化学能)提供的非静电力克服静电力作功，把正、负电荷分别移向正、负两极，提高电荷的电势能；在外电路，静电力作功，使正电荷移向负极，负电荷移向正极，把电荷的电势能转化为其他形式的能量(例如热能)，完成电流的闭合循环．可见，从能量角度看，电源是把别种形式的能量转化成电能的装置，它是电路中电能的来源；而存在于电路中的稳恒电场则是使电源所提供的电能向另一种形式的非静电能转化的中介．电能不过是这种转化的中间产物．

描述电源非静电力作功能力的物理量称为电源的电动势，用 $\mathscr{E}$ 表示，它等于把单位正电荷从负极经内电路移到正极时非静电力所作的功，即

$$\mathscr{E}=\frac{W}{q} \tag{3-12}$$

式中 W 表示非静电力的功，q 表示电量的绝对值．电源的非静电力作功消耗的是非静电能，所以，电动势又等于把单位正电荷从负极经内电路移到正极时需要的非静电能．这个非静电能转化为静电能，所以电动势又等于单位正电荷从负极经内电路移到正极时提高的电势能．由此规定电动势的指向：从负极经内电路指向正极．

我们知道，水泵的作用是凭借非重力来克服重力作功，把水从低处抽到高处，提高水的重力势能，而消耗的则是非重力势能，例如电能．与此相似，电源的作用就在于依靠非静电力作功，把正电荷(或负电荷)从低电势(或高电势)处移送到高电势(或低电势)处，使其它形式的能量转化为电能．

3.9 单靠电源两极上的电荷，能在外电路中维持稳恒电场吗？

电源的两极分别带有正、负电荷，它们在包括内、外电路的空间激发电场．在外电路中，电场驱动电荷定向移动形成电流，在电流稳恒的条件下，外电路中的电场也是稳恒的．那么，这种稳恒电场仅仅是由电源两极上的电荷维持的吗？为此我先来考察一个反例．

图 3－11 的弯曲电路中，P、Q 两点靠得很近，电流在这两点的方向相反，因此这两点电场反向．如果外电路中的稳恒电场真的只是由两极上的电荷维持的，P、Q 两点靠得很近，电场也该相近，现在却截然反向，叫人殊难相信．可见，一定还有别的电荷在起作用．它们又分布在哪里呢？对此，可从以下两个方面进行分析：

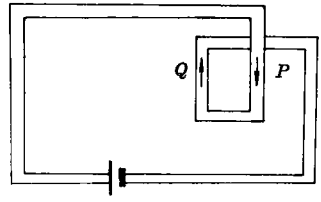


图 3－11

1．稳恒电路中，均匀导线内部电荷的分布情况

我们知道，静电场可以用电场线[①]形象地描绘．通过某面积 S 的电场线根数叫做通过该面积的电通量，用 Φ_e 表示，它实际上是场强对该面积的积分，$\Phi_e = \int_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$. 高斯定理反映了通过某封闭面 S 的电通量 Φ_e 与该封闭面内所包围的电荷之间的关系．其物理表述是：电场中任一闭合曲面的电通量，等于该曲面所包围的电荷的代数和的 $1/\epsilon_0$，即

$$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \frac{\sum_i Q_i}{\epsilon_0} \tag{3-13}$$

式中 ϵ_0 是真空电容率[②]．前已述及，稳恒场要求电荷的分布不随时间变化，从这个意义上说，稳恒场与静电场一样，高斯定理也成立．另外，稳恒电路中由稳恒电场维持电流的稳恒，稳恒电流密度 $\boldsymbol{j}$ 与稳恒场强 $\boldsymbol{E}$ 之间有着简单的线性关系，即 $\boldsymbol{j} = \sigma \boldsymbol{E}$，$\sigma$ 是导线电导率(参阅 3.10)．对外电路运用这个关系和高斯定理：在导线内任取封闭面 S，注意到均匀导线电导率 σ 是常量，就可以得出通过 S 的电通量 $\Phi_e = \oint_S \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \oint_S \frac{\boldsymbol{j}}{\sigma}\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \frac{1}{\sigma}\oint_S \boldsymbol{j}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$. 这个式子右边积分号里的 $\boldsymbol{J}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 实际上是通过 S 面上面元 $\mathrm{d}\overline{S}$ 的电流〔强度〕，所以 $\oint_S \boldsymbol{j}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 是流过 $\boldsymbol{S}$ 面的电流〔强度〕，即单位时间内流过整个封闭面的电量．3.5 中说过，电流稳恒时，导线内任一封闭面内的电量不随时间变化，因此，单位时间内流过任一封闭面的电量一定为零，或者说，单位时间内有多少电量流进封闭面，就有多少电量流出封闭面，即 $\oint_S \boldsymbol{j}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0$，这就是电流稳恒的条件．由此得出通过导线内任一封闭面的电通量 Φ_e 等于零，则根据高斯定理，封闭面内的净电荷必为零．封闭面 S 是在导线内部任取的，由此可得结论：稳恒电路中均匀导线的内部没有净电荷．

---

① 电场线又称电力线．

② 真空电容率又称真空介电常量．

2．稳恒电路中，导体表面以及导体内部不均匀处的电荷分布情况

在导线的表面以及导体内部不均匀处(如不同质导线的接头处)，电导率 σ 发生跃变．因此，如果在导线内作含表面在内的封闭面，计算通过该封闭面的电通量 Φ_e 时，σ 就不能作为常量从积分号内提出去，因而不能得出 $\Phi_e=0$ 的结果．这就是说，导线表面及内部不均匀处会有净电荷出现．这个结论跟我们开头提出的反例的论述相吻合，亦即电路中的稳恒电场不可能只是由两极上的净电荷维持的，必然还有别处的电荷在起作用．而上一段已证明均匀导线内部不可能存在净电荷，实际上这些电荷就出现在导线的表面及其内部不均匀处(如用电器的两端与输电线的联结处)．所以稳恒电路中，导线内部的稳恒电场是由电源两极上的电荷和分布在导线表面及内部不均匀处的净电荷共同维持的．

导线弯曲的形状改变时，导线表面的电荷会自动调整，调整的过程以电磁波传播速率的数量级进行，时间极短，其结果使空间电磁场迅速达到新的稳恒，导线内电场仍沿导线稳恒分布，电流沿导线稳恒流动．

三、电　阻

3.10　电阻、电阻率及其微观实质

电流经过导体要受到阻碍作用，就是说，导体有电阻．我们仍以金属导体为例，用经典电子论的观点来讨论电阻的微观实质．3.1 中说过，电子在电场力作用下逆电场方向定向移动，另外，电子还要做无规则热运动与晶体点阵碰撞．“电阻”所反映的是自由电子与晶体点阵上的原子实碰撞时造成对电子定向运动的破坏作用．下面我们对电阻率和电阻分别进行讨论．

1．电阻率的物理意义，决定物质电阻率大小的主要因素

实际上，电子与点阵碰撞后沿什么方向散射，具有很大的偶然性，各方向概率相等，亦即完全丧失了定向运动的特征，碰后电子的定向运动速度变为零．也就是说，每次碰撞之后，电子都是在电场力作用下，逆电场方向做初速为零的匀加速运动．两次碰撞之间的时间就是电子被加速的时间，它等于电子在两次碰撞之间走过的路程（自由程）除以电子的速率．对大量电子而言，平均加速时间

$$\bar{\tau}=\frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} \tag{3-14}$$

式中 $\bar{\lambda}$ 是电子对点阵碰撞的平均自由程，$\bar{v}$ 是电子热运动平均速率（因为 $\bar{u}<<\bar{v}$，式中忽略了 $\bar{u}$ 的影响）．电子的加速度 $\boldsymbol{a}=\frac{\boldsymbol{F}}{m}=-\frac{e\boldsymbol{E}}{m}$，其中 m 是电子的质量，于是可以写出电子的平均定向移动速度

$$\boldsymbol{u}^{*}=\frac{\boldsymbol{a}\bar{\tau}}{2}=-\frac{e\boldsymbol{E}}{2m}\frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} \tag{3-15}$$

把 $\boldsymbol{u}^{*}$ 代入(3－2)式，得到金属中的电流密度

$$j = \frac{ne^2\bar{\lambda}}{2m\bar{v}}E \tag{3-16}$$

或者写成

$$j = \sigma E \tag{3-17}$$

其中，σ 是金属的电导率，由

$$\sigma = \frac{j}{E} \tag{3-18}$$

可知，电导率等于金属中单位场强所产生的电流密度，它描述了金属的导电能力．电导率的倒数是电阻率 ρ，$\rho = \frac{1}{\sigma}$，由(3－18)式得

$$\rho = \frac{E}{j} \tag{3-19}$$

上式表明，电阻率等于在金属中产生单位电流密度需要的场强，它反映了金属材料对电流的阻碍作用的性能．

电阻率和电导率从两个相反的方向描述了金属的导电性能．由(3－16)和(3－17)式可知

$$\rho = \frac{2m\bar{v}}{ne^2\bar{\lambda}} \tag{3-20}$$

可见，金属材料的电阻率与场强和电流密度无关，与具体导体的几何形状也无关，它只决定于金属材料自身的微观结构和热运动状态．(3－20)式中的$\frac{\bar{v}}{\bar{\lambda}}$是单位时间内电子和点阵的平均碰撞次数，叫做平均碰撞频率，它不仅与材料性质有关，还与温度有关．(3－20)式表明：某种金属材料的电阻率(ρ)，跟金属内的自由电子数密度(n)成反比，跟电子和点阵的平均碰撞频率($\frac{\bar{v}}{\bar{\lambda}}$)成正比．这个结论的物理实质是很显然的：碰撞愈频繁，对电子定向移动的破坏作用愈大，即对电流的阻碍作用大；电子的数密度愈小，在同样的外加电场作用下只能形成较小的电流密度，宏观上表现为电导率小，而电阻率大．

2．电阻的物理意义和决定导体电阻大小的条件

假定导体是均匀材料制成的直圆柱体，长为 L，横截面积是 S，如图 3－12 所示．若导体两端的电压是 U，横截面上的电流［强度］是 I，则 $I = jS = \frac{E}{\rho}S = \frac{U}{\rho L}S$，可以把这个式子写成

$$I = \frac{U}{R} \tag{3-21}$$

其中 R 是导体的电阻，即

$$R = \rho \frac{L}{S} \tag{3-22}$$

(3－21)式和(3－22)式正是我们熟知的并经实验证明了的欧姆定律和电阻定律．由(3－21)式变形，可得

$$R = \frac{U}{I} \tag{3-23}$$

上式就是电阻的定义式，它揭示了电阻的物理意义：电阻是一个用来描述导体对电流阻碍作用大小的物理量，导体的电阻愈大，则要在导体中产生单位电流〔强度〕，两端需要加的电压愈大．应当指出，电阻只决定于导体自身的性质，而与电流、电压无关．对同一导体而言，两端所加的电压越大，通过的电流〔强度〕也越大，两者的比值(即电阻)是唯一确定的．

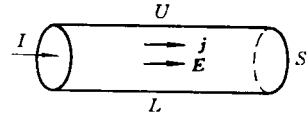


图 3－12

(3－22)式所表示的电阻定律，具体表达了决定一个导体电阻大小的条件，即：导体的电阻与它的长度与正比，与它的横截面积成反比，与构成该导体的材料的电阻率成正比．电阻定律的物理解释是显而易见的：对于一定材料制成的导体，横截面积一定时，导体愈长，电子通过时与点阵碰撞的总次数愈多，电阻愈大；长度一定时，横截面积愈大，可供每个电子通过的通道愈宽，与点阵碰撞的次数就愈少，所有电子与点阵碰撞的总次数也愈少，所以电阻愈小．

还有一个教学中值得注意的问题是应强调出电阻和电阻率的

区别和联系：电阻率是材料的电阻率，而不是一个具体导体的电阻率，同种材料在一定的温度下，不管构成怎样的导体，其电阻率是唯一确定的；电阻是导体的电阻，每个导体各有自己的电阻值，材料的电阻率只是决定导体电阻大小的三个条件之一．

3.11 电阻是怎样随温度变化的？

实验表明，各种金属导体的电阻都随温度变化．例如，一只“100W、220V”的灯泡平时的电阻大约只有 40 欧，正常工作时因温度升高电阻达到 484 欧．那么，电阻随温度变化的规律是什么？

实验表明，大多数金属导体的电阻近似地与绝对温度成正比．

对于纯金属，当温度变化的范围不大时，电阻率与温度近似地有下列线性关系：

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \tag{3-24}$$

式中 ρ_0 是 0℃时的电阻率，ρ 是 t℃时的电阻率，α 叫做电阻的温度系数．多数纯金属的 α 值近似等于 $0.004(\approx\frac{1}{273})$，即 ρ 近似地与绝对温度 T 成正比．

金属的线胀系数大约只有 10^{-5}的数量级，比 α 的数量级小得多．因此在考虑金属导体的电阻随温度的变化时，可以忽略导体长度和横截面积的变化，于是有

$$R = R_0(1 + \alpha t), \tag{3-25}$$

式中，$R_0 = \rho_0 \frac{L}{S}$是 0℃时导体的电阻，$R = \rho \frac{L}{S}$是 t℃时的电阻．与(3－24)式一样，(3－25)式表明金属导体的电阻近似与绝对温度成正比．

从经典的观点看，金属电阻率随温度升高而增大可以解释为电子与点阵碰撞的加剧．

由 3.10 中的分析，金属的电阻率 $\rho = \frac{2m}{ne^2}\frac{\bar{v}}{\bar{\lambda}}$．把电子气体看

作理想气体，按麦克斯韦速率分布律，其热运动平均速率 $\bar{v}$ 与绝对温度 T 的平方根成正比，平均自由程 $\bar{\lambda}$ 与 T 无关，所以碰撞频率 $\frac{\bar{v}}{\bar{\lambda}} \propto \sqrt{T}$，$\rho \propto \sqrt{T}$.

由上所述可知，经典理论只是粗略地对金属电阻的微观机制作出定性的描述、得出的 $\rho \propto \sqrt{T}$ 的结果与实验结论 ρ 近似地与 T 成正比有很大的矛盾．这是因为经典理论认为电子只具有粒子性，不具有波动性；而近代物理的理论和实验都证明，微观粒子具有波粒二象性，它们的行为服从量子力学，因此上述矛盾要用量子力学解决．

[思考题]

(1)铜的自由电子密度 $n = 8.4 \times 10^{28}$/米^3．技术上为了安全，铜导线中的电流密度不能超过 6.0 安培/毫米^2．计算自由电子的平均定向移动速度 $\bar{u}$ (4.5×10^{-4}米/秒)

(2)按公式 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ 计算 $T = 300$K 时电子的平均热运动速率，$\bar{v}$ 是 $\bar{u}$ 的多少倍？$k = 1.38 \times 10^{-23}$J·K^{-1}.(1.1×10^5 米/秒，2.4×10^8 倍)

(3)我们说导线中的电流方向是从一端沿导线流向另一端．那么，在导线内各点，正电荷运动方向是怎样的，电场强度的方向是怎样的，它们和上述电流方向的关系如何(不考虑导线横截面的大小)？

(4)在电学实验中，为了避免通过某仪器的电流过大，常在电路中串接一个限流的保护电阻．图 3－13 中保护电阻的接法是否正确？是否应把仪器和保护电阻的位置对调？

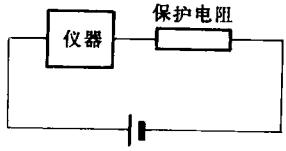
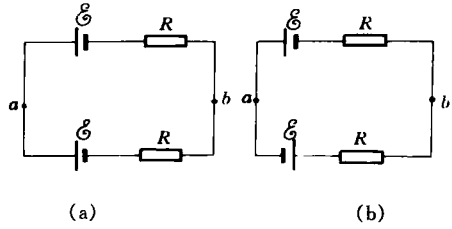


图 3－13

(5)有人说，电势能和电势是相对量，所以电压也是相对量，你认为他说的正确吗？

(6)有人说，只要空间两点有电压，这两点间一定有电场；只要两点间没有电场，这两点一定等势．反过来，只要两点间没有电压，这两点间一定没有电场；只要两点间有电场，这两点一定不等势．你认为他说的正确吗？说说你的道理．

(7)稳恒电路中,导线内的电流不为零,任一封闭面内的净电荷却为零.这个净电荷指的是哪些电荷?



(a) (b)

图 3-14

(8)有两个相同的电源和相同的电阻如图 3-14(a)所示联接起来,电路中是否有电流? a、b 两点是否有电压? 若将它们按图(b)所示电路联结起来,电路中是否有电流? a、b 两点是否有电压?

(9)用经典理论推导金属电阻率公式 $\rho=\frac{2m}{ne^2}\frac{\bar{v}}{\lambda}$ 时,为什么不考虑电子之间的碰撞?

四、欧姆定律

3.12 欧姆定律的物理意义是什么?

实验证明,对于稳恒电流,导体中的电流〔强度〕与导体两端的电压成正比,与这段导体的电阻成反比,即

$$I=\frac{U}{R} \tag{3-26}$$

这就是部分电路的欧姆定律,简称欧姆定律.

欧姆定律的意义在于它表达了导体中电流、电压和电阻三者之间的关系.可以把(3-26)式变形写成 $U=IR$,这个式子表明一段导体两端的电压等于通过它的电流〔强度〕与其电阻的乘积.但不能因此就说因为导体中有电流,所以导体两端有电压.实际因果关系是导体两端有电压(从而导体内有电场),才产生电流.(3-26)式的第二个变形式是 $R=\frac{U}{I}$,如 3.10 所述,这个式子是电阻的定义式,它提供了用伏安法测电阻的理论依据.

(3-26)式又称为欧姆定律的积分形式,它的微分形式 $j=\sigma E$ 已在 3.10 中导出.欧姆定律的积分形式只是在总体上反映导体中电流与电压、电阻的关系,而微分形式能细致地描述导体内各点的电流与电场以及材料导电性能的关系.

此外还有闭合电路的欧姆定律,即闭合电路中的电流〔强度〕I 与电源电动势 $\mathscr{E}$ 成正比,与内电路电阻 r、外电路电阻 R 的和成反比:

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R+r} \tag{3-27}$$

它揭示了闭合电路中电流、电源电动势和电路总电阻三者之间的关系.闭合电路欧姆定律与部分电路欧姆定律,两者表达式的结构相似,但是电动势和电压的本质不同.前者描述了电源非静电

力作功的能力，它等于把单位正电荷从负极经内电路移到正极时非静电力所作的功，或者说等于该过程中单位正电荷提高的电势能．后者描述了单位正电荷从导体一端移到另一端时电场力所作的功，或者说，等于单位正电荷电势能的减少．可以把(3－27)式变形写成 $\mathscr{E}=IR+Ir$，其中 IR 是外电路上的路端电压 U，Ir 是电源内电压 U'，根据这个变形公式可以作出这样的解释：单位正电荷在闭合电路中回转一周的过程中，从电源非静电力对它作功中获得的电势能，全消耗在内、外电路上了．

实际电路中往往有几个电源供电．如果这些电源是串联的，因为单位正电荷每移过一个电源其电势能提高一个电动势的数值，移过几个电源其电势能就提高几个电动势的数值，所以串联电源的总电动势等于各电源电动势的和；几个电源串联时，相当于内电路加长，所以串联电源的总内阻等于各电源内阻的和．

如果几个电源并联供电，不妨假定各电源电动势相同，内电阻也相同．因为单位正电荷从公共负极经任一电源内电路移到公共正极时，其电势能只提高一个电动势的数值，所以并联电源的总电动势就等于单个电源的电动势．又因为几个电源并联时，相当于内电路横截面积扩大几倍，所以并联电源的总内阻等于单个电源内阻的几分之一．如果各并联电源的电动势和内阻彼此不同，就不能作上述等效处理．解这样的电路问题需要用到复杂电路理论，例如基尔霍夫定律．

3.13 从微观机构上怎样解释欧姆定律？

如果在导体两端加上电压，导体中就产生电流．导体具有电阻，欧姆定律就是表明导体中电流、电压和电阻三者之间的关系．那么，从微观机构上怎样理解这个关系呢？

以金属直圆柱为例，设它的长为 L，底面积是 S，当圆柱两端存在电压 U 时，其内部就有电场，场强 $E=\dfrac{U}{L}$．在电场力作用下，

自由电子逆场方向加速运动．但是电子要与点阵碰撞，这种碰撞相当于使电子受到阻力，使电子定向速率的增加受到限制．电阻就是描述电子与点阵碰撞所造成的对电子定向移动阻碍作用的大小．

移恒电路中，正是在电场力和由于电子与点阵的碰撞所造成的阻力，这样两个对立因素的共同作用下，稳定时使大量自由电子以一定的平均定向速率 $\overline{u}$ 作定向移动，形成稳恒电流．由 3.10 中的(3－15)式可知，电子的平均定向移动速率 $\overline{u}=\frac{eE}{2m}\frac{\overline{\lambda}}{\overline{v}}$．将 $\overline{u}$ 代入(3－1)式，即得电路中的电流〔强度〕为

$$I=ne\overline{u}S=\frac{ne^2}{2m}\frac{\overline{\lambda}}{\overline{v}}SE=\frac{ne^2}{2m}\frac{\overline{\lambda}}{\overline{v}}\frac{S}{L}U \qquad (3-28)$$

令

$$R=\frac{2m}{ne^2}\frac{\overline{v}}{\overline{\lambda}}\frac{L}{S} \qquad (3-29)$$

则有 $I=\frac{U}{R}$，这就是部分电路欧姆定律．(3－29)式就是电阻的微观表达式，其中 e 和 m 是电子的电量和质量，n 是自由电子的数密度，$\overline{v}$ 是电子热运动的平均速率，$\overline{\lambda}$ 是平均自由程．比值 $\frac{\overline{v}}{\overline{\lambda}}$ 就是电子对点阵的碰撞频率．由以上分析可知，欧姆定律的微观实质是：反映了导体中自由电子定向运动的强弱(宏观上表现为电流〔强度〕)，跟导体中的电场强度(决定于两端的电压)以及自由电子与点阵的碰撞频率、电子数密度等微观因素之间的关系．

3.14 欧姆定律成立的条件

欧姆定律是中学物理的重点内容，它的应用很普遍．但是不少人在应用欧姆定律时往往忽视了它的条件，陷入绝对化．那么，欧姆定律成立的条件是什么？

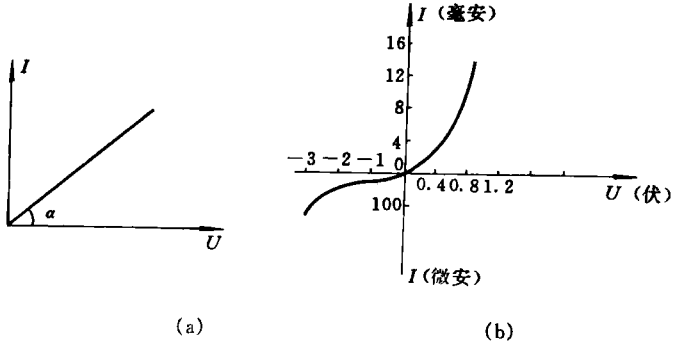
(1)对于稳恒电路和似稳电路，欧姆定律成立．

对于稳恒电路欧姆定律成立，在欧姆定律的完整表述中，明确提出了这一点．这是因为：稳恒电路里电场稳恒，同静电场一样，

可以提出电势和电压的概念，才有欧姆定律成立．

对于非稳恒电路，如果电源变化的频率 f 比较低，周期 T 较长，相应的电磁波的波长 $\lambda=\frac{c}{f}$ 就较长，c 是光速．当电磁波的波长 λ 远大于电路的线度 l 时，电磁场的变化传布整个电路所需的时间 l/c 远小于一个周期 T，在这样短的时间内，电流、电荷和电磁场的分布都未来得及发生显著变化．在这种情况下可以认为，每一时刻电磁场的分布与同一时刻电流、电荷分布的关系，和稳恒电路一样，只不过它们一起同步地作缓慢的变化．这类电路叫似稳电路．似稳电路中，欧姆定律成立．例如市电频率是 50 赫兹，其波长是 6000 千米，远大于常用电路的线度，可以看作是似稳电路．

(2)实验证明欧姆定律适用于金属和电解液．欧姆定律成立时，导体中的电流〔强度〕随电压变化的关系，即伏安特性如图 3－15(a)所示，它是一条过原点的直线，直线的斜率等于电阻的倒数，即 $\mathrm{tg}\alpha=\frac{1}{R}$．电阻是常量，与电流、电压无关，这种电阻叫线性电阻或欧姆电阻．



(a)　　(b)

图 3－15

对气态导体(如日光灯管中的汞蒸气)和其他一些导电器件，

如电子管、晶体管等，欧姆定律不成立，其伏安特性不是直线；其电阻虽然可按 $R=\frac{U}{I}$ 定义，但不是常量，而是随电流、电压变化的．这种电阻叫非线性电阻．图 3－15(b)中画出了晶体二极管的伏安特性曲线．

(3)如果考虑导体的电阻随温度变化，欧姆定律不成立．例如白炽灯，不发光时温度不过几十摄氏度，通电发光时，钨丝的温度能达到 2000 多摄氏度，电阻值要增大许多倍．但是一般金属导体温度变化几摄氏度或十几摄氏度时，电阻值变化不过百分之几，可以忽略不计，这时认为欧姆定律成立．

(4)欧姆定律只对一段不含电源的导体成立．对一段含源电路，(3－26)式和(3－27)式表示的欧姆定律不成立．例如，图 3－16 中，导体的电阻是 R，电源的电动势是 $\mathscr{E}$，内阻是 r，设它们串联



(a)　　(b)

图 3－16

后的两端电压是 U_{AB}，电流从 A 流向 B，电流〔强度〕是 I．在这样的电路中，U_{AB} 既不等于 IR，也不等于 Ir 或 $I(R+r)$，欧姆定律不成立．那么 U_{AB} 等于什么呢？先分析(a)图：因为路中电流方向从 A 指向 B，与电动势从负极经内电路到正极的指向一致，所以单位正电荷从负极经内电路移到正极时，电势能提高的数值是 $\mathscr{E}$；但是单位正电荷经过电阻 R 和内电阻 r 时，电势能分别降低 U 和 U'，而从 A 移到 B 时总势能降低 U_{AB}，根据能量守恒，应有 $U_{AB}=U+U'-\mathscr{E}$．在电阻 R 和内电阻 r 上欧姆定律成立，即 $U=IR$，$U'=Ir$，所以 $U_{AB}=I(R+r)-\mathscr{E}$．再分析(b)图：现在电动势的指向与电流的方向相反，单位正电荷从正板经内电路移到负极时电势能要降低一个 $\mathscr{E}$，其他在 R、r 以及从 A 到 B 的电势能降低与上述相同．根据能量守恒和在 R、r 上应用欧姆定律，就有

$U_{AB} = I(R + r) + \mathscr{E}$.

(5)欧姆定律的微分形式在非稳恒电路中也成立，比它的积分形式有更大的普遍性．

3.15 用伏安法测电阻时，根据什么选择内接法或外接法？

用伏安法测电阻，为了同时测量电阻 R 两端的电压 U_R 和通过它的电流〔强度〕I_R，可选择图 3－17 的两种接法之一，其中Ⓐ表示电流表，Ⓥ表示电压表．(a)图的电流表接在电压表的测量端外，称为外接法；(b)图的接法称为内接法．

采用外接法时，电压表测出的电压 U 就是电阻两端的电压 $U_R(U = U_R)$；但是电流表测出的电流〔强度〕I 是流过电阻的电流〔强度〕I_R 与流过电压表电流〔强度〕I_V 的和：$I = I_R + I_V$．这是由于电压表内阻 R_V 不是无穷大，具有分流作用，引起了电流的测量误差．测出的电流比实际值大，使测得的电阻值 R' 比它的实际值小．实验测得的 R' 是 R 与 R_V 的并联值：$R' = \dfrac{R \cdot R_V}{R + R_V}$．可以算出电流表外接时产生的系统误差：

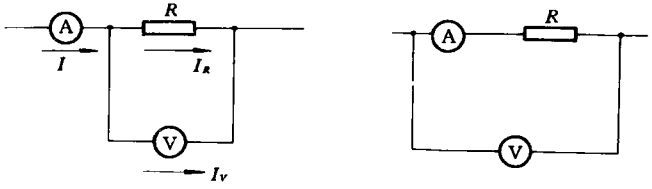


图 3－17

$$\Delta R = |R' - R| = \frac{R^2}{R + R_V}, \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{R}{R + R_V}. \qquad (3-30)$$

如果 $R \ll R_V$，误差就很小，R_V 的影响可以忽略．要想得到待测电阻的准确值，可以对结果进行修正，这只要将 I_V 从总电流

〔强度〕I 中减去，I_V 是容易求出的，由于电压表已指出电压值 U，若已知电压表的内阻是 R_V，由 $I_V=\frac{U}{R_V}$ 即可求出 I_V，则被测电阻的准确值是 $R=\frac{U}{I_R}=\frac{U}{I-I_V}$.

采用内接法时，电流表测出的电流〔强度〕I 就是通过电阻的电流〔强度〕$I_R(I=I_R)$；但是电压表的示数 U 却是电阻和电流表二者端电压 U_R 与 U_A 的和：$U=U_R+U_A$，这是由于电流表内阻 R_A 不为零，具有分压作用，引起了电压测量误差．测出的电压比实际值大，使测得的电阻值 R' 比它的实际值 R 大．实际上，这时测出的是 R 与 R_A 的串联值：$R'=R+R_A$．电流表内接时的系统误差是：

$$\Delta R=|R'-R|=R_A,\ \frac{\Delta R}{R}=\frac{R_A}{R} \qquad (3-31)$$

如果 $R_A\ll R$，误差很小，R_A 的影响可以略去．要得到待测电阻的准确值，只需从测量结果 R' 中减去 R_A 即可．

由上分析可知：当 $R\gg R_A$ 时，选内接法；$R\ll R_V$ 时，选外接法；二者都满足时（即 R 值处于 R_A 和 R_V 之间，且离两者都较远），两种接法可任选．

如果无法估计待测电阻 R 的阻值，则可先把 R 跟安培表串联，接在电路中，然后把伏特表试接在待测电阻 R 的两端（如图 3－18）．注意观察安培表读数的变化．如果安培表的读数变化较大，说明这种接法不正确，应该改用内接法．

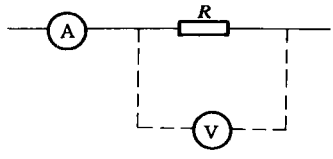


图 3－18

最后指出，中学常用的伏特表和安培表内阻分别是几千欧和

零点几欧，当待测电阻是几十欧时，不论采用哪种接法，结果都差不多．

3.16 为什么能用水流比喻电流？

教学中我们常用水流比喻电流，用水压比喻电压，它的依据是什么？

我们先比较一下水流和电流形成的机制．一段水管，一端水位较高，另一端水位较低，管两端就存在水位差．所谓水位差又叫水压．由于水管两端存在水压，管中沿管长方向产生一个压力梯度．把水看作是不可压缩的，管中任一段水柱两底面的压力差就推动水柱移动形成水流．水流流动时要受到粘滞阻力的作用，这种阻力来自内部各流层的水分子之间相互作用的引力，以及附着层上的水分子与管壁分子之间的引力．稳定时，管内每一点都保持一定的流速不变，形成稳恒水流．对于一段金属导体，当它两端存在电势差(即电压)时，导体内就形成一个电势梯度，即存在着一个电场，电场力将驱动自由电子定向移动形成电流．电子定向移动时要与点阵碰撞，这种碰撞使电子的定向移动受到阻碍．稳定时，电子通过导体内每一点时的平均定向速度保持不变，形成稳恒电流．

由上所述可知，无论是水流还是电流，它们都是受到某种动力和阻力两个因素的作用．就动力因素而言，水压和电压对形成电流和水流所起的作用是相似的，因此教学中常用比较熟悉的水压比喻比较陌生的电压．水压是水管两端的水位差，它是与重力势能相联系的一个物理概念，本身不是力，但是由于它的存在，管中形成了一个压应力性质的“场”，任一点都存在确定的压强，而不同的点压强不同，使得任一段水柱两底面都存在压力差，从而推动水柱移动，形成水流；而电压如 3.6 中所述，是与电势能相联系的一个物理量，它本身也不是力，只是由于导体两端存在电压时，导体中将形成电场，而这个电场要对导体中的自由电子产生作用力

——电场力，从而引起电子的定向移动，形成电流．

水流与电流形成的微观机制不同，宏观上却表现出相似的运动规律，例如，水流过程和电流过程分别遵守质量守恒和电荷守恒定律．对于稳恒水流和稳恒电流，它们有更多的相似点．例如：串联、并联电路中的电流、电压分配关系，在稳恒水路中都有它们的对应关系式；稳恒电路中的欧姆定律跟水平细管中的层流所遵循的泊肃叶公式很相似[①]，即

$$Q=\frac{p_1-p_2}{8\eta L}\pi a^4 \qquad (3-32)$$

式中 Q 是水流的流量，即单位时间内流过水管任一截面的水的体积，它相当于电路中的电流〔强度〕；η 是水的内摩擦系数，L 是管长，a 是管半径；p_1-p_2 是管两端的压强差，它体现了水管两端的水压，相当于电路两端的电压．如果把(3－32)式中的 $\eta\frac{8L}{\pi a^4}$ 称之为水阻，并表作 r 的话，那么就有

$$Q=\frac{p_1-p_2}{r} \qquad (3-33)$$

此式与(3－26)式所表示的欧姆定律：$I=\frac{U}{R}=\frac{U_1-U_2}{R}$ 相比，形式上完全相似．且水路中的 Q、p_1-p_2 和 r，跟电路中的 I、U_1-U_2 和 R，其涵义的作用一一相对应．

正因为电流和水流存在着这些相似点，所以在教学中可以用水流、水压、水阻乃至泊肃叶公式分别比喻电流、电压、电阻和欧姆定律，这在一定程度上有助于学生形象地建立电压的概念，理解电流定律的涵义．这与欧姆当初建立电流定律的思路也是相符的．

当然，“比喻”总是“比喻”，在利用这种比喻讨论问题时，应当指出水流与电流在物理实质上的区别，防止学生在电势差与水位差、电阻与水阻等等之间划等号．

---

① 顾建中编，《力学教程》，高等教育出版社，1979 年版，224 页．

五、电功　电功率

3.17　电流作功的物理本质是什么?

电流是怎么作功的,它的物理图象是什么样子?我们分别从电流的热效应,化学效应和磁效应来分析.

在金属导体中,自由电子受电场力作用定向移动,形成电流.按照动能定理,电子的电势能减少,动能增加.但是电子移动时要与点阵碰撞,按3.10所述,对大量电子而言,碰后电子的平均定向移动速率为零,即电子把动能全部传给了点阵,之后又从零初速开始受电场力加速,并获得定向运动的动能.因为电子在两次碰撞之间的加速时间($\bar{\tau}=\frac{\bar{\lambda}}{v}$)很短,碰撞又是在更短的瞬间完成的,所以从宏观的时间看,截面均匀的导线中电子保持匀速率定向移动;而点阵因受电子碰撞,无规则热振动加剧,宏观上表现为导体温度升高,内能增加.这便是电流的热效应.

如果让电流通过化学电源给电源充电,这时电流是从正极经内电路流向负极.电源内的静电力方向与电流方向一致,对电荷作正功;非静电力方向与电流方向相反,对电荷作负功,即电荷把从电场对它作功中得到的动能用来克服非静电力作功,即克服充电电源的电动势作功,将电能转化为电源的化学能,这就是电流的化学效应.

另外,电流通过导体,导体内外便分布有磁场,这就是电流的磁效应.在磁场建立的过程中,总是伴随有电磁感应,出现非静电场,即有感生电动势产生.电流从非稳恒到稳恒的过程也是靠消耗电荷的动能克服非静电力作功实现的,将电能转化为磁场能.

总之,无论是在电流的热效应、化学效应还是磁效应中,电流作功都要消耗电荷的移动动能,电荷的移动动能又是通过电场力

对它作功由电势能转化来的，所以，说电流作功本质上是电场作功．因为电场作功是在有电流的条件下完成的，所以又说成电流作功．

设一段电路两端的电压是 U，当电路中在 t 时间内通过电量 q 时，电场做的功 $W = qU$．因为 $q = It$，I 是电流〔强度〕，所以电场作的功（即电流作的功）是

$$W = IUt \tag{3-34}$$

单位时间内电流作的功就是电功率 P，即

$$P = IU \tag{3-35}$$

电流作功本质上是电场作功，电场作功要消耗电势能，这个能量又是从电源来的．电流作功的全过程是：电源通过非静电力移送电荷作功，把其它形式的能量转化为电势能；再通过电场力推动自由电荷而作功，使电势能转化为电流能（即运动电荷的动能）；电流又要克服电阻或反电动势而作功，使电流能转化为其它形式的能量．实际上，后两个过程直接表现为电场力克服电阻或反电动势推动电荷定向移动而作功，使电势能转化为其它形式的能量．由此可见，稳恒电路中电源是提供能量的装置，静电场起着能量的中转作用，把电源内部的非静电能转运到负载上①．所谓电流作功，实质上是电场作功．

3.18 $P = IU$、$P = I^2R$、$P = \frac{U^2}{R}$三式，任何情况下都等效吗？

计算电功率的这三个式子中，$P = IU$ 是基本公式，这是从电流作功实际上是电场作功这一物理本质得出的结论

在纯电阻电路中，欧姆定律成立，即 $I = \frac{U}{R}$．把它代入基本公

① 参看赵凯华等编，《电磁学》上册，人民教育出版社，1978 年第 1 版，200～201 页．

式，就得到 $P=\frac{U^2}{R}$；或者用 $U=IR$ 替换基本公式里的 U，就得到 $P=I^2R$．这就是说，在纯电阻电路中，电功率的三个式子是等效的．这种等效是联合应用电功率基本公式和欧姆定律公式的结果．在纯电阻电路中，如 3.18 所述，电流作的功以焦耳热放出，所以这三个式子实际上又是电流的焦耳热功率公式．

如果不是纯电阻电路，例如含有化学电源（它有电动势），或者路中接有电动机，电动机转子在定子磁场中转动时会产生感生电动势，这时路中相当于含有电源，且这种感生电动势的指向总是与通入的电流方向相反的，故称为反电动势．对于这样的含源电路，电功率的基本公式 $P=IU$ 依然成立，I 是电路中电流〔强度〕，U 是这一段电路两端的电压．但是对于一段含源电路，欧姆定律不成立，$U\neq IR$（见 3.15）．这时，功率的三个式子不等效．

在这种非纯电阻电路里，电流的功率 $P=IU$，即单位时间里作的功，一部分用在克服反电势作功上；另一部分消耗在化学电源或电动机的内阻 R 上，以焦耳热的形式放出．这时，如果用 I^2R 计算功率，算出的实际上是它们内阻上的焦耳热功率．至于 $\frac{U^2}{R}$，因为 U 是电路两端的电压，不是内阻 R 上的电压降，$\frac{U^2}{R}$ 已没有物理意义．例如图 3－19 中，对电动势为 $\mathscr{E}$、内阻为 r 的电源通以电流〔强度〕I 给它充电，问电流的输入功率是多少？因为内阻上消耗的热功率是 I^2R，电源得到的功率是 $I\mathscr{E}$，根据能量守恒，电流的输入功率 $P=I\mathscr{E}+I^2R$．或者，因为电源两端的电压 $U=\mathscr{E}+IR$（$\neq IR$）（见 3.15），所以 $P=IU=I\mathscr{E}+I^2R$．可见，两种解法答案相同，都不是 I^2R．那么 $\frac{U^2}{R}$ 是什么呢？$\frac{U^2}{R}=\frac{(\mathscr{E}+IR)^2}{R}$，看不出它有什么意义了．

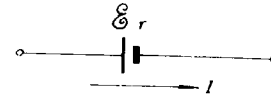


图 3－19

最后指出，功率的这三个式子只

适用于纯电阻稳恒电路和似稳电路．它们是功率的积分表达式．另外还很容易得到焦耳热功率的微分形式．例如，在图 3－12 所示的一段均匀导体中，$P = I^2R = (jS)^2\rho\frac{L}{S} = \sigma E^2(SL)$．单位体积内的热功率称为热功率密度，用 p 表示，

$$p = \sigma E^2 \tag{3-36}$$

这就是焦耳热功率的微分形式，它对非稳恒情况也成立．

3.19 用电器的额定功率和实际功率

用电器正常工作时的电压叫额定电压．用电器在额定电压下的功率叫额定功率．随着用电器实际的外加电压不同，它的实际功率也不同．显然，用电器的实际功率可以有无数个，而额定功率是确定不变的，一般把它标在用电器的铭牌上．当实际功率大于额定功率时，用电器有烧坏的危险；实际功率小于额定功率时，用电器往往不能正常工作．

家庭电路中，如果用电器过多，总功率过大，会使干路中电流过大，导致用电器不能正常工作．这是因为：用电器多数按并联要求设计的，用电器愈多，它们并联后的总电阻愈小，而电源的电压可以认为是不变的．由于干路上电流增强，造成电压损失增大，分配到用电器上的实际电压就减小，用电器的实际功率将小于额定功率，不能正常工作．

如果电源的两根电源线不经过用电器而直接接触，就是短路．短路是造成家庭电路电流过大的另一个原因．例如图 3－20 中，A、B 间短路，内阻几乎为零，整个电路的电阻变得很小，电源电压认为不变，因而电流很大．这时，电源电压几乎全部降落在干路上，分配到用电器上的实际电压几乎为零，用电器的实际功率也几乎为零，不能工作．

电路中电流过大，特别是短路造成电路中强大的电流时，轻则烧毁电气设备，重则引起火灾．因此，在电路中安装保险丝是必要

的．保险丝的规格常用它的额定电流表示，选择保险丝时，应使它的额定电流等于或稍大于电路的最大工作电流．当电路中的电流超过保险丝的额定电流达到它的熔断电流时，它就迅速熔断，起到保护电气设备的作用．

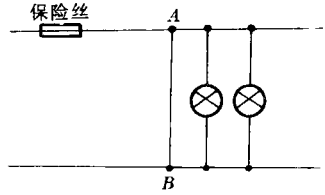


图 3－20

短路时保险丝熔断的断路与通常导线脱接等造成的断路，二者情况不同：前者的影响是带全局性的，往往使大面积的用电器停止工作；后者是局部的，哪里导线脱接，哪里的用电器就停止工作，其他地方的用电器不受影响．

实验室里的各种电学仪器设备和元件都有一定的额定电压和额定功率，例如滑线变阻器和电阻箱，除了电阻值，额定功率也是它们的主要规格之一．设计实验电路以及使用这些器件时，注意不能超过它们的额定值．绝对不允许把安培计不经用电器直接接在电源上，因为安培计的内阻很小(1 欧以下)，那样接等于短路，安培计将被烧毁．

3.20 电路中是怎样传输能量的?

在 3.2 和 3.18 中已阐明稳恒电路中传输能量的过程．电路没有接通前，整个电路处于静电平衡，导体内部没有电场，也没有电流．当输电闸刀刚闭合时，由于闭合处出现电磁扰动，由这种电磁扰动所引起的电磁波就以 3×10^8 米/秒的速率向包括电路所在区域的远近空间传播，使导线内部迅速建立起电场，并驱动当地的

自由电子定向移动，于是迅速在全电路形成电流．一旦达到稳定，在内外电路上建立起稳恒电场(相当于静电场)后，只要有电源持续工作，提供能量，维持内外电路的稳恒电场不变，那么就如 3.18 所分析的那样，电路中的自由电荷在电场力和电源的非静电力作用下，沿闭合电路循环流动．在外电路上电场力对电荷作正功，使电势能转化为其它形式的能量；在内电路，电源的非静电力克服电场力和阻碍移送电荷作正功(即电场力作负功)，使非静电能转化为电势能．整个闭合电流循环流动过程中，静电场起着能量中转的作用，把电源的非静电能转运到负载上．

那么交流电路中能量是怎样传输的呢？我们知道自由电子的平均定向移动速率的数量级是 10^{-4} 米/秒，而市用交流电的频率是 50 赫兹，周期是 0.02 秒．这就是说当电子在正向电场力作用下定向移动 0.01 秒后，电场的方向就反转了，相应地电子的定向移动方向也随着改变．所以交流电路中的自由电子并非是沿闭合电路循环运转的，而只是在热运动基础上迭加了一个极小范围内的往复振动，振动幅度的数量级是(10^{-4} 米/秒 $\times$ 0.01 秒)10^{-6} 米．所以说，交流电路工作过程中，外电路上的所有自由电荷根本不通过电源的内电路，而只是在数量级为千分之一毫米的幅度范围内作微小的往复振动．那么电源的非静电能转化为电能后是怎样传输给外电路上的运动电荷的呢？简要地说：交流电路不仅在刚刚接通时，由于电磁扰动而引起电磁波，迅速传向远近空间，在整个外电路的导体中激起电场，形成电流；而且达到稳定后，由于电源的电动势是按正弦规律变化的，内电路的自由电荷也是在变化着的非静电力作用下按正弦规律往复移动，从而在周围激起了交变电磁场，这种交变电磁场仍以电磁波的形式传向整个电路所在的远近空间，并在电路中激起相应的交变电场，推动当地的自由电子往复移动，于是与内电路一起形成闭合交流电．可见，交流电路中，电磁能不是通过静电场和运动电荷沿导线内部从电源传给负载的，而是以电磁波的形式从外部空间由电源传到负载的．对

此，我们还可以应用电磁波的能流密度，电场的环流定理、高斯定理和似稳电路等知识作定量推论，证明交流电路中负载上消耗的电能确是从外部空间由电路侧面传入的．具体推证从略．

[思考题]

(1)设长方形电解槽的长是 L，横截面积是 S．在两极板间加上电压 U，平衡时，正、负离子以各自的平均速率 $\overline{u}_+$、$\overline{u}_-$ 匀速移动，且速率与场强 E 成正比，比例系数分别是 u_+^0 和 u_-^0，分别称为正、负离子的迁移率．设离子的数密度分别是 n_+ 和 n_-，带电量分别是 q_+ 和 q_-．试根据这些写出对电解液的欧姆定律及其微分形式．

(2)用伏安法测电阻，已知待测电阻大约 50 欧姆，查一下你们实验室电流表和电压表的内阻值，看选择什么接法好．

(3)既然交流电路的电能是由电磁场从电源内部传出，再从导线表面传入导线内部，为什么断路后电灯不亮？

(4)直流电动机的外接电压一定，它的内阻又不变，为什么轻载时发热少，重载时发热多？

(5)电流通过铁丝，铁丝微热，如果把铁丝的一部分浸入冷水，其余部分会更热，为什么？

(6)断丝后的白炽灯，若设法将灯丝重新搭上后，通常情况下，灯泡总要比原来更亮些，而且寿命一般不长，试解释此现象．

(7)实验室里常用的电阻箱中每一个电阻的额定功率规定为 0.25 瓦，如果把其中 100 欧姆和 10 欧姆的电阻联用，额定电流是多大？(50 毫安)

(8)用塑料梳子梳头，可能产生上万伏的电压，为什么这么高的电压并不危险，而家庭电路上的电压远比这个电压低，一旦接触，反而很危险？

六、磁　场

3.21　物质为什么有磁性？磁单极子存在吗？

磁体能够吸引铁质类物体的性质叫磁性，这是一个宏观现象．从历史上看，随着磁学知识的积累和磁电现象间联系的揭开，对磁性起源也逐渐形成了两套平行的理论和相应的两种物理微观模型．运用它们分别讨论磁相互作用，所得的宏观结论是等价的．这两套理论是磁荷理论和分子电流理论．

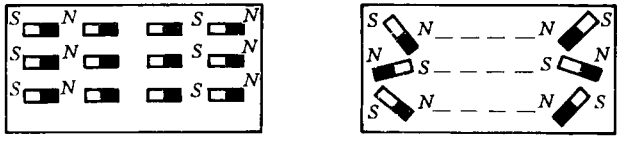
磁荷理论，历史上起源较早，那时对磁性与电流的联系还一无所知，它是从研究永磁体总结出来的．最初人们注意到天然条形磁体两端的磁力最强，认为两端存在两个磁极．当把磁体悬挂起来，发现总有一端指南，另一端指北．于是认识到两极虽都具磁性，但性质有别，分别称之为南极和北极．它们之间的作用，同极相斥、异极相吸，类似于电荷之间的作用．由此假定在磁极上也存在一种叫“磁荷”的东西，磁体的两极则分别带有异性磁荷，它们同性相斥，异性相吸．库仑还测量了两个“点磁荷”之间的作用力，确立了“磁库仑定律”．磁荷与电荷之间的酷似性，以及对磁体间相互作用的解释，使人们普遍接受了磁性起源于两极的磁荷这种观点．

从“磁荷”概念出发，根据每一磁体无论被折断多少次之后，任何一小段都具有两上磁极，而且自成一个单独的磁体的事实，库仑提出了磁分子假说，认为磁体都是由无数个微小磁体构成，建立了磁荷理论的微观模型．

按照这种理论和物理模型，天然磁体中的磁分子首尾相接整齐规则的排列成阵，如图 3－21(a)所示．在磁体中间各部位，由

于各相邻磁分子的磁极是异性的，因而对外的磁力作用相抵消；而在磁体两个端头处，各磁分子的极性是单独的，磁性未被抵消，对外显示出磁力作用．

在通常情况下，铁质类物体中那些无数多磁分子的排列是杂乱无章的．不仅在物体的中间各部位，而且在两端的所有磁分子的磁性都相互抵消，如图 3－21(b)所示．因而对外不显示出磁性．



(a)　　(b)

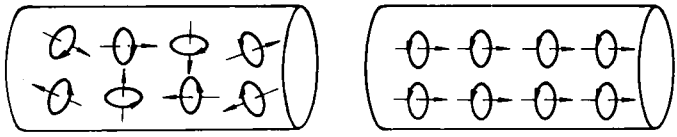
图 3－21

但是在它们被磁化时，那些磁分子受到磁力的作用纷纷转向，从杂乱无章变成有序地排列，这时物体就显示出磁性．可见物体的磁化就其内部变化来讲是磁分子从无序排列到有序排列的转化过程．在此过程中如果再辅以振动和升温的办法增加磁分子的活动性，就可以使磁化作用更为显著．

磁荷理论不仅解释了磁化的原因，而且还可以仿照静电场的方法建立起一套磁场的理论，仿照电介质理论建立起一套磁介质理论，这些理论对宏观磁现象的认识都是有效的．但是磁荷理论并未说明磁分子为什么会有磁性，因而对物质磁性起源的认识是不彻底的．只有在奥斯特发现了“电流的磁效应”，揭开了电磁现象的联系后，安培从中受到启示，提出分子电流假说观点，对磁性起源做出了进一步地解释．

安培认为，物质的磁性起源于电流．每个库仑磁分子相当于一个环形电流，叫做分子电流．与每个分子电流相应的 N、S 极

就分布在环形电流的两侧．由于分子电流取向不同，极性取向就有差异．它的磁性用分子磁矩来描述．一般物体通常不显示磁性，因为物体中各分子环形电流的取向是杂乱的，大量分子电流的磁性互相抵消，所以宏观上物体不显磁性．如图 3－22(a)所示，对磁性物体，各分子环形电流的取向大体一致，如图 3－22(b)所示．因此宏观上在其两端显示出磁性．按照分子电流的观点，物质的磁化实质上是在外磁场作用下物质内部各分子环流方向趋于一致的过程．



(a)　　(b)

图 3－22

分子电流的观点揭示了物质磁性的电流本质，从分子磁矩这一基本概念出发也可以建立起整套的磁介质理论，所得出的宏观规律与由磁荷观点得到的完全一致．

安培最初是以假说的形式提出分子电流学说的，近代原子物理对物质内部结构的深刻认识，揭示了物质内部的确存在着环形电流．在物质内部的原子中，带电粒子运动形成的环形电流，都具有磁矩，见图 3－22．这使安培的假说成为事实．

既然分子电流观点已经为现代原子结构的理论和事实所证实，能不能就此摒弃磁荷观点呢？否．它做为一种理论能够继续存在，不仅因为由它得到的宏观推论已经经受了事实的验证；而且还因为由它引发出的磁荷单独存在之谜的问题一直是现代物理急待突破的重大基本课题之一．

如前所述，从假定磁体两极带有导性磁荷开始，就不断有人想

通过无限制地分割磁体棒而得到单一极性的最小磁荷，或称磁单极子，但是努力都与愿违．分子环流理论建立后，人们更加明白，即使是仅有一匝的电流线圈，或者甚至是一个旋转着的电子形成的环电流，也同样呈现出两个磁极．事实就是这样，磁极总是双双共存着，至今，还未发现过与此不一致的现象．概括了电磁宏观规律之大成的麦克斯韦电磁方程组，也是以肯定这一事实当作其基本依据之一．也正由于此方程组便明显地表现出电磁二者的不对称性：电有电场，磁也有磁场；通过场磁电间可以相互作用；电能生磁、磁也能生电．但是方程组有电荷量却无磁荷量．因为事实上单独的电荷比比皆是，却唯独不见单独极性的磁荷．电荷运动产生磁场，却不存在磁荷运动产生电场．这种不对称使麦克斯韦终生费解．

但是物理理论并不排斥磁单子的存在，物理学家早已发现了电荷的量子化事实．自然界所有带电体带电量为什么总是电子电量的整数倍？其原因，至今未能解开．狄拉克从磁电对称性出发运用量子力学理论研究指出，电荷量子化事实只有借用磁单极子与电子间相互作用才能解释清楚，并且计算出了磁单极子的磁荷．从本世纪三十年代起，狄拉克的设想及以后的基本粒子和天体物理理论都预言了磁单极子存在的可能性．进入七十年代，“大统一”理论又预告了磁单极子的质量，狄拉克的预言又一次得到了支持．

从理论上讲，如果一旦证实磁单极子的存在，那将引起许多现有的近代物理理论的修正或改写；从实用上看，它将开辟重大新技术的发展途径．

理论的预言不断激起了科学界探求磁单极子的热情，相继集中了人力、物力开始了一场长期搜寻其踪迹的行动．有的想从宇宙射线中觅得音讯，所以从宇宙空间到地球内部应用了不同方法，设计了各种装置．有的则想通过高能粒子加速器发现它，但进展十分艰难．七十年代、八十年代期间都曾传出喜讯、引起震动，但

最多是“一次事件不能证明一切”．所以至今既不能肯定，也不能否定磁单极子的存在．但是这桩疑案终究会得到了结的．

3.22 不同物质磁化时显示的磁性有何差异？为什么会有这些差异？

根据实验结果分析，物质在磁化时显示出磁性的差异甚大．按差异反映的特性，可将物质分为三类．第一类以锰、铬、铝等为典型代表，在外磁场中它们因磁化显出磁性成为磁体，自身的磁场很弱，不过方向跟外磁场同向，其结果使总磁场增强，因而称之为顺磁性物质．一旦撤去外场，它们的磁性也就随之消失．第二类物质如铜、银和惰性气体，和第一类物质一样在外磁场作用下也会显出磁性成为磁体，本身磁场也很弱，但它的磁性却使总磁场减弱，故而称它们是抗磁性物质．外磁场撤消，其磁性也几乎失尽．铁、钴、镍等是第三类，叫铁质类物质．它们在磁场中磁性很强，极大地增强了总磁场，就是当外磁场撤消时，仍能保持着很强的磁性，变成独立的永磁体．这一特性使我们对它很感兴趣，现今已开发出广泛的应用领域．并且不断研制新的磁性材料．

物质在磁化时，因磁性的差异而一分为三，是什么原因造成的呢？这要从各类物质内部的原子结构特性和受外磁场作用时所发生的变化来加以认识．

任何物质的原子中，电子都在绕原子核旋转，它等效于一个环形电流，具有磁矩 $P_m = IS$．其中 I 是与环形电流等效的电流〔强度〕，S 是环的面积．这种磁矩是电子绕核作轨道运动而形成的，称为轨道磁矩．显然，这一磁矩大小取决于电子的旋转速度和轨道半径．此外，电子同时还有因自旋运动而形成的自旋磁矩．两种磁矩如图 3－23 所示．电子的两种磁矩的存在，是我们认识物质磁性起源的基本依据．那么，原子的磁矩是多少呢？

每个原子内部有多个电子，它们在原子核外是按层排布的，每层中所容纳的电子数是确定的．一般讲内层都是填满了的，只有

最外层才会出现未填满的情况．而所有满层的电子，它们的磁矩总效果互相抵消．这样，一个原子的磁矩就只决定于外层中电子的总磁矩，称作固有磁矩．由原子组成分子时，若仍有未被抵消的磁矩，就叫做分子的固有磁矩．顺磁性物质的原子结构就具有这种特性．

对一块有宏观体积的顺磁性物质来讲，在通常情况下因分子热运动的影响，各分子固有磁矩的取向是杂乱的，因而对外不显磁性；当有外磁场时，它们都转向外磁场，整体对外显示出磁性，并且磁矩方向与外场一致，使总场加强．

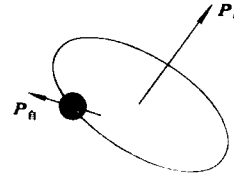


图 3－23

抗磁性物质的原子结构特性与顺磁性的不同点在于它的分子固有磁矩为零．这一结果，又分别有两种不同形成原因，即除了像惰性气体那样，核外电子都填满壳层的情形外；也有些抗磁性物质的原子中，电子在最外壳层虽未填满，但在原子组成分子时由于组合方式特别，使得一个分子中的各原子的磁矩相互抵消．

那么，既然分子固有磁矩为零，它在外磁场中又怎么会磁化呢？要进一步揭开抗磁性物质的这一迷底，让我们反思一下上面的分析．在我们说到分子固有磁矩时，都是在无外磁场的条件下作出的，那么有了外磁场，分子固有磁矩难道不发生变化吗？循此思索会是什么结论？

我们知道，在外磁场中，运动着的电子会受到洛仑兹力作用，这样一来就使得电子绕核旋转的速度不同于无外场时的速度，因此电子磁矩也将变化，通常以附加磁矩表示这一变化．计算表明，它的大小与外磁场成正比，但方向总是与外场相反．从而消弱了总磁场，表现为抗磁效应．这就是抗磁性物质发生磁化时的物理过程．电子轨道磁矩的变化如此，电子自旋磁矩也发生类似的变化．

从上面的论述可以想到，抗磁效应绝非抗磁性物质独有．一般说来，任何物质在外磁场中，都会产生附加磁矩，只是因为顺磁性物质的附加磁矩比分子固有磁矩小得多，使抗磁效应远弱于顺磁效应，因而显示出顺磁性现象．

铁磁性物质的原子磁矩与前两类相比，并无本质上的区别，但是在磁性的主要来源上却有重要区别，顺磁性与抗磁性物质主要来源于电子的轨道磁矩，而铁磁性物质则主要来源于电子的自旋磁矩，它的基本磁单元不是分子电流，而是很多分子组成的集合体．量子力学认为，在邻近原子的电子之间存在着一种“交换作用”，靠这种相互作用克服了热运动影响，在铁磁性物质内部自发形成了许多小区域，每个小区内原子的电子自旋趋于平行排列，因而即使无外加磁场它们也各具有一定的总磁矩，我们称这些小区域为磁畴，那末每个磁畴就都是一个自发的磁化区，无外场时各个磁畴的磁矩方向并不一致，而是杂乱无章的，所以一块宏观大小的铁磁性物质对外并不显磁性．

受到外磁场作用时，各个磁畴的磁矩会逐步改变方向趋于一致，从而整体上对外显出磁性．由于磁化场的作用只是使各个磁畴的磁矩转向外场，而不是直接使每个原子的磁矩转向，所以只要有不太强的外场，就能使铁磁性物质磁化，显示出很强的磁性．例如，在同样强度的外磁场中，纯铁磁化后的磁性，是顺磁性物质硫酸亚铁磁化后磁性的一百万倍．这一特性（通常称高 μ 值）是铁磁质得以广泛应用的主要原因．撤掉外场磁畴并不完全退回原状．所以铁磁性物质仍能保持磁性，称剩磁．铁磁质的剩磁特性使永磁铁制造成为可能．

磁畴的存在及其特性，是铁磁性物质磁化时的本质特征．我们借助显微镜可以直接观察到磁畴，每个体积大约占 10^{-15} 米^3，包含有约 10^{15} 个原子、形状大小不一．

3.23 如何运用磁极概念来处理问题?

运用磁体和磁极表述磁现象,是初中磁电教学中经常用到的.比如通电螺线管对外相当于一个磁体,确定等效磁体的磁极等.由此也遇到了一个问题,相应磁体的两极,对外相当,对内呢?因此正确运用磁极处理问题是应该注意研究的.

磁极一词,在磁学发展的初期就已出现,它是基于对永磁体中间部位和端头处的磁性强弱有别的事实而提出的,把磁体上磁性最强的部分就叫做磁极.因而条形磁体有两个极.随后又因发现同一磁体两极的性质并不一样,分别称为 N、S 极.这样磁极间的相互作用规律就可简洁地表述为同名极相斥,异名极相吸.可见磁极原本是一个形象的表述,并无确切的涵义.中学物理教材至今也都沿用这样的说法.

磁性起源的"磁荷观点"出现后,对磁极概念赋予了新的涵义,磁分子是由正、负磁荷组成的磁偶极子,磁体是由磁分子有序排列而成的,一根磁棒的两端会出现未被抵消的净磁荷,因而磁极便是净磁荷的集中处,净正磁荷集中处是 N 极,反之便是 S 极.磁库仑定律的建立是以磁极所含磁荷的多少为基础的.

场的概念建立后,磁荷观点认为磁场是磁荷激发的.为了描述磁场强度($\boldsymbol{H}$)的分布引入了磁力线.仿照电场线($\boldsymbol{E}$ 线)的性质,磁力线也应该发源于正磁荷,终止于负磁荷.这样一来,对于一个永磁体无论是磁体之外还是磁体之内磁力线($\boldsymbol{H}$ 线)指向都是从 N 极到 S 极.如图 3-24 所示.所以按照磁荷观点,永磁体磁场是有源场,磁极是源头(尾).

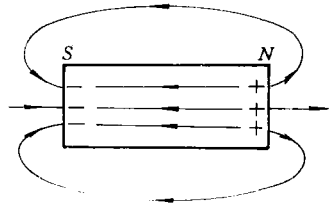


图 3-24

分子电流理论从本质上揭示磁现象起源于运动电荷，磁场是电流激发产生的，描述电流的磁场性质用磁感〔应〕强度 $\boldsymbol{B}$ 表示，磁场分布借用磁感〔应〕线（$\boldsymbol{B}$ 线）来描述，而 $\boldsymbol{B}$ 线与 $\boldsymbol{E}$ 线不同，都是些闭合曲线，无头无尾．例如，一根通电直导线在垂直导线截面上的 $\boldsymbol{B}$ 线是环绕电流的一组同心圆，再如，通电螺线管，分管内、外来说，管外的 $\boldsymbol{B}$ 线分布与一条形磁铁的外部磁力线（$\boldsymbol{H}$ 线）分布相同，在内部 $\boldsymbol{B}$ 线与管轴线平行并和外部 $\boldsymbol{B}$ 线相连接，形成一条条闭合曲线．所以从分子电流观点来看，磁荷不存在，源头无意义，具有这些涵义的磁极也不必要．

由上面的分析我们看到，用磁极讨论磁相互作用问题时是以磁荷理论为基础的，并不涉及电流；而分子电流理论则是以电流为磁的本质作为基点来讨论磁相互作用问题的，不存在也不必涉及磁荷和磁极，两种理论自成体系相互独立．实际分析问题时，有时用这种理论有时用另种理论，但要注意使用一种观点时始终如一，贯彻到底，不能混淆体系．否则就会出现困惑．

例如在讨论通电螺线管内部放置一个小磁针的取向问题时，按照磁荷观点用极性间相互作用规律解释和按照电流观点用磁感线方向判断，会得出相反的结果，见图 3－25．孰对孰错？似难辨清，困惑就出现在违背了始终为一的原则．如果我们用电流观点，那就根据通电螺线管内磁感应方向去判断，无需再用磁极做判断；如果是用磁荷观点，那就以一条形磁铁替代之，而不再考虑有传导电流的效应，这里等效磁体左端（螺线管的左端）是 $\boldsymbol{N}$ 极，右端是 $\boldsymbol{S}$ 极．为判断小磁针置入后的取向，我们想象在等效磁体内沿轴向挖出一狭长空腔，如图 3－26 所示．按照磁荷理论，腔的两端显现出极性，与等效磁体 $\boldsymbol{N}$ 极相近的腔端呈 S 性，出现净负磁荷，另端是 $\boldsymbol{N}$ 性，出现净正磁荷，小磁针放入后，其取向与前述电流观点的判断结果相同．殊途同归，两种方法等效地说明同一宏观现象．

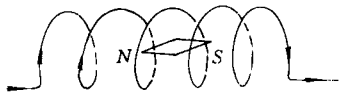


图 3－25

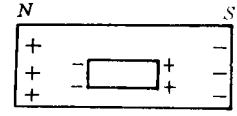


图 3－26

现代原子结构的理论已经证实电流观点揭示了磁的本质，但是由于用磁极描述问题具有简明的优点，所以教材中讨论通电螺线管的磁场取向时，又经常借用等效磁体的极性来作说明，这仅具有表述上的简便性，并非混用两种观点．教学上在初中阶段侧重于用磁极来说明问题，对通电螺线管则只讨论外部的磁场分布，而不涉及内部磁场；高中阶段要树立起电流的磁场观点，用安培定律分析磁力问题，但不论初中还是高中阶段都要注意从二种不同观点形成场的观念，并最终统一为电流的磁场．而不要停留于只从两磁体或两载流体间的相互作用上认识磁力．

3.24 怎样用力线描述场？使用力线对研究物理有何重要意义？

中学生认识场是从初中磁现象知识引入磁场和磁感线开始的，进入高中又接触到电场和电场线．磁感线、电场线我们都统称为力线，力线是为描述场而提出的，所以先就场概括地说些基本认识．

场的概念的建立是物理学自牛顿以来最重大的进展，之前物理学研究的对象主要是离散的物质实体，它们具有惯性．它们的原子所占据的空间不能同时为另一原子再占据．场是物质存在的另一类实在形态，具有广延连续的分布，若干个场可以同时处于同一空间．通过场物质实体间可以互相施加作用，科学实验和科技的实践完全证实了场的物质性，场绝不是虚无飘渺的．它虽不是

由原子分子组成，但也具有能量、动量，近代研究还发现在一定条件下场和实物之间还可以发生转化．

场不能简单地说成是一个空间区域或范围，它有自己的性质．反映场基本性质的物理量，就是基本场量，描述出这些量，就可以得出对场的认识．描述基本场量可以采用不同的方法，最根本的最精确的方法是写出基本场量的函数形式．例如场都有与力作用相关的基本性质，反映这一性质的基本场量有磁感〔应〕强度 $\boldsymbol{B}$、电场强度 $\boldsymbol{E}$ 等，如果确定了 $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 随空间各点和随时间变化的函数关系形式 $\boldsymbol{B}(x、y、z、t)$、$\boldsymbol{E}(x, y, z, t)$，磁场、电场的性质就得到了描述．但是这种描述很不直观，因而产生了用图示作辅助的方法．

怎样用图示方法显示场的性质呢？基本的想法是使图的形象与场量的性质相吻合．拿 $\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{E}$ 量来说，它们都是反映场力作用强度的，因而都是场强矢量．用有向线段表示矢量是我们熟悉的．即在场中一点画一有向线段，来表示该点场强的方向和大小，这样作就一些点是可行的，但如果点点如此，整个图形就显得杂乱无章，显然不可取．所以我们想到用有方向的曲线来描述．如何使有向曲线的形象跟场强性质相吻合呢？首先使曲线上每点的切线方向表示该点场强的方向，这样各有向曲线就可以把场中各点处场强的方向全部表现出来，称这些有向曲线是力线．

其次，为了使力线也同时能表示场强大小，我们联想到把大小跟力线分布的疏密对应起来．疏密程度通常是用力线密度来量化的，这样就可以用力线密度反映场强．而力线密度是指穿过一个与力线垂直的单位面积的力线条数，条数多密度大就表示场强大，它们成正比关系（实际上作力线图所画线的条数多少也是依正比关系表示场强大小的）．所以我们约定用力线密度表示场强大小．当对有向曲线赋予了上述物理意义之后，力线便形象地描绘出场强矢量的性质．如果描述的是磁场的磁感〔应〕强度，或者是电场强度，相应地称为磁感线（$\boldsymbol{B}$ 线）或电场线（$\boldsymbol{E}$ 线）．

根据上述约定，可以计算穿过场中任一面积(包括曲面、平面)的力线的总条数，又称力线通量 Φ，相应于 $\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{E}$ 线分别称磁通量、电通量．比如对于匀强磁场，磁通量 $\Phi = \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{S} = BS\cos\theta$，$\boldsymbol{B}$ 是磁感[应]强度，它的大小等于磁感线密度，$\boldsymbol{S}$ 是场中任一有方向的平面面积(方向取平面的法线方向)，θ 是 $\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{S}$ 间夹角．

能不能把力线画得相交呢？如果两力线相交于一点，则交点处应有两个切线方向，以表示该点的场矢量有两个方向，但是这一情况在事实上是不存在的，所以力线不能画成相交线．以上所述力线的物理意义是各种力线都具有的共性．反言之，力线能形象地描绘出场的通性．

力线还能反映各种矢量场的特性．$\boldsymbol{B}$ 线都是无始无终的闭合曲线，没有源头，犹如旋涡，所以磁体和稳恒电流的磁场是无源场(或涡旋场)．$\boldsymbol{E}$ 线总是从正电荷发出，终止于负电荷，有头有尾不闭合，犹如冒出的水源头，所以称静电场是有源场，电荷所在处是源头．如果用力线通量的概念来表述场的特性：在场中取任意的一个闭合曲面 S，对无源场由于 $\boldsymbol{B}$ 线总闭合，所以穿过该闭合曲面的磁通量总为零(记为 $\oint \boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0$)；对有源场，由于电荷是源头，所以穿过任意闭合曲面的电通量存在着不为零的情况．如果从力线是闭合还是不闭合的角度看，这是对场的又一个特性的描述．它还可以换成用环路定理表述的说法．这里不再介绍．概括上述，不同性质的力线描绘不同的场．

若上面用力线所描述的场性质都不随时间变化，则是静场．另外还常用力线描述变化场的动态过程和效果，例如对电磁感应现象发生的条件、过程、结果及其规律，都是可以使用力线作表述的．

综合上述，借用力线能把抽象的场、场的性质和变化，形象地表示出来，把严密的数学关系图象化，使数学公式和图象相辅相成，成为我们表述、研究场问题的一个基本方法．不过应该明确一点，力线不是场中实际存在的东西，我们不用这种方法去描绘，场

的性质依然存在．至于用实验显示出的力线，那只是一种模拟方法，不能看作存在的证据，也无需去寻找什么当证据．

3.25 电磁起重机、电磁继电器和电话耳机，它们所用电磁铁的铁心是一样的吗？

电磁铁是在铁心上紧密地套着通电螺线管构成的，其作用是希望能以较小的传导电流激发强大的磁场．实验和理论证明，无铁心的通电螺线管所产生的磁场既跟通入的传导电流大小成正比，也跟螺线管的匝数成正比，前面已经提过铁磁质的一个重要特点就是在外磁场中的磁化效应[①]比顺磁性、抗磁性物质强得多[②]．所以把铁磁质材料做成棒心插入通电螺线管时，铁心便被通电螺线管的磁场磁化，磁化产生的场就是原通电螺线管场的几千几万倍，总磁场大大得以增强．实现了以较小的传导电流获得强大磁场的愿望．

铁磁质材料除了都具有高 μ 值这一共性外，还另有个性．有的铁磁质在撤去传导电流时，仍可以保持相当强磁性，这种磁性称为剩磁；而有的随即失去了磁性．据此工程上把铁磁质分为两类：有剩磁特性的称为硬磁材料（硬铁），典型代表有碳钢等；无剩磁的则称软磁材料（软铁）如纯铁、硅钢片和铁氧体等．

软磁材料的磁性在传导电流接通时即很强，切断时即消失，具有快显快消的特点，适宜于电磁起重机和电磁继电器对电磁铁性能的要求，所以起重机、继电器电磁铁的铁心多用纯铁棒．还有变压器和电机的铁心也用软磁材料．硬磁材料适用于制造永磁铁，电话听筒电磁铁需用永磁铁，所以听筒是用钢等硬铁类作铁心．

听筒里为什么要用永磁体而不用软铁做铁心呢？电话听筒螺

---

① 通常以磁导率 μ 表示这一性质，μ 值越大，磁化效应越强．

② 铁磁质的 μ 值通常可以大至几千、几万，即所谓的高 μ 值．

线管中通过的电流是随声音变化的一种交变电流，如果用磁性快显快消的软铁心，那么，不论电流流向是正半周还是负半周，电磁铁都将吸引振动膜，就是说，在电流变化的一个周期里，振动膜振动频率变成原声音频率的二倍，造成声音失真．如果以磁性很强的永磁体做铁心，不通话时，振动膜就有些弯向磁极，当正、负半周电流流过螺线管时只是增强或者消弱膜的弯曲度，并不改变振动次数，使听筒发出的声音与从话筒传来的声音相同．对永磁体所起的这种作用换个说法是在它磁极附近的小间隙中产生一个稳恒磁场，许多电器设备，如各种电表、扬声器、拾音器、录音机也都有能起这种作用的装置．

剩磁还有另一种重要的应用领域，就是磁记录的理论和技术方面，如记录声音、图象、数据和文字的录音、录象带和磁鼓、磁盘等都早已成熟；磁性卡片的出现和推广应用又使磁记录找到了新的应用途径，将促进“无现金”时代的早日到来．

3.26 怎样认识磁场力的特性？

磁体放入磁场，磁体便受到磁力作用，通电导线在磁场中也会受到力的作用．不论是磁体还是通电导线受到的力都是磁场给予的，具有共同的特性，故统称为磁场力．

人类认识磁场力是跟认识电场力相比较而发展起来的，经历了“合—分—合”的过程．对磁力认识始于天然磁体能够吸引铁屑等铁制物一类现象，在此前后，人们也还发现了经过摩擦的琥珀等物，能吸引轻小物体的电力．两种现象的极其相似性，在当时想当然地把“磁、电”看成一码事．长期实践的积累，人们进一步发现两种力性质不同，磁性体随时随处都可以吸铁制物，琥珀等物则需经摩擦才会吸引轻小物，大家开始转而接受磁电是完全不同的东西．库仑总结出两电荷间和两磁极间作用力都满足的平方反比定律，首次对两种力作出了定量计算，但仍将二者分开，奥斯特开创性的发现了电流磁效应，终于揭开了磁电间的内在联系，彻

底改变了二千多年来的错误见解，把磁学研究从磁电无缘的迷途引向既有区别又有联系的正确发展道路．法拉第以非凡的想象，另辟蹊径，建立起场和力线的概念，把磁、电间的作用从限于物质实体之间的作用中解脱出来，扩展到它们周围的空间，认识到作用是通过场传递的，有了场才有了场力的概念，磁场有磁场力．安培巧妙的运用了数学解决了磁场力的计算问题，故常常称磁场力是安培力．

从起源看，电场由电荷激发，电场力是电场对场中电荷的作用．那么磁场和磁场力呢？宏观现象告诉我们，磁场可以由磁体激发，也可以由电流激发，而磁体磁性的本质上也是物质内部的原子电流引起，所以磁场统一于由电流激发．电流是电荷定向运动产生的，磁场便归因于运动电荷所激发；磁场力归源于磁场对场中运动电荷的作用力，即洛伦兹力．这样通电导体之间、磁体之间以及电流与磁体之间的相互作用，都可归源于运动电荷间通过磁场的相互作用．

磁场力的本质特征表现为力在方向上所具有的横向性．为了说明这点，让我们再次对奥斯特实验中的两种极端情形做些考察．通电导线与小磁针处于垂直跨过的位置关系时，是观察不到磁针偏转的，处于平行跨过的位置时磁针发生偏转．注意这里的"偏"是对导线的纵向方位说的．这一现象显示出两层意义，其一：证明是电流在周围激发出磁场，电流既然能使磁针偏转，说明它象磁体一样对磁针具有作用力，表明电流周围必存在磁场；其二：还告诉我们磁场方向跟电流方向存在相依关系．由于我们约定是用检验小磁针的 N 极受力方向，标定为磁场方向的，所以，不论是磁针的 N 极还是 S 极，所受磁场力的方向，对电流方向讲都具有横向性，而非纵向性．正是磁场力方向的这种横向性，才使导线垂直跨过磁针时不发生偏转现象．这恰好反映出磁场力和电场力、万有引力的本质上不同，在两点电荷间的静电力是沿着它们的连线，两质点间的引力也是沿着两质点的连线，都具有纵向

性．两种场力方向的取向与相互作用者之间的联线也是纵向性的．

磁场中每点处磁场方向对激发电流方向具有的横向性，使磁力线成为围绕着电流的一组闭合曲线，磁力线跟电流互相套绕着，整体来看磁力线象是绕着电流打旋，犹如水流里发生的涡旋，因此也形象地称磁场为涡旋场，它和静电场电力线的形象完全不同．

因此在判别磁场力的方向时，要兼顾三个相关因素的方向：(1)施力方，直接给定磁场方向或通过给出激发电流方向和激发磁极的极性间接给出磁场；(2)受力方，置入磁场中的磁极极性和通电导线电流方向；(3)相互作用力的方向，该方向是沿受力导线的侧向，因而总与导线垂直．判别磁场对电流作用这一类问题中各方向间的依赖关系用左手定则；所以要从实质上认识和运用左手定则，并注意与安培定则的区别．安培定则是用来判断电流磁场方向的．使用安培定则，还要区别对于直线电流和通电螺线管的两种不同用法．在这两种情况下，四指和拇指所表示的意义相反．

进一步研究发现，上面所讲的磁场性质都是对稳恒电流激发产生的稳恒磁场，即静磁场而言的．如果磁场不是稳恒的而是变化的，那么变化磁场的空间所具有的力的性质不同，是另一种场——感生电场特性的反映．

[思考题]

(1)分析“磁铁只能吸铁”的说法．

(2)铁磁性物质磁化的本质特征是什么？从磁性来源上看，它与顺磁性、抗磁性物质有何不同？

(3)一支通电螺线管对外相当于一个磁体，对内呢？

(4)说明“与螺线管相应磁体的磁极”的含义．

(5)使用力线有何优越性？中学物理在哪些地方使用了力线，都起什么作用？

(6)磁场力本质特征的表现是什么？

七、电磁感应现象

3.27 电磁感应现象中，感应电流产生的条件是怎样探求到的？

感应电流产生的条件，在中学物理教学中先后作过不同表述．初中阶段的说法是“闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁力线运动时，导体中就产生感生电流”；高中教材概括为：“只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感生电流．”初中的说法是就部分导体跟磁感线发生横向相对运动这一情形讲的，是局限于特定情况所作的结论，没有顾及到一般情形．具有形象、简明的特点，易于为初学者理解．高中的说法概括了所有各种可能情形，从整体的变化把握了发生条件，是一种全面的认识，也为定量表述打下了基础．

磁通量的变化是产生感应电流的唯一条件，这个结论的得出，经历了长期的探求过程．它是以物理思想创新为先导，然后进行了大量的实验探索．其中饱含了曲折和失败，从失败的和成功的比较中才逐步认识到的．

奥斯特的“电流磁效应”实验的成功，展示了电现象与磁现象相关的事实，揭示了由电生磁的条件和结果：有电流，电流周围就产生磁场．对这一事实从自然界是个统一整体的观点来看，会进一步想到电磁既相关，电又能生磁，那么，其间的转化决不会是单向的，也一定存在从磁向电的转化．从科学发展中来看，法拉第在奥斯特和安培之后对他们的研究成果进行了仔细分析，当时他想：一个静电体可以使附近导体感应出电荷，磁体可以使近旁铁块磁化（感应生磁），那么，电流为何不可以使近旁的导线中感应出电

流呢？据此作出了伟大的预言："磁能转化成电"．这是继奥斯特实验后两年，1822 年法拉第在日记中写下的光辉思想．为此他进行了系统的探索．开始，他想从与奥斯特相反的实验中得到证实，把两根导线平行放置，向其中之一通上稳恒电流，期望能从另一条导线中感应出电流，后来他用强磁铁替代通电导线，均以失败告终．但他锲而不舍，历经十年艰辛，终于在 1831 年取得了突破性进展．他把成功的几十个实验分类归纳，向世人宣告可以实现由磁生电的五种情况：①变化着的电流；②变化着的磁场；③运动着的稳恒电流；④运动的磁铁；⑤在磁场中运动的导体．此时法拉第才终于清楚地认识到，电磁感应现象的发生是与某种"变化"相联系的，不断的获得依赖于不断的变化，是一个动态过程．

产生电磁感应现象的条件是动态效应，与静电感应现象和电流磁效应发生的条件有别，它们都是静态效应．在静电感应中一个带电体只要和另一导体保持近距离，感应出的电荷就可以一直保留下去；在电流磁效应中，一根导线只要通入稳恒电流，在它周围就会激发起稳恒磁场，并一直与电流相伴．因此从静态效应实验中是观察不到动态效应的．法拉第开始阶段失败的原因也在于此．由磁感应生电的动态性也表现为发生的瞬时性．这是在实验中能否观察到效应的关键．

和法拉第同时代的不少人也都寻求过磁感应生电的方法，有的是因企图从静态中探求未获成功；有的就是因为未能捕捉到这个瞬间而告失败．瑞士物理学家科拉姆，1825 年曾经做过磁铁棒插进抽出线圈的实验，据说为了排除磁铁对检流计的影响，他特地把检流计和螺线管用长导线相连分放在两个房间，先使磁铁与线圈作相对运动，然后再跑到隔壁房间去观察检流计，跑失了良机，当然他什么也得不到了．

为了把法拉第归纳出的五种变化情况进一步概括，我们先把它们分成两大类实验：一类是闭合电路不动，其磁场随时间变化；另一类是磁场不变，闭合电路相对于磁场运动．然后再引用磁通

量的概念作表述．可以看出两类实验引起的效果有一个共同点，都使得穿过闭合线圈的磁通量发生了变化．所以一般情况下的结论就是：磁通量的变化是产生感应电流的唯一条件．因而为了获得持续不断的感生电流，必须不断保持磁场的变化或者保持导体在磁场中的切割磁感线运动．

根据 3.24 中磁通量计算式 $\Phi = \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{S} = BS\cos\theta$，可见，$\Phi$ 的变化与改变 B、改变 S 或是改变 θ 相联系，所以用 Φ 概括的表述了两大类实验的变化因素．还值得提出的一点，就是 B 既可以来源于闭合电路中自身电流激发，也可以来源于电路之外的场，据此也可将电磁感应分为自感与互感两类．

3.28 用楞次定律确定感应电流方向时，“阻碍”之意如何理解？

掌握了感应电流产生的条件之后，进一步就需要寻求决定它的方向的因素．电流既是因磁通量变化而发生，它的方向自然也要依赖于磁通量变化．从实验事实上已经充分显示了这一制约关系．但是，要把它叙述清楚并不容易，法拉第自己没能办到，楞次在法拉第资料的基础上，又通过实验才总结出：感应电流的方向总是要使它的磁场，阻碍引起感应电流的磁通量的变化．

楞次总结出的这一规律，是从产生感应电流的一般情形中概括出来的，撇开了发生电磁感应现象的各种具体形式，抽出了它们的共同点．所以在理解上要把共性当作重点，这包括有：第一，分清因果．原因是“引起感应电流的磁通量变化”，结果是“感应电流产生的磁场”；第二，把握因果联系具有相对抗的特点．这一特点选用了三个关键词作表述；“阻碍”、“变化”和“总是”．阻碍是对变化讲的，而磁通变化，有增减之分，所以“阻碍”之意应为：增则阻增(对消)、减则阻减(补充)．切忌把“阻碍”作“相反”理解．因为“相反”只说明了磁通增加这一种情况，没有包含当磁通减小时的情况．

为了准确运用“阻碍”判定方向，一般按“四确定”，分四步进行：①确定原磁场的方向；②确定穿过闭合电路的磁通量的变化是增加还是减少；③确定感生电流的磁场方向；④确定感生电流方向．

例如在图 3－27 中，一个矩形线框，放入一个均匀磁场中，用“×”表示磁场方向垂直纸面向里，当可动边在外力作用下向右边运动时，穿过线框包围面的磁通量增加，感生电流的磁场方向与原磁场方向相反，从纸面里指向纸外面，感生电流方向沿线框逆时针方向流动．流过可动边里的感生电流方向便如图中箭头所示．这是运用楞次定律求得的．由于图示的电磁感应现象形式，是闭合电路部分导线作切割磁力线运动，我们也可以对这种特定形式，直接用右手定则来判断：使原磁场穿过手心，拇指方向代表导线运动方向，四指方向就是感生电流方向．结果与前述一致，不过对于这类情况使用右手定则具有明显、简便的特点．

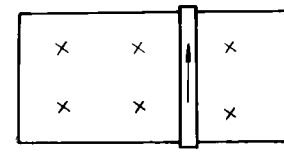


图 3－27

3.29 电磁感应现象中，电源作用是如何实现的？

1．感应电动势起了电源作用

我们知道，电路中有电流，是因为电路两端存在电压；电压是靠电源提供的，有了电源电路中才有持续电流．电磁感应实验中，闭合电路里产生感应电流，这电路中必定是有电源起作用．我们还知道，电源提供电压从根本上讲，是靠其内部某种非静电力移动电荷，才使正、负极不断地聚集起正、负电荷．不同电源的非静电力移送电荷作功是不同的，单位电量的电荷从电源一端经内部移至另一端时，非静电力所作的功就等于电源的电动势．发生电磁感应现象时，闭合电路内也一定存在某种电动势．这种由电磁感应引起的电动势叫感应电动势．正是感应电动势的存在才使

得发生电磁感应的电路能起到电源的作用．

实验证明，闭合线圈的感应电动势 $\mathscr{E}$ 的大小，跟穿过这个线圈的磁通量的变化率 $\mathrm{d}\Phi/dt$ 成正比，而跟磁通量 Φ 本身的多少无关．这就是法拉第电磁感应定律．用公式表示是：

$$\mathscr{E}=k\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

k 是比例常数．

根据磁通量的变化率能直接确定感应电动势．感应电流的求得则还要知道闭合电路的组成和电阻，如果电路不闭合，则只有感应电动势而无感应电流．所以电磁感应现象中，感应电动势比感应电流是更基本的物理量．下面对电动势的产生做进一步分析．

法拉第电磁感应定律作为一个整体表明，只要闭合电路有磁通量变化就有感应电动势，而不问这种变化的起因．事实上，如前面讨论感应电流产生条件时已经指出过的那样，磁通量的变化原因分为两种，由这两种原因相应产生感应电动势的内在机制也不同，通过对两种机制形成的分析可以看到它们是从不同途径实现电源作用的．

2．产生动生电动势的非静电力是洛仑兹力

当磁场 $\boldsymbol{B}$ 不随时间变化，而闭合电路的整体或部分对磁场作相对运动，使线圈的磁通量变化，这种原因引起的感应电动势叫动生电动势．

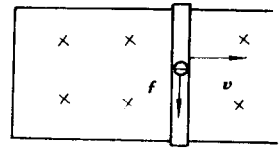


图 3－28

以图 3－28 为例作分析，可动边受外力作用以速度 $\boldsymbol{v}$ 向右作切割磁力线运动，它里面的电子也随之向右以 $\boldsymbol{v}$ 速度运动．因线框在外磁场中，向右运动的电子就要受到洛仑兹力 $\boldsymbol{f}=-e\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$，$e$ 是电子电量的绝对值，$\boldsymbol{f}$ 方向向下，

它使电子向下运动，因而在可动边的下端聚集起负电荷，上端聚集起正电荷，整个闭合电路便出现逆时针方向的电流，这就是感应电流．产生这个电流的电动势是动生电动势，非静电力是洛仑兹力，它存在于可动边中，可动导线便成了一个电源．它是电源内部，这里上端是电源的正极，下端是负极，其余的框边是整个电路中的外电路部分．

3．产生感生电动势的非静电力来源于感生电场

当闭合线圈不动而磁场发生变化时，线圈里的磁通量也会发生变化，由此引起的感应电动势叫感生电动势．

在动生电动势出现的情况下，由于导体运动，非静电力是洛仑兹力，现在线圈不动，线圈中的电子并不受洛仑兹力，只是磁场的变化便出现了电动势，那么与感生电动势相应的非静电力是一种什么力呢？想必它是与磁场变化有关的．从我们原有认识来看，能对电荷起作用的力，迄今只有两种：洛仑兹力（磁场对运动电荷的作用）和电场力．由电荷激发的电场，对场中的任何电荷都能发生库仑力．但是库仑力跟磁场的变化没有关系，所以库仑电场力、洛仑兹力都不是我们要探求的非静电力．原有的知识已经不能解释，需要从事实出发，扩展认识，揭示出尚未知道的力．

实验事实表明，感生电动势跟线圈的形状、制成线圈所用的材料的性质完全无关，这说明线圈中静电荷所受的力，是由变化磁场本身引起的．既然如此，设想取走线圈，把静止电荷直接置入变化磁场空间，电荷也一定还会受到这个力．变化的磁场空间，具有对静电荷作用力的性质，这是个新的效应，不同于我们关于静电场能对电荷产生作用的已有认识．据此将原来的电场力和电场概念给以推广：凡是静电荷因其荷电而受到的作用力叫做电场力；凡具有电场力作用的空间力场叫电场，这样一来，电场便从单一激发原因变成了两种原因：①由静电荷所激发，叫库仑电场；②由变化磁场所激发，称为感生电场．

感生电场力移送线圈中电荷作功从而产生感生电动势．显

然，感生电场力是非静电力，它源于变化着的磁场．正是由于变化着的磁场周围激起了感生电场，感生电场对置于场中的导体内部的自由电荷要产生感生电场力，感生电场力移送电荷而作功，从而形成了感生电动势．

虽然感生电场和静电场都能对电荷产生作用力，但两者又有实质性区别．就事实来说，我们已经看到感生电场力在闭合线圈中移送电荷回转一周过程中作的功不为零，因而产生了感生电动势．而静电场中，静电场力沿任一闭合曲线作功必为零，因此感生电场力虽是电场力但不同于静电力．进一步从根本上讲，感生电场与库仑电场在基本性质上有重大区别：①描绘感生电场的力线是闭合曲线无头无尾，不象静电场的电力线有始有终；②感生电场不是势场，不能引用电势、电势差的概念，而静电场是势场．因此常把感生电场也称为涡旋场．

3.30 对比分析动生感应电流的产生和磁场对通电导体的作用两种电磁现象

两种现象，前者属磁生电，后者是磁电间相互作用，这两件事本身就是从一个侧面展现了磁电的联系．教学中学生往往对二者纠缠不清，混淆左右手定则的使用．所以应该从比较入手，认识区别，分析联系，这样做有助于深入认识它们的本质．

1．两种现象是两个不同的物理过程，具有不同的规律

通电导体放进磁场里要受到力的作用，这个力是磁场给予的．它的性质前面有过一些讨论，这里为了比较，从另一角度再作些阐述．事实表明安培力是由磁场和通电导线中的电流共同产生的，没有它们之中的哪一个都不会出现这种作用．所以说它的存在是磁对电发生作用的物理过程，表现为通电导线发生运动．因此作为过程产物的安培力，它所具有的基本性质，必然受制约于磁电双方．安培力的方向，既跟电流方向垂直又跟磁场方向垂直，三个方向间相互依存的正交关系用左手定则表示：让磁力线穿

入手心，四指指向电流方向，则拇指所指方向便是安培力方向．安培力的大小F，既取决于电流的大小I、导体的长l，也取决于磁感应强度B．用公式表示是$F=IlB\sin\theta$，θ是I、B两方向间的夹角，它的取值直接影响安培力大小：$\theta=\frac{\pi}{2}$时，F = IlB，具有最大值；$\theta=0$或π时，$F=0$，表明当电流方向平行于磁力线时，导线中虽有电流也不受安培力．θ的作用也使我们看到了安培力的基本性质．

闭合电路中部分导体运动切割磁力线引起电流，是由磁感应而生电的物理过程，过程诱发的原因是导体在磁场中作切割磁感线运动．导体的运动是由外力（通常是某种机械力）作用而引起．作为这个过程的产物——动生感应电动势和电流，其方向和大小必然受制于产生原因即磁感〔应〕强度和导体运动的速度．感应电流的方向，既跟磁场B的方向垂直，也跟导体运动速度v的方向垂直，三者方向间的相依关系用右手定则表示．和左手定则区别之处是拇指代表导体的运动方向，四指代表感生电流方向．动生电动势$\mathscr{E}$的大小也决定于相关各因素，以公式表示$\mathscr{E}=Blv\sin\theta$，$l$是切割磁感线导体的长度，$\theta$是$v$跟$B$间的夹角．

从上面的分析比较看到，磁对电的作用和磁生电这两种不同的物理过程，表现出两种现象，遵循各自发生的规律，相应有两个定则和两个公式，这是它们的不同．但是二者都同是磁电联系的具体表现，那么两个不同的物理过程中也一定蕴含着这种联系．

2．两种过程的微观机制都借助洛仑兹力作为“中介”

对导体作切割磁感线运动而生电的微观机制我们前面已有分析，导体作切割运动时带动了其中每个静止的电荷一同在磁场中运动，因而使电荷受洛仑兹力作定向运动，结果在运动导体中形成了电流．

当通电导体放进磁场里时，从微观机制看，导体里的电流是定向运动的电荷，在磁场中导体内的每一定向运动的电荷，都要受到

洛仑兹力．因受导体约束，而将这些力传递给导体(对这种传递机制的深入分析这里从略)表现为通电导体受到的磁场力．

比较两种过程的微观机制可以看出，有一个共同点：运动电荷都受到洛仑兹力．对一个运动导体，洛仑兹力的微观转换机制获得了宏观的动生感应电流；对一个通电导体，洛仑兹力微观传递作用在宏观上表现为导体受到的安培力．所以说在宏观现象与微观机制间洛仑兹力起着“中介”作用．只是因为，两种过程中使电子获得的定向速度的驱动方式不同：在磁生电的过程中是外力驱动导体，由导体带动才使电子作定向运动；在磁对电的作用过程中则是由外加电压驱动使电子作定向运动．导致洛仑兹力的成因有别，从而造成洛仑兹力实现“中介”作用的途径也不一样，最后产生出相异的结果，一个“生电”，另一个“生力”．所以从微观机制看两种过程都是借助于洛仑兹力的中介作用，以两种方式驱动，沿两种途径实现了两个结果．

3．两种现象相伴而生

上面对两过程的分析，只指出了一个过程中发生的单一现象，而事实上在一个过程中都是两种现象共生的．就此我们分别作些讨论．

闭合电路中，部分导体做切割磁感线运动时，运动导体中就产生动生感应电动势，整个闭合电路中便有电流，这是磁生电现象．运动导体里一旦有电流流过，电流必定处于磁场中，因而又出现磁场对通电导线的作用．这就是说在导体切割磁感线引起动生电流的同时也伴随着发生了动生电流受磁场力的作用，前一种情况下判断动生电流的方向用右手定则，后一种情况下判断磁场力的方向用左手定则，而磁场力的方向总是跟磁生电现象中的外力方向相反，随外力的作用而生而变，跟外力形影不离．事实上正是在外力不断克服磁场力而推动导体持续运动的过程中才获得感应电流的．可见磁生电的过程不是单一现象的过程，它与磁对电的作用是共生共存的．

同样，一通电导体在磁场中因受磁场力作用，导体便会在磁场中运动，而导体运动必定要切割磁感线，注定会产生感应电动势，运用右手定则可以判断出它的方向总是与通电导体两端的外加电压相反，故而常称反电动势．反电动势的出现制约了磁场力的大小，说明磁对电的作用过程也不是单一现象的过程，而是与磁生电现象共生共存的．

所以磁生电与磁对电的作用虽是两种物理过程，但总是相互伴生、相互共存的，如同孪生兄弟．正因为如此教学上也成了难点，对策就是既要分清两个过程的本质和规律，也要认清它们的本质联系．做为认识的宏观整体是不能把二个方面割裂开的，但是教学过程又是循序渐进的，初学时要分开，先顾及其一，再顾及其二，都学过之后再综合成实际面目．

3.31 电磁感应现象中机械能是怎样转化为电能的?

前面已经从微观机制分析过电磁感应，现在再从能量转化的观点加以分析．为了突出对其中基本问题的认识，分析时用了一种特殊情形为例，作简明讨论．

闭合电路的部分导体做切割磁感线运动时，外力移动导体作了功．作功过程中，一方面在消耗机械能，另一方面同时在产生感应电流，获得了电能．由此我们认识到在电磁感应现象中是机械能转化成了电能，这一概括性认识，是从能量转化的因果对应关系来说的．转化是个过程，作功是实现转化的方式之一，以上这些观点都是熟悉的．问题在于这一作功过程是怎样进行的，它有什么特点，为什么机械能在这个过程中转化为电能而不是别的能呢？这是本节要着重分析的问题．

图 3－29 所示的闭合电路处在匀强磁场中，设磁感应强度为 B，方向如图中“×”号表示，长为 l 的导线 AB 在外力 F 的作用下，以速度 v 向右做切割磁感线运动．AB 中产生动生感应电动

势 $\mathscr{E}=Blv$. 由于电路是闭合的，电路中有感应电流 I，它的方向用右手定则判定，图中以箭头标出，这样电路中获得的电功率 $P=\mathscr{E}I$，或 $\mathscr{E}=BlvI$，这是一个方面 .

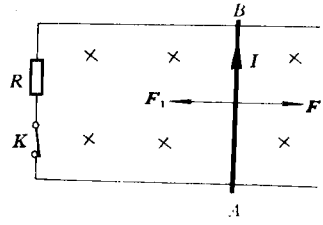


图 3－29

与此同时另一方面是导线 AB 中一出现电流 I，就处于磁场中立即受到磁场对它的作用力 F_1，方向用左手定则判定，如图示，它与外力 F 方向相反，阻碍导线 AB 的切割磁感线运动，而且只要 F 使导线向右作切割磁感线运动，孪生的 F_1 就立即阻碍运动，形影不离 . 所以外力对导线 AB 的作功过程，就是 F 不断克服 F_1 阻碍的过程，也就是 F 与 F_1 相互对抗的过程 . 在由它们确定的过程中，实现着与各方相对应的能量形式间的转化，亦即从与机械力对应的机械能向与磁场力相应的电能转化 .

根据设定的条件，磁场力 $F_1=BIl$，方向与切割速度 v 反向，则磁场力的功率 $P_1=-BIlv$，负号表示磁场力作负功，是对外力 F 作正机械功而言，恰好反映了磁场力的功，是以机械能的减少为代价的 .

比较上述 P 与 P_1 的计算式，发现每一瞬时(以该时刻的 v 和 I 标定)它们的大小总相等，说明电路内每时每刻获得的电能，都是以此时此刻消耗的机械能来换取的，这是能量守恒的必然反映 . 而这种换取的实现是以对抗双方的时刻存在为前提条件的 . 如果失去了一方，对抗消失，转化也不再进行 . 如上述电路当 AB

切割磁力线时，将 K 打开，AB 中便只有电动势，电路中没有了电流，磁场力随即消失，对抗一方不存在，电路中不能获得电能．与此同时，外力 F 也不必克服磁场力的阻碍，也就不必为此而消耗机械能，机械能向电能的转化过程即刻停止．

综上所述，电磁感应现象中存在着外力跟磁场力的对抗，才发生机械能向电能的转化，这一结论，虽然是从导体的平面平动得到的，但具有普遍意义，对于线圈在磁场中转动的发电机模型也是适用的．

3.32 通电导体在磁场中运动时，电能是怎样转化为机械能的？

设闭合电路由图 3－30 所示的几部分组成，整个电路都在一匀强磁场中，磁感〔应〕强度 B 的方向如图，$\mathscr{E}$ 为电源电动势，R 为电阻，长 l 的导线 AB 与线框正交且可自由滑动，电键 K 闭合时，电路中通过的电流为 I（注意：不要认为 $I=\mathscr{E}/R$）．导线 AB 受到磁场力作用，方向用左手定则判断，大小 $F=IBl$、因而加速运动，动能增加，获得了机械能，设某一时刻导线 AB 的速度是 v，则此时刻机械功率 $P_1=Fv$，或 $P_1=IBlv$.

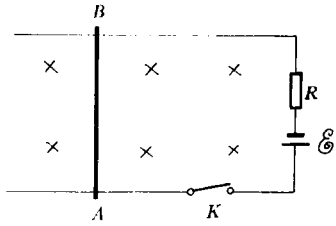


图 3－30

机械能是靠消耗了电能而获得的，这个结论是清楚的，问题仍然是经由一个怎样的过程实现从电能向机械能的转化呢？

我们已经指出过，通电导线 AB 受磁场力作用的运动，必然又是一个切割磁感线的运动．因此立即会在 AB 中孪生电磁感应现象．闭合电路里无外加电源时，电路中的电流都是因磁感应而生的，现在情形不同，电路中有外加电源，所以电路中的电流就不单是感应产生的，应该是由电源和因电磁感应产生的感应（动生）电动势共同作用而形成的，感应电动势的方向用右手定则判断，恰与外加电源电动势 $\mathscr{E}$ 的方向相反，故有反电动势之称，记作 $\mathscr{E}_{反}$，其大小 $\mathscr{E}_{反}=Blv$，这样一来，流过电路里的电流 I，应由全电路欧姆定律给出：$I=\mathscr{E}-\mathscr{E}_{反}/R$．

反电动势的功率 $P_2=I\mathscr{E}_{反}$，或者写成 $P_2=-IBlv$，负号反映了 $\mathscr{E}_{反}$ 与电路中的电流方向相反．反电动势做负功又可以说成是电源克服 $\mathscr{E}_{反}$ 作功，表明它是消耗了电源的电能，所以说 P_2 也是对所消耗电能的计算，这是就反电动势与电源关系来讲的．通常反电动势同时还具有另一重身分，它又是电路中电能向其它形式能转化的特征量，比如在充电电路里代表转化为化学能的那分电能，在有电动机的电路里代表转变为机械能的那部分电能．$\mathscr{E}_{反}$ 的双重身分说明在电能向其它能的转变中它是一个“二传手”，一方面从电源获取电能，另一方面又将它的所得转化为其它形式能．

至于反电动势将电能转变为哪一种形式能，要看与 $\mathscr{E}_{反}$ 相对抗的另一方性质．本问题中与它相对抗的是磁场力．因为只要通电导体受磁场力 F，导体产生运动就必然诱发出 $\mathscr{E}_{反}$，而 $\mathscr{E}_{反}$ 的产生又使电流减小，抑制着 F，F 与 $\mathscr{E}_{反}$ 相对抗，在对抗中实现了电能向机械能的转化．

如果对抗的一方不存在，比方 $\mathscr{E}_{反}=0$，那也就不存在转化．例如导线因受约束不能运动，这时虽有磁场力但导线也不能获得机械能，$\mathscr{E}_{反}$ 自然为零，即表明电路中除了转化为焦耳热的电能外，无需消耗更多的电能．反之，设想 F 与 $\mathscr{E}_{反}$ 不是相对抗的情形，则应设定 $\mathscr{E}_{反}$ 与电流不是反向而是同向，那么结果会是什么呢？电

路中的电流在两个同向电动势作用下变大，磁场力 F 随之变大，F 变大又使电流增加……如此循环发展，当然与能量守恒相背，因而是不可能的．

以上从正反两方面都说明：通电导体受磁场力作用而运动，是磁场力跟反电动势对抗作用的过程，在对抗中实现电能向机械能的转变．这个结论，具有普遍意义．同样，对于通电线圈在磁场中转动的电动机模型也是适用的．

3.33 磁和电之间有哪些联系？二者是一回事吗？

反映磁和电之间联系的现象很多，归纳起来有两方面：磁电间的互生和磁电间的相互作用．

磁电间互生，包括电生磁和磁生电．奥斯特的电流磁效应实验是对电生磁事实依据的首次发现；磁场对场源电流的依赖关系是电生磁的规律．毕奥—萨代尔定律概括了这个规律，它用严密的数学方法计算出一个任意形状电流所产生的磁场的方向和大小．高中课本给出了直线电流磁场的计算公式．在初中范围用实验的方法对这一规律作了些定性的介绍：指出了磁场和它的电流二者方向间存在的安培右手定则关系；显示了几种基本形状电流磁场的磁感线分布．

电磁感应现象是磁生电的事实依据，法拉第电磁感应定律、楞次定律都是磁生电的规律．高中课本反映了这些内容，初中限于对动生电流现象的描述和应用，并引进了发电机原理．

磁电间互生现象和互生规律，除了上述，后面在 3．35 对电磁波本质的分析中，还将进一步认识到电场（感应电场）跟磁场间也有互生，所有这些都反映了磁电间存在的联系．

各种通电导线间发生相互作用的实验，是磁电间存在相互作用的事实依据．磁电间的作用除了这种电流与电流间的相互作用外，还有磁体与磁体、磁体与电流间的作用．这些作用都是通过磁场发生的，而且磁体的实质也归结为物质内部原子电流的存在，所

以把三种作用都归结为磁和电间这一种相互作用．磁场对通电导体的作用这个实验就是对这类事实的概括，磁场对电流作用力规律的确切表述是安培力公式，它给出了磁场力的方向和大小对磁感〔应〕强度和电流的依赖关系．高中阶段能够计算电流在匀强磁场中受到的力，初中介绍了这些现象，指出了其间的方向关系还引进了电动机原理．

磁电宏观现象间的密切联系和它们所遵循的规律，能够用一组数学方程统一地给予表述，这就是麦克斯韦方程组．磁电间的密切联系还可以从微观带电粒子的运动和受有洛仑兹力、电场力得到统一说明，那么，磁电是一回事吗？

为了说明这个问题，先考察图 3－31 中所示的一段导体在磁场中运动时的情况．当导线切割磁感线运动时，导体内的自由电子也都随着一起运动，从而也都有和导线相同的速度，这样，每一自由电子都受到磁场力的作用，即洛仑兹力的作用，结果在导体的两端分别聚集起负、正电荷，运动导体成了一只电源．

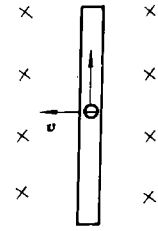


图 3－31

现在我们变换参考系来研究这同一现象，又会怎样呢？假定观察者随导体一起运动，他发现，静止在导体上的每个电子都受到了力的作用．据此推想，空间存在着力场，由于是静止电荷受力，他称这个场是“电场”，他还认为这个场的出现，不是因静电荷的存在所形成，而是同另一参考系中存在的磁场有联系．这个磁场相对于观察者而言是运动着的，因而他认为是这个运动着的磁场产生了“电场”，姑且称它为“感应电场”．（参看 3．30）所以这位观察者看来，自由电子受到的是感生电场力而不是磁场力．就这样他也成功地解释了运动导体成为电源的事实．

上述例子启示我们：一个参考系中的磁场，在另一个参考系中的观察者看来会产生电场；反之亦然．当相对论时空观念引入后，

这个思想才清晰了．电场和磁场是一种物质——电磁场的两个方面，它们具有统一性，但又具有相对性．在给定的参考系中，电场、磁场表现出不同的性质，参照系变换时，它们之间可以互相转化．所以不能简单的把磁电视为“一回事”．

3.34 交流电是怎样产生的？它有哪些基本性质？

1．变化的电流就是交流电吗？

方向和大小都不随时间变化的电流叫稳恒电流，习惯上也常称为直流电、电流如果是随时间变化的叫变化电流，它分为两种：方向不变大小变的是脉动直流；方向大小都变化的才是交变电流，也称交流．所以交流不等同于变化电流，只是变化电流的一种．交流电的形式很多：如市电电流，电子示波器里用来扫描的锯齿波电流，电子计算机中采用的矩形脉冲电流等．其中最常见最重要的是市电电流一类的简谐电流，也叫正弦电流，物理教学中的交流电就是指这种电流．它的大小和方向随时间按正弦（或余弦）函数规律作周期性变化，高中课本就是这种表述，初中课本虽然未作严密的表述，但也指出了电流方向具有周期性变化的特点．这是应该注意的．有人把交流电说成是“方向来回变”的电流，这种说法就没有体现出这个特点，因为“来回变”并不具有周期性的意义．

2．交流电的产生

交流电的产生是电磁感应原理应用的一个典型．根据导体切割磁感线能获得感生电流的规律，要想连续获得电能，就要设法在有限的磁场空间内，使导体做连续的切割运动，所以实际上都用线圈转动替代导线的平动运动．图 3－32 是获取交流电的原理示意图．矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，每转动一周线圈中的电流方向改变二次，电流大小经历一次周期性变化．线圈继续转动，电流周期地重复上述变化．

分析周期性变化时，要特别留意对中性面的理解．中性面是指与磁感线垂直的平面，它对分析交流电是一个关键位置．线圈

在磁场中运动到中性面的瞬间，线圈里的感生电动势为零，感生电流也为零．而在这位置的前后，线圈里的电流方向相反，所以中性面是电流改向的分界面．线圈在转动一周里，两次到达中性面，电流因此两次改向．有人误以为线圈在中性面位置时，穿过线圈的磁通量最大，所以此时得到的感生电动势最大．这个看法，从两方面分析都是错误的：一方面感生电动势不是跟磁通量成正比，而是跟磁通量的变化率成正比；另一方面线圈在中性面附近运动时，与线圈平面跟磁力线平行的位置（即和中性面垂直位置）附近运动时，如图 3－33 所示．经同样的时间 Δt 内切割磁感线数的多少是不相等的．后者远多于前者，因此后者才是感生电动势最大的位置，前者在通过中性面的瞬间感生电动势为零．

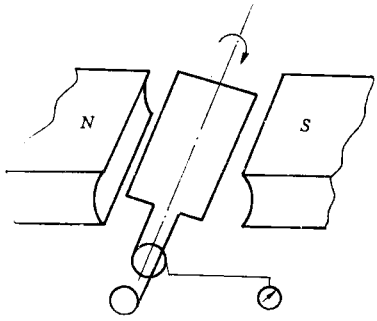


图 3－32

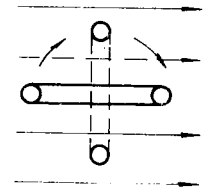


图 3－33

在图 3－32 中的装置里，如果在外电路接上直流电源，向线圈通入电流，问题就变成了通电线圈在磁场里的转动问题．这里也有线圈平面跟磁感线垂直的位置，不过这时线圈是因为受到一对平衡力作用而停在这个位置上的，如果因惯性稍稍发生偏离，这时线圈受到一对力产生的力矩作用，又会使线圈恢复回原位，故称这个位置是平衡位置，它的意义完全有别于上述的中性面．同样的位置关系，在不同性质的问题里，其作用不同，要注意区别．

3．交流电的基本性质

在线圈转动一周中交流电除方向发生二次改变外，大小也经历了周期性变化：从通过中性面位置处的零值开始，逐渐增大，到达与中性面垂直的位置时，具有正最大值 $+I_m$（设前半周电流方向为正方向），而后逐渐减小直至又一次到中性面时，又取零值，这是前半周情况；后半周，电流改向，大小从零到负最大值 $-I_m$ 再回到零．从中性面位置开始计一周中的变化经历是：$0\rightarrow+I_m\rightarrow0\rightarrow-I_m\rightarrow0$．电流如此，电动势和电路上电压的变化也都有类似情况，它们都遵循正弦函数的变化规律．用数学公式表示任一时刻 t 的瞬时电流为：

$$i=I_m\sin\omega t \qquad (\text{初相为 } 0)$$

瞬时电动势 e 和瞬时电压 u 分别为

$$e=\mathscr{E}_m\sin\omega t$$

$$u=U_m\sin\omega t$$

ω 是线圈转动角速度，$\mathscr{E}_m$、U_m 分别是电动势、电压的最大值．从这些分析可见要掌握一个交流电，需要把握三点：即变化的幅度、变化的快慢和对一个周期内各个状态的描述．和这三点相对应有三个物理量．

(1)最大值是描述变化幅度的物理量．

由于电流、电动势和电压的值都有正、负最大，所以它们在任意一个时刻的大小都不超过 I_m、U_m、$\mathscr{E}_m$．那么，我们日常使用的市电电压和市电电流是指什么值呢？既不是最大值，也不是瞬时值，而是有效值．

有效值，是对交流电等效直流的计算，设想一个交流电和一个直流电，分别通过一只相同的电阻，它们在相同时间里产生相等的热量，那么这个直流电电流的值就称为交流电电流的有效值．直流电电流的大小就是交流电的有效电流，由电阻和有效电流确定的电压是有效电压．市电 220 伏，就是指有效电压 220 伏．

有效值的大小就是根据交直流电的热功率相等推求出来的，

各有效值和它们的最大值之间的关系是：$I = I_m/\sqrt{2}$，$U = U_m/\sqrt{2}$，$\mathscr{E} = \mathscr{E}_m/\sqrt{2}$.

(2) 周期和频率是反映变化快慢的物理量.

周期 T 和频率 f 之间的关系是：

$$T = \frac{1}{f} \quad 或 \quad f = \frac{1}{T}.$$

除了用周期和频率反映交流电的变化快慢之外，还常用角频率 ω，它们之间的关系

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, f = \frac{\omega}{2\pi}$$

在场磁极只有一对的情况下，ω 才是线圈转动的角速度.

(3) 相是对一个周期内各状态的描述量.

“相”原来是力学里描述振动状态的物理量，振动的特征是运动的周期性. 交流电的电流、电压也具有周期性，类比并推广后，凡是具有周期性变化特征的物理量都可以用相来描述. 一个周期性变化，最重要的是一个周期内状态(如电流的方向和大小)的变化，在这之后和之前的各个周期的状态变化都不过是完全的重复. 因此，只要分析某一周期内状态的变化规律，就掌握了全部过程. 状态变化规律，可以用状态对时间的关系来表述，比如时间 t 取何值，电流的方向是什么，大小是多少. 但 t 的取值仅具有连续序列性，不反映周期性，跟状态的周期性重现不对应. 因此采用有周期性的物理量——相，以弧度作它的单位，变化周期是由 0 到 2π. 它的一个周期跟物理量状态变化的周期相对应，它的每一个取值跟每一个状态相对应，所以，相是对一个周期内各状态的描述. 例如用相来描述交流电电流状态的变化，取中性面处初相为 0，那么当相分别取值是 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 时，对应的电流状态是 $+I_m$ 和 $-I_m$.

八、电　磁　波

3.35　电磁波的本质是什么?

要了解电磁波的本质,需要注意区分电场和磁场、电磁场、电磁波这三个不同层次的概念．在中学范围里,电场主要指静电场,也包括产生稳恒电流的稳恒电场,这两种都是场电荷在空间的分布不随时间发生变化的情形,之外还有场电荷分布随时间变化的似稳场．这些场都是由电荷按库仑定律激发产生的,故此又统称库仑场．磁场主要指由电流激发产生的情形．电磁场,有人认为就是指上述含义下的电场和磁场的总称．这种认识只局限于特别情况,不反映普遍性质,它有更广泛更丰富的意义．

在电磁感应现象中,我们分析过除了库仑电场还存在感生电场(见3．30)．一个随时间变化的磁场都要在相邻的空间激发感生电场,因而变化的磁场总是和电场的存在联系着．从感生电流随时间变化的现象又知道感生电场是随变化的磁场而变化．因而变化磁场和变化电场是联系着的,在变化的磁场空间也充满了变化的电场．

在电流的磁效应中,导体中的自由电荷定向移动(称为传导电流)在周围空间产生磁场．这里除了磁场,还有电荷自己的电场,还有使电荷作定向运动的电场,因而这里电场总是和磁场存在联系着．

除了传导电流,还有由变化电场产生的位移电流,它不需电荷移过,也不依存于导体．例如有电容器的交流电路里,交流电能够通过电容器,并不是有电荷流过电容器而是电容器中间存在变化电场．位移电流一样具有磁效应,因而变化电场和变化磁场联系

着，变化的电场空间同时也充满了变化的磁场．

变化的电场和变化的磁场，相互依存，相互激发，形成一个不可分离的统一整体，就是电磁场．

依上所述，如果空间某处有迅速变化的电流(振荡电流)，在周围空间激发出变化磁场，这个磁场又在自己周围较远处激发变化的电场，接着变化的电场又在更远些空间激起新的磁场，这样交替出现着变化电场和变化磁场的互相激发，电磁场的空间越来越向外扩展，而不局限于某个区域．电磁场从振源所在的始发区，由近及远向周围空间的传播就是电磁波．

3.36 电磁波有哪些基本性质?

波是宇宙中极为广泛的现象，凡波具有的各种基本性质，电磁波也都有具体表现，这里仅限和我们现在理解问题有关的两个性质作初步说明．

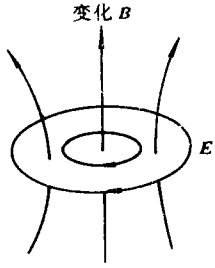
1．电磁波是横波

机械波所传播的是振动的形式，当振动方向跟波传播方向成正交关系时是横波，当二者成平行关系时是纵波．我们在3．21中曾提到电磁波是横波，它所传播的两个物理量 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$ 的振动方向和传播的方向，三者之间都是互相垂直的．简要分析如下．

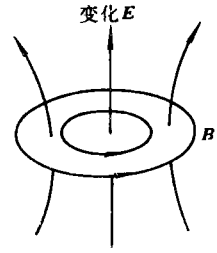
首先分析电场 $\boldsymbol{E}$ 与磁场 $\boldsymbol{B}$ 两方向间的关系①．依据电磁感应现象中，确定感生电流方向的楞次定律，可以知道变化磁场与感生电场(由感生电流确定)之间的关系如图3－34(a)所示(画出的是磁场增强时的情形)．图3－34(b)则表示的是变化电场与磁场方向间的关系，它是用安培右手定则确定的．因为变化电场与传导电流一样都具有磁效应，而传导电流的磁场方向是用安培右手定则判定的．综合这两种情形，可以看到不论是哪种情形，电场 $\boldsymbol{E}$

① 磁感强度与磁场强度的关系由磁介质的性能方程表示：$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$，两者的方向相同，量值差 μ 倍．μ 是磁介质的绝对磁导率．在真空中有 $\boldsymbol{B}=\mu_0\boldsymbol{H}$．3．21中已提到．

和磁场 $\boldsymbol{B}$ 的方向总是互相垂直的，麦克斯韦的电磁场理论也指出，在电磁波中的每处都有这种关系．



(a)变化磁场周围空间的电场



(b)变化电场周围空间的磁场

图 3－34

并且理论上还证明，电场 E 磁场 B 的方向都跟那里的电磁波的传播方向垂直．三者的方向构成一右手系直角坐标，如图 3－35 所示，单位矢量 $\hat{k}$ 的方向表示电磁波的传播方向．以上都说明电磁波是横波．

2．电磁波的传播速度等于光速

这是麦克斯韦理论作出的又一预言，后来也为实验证实．

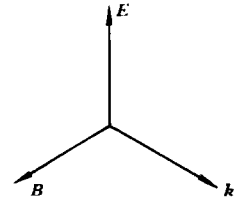


图 3－35

电磁波波源是振荡电流，它激起同样频率的磁场，变化磁场又激起同样频率的电场．所以电磁波的频率是由波源振荡电流的频率决定的，而振荡电流的频率是由振荡电路的组成决定的，所以当电路确定后，电磁波的频率就不变了．调整电路才能得到不同频率的电磁波．例如由自感线圈 L 和电容器 C 组成的 LC 振荡回路，它的振荡频率 $f=1/2\pi\sqrt{LC}$，要改变频率需要通过改变电容或电感的办法来实现．

不同频率的电磁波，在同一媒质中的传播速度都一样，所以波长也不相同．各种电磁波的波入 λ 和频率 f 的乘积，都等于光的传播速度 v，即 $v=f\lambda$．v 因媒质不同，取值不同，$v=1/\sqrt{\varepsilon\mu}$，式中的 ε、μ 是介质的绝对电容率、绝对磁导率，对于真空 $\varepsilon=\varepsilon_0$，$\mu=\mu_0$，得出各种频率电磁波在真空中的传播速度，它与光在真空中的速度相等，$v=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}=3\times10^8$ 米/秒．

不同频率的电磁波，在一些物理性质上还存在重大的差别，例如光波表现出直进性，对人眼有视觉、色觉感觉；无线电波中的中、长波具有很强的绕射性；X 射线穿透力很强等．因而实际上有不同用途．

3.37 电磁波是怎样产生的，又是如何传播的？

声波、水面波都是机械波．机械波传播振动，它的产生要具备两个条件：一是振源，二还要有媒质．外界的扰动，使某部分媒质先发生振动，因媒质间存在着相互作用力，而带动周围的媒质也振动起来，接着一步步把振动传播开．如果没有媒质，振动就不能传播，也形不成机械波，例如声音在真空中不能传播．电磁波和机械波不同，它除了在媒质中传播也能在真空中传播，例如日光穿过宇宙真空射到地球，通过宇宙空间可以传送无线电波．

1．电磁波产生也要有振源

电磁波的振源，从原理上讲一个交变电流元就能起到电磁振源的作用．交变电流元可以用一个振荡的电偶极子为模型，其构成可由相距很小的两个小球，保持相对位置不变，让球上电量按正弦规律变化，球上交替出现正负电荷，整个系统上有交变电流，由系统激发的电磁场，随振荡偶极子（或称偶极振子）的电荷电流变化规律而变化．历史上，赫兹就是用类似的偶极振子做实验产生了电磁波，首次验证了电磁波的存在，证实了偶极振子能产生和发射电磁波．

实际应用中我们是用 LC 振荡电路作电磁波的振源．但闭合

式的 LC 电路，电场电能集中在电容器极板间，磁场磁能集中在自感线圈中，为了能发射出去，除了不断补充能量外还必须具备如下的条件：

(1)振荡电路频率要足够高，频率越高，越能有效地辐射出能量．由 LC 电路的固有频率 $f=1/2\pi\sqrt{LC}$ 知 L、C 必须要小；

(2)电路要开放，减少线圈匝数使 L 变小，电容器面积减小，增大距离使 C 变小，以提高频率 f. 电路从闭合式改造为开放式，直至电路演变为一直线，如图 3－36 所示的演变过程．电流在其中来回振荡，两端出现正负交替等量异号电荷，构成偶极振子电路，成为有效地发射电磁波的振源．

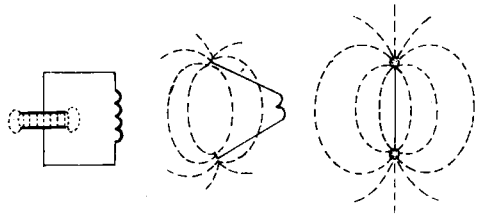


图 3－36

实用的广播天线的辐射虽然复杂，但都可以看成是偶极振子电路的迭加．

2．电磁波传播过程

这个问题前面已经说到．这里依照 3．36 对电磁场和电磁波形成过程的分析，以及 3．36 中指出的电磁波是横波的传播特性，再来示意地描绘出电磁波传播时的图象．

我们从 3．25 和 3．27 知道磁感线和感应电场的电场线，都是环绕激发源的闭合曲线，所以电磁波传播中交替产生的电场、磁场的力线都呈环状，这些环线犹如链条的环节，依传播的先后顺序一个个套连下去，相邻的先后 EB 环面相互垂直．如图 3－37 所示，图中画出的只是在一直线上的传播过程示意，实际上是沿各个不

同方向上都有这样的过程，向外对整个空间传播；每一个环只代表同一环绕方向上的力线，实际上在这个方向是一簇力线，各环的套连，都是先后各簇力线间的套连交织．这样罗织出的力线，因 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$ 相互激发，不断向外扩展，就是电磁波的传播．

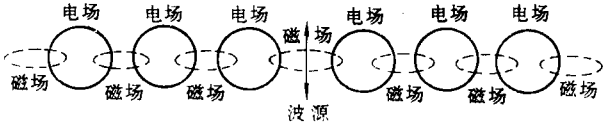


图 3　37

[思考题]

(1)历史上，探求电磁感应产生条件的突破性进展是什么？

(2)分析利用电磁感应现象，获取电能的物理过程．

(3)就磁场对通电导体的作用，分析从电能获取机械能的物理过程．

(4)对磁电之间具有什么样的关系，作一全面分析．

(5)说明磁生电与磁对电作用的共生性．

(6)描述交流电，为什么要引入“相”的概念？

(7)电磁场的传播，为什么具有波的性质？

(8)电磁波的波谱是指什么？

第四篇　光　　学

一、光的传播

4.1　光总是沿直线传播的吗?

光在均匀媒质中是沿直线传播的．这个结论是几何光学的基本实验定律之一,它是从日常见到的许许多多光现象中概括出来的：如放映机射向银幕的光束、小孔成像、本影和半影的形成等等,都是光的直线传播的例证．那么光是否总是沿直线传播的呢?

为回答这个问题,我们做这样一个小实验,在一块不透明的硬纸板上用绣花针穿一个很小的小孔,孔径大约 0.1mm,通过小孔观察手电筒发亮的小电珠(去掉反光罩),我们可以发现一个周围有彩色圆环的小亮斑(在此,眼睛充当接收屏),这种现象与小孔成像迥然不同,用光的直线传播理论显然解释不通．彩色圆环的出现,表明通过小孔的光已偏离直线路径,绕到障碍物(硬纸板)的背影中去了,这种现象称为光的衍射现象．其实,不仅很小的孔可以发生衍射现象,狭缝以及很小的障碍物,都可以发生衍射现象．甚至当反射面或折射面的线度很小时,反射光或折射光也会发生衍射现象,就在我们的日常生活中,衍射现象也不少见．比如夜晚在马路上行走,迎面而来的汽车射出刺眼的灯光会让你不自主地眯起眼睛,这时,你会发现灯光的四周有许多明暗相间的彩条,这就是光通过眼睑以及睫毛时产生的衍射现象．

在衍射现象中,光不再沿直线传播,而是绕过障碍物进入几何阴影中,在屏幕上出现不均匀的光强分布．从表面看,光的直线传

播和光的衍射之间相互矛盾，但它们有着深刻的内在联系．

光的电磁理论告诉我们，光是电磁波．它的传播具有波动性，按照惠更斯—菲涅耳原理，光以波的形式传播，其相位相同的各点形成一个个波面．波面上每一点都可以看作新的振源，由此发射次波，光向前传播的过程，就是所有这些次波彼此叠加的过程，波面前方某一给定点的振动情况，是同一波面上所有各点所发次波在该点相干叠加形成的．如果在光的行进方向上没有障碍物，即当波面完全不被遮蔽时，所有次波在任何观察点叠加的结果乃形成了光的直线传播．如果波面上某些部分受到障碍物的遮蔽，因而波面不完整，这些部分所发的次波不能到达各个观察点，以致观察点上叠加时缺少了这部分次波的参加，于是在不同方向上(包括障碍物的几何影子区)将出现不同的光强分布，形成明暗相间的条纹花样，即发生了衍射现象．然而光波的波长很短，通过一个较大的孔(或障碍物边缘)的波面，相对于光的波长可以看作是无限大的，即相当于一个不受遮蔽的波面，不会产生明显的衍射现象，因而仍表现为直线传播．

总之，衍射现象是光的波动性的基本表现之一，而直线传播只不过是障碍物或孔隙的线度远远大于光的波长时的一种极限情况而已．也就是说，光的直线传播只是光的波动理论的近似．

应当指出，光线是为了形象地描述光的直线传播而引入的一个概念，它只用来表示光的传播方向，而光束是一些有一定关系的光线的集合，如单心光束、平行光束等．但是，我们却不能把光束里的光线一根根分开．所谓光线、光束都是为了研究光学现象引入的理想模型，如同力学中的质点、刚体一样．

4.2 光通过不同媒质的界面时是如何传播的？

光的直线传播实际上是光在真空中或在同一种均匀媒质中的传播规律，那么，光经过不同媒质时的传播情况如何呢？首先应当指出，任何一种媒质都有吸收光能的属性，这在以后的讨论中还要

提及．当光通过两种不同媒质的分界面时．实验表明，一部分光返回原媒质，还有一部分光从一种媒质射入另一种媒质，即发生反射现象和折射现象．

反射现象有镜面反射和漫反射两种情况，镜面反射是大家所熟知的反射现象，它严格遵守反射定律．但如果反射面粗糙不平，即使入射光线平行，反射后也显得杂乱无章，这称为光的漫反射．我们之所以能从不同方向看到物体的存在，正是这些物体表面上发生漫反射的缘故．对于漫反射，我们可以这样分析，物体表面（即反射面）虽然凹凸不平，但可以把它看作是由许多小块平面组成，每一小块入射面的线度远大于光的波长，这一个个小入射面完全满足反射定律的要求，因此，每条入射到这些小平面的光线都要按照反射定律进行反射，只是从整体上看，这些小平面具有不同的方向，以致从这些小平面反射出的光线方向不一，其实，即使是实际的镜面，也和反射定律所要求的理想光滑平面有差距，也会出现漫反射现象，只不过相对来说较弱罢了．从这一点上来讲，漫反射较镜面反射更具普遍性．

光的折射是由于光在两种媒质中行进速度的不同而造成的，按照光的电磁理论，光在媒质中传播的速度为 $u=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$（$\varepsilon_r$ 为媒质的相对电容率，其数值大于 1），这是光与物质相互作用的结果．光在真空中的速度 c 与光在媒质中的速度 v 的比值 $\frac{c}{v}$ 是一个只与媒质的光学性质和光的频率有关的常数，它可以用来表示光从真空射入媒质时的折射程度，称为该媒质的绝对折射率．如果光在第一种媒质（绝对折射率为 n_1）中的速度为 v_1，在第二种媒质（绝对折射率为 n_2）中的速度为 v_2，则第二种媒质相对于第一种媒质的相对折射率 $n_{21}=\frac{v_1}{v_2}=\frac{n_2}{n_1}$，比值越大，表示光从第一种媒质射入第二种媒质时的折射程度越大，光在空气中的速度与其在水中的速度之比为 $\frac{4}{3}$，光在空气中的速度与其在玻璃中的速度之比为 $\frac{3}{2}$，

因此，光由空气射入玻璃比由空气射入水中的折射程度要大．

应当明确，反射和折射是只发生在媒质交界面处的两种光学现象．一般情况下，二者可以同时发生，在任何情况下，只要有折射光线存在，反射光线也一定存在．但有反射光线存在时，折射光线不一定存在．如光线入射不透明物体的表面时即只发生反射现象，而没有折射现象．

全反射是一种特殊的现象．由折射定律可知，当光从折射率较大的媒质(光密媒质)射向折射率较小的媒质(光疏媒质)时，折射光线将远离法线，折射角大于入射角．当入射角为某一定值 i_c 时，折射角为 90°，入射角超过 i_c 的光线，都要按照反射定律返回原媒质，这即全反射现象，i_c 称为临界角：

$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

全反射现象因其能量损失较小而被得到广泛的应用，以下还要单独讨论．需要强调的是，全反射的光路是遵守反射定律的，容易证明，包括全反射在内的光的反射和折射，其光路是可逆的，光的可逆性原理在光线传播中具有普遍意义．

与光的直线传播一样，光的反射定律和折射定律也可以在光的波动说中得到完满的解释．因此说，以上述三个定律为基础的几何光学是波动光学在一定条件下的近似理论．

4.3 光在不均匀媒质中是如何传播的？

夜幕降临，满天繁星，它们的位置是否都是我们所看到的那样高？为什么它们总是不停地忽明忽暗地闪烁？

要回答这个问题，就需要探讨一下光在大气层中的传播路径．众所周知，我们居住的地球，被厚厚的大气所包围，通常称为大气层，其密度自上而下依次加大．按照密度分布的疏密程度我们可粗略地把大气分成若干层，每层因密度不同而折射率有别．这样，当光线由一层射入另一层时，就要发生折射现象(当然也伴

随有反射现象). 由于大气层中空气密度的变化可认为是连续的,于是,光线层层折射的结果,就在大气层中形成了一条弯曲的径迹,如图 4-1 所示. 我们所看到的星星其实只是它们的像. 星光进入大气层以后,走的是一条曲线,而我们的眼睛的感觉,光总是沿直线射来的,所以星体的实际位置与我们看到的像的位置不在同一方位. 又因为大气层的密度随温度时刻都在变化,光的折射情况也会随之而变,这在我们眼里便形成了星星的不停闪烁.

由上述问题的分析,我们可以得出一个结论,即光在同一种不均匀媒质中并不是沿直线传播,而是沿曲线传播的.

同样的道理,早晨和傍晚我们看到处于地平线的太阳,其实际位置是在地平线以下.

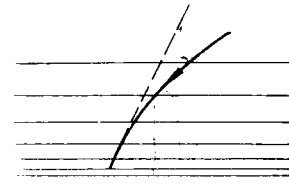


图 4-1

4.4 光的传播速度

远在两千多年前,我们中华民族就已经知道构筑烽火台,利用火光来传递军情,这可以说是最快的传递方法了,按照光的电磁理论,光在真空中的速度为

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=299,792.500\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$$

这个数值大约相当于喷气式飞机时速(以 $0.833\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$计)的 36 万倍. 这是迄今为止我们所知道的最大的速度. 为了描述茫茫宇宙,我们用这个速度乘以一年的时间,即光在一年里走的距离作为天文长度单位叫做一光年,用光年来度量星体间距,以使那些冗长的天文数字变得简单些.

光在传播过程中表现波动性. 因电磁波本身是物质的一种形式,故在其传播过程中不需要另外的介质,这是它与机械波传播的一个重要区别. 光在媒质中传播,必然要与媒质中的分子、原子相

互作用．出现光的吸收色散和散射等现象．光在媒质中的传播速度要小于它在真空中的速度．不过在同一种媒质中，光的速度是不变的，并不因光的强弱不同而速度各异．

光在真空中的速度与光源运动或观察者运动均无关系，是一个普适常数 c．这一光速不变原理是爱因斯坦的狭义相对论的理论基础之一，相对论的问世，实质上是关于时空观念的一次大革命，在物理学的发展史上有着划时代的意义．

光速与物理学中许多问题密切相关，因此，光速的测定一直为众多物理学界的精英所关注．

在测定光速的众多方法之中，就其测定的是群速还是相速，我们可以分为两类．凡是不考虑频率和波长，只是通过测量光波通过的距离以及所用时间的方法，都属测定群速一类，包括光行差法、齿轮法、旋转镜法、克尔盒法以及光电或雷达测距仪法、声调制法等等．其改进都是朝着长度和时间的测量精度上努力，这也正是这类方法的困难所在．另外，通过平面单色波的方程 $\psi = A\cos\omega(t - \frac{r}{v})$，可以导出相速的表达式 $v = \nu\lambda$，只要测出光的频率 ν 和波长 λ，就可以确定光的相速度．如微波干涉仪法、激光测速法就属测相速一类．目前，激光的频率和波长已能达到相当高的精度，使得光速测量的精度大大提高．美国利用激光测速法测定的光速值比以前已有的最精密的实验方法测得的值提高精确度约 100 倍．现在公认的光在真空中的传播速度为

$$c = 299,792.458 \pm 0.001\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$$

据此，国际单位制中长度的基本单位米由光速 c 来定义：光在真空中 1/299,792,458 秒通过的距离为 1 米．

二、光路控制和成像

4.5 人们是如何按照自己的意愿控制光的传播方向的?

光路控制实质是人们依据光的几何传播规律,利用光学元件,有目的地改变光的行进方向．这被广泛应用于生活、生产和科学实验中．

1．按照光的反射规律,实现对光路的控制

不同的光学元件有不同的反射作用,从而实现不同场合、不同目的的光路控制作用．

(1) 利用平面镜控制光路:镜面反射不改变光束的性质,一束平行光经平面镜的反射以后只改变传播的方向,但彼此间仍保持平行关系．

[Ⅰ] 利用放置在不同方位的平面镜,可以使一束平行光作定向性反射,这种方法应用广泛．如潜望镜、香港汇丰银行天然照明用的平面镜陈列等．按照反射光对入射光方向的变化,通常有以下几种情况:

变水平方向的入射光为竖直方向的反射光,如图 4－2 所示．

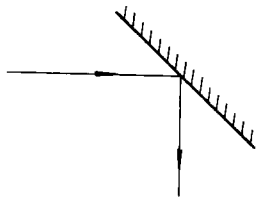


图 4－2

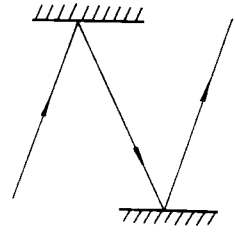


图 4－3

图 4－3 的装置是二平面镜平行且相对错开放置．入射光线

经两次反射后的出射光线与原入射光线平行且同向．

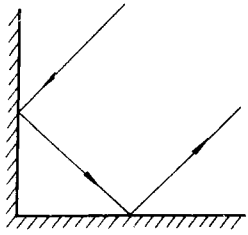


图 4－4

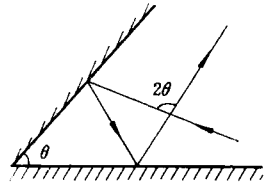


图 4－5

如需出射光线与原入射光线平行且方向相反，可采用图 4－4 的方法，将两块平面镜垂直放置．

如果要求出射光线与原入射光线成某一特定的角度 2θ，可让二平面镜成 θ 角，如图 4－5 所示．

［Ⅱ］ 利用反射光斑变化的距离来显示某些微小的形变，如光杠杆．

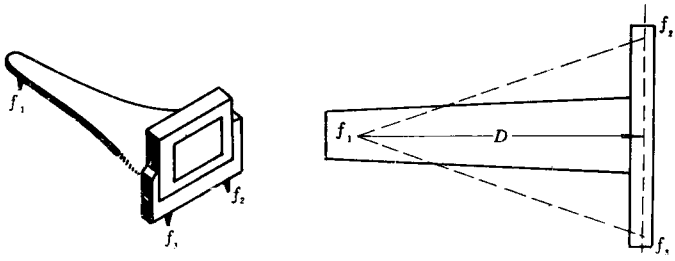


图 4－6

光杠杆的构造如图 4－6 所示：直立的平面镜安装在三足底板的一端，f_1、f_2、f_3 三个足尖构成等腰三角形，且在同一平面上．当 f_1 随其它装置作微小变动时，平面镜将旋转一个角度 θ，反射

光线将旋转 2θ，从对面联用的镜尺组中可读出相应的长度变化．这样就把不易直接测量的微小变化放大为镜尺组中竖尺上比较容易测量的距离．

激光液面控制仪的原理与光杠杆有类似之处，其光路如图 4－7 所示．装置中不使用平面镜，靠液面自身对光的反射来实现．一束激光以一入射角 i 照射液面，反射光斑处用光电管接收，然后变成电讯号输入控制系统．当液面变化 Δh，反射光斑将移动 Δs．光电管将接收到的光信号变成电讯号输入控制系统，由控制系统发出指令以调节液面的高度．

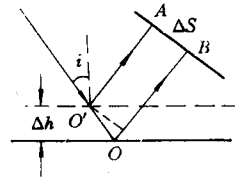


图 4－7

生活、生产和科技实验中，存在许多利用平面镜控制光路的事例，这里不一一列举了．

(2) 漫反射的利用：漫反射虽然也遵从反射定律，但它和镜面反射的不同之处在于平行光经漫反射后将不再平行，而是射向不同方向．因光线弥散而变得柔和．反射处的情况清楚可见，在需要消除镜面反射的场合，经常把反射面故意作粗糙一些，以利于产生漫反射．如教室里的黑板使用较粗糙的毛玻璃制造，就是根据这个道理．

(3) 利用球面镜对光线的会聚作用(凹面镜)或发散作用(凸面镜)实现对光路的控制．

把光源放在凹面镜的焦点处，反射光为平行光；反之，平行光经其反射，则会聚于焦点．这些即为探照灯、手电筒以及太阳灶、太阳炉等所依据的构造原理．

香港汇丰银行办公大楼顶部的凸面镜陈列可以把平面镜陈列反射过来的太阳光发散到整个大厅就是应用了凸面镜对光线有发散作用这一特性．

2．按照光的折射规律，实现对光路的控制

(1) 利用棱镜使复色光色散:一束白光通过玻璃三棱镜,经空气—玻璃,玻璃—空气两次折射,将按频率不同,分成七种色光,分光镜和摄谱仪就是根据这一原理制成的.

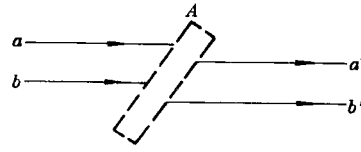


图 4-8

(2) 利用玻璃砖使光线侧移:如图 4-8 所示,平行光束 ab 通过两面平行的玻璃砖 A 后,出射光束 $a'b'$ 将发生侧向平移而方向不变.利用这种方法还可以得到媒质(玻璃砖)的折射率.

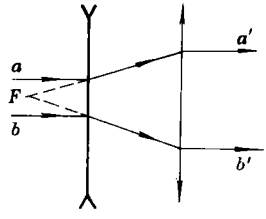


图 4-9

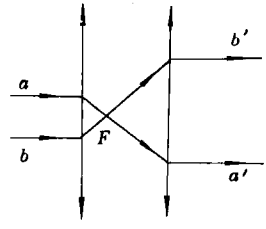


图 4-10

(3) 利用透镜的会聚作用和发散作用:凸透镜对光线有会聚作用,凹透镜对光线有发散作用.原则上它们和球面镜在光路控制中有相同的作用.但球面镜是通过反射,而透镜是通过折射达到目的.因此,由出射光线与入射光线的方向要求不同而用于不同场合.

另外,透镜广泛应用于扩束工作中.如某些激光器发出的激光束直径很小,而有时却需要获得直径比较宽阔的激光束.这时

就必须进行扩束．如图 4－9 所示，光束 ab 需要扩宽为光束 $a'b'$，间距扩大但不颠倒平行光线的上下顺序，可采取焦点重合的凹透镜和凸透镜组合来达到目的．如果是要求扩束后出射线 $a'b'$ 的顺序颠倒，则需要采用焦点重合的两个凸透镜组合来实现，如图 4－10 所示．

顺便强调一点，透镜对光线的会聚（或发散）作用决不可理解为经透镜折射后的出射光线一定是会聚（或发散）光线．以凸透镜为例，平行光线或本来就会聚的光线入射凸透镜，其折射光线确实是会聚光线．但从焦点发出的光线，经凸透镜折射后变为平行光线，而从焦点以内光点射出的发散光线，经凸透镜折射后仍然是发散光线，只是发散程度比折射前较小而已．如图 4－11 所示．凹透镜对光线发散作用也可作类似的分析．球面镜对光线的会聚（或发散）作用也有这种与透镜类似的情况．这个问题很容易被学生误解，教师在授课中应予充分注意．

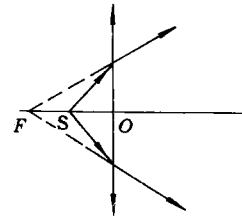


图 4－11

3．全反射现象在光路控制中的应用

在全反射现象中，反射光线完全服从反射定律，通常用全反射棱镜（等腰直角三棱镜）来实现对光路进行控制的作用．

如图 4－12 所示，光线从直角棱的一个折射面上垂直入射，以超过临界角的 45°角入射到斜折射面上，发生全反射，光线从直角棱的另一折射面射出．光线的行进方向改变了 90°．如果光线从斜折射面上垂直入射，在棱镜内经过两次全反射，则出射光线与入射光线平行且方向相反，同时平行光线间顺序关系上下颠倒．如图 4－13 所示．另外，还可制成所谓转向棱镜，以适应出射光线与入射光线成多种不同角度的需要．在全反射现象中，能量损失较小，因而利用全反射棱镜控制光路比用平面镜效果要好些．

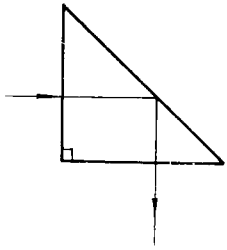


图 4－12

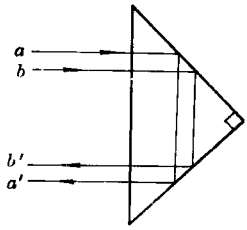


图 4－13

全反射现象在光路控制中一个不可替代的应用是在光纤领域，一般使用的光导纤维是利用高纯度石英玻璃（或透明塑料）制成的直径在几微米到几十微米之间的纤维，外包折射率略小的包层，光线由一端入射．入射角大于临界角的光线在两层纤维之间的界面上发生全反射．由于光导纤维是圆柱形结构，反射光线射到相对界面上，入射角不变，将再次发生全反射，经过多次全反射后，光线从另一端射出，如图 4－14 所示．



图 4－14

虽然光导纤维的类型并不单一，但传光原理都是全反射规律．

光导纤维具有抗干扰性好，频带宽，资源丰富等突出优点，近年来发展迅速，广泛应用于通信、电视节目传送、传真以及传感等领域．另外，由于光导纤维细而柔软，能弯成任何形状，可用来制造医疗等多领域应用的内窥镜．

4.6 什么是像？

1．物和像

人们照相时总希望得到一张清晰的相片．可是有时底片却模

糊不清，这是为什么？我们从物、像关系的角度来探讨一下这个问题，物体可以看成是由许多按一定规律排列的物点的集合，从每一物点射出的光线，经镜头折射后正常情况下都会相交在底片上的一点，称为像点，有一物点就会有一像点，二者是点点对应关系，物体的像就是这些像点的集合．如果因为某种原因（譬如调焦不适当），底片上出现的不是与物点对应的像点，而是一个光斑，就会呈现模糊不清的现象．

一般来说，从一物点发出（或反射）的光线构成一个以物点为顶点的单心光束，此光束入射光学系统后，如果出射光线相交于一点，则这点称为物点在该光学系统中的实像点，如果是出射光线的反向延长线相交于一点，则称为虚像点．当物点和像点（包括实像点和虚像点）存在点点对应关系时就是理想成像．在这种情况中，各物点发出的单心光束经光学系统的反射或折射后仍保持其单心性．如果出现点斑对应，则是单心光束经光学系统后，其单心性被破坏的结果．

概言之，由同一物点发出（或反射）的光线，若经光学系统作用后的所有出射线，或它们的反向延长线相交于一点，那么这一点就是对应于物点的像点．所谓物体的像，就是跟物体上所有各点相对应的像点的集合．物与像点点对应时就是清晰的理想成像．

2．眼睛和像

如果只凭视觉（排除理智），根本无法判别从镜子里看到的是实物还是像（譬如傻子照镜，与自己的像对话）．这是为什么呢？原来我们的眼睛接收的只是发散光束，感觉到的只是这发散光束的顶点．换言之，实物、实像和虚像在人的眼睛里产生的效果是相同的，它们在视网膜上都会形成倒立的实像．这个倒立实像刺激感光细胞，通过视神经传入大脑，于是产生视觉．当然，实物能够向各个方向射出光线，站在各个方位均可看到，而像却是一特定发散光束的顶点，只有在这光束的发散范围内才可以看到．实像是由光线实际会聚而成的，可以用屏幕显示出来，观察显现在屏幕上

的实像，只要站在屏幕前即可，而虚像只能通过光学系统用眼睛直接观察，不能用屏幕来显示．

4.7 如何观察物体所成的像？

1．平面镜反射成像

平面镜是一个最简单的、不改变光束单心性的、能成完善像的光学系统．平面镜所成虚像与物相对于镜面对称，且与物大小相同．这一特点与物到镜面的距离及镜面的大小无关．

前边提到，观察像要在能够接收到以像为顶点的发散光束的范围以内，那么，平面镜所成虚像的观察范围如何确定呢？

图 4－15 中，MN 是平面镜，要确定观察物点 S 的虚像点 S' 的范围，首先要找到虚像点 S' 的位置．这有两种方法：一是由 S 向平面镜任意作二条入射光线，根据反射定律作出反射光线，其反向延长线的交点即是；二是根据物与虚像相对于镜面对称的特性直接找出虚像点 S'．

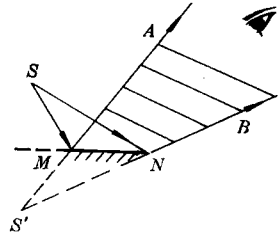


图 4－15

大家知道，凡是由 S 发出的，且经镜面反射的光线，其反向延长线一定通过 S'．因此，只要找出 S 在 MN 边界 M、N 处的反射线，则经镜面其它部位的反射线必夹在这两条边界反射线之内．

根据以上思路，作出 MA 和 NB 两条边界反射线，则在 MA 和 NB 范围内（图中斜线部分）均可看到物点 S 的虚像点 S'．如图 4－15 所示．

与上不同，图 4－16 中的物 AB 不是一个物点．这种情况下我们可以想到，只要在同一个位置上能同时看到物体 AB 两端端点的虚像点 A'、B'，那么，虚像 $A'B'$ 的其它部分也一定能够在此

位置看到．为此，我们先找出观察 A' 的范围，其边界是 MA_1 和 NA_2，再找出观察 B' 范围的边界 MB_1 和 NB_2．既能看到 A'，又能看到 B' 的区域，只能是两个范围的公共部分，即 MA_1 和 NB_2 所围部分．如图 4－16 中斜线部分所示．

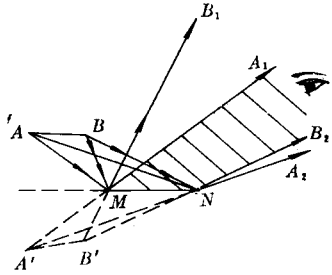


图 4－16

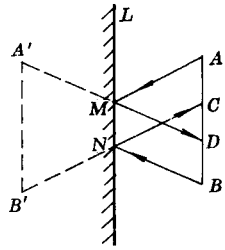


图 4－17

许多参考书都提到人站在镜前照见全身所需平面镜的长度问题，我们不再重复，作为一个例子，我们分析一下要照见全身，镜子至少需要多宽？

如图 4－17 所示，L 是平面镜，AB 为肩宽，C、D 为眼睛，若要看见全身的宽度，至少要左眼看到右肩，右眼看到左肩才行．画出光路图．显然图中平面镜 L 的 MN 段即是所需的最小宽度．运用平面几何知识，可以得出，MN 的大小正好是 $\frac{1}{2}$ 肩宽与 $\frac{1}{2}$ 眼距之差．

2．平面折射成像

单心光束在两种透明媒质界面上发生折射时，往往不能保持其单心性．即是说，从物点射出的光线，经界面后折射光线的反向延长线并不准确交于一点．因此，平面折射不能理想成像．但是，我们能够看见水面下的物体，这是因为人眼的瞳孔很小，只能接收很少量的折射光，它们的反向延长线可近似相交于一点，原则上水

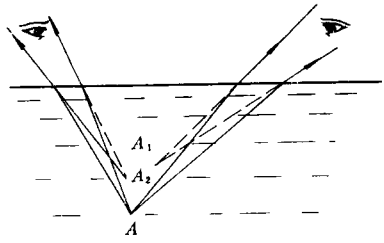


图 4－18

面以上任何方位都可以观察到水中物体的像．不过，观察位置不同，像的位置也不同．如图 4－18 所示．

3．球面镜反射成像

一般来说，球面镜反射也会破坏光束的单心性．只有当物点靠近球面镜主轴，且由物点射向镜面的光线与主轴夹角很小时（满足这两个条件的光线称为近轴光线），才能近似成完善的像．

（1）物体位于凸面镜前，可在镜的另一侧成正立、缩小的虚像，只要站在镜前均可看到．因此，凸面镜可以扩大视野．司机前方的观后镜以及马路拐弯处安装大凸面镜就是应用了这个道理．

（2）凹面镜成像较复杂，以 u 表示物距，f 表示凹镜的焦距，则当 $u>2f$ 时，与物同侧成倒立、缩小实像；$f<u<2f$ 时，与物同侧成倒立、放大实像，$u<f$ 时，在镜的另一侧成正立，放大虚像．观察这些像，各有一定的范围限制，考虑到球面镜在初中教材里只属了解内容，本书从略．

4．透镜折射成像

中学阶段所说透镜一般指薄透镜．经薄透镜折射也会破坏光束的单心性．因此，透镜成像也必须是近轴光线．成像规律由透镜公式所表达，即

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v}$$

式中物距 u 总是正的；凸透镜的焦距 $f>0$，凹透镜的焦距 $f<0$；成实像时像距 $v>0$，成虚像时 $v<0$. 根据透镜公式讨论，可以得出凸透镜、凹透镜成像的各种情况，高中物理教材对此作了详细分析，这里不重述．我们只从如何观察透镜成像的角度作些讨论．

(1)凸透镜成像

在近轴情况下，对处于不同位置的物体，凸透镜有成实像和虚像之别．实像可以用屏显示，站在屏前，无论什么方位均可看到，实像也可用眼睛直接观察．虚像只能用眼睛直接观察．下面主要就像的观察范围及其边界的确定对几个事例作些分析．

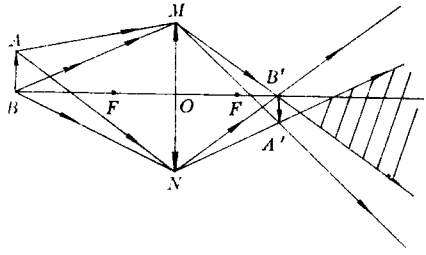


图 4－19

[Ⅰ] $u>2f$ 时，成倒立、缩小的实像，$f<v<2f$. 用三条特征光线作出 AB 的实像 $A'B'$[①]. 因为 A' 系 A 发出经透镜折射的所有光线会聚而成，所以观察 A' 的区域是由从 A 发出经过透镜端点 M、N 的折射光线围成．作出这两条光线 MA' 和 NA'. 则在 MA' 和 NA' 经过 A' 后的发散区域内可看到 A'. 同理，在 MB' 和 NB' 经过 B' 后的发散区内可看到 B'. 于是，在两个发散区的公共部分(图 4－19 的斜线部分)内，就可以观察到整个实像 $A'B'$. 实际上，只要作出 MB' 和 NA' 两条边界光线，观察范围即可确定．

① 透镜的三条特征光线是：(Ⅰ)跟主轴平行的光线，折射后通过焦点；(Ⅱ)通过焦点的光线，折射后跟主轴平行；(Ⅲ)通过光心的光线经过透镜后方向不变．

如果在 $A'B'$ 处放一底片，图 4－19 就成了照相机的示意图．

$u\to\infty$，成一实像点，像距 $v=f$．

[Ⅱ] $u=2f$，成一倒立、等大实像，像距 $v=2f$．望远镜的倒像透镜就是根据这个原理制成的．

$f<u<2f$，成倒立、放大的实像，$v>2f$，这里幻灯机、电影机及显微镜物镜的成像原理．

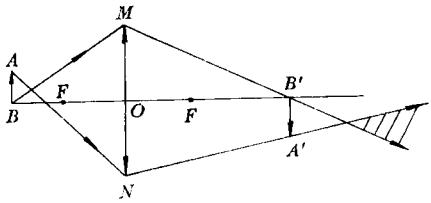


图 4－20

仿照[Ⅰ]中的方法，作出 $v=2f$ 和 $v>2f$ 时的观察区域．分别如图 4－20 和图 4－21 中斜线部分所示．

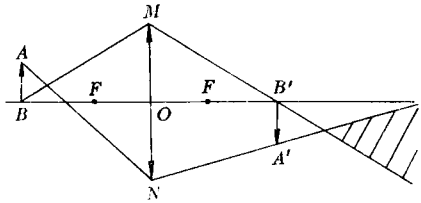


图 4－21

$u=f$ 时，折射光线与主轴平行，不能成像．

[Ⅲ] $u<f$，与物同侧，成一正立、放大的虚像，$v<0$．虚像不能用屏显示，但眼睛观察范围的确定方法却与实像相同．如图 4－22 所示．凸透镜成虚像是放大镜及显微镜、望远镜目镜的理论

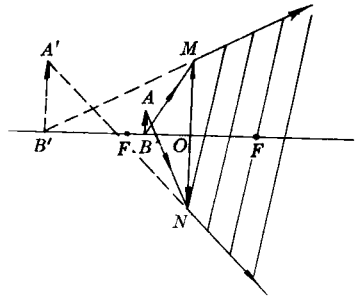


图 4－22

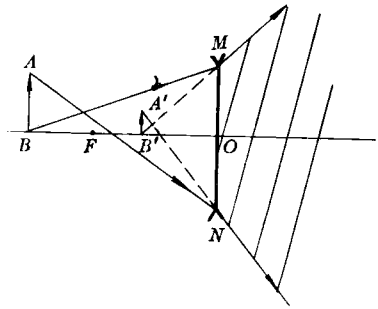


图 4－23

依据．

(2) 凹透镜成像

无论物体的大小和所处的位置如何，凹透镜只能成正立、缩小的虚像．$f<v<0$．在透镜的另一侧都可以观察到．如图 4－23 所示．

(3) 透镜成像及其作图中的几个问题．

[Ⅰ] 根据折射光路的可逆性，在透镜成实像的情况下，物、像位置可以互换．

[Ⅱ] 透镜所成像系经透镜的所有折射光线形成的，决不可认为仅与三条特征光线有关．因此，把透镜的一部分遮住或去掉，不影响像的虚实，正倒，大小和位置．只是像的亮度减弱．

[Ⅲ] 对位于透镜主轴上的物点，不能直接利用三条特征光线作图，可采用辅助的方法求作像点：

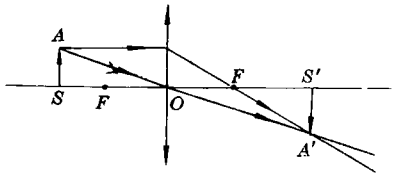


图 4－24

方法一、如图 4－24，求作 S 的像点．过 S 作 SA 垂直于主轴．用特征光线确定 A 的像点 A'．过 A' 作 $S'A'$ 垂直于主轴，垂足 S' 即 S 的像点．

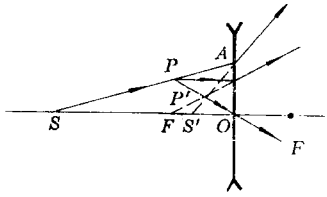


图 4－25

方法二、如图 4－25，过 S 任作一条射向凹透镜的光线 SA．在 SA 上任取一点 P．利用特征光线找出 P 的像点 P'，则 SA 的折射光线一定通过 P'．连 AP' 交主轴于 S'，则 S' 即为 S 的虚像点．

上述方法均不超出中学知识范围．另外，也可以利用焦平面和副光轴解决这类问题．限于篇幅，我们就不介绍了．

三、颜色之谜

4.8 单色光的“单色”有何含义?

自从17世纪后半叶牛顿第一次成功地将白光分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光之后,人们逐渐认识到,光的颜色决定了频率,物体或颜料呈现颜色是一种光学现象.解剖医学实验的结果表明,人眼的色觉是一种综合感觉,一定频率的光可引起人眼的一种色感.但要使人眼产生同一种色感,却可用多种色光的组合来实现.

可见光是频率在$(7.7\sim4.1)\times10^{14}$Hz范围内的电磁波,对应波长为3900~7800Å.不同频率的光在媒质中有不同的速度,媒质对不同频率的光有不同的折射率.这样,一束白光由真空射入媒质,或由一种媒质射入另一种媒质,不同频率的光就会按不同的折射角散开,形成光的色散.白光由于色散形成的连续光谱,呈现七种颜色.据此,一般人们认为白光由七种单色光组成.其实这是不确切的.实际上,每一特定频率的光,对应一种特定的光色.光谱上不同部位的颜色均不相同,每一频率的单色光对应光谱上的一条光谱线.但是,邻近的单色光,频率只有微小的差别,视神经受到的刺激相仿,看起来颜色就似乎相同.因此,习惯上所说的单色光并不指单一频率的光,而是以某一频率为中心,有一个频率范围,即频宽$\Delta\nu$,相应也就有一定的谱线宽度$\Delta\lambda$.$\Delta\nu$越窄,$\Delta\lambda$越小,光的单色性就越好.氦氖激光器射出的光只存在10个不同的频率,是迄今单色性最好的光束.

4.9 色光的五光十色是怎样产生的?

前边曾简单提到,人眼不能分辨色光的频谱,但却有极好的混合本领.两种、三种或多种频率的光按一定比例混合后,可在人眼

中产生另一种频率光的色感效果(这里仅指色感效果,不可误解为几种频率的单色光混合后会产生另一种频率的单色光).把红光、绿光和蓝光按不同比例混合,在视觉中可以感觉到成千上万种颜色,但红、绿、蓝三种色光中的每一种色光都不能用另外两种色光匹配出来.通常把这三种色光称为三原色光,而把红、绿、蓝三色称为光的三原色.虽然任意三个独立的光色都可以选为三原色,但以红、绿、蓝为三原色最为普遍,这也符合解剖学中关于人眼锥体细胞中心含有对此三种色光敏感的三种不同色素的实验结果.

两种或三种原色光按相当强度混合,可得如图 4-26 所示的几种色光.如果两种光混合后得到白光的色感效果,则这两种光色就互称为补色.如红和青,蓝和黄,绿和品红都是互补色.互补色光原理在光技术中应用得很多.如用黑白胶卷拍摄空中的白云,需加大它和蓝天的反差,因此,要在镜头上加一块橙黄色的滤色片.这是因为橙黄色和蓝色近似为互补色,蓝光通过镜头时大部分被滤色片吸收,使底片上对应的部位感光度大为减小,而白云所发白光中黄光附近的频带都能够通过,从而加大了底片的反差.

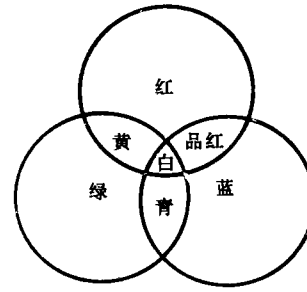


图 4-26

彩电是色光合成技术的一项重要成果,我们简略介绍一下它的色彩的形成.彩电的荧屏上,每一处都涂有距离很近,能显示红、绿、蓝色的荧光粉点.彩电接收到的全彩色电视信号经解码器分解为三个原色信号输入彩色显像管,管内装有的保持确定位置关系的电子枪分别按三个原色信号的大小发出三个强度不同的电子束,经荫罩板打到相应的荧光粉点上,从而发出强度不同的三种原色光,形成色彩丰富的彩色图象.

4.10 物体的颜色和颜料的颜色是怎样形成的?

物体或颜料的颜色通常是指白光照射下所显示的颜色．

前面提到白光照射到物体上，一般有吸收、反射和折射三种现象发生．如果眼睛接收的是经物体反射来的光，则人眼对反射光的色感即物体的颜色．换言之，不透明物体的颜色由反射光的颜色决定．而透明物体的颜色取决于折射后透过透明体的色光的颜色．红花是因为吸收了绿光和蓝光，而反射红光而呈现红色；绿叶是因为吸收了红光和蓝光而反射绿光而呈绿色；红色玻璃则是吸收了蓝、绿光，而透过了红光．不论是透明体，还是非透明体，如果用某一色光照射物体，则物体的颜色或与白光照射下颜色相同，如红光照射下，红花也呈红色；或与白光照射下相异，如用蓝光照红花，则花呈黑色．白色物体能反射各种色光，用哪种色光照射，它就呈现哪种颜色．黑色物体吸收各种色光，而没有反射光或透射光(或只有微弱反射光)，我们之所以能看到它们，是因为周围有较亮物体衬托的缘故．无色透明体是因为它能透过各种色光，对透明体来说，无白色和黑色可言．

颜料的颜色，同样决定于它能够反射的色光成分．如在白光照射下，红色颜料只能反射红光，而吸收了其它各种色光成分，所以呈现红色．

颜料(或油漆类)混合后的颜色取决于所混合的几种颜料能共同反射的光色．如果说色光的混合符合“加色法”的话，则颜料的混合符合“减色法”，即从本质上来说，是色光相减．例如，黄颜料所反射的除了黄光，还有橙、绿光，蓝颜料所反射的除了蓝光，还有绿光，二者混合后，共同反射的主要是绿光(因前者吸收了蓝光，后者吸收了橙光和黄光，相当于前者“减”去了后者的蓝光，后者“减”去了前者的橙光和黄光)，因此呈现绿色．

在颜料的合成中，常把品红、黄和青三种颜色称为颜料的三原色．在色彩合成中，随着三原色颜料的投放比例不同，可以混合出

多种色彩．在彩色印刷中，使用的就是品红、黄和青三种颜色的油墨，通过对浓淡不同的三原色的叠加复合，即可产生丰富多彩的彩色印刷品．

四、大气中的光现象

4.11 为什么天空呈蔚蓝色?

晴朗的天空呈蔚蓝色,这是为什么呢?对此,可解释如下:在大气层中,由于气体分子的无规则运动,会出现分子密度的涨落,而造成不均匀性.在阳光照射下所产生的次波没有固定的位相关系,不是相干光,从而在各处都不会相消,形成向各个方向的散射光.散射光没有一定规则,这是和漫反射的不同之处.按照瑞利定律,散射光的强度和光频率的四次方成正比.因此,大气层的散射光大多是频率较大的蓝光和紫光,这即天空是蔚蓝色的成因.

在阴雨天气,空中悬有比气体分子大得多的小水珠,这时除前边所说的分子散射外,频率较小的其它色光也有相当部分的散射.于是,天空是灰白色的.在空气被严重污染地区的上空,悬浮大量有害微粒.它们的体积也远较气体分子为大,阳光的散射情况与阴雨天相似,天空总是混混浊浊的,呈现灰白色.

4.12 海市蜃楼是怎样形成的?

海市蜃楼又称蜃景,是光折射和全反射造成的一种自然现象,通常出现在夏季.蜃景又有上现蜃楼和下现蜃楼之别.

上现蜃楼一般在海域出现,海面上的空气,上受炙热阳光的照射,下受温度几乎常年不变的海水的影响,形成温度上高下低,密度上小下大的情况.远处景物发出的光线在射向空中时会不断地折射而"向下"弯曲,射入热气层的入射角也因此不断增大.当射入某一层时,入射角大于临界角,就要发生全反射,使光线向下偏折.观察者沿其反向(直线方向)就会看到有"景物"悬在空中,比实际景物位置高,且正立.这即上现蜃楼.

下现蜃楼一般出现在炎热季节的沙漠地带,成因与上现蜃楼

相仿．只是空气温度上低下高，密度上大下小，由景物射向地面的光线要“向上”弯曲，所现蜃景比实际景物位置要低，且为倒立．在夏天的宽阔柏油马路上，有时也会出现下现蜃楼．

4.13 霓虹现象是如何形成的？

霓虹是阳光沿一定角度入射空中小水珠引起一系列折射和全反射而造成的一种色散现象．

在夏季，雨过天晴后的空中悬浮着许许多多的小水珠，形状近似小长椭球．阳光入射小水珠表面，会出现反射或折射现象．其中一部分光线要经历折射—全反射—折射，出射的方向取决于阳光入射的方位，只有在某一方位入射的光，在水珠内发生了全反射，出射光最强．沿此出射光的方向，就可以看到虹．处于这种情况的小水珠分布在一条圆弧带上，形成彩带，好似一座彩色拱桥．

至于虹具有五颜六色，则是阳光中各种色光成分经小水珠的两次折射，相互分开，发生色散的缘故．当紫光的出射倾斜角是 40°多时，红光的出射倾角就是 42°多，其它频率的色光夹在其间(图 4－27)．所以虹的颜色自上而下，依次为红橙黄绿青蓝紫．当然，从同一水珠出射的各种色光，因射向地面的方向不同，所以不可能同时进入一个观察者的眼睛．然而在虹的圆弧带上处于上下层(或说外层内层)不同部位处的水珠，与人眼连线的倾角各不相同，因而它们出射的各种色光进入观察者眼睛的成分也各不相同，当最上层(或外层)的水珠所出射的红光能射向人眼时，则最下层(或内层)的水珠所出射的紫光刚好也射向人眼．所以地面上的观察者还是能同时看到虹的圆弧带上由上到下(由外到内)的所有七色光彩．

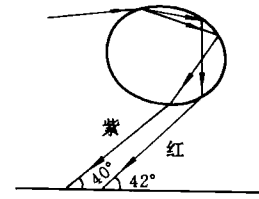


图 4－27

如果光线在小水珠内部发生两次全反射，出射光的角度比虹

的情况要约大 10°左右，是虹的外围形成另一条彩带，通常称为霓（有的称付虹）．霓比虹要暗一些，颜色的排列顺序与虹相反．从理论上讲，有出现多道彩虹的可能，但反射次数越多，出射光的强度越弱．因此，看到多次彩虹的机会是不多的．

站在地上看到的彩虹为半圆形，距离观察者一般为几公里．太阳的位置高，虹的位置就低．正在空中飞行的飞行员可以看到完整的彩虹，那是一个封闭的彩色光环．

五、光　　源

光来自光源．广义上讲，凡是本身能够发光的物体都叫做光源；狭义上讲，指照明或技术上的专用光源．太阳、北极星等属自然光源，电灯、蜡烛等为人造光源．任何光源发光都要消耗其它形式的能量．

为弥补天然光源的不足，人们千方百计地研制人造光源．自从本世纪初爱迪生发明电灯以来，电光源基本上沿“热光源”和“冷光源”两条途径发展．

靠高温下把内能转换成光能的是热辐射光源，简称热光源，如白炽灯．在灯泡中充入氮气、氩气或碘、溴等卤素，可制成充气白炽灯、碘钨灯、溴钨灯等．目的是减慢灯丝挥发，提高工作温度，加大功率．

气体放电光源，工作温度较低，俗称冷光源．其中一类系直接发光，如高压汞灯（钠、氙灯），长、短弧氙灯等；另一类如日光灯、显像管等通过气体放电产生的紫外线或电子射线激发荧光粉发出荧光．

上述光源的发光机理都是原子于激发态自发跃迁到低能态的自发辐射．

激光是光受激辐射放大的简称，是六十年代初开始发展起来的与普通光源发光机理完全不同的一种新型光源．大家知道，在正常情况下，原子大多处于基态．当它获得一定能量后，便跃迁到激发态，处于激发态的原子如果受到外来光子的激励，就会辐射出与外来光子频率、振动方向及位相均相同的光子而跃迁到较低能态．如果此辐射光子与外来光子再作用于其它处于激发态的原子，它们也会发生受激辐射，这样就得到四个性质完全相同的光子．这样的过程继续下去，就如同链式核反应那样，光子数目迅速增多，从而实现受激辐射光放大，得到激光．

由于激光具有单色性好、方向性好、相干性好以及能量集中、功率密度大等突出优点，因此，自其问世以来，得到迅速发展和广泛应用．概括起来有以下三个方面：一方面激光理论、激光技术进展迅速，出现了不同工作物质、不同工作方式的各种激光器；另一方面带动了诸如非线性光学、全息光学等一批新兴学科的发展；再一方面是激光在技术上得到日益广泛的应用，如激光加工、激光医疗、激光通信、激光育种、全息照相乃至激光武器等等．

展望未来，光源领域一定会朝着节能、高效、专用、美观的方向发展，出现争芳斗艳的新局面．

[思考题]

(1)暗室中有一长方形暗箱，箱内后端处装着一盏直丝白炽灯，前端箱壁上有一个大小可以调节的方孔．箱外方孔的前方置一纸屏．试问当方孔从大到小缓慢地连续调节过程中，纸屏上将观察到什么现象？

(2)白墙上挂一圆形明镜，黑夜用手电筒斜向照射墙和明镜时，看起来挂镜处像是“黑洞”，这是为什么？

(3)在池水面下 h 深处装一点光源．夜间池边的人观察，该点光源能把多大的池面照亮？(水的折射率是 $n=\frac{4}{3}$)

(4)一条鱼滞留在水中某处不动，渔民如果向他所观察到的鱼的位置投扔鱼叉，能否把鱼击中？为什么？

(5)已知凸透镜的焦距是 f，有一点光源置于主轴上离光心距离 u 处．问：①如果用一条不透明的纸带遮住透镜的中部，则成像情况有何变化？像距是多少？②如果把透镜从当中剖成两块(半圆形)，并把上下半块分别向上和向下移动一个距离 d，那么所成之像有何变化？试作图分析之．

(6)如图 4－28 所示，S 和 S' 分别表示发光点及透镜所成的像点，OO' 是透镜的主光轴．试用作图法分别判断图示两种情况透镜的性质，并确定透镜焦点和光心的位置．

(7)如图 4－29 所示，屋顶上挂有吊灯 MN，C 点是人的眼睛．那么要想通过挂在墙壁 AB 上的平面镜看到 MN 的像，平面镜应挂在多高处？至少要多长？作图分析之．

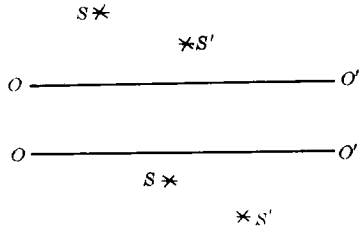


图 4 - 28

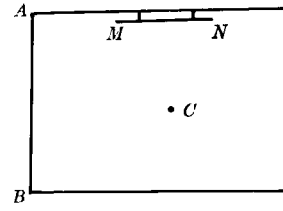


图 4 - 29

(8)色光的三原色是红、绿、蓝，为什么在颜料的合成中，却常把品红、黄和青三种颜料作为三原色颜料．

(9)初升的朝阳，或即将落入地平线的夕阳，呈现红色，且这时天边的浮云形成鲜红的霞光，这是为什么？

(10)炎热的夏天，有时在高大建筑物或陡峭山壁旁，会出现侧现蜃楼，这是为什么？试解释之．

第五篇　能　　源

一、中学物理教学中对能量认识的发展

5.1　能量概念有何重要意义?

(1) 对此,可从以下几方面说明:从历史发展看,对能量概念认识的不断深化,反映了对物质各种运动形式及它们联系的认识的逐步扩展.

人类对能量概念和有关规律的认识经历了漫长的发展过程,在机械运动形式中动能概念是逐步由力的概念中分离出来,并且和功的概念建立起联系之后才形成的.随着对种种运动形式的认识,以及对它们之间联系的发现,19 世纪中叶建立起了能量守恒定律,这时才真正认识了功、热量、能的真实含义.20 世纪初,爱因斯坦建立了狭义相对论,得到了质能关系,揭示了能量和质量的相当性,使经典力学中彼此独立的两个基本自然规律成为统一的质量-能量守恒定律的两个侧面,使原来在经典力学中相互孤立的动量守恒定律与能量守恒定律结合成为一个统一的"能量-动量"守恒定律,使我们对能量的认识更深入了一步.教学上也是顺着这一脉络逐步深化着对能量的认识.

(2) 从科学体系结构看,能量概念是物理学中对物质运动各种形式都适用的最重要的基本概念之一,能量是物质运动各种形式间公共量度的物理量.

以能量概念为核心的能量守恒定律是支配自然现象的最重要规律之一.它的发现,一方面肯定了机械运动、热运动、电磁运动

等各种形式运动之间既存在着质的差异，又存在着相互转换的可能性；另一方面又以量的规律把各种运动形式联系起来，指出各种现象之间在相互转化中有量的共同性，而对这一共同性的公共量度就是能量．可见它是对统一的物质运动本性的反映，是通用于各学科领域的基本概念之一．

(3) 从研究物理的方法上看，能量概念及相关的规律为解决问题开辟了宽广的途径，对某些问题用能量概念去讨论比较简捷．例如在力学中，有些问题我们用功能概念处理，比直接应用牛顿运动定律方便得多．由于能量守恒是支配自然现象的基本规律．所以它也经常被用作检验、论证理论的准绳之一．一定条件下如果在一个过程中，物质系统的能量守恒，那么我们就有可能根据在某时刻的状态，去预言出一系列其它时刻系统具有的相应状态．把这个思想推广到其它物理量，包括我们熟悉的动量、角动量等，还有我们不熟悉甚至未知的．这就是用守恒量处理问题的方法，那将带来极大的方便，因此不断地去寻求守恒量及其成立条件是物理学极重要的研究方向之一．

(4) 从物理学、科学技术与社会发展的关系来看，有效利用能量的资源已成为当今社会关注的焦点之一．

能量守恒定律表明物质运动形式间发生转化是物质本身所固有的特征，各种运动形式间的转化有无限可能性，这就从理论上为利用能量的各种资源提供了依据．从实践上它使人们走出制造永动机的误区，致力于研究各种能量形式相互转化的具体条件，求得最有效地去利用自然界提供的各种各样的能量．

5.2 在力学、热学的学习中，是怎样认识机械能和内能的？

无论是从科学史看，还是从中学物理教材的结构看，动能都是认识能量的起点．因为认识了动能，再加上保守力和势能的概念，才能建立机械能的概念，尔后再借助机械能去认识内能、电磁能等

其它形式的能．回顾人们的认识史，当初为了认识动能，首先需要把动能的概念从力的概念中分离出来．17至18世纪，在物理学界发生过对“物体运动的力”有两种量度的争论[①]，就是因为当时把动能和力的概念混用的结果．历史上出现过的这种认识，在当今学习物理的过程中也频频产生，我们在教学上也要借鉴历史及早作些安排，防止产生混淆．

就知识发展的脉络来看，如果不是首先找出功与能的联系，上述分离也是做不到的．而要建立这种联系必须先对功要有确切的认识．功的概念是在使用简单机械实践经验的基础上逐步发展成为科学概念的，而功的概念的形成就为认识能量准备了知识基础．再通过对大量事实作考察和理论推算，才最终确立了二者的联系．这就是我们知道的动能定理和功能原理．

从这种联系的角度看问题对能量浅近的说法就是“物体能够做功，物体就具有能．”能量的这种表述，虽然粗浅，但也概括地给出了能量概念所要反映的基本事实，定性地道出了功与能的区别及联系：功是过程量，物体在过程的始态和终态具有的能量是状态量；物体作功的过程就是自身能量改变的过程．正因为如此，高初中教材在引入能的概念时，都采用这一表述．教学中，尤其是在初中教学中，不能因粗浅而忽略揭示其内含．在对机械能各种具体形式的认识中，要反复阐明讨论能量的基本方法：物体能否作功，是我们识别物体是否具有能量的基本依据；而能量的具体形式，要视物体是用什么物理量作为状态参量来定．如：以速度为状态参量的是动能；以对地表面的高度为状态参量的是重力势能；以弹性形变量为状态参量的是弹性势能．后两种都是以相对位置为状态参量的，统称为势能．如果物体始态时的能量形式与终态时的不同，便表明发生了能量从一种形式向另一种形式的转化．一切实

① 当时所谓的“物体运动的力”，是指一个正在运动的物体所具有的使另一物体运动的能力．两种量度：一种是用动量；另一种是用所谓“活力”，即后来的动能．

验事实证明，这一转化是通过作功来实现的．所以说，作功是实现能量转化的基本途径之一．上述这些思想在初高中物理教材中都有程度不同的要求．差别在于初中只是定性说明，高中则逐步提高到定量，给出了动能、势能的定义式和动能定理的表达式．

往往有人对能量有一种“多余感”，觉得在讨论物体间相互作用时，已经有了力的概念，就足够了，何必又要有能量的概念呢？诚然，用力的概念和牛顿三定律可以细致地描绘物体间相互作用的规律．然而，这只是描写物体相互作用的一种方式，我们还可以用能量、动量来描写相互作用，例如各种势能就是不同性质相互作用的能量．

在分析力学里，就是以能量和动量概念为基本物理量建立了物体运动的基本方程，发展成一套完整的理论方法．它和以力、加速度概念为基础的牛顿定律平行发展．以力为基础的方式和以能量为基础的方式，在经典力学范围内是等价的，可以从一个推出另一个，在处理具体问题时只有繁简之分．然而，在现代物理中它们并不等价，用能量的观点不仅可以描写实物运动，而且可以完善地描写场，用力却不能描述电磁场本身的运动．至于能量守恒根源于时间均匀性的时空特性，用力的方式是无法认识到的，所以从物理学的发展上看，能量方式要优于力方式．

对新能量的认识总是同已知能量的认识相联系取得的．内能、电磁能等能量形式的认识，都是与机械能相联系取得的．人们按照上述以功能关系为线索认识能量的基本方法，通过对一些与热现象相关的物理过程的分析，认识到物体不仅具有由它整体的机械运动状态所决定的能量——机械能，而且内部还存在着与它自身的热状态相关的能量．例如，气体绝热膨胀的过程中对外界做了功，同时自身的温度降低．这表明气体在一定的状态下，内部存在着与它的热状态直接相联系的能量，从而具有做功的本领．这种能量就是物体的内能．我们在第二篇 2.4 中已详细阐明了内能的热力学定义和微观本质，这里不再重述．

大量事实告诉我们,要改变物体的内能,只有两种方法:作功和热传递(参看 2.7). 在作功过程中,物体内能的改变,往往是与物体体积的变化相联系的;在发生热传递时,内能的改变常常是与温度变化相联系的、综合而言,一般情况下,物体内能的改变是与温度和体积的变化相联系的 . 就是说,内能的确定是以温度和体积两个宏观量一起作为状态参量的 . 这和从微观上的认识是一致的,因为从分子运动论看,温度是与分子平均动能相关,体积是与分子间相互作用势能相关的 .

两种方法在改变物体内能上的等效性,拓宽了对能量转化形式的认识;热功当量的测定,又从量的关系上确立了转化的联系,多样形式间相互转化和转化中量的守恒,促成了普遍的能量守恒定律的发现 . 为利用热能制造热机奠定了理论基础,彻底打破了制造第一种永动机的幻想 .

内能的建立扩展了对能量的认识:从认识由物体整体的机械运动状态所决定的能量——机械能,发展到由物体自身热状态所决定的能量——内能;从认识宏观物体具有的能量,深入到微观粒子热运动所具有的能量 .

5.3 在电磁学学习中,是怎样认识电磁能的?

在电磁学学习中,对电磁能的认识经历了从电流能到电磁场能的发展过程,这是一个从现象到本质的深入过程 .

对电能的认识,同对机械能、热能的认识类似,依然是从功能关系开始的 . 电路中通过电流时,电流能够作功,因此电流具有电能 . 那么,对电流作功该怎样理解,它是怎样表现出力作功的呢?在初中教学里,还没有电场的概念,所以电流作功,不是直接指什么力作功这一通常含义,而是指与电流表现出的各种效应所相当的功 . 或者说是通过电能所转化的其它形式能量来间接认识电能的,例如通过热效应的热能来认识电能 . 电流作功的直接意义,要待场的概念建立之后才能看清 .

场的概念，开始于初中的磁现象教学，高中进一步认识到电场和磁场．场有场力，场力能作功，表明场具有能量．在直流电路中，由电源的正负极形成电场，电场力作用于自由电荷而作功，这个功是在有电流的条件下完成的，因而形象地称为“电流的功”，但其本质是电场力的功．电场力作功，使电能转化为焦耳热，表现为电流的热效应．在参考静电场力（稳恒电流的场也是一种静电场）作功的特性中，引入了电势、电压的概念来描写场中各点的能量性质，从而产生了能量分布于场，场存贮能量的新观念．运用电压概念能够计算电流所作的功，这个功也就是转化成其它形式能所消耗的那部分电能、从能量守恒看，电能应从其它能量转化而来．所以在整个电路中电源是获得电能的装置．电源内部的非静电力作功，使其它能转化为电能．电动势是对这种转化性能的量度．因此，电动势和电场力一起描述了电路中从非静电能→电能→其它能之间的转化．

磁场对电流的作用力，使通电导体发生运动，实现了电磁能向机械能的转化；电磁感应现象则实现了从机械能获得电能的愿望．这两方面为开发和利用电能资源奠定了理论基础．变化的磁场和变化电场间的相互激发产生出统一的电磁场，电磁场的传播，以波的形式将电磁场能量及所载信息向空间辐射，使电磁波成为现代信息技术的基础．

回顾对电磁能的认识，其中有两点对我们深入认识能量概念是很重要的．其一：电磁能进一步扩展了对能量的认识，不仅以实体形式存在的物质具有能量，以场形式存在的物质也同样具有能量，物质都有能量，能量是物质普遍具有的性质．其二：物质的能量分布于何处，或者说能量存贮于何处？在机械能、热能中，能量都不离开物体单独存在，或者说物体携带能量．在静电场中，场具有能量，然而静电场是由电荷、电流在空间分布所决定的，因此电荷分布也决定了能量在场中的分布；它们之间存在着一一对应关系．可见在静电场的情况下，能量也不离开电荷和电流单独存在，

能量分布可以完全由电荷或电流分布表示出来，但是在变化的电场、磁场中就不是这样的了．变化的电磁场是可以脱离电荷或电流存在的(见 3.30 和 3.36)．例如生活中我们经常遇到，当关闭电灯时，当电冰箱电路断开时，电流急剧变化，在开关断开点处发生火花，电火花会激发一个变化的电磁场，并以电磁波的形式向周围传出，虽然电火花已经熄灭，这个电磁波却仍然继续传播，当它传到一个收音机时，收音机发出“喀喀”响声，说明收音机收到了能量，根据能量守恒定律，理所当然地认为这份能量是由电磁波带过来的．所以结论就是：电磁能量能够独立存在于电磁场中，电磁能量在空间可以传播．

5.4 对原子核能应该如何认识？

对于核能的认识是在原子核结构发生变化时从其中所反映出的功能关系开始的．原子核结构的变化，有天然放射性现象和核人工转变．核发生转变时，都要放出一些粒子，由测量知道它们都有不小的能量．这说明核里贮藏着很大的能量．那么，能否认为核能就是指核内贮藏的能量呢？为了弄清这个问题，我们先对核里为什么有能量作些分析．

原子核里具有能量的原因是由于原子核内存在着核力．核力是一种强相互作用的交换力，只在小于原子核的线度内才发生作用，它与核子是否带电无关，比库仑斥力要大得多，所以才能使核内的质子紧密结合．但是我们对核力的认识迄今还是一个有待探索解决的基本问题，又加上对核内结构的认识也不是十分清楚，这种情况下我们还不可能从核力去细致地讨论核能问题．但如果从核是一个封闭系统考虑，就可以从能量守恒、质量守恒、电荷守恒的观点来进行讨论．

从能量转化关系看，设想将原子核中的一个核子从核中分离出去．移到无穷远处，在这过程中一定要有外界作用，克服核力的吸引而作一定的功，结果使核和这个核子的整体能量增加．反之，

设想核里的所有核子，起先它们相距无穷远，因而都是些自由粒子，然后从自由状态再结合成核，在这个过程中核力将作一定的功，因而整体能量将相应地减少．这就是说核子在形成原子核的过程中，要放出能量．这个能量叫原子核的结合能．核子结合成核的过程中，核力作功愈多，放出能量也愈多，结合能就愈大①．这时原子核能量就愈低，表明原子核结合得愈紧密，因而核愈稳定．反之如果结合能小，原子核结合得比较松，核就不稳定．可见，如果能求得结合能，就知道了放出的能量，比较出核的稳定程度．计算结合能就是计算分散核子结合成核时，核力所作的功．然而由于对核力还不甚清楚，所以需要另辟蹊径用新的观念寻求新的解决办法．这一新观念就是质能关系，办法就是依据质能关系，计算出与质量亏损相联系的能量减少，从而得出结合能．

相对论确立了物体的质量和能量两个重要物理量间的关系：

$$E = mc^2 \qquad (5-1)$$

式中 E 是物体的总能量，c 为光在真空中的速度，m 为物体的质量．它表明物体的总能量和它的质量成正比．这一关系的普遍正确性，已为实验事实和物理学的发展所证实．

质能关系式揭示出，任何一定的质量都同时联系着一定的能量．但该式表示的只是在质量和相联系的能量二者之间存在的一种数量关系，而不是一种相互转化关系．质量和能量是一个物体的两种属性，它们既不能等同，也不存在实质和表现形式的关系．

我们知道由核子结合成原子核时，要发生质量亏损的现象．原子核既然是由中子和质子所组成，原子核的质量似乎也应该等于核内中子和质子的质量之和．精确的实验测量表明，实际情况却并非如此，原子核的质量总是比组成它的所有核子的质量之和要小一些．二者之差就是原子核的质量亏损(Δm)．

既然在多个核子结合成原子核时，质量亏损了 Δm，根据质能

① 注意不要把结合能的概念与用功表征物体机械能改变量的大小，二者混淆．

关系，能量也要相应地减少 $\Delta E = \Delta mc^2$．它表明由多个核子结合成原子核时会放出能量．这一结论和前面从核力作功的角度分析核子结合成原子核时要放出能量的结论是一致的．因此 Δmc^2 就是原子核的结合能．

其实，这种“1 + 1≠2”的情况，并不新鲜．分子的质量并不等于原子质量之和，原子的质量也并不等于核和电子质量之和；任何两物体结合时，都会放出一部分能量．只不过通常放出的能量微乎其微，不加考虑就是了．但是在原子核物理和高能物理中结合能的意义是很重要的．

一个质量数为 A 的原子核，当它的 A 个核子结合成原子核时，核力作功所放出的能量就等于结合能 Δmc^2．平均一个核子所放出的能量叫做平均结合能，它等于 $\Delta mc^2/A$．

根据前述，结合能越高，核子在核内结合越紧密，核就越稳定．现在也同样可以用平均结合能的大小比较核的稳定性：平均结合能越高的，核越稳定．

把所有核按质量数排序，从它们的质量数和平均结合能的关系中，发现中等质量数的核的平均结合能，比轻核、重核都要大．

当原子核从平均结合能较小的核转变成结合能较大的核时，即当结合得比较松的核变成结合得紧的核时，就会放出原子核能．从上述关系可以看出，有两个途径可以获得能量：一个重核分裂成两个中等质量的核，这就是重核的裂变；另一是轻核聚变．根据重核裂变的原理制成了原子反应堆和原子弹；根据轻核聚变的原理制造了氢弹．

由上述可见，核能，实际上主要是指原子核结合能发生变化时释放的能量．这个能量与原子核内贮藏的能量 mc^2 不同．以氘核为例前者仅为后者的千分之一．所以常听到有人讲如果一克物质全部释放出能量，就可以得到多少能量，发多少度电．这是办不到的，也决不能全部被利用．

二、能量的利用

5.5 内能的利用具有什么特点?

在利用各种形式能量作功过程中,总能量不会有任何增益和损失,这是个普遍规律,内能也不例外.除此之外,由于内能与其他形式的能量存在着质的差别,因而内能的利用亦另有自己的特点.例如,当冷热物体接触时,总是温度高的物体变冷,低温的物体变热.然而与此相反的单纯热传递过程——热的物体更热,冷的更冷的现象,虽不违背能量守恒,在自然界中却从不发生.这事实说明,符合能量守恒定律的过程,并不一定在自然界都能发生.热现象发生的过程,除了受能量守恒定律限制之外,还要受过程进行方向的限制.这使得利用内能作功时具有自己的特点.

(1) 内能的利用要有工质,工质在两个热源之间作功.

内能是物质的内能,离开物质,内能也不存在.蒸汽机里的高温高压水蒸气、内燃机、汽轮机里的高温高压燃气都是工作物质,简称工质.在热机里机械能是由内能转化而来的,要连续获得机械能,需要不断消耗内能,而内能的补充是从燃料燃烧中吸收热量.我们把燃料燃烧部分称作高温热源.作功过程中,一部分热量转变为机械能,一部分损失,相当一部分被废气携带而排走,进入温度低的环境,称为低温热源.工质从高温热源吸收热量 Q_1,作功之后,废工质将剩下的一部分热量 Q_2 再排入低温热源.可见,工质要有两个热源,才能作功.

(2) 从内能转化为其它形式能量具有不等值性.

大量的经验事实证明,机械能完全可以转化成内能.摩擦生热就是一个明显的事例.摩擦所作的功,使物体温度升高,物体吸收的热量与摩擦作功之间存在着等值性.然而,在不产生任何其他影响的情况下,要把内能百分之百地变成机械能却是不可能

的．如，我们在分析头一个特点时所指出过的那样，当热机把内能转变为机械能时，由于各种损失内能只有一部分才转变成机械能．所以在 Q_1 和机械能之间具有不等值性．正由于此热机的效率总小于百分之百．

通过作功可以完全将机械能转变成热，反之却不成，说明这两个过程是不对称的．或者讲过程是不可逆的．一般而言，一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的．这是热力学第二定律指出的规律．也是内能的利用中具有的基本特点．

5.6 与电能利用有关的几个问题

1. 利用电能时用电和发电必须同时完成

由于这个问题涉及到用电和发电，所以要从全电路来作讨论．为了简明，仅限于用直流电路说明这个特点．设电路里电源是一台直流发电机，内电阻 r，在一定转速时电动势为 $\mathscr{E}$，外电路里用电器是纯电阻，设为 R_1，输电线电阻为 R．则电路中的电流应用全电路欧姆定律计算：

$$I = \frac{\mathscr{E}}{r + R + R_1} \tag{5-2}$$

外电路的端电压

$$U = I(R + R_1) = \mathscr{E} - Ir \tag{5-3}$$

外电路的用电功率

$$P = IU = I^2(R + R_1)$$

或者表示为

$$P = I\mathscr{E} - I^2 r \tag{5-4}$$

上式表明，用电器在某一时刻消耗的电能 P，由该时刻发电机产生的电能 $I\mathscr{E}$ 提供，用电和发电是瞬时对应关系．

当并入的用电器增多，R 变小，I 增大，如果要保持端电压 U 不变，由(5－3)式知道，发电机必须提高 $\mathscr{E}$，而这又需外界动力机

输给更多的其它能，以提高转速[①]．这就是说当用电量增加时，发电量也要增加．

在极限情况下，外电路断开时，$I=0$，外电路用电量为零，由(5－4)式知，也无需发电机供电．可见电能的消费决定着生产，有消费同时才有生产，消费多生产也多．当然这种消费的增加不是无限的，要受到发电机所能提供的最大功率的限制，否则要烧毁电枢线圈．

从上可见，在解决电能大规模的直接贮存问题之前，用电和发电是同时完成的．

2．电能的大规模储存

电能使用十分普遍和方便，所以对电能的储存也是为人们十分关注的问题．电能的储存分直接和间接两种方式．使用电容器可以直接储存电能，但是储存能量很有限，时间不长，只能作为很短时间内直接以电能形式释放能量的蓄能器．间接存储：经常使用的有蓄电池，它是先将电能转化为化学能，使用时再转化为电能，储存量也有限．世界上各国采用的大规模储存电能的办法是把电能先转换成水势能储存起来然后再发电，这叫抽水储能发电．抽水储能发电是怎么回事呢？

前面说到电能的生产和消费是同时完成的．实用上电能消耗在一昼夜的不同时间很不平稳，白天用电量急增，晚上也需要大量电，都是用电高峰期，而午间和半夜则是低负荷用电期，高峰和低谷给电网造成很大差距抽水蓄能就是在用电低谷时，把电网多余的电能用来抽水，当用电高峰时，把水势能转换成电能，补足电网供电的不足．这样的发电站称为抽水蓄电站．发电站靠可逆式水

---

① 实用电路一般都要求发电机的电动势不变，维持电枢匀速转动(交流电路更是如此，因频率不能变)．当负载电流 I 增大时，由于阻碍电枢转动的磁场力增大了，要维持匀速转动，必须增大动力矩，从而动力机输给发电机的功率和发电机发出的总电功率($I\mathcal{E}$)都相应增大．

泵水轮机组和自动切换系统来控制这一转变．世界各国在这方面的建设发展极快．目前我国正分别在广州和北京建设这种电站，北京的十三陵水库抽水蓄能电站装机容量为80万千瓦，设计年发电量可达12亿度．

3．直流输电的发展

直流输电是最早使用过的输电方式，出现于1875年．当时输电电压比较低，是从直流发电机直接产生并输出的，所以那时从发电、输电到用电全部都是直流电．交流电经过变压器能简便、经济地实现升压或降压，高压输电效益好，低压用电安全，所以从1888年起很快被交流输电取代．交流输电也有不利之处，当再增大输电电能时，电压的提高遇到很大困难，配套设备也将复杂化；输电线路内，电压损失与包括电容和电感在内的阻抗相关，而不是象直流电时，仅是电阻；在输电系统相互联网中，对交流要求高，频率要相等，要同步．随着输电系统网联的扩大和输电功率的增加，距离的增长，70年代兴起了现代直流高压输电．它是在可控硅出现，掌握了变流技术后保留了交流电优点的前提下重新发展起来的，并且得到了迅速发展．

现代直流输电的过程是：将高压交流电经输出端的变流器变换成高压直流电，用两根导线将电能输送到远距离用户区，再经接收端的变流器逆变成高压交流电，送入用电区的交流电网中．可见现代直流输电的特点是：发电和用电部分仍然是交流电，只是在输电线路上是高压直流电．

我国从70年代末期起，已建成数条高压直流输电线路，其中从长江葛洲坝发电站至上海的一条全长1052.25千米，输送功率120万千瓦，直流超高压±500千伏．这是我国电力建设上的一项重大工程，与核电站、60万千瓦火电机组一起，成为我国电力现代化建设的三大标志．

5.7 核电站的反应堆会像原子弹那样爆炸吗?

原子弹的核心是由高浓度(大于90%)的裂变材料铀-235或钚-239和引爆系统构成．引爆装置复杂而精密．当它点火起爆后,内爆式原子弹内利用炸药产生的内聚冲击波,迅猛地压缩(过程历时约几十微秒)处于次临界状态的裂变材料,使其密度急剧增高,达到超临界状态．巨大的核能瞬间(历时约微秒量级)释放出来,产生并形成了破坏力极强的毁灭性核爆炸．

反应堆的结构和特性与原子弹完全不同:堆内没有高浓度的裂变材料,采用低浓度(约3—4%)[①]裂变材料作燃料,也没有引爆系统．不具备原子弹产生爆炸的两个必要条件．因此不会发生像原子弹那样的核爆炸．反应堆都设有安全控制系统,该系统使核能缓慢有控制地释放出来．此外,反应堆还具有自稳定特性,当核能释放太快,堆芯温度上升太高时,链式裂变反应会自行减弱乃至停止．

① 天然铀中仅含有0.71%的U-235.

三、能源与社会发展

5.8 能源是怎样分类的?

能源有多种分类方法,如按形成条件、技术状况、使用性质、对环境影响等不同角度进行分类．常见的分类有下面几种:

1．一次能源和二次能源

按能源形成条件可分为一次能源和二次能源．

一次能源是指天然存在,不经加工可以直接利用的能源．如原煤、石油、天然气、核燃料、水流、潮汐、太阳能、地热、植物秸杆等．又称为天然能源．

从一次能源的来源看又可分为三类:第一类来自地球以外,即以太阳辐射能为来源,如水能、风能、生物质能、原煤、原油等;第二类来自地球内部,如地热;第三类来自地球和其他天体的作用产生的能量,即潮汐能．

二次能源指由一次能源经加工转换而成的能源,如电、煤制品(煤气、焦炭等)、石油制品(汽油、柴油、煤油等)、氢气、酒精、沼气、蒸汽、热水等．又称为人工能源．

2．再生能源和非再生能源

对一次能源,按其是否能再生又可分为再生能源和非再生能源．

再生能源指能重复产生的自然能源,如太阳能、水能、潮汐能、植物燃料等．

非再生能源指不能重复产生的自然能源,如煤,石油,核燃料等．

3．常规能源和新能源

按能源利用的技术状况,分为常规能源和新能源．

常规能源指技术已经成熟,大量生产广泛使用的能源,如煤、

石油、天然气、水力等，又称传统能源．

正在开发，还未大量使用的能源是新能源．如太阳能、核燃料、地热、氢能等．

其他分类不再列举，所有的分类都是相对的，不能作绝对地理解．

5.9 能源对社会发展的影响

能源是人类生存和发展的重要物质基础，是人类文明的先决条件，人类社会发展的历史与能源的开发和利用水平密切相关．

蒸汽机出现之前，社会生产力低下，人类对能源的使用和控制能力很低，在生产和生活中的主要能源是自身体力与部分畜力、自然力和薪柴，因而社会发展十分缓慢．

18 世纪，蒸汽机的发明，引起了产业革命，煤炭成为人类社会的重要能源，1920 年煤炭占该年世界总能源的 87%，使世界能源结构发生了第一次转变．以蒸汽机为动力推动了纺织、交通、矿业开采等领域的发展，社会生产力大为提高，人类生活条件大为改善．煤炭的广泛使用成了资本主义工业化的动力基础．

从 20 世纪 20 年代开始，随着石油的发现和利用，内燃机的发明，世界能源结构发生了从以煤炭为主向以石油和天然气为主的第二次转变．1920 年至 1959 年，煤炭在世界能源中所占的比例由 87%下降到 48%，而石油和天然气则由 11%上升到 50%．目前，世界上大多数国家的能源消费结构均以石油和天然气为主．能源结构的第二次转变，推动了交通运输的大发展，促进了生产力的提高．尤其是 19 世纪 70 年代电能的利用，人类社会开始迈进电气化时代，为社会的大生产和新技术的发展创造了广阔的前景．

当今，世界新技术革命，促进了新兴工业的蓬勃发展，迫切要求采用可再生、多样化的能源，这是一方面；另一方面，煤、石油、天然气等不再生燃料资源日趋贫乏．两方面共同推动了新能源的开发和利用，世界能源结构已开始经历第三次转变．预计太阳能发

电、核能发电，将成为世界能源体系的支柱，而煤炭、石油、天然气则主要转变为化工原料．

综观能源结构发生三次转变的历史，我们可以看到，每一种能源的发现、利用和发展，都伴随着生产技术的重大变革，推动社会生产的发展，把社会经济水平提高到一个新阶段．

能源消费水平是制约一个国家国民经济发展速度的突出因素．

根据统计资料，能源消费增长率和国民生产总值增长率成正比关系．在发达国家中日本的能源消费量增长最快，其国民生产总值增长也最快；英国的能源消费量增长最慢，其国民生产总值增长也最慢．发展中国家与当代工业化国家在发展国民经济中存在着差距，其主要标志之一是能源消费水平．工业国家的人口约为世界人口的三分之一，其能源消费却占世界能源总消费的80％．所以，任何国家在任何时期要加速其国民经济的发展速度，就必须保持能源消费量有相应的增长速度．

[思考题]

(1)为什么说，能量是物质各种运动形态间的共同度量？

(2)我们是循着一个什么样的基本思路认识各种形式能量的？

(3)物理教学中对能量的认识是怎样逐步扩展的？

(4)有人说，“原子核的结合能越大，核能也就越大”，试分析这种看法．

(5)从世界能源结构发生的三次转变历史，说明：对人类社会并不存在“能源危机”，但却需要不断开发和利用新能源．

主要参考书目

1. 北京大学物理系编,《普通物理学》(力学部分),人民教育出版社,1961年,第1版

2. 复旦大学、上海师大物理系编,《物理学》(力学),上海科技出版社,1978年,第1版

3. 梁绍荣等主编,《普通物理学》(力学),北京师范大学出版社,1985年,第1版

4. 李椿等编,《热学》,人民教育出版社,1978年,第1版

5. 黄淑清等编,《热学教程》,高等教育出版社,1985年,第1版

6. 赵凯华等编,《电磁学》,人民教育出版社,1978年,第1版

7. 梁灿彬等编,《电磁学》,人民教育出版社,1980年,第1版

8. 姚启钧原著,华东师大改编,《光学教程》,人民教育出版社,1981年,第1版