国家教材委员会专家委员会审核通过
2019

普通高中教科书

物理

必修

第一册



教育科学出版社
ESPH

普 通 高 中 教 科 书

物理

必修

第一册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　管寿沧　陶　洪
本册编者　（按姓氏笔画排序）
叶　兵　苏建东　张　飞　张惠钰
莫永超　曹　宏　彭兆光

出 版 人　李　东
责任编辑　莫永超
版式设计　李勤学　郝晓红
责任校对　贾静芳
责任印制　叶小峰

普通高中教科书

物理　必修　第一册

WULI　BIXIU

教育科学出版社出版发行
（北京·朝阳区安慧北里安园甲9号）
邮编：100101
市场部电话：010-64989009　010-64891796（传真）
编辑部电话：010-64989537　010-64989519（传真）
编辑部邮箱：wuli@esph.com.cn
网址：http://www.esph.com.cn
各地新华书店经销
天津市光明印务有限公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：9.25
2019年9月第1版　　2022年7月第5次印刷

ISBN 978-7-5191-1968-3
定价：10.70元
批准文号：京发改规〔2016〕13号　价格举报电话：12315
如有印装质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

目录

走进物理学 …… I



第一章　描述运动的基本概念

1. 参考系　时间　质点 …… 2
2. 位置　位移 …… 7
3. 位置变化的快慢与方向——速度 … 13
4. 实验：用打点计时器测量小车的速度 …… 19
5. 速度变化的快慢与方向——加速度 …… 22

反思・小结・交流 …… 29
本章复习题 …… 30



第二章　匀变速直线运动的规律

1. 匀变速直线运动的研究 …… 32
2. 匀变速直线运动速度与时间的关系 …… 37
3. 匀变速直线运动位移与时间的关系 …… 41
4. 匀变速直线运动规律的应用 …… 46
5. 自由落体运动 …… 51

反思・小结・交流 …… 59
本章复习题 …… 60



第三章　相互作用

1. 力　重力 …… 62
2. 弹　力 …… 69
3. 摩擦力 …… 74
4. 力的合成 …… 82
5. 力的分解 …… 87
6. 共点力作用下物体的平衡 …… 92

反思・小结・交流 …… 97
本章复习题 …… 97



第四章　牛顿运动定律

1. 牛顿第一定律 …… 100
2. 探究加速度与力、质量的关系 … 106
3. 牛顿第二定律 …… 113
4. 力学单位制 …… 117
5. 牛顿第三定律 …… 122
6. 牛顿运动定律的应用 …… 128
7. 超重与失重 …… 134

反思・小结・交流 …… 137
本章复习题 …… 138

附录　误差和有效数字 …… 139
附录　中英文索引 …… 140

走进物理学

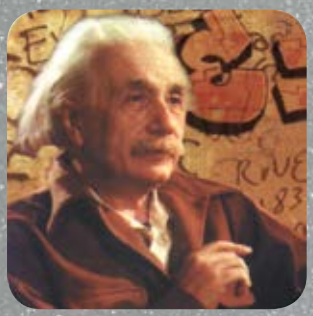
物理是物质世界结构和运动的道理

小到肉眼看不见的微观粒子和它们的相互作用，大到天体和星系的过去与未来，都遵循一些基本的规律。物理学家们从自然现象中发掘出这些道理。

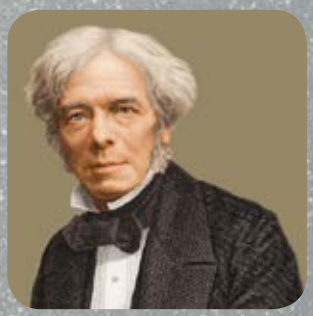
物理学中只有少数来自科学实验和生产实践的“大道理”，它们却管着物质世界所有的“小道理”。学习物理学，就是要学会用少数大道理，说明白许多小道理；要学习物理学家观察世界的思想、方法和态度，善于观察和思考，努力追根溯源、探求真理，不盲从，不迷信。















物理学是现代科学技术的基础

每一个现代人的生活和工作都离不开物理。从汽车里的油路、气路、电路，传感、传动、制动，到自动控制和无人驾驶；从智能手机里几十亿个三极管的集成芯片，到使用激光的许多医疗设备，还有CT和B超……这些都是物理学研究成果的应用。而今天的物理实验室正在为明日的高新技术创造条件。现在，人们很重视交叉学科，事实上其中的许多交叉是以物理学为基础和依托，最终发展成独立的领域。想一想地球物理、大气物理、海洋物理、天体物理、生物物理、半导体物理、工程热物理等这些带着物理“复姓”的学科，就能悟出这个道理。同学们将来无论从事什么工作，物理学都是必要的基础。







物理课堂，是鼓励质疑和激励探究的乐园

走进这里的每一个人，首先自己要对物理有兴趣，要善于从日常生活和周围环境中提出问题，联系物理。

1. 为什么谁也没有在地球上看见过足球那么大的雨点？

2. 赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？雨后复斜阳，关山阵阵苍。为什么恰好“斜”到42度半？

3. 巨树临风，大枝小叶的摇摆频率有何不同？

4. 大树最多能长多高？

5. 计算机的速度能提到多快？尺寸能做到多小？有没有物理限制？

要勇于提问，老师是我们探究的良师益友，可以一道去寻求问题的答案。当然，质疑与思考要因循一定的出发点和科学方法，不要没有根据地胡思乱想，用苦思冥想浪费时间，而是要善于观察和悉心思考。





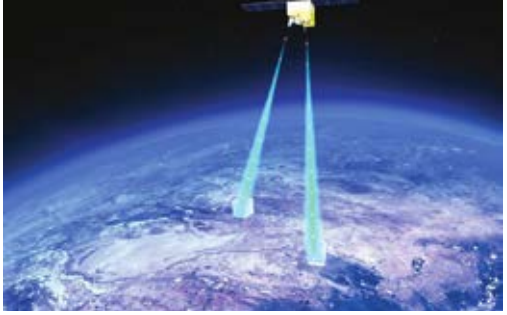




学好物理并不难

只要始终保持学习的兴趣和热情，熟练掌握学习物理的科学方法，养成良好的学习习惯和态度，就一定能收到成效。




学习物理不需要死记硬背，只要明白道理。要做物理习题，但是不要把物理习题变成算术习题。只要道理讲对了，就应得到鼓励和认同；如果回答有创意，即使与标准答案不同，也应当给予鼓励。举一个小例子，有一个常见的问题是：一个人要在平面镜里看自己的全身，那镜子至少要多高？标准答案是人身高的一半。如果有人说，镜子可以更短，只要把它倾斜一些，这答案是对是错？应当给这位同学加分。创新能力的养成就蕴含在这样的细节中。

同学们可以利用学校实验室的设备，自己动手设计实验，还可以组织课外学习小组：一些人玩无线电，从矿石收音机做到半导体超外差；另一些人可以关心地震活动，搜集所在地区的地震和地磁数据……海边的同学可以关心潮涨潮落的规律，山脚下的人们可以记录一年四季和每天早晚的气流运动变化。针对某个具体问题，自己动手学到知识和技能，领悟科学思维，今后在其他方面解决问题的能力和克服困难的勇气，都会有所提高。

物理是一种文化，是现代公民不可或缺的科学素养

对于即将走入社会的年轻人，高中物理是一次进行系统学习的宝贵机会；对于决心在技术或自然科学领域取得更深层次发展的年轻人，高中物理是最初的起跑线。因此，高中物理是一门关键课程，老师任重，学生道远。我们每一天都享用着物理学的成果，而物理学也会回馈那些追赶她前进脚步的人们。在实现中华民族伟大复兴的道路上，需要无数攀爬科学技术新高峰的创新人才，为保证全民创新事业的可持续性，让我们在这门关键课程中携手前行。





不了解运动，就不了解自然。



第一章

描述运动的基本概念

- 参考系　时间　质点
- 位置　位移
- 位置变化的快慢与方向——速度
- 实验：用打点计时器测量小车的速度
- 速度变化的快慢与方向——加速度

滑雪场上高速滑行的运动员、草原上飞奔的骏马、原野上风驰的高铁列车、航母上起降的战斗机……它们的共同点是什么？它们都在运动着。

我们处在一个运动的世界里，小到组成物质的基本粒子，大到托起我们的大陆板块，乃至整个地球，整个太阳系，整个宇宙，时时刻刻都处在运动之中。

描述物体的运动就成为我们认识和研究这个世界的开始。

1 参考系 时间 质点

观察思考

图1-1-1中的4幅图都是运动场上的精彩瞬间，拍摄这些照片时运动员都处于运动过程中。请思考并讨论，相应的这4种运动有什么不同？我们怎样描述物体的运动？



（a）运动员驾驶摩托艇劈波斩浪



（b）滑冰运动员终点前冲刺



（c）体操运动员在单杠上的大回环



（d）跳高运动员背越式过杆

▲ **图1-1-1** 运动场上的精彩瞬间

参考系

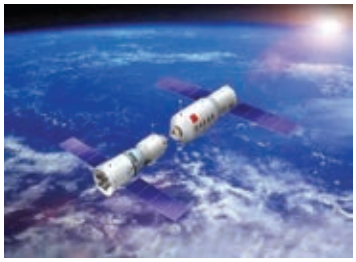
我们在初中已经学过，世界上的一切物体都在运动着，没有绝对静止的物体。我们研究物体的运动时，总要选取某一个物体作为参照，如果一个物体的位置相对于这个物体发生了变化，就说它是运动的； 如果它的位置相对于这个物体没有发生变化，就说它是静止的。这就是说，我们所界定的运动或静止都是相对于这个作为参照

的物体而言的。这个作为参照的物体叫作参照物，它以及与它保持相对静止的物体组成一个系统，叫作**参考系**（reference frame）。

参考系的选择原则上是任意的，只是选择不同的参考系，物体的运动情况可能会有所不同。例如图1-1-1（a）中，运动员驾驶着摩托艇在水面上疾驶，以地面为参考系，他是运动的；如果改为以摩托艇为参考系，则他是静止的。

我们生活在地球上，为研究运动方便起见，更多的是以地面为参考系讨论问题，今后凡没有特别说明的，都默认是以地面为参考系。如果选取其他参考系，需要予以说明。例如图1-1-2中的“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接时都以很大的速度绕地球运动，这时虽然没有明确说出参考系，但我们都知道这是以地面为参考系的。但在飞船中的宇航员眼里，它们对接瞬间“天宫二号”几乎是静止的，这是以他自己（或者是“神舟十一号”飞船）为参考系的，这时“‘天宫二号’是静止的”的说法便不确切了，而必须说“天宫二号”相对于“神舟十一号”飞船是静止的。

你还能说出一些类似的现象吗？



▲ **图1-1-2**　“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接

讨论交流

1. 如图1-1-3所示，一架直升机正在执行救援任务，它悬停在大海中的钻井平台上空，救生员抱着受援者，缆绳将他们提升到直升机上。试分别以飞机驾驶员、救生员和平台上的其他人员为参考系，描述受援者的运动情况。

2. 无风的雨天里，站在路旁的小明与坐在行驶的汽车中的小聪看到雨滴的轨迹有什么不同（图1-1-4）？



▲ **图1-1-3**　直升机空中救援



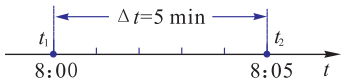
▲ **图1-1-4**　两人看到的雨滴轨迹是不同的

时间和时刻

物体运动的描述离不开时间。在日常生活用语中，“时间”一词有时表示某一个时刻，有时表示一段时间间隔。譬如问“火车什么时间开？”这句话里的“时间”实际上指的是“时刻”；又如问“一节课多长时间？”这句话里的“时间”实际上指的是“时间间隔”。

在物理学中，可以用时间坐标定量描述，即用时间轴上的点表示时刻，用时间轴上的一段长度表示时间（时间间隔）。

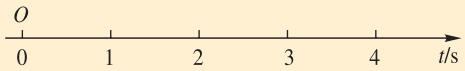
例如，公共汽车8时整从某一个车站开出，8时05分到达下一个车站。其中8时整指的是一个时刻，用 t_1 表示，简写为 $t_1 = 8{:}00$；8时05分指的是另一个时刻，用 t_2 表示，简写为 $t_2 = 8{:}05$。t_1 和 t_2 分别对应于时间轴上的两个点，两时刻之间的时间间隔则对应于时间轴上的一段距离，用 Δt 表示（图1-1-5）。显然 $\Delta t = t_2 - t_1 = 5\text{min}$。



▲ **图1-1-5** 时间轴上的时间和时刻

活动

如图1-1-6所示是一条时间轴，它的原点*O*是我们计时的起点，叫作零时刻，时间间隔的单位为1s。请说明第2s末、第3s初、第3s末、第3s内与前3s内的区别，并在时间轴上标出来。



▲ **图1-1-6** 在时间轴上标出时刻和时间

质点

在初中物理的学习中我们已经知道，物体的空间位置随时间变化的过程称为**机械运动**（mechanical motion）。

按物体上各点的运动情况是否相同进行分类，可以把机械运动分为平动和转动两类。在图1-1-1中，（a）图中的摩托艇驾驶员身体的各部分运动情况都相同，这类运动称为平动。（b）图中的滑冰运动员在终点前冲刺的一小段过程，也可以看作平动。（c）图中体操运动员在单杠上做大回环时，身体的各个部分都绕单杠做圆周运动，但

各部分的圆周半径各不相同，这种运动称为转动。（d）图所示的跳高运动员在做背越式跳高动作时，其运动可以看作是既有平动又有转动的复杂运动。

要描述物体的运动，首先要确定物体某时刻所在的位置，其次是得到其位置随时间变化的规律。

要确定和描述一个点的位置比较容易，但要确定和描述一个物体的位置却非常困难，这是因为一个物体是由无数个点所组成的，它们在空间的位置各不相同。是不是可以把物体抽象成一个点，从而使得问题变得简单呢?

对于做平动的物体（例如驾驶摩托艇的运动员），由于各部分的运动情况都相同，即它们的位置随时间变化的规律都相同，我们可以用其中的某一个点代表其整体的运动。

对于各部分运动情况不同的物体，如果物体的形状和大小对所研究问题的影响可以忽略不计时，也可以把物体抽象为一个点。例如，当我们讨论一列火车在两个车站之间行驶需要多长时间的问题时，完全可以不考虑列车的大小和形状，以及诸如车轮的转动等其他因素，而把它抽象为一个点。又如当我们讨论地球绕太阳公转的周期时，可以不考虑地球的自转以及地面上各种物体的运动，而把地球当作一个点。

这种保留主要因素而忽略次要因素的思维方法通常称为**理想化方法**，而这种从实际物体中抽象出来的、被理想化了的研究对象称为**理想模型**。

物体都是有质量的，当我们把物体抽象为一个点时，它的质量并不能忽略。这就是说，在满足一定条件时，我们可以把物体简化、抽象为一个具有质量的点，称为**质点**（mass point）（图 1-1-7）。这样，我们对某些实际物体运动的描述，就转化为对质点运动的描述，从而使问题得到简化。

质量为什么不可忽略？在运动学问题中，你还看不出来，等后面学习动力学问题时，你就会有深刻体会了。



▲ **图1-1-7**　哪些物体在什么情况下可视为质点

讨论交流

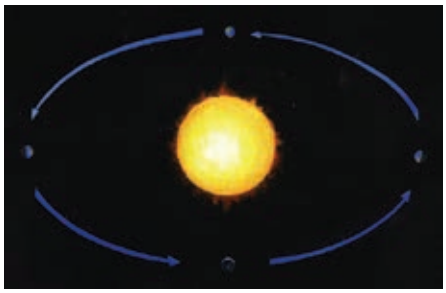
1. 如图1-1-8所示，你认为在研究什么问题时能把地球当作质点？什么情况下不能？为什么？

2. 如果要计算一列火车从上海行驶到北京所需的时间，能否把列车看成一个质点？

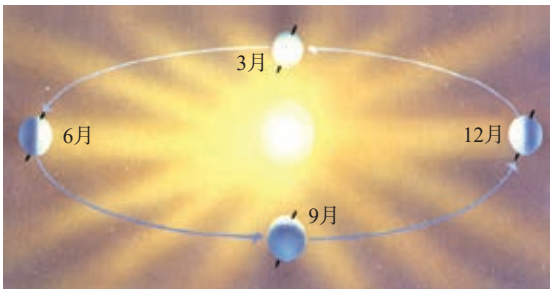
说出你对这两个问题的看法，并说明理由。

在图1-1-8（a）的这个问题中，在研究地球公转的周期时，不必考虑地球的自转以及地球上物体的运动情况，可以把它视为质点；而对图1-1-8（b）所示的问题，由于季节和昼夜长短的变化与不同地区在地球上的位置有关，因此不能将地球视为质点。第二个问题中，由于火车由上海到北京运动的距离比其自身的长度大得多，此时该列火车可视为质点；倘若要研究火车车轮的运动情况，显然就不能将火车视为质点。

可见，一个物体能否看作质点，取决于所研究的问题，而不是单纯看物体实际体积的大小。



（a）研究地球绕太阳公转一周所需的时间



（b）研究地球绕太阳公转一周，地球上不同地区季节和昼夜长短的变化

▲ 图1-1-8

自我评价

1. 关于时间与时刻，下列说法中正确的是（　　）

A. 手表上指针所指的某一位置表示的是时间

B. 作息时间表上的7：40表示的是时刻

C. 2 s内与第2 s内是指同一段时间

D. 第5 s内和第3 s末都是指时刻

2. 下列情况下，物体能够被看成质点的是（　　）

A. 测量一列火车从北京开往上海的时间

B. 乒乓球教练研究对付弧圈球的方法

C. 研究体操运动员在吊环上转体时的动作

D. 描述轮船在大海中航行的方向和快慢

3. 开始时，两列火车平行地停在某一站台上；过了一会儿，甲车内的乘客发现窗外树木在向西运动，乙车内的乘客发现甲车仍没有动。如以地面为参考系，上述事实说明（　　）

A. 甲车向东行驶，乙车不动

B. 乙车向东行驶，甲车不动

C. 甲车向西行驶，乙车向东运动

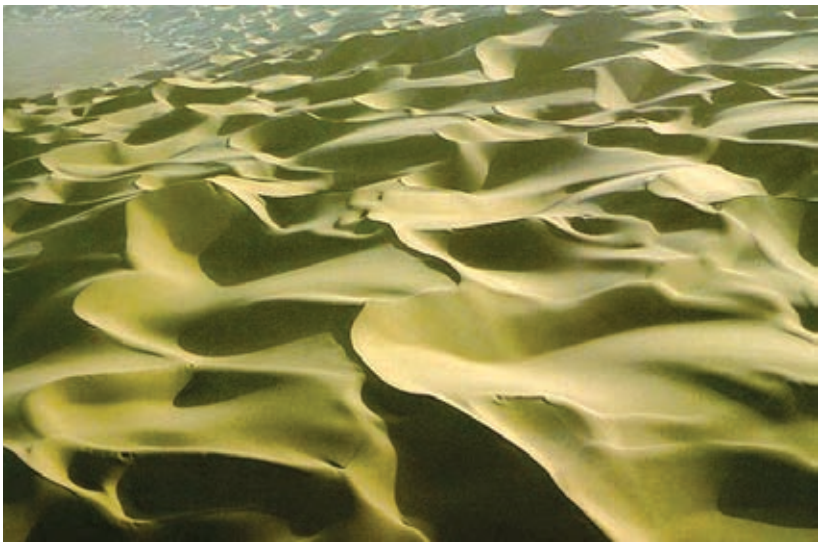
D. 甲、乙两车以相同的速度向东行驶

4. 五代词《浣溪沙》中写道：“满眼风光多闪烁，看山恰似走来迎。仔细看山山不动——是船行。”请你用参考系的知识解释一下，文中的这两句话分别是以什么参考系来描述的。

5. “楚人有涉江者，其剑自舟中坠于水，遂契其舟曰：‘是吾剑之所坠。’舟止，从其所契者入水求之……”这便是《吕氏春秋·察今》中著名的“刻舟求剑”的故事，你认为“楚人”找不到剑的原因是什么？

2　位置　位移

许多穿越塔克拉玛干沙漠（图 1-2-1）的勇士极易迷路，甚至因此而付出生命的代价。他们之所以失败，常常是因为在沙漠中弄不清这样三个问题：我在哪里？我要去的地方在哪里？选哪条路线最佳？现在好了，我们有了北斗卫星导航系统，这些问题都轻松地解决了（发展空间·课外阅览）。



▲ **图 1-2-1**　塔克拉玛干沙漠是我国最大的沙漠。大漠中，远眺不见边际，抬头不见飞鸟，满目沙丘，仿佛置身于巨浪滚滚的大海中，人们把它称为“死亡之海”

这三个问题涉及三个描述物体运动的物理量：位置、位移和路程。

确定质点位置的方法——坐标系

观察思考

对于疾驶在高速公路上的汽车（图 1-2-2）、航行在浩瀚大海中的轮船（图 1-2-3）和翱翔在蔚蓝天空中的飞机（图 1-2-4），我们怎样确定它们在某个时刻的位置呢？



▲ **图1-2-2** 高速公路上的汽车



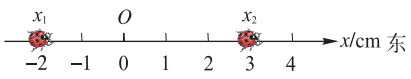
▲ **图1-2-3** 大海中的轮船



▲ **图1-2-4** 蔚蓝天空中的飞机

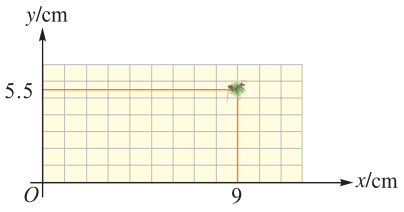
要准确地描述质点的位置，需要建立**坐标系**（coordinate system），即按照规定的方法选取一组有序的数来描述它的位置，这组有序的数就是“坐标”。确定地球表面物体位置常用的坐标系是经纬度，它是固定在地球表面上的二维坐标系。海面上航行的轮船和陆地上行驶的汽车，用经纬度就可准确地定位。而在空中飞行的飞机，要准确地描述其位置，除了经纬度以外，还需要高度的数值，这就是一种空间的三维坐标系。

本章我们研究最简单的运动——沿一条直线的运动，因此只需要使用沿运动方向的一维直线坐标系就可以准确地描述质点的位置。例如，甲虫在沿东西向的直铁丝上向东爬行，若以O为原点沿铁丝建立一个直线坐标系（图 1-2-5），甲虫在任何时刻的位置就可用它在该时刻的位置坐标表示，坐标值$x_1 = -2$ cm和$x_2 = 3$ cm表示它在初、末两时刻的位置。



▲ **图1-2-5**

如果物体在一个平面上运动，就需要建立平面直角坐标系。例如，一只蚂蚁在坐标纸上爬行，若以O为原点建立平面直角坐标系，则该蚂蚁任何时刻的位置即可由位置坐标表示。图1-2-6中蚂蚁该时刻的位置为：x=9 cm，y=5.5 cm。

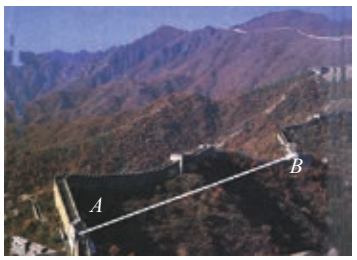


▲ **图1-2-6**

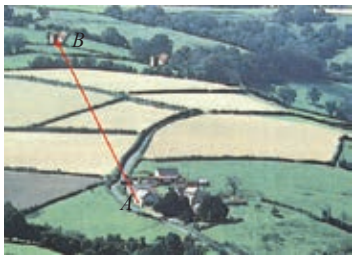
位置的改变——位移

如果物体的位置随时间发生变化，有一种描述运动的方法就是描出物体的轨迹，它是物体运动的路线，该路线的长度就是**路程**（path）。

但在很多情况下，人们关心的是，经过一定时间后物体位置的变化。例如，乘飞机时，乘客关注的焦点是飞机从哪座城市到哪座城市，而不关心飞机飞行的路径。为此，物理学中引进一个描述物体位置变化的物理量，称为**位移**（displacement）。位移常用由初位置指向末位置的有向线段来表示。如图 1-2-7 所示，从 A 位置运动到 B 位置，其位移可以用图中带箭头的线段 AB 来表示。线段的长短表示位移的大小，箭头表示位移的方向。在海洋中航行或在沙漠中行走时，就必须准确地控制好自己的位置变化——位移，否则，你将会迷失方向！



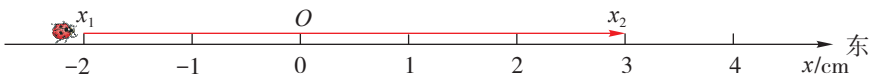
（a）同学甲从长城的垛口 A 到垛口 B 的位移可用图中带箭头的线段表示



（b）同学乙从家（A）到学校（B）的位移可用图中带箭头的线段表示

▲ 图1-2-7

图1-2-5所示的甲虫从$x_1 = -2$ cm爬到$x_2 = 3$ cm处的过程中，位移可用图1-2-8所示的有向线段表示，其大小为$\Delta x = x_2 - x_1 = 3\ \text{cm} - (-2\ \text{cm}) = 5\ \text{cm}$，方向向东。



▲ 图1-2-8

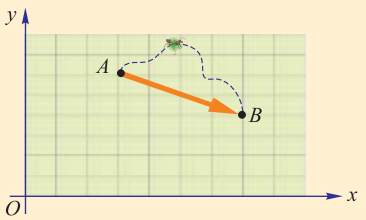
讨论交流

1. 如图1-2-9所示，蚂蚁从A点出发，位移大小为0.5 m，方向为东偏南30°，你能确定蚂蚁的末位置B吗？如果已知蚂蚁从A点出发，路程为0.5 m，你能确定蚂蚁的末位置B吗？能确定它的末位置范围吗？

2. 上面的问题中，假如蚂蚁从A点出发到达终点B，其位移大小为0.5 m，方向为东偏南30°，它爬行的路径可能有多少条？路程与位移大小的关系如何？

3. 若蚂蚁恰好沿半径为R的圆爬行一周，则它的位移与路程各是多少？

请总结位移与路程的区别。



▲ 图1-2-9　蚂蚁运动的位移和路程

例题示范

问题 某汽车在北京长安街上行驶，如图1-2-10所示。它在10: 00经过西单路口，10: 06经过天安门，10: 10到达王府井路口。已知西单路口距天安门1.8 km，王府井路口距天安门1.2 km。求该汽车从西单路口到王府井路口以及它再从王府井路口返回西单路口这两个过程的位移。



▲ **图1-2-10** 长安街示意图

分析 沿长安街建立直线坐标系，坐标轴正方向向东。可以以天安门为坐标原点 O，也可以以这段运动的起点西单路口为坐标原点 O。在坐标轴上标出上述各点的位置坐标，用末位置坐标减去初位置坐标，即可求出位移。

解 **方法 1** 以天安门为位置坐标的原点 O，向东为正方向建立直线坐标系，如图1-2-11 所示，各点的位置坐标为：西单路口 $x_A=-1.8$ km，王府井路口 $x_B=1.2$ km。

从西单路口到王府井路口的位移 $\Delta x= x_B - x_A=1.2\ \text{km} - (-1.8)\ \text{km} = 3.0\ \text{km}$，方向向东。

从王府井路口返回到西单路口的位移 $\Delta x' = x_A - x_B= -1.8\ \text{km} -1.2\ \text{km}= -3.0\ \text{km}$，负号表示方向向西。

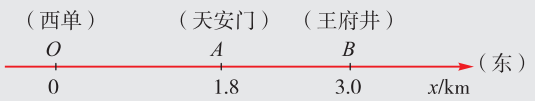
方法2 以西单路口为位置坐标的原点 O，向东为正方向建立直线坐标系，如图1-2-12所示，各点的位置坐标为：天安门 $x_A=1.8$ km，王府井路口 $x_B= 3.0$ km。

从西单路口到王府井路口的位移 $\Delta x = x_B - x_O= 3.0\ \text{km} - 0 = 3.0\ \text{km}$，方向向东。

从王府井路口返回到西单路口的位移 $\Delta x' = x_O - x_B= 0 - 3.0\ \text{km} = -3.0\ \text{km}$，负号表示方向向西。



▲ **图1-2-11** 以天安门为坐标原点建立直线坐标系



▲ **图1-2-12** 以西单为坐标原点建立直线坐标系

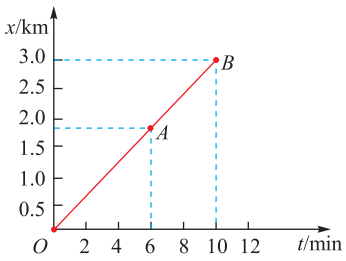
拓展 从上面可以看出，选择不同的位置作为坐标原点，各点的坐标数值是不同

的，但某一过程的位移却与坐标原点的选择无关。在很多情况下，选择所研究的运动过程的起点作为坐标原点比较方便，这时各点的位置坐标 x 与该位置相对于起点的位移 Δx 相等。

位移–时间图像

要研究物体运动的规律，往往要测量较多时刻物体所处的位置。我们可以把这些数据记录在一个直角坐标系上，这样就可以较直观地看出物体运动过程中位置是如何随时间变化的。

例如上面的例题中，题目告诉我们三个不同时刻汽车所处的位置，即“10：00 经过西单路口，10：06 经过天安门，10：10 到达王府井路口”。建立直角坐标系，用纵轴表示位置 x，横轴表示时间 t。其中纵轴的正方向为向东，原点 O 选为西单路口；横轴的原点则选择 10：00，如图 1-2-13 所示。图中的 O 点坐标为（0，0），即表示汽车位于西单路口的时间为 10：00，A 点坐标为（6 min，1.8 km），B 点坐标为（10 min，3.0 km），它们分别表示汽车经过天安门及王府井路口的时间分别为 10：06 及 10：10。把图中各点连接成一条线，就得到了汽车的 x–t 图像。由于我们把运动的起始位置和起始时刻分别作为纵轴和横轴的原点，各点的位置坐标 x 就等于它们相对于起始位置的位移 Δx，因此这样的 x–t 图像我们称为位移 – 时间图像。



▲ **图1-2-13**　汽车的x – t图像

矢量和标量

在物理学中，只有大小没有方向的物理量称为**标量**（scalar），如质量、时间、温度等；像位移那样既有大小又有方向的物理量称为**矢量**（vector），力、速度等也是矢量。矢量可用带有箭头的线段（有向线段）表示，线段的长短表示矢量的大小，箭头的指向表示矢量的方向。

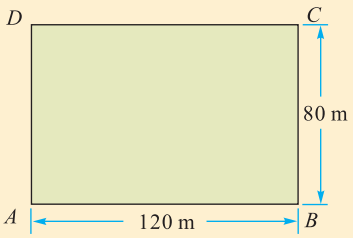
标量加减遵循“算术法则”，但矢量的加减却有所不同，我们将在第三章讨论这个问题。

路程是标量，没有方向。物体在沿一条直线向同一方向运动时，位移的大小与路程数值相等，但不能说路程等于位移，因为位移不仅有大小，还有方向。物体做曲线运动，或者沿一条直线往返运动时，位移的大小与路程不相等。

自我评价

1. 皮球从3 m高处自由落下，被地板弹起后，在1 m高处被接住，则小球在整个过程中通过的路程为_____ m，位移的大小为_____ m，方向_____ 。

2. 如图1-2-14所示，一个长方形的运动场，长为120 m，宽为80 m。学生甲在Δt_1时间内，从A点出发，沿着AB、BC、CD到达D点。他在Δt_1时间内行走的路程是多少？位移的大小是多少？位移的方向如何？学生乙在Δt_2时间内，从A点出发沿着四条边运动一周，回到A点，他在Δt_2时间内的位移是多少？



▲ 图1-2-14

3. 溜冰者在冰面上滑行的路径由两个半圆组成，如图 1-2-15 所示。

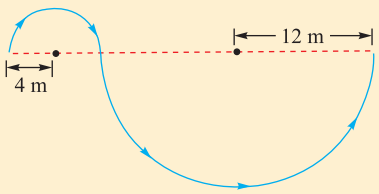
（1）求整个过程中溜冰者的滑行路程；

（2）求整个过程中溜冰者的位移。

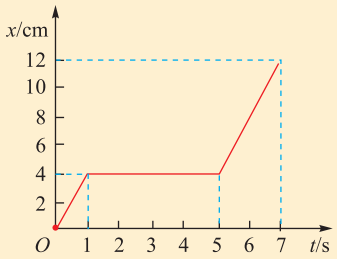
4. 图 1-2-16 是某昆虫沿一条铁丝运动的 x–t 图像。回答下列问题：

（1）该昆虫 7 s 时间内的位移是多少？

（2）该昆虫运动和休息的时间各是多少？



▲ 图1-2-15



▲ 图1-2-16 昆虫的$x-t$图像

发展空间

课外阅览

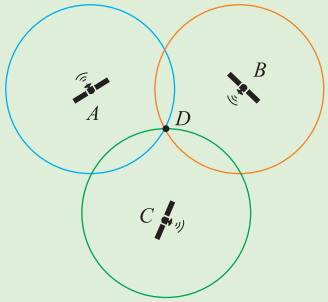
中国北斗卫星导航系统

中国北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）（图 1-2-17）是中国自行研制的全球卫星导航系统。是继美国全球定位系统（GPS）、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统（GLONASS）之后第三个成熟的卫星导航系统。

我们知道，在空间中若已经确定 A、B、C 三点的空间位置，且第四点 D 到上述三点的距离皆已知的情况下，即可以确定 D 的空间位置。因为 A 点位置和 AD 间距离已知，可以推算出 D 点一定位于以 A 为球心、AD 为半径的圆球表面，按照此方法又可以得到以 B、C 为球心的另两个圆球，即 D 点一定在这三个圆球的交汇点上，这就是卫星定位的基本原理，如图 1-2-18 所示。据此原理，根据 3 颗卫星到用户终端的距离信息，就可以列出 3 个方程得到用户终端的位置信息，即理论上使用 3 颗卫星就可实现空间定位。



▲ **图1-2-17**　北斗卫星导航系统的标志



▲ **图1-2-18**　卫星定位

北斗卫星导航系统空间段由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，中国计划到 2020 年左右，建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。目前，北斗卫星导航系统已获得国际海事组织的认可。

走向社会

根据你所在地区的地图，按照比例在一张纸上画一幅地图，在地图上标明你从家到学校的路径，并画出你从家到学校的位移。比较路程与位移的区别。

3　位置变化的快慢与方向——速度

百米赛跑是奥运会田径赛场上最短的直道项目，被称为“飞人大战”（图 1-3-1）。它根据什么确定选手的名次呢？百米赛跑世界纪录保持者为什么被称为“世界上跑得最快的人”？



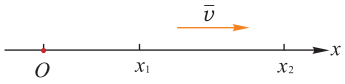
▲ **图1-3-1**　“飞人大战”

平均速度

在百米赛跑起点线前，选手们一字排开，发令枪响，选手们开始运动，运动方向相同，位移Δx都等于100 m，看谁所用的时间Δt最短，谁就是优胜者。

我们把物体的位移Δx与发生这段位移所用时间Δt的比叫作这段时间内的**平均速度**（average velocity），它的方向就是物体位移的方向。

如图1-3-2所示，物体沿直线坐标系Ox做直线运动。在t_1时刻，物体的坐标为x_1；在t_2时刻，物体的坐标为x_2。则这段时间的平均速度为



▲ 图1-3-2

$$\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$$

平均速度的常用单位是米每秒和千米每时，符号是m/s和km/h。

平均速度中的“平均”二字，一般不能省略，并且还要说明是哪一段时间（或说哪一段位移）内的平均速度。

瞬时速度

公式$\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$求得的是$\Delta t=t_2-t_1$这段时间（或者说$\Delta x=x_2-x_1$这段位移）内的平均速度。一般来说，如果这段时间内的速度是变化的，$\bar{v}$与起始时刻t_1（或起始位置x_1）的速度v_1不相等。所取的时间间隔Δt越短，$\bar{v}$就越接近v_1，当我们所取的时间间隔Δt非常非常短时，则可以认为$\bar{v}=v_1$。

像上面提到的v_1这样，某时刻（或经过某位置时）的速度称为**瞬时速度**（instantaneous velocity）。

瞬时速度中的“瞬时”二字，我们常常将它省略，简称为速度。诸如初速度、末速度、中间时刻的速度、速度的大小、速度的方向、速度在变化……其中的“速度”都是指瞬时速度。我们常说“描述物体运动快慢和方向的物理量是速度”，这里的速度也是指瞬时速度。

有些情况下，更关注的是速度的大小，而不关心速度的方向。瞬时速度的大小称为**速率**（speed）。汽车驾驶室

里的速度表（图 1-3-3），其实是“速率表”，它指示的是瞬时速度的大小——速率的数值。道路上标示的限速牌，限制的也是速率，如图 1-3-4 所示是立在居民区入口的限速牌，它提醒司机车辆的速度大小应限制在 10 km/h 以内。



▲ 图1-3-3　速度表



▲ 图1-3-4　限速标志牌

讨论交流

既然速度（指瞬时速度）的大小称为速率，那么，平均速度的大小是否可以称为平均速率呢？

在初中我们接触过的“路程与时间之比叫作速度”的说法并不确切，路程与时间之比实际上是平均速率，它粗略地表示这一过程运动的快慢，不涉及方向。显然，一般情况下平均速度的大小不等于平均速率。

速度的测量

实验室及生活中测量速度的方法很多，但其原理基本上都是测量某一段时间 Δt 内的位移 Δx，则 Δx 与 Δt 的比就是速度。当然，这是 Δt 这段时间的平均速度，即 $\overline{v}=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$。

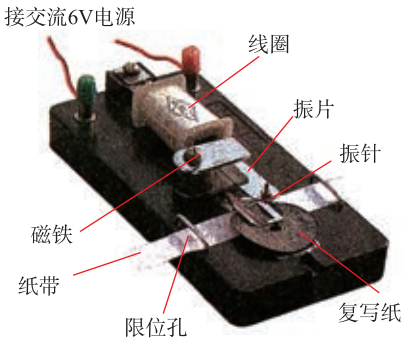
如果测量过程足够短，即 Δt 足够小，则 $\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ 就可以认为是测量时刻的瞬时速度。

下面介绍两种实验室中常用的测量速度的方法。

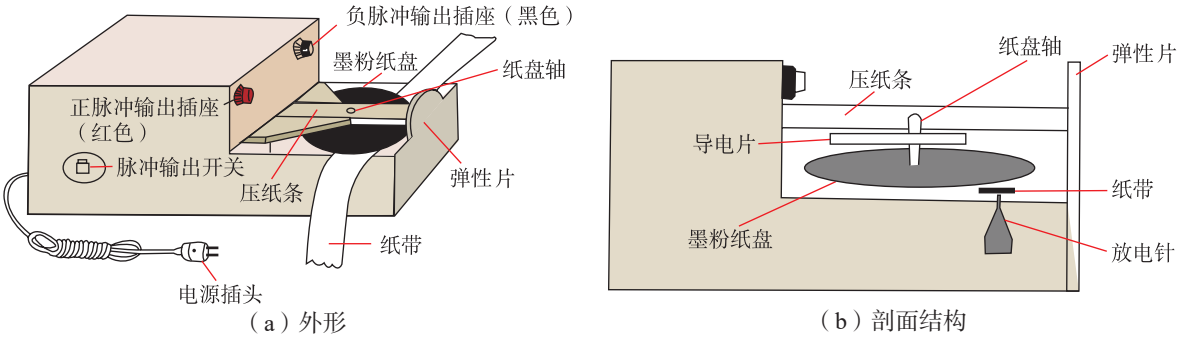
1. 使用打点计时器测速度

打点计时器是一种每隔相同的较短时间（例如 0.02 s）

通过打点记录一次做直线运动的物体位置的仪器。目前中学实验室里使用的打点计时器有两种：电磁打点计时器和电火花打点计时器。前者如图 1-3-5 所示，它是利用电磁作用带动振针振动，从而在纸带上打出一系列点迹，后者如图 1-3-6 所示，它与前者的不同在于没有振针，是靠电火花在纸带上留下一系列印迹的。我们实验室使用的这两种打点计时器的打点频率都是 50 Hz，即每隔 0.02 s 打一个点。测量出某两个点迹间的距离 Δx，除以相应的时间间隔 Δt 即得到这段时间内的平均速度，如果这段时间很短，所得的结果也可认为是瞬时速度。



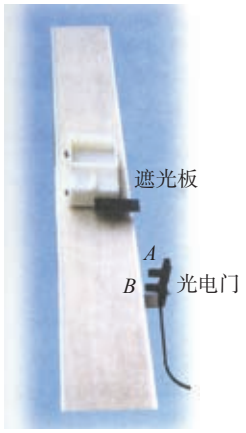
▲ **图1-3-5** 电磁打点计时器



▲ **图1-3-6** 电火花打点计时器

2. 用光电门测速度

如图 1-3-7 所示，以运动小车为研究对象，在小车上固定一块窄窄的遮光板，在小车经过的轨道上某处固定一个光电门。光电门的 A 为发光管、B 为接收管，当小车经过时，遮光板阻挡了射到 B 管上的光线，与光电门相连的计时器启动开始计时；而当遮光板离开，光线重新照射到 B 管时，计时器停止。由于遮光板很窄（例如 5 mm），遮挡光线的时间 Δt 足够短，遮光板的宽度 Δx 与相应的时间间隔 Δt 的比就可以认为是小车经过光电门时的瞬时速度。

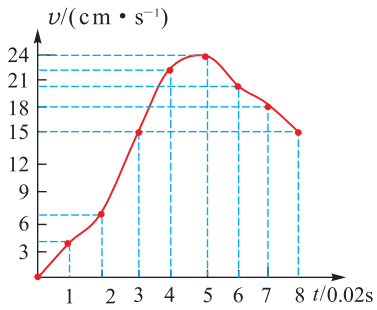


▲ **图1-3-7** 测量瞬时速度大小的装置

速度–时间图像

如果已经测得物体多个不同时刻的速度，可以用速度–时间图像把物体的速度随时间变化的情况直观地表示出来。

在直角坐标系中，用纵轴表示速度v，用横轴表示时间t，把测量所得的各数据（速度v及相应的时间 t 的数值）标注在坐标系中，再把各数据点连接成一条光滑的曲线，即是速度–时间图像，简称 v–t 图像。图1-3-8是根据下列表格中的数据绘制的 v–t 图像。



▲ **图1-3-8**　v–t 图像的绘制

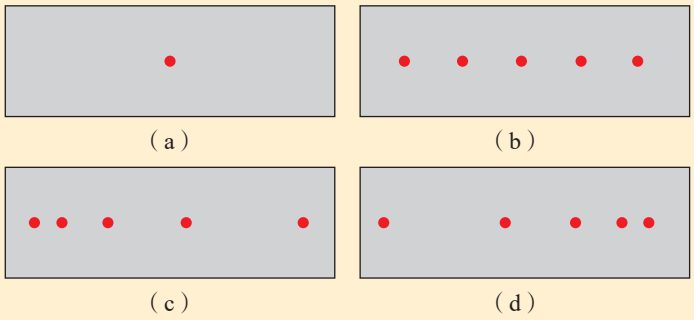
序　号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
速度 v/（$m \cdot s^{-1}$）	0	0.04	0.07	0.15	0.22	0.24	0.20	0.18	0.15
时刻t/s	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16

不难看出，该图像是一条曲线，说明该物体的运动是变速运动，即速度是随时间变化的，开始阶段速度逐渐增大，而后面阶段速度逐渐减小。

自我评价

1. 北京市东北郊有一条供机车车辆试验用的环形铁道，铁轨呈封闭的正圆形，半径为 r。如果某机车在该环形铁道上绕行一周用时为 t。它绕行一周的过程中的平均速度和平均速率各是多少？其中哪一个可以粗略地描述它位置改变的快慢？

2. 图 1-3-9 是根据频闪照相得到的四幅质点运动图（每照一次相的时间间隔为 Δt），由每一副图中点的分布情况，分别判断各质点的速度是如何变化的。



▲ **图1-3-9**

3. 在运动小车上固定一个宽度为 1 cm 的遮光板，它通过光电门时，与之相连的计时器记录下来的时间是 4.0 ms，求小车经过光电门时的速度大小。这个速度是平均速度还是瞬时速度？为什么？

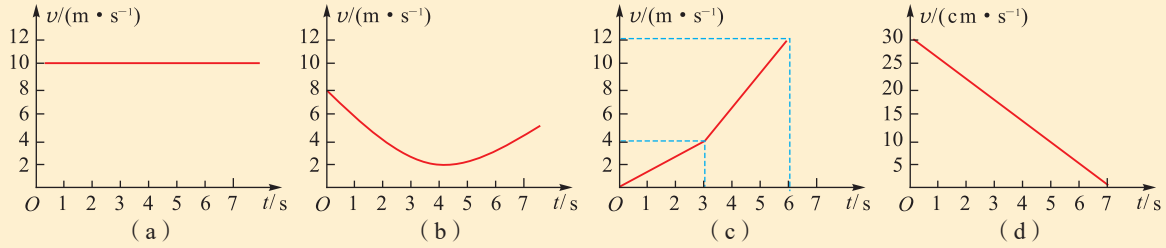
4. 图 1-3-10 的四幅图是不同物体做直线运动的v–t 图像，回答下面的问题：

（1）图（a）所示的物体速度是多大？它 5 s 内的位移是多大？

（2）图（b）中物体的初速度是多少？速度的最小值是多少？它出现在哪个时刻？

（3）图（c）中物体的速度在前 3 s 和第二个 3 s 两个时间段内，哪一个的速度变化量较大？

（4）图（d）中物体的初速度是多少？哪个时刻物体的速度是初速度的一半？



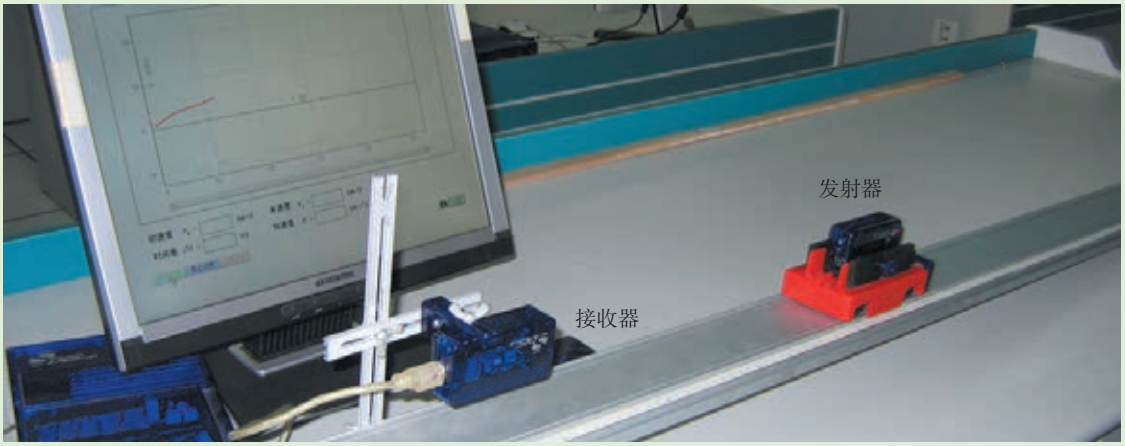
▲ **图1-3-10** 不同的v–t图像

发展空间

实验室

用位移传感器测速度

位移传感器由发射器和接收器两部分构成，其中发射器固定在运动小车上，而接收器则固定在运动小车的正前方某处，如图1-3-11所示。发射器每隔一段很短的时间Δt，就同时发射一组短促的红外线信号和超声波信号（信号持续的时间远小于Δt）。红外线以光速传播，可以忽略它传播所需的时间，而超声波以声速传播，接收器接收到的光信号与超声波信号的时间差t_1可以认为就是声波从运动小车到接收器所需的时间，用它乘以声速$v_{声}$就是小车离接收器的距离x_1。间隔很短的时间Δt后，发射器又发射第二组信号，同样可以得到小车离接收器的距离x_2；……由此每个Δt时间内的平均速度都可求出，即$\bar{v}_1=\frac{x_2-x_1}{\Delta t}$，$\bar{v}_2=\frac{x_3-x_2}{\Delta t}$，……由于$\Delta t$非常小（例如0.02 s或更小），因此这个平均速度可以认为就是该时刻的瞬时速度。



▲ **图1-3-11** 用位移传感器测速度

4　实验：用打点计时器测量小车的速度

在上一节我们了解了测量速度的几种方法。那么，具体如何用打点计时器测量物体的运动速度呢？

观察思考

观察电磁打点计时器（或电火花打点计时器），想一想：打点计时器使用什么电源？纸带放置的正确位置在哪里？

1. 实验设计

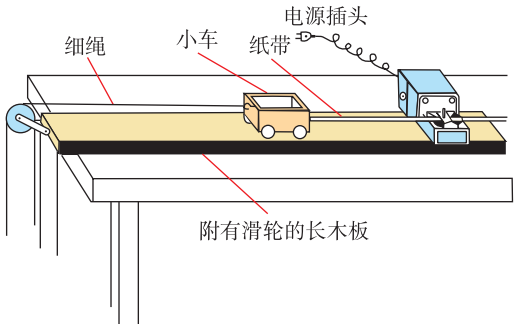
使小车拉动纸带运动，用打点计时器按相同的时间间隔在纸带上打出一系列点迹，这些点迹对应着各时刻小车的位置。通过测量各个时刻小车的位置，算出相邻时刻间的位移，我们就可以算出小车的速度了。

◎实验器材

小车、附有滑轮的长木板、打点计时器、纸带、细绳、刻度尺、坐标纸。

2. 实验操作

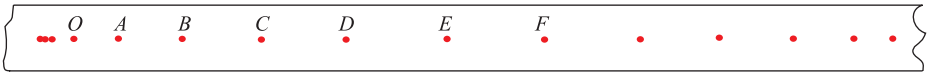
（1）安装实验器材。注意把打点计时器固定在长木板没有滑轮的一边，纸带前端固定在小车后部，然后穿过打点计时器，小车前端的细绳穿过定滑轮垂下，如图 1-4-1 所示。



▲ **图1-4-1**　实验装置

（2）使小车在木板上保持静止，并靠近打点计时器，开启打点计时器的电源开关。打点计时器稳定工作后，用手拉动细绳，使小车沿木板做直线运动。待小车运动约一半距离时，松开手，使小车依靠惯性继续运动，直到左端。纸带上会留下一系列点迹。

小组中的每一位同学都亲自动手拉动小车运动，并打出一条比较清晰的纸带，如图 1-4-2 所示。



▲ **图1-4-2** 纸带上的点迹

3. 处理数据

（1）在纸带上选取一段点迹清晰并且没有重叠的区间，把第 1 个点标为 O，而后依次标为 A、B、C、D……

（2）用刻度尺测量各点的位置（一般使刻度尺的零刻度线与 O 点对齐，即 O 点的位置记为 0），并记录在表 1 中。

表1

计数点序号	O	A	B	C	D	E	…
计数点对应的时刻/s	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	
计数点对应的位置坐标x/m							

（3）计算各相邻计时点间的位移 x_{OA}、x_{AB}、x_{BC}、x_{CD}、x_{DE}……并记录在表 2 中。

（4）计算各段的平均速度 $\overline{v}_{OA}$、$\overline{v}_{AB}$、$\overline{v}_{BC}$、$\overline{v}_{CD}$、$\overline{v}_{DE}$、$\overline{v}_{EF}$……并记录在表 2 中。

表2

相邻计时点间的位移Δx/m	x_{OA}	x_{AB}	x_{BC}	x_{CD}	x_{DE}	x_{EF}	…
相邻计时点间的平均速度v/（$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$）	$\overline{v}_{OA}$	$\overline{v}_{AB}$	$\overline{v}_{BC}$	$\overline{v}_{CD}$	$\overline{v}_{DE}$	$\overline{v}_{EF}$	…



▲ **图1-4-3** 绘制v–t图像

4. 绘制v –t 图像

把相邻计时点间的平均速度当作起始点的瞬时速度（例如把 $\overline{v}_{OA}$ 当作 v_O），在图 1-4-3 所示的坐标纸上绘制 v–t 图像。

讨论交流

1. 为什么我们可以把相邻计时点间的平均速度当作起始点的瞬时速度？

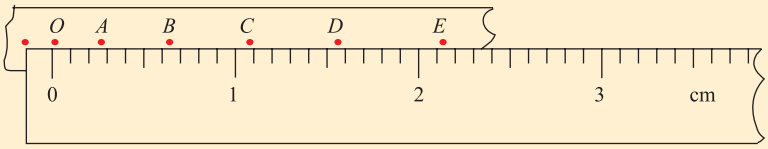
2. 观察你绘制的v–t图像，你怎样描述小车在这段过程中的运动？

自我评价

1. 中学实验室使用的打点计时器使用的电源是直流还是交流？电压是多少？它的打点时间间隔是多少？

2. 使用打点计时器测量运动小车速度的实验中，是先开启打点计时器的电源后使小车开始运动，还是先让小车开始运动再开启打点计时器的电源？为什么？

3. 如图 1-4-4 所示是某次实验打出的一条纸带的一部分。



▲ **图1-4-4**　测量纸带上点迹的位置

（1）读出各计时点的位置坐标，填写在下面的表格中。

（2）计算相邻计时点间的位移以及相应的平均速度，填写在下面的表格中。

（3）各段的平均速度当作起始点的瞬时速度，描点并绘制出v –t 图像。

计时点序号	O	A	B	C	D	E
计时点对应的时刻 t/s	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
计时点的位置坐标 x/m						
相邻计时点间的位移Δx/m						
相邻计时点间的平均速度v/（$m \cdot s^{-1}$）						

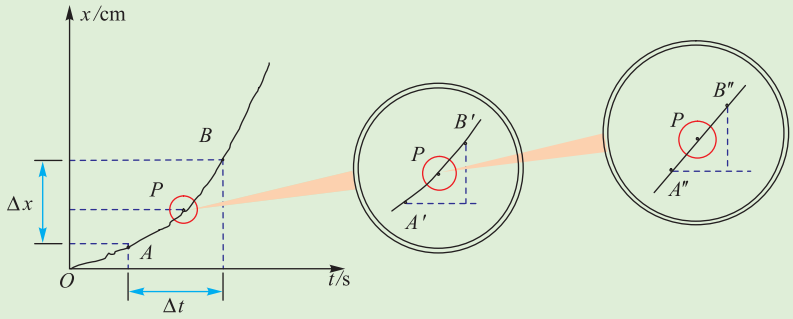
（4）OE 间的平均速度与 OA 间的平均速度，二者谁更接近 O 点的瞬时速度？为什么？

发展空间

课外阅览

用 x–t 图像理解瞬时速度的概念

我们根据变速运动实验获得的位移、时间数据可以作出x – t图像，如图1-4-5所示。我



▲ 图1-4-5

们可以用A、B两点之间的平均速度大致来描述P点的运动快慢。如果取更接近P点的两点A'和B'，运动的图线接近于直线，表明物体的运动接近匀速。如果取非常非常接近P点的两点A''和B''，则运动的图线几乎就是一条直线了，这表明可以把$A''B''$段的运动看成是匀速直线运动，由此求出的平均速度可以认为是P点的瞬时速度。

5 速度变化的快慢与方向——加速度

在日常生活中，我们常常会说走了多“远”，大家知道这是指路程或位移。也常常会说走得多“快”，我们知道这是指速度。有时还会说“越走越快”或“越走越慢”，这是指速度随时间的变化。对于这种情况，应当用一个什么样的物理量来描述它变化的快慢呢？

讨论交流

观察图1-5-1至图1-5-4，各物体都在做直线运动，其运动的速度都在发生变化，但速度变化的快慢不同。怎样比较速度随时间变化的快慢呢？



▲ **图1-5-1**　万吨货轮起航，10 s内速度增到0.2 m/s



▲ **图1-5-2**　火箭发射时，10 s内速度能增到约10^2 m/s



▲ **图1-5-3**　以8 m/s的速度飞行的蜻蜓，能在0.7 s内停下来



▲ **图1-5-4**　以8 m/s的速度行驶的汽车，急刹车时能在2.5 s内停下来

加速度

如图1-5-5所示，一辆汽车做直线运动，沿汽车运动方向建立直线坐标系Ox。如果汽车在t_1时刻速度为v_1，t_2时刻速度为v_2，在$\Delta t = t_2 - t_1$这段时间内，速度的改变量$\Delta v = v_2 - v_1$，这段时间内速度变化的快慢可用Δv与Δt的比表示

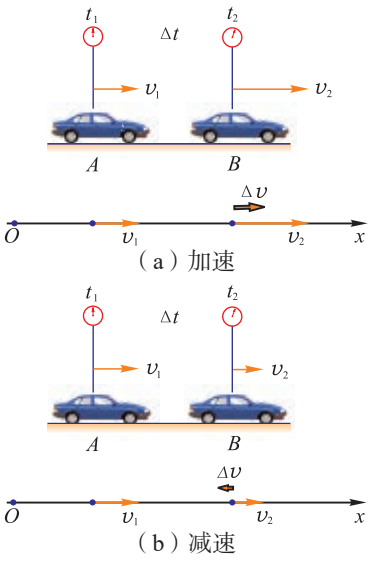
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

图1-5-2中的火箭从静止加速到10^2 m/s，耗时10 s，其Δv与Δt的比为

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{10^2\ \text{m/s} - 0}{10\ \text{s} - 0} = 10\ \text{m/s}^2$$

这个结果表明，火箭运动平均在1 s内速度增加10 m/s。

图1-5-4中的小汽车从8 m/s刹车到静止的过程耗时2.5 s，其Δv与Δt的比为



▲ **图1-5-5**　汽车做变速直线运动

$$\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{0-8\ \text{m/s}}{2.5\ \text{s}-0}=-3.2\ \text{m/s}^2$$

这个结果表明，小汽车平均在1 s内速度减少3.2 m/s。显然，火箭速度的变化要比一般的小汽车快得多。

物理学中，用速度的改变量Δv与发生这一改变所用时间Δt的比定量地描述物体速度变化的快慢和方向，并将它定义为**加速度**（acceleration），用公式表示为

$$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

上式中，Δv为速度的变化量，Δt为发生这个变化所需的时间。如果速度的单位取米每秒（m/s），时间的单位取秒（s），则加速度的单位为米每二次方秒（m/s^2）。如果物体保持2 m/s^2的加速度，它的速度在每秒钟内变化2 m/s。

讨论交流

你认为速度v、速度变化量Δv与加速度a有什么区别和联系？

下表提供了一些物体运动的加速度的数量级。

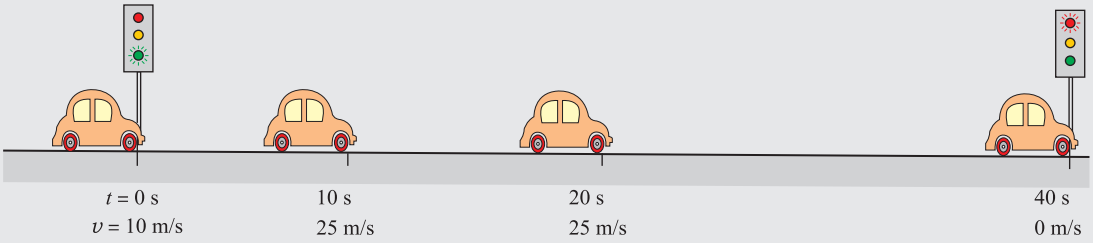
加速度的数量级（单位：m/s^2）

高速离心机中的物体	10^5
子弹在枪膛中运动期间	10^4
弓箭射出	10^3
火箭升空	10^2
地球上的自由落体运动、汽车刹车、飞机着陆	10^1
电梯起步	10^0
列车开出	10^{-1}
万吨货轮起航	10^{-2}
地球绕太阳公转	10^{-3}
太阳绕银河系中心公转	10^{-10}

关于物体做圆周运动的加速度，我们将在《物理 必修 第二册》中学习。

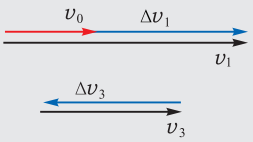
例题示范

问题　图1-5-6标出了一辆汽车在一段直路的两组交通灯之间行驶过程中几个时刻的速度。在三个时间段里，汽车的运动有什么特点？并求出各段的加速度。



▲ **图1-5-6**　汽车在40 s内的速度变化情况

分析　第一时间段（$\Delta t_1 = 10\,\text{s} - 0 = 10\,\text{s}$），汽车的速度增加（$\Delta v_1 = 25\,\text{m/s} - 10\,\text{m/s} = 15\,\text{m/s}$）；第二时间段（$\Delta t_2 = 20\,\text{s} - 10\,\text{s} = 10\,\text{s}$），汽车的速度保持不变（$\Delta v_2 = 25\,\text{m/s} - 25\,\text{m/s} = 0$）；第三时间段（$\Delta t_3 = 40\,\text{s} - 20\,\text{s} = 20\,\text{s}$），汽车的速度减小（$\Delta v_3 = 0 - 25\,\text{m/s} = -25\,\text{m/s}$）。第一时间段和第三时间段内汽车的初速度、末速度及速度变化量的示意图如图 1-5-7 所示。



▲ **图1-5-7**　第一时间段和第三时间段内速度变化的矢量示意图

解　（1）在 0 s → 10 s 时间段内，汽车的速度由 10 m/s 增至 25 m/s，对应的加速度为

$$a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} = \frac{15\,\text{m/s}}{10\,\text{s}} = 1.5\,\text{m/s}^2$$

（2）在 10 s → 20 s 时间段内，汽车匀速运动，速度没有发生变化，对应的加速度为

$$a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2} = \frac{25\,\text{m/s} - 25\,\text{m/s}}{10\,\text{s}} = 0$$

（3）在 20 s → 40 s 时间段内，汽车的速度由 25 m/s 减至 0，对应的加速度为

$$a_3 = \frac{\Delta v_3}{\Delta t_3} = \frac{0 - 25\,\text{m/s}}{20\,\text{s}} = -1.25\,\text{m/s}^2$$

在（1）中，加速度与初速度都为正值，表示二者方向相同，物体做加速运动。（3）中，加速度为负值，而初速度为正值，表示二者方向相反，物体做减速运动。

拓展　加速度不仅有大小，而且有方向，是一个矢量，它的方向由速度变化量的方向来决定（图 1-5-8）。对于在运动中速度方向不变的物体来说，如果末速度大于初速度，则加速度与初速度方向相同，初速度若为正值，则加速度也为正值；如果末速度小于初速度，则加速度与初速度方向相反，初速度若为正值，则加速度为负值。当运动方向改变时物体也具有加速度，关于这个问题，我们将在《物

理 必修 第二册》中讨论。



（a）短跑运动员起跑时加速度与运动方向一致



（b）汽车刹车时的加速度与运动方向相反



（c）过山车上的人也具有加速度

▲ 图1-5-8

加速度的测量

通过实验测量运动物体的加速度，有很多种方法，但其原理基本上是通过测量一段时间Δt内的速度变化量Δv，则$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$。下面介绍两种中学实验室中常用的测量加速度的方法。

1. 用打点计时器测加速度

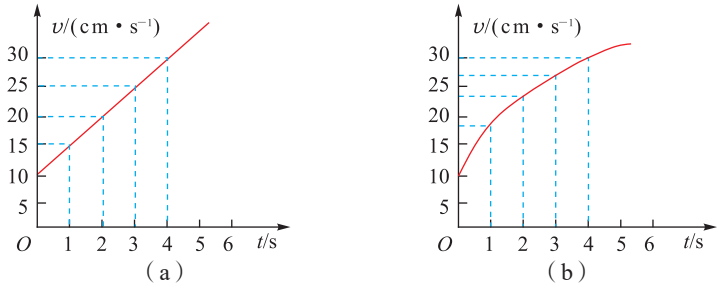
打点计时器可以相隔相同的较短时间在纸带上打出一系列点迹。通过前面的学习我们已经知道，测量一段时间Δt内的位移Δx，Δx与Δt的比就是这段时间内的平均速度，只要Δt足够小，就可以认为它是这段时间内某时刻的瞬时速度。利用纸带上的点迹，如果求得了两个不同时刻t_1和t_2的速度v_1和v_2，则加速度$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}$。

2. 用光电门测加速度

在相近的位置固定两个光电门，分别测量出小车通过这两个光电门时的瞬时速度v_1和v_2，以及在两个光电门间的运动时间ΔT，则这段时间内有$a=\frac{\Delta v}{\Delta T}=\frac{v_2-v_1}{\Delta T}$。只要两个光电门距离足够小，则$\Delta T$足够短，就可以认为小车在$\Delta T$这段时间内保持以这个加速度运动。

速度–时间图像与加速度

如图1-5-9所示是做直线运动的两个物体在一段运动过程中的$v-t$图像。



▲ **图1-5-9**　不同运动物体的v–t图像

讨论交流

这两个图像有什么共同点？有哪些不同？你能从中引申出什么结论？

这两个物体的初速度都是10 cm/s，4 s末的速度都是30 cm/s，前4s时间内的速度变化量都是20 cm/s。不同在于：（a）图是一条直线，而（b）图是一条曲线。

不难看出，（a）图所示的物体的速度每隔相同时间增加的数值相等，即每1s时间速度增加5 cm/s。而（b）图所示的物体的速度每隔相同时间增加的数值不相等。我们把前者称为匀变速运动，后者则称为非匀变速运动。

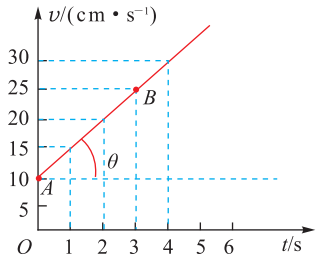
要求出（a）图中物体运动的加速度a，可以任意确定图像的两点，分别读出它们的速度坐标v_1、v_2及时间坐标t_1、t_2，例如取图1-5-10所示的A、B两点，则加速度

$$a=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{25\ \text{cm/s}-10\ \text{cm/s}}{3\ \text{s}-0}=5\ \text{cm/s}^2$$

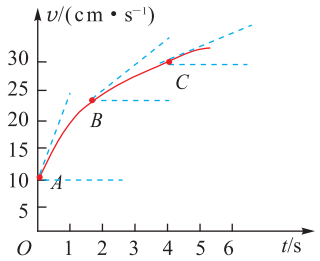
由数学知识可知，在如图1-5-9（a）所示的$v-t$图像中，加速度的数值等于该图像的斜率。

对于图1-5-9（b）所示的曲线，它每一点的切线的斜率各不相同，即不同的时刻加速度的数值不同。如图1-5-11所示，图中A、B、C三点的切线方向不同，其斜率不同，即加速度不同。

“匀变速”中的“匀”是指速度变化的快慢和方向都不变，即加速度不变。



▲ 图1-5-10 从图像求匀变速运动的加速度



▲ 图1-5-11 各点切线的斜率不同

自我评价

1. 下列说法中正确的是（　　）

A. 物体速度变化的方向一定与其初始速度的方向一致

B. 物体速度变化的方向一定与其加速度的方向一致

C. 物体的加速度与速度同向时，其速度一定在增加

D. 物体的加速度为正值时，其速度一定在增加

2. 枪管内的子弹在某一时刻的速度是 100 m/s，经过 0.0015 s，速度增加到 700 m/s，求此过程中子弹的加速度。

3. 猎豹由静止开始起跑，经过 2 s 速度达到 70 km/h，猎豹的加速度是多大？

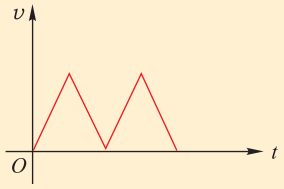
4. 某物体做直线运动的 $v-t$ 图像如图 1-5-12 所示，则该物体（　　）

A. 做往复运动

B. 做匀速直线运动

C. 沿某一方向做直线运动

D. 以上说法均不正确



▲ 图1-5-12

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 人类从蒙昧走向现代文明，与物理学的发展密不可分，而真正意义上的物理学研究，是从伽利略对运动的研究开始的，我们的高中物理也首先从运动学开始。

2. 自然界实际发生的过程非常复杂，我们的研究总是要忽略很多次要因素而保留主要因素，从而使问题得到简化。建立理想模型就是这种思想的体现，质点是我们建立的第一个理想模型。

3. 定义一些物理概念是定量化研究的前提，为了精确地描述物体的运动，我们定义了位置、位移、速度、加速度等物理概念。

4. 物体的运动，可以用公式表述，也可以用图像形象地描述。它们将贯穿于我们物理学习的始终。

• 自主小结

1. 描述物体的运动，首先要确定参考系。一般情况下，凡没有明确说明参考系的，都默认是以地面为参考系。

2. 建立质点这个理想模型，是研究物体运动规律所必需的。一个物体是否可以抽象为质点，由所研究问题的性质决定。

3. 对于做直线运动的物体，位置可以用直线坐标表示。

4. 位置的变化是位移，即$\Delta x=x_2-x_1$，它是矢量。路程是物体运动路径的长度，它是标量。

5. 位移 Δx 与相应时间 Δt 之比是平均速度，在物体运动方向不变的情况下，平均速度可以粗略地描述物体运动的快慢。在 Δt 很短的条件下，平均速度可以认为是该时刻的瞬时速度，它是描述物体位置变化快慢与方向的物理量（矢量）。瞬时速度的大小称为速率，是标量。

6. 速度的变化Δv与相应时间Δt 之比是加速度，它是描述物体速度变化快慢与方向的物理量，也是矢量。

7. 位移–时间图像（x–t图像）与速度–时间图像（v–t 图像）是形象地描述物体运动规律的工具。x–t 图像的斜率等于速度，v–t 图像的斜率等于加速度。

• 相互交流

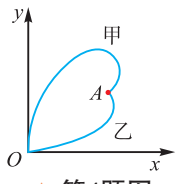
1. 通过本章的学习，你在科学思维方法上有哪些收获？

2. 本章学习了哪四个描述物体运动的矢量？它们之间是怎样的关系？

3. 用图像描述某个物理量随时间变化的情况有什么好处？

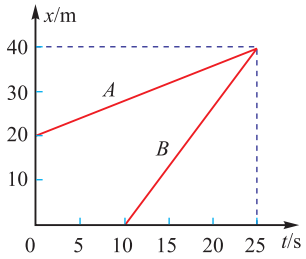
本章复习题

1. 关于质点，下列说法中正确的是（　　）
   A. 体积很小的物体一定能看作质点
   B. 质量很小的物体一定能看作质点
   C. 研究地球运动时，也可能把地球看作质点
   D. 研究火车运动时，一定不能把火车看作质点
2. “抬头望明月，月在云中行”，这时选取的参考系是（　　）
   A. 月亮
   B. 云
   C. 地面
   D. 观察者自己
3. 对沿直线运动的物体，下列说法中正确的是（　　）
   A. 若物体沿直线一直向某一方向（单方向）运动，则物体运动的路程就是位移
   B. 若物体运动的路程不为零，则位移也一定不为零
   C. 若物体的位移为零，则通过的路程也一定为零
   D. 若物体通过的路程不为零，但位移有可能为零
4. 甲、乙两小分队进行代号为“猎狐”的军事演习，指挥部通过现代通信设备，在荧屏上观察到小分队的行军路线如图所示。两小分队同时由同地 O 点出发，最后同时捕“狐”于 A 点，下列说法正确的有（　　）



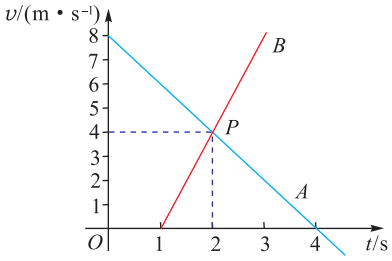
▲ 第4题图

   A. 小分队行军路程 $s_{甲} > s_{乙}$
   B. 小分队平均速度 $\overline{v}_{甲} = \overline{v}_{乙}$
   C. $y-x$ 图像是速度 – 时间（$v-t$）图像
   D. $y-x$ 图像是位移 – 时间（$x-t$）图像
5. 如图所示是做直线运动的 A、B 两物体的位移 – 时间图像，由图像可知（　　）



▲ 第5题图

   A. B 开始运动时，两物体相距 20 m
   B. 在 0 ～ 10 s 这段时间内，物体间的距离逐渐变大
   C. 在 10 ～ 25 s 这段时间内，物体间的距离逐渐变小
   D. 两物体在 10 s 时相距最远，在 25 s 时两物体相遇
6. 如图所示是 A、B 两物体做直线运动的 $v-t$ 图像，试对图像进行分析，并回答下列问题。
   （1）A 的图像与 v 轴交点的意义是什么？
   （2）A、B 两图像与 t 轴交点的意义是什么？
   （3）A、B 两图像交点 P 的意义是什么？



▲ 第6题图

7. 为测量光滑直导轨上小车的加速度，小车安装了宽度为 3.0 cm 的遮光板（图 1-3-7）。小车在牵引力的作用下先后通过两个光电门，配套的数字毫秒计记录了遮光板通过第一个光电门的时间为 $\Delta t_1 = 0.29$ s，通过第二个光电门的时间为 $\Delta t_2 = 0.11$ s，遮光板从开始遮住第一个光电门到开始遮住第二个光电门的时间为 $\Delta t = 3.57$ s，求小车的加速度的大小。



第二章

匀变速直线运动的规律

主题一　研究匀变速直线运动的规律

- 匀变速直线运动的研究
- 匀变速直线运动速度与时间的关系
- 匀变速直线运动位移与时间的关系

主题二　匀变速直线运动规律的应用

- 匀变速直线运动规律的应用
- 自由落体运动

斗转星移，风起云涌，自然界的一切都在永不停息地运动。物体的运动纷繁多样，形态各异，我们总是从最简单的情形开始，而后再慢慢地深入认识复杂的现象。在初中我们已经研究了一种最简单的运动——匀速直线运动，现在，我们要深入一步，研究变速直线运动，其中最简单的是匀变速直线运动。

充分利用各种工具，动手进行探究，我们可以归纳总结出匀变速直线运动的规律，即它的速度与位置是如何随时间变化的。

1 匀变速直线运动的研究

暑假的一天，小聪随父母自驾车外出旅行。当汽车行驶在平直的高速公路上时，妈妈发现小聪一反常态，专注地盯着汽车的速度表。正当妈妈纳闷之时，小聪突然说道：“咱们刚刚经历了一次匀变速直线运动！”

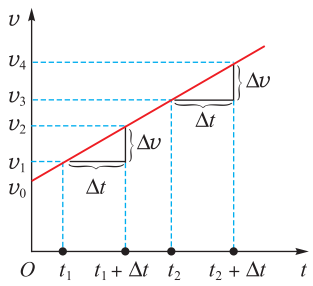
匀变速直线运动

上面的情形中提到的匀变速直线运动是什么？

小聪说：“通过观察，我发现汽车在平直的高速公路上行驶时，速度表在不同的阶段会有不同的状态：有一段时间指针会稳定在某一刻度不动；还有些时间段指针沿着顺时针方向均匀而缓慢地转动；当然，有时指针也沿逆时针方向均匀而缓慢地往回转。”

讨论交流

怎样用所学的速度和加速度的概念，描述小聪观察到的上述三种过程中汽车的运动情况呢？



▲ 图2-1-1

利用速度概念，我们可以把直线运动分为匀速直线运动和变速直线运动。速度表指针稳定在某一位置的运动就是我们在初中物理中已经学过的匀速直线运动。在分析速度表的后两种变化过程之前，让我们先研究一下如图2-1-1所示的v–t图像。这个速度图像对应的运动有什么特点？

从图像可以看出，无论 Δt 选在什么区间，对应的速度v的变化量 Δv与时间 t 的变化量 Δt 的比都是一样的，即物体运动的加速度保持不变，速度随时间均匀变化。在物

理学中，我们把速度随时间均匀变化的直线运动叫作**匀变速直线运动**（uniformly accelerated rectilinear motion）。匀变速直线运动中，加速度保持不变。

现在大家应该明白了，小聪观察到的另外两种运动，就是匀加速直线运动和匀减速直线运动，统称匀变速直线运动。在必修1模块，对于变速运动我们主要讨论匀变速直线运动。

实验：研究小车的运动

小车在恒定拉力作用下的运动是匀变速直线运动吗？小车在倾斜直轨道上的运动是匀变速直线运动吗？匀变速直线运动有什么特点？我们可以通过实验来研究。

1. 方案1：用打点计时器进行研究

如图2-1-2所示，与第一章图1-4-1类似，这一次我们改为用钩码通过细绳绕过定滑轮来拉小车。

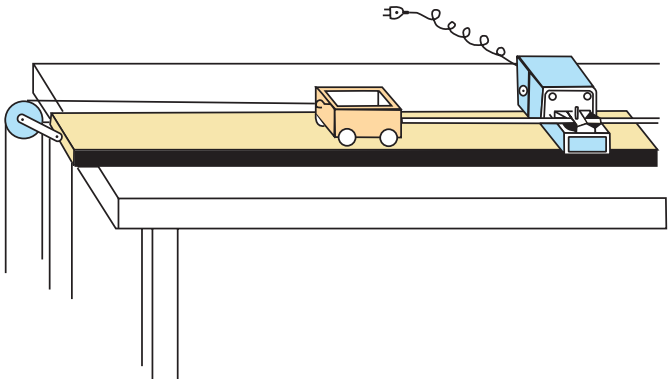
用手按住小车，使它保持静止状态。先开启打点计时器的电源，待它稳定工作后释放小车，使它在恒定拉力作用下开始运动，并打出一条纸带。

请每一位同学都打出一条纸带，用于测量分析。

测量纸带上的数据，进行必要的计算，将结果填入下页的表格中。

◎**实验器材**

小车、附有滑轮的长木板、打点计时器、纸带、细绳、钩码、刻度尺、坐标纸。



▲ **图2-1-2**　实验装置

计时点序号	O	A	B	C	D	E	…
计时点对应的时刻 t/s							
计时点的位置坐标 x/m							
相邻计时点的间距Δx/m	—						—
平均速度v/（m·s^{-1}）	—						—

讨论交流

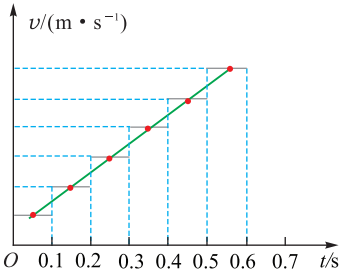
为了验证小车的运动是否为匀变速直线运动，该对上述数据进行怎样的分析，从而得出结论？

我们可以有两种方法。

方法一：取任意两个点，用它们的速度差$\Delta v=v_2-v_1$除以相应的时间差$\Delta t=t_2-t_1$，求得加速度。如果取不同的两个点，求得的加速度都相等，则小车的运动是匀变速直线运动。

方法二：把各0.02s时间段内的平均速度当作起点时刻的瞬时速度，绘制v–t图像。如果该图像在误差允许的范围内，可以看作一条倾斜的直线，则该运动是匀变速直线运动（图2-1-3）。

方法一中，我们如何得到各时刻的瞬时速度？



▲ **图2-1-3** 依据测得的平均速度作出的速度–时间图像应是阶梯状的。想象一下：如果测量的时间越来越短，这个“阶梯”会变成密集的点，而连成一条线吗？

活动 | 研究匀变速直线运动速度的特点

以纸带上某一点为中心，取两边时间间隔相等的两点，求这个区间的平均速度。例如以图1-4-2的纸带上C点为中心，分别取OF、AE、BD段，求这些区间的平均速度。它们相等吗？

如果这些区间的平均速度都相等，则可以猜想：某区间的平均速度，等于该区间中间时刻的瞬时速度，该结论可记作$\overline{v}_{PQ}=v_{PQ\text{的中间时刻}}$。

在后面我们将证明这一结论的正确性。它常用作求瞬时速度的依据。

活动 | 研究匀变速直线运动位移的特点

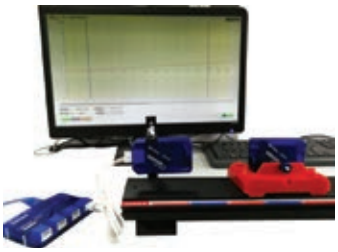
观察表格中各相邻计时点间的位移数值，可以发现它们逐渐增大，而且似乎有一定规律。请猜想可能是怎样的规律，并计算一下每一对相邻的相等时间间隔内，后面的位移减去前面的位移，有什么特点？

对于匀变速直线运动而言，相邻的相等时间间隔内的位移差值会是一个常数。在后面的学习中我们将严格证明这一结论的正确性。它常常用来作为判断物体是否做匀变速直线运动的依据。

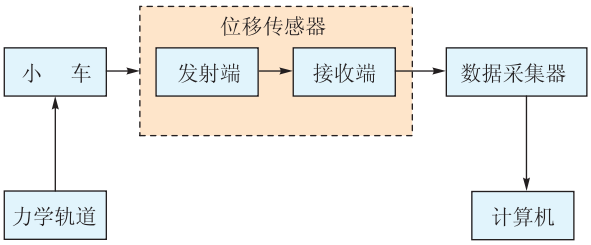
2. 方案2：用位移传感器进行研究

利用传感器实验系统，我们可以在计算机屏幕上直接获得相关实验结果。

实验系统如图2-1-4所示，包括位移传感器、数据采集器、计算机、力学轨道、小车等。其结构示意图如图2-1-5所示。



▲ 图2-1-4



▲ 图2-1-5

首先，要进行硬件系统的连接和调整。将轨道支架与力学轨道连接在一起，使轨道倾斜放置；将位移传感器的发射端固定在小车上；将位移传感器的接收端悬挂在轨道顶端上方，并与接收端处在同一平面内；通过数据线，将位移传感器、数据采集器和计算机连接起来。

然后，对软件系统进行设置。启动计算机，同时将小车放置在斜面顶端保持静止，打开位移传感器发射端的开关，进入软件界面，在采集设置中点击“调零”按钮；设置记录时间间隔和数据采样数。

在完成上述准备工作后，开始实验。点击软件“开始”按钮的同时，释放小车，表格自动记录数据。

获得数据后，通过计算机软件对数据进行处理，我们

就得到了一系列的（v_i，t_i）数据。在软件的绘图设置对话框中，将横轴设置为t，纵轴设置为v，可以生成v–t的散点图；利用软件的图像分析中的“线性拟合”功能，得到v–t图像（图2-1-6）。

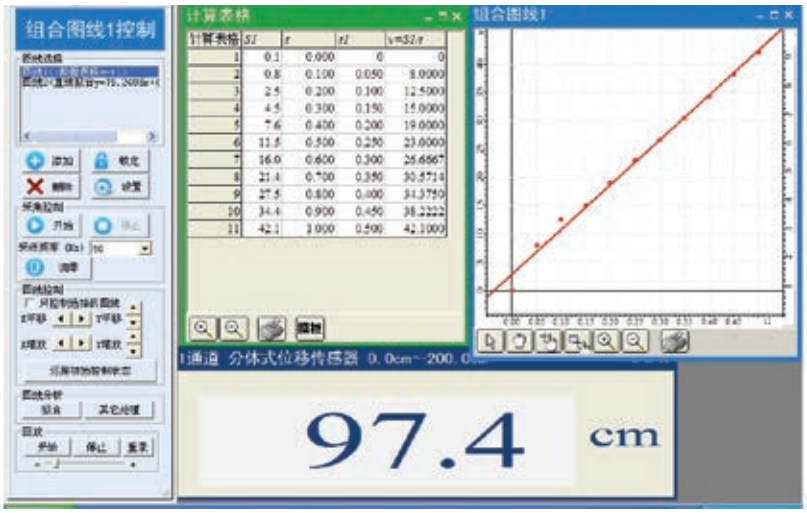


图2-1-6 数据窗口

讨论交流

1.计算机是怎么代替人完成一系列实验的实验数据的采集处理工作的？

2.实验数据在计算机中呈现的原始图像是什么？计算机是怎样得到v–t图像的？

3.图2-1-6中的v–t图像与图2-1-1中的v–t图像一样，均为直线吗？这说明了什么？

自我评价

1. 下列关于打点计时器的说法中，不正确的是（　　）

A. 无论使用电磁打点计时器还是电火花计时器，都应该把纸带穿过限位孔，再将套在轴上的复写纸片压在纸带的上面

B. 使用打点计时器时应先接通电源，再拉动纸带

C. 使用打点计时器的过程中，在拉动纸带时，拉动的方向应与限位孔平行

D. 使用打点计时器时应将打点计时器先固定在桌子上

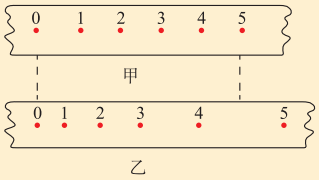
2. 如图2-1-7所示是同一打点计时器打出的两条纸带，由纸带可知（　　）

A. 在打下计数点“0”至“5”的过程中，纸带甲的平均速度比乙的大

B. 在打下计数点“0”至“5”的过程中，纸带甲的平均速度比乙的小

C. 纸带甲的加速度比纸带乙的加速度大

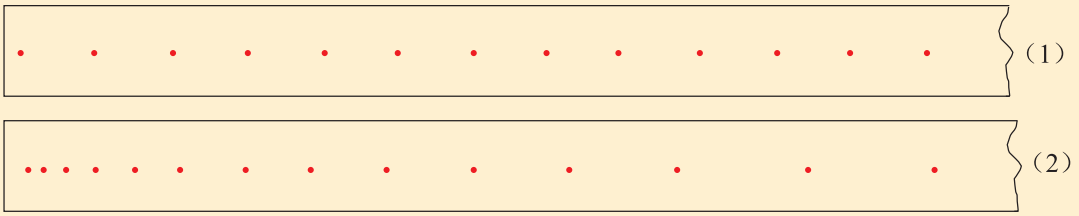
D. 纸带甲的加速度比纸带乙的加速度小



▲ 图2-1-7

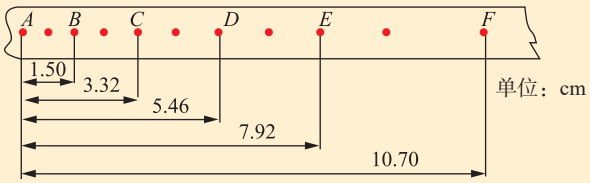
3. 中学实验室常用的打点计时器有电磁打点计时器和电火花打点计时器两种，它们的共同点是什么？不同点有哪些？使用时应注意哪些问题？

4. 如图2-1-8所示的是打点计时器打出的两条纸带，它们所对应的运动有什么不同？你是根据什么判断出来的？



▲ 图2-1-8

5. 某同学在研究小车运动的实验中，获得一条点迹清晰的纸带，如图2-1-9所示。已知打点计时器每隔0.02 s打一个点，该同学选择了A、B、C、D、E、F六个计数点，测量数据如图中所示，单位是cm。



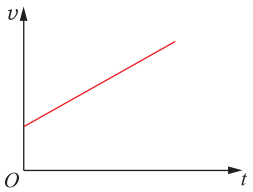
▲ 图2-1-9

（1）小车做什么运动？

（2）试根据课文中关于匀变速直线运动的瞬时速度的猜想，计算瞬时速度v_B、v_C、v_D、v_E各是多大。

2 匀变速直线运动速度与时间的关系

上一节我们学习了利用打点计时器记录下小车运动过程中的一系列位置，通过数据处理，绘制v–t图像的方法。其中小车在钩码牵引下运动的v–t图像是一条倾斜的直线，如图2-2-1所示。从这个图像我们可以得出哪些运动规律？



▲ 图2-2-1　小车在重物牵引下运动的v–t图像

匀变速直线运动的速度与时间的关系

讨论交流

某物体做匀变速直线运动，设其加速度为a，$t=0$时刻的速度即初速度为v_0，经过时间t，速度变为多少？

根据加速度的定义$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$，有

$$\Delta v = a\cdot\Delta t = a(t-0) = at,$$

设 t 时刻的速度为v_t，$\Delta v = v_t - v_0$，因此，

$$v_t = v_0 + at$$

这就是匀变速直线运动的速度与时间的关系式，也称速度方程。式中加速度a是常量，此关系式表明，做匀变速直线运动的物体，任意时刻的速度 v_t是时间 t 的一次函数，其v–t图像的斜率就等于加速度a。这与我们在第一章由图像分析得出的结论是一致的。

速度方程的深入讨论

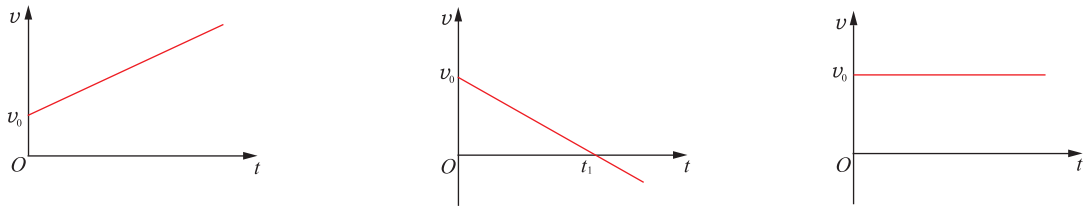
$v_t=v_0+at$ 式中的速度 v_t、v_0和加速度a都是矢量。对于直线运动，可以建立一维的直线坐标，它们的方向用正负号表示。一般情况下，我们以初速度v_0的方向为正方向，即初速度v_0为正值。

（1）如果加速度a是正值，表示 a 与 v_0 的方向相同，物体的速度数值随时间的增加而增加，物体做的是加速运动。其v–t图像向上倾斜，如图2-2-2（a）所示。

（2）如果加速度 a 是负值，表示 a 与 v_0 的方向相反，其v–t图像向下倾斜，如图2-2-2（b）所示。开始阶段，物体的速度数值随时间的增加而减小，物体做减速运动。当物体的速度减为零后，速度变为负值，加速度的方向与速度方向相同，物体做加速运动，速度的大小逐渐增加。

（3）如果加速度$a=0$，物体的速度不发生变化，其运

动就是匀速直线运动，其v–t图像是一条水平直线，如图2-2-2（c）所示。



（a）加速度与初速度方向相同的$v-t$图像　（b）加速度与初速度方向相反的$v-t$图像　（c）加速度为零的$v-t$图像

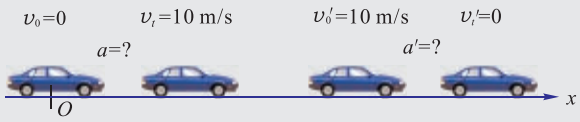
▲ **图2-2-2**　几种匀变速直线运动的$v-t$图像

例题示范

问题1　一汽车从车站由静止开出沿直线行驶，5 s后速度增加到10 m/s，该汽车的加速度是多少？后来汽车在行驶中遇到情况开始制动，在2 s内速度由10 m/s减小到零，在此过程中加速度又是多少？

分析　汽车的运动过程可分为两段：前一段是初速度为零、末速度为10 m/s的匀加速运动；后一段是初速度为10 m/s、末速度为零的匀减速运动。汽车在两段运动过程中的时间题目中均已给出，由速度方程$v=v_0+at$就可以求得加速度a。

解　图2-2-3是汽车运动过程的示意图。沿运动路线建立直线坐标系，取车站为坐标原点，汽车的运动方向为x轴正方向。



▲ **图2-2-3**

汽车在加速过程中，已知$v_0=0$，$v_t=10$ m/s，$t=5$ s

由速度方程$v_t=v_0+at$有

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}=\frac{10-0}{5}\ \text{m/s}^2=2\ \text{m/s}^2$$

汽车在制动过程中，已知$v_0'=10$ m/s，$v_t'=0$，$t'=2$ s

可得

$$a'=\frac{v_t'-v_0'}{t'}=\frac{0-10\ \text{m/s}}{2\ \text{s}}=-5\ \text{m/s}^2$$

a'为负值，表示加速度方向与x轴的正方向相反，即加速度方向与初速度方向相反，汽车做匀减速运动。

问题2 证明：对于匀变速直线运动，某段时间中间时刻的瞬时速度等于这段时间的始、末速度的算术平均值，即

$$v_{\frac{t}{2}}=\frac{v_A+v_B}{2}$$

解 **方法1**：用解析法证明。

如图2-2-4所示，前$\frac{t}{2}$阶段，初速度为v_A，末速度为$v_{\frac{t}{2}}$，加速度为a，时间为$\frac{t}{2}$，故有



▲ 图2-2-4

$$v_{\frac{t}{2}}=v_A+a\times\frac{t}{2} \qquad ①$$

后$\frac{t}{2}$阶段：

$$v_B=v_{\frac{t}{2}}+a\times\frac{t}{2} \qquad ②$$

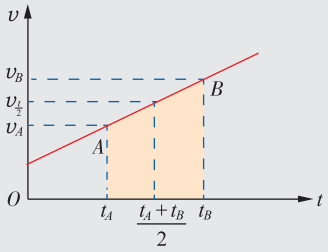
②式移项与①式相加再除以2，得

$$v_{\frac{t}{2}}=\frac{v_A+v_B}{2}$$

方法2：用图像进行证明。

如图2-2-5所示为一个做匀变速直线运动物体的v–t图像，A点时速度为v_A，B点时速度为v_B，A、B的中间时刻速度为$v_{\frac{t}{2}}$。图中t_AABt_B为一个直角梯形，由梯形中位线公式可知

$$v_{\frac{t}{2}}=\frac{v_A+v_B}{2}$$

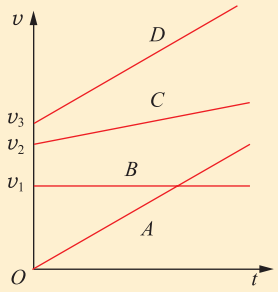


▲ 图2-2-5

自我评价

1. 已知物体的初速度是 18 km/h，加速度是 0.5 m/s^2，经过 20 s 后物体的速度多大？
2. 一辆汽车刹车后做匀减速直线运动，初速度大小为 15 m/s，加速度大小为 3 m/s^2，求：
（1）第 6s 末的瞬时速度；
（2）汽车末速度减为零所需的时间。

3. A、B、C、D 四个物体在一条直线上运动，它们的速度图像如图 2-2-6 所示，请回答以下问题：



▲ 图2-2-6

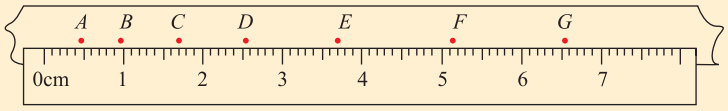
（1）哪一个物体的加速度为零而速度不为零？

（2）哪一时刻，有两个物体的速度相同而加速度不同？

（3）同一时刻，哪两个物体运动的加速度相同但速度不相同？

（4）同一时刻，哪一个物体的加速度比另一个物体小，但速度比另一个物体大？

4. 如图 2-2-7 所示是某同学做“研究匀加速直线运动”实验时获得的一条原始纸带。在纸带上选取连续的 A、B、C、D、E、F、G 共 7 个点，已知相邻两点间的时间间隔是 0.02 s。为测量各点间的距离，在下面放上一把刻度尺。



▲ 图2-2-7

（1）请你确定物体的运动方向。

（2）请根据图 2-2-7 读出纸带上的数据，作出 $v-t$ 图像。

（3）根据作出的图像求出这7个点中最初那个点的速度 v_0 和物体运动的加速度 a。

3 匀变速直线运动位移与时间的关系

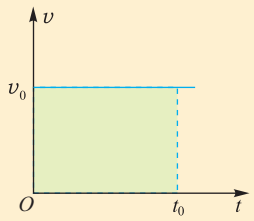
在前面的学习过程中，我们通过实验测出物体随时间变化的一系列位移，得出了匀变速直线运动的速度图像和函数表达式，但并没有得出位移随时间变化的图像和函数表达式。而位移随时间变化的规律，同样是对运动进行描述的重要内容。

如何从速度随时间变化的规律找出匀变速直线运动位移与时间的解析关系？

讨论交流

在初中物理中，我们知道匀速直线运动的位移为$\Delta x = v t$，它的$v-t$图像是一条平行于横轴的直线，如图2-3-1所示。位移Δx就对应着那段图像与两个坐标轴间所围成的矩形（即图中阴影区域）的“面积”。

对于变速直线运动，速度v是随时间变化的，它的$v-t$图像不再是平行于横轴的直线，图像与两个坐标轴间围成的图形也不再是矩形，是否还可以利用求“面积”的方法求位移Δx呢？



▲ **图2-3-1** 匀速直线运动的速度图像

理论探究

最简单的变速运动是匀变速直线运动，它的$v-t$图像是一条倾斜的直线，如图2-3-2（a）所示，该图像与两个坐标轴所围成的图形是一个梯形。如何理解这个梯形的“面积”与$0\sim t$时间内位移的对应关系？

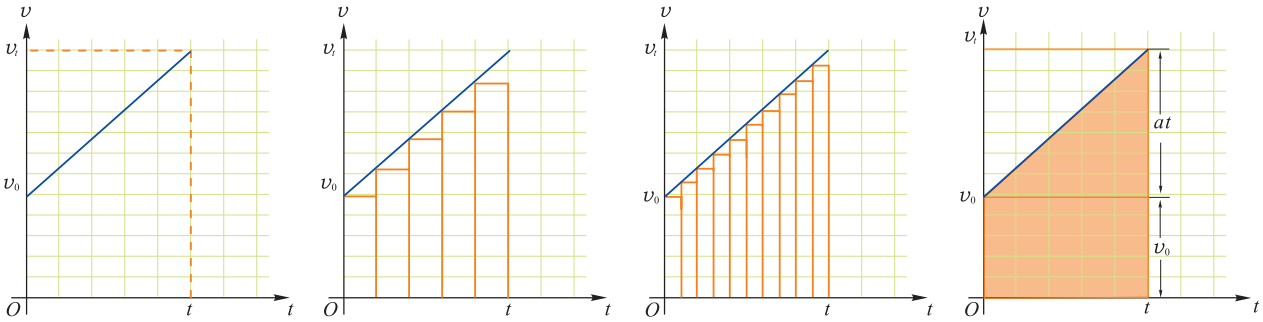
将时间t分成若干等份，每一段的时间都是Δt，用每一时间段开始时刻的速度v_i近似代表这个小段时间的速度，则$v_i \Delta t$就是在这段时间的位移，它在图上表现为一个小矩形的“面积”。所有这些小矩形合起来是一个“阶梯形”的图形。图2-3-2（b）中将时间t分成5等份，即把一个速度为$v = v_0 + at$的匀加速直线运动，分成五段速度阶梯式升高的匀速直线运动的组合。显然这样用阶梯形图形的“面积”替代梯形的“面积”，两者是存在一定误差的。

如果将$v-t$图像中的时间间隔划分得更小些，如图（c）所示，所得的阶梯形图形与原来的梯形相比较，两者的误差就会更小。极限情况下，即把时间分成无限多个小的间隔，即$\Delta t \to 0$时，可以想象，“台阶”形的折线就变成了一条直线，它与两个坐标轴所围成的图形的“面积”，就可以看作等于那个梯形的“面积”。

上述分析推理说明，在匀变速直线运动的图像中，对应时间t的速度图像与两个坐标轴所围成的梯形，即图（d）中梯形（画阴影部分）的“面积”，在数值上就等于在时间t内的位移值。

◎极限思想

当$\Delta t \to 0$时，即分成的小矩形无限多时，矩形上端的台阶形成的折线就无限趋近$v-t$图像中的斜直线。图中无限个小矩形的“面积”之和就无限接近梯形的“面积”，这样我们就可以认为t时间内运动的位移的数值等于梯形的“面积”。



（a）物体做匀变速直线运动的$v-t$图像

（b）把t分成五段，每段Δt时间内做匀速直线运动，其位移的数值等于这个小矩形的“面积”

（c）若Δt取得更小，矩形上端的台阶更密，更接近斜直线

（d）若$\Delta t \to 0$，矩形上端的台阶形成的折线就变成了$v-t$图的斜直线。图中无限个小矩形的“面积”之和即梯形的“面积”就等于t时间内的位移的数值

▲ 图2-3-2

取初始时刻（$t = 0$）的位置为坐标原点，则物体在t时间内运动的位移Δx在数值上就等于它在t时刻的位置坐标x，由梯形面积公式知

$$x = \frac{v_0 + v_t}{2} \cdot t$$

又

$$v_t = v_0 + at$$

得到

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

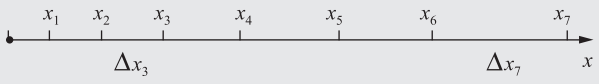
此即为匀变速直线运动的位移与时间的关系式，也称位移方程。

把初始位置作为坐标原点在解决实际问题中是很常见的做法。为简单起见，位移Δx也常常用x表示。

例题示范

问题1　某物体做匀加速直线运动，第3 s内的位移是2.5 m，第7 s内的位移是2.9 m，求物体运动的加速度与初速度。

分析　如图2-3-3所示，建立直线坐标系，以运动方向为x轴正方向，物体开始运动时的位置为坐标原点。物体在第3 s内的位移$\Delta x_3 = 2.5$ m应是前3 s内的位移x_3与前2 s内的位移x_2之差；在第7 s内的位移$\Delta x_7 = 2.9$ m应是前7 s内的位移x_7与前6 s内的位移x_6之差。



▲ 图2-3-3　物体运动示意图

解　根据题意，有

$$\Delta x_3 = x_3 - x_2 = \left(v_0 t_3 + \frac{1}{2} a t_3^2\right) - \left(v_0 t_2 + \frac{1}{2} a t_2^2\right)$$

$$\Delta x_7 = x_7 - x_6 = \left(v_0 t_7 + \frac{1}{2} a t_7^2\right) - \left(v_0 t_6 + \frac{1}{2} a t_6^2\right)$$

解决此题的方法很多，请你试一试你还能用几种方法求解。

联立以上二式解得：$a = 0.1\ \text{m/s}^2$；$v_0 = 2.25\ \text{m/s}$。

问题2 证明：做匀变速直线运动的物体，某段时间内的平均速度等于这段时间的中间时刻的瞬时速度，即$v_{\frac{t}{2}} = \bar{v} = \frac{x}{t}$。

解 **方法1**：解析法。

设初始时刻速度为v_0，加速度为a，则经过时间$\frac{t}{2}$，根据速度公式，速度变为

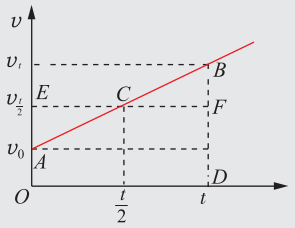
$$v_{\frac{t}{2}} = v_0 + a \cdot \frac{t}{2}$$

根据位移公式，时间t发生的位移$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$，这段时间内的平均速度

$$\bar{v} = \frac{x}{t} = \frac{v_0 t + \frac{1}{2} a t^2}{t} = v_0 + \frac{1}{2} a t$$

因此得证 $$v_{\frac{t}{2}} = \bar{v} = \frac{x}{t}。$$

方法2：图像法。初速度为v_0，加速度为a的匀变速直线运动的$v-t$图像如图2-3-4所示，时间t内的位移x在数值上等于图中梯形$OABD$的“面积”。$\frac{t}{2}$时刻的速度为$v_{\frac{t}{2}}$，若以此速度做匀速运动，时间t内的位移在数值上等于矩形$OEFD$的“面积”。由几何关系可知，图中$\triangle BCF$与$\triangle ECA$全等，可以设想把$\triangle BCF$割下补到$\triangle ECA$处，从而梯形$OABD$变成了矩形$OEFD$，二者“面积”相等，因此这段时间内的平均速度等于这段时间的中间时刻的瞬时速度的结论成立。



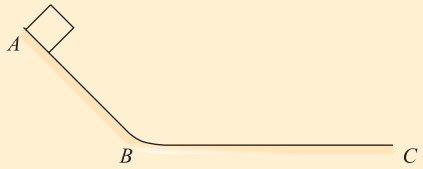
▲ **图2-3-4** 用$v-t$图像证明

拓展 前面我们证明了匀变速直线运动某段时间中间时刻的瞬时速度等于这段时间始末速度的算术平均值，即等于初速度加末速度除以2，现在又证明了它也等于这段时间的平均速度。事实上，这一结论我们在本章第1节实验中已经猜想到了。请特别注意的是，这两个结论都只对匀变速直线运动适用；对于一般的变速运动，某段时间中间时刻的瞬时速度与这段时间始末速度的算术平均值并不相等，也与这段时间的平均速度不相等。

自我评价

1. 一个质点沿某一直线做匀加速直线运动，第 2 s 内运动了 5 m，第 4 s 内运动了 9 m，求该质点在第 5 s 末的速度以及运动 5 s 的位移。

2. 物体由静止从 A 点沿斜面匀加速下滑，通过 B 点后在水平面上做匀减速直线运动（假设从斜面进入水平面时，速度大小不变），最后停止于 C 点，如图 2-3-5 所示。已知 AB = 4 m，BC = 6 m，整个运动用时 10 s，则沿 AB 和 BC 运动的加速度 a_1、a_2 大小分别是多少？

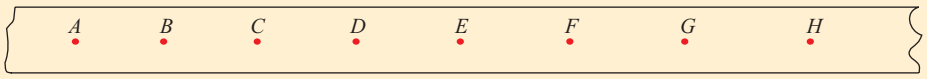


▲ 图2-3-5

3. 人骑自行车以 5 m/s 的初速度在一个斜坡上做匀减速直线运动，加速度的大小为 0.4 m/s^2，斜坡长 30 m，求人骑自行车通过斜坡需要的时间。

某同学用 $x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ 直接代入已知量求解，解得 t = 10 s 或 15 s，请你分析：为什么会有两个时间？哪一个是正确答案？

4. 图 2-3-6 是做匀变速直线运动的小车经打点计时器打出的一条纸带，已知打点周期为 T（即每隔时间 T 打一次点），小车运动的加速度为 a。试证明：相邻点迹间距离之差 $\Delta x = aT^2$（即证明 $BC-AB=CD-BC=DE-CD=\cdots=aT^2$）。



▲ 图2-3-6

感悟 · 启迪

通过本主题的学习，对于如何进行科学探究活动以认识物理规律，你们有什么感悟？科学实验是认识物理规律的基础，在实验的基础上进一步通过科学思维，进行数理推演，才有可能到达认知的彼岸。

4 匀变速直线运动规律的应用

前面，我们已经学习了匀变速直线运动的两条主要规律：一是速度与时间的关系，二是位移与时间的关系。具体地说，就是速度方程$v_t = v_0 + at$和位移方程$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$。二者共涉及5个物理量：初速度$v_0$、末速度$v_t$、加速度$a$、位移$x$和时间$t$，其中前面4个都是矢量，只有时间 t 是标量。对于匀变速直线运动来说，加速度a和初速度v_0是恒量，末速度v_t和位移 x 分别是时间 t 的一次函数和二次函数。下面，就让我们通过几个具体的实例来学习对匀变速直线运动规律的应用。

● 飞机跑道的长度

根据机场的等级和自然条件，且为适应不同性能飞机的起降，对机场跑道长度有不同的要求。如大型飞机要求有较长的起降跑道，所以不能在小机场起降；北京首都机场T1、T2和T3三个航站楼的双向跑道长宽分别为3800 m × 60 m、3200 m × 50 m和3800 m × 60 m（满足F类飞机的使用要求）；在高原地区由于空气稀薄，致使飞机升力和发动机的功率降低，所以这些地方的机场跑道长度需要4000 m以上。我国西藏昌都地区海拔4334 m，位于此地的邦达机场的跑道长达5500 m，是当今世界上海拔最高、跑道最长的机场。

飞机跑道长度，与匀变速直线运动有什么关系呢？

例题示范

问题　可以认为飞机起飞是在跑道上做匀加速直线运动。若加速运动时加速度 $a = 4.0\ \mathrm{m/s^2}$，设当飞机速率达到85 m/s时就可升空，则跑道的长度至少应当设计为多长?

分析　这是一个匀变速直线运动的问题，因此可以根据$v_t = v_0 + at$先求出运动的时间t，然后根据$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$得出飞机起飞前在跑道上滑行的位移$x$。但是，在这个问题中，已知条件和所求的结果都不涉及时间t，它只是一个中间量。我们就把$v_t = v_0 + at$和$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$两式联立起来，消去$t$，直接得到速度$v$与位移$x$的关系式$v_t^2 - v_0^2 = 2ax$，这个关系式对解决这类问题是非常方便的。

解　以飞机滑行的起点为坐标原点，以飞机滑行的方向为正方向建立坐标轴。飞机在跑道上运动的初速度是0，飞机起飞时的速度$v_t = 85\ \mathrm{m/s}$，加速度$a = 4.0\ \mathrm{m/s^2}$。用$v_t^2 - v_0^2 = 2ax$计算飞机起飞时的位移x，由上式可得

$$x = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(85\ \mathrm{m/s})^2 - 0}{2 \times 4.0\ \mathrm{m/s^2}} \approx 904\ \mathrm{m}$$

所以，飞机跑道的长度至少应当设计为904 m。

拓展　（1）关于匀变速直线运动的规律，除了前面已经学习过的速度方程和位移方程以外，这里又推导出了速度与位移的关系式，这样就有了三个方程，即

$$v_t = v_0 + at \qquad ①$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad ②$$

$$v_t^2 - v_0^2 = 2ax \qquad ③$$

这三个方程中，只有两个是独立的。在涉及的5个物理量，即v_0、v_t、a、t、x中，若已知其中的3个，可以运用三个方程中的任意两个，联立求解得出另外两个未知量，本题就是已知v_0、v_t、a这三个物理量，可以求时间t和位移x，只是时间t对这个问题无关紧要，因此只求出x即可。

（2）大型飞机起降跑道都比较长，因此需要占用的土地比较多，在山区和海边修建机场常常需要开山填海，工程浩大。而在航空母舰起降飞机就要另辟蹊径了。我国第一艘航空母舰辽宁舰采用的是滑跃式起飞，而更先进的是采取弹射式起飞，即利用蒸气弹射或电磁弹射，给飞机施加外力以获得更大的加速度。

航母的甲板前端设计成向上翘起的形状，飞机滑行的后一段沿着它向斜上方方向冲出，这种起飞方式称为滑跃式起飞，它可以在速度较小的情况下升空。

飞机刹车系统的要求

例题示范

问题 出于安全考虑，还必须允许飞机在起飞前的滑行过程中的任一时刻，若发现突发情况（或只是感到异常）则立即停止加速，改为减速滑行，并最终停止在跑道上。仍以上面的飞机为例，若机场跑道长度为 1700 m，极限情况下，它加速滑行已经达到起飞速率的瞬间因故终止起飞，为确保飞机不滑出跑道，则减速过程中的加速度至少要多大？

分析 本题中飞机仍沿直线运动，所不同的是做减速运动，以初速度方向为正，则加速度方向与它相反，应为负值。

解 以飞机滑行起点为原点，沿飞机滑行的方向建立坐标轴。飞机达到最大速度瞬间，即减速阶段的初速度 $v_0 = 85\ \text{m/s}$，末速度 $v_t = 0$。为保证安全，其最大位移 $x = (1700 - 904)\ \text{m} = 796\ \text{m}$。仍运用速度与位移的关系式 $v_t^2 - v_0^2 = 2ax$，有

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2x} = \frac{0 - (85\ \text{m/s})^2}{2 \times 796\ \text{m}} = -4.54\ \text{m/s}^2$$

负号表示它的方向与初速度方向相反，即加速度的最小值为 $4.54\ \text{m/s}^2$。

拓展 （1）飞机减速时主要靠空气阻力产生加速度，这主要由机翼上的副翼承担，加速度的数值越大，就越困难，必要时（如航天飞机降落时）可以打开携带的降落伞。

（2）飞机在航母上降落时，由于航母上甲板长度有限，一般都采用设置拦阻索的方式，也就是借助外力增大降落滑行时的加速度大小。

子弹在枪管内的运动时间

例题示范

问题 88式狙击步枪是我国自主研制的小口径狙击步枪，其有效射程为800 m，于1996年完成生产试制任务，1997年首先装备驻港部队，2006年上海上合组织峰会期间，执行保卫任务的狙击小组使用的就是这种狙击步枪。该步枪枪管长 620 mm，子弹出口的初速度为895 m/s。如果把子弹从被击发到射出枪口的运动看作匀变速直线运动，求子弹在枪管内的运动时间。

分析 本题讨论子弹在枪管内的运动，初速度 $v_0 = 0$，末速度 $v_t = 895\ \text{m/s}$，位移 $x = 0.62$

m，求运动时间t。运用匀变速直线运动的规律，可联立求解。

解　根据匀变速直线运动速度与位移的关系及速度方程，有

$$\begin{cases} v_t^2 - v_0^2 = 2ax & ① \\ v_t = v_0 + at & ② \end{cases}$$

由①式，得　　$a = \dfrac{v_t^2 - v_0^2}{2x}$

代入到②式，解出子弹在枪管内的运动时间为

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{(v_t - v_0)\cdot 2x}{v_t^2 - v_0^2} = \frac{2x}{v_t + v_0} = \frac{2 \times 0.62\ \text{m}}{895\ \text{m/s}} = 1.39\times10^{-3}\ \text{s}$$

拓展　在实际的工程设计时，往往各种因素相互影响，改变其中的某一个参量，会引起其他很多参量的变化，这可能既有有利的一面，也有不利的一面，要综合考虑各种因素，根据实际情况取得一个较为理想的平衡点。以本题的步枪为例，在枪管长度一定的条件下，要缩短子弹在枪管内的运动时间t，可以提高子弹出口时的速度，从而提高射击的有效射程和射击精确度，还可提高子弹的穿透力。但要缩短时间t，必须增加火药的装填量或者提高火药的燃烧质量，以增大火药燃烧时产生的压力，而这就使得枪管承受更大的压力，可能需要增加枪管的厚度或者强度，从而使枪支总质量增加，而这与使用灵活、轻便等要求背道而驰。

自我评价

1. 试证明：匀变速直线运动某段位移中间位置的瞬时速度$v_{\frac{x}{2}}$与初速度v_0、末速度v_t之间满足关系式

$$v_{\frac{x}{2}} = \sqrt{\frac{v_0^2 + v_t^2}{2}}$$

2. 试证明：初速为 0 的匀变速直线运动，第 1 s 内、第 2 s 内、第 3 s 内……的位移之比等于 1 : 3 : 5 : ……

3. 一个物体在做匀变速直线运动的过程中，已知它第 3 s 内的位移为 8 m，第 7、8 两秒内的位移为 3.5 m，求它的加速度及初速度的大小。

4. 一辆汽车从A站出发沿平直公路行驶，先做匀加速运动，历时 5 min，随即做匀减速运动，3 min 后恰好停在B站。已知A、B两站间的距离为 2.4 km，求汽车在这段运动中的最大速度。

5. 根据我国机动车运行安全的技术标准，一辆满载总质量在 3.5 t ~ 12 t 之间的大型汽车，如行驶速度为 30 km/h，制动距离必须在 8.0 m 以内，则该车的制动系统产生的加速度至少

多大？若该车保持这个最小制动加速度不变，当它的行驶速度为 60 km/h 时，制动距离为多少？

（制动距离是指：从开始制动时起至汽车停止时驶过的距离）

发展空间

走向社会

对一起交通事故的分析

为了车辆的行驶安全，国家对各种车辆的车速和车距都有限制。譬如，许多城市的交通繁忙路段，机动车辆的速度限制在25 km/h以内，并要求驾驶员必须保持至少5 m的车距。在高速公路上行驶，车距就要更大。以速度为70 km/h行驶的汽车为例，它在干的沥青路面上行驶时制动距离为50 m，在积雪路面上时为117 m，在结冰路面上时可达216 m。学习了这一章的内容，就能对上面的一些数据进行分析。

下面请同学们来分析一起交通事故。

1. 事故

某公路上发生了一起交通事故。总质量大于12 t的载重汽车与一辆总质量小于3.5 t的空载小型汽车迎面相撞，空载小型汽车的前部车体损坏，驾驶员受伤。载重汽车的前车灯被撞坏。

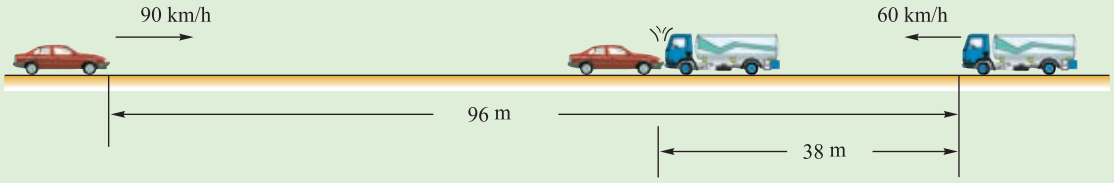
机动车运行安全技术标准之一

项目 / 车型	装载	初速度/（$km \cdot h^{-1}$）	制动距离/m
大型汽车 总质量>12 t	空	20	≤4.4
	重	30	≤9.5
小型汽车 总质量<3.5t	空	30	≤6.5
	重		≤7.0

2. 数据

国家对于机动车辆要进行定期检验，不符合技术指标的不能上路。这两辆车都符合上表中的技术标准。假定两车的制动性能可用上表中对应的制动距离的最大值来进行分析。

交警测得两车制动点之间的距离为96 m，开始制动时载重汽车的速度为60 km/h，空载小型汽车的速度为90 km/h。事故地点距载重汽车的开始制动点38 m，如图2-4-1所示。



▲ 图2-4-1

3. 分析

两车的自身长度可以略去，当作两个质点进行分析。根据上表中的数据进行计算，并将结果填入下表。

项目 / 车型	制动前车速 /（km·h^{-1}）	制动加速度 /（m·s^{-2}）	制动距离 /m	出事地点车速 /（m·s^{-1}）
载重汽车	60			
空载小型汽车	90			

4. 结论

写出你对事故原因的分析。

5　自由落体运动

“重的物体比轻的物体下落得快。”这是公元前4世纪，古希腊哲学家亚里士多德的观点，你觉得有道理吗？

活动

1. 如果你一只手拿一块橡皮，另一只手拿一张薄纸，举到同一高度，同时松手，会看到什么现象？

2. 再拿两张相同的薄纸，一张捏成一团，另一张则展开，模仿上述情况，举等高同时松手，会看到什么现象？

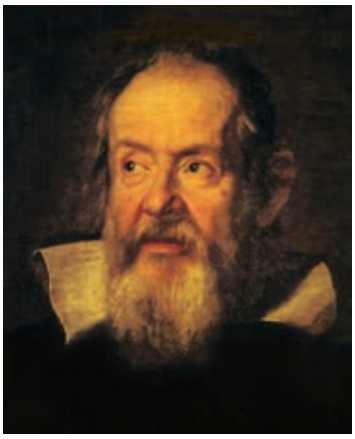
第一个实验，会看到橡皮先落地，这符合亚里士多德观点。第二个实验，会看到纸团先落下，但两张纸轻重相同，这就与亚里士多德的观点相左了！

亚里士多德是古希腊伟大的哲学家和科学家。他生活在古希腊文化的鼎盛时期。他的著作集当时西方文化和思想之大成，对后世产生了重大影响。

可见，“重的物体比轻的物体下落得快”作为普遍结论是不能成立的。

自由落体运动

亚里士多德的这个错误结论流传了近2000年，直到伽利略（图2-5-1）的出现。其中的原因是什么？

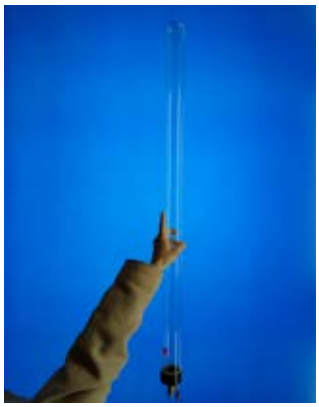


▲ **图2-5-1** 伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）

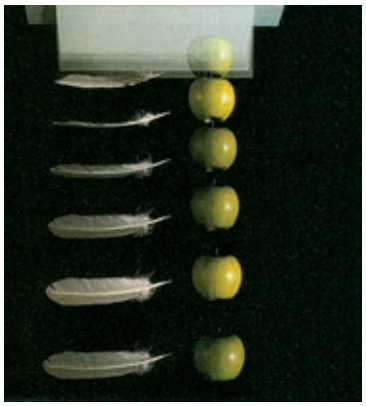
人们总是从看得见、听得到、摸得着的周围事物开始认识世界的，并且在不断地重复中形成经验。生活中常常见到的确实是果实比树叶落得快，石子比纸片落得快，亚里士多德的说法与人们的这些常见生活经验是相符的。这是他的观点在漫长岁月中获得支持的重要原因。

人类不断认识世界的过程常常会像“瞎子摸象”那样。在17世纪以前，人们对落体现象的认识是不全面的，不知道落体还受到空气阻力的影响。正是看不到空气对不同落体阻力的不同，才会片面地认为“重的物体比轻的物体落得快”。

现在，我们可以通过科学实验直接证明，在真空条件下，一切物体下落的快慢相同（图 2-5-2 到图 2-5-4）。



▲ **图2-5-2** 牛顿管实验



▲ **图2-5-3** 在真空实验室里拍摄的羽毛和苹果同时开始下落的频闪照片



▲ **图2-5-4** 月球上的落体实验：1971 年阿波罗15号（Apollo 15）登月，宇航员大卫·斯科特在没有空气的月球上将一根羽毛和一把铁锤同时释放，发现它们同时竖直地落到月球表面

物理学中把只在重力作用下，物体由静止开始下落的运动称为**自由落体运动**（free fall）。严格地说，只有在真空中由静止开始下落的运动才是自由落体运动。生活中的落体运动是在重力和空气阻力的共同作用下的运动，但在

空气阻力的影响很小而可以忽略的情况下（例如实心的金属小球在空气中的落体运动），且若下落高度不是很大，则可以近似地看作自由落体运动。

通过讨论，我们应该牢记一个很重要的科学观点：在谈及物理现象和物理规律时，首先应该弄清楚现象和规律发生的条件。

伽利略对落体运动规律的探究

问题提出　伽利略对落体运动的研究，不仅要推翻亚里士多德的观点，更重要的是要找出落体运动具体遵循的规律。

提出猜想　在伽利略时代，实验的技术方法和手段都十分原始和简陋，要探索运动规律并不容易。为了寻求落体运动的规律，伽利略进行了反复思考，在“自然界总是习惯于运用最简单和最容易的手段行动”的哲学信念引导下，他提出了一个大胆的猜想：物体下落的过程是一个速度随时间均匀增大的过程，其速度与时间成正比，即 $v \propto t$。

基于 $v \propto t$ 的假设，通过构造几何图形进行推理，伽利略得出自由落体运动应满足 $x \propto t^2$ 的推论。

实验验证　伽利略由猜想假设，进行数理推演得到的落体运动规律，到底是否符合实际呢？这需要进行实验验证。那么他是如何检验呢？

我们都知道，物体下落过程中速度增加很快，在当时的技术条件下很难进行实验测量。伽利略发挥他的才智和创造力，采用了一个先“转换变通”，后“合理外推”的巧妙方法。如图2-5-5所示，他让一个黄铜小球从阻力很



▲ 图2-5-5

小、倾角为α的斜槽上滚下，这样的设计，运动的路程可以事先设定，只要测出运动时间即可。

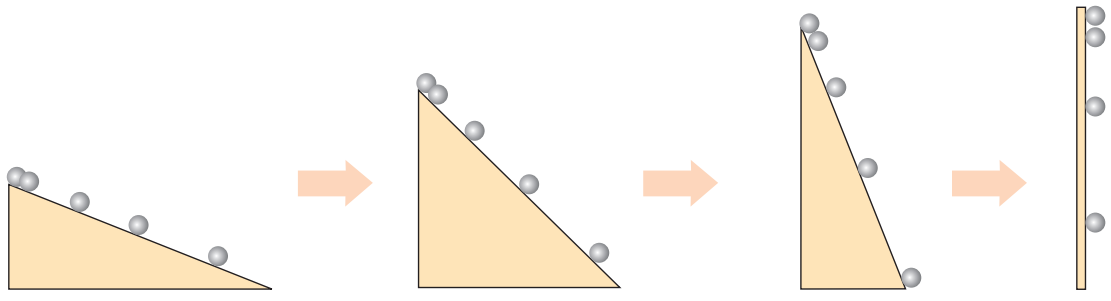
◎ 伽利略测定时间的方法

把一个盛水的大容器放在高处，在容器底部焊上一根直径很小的能射出细流的水管。在每一次小球滚下的时间内，我们把射出的水收集在一个小玻璃杯中。在精密的天平上称量所收集的水的质量，这些质量的差别和比例告诉了我们时间的差别和比例。

先让小球从顶端沿斜槽滚下，并记录下降到槽底所需的时间；再让小球从槽的$\frac{1}{4}$长度上滚下，测得它下降的时间后，伽利略发现后者是前者的一半。接着尝试别的距离，把球滚过整个长度的时间与滚过$\frac{1}{2}$、$\frac{2}{3}$、$\frac{3}{4}$或者任何分数长度的时间作对比，总可以发现：通过的距离之比等于时间的平方之比。即一个由静止开始滚下的小球到每个相等的时间间隔末，运动的距离之比为1∶4∶9∶16……这也完全证实了小球沿光滑斜面向下的运动符合$x \propto t^2$，即$v \propto t$，证实了斜面上滚下的小球速度与时间成正比的猜想。

合理外推 但是斜面上运动并不等于竖直方向的落体运动，怎么办？

接着，伽利略将斜面角度不断增大，实验结果仍然不变。于是伽利略就将上述结果进行合理外推：当斜面的倾角逐渐加大直到90°，小球就成为落体运动，小球的运动仍应当满足下落距离与时间的平方成正比的关系。（图2-5-6）



▲ 图2-5-6

自由落体运动的规律

若$v \propto t$，则v可表示为$v = kt$，即

$$k = \frac{v}{t} \qquad ①$$

由于自由落体运动的初速度v_0为零，由加速度的定义式可知，初速度为零时

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{v_t}{t} \qquad ②$$

比较①②两式可知，k 即为自由落体的加速度a，有

$$v = at$$

这说明自由落体运动是初速度为零、加速度a恒定的匀加速直线运动，它的位移

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

爱因斯坦高度赞扬伽利略的成就及方法，并指出："伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，它标志着物理学的真正开端。"

自由落体加速度

使用不同物体进行的反复实验表明，在同一地点，一切物体自由下落的加速度都相同，这个加速度叫作自由落体加速度，也叫作**重力加速度**（gravitational acceleration），通常用 g 表示。

重力加速度的方向竖直向下，它的大小可以通过多种方法用实验测定。

精确的实验发现，在地球上不同的地方，g的大小是不同的，在赤道海平面处g = 9.780 m/s^2，在北京g = 9.801 m/s^2。一般的计算中，为了简便，可以取g = 9.8 m/s^{2}或g =10 m/s^2。

一些地区的重力加速度值

地区	赤道（海平面）	广州	上海	北京	莫斯科	北极
纬度	0°	23°06′	31°12′	39°56′	55°45′	90°
重力加速度g/（m·s^{-2}）	9.780	9.788	9.794	9.801	9.816	9.832

例题示范

问题 小明在野外发现一口枯井，他捡起一颗石子，从井口处无初速释放，同时用手机开始计时，直到他听见石子撞击井底的声响，记录的时间是1.56 s。请协助他计算一下这口枯井有多深。

分析 石子在空气中运动，空气阻力可以忽略，因此石子的运动可以按自由落体运动处理，经历时间$t = 1.56\ \mathrm{s}$。

解 石子自由落体运动的总位移即为井的深度，有

$$h = \frac{1}{2} gt^2 = \frac{1}{2} \times 9.8\ \mathrm{m/s^2} \times (1.56\ \mathrm{s})^2 \approx 11.9\ \mathrm{m}$$

拓展 （1）只有在真空中的运动才真正没有空气阻力。石子的运动之所以可以忽略空气阻力，原因有两点：一是石子的表面积较小，受到的空气阻力与重力比较可以忽略；二是石子在空气中运动的距离较短，最终速度也不大，而空气阻力一般与速度的二次方成正比，因此这种情况下可以忽略。

（2）石子落到井底发出声响，传回地面是需要一定时间的，但声音在空气中传播速度在340 m/s左右，对于只有十几米的距离来说，传播时间很短，因此也可以忽略。

自我评价

1. 甲物体的质量是乙物体的5倍，甲从H高处自由落下，乙从$2H$高处与甲物体同时自由落下。不计空气的影响，在它们落地之前，下列说法中不正确的是（　　）

A. 两物体下落过程中，在同一时刻甲的速度比乙的速度大

B. 下落1 s末，它们的速度相同

C. 各自下落1 m时，它们的速度相同

D. 下落过程中甲的加速度比乙的加速度大

2. 一物体从H高处自由下落，经时间t落地，则当它下落到$\frac{t}{2}$时刻时，离地高度是多少？速度多大？

3. 细雨霏霏，在一个楼房的屋檐边缘，每隔一定时间有一水滴落下。若某一水滴共用时1.2 s落到地面时，恰好有另一水滴离开屋檐开始下落，并且空中还有另外两滴水滴正在下落，求：（为计算简便，取$g = 10\ \mathrm{m/s^2}$）

（1）此屋檐离地的高度；

（2）某一水滴落地的瞬间，空中的两滴水滴分别距离地面的高度。

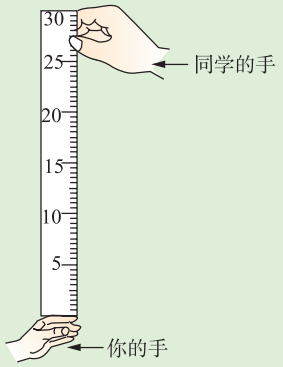
4. 长为5 m的竖直杆从高层楼房房顶自由下落，在这个杆的下方距杆的下端5m处有一面广告牌，若这面广告牌的高度也是5 m，则这根杆通过广告牌的时间为多长？

发展空间

实验室

测一测你的反应时间

如图 2-5-7 所示，两位同学合作，可以用毫米刻度尺测出自己的反应时间。建议课下测一测，并将自己的尺子改造成“反应时间尺”。



▲ 图2-5-7

课外阅览

伽利略简介

伽利略·伽利莱，意大利物理学家、数学家、天文学家及哲学家，科学革命中的重要人物，出生于意大利北部佛罗伦萨一个贵族的家庭。1581 年，17 岁的伽利略进入著名的比萨大学，按照父亲的意愿，他当了医科学生。但他对医学并没有多大兴趣，而是对古希腊的物理学（自然哲学）及亚里士多德、德谟克利特和阿基米德的著作着迷。他在科学上的创造才能，在青年时代就显示出来了，1583 年，当 19 岁的伽利略还是比萨大学的医科学生时，就发明了能测量脉搏速率的摆式计时装置。后来他的兴趣转向了数学和物理学，1589 年，比萨大学便聘请他任教，讲授几何学与天文学，第二年他发现了摆线。

由于伽利略在科学上的独创精神，不久就跟拥护亚里士多德传统观点的人们发生了冲突，遭到对手们的排挤，不得不在 1592 年辞去比萨大学的职务，转而到威尼斯的帕多瓦大学任教。在帕多瓦，他深入而系统地研究了落体运动、抛射体运动、静力学、水力学以及一些土木建筑和军事建筑等；他发现了惯性原理，研制了温度计和望远镜。1609 年，伽利略用自创的天文望远镜（后被称为伽利略望远镜）来观测天体。他发现了月球表面的凹凸不平，并亲手绘制了第一幅月面图。1610 年 1 月 7 日，伽利略发现了木星的四颗卫星，为哥白尼学说找到了确凿的证据，标志着哥白尼学说开始走向胜利。借助于望远镜，伽利略还先后发现了土星光环、太阳黑子、太阳的自转、金星和水星的盈亏现象、月球的周日和周月天平动，以及银河由无数恒星组成等等。这些发现开辟了天文学的新时代，为了纪念伽利略的功绩，人们把木卫一、木卫二、木卫三和木卫四命名为伽利略卫星。

1610 年，伽利略接受了图斯卡尼大公爵的邀请，到罗马担当大公爵的宫廷数学家兼哲学家。伽利略这样做的目的是希望大公爵对他的科学研究给予资助。在罗马期间，伽利略为了确立新的自然研究法——实验法的地位，又同教会的唯心论世界观进行了激烈的斗争，这就更加激怒了教会。1632 年，他的名著《关于两大世界体系的对话》出版，但立即被教会列为禁书。1633 年 6 月 22 日，伽利略受到宗教法庭审判，并被判终身软禁，成了“宗教裁判所”的囚徒。1638 年，伽利略在荷兰出版了《关于两门新科学的对话》一书，对自己多年来在力学方面的研究进行了总结。

伽利略是文艺复兴后期近代实验科学的创始人，特别是在力学方面有着很深的造诣，学术上硕果累累。他通过大量的观察和实验总结出了惯性定律、自由落体运动规律和相对性原理，发现了单摆振动的等时性原理等，为牛顿的理论体系的建立奠定了基础。他用自制的 33 倍望远镜观察天象，发现了一系列令人震惊的天文现象。他坚持“自然科学书籍要用数学来

书写”的观点，倡导实验和理论计算相结合，用实验检验理论的推导，这种研究方法对之后的科学研究工作具有重大的指导意义。

1642 年 1 月 8 日，伽利略在比萨逝世，享年 78 岁。

感悟 · 启迪

物理学的重要价值不仅在于帮助人们认识物质世界的规律，还在于能够进行技术创新，创造文明、造福人类。匀变速直线运动规律的应用远不限于飞机跑道、飞机、车辆的制动系统的设计，还广泛应用于科学技术多个领域，如火箭发射、高铁列车运行图的编制、粒子加速器的设计等。同学们可以收集资料、互相交流。

400多年前，伽利略能够在原始的实验条件下，成功地完成“落体运动规律”难题的研究，从中你能悟出什么呢？

科学研究首先要有智慧，能够敏锐地提出问题，其次还需要坚持不懈地去探索，把问题变成科学猜想和假设。如果提出的假设无法进行实验验证，就应该通过数理推演，把科学假设转变成可以付诸实验的形式，然后千方百计地创造条件，去证实自己的设想。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 从简单的入手，这是生活中的常识，也是科学研究中正确的思维方法。自然界物体的机械运动一般都很复杂，我们初中学习最简单的匀速直线运动，现在进一步学习变速直线运动则从最简单的匀变速直线运动入手，正是按照循序渐进的正确道路前进。

2. 打点计时器是一种并不复杂的仪器，但它却能在研究直线运动的过程中扮演重要的角色，在今后的学习中它还将大显身手，我们要熟练地掌握它。

3. 物理学的精髓在于能把复杂的自然现象整理归纳成很简单的几条规律，而这些规律能够应用广泛、解决多方面的问题。匀变速直线运动的规律就是如此，用两个公式（速度方程和位移方程）就能概括。在今后的学习中你会有更多、更深的体会。

• 自主小结

1. 匀变速直线运动是加速度保持不变的直线运动，它的 $v-t$ 图像是一条倾斜的直线，图像的斜率等于加速度，图像与两个坐标轴所围的“面积”等于这段时间的位移。

2. 匀变速直线运动的规律概括起来就是两条，用公式表示是

$$v_t = v_0 + at$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

3. 自由落体运动是初速度为零、加速度为 g 的匀加速直线运动。真正的自由落体运动只有在真空的环境中才存在，但较重的实心物体在下落高度不大的情况下，空气阻力可以忽略，因此可以按照自由落体运动处理。

• 相互交流

1. 拿到一条打点计时器打出的纸带，你有哪些方法判断它记录的是不是匀变速直线运动？

2. 在已经确定纸带做的是匀变速直线运动的情况下，你有哪些方法可以求出它的加速度？

3. 学习过伽利略对自由落体运动的研究后，你有什么收获或体会？

本章复习题

1. 以 20 km/h 的速度行驶的汽车，制动后能在 2 m 内停下来，如以 40 km/h 的速度行驶，则它的制动距离应该是（　　）

A. 2 m　　B. 4 m

C. 6 m　　D. 8 m

2. 如图所示的一辆农用“小四轮”拖拉机漏油。假如它在平直公路上行驶，每隔 1 s 漏下一滴，一位同学根据漏在路面上的油滴分布，分析“小四轮”的运动情况（已知拖拉机的运动方向）。下列说法中正确的是（　　）



▲ 第2题图

A. 当沿运动方向油滴始终均匀分布时，拖拉机可能做匀速直线运动

B. 当沿运动方向油滴间距逐渐增大时，拖拉机一定在做匀加速直线运动

C. 当沿运动方向油滴间距逐渐增大时，拖拉机的加速度可能在减小

D. 当沿运动方向油滴间距逐渐增大时，拖拉机的加速度可能在增大

3. 一物体以初速度v_0= 20 m/s 沿光滑斜面匀减速向上滑动，当上滑距离 s_0= 30 m 时，速度减为v_0/4。物体恰滑到斜面顶部停下，则斜面长度为（　　）

A. 40 m　　B. 50 m

C. 32 m　　D. 60 m

4. 物体做直线运动，在 t 时间内通过的路程为 s，在中间位置 $s/2$ 处的速度为v_1，且在中间时刻 $t/2$ 处的速度为v_2。则v_1和v_2的关系错误的是（　　）

A. 当物体做匀加速直线运动时，$v_1 > v_2$

B. 当物体做匀减速直线运动时，$v_1 > v_2$

C. 当物体做匀速直线运动时，$v_1 = v_2$

D. 当物体做匀减速直线运动时，$v_1 < v_2$

5. 如图所示，长 100 m 的列车匀加速通过长 1000 m 的隧道，列车刚进隧道时的速度是 10 m/s，完全出隧道时的速度是 12 m/s，求：

（1）列车过隧道时的加速度是多大？

（2）通过隧道所用的时间是多少？



▲ 第5题图

6. 一物体从斜面顶端沿斜面由静止开始做匀加速直线运动，最初3s内的位移为 s_1，最后3s内的位移为 s_2。已知 $s_2 - s_1 = 6$ m，$s_1 : s_2 = 3 : 7$，求斜面的总长。

7. 在同一水平面上，一辆小车从静止开始以 1 m/s^2 的加速度前进，有一人在车后与车相距 25 m 处，同时开始以 6 m/s 的速度匀速追车，人与车前进的方向相同，则人能否追上车？若追得上，求追上时小车的速度；若追不上，求人与车的最小距离。



第三章

相互作用

主题一　常见的力

- 力　重力
- 弹　力
- 摩擦力

主题二　力的合成和分解

- 力的合成
- 力的分解

主题三　共点力的平衡

- 共点力作用下物体的平衡

在自然界中，大到天体星系，小至分子、原子乃至更小的微观粒子，无不处在与其他物体的相互作用之中，物理学中将这种相互作用称为力。

正是在力的作用下，航空母舰纵横四海，舰载机升降自如……，世间万物及其运动状态才变得有规律可循。力的概念是物理学大厦的基石之一。本章将学习三种比较常见的力：重力、弹力、摩擦力，以及共点力的合成与分解法则，并对共点力作用下物体的平衡问题做初步的研究。

1 力 重力



▲ 图3-1-1 “长征五号”

2016年11月3日，我国“长征五号”运载火箭（图3-1-1）在海南文昌发射场成功发射。这是我国新一代大推力运载火箭，其起飞质量达879 t，起飞推力约10 524 kN，具备近地轨道25 t、地球同步转移轨道14 t的运载能力。

力

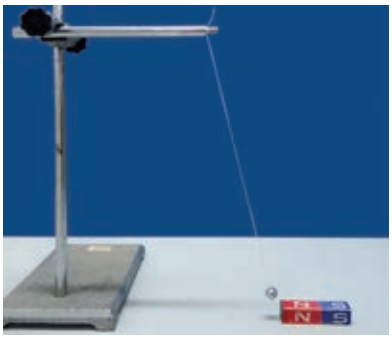
在人们的日常生活中，力的作用是经常遇到的。初中物理中，我们已经学习了有关力的一些初步知识。请你观察图3-1-2所示各例，思考所提出的问题。



（a）运动员站在跳板上，跳板会发生弯曲，跳板对运动员有作用力吗？



（b）在水平冰面上将冰壶推出后，为什么运动员可以通过刷冰来控制冰壶的运动呢？



（c）悬挂铁质小球的细线为什么偏离了竖直方向？

▲ 图3-1-2

讨论交流

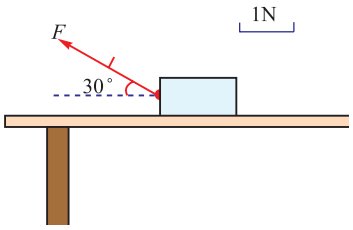
根据对图3-1-2的观察和分析，结合在初中所学的知识，你认为什么是力，你能说出哪些常见的力？力能产生哪些作用效果？如何形象地描绘力？

力（force）是物体与物体之间的一种相互作用。这种相互作用可以改变物体的运动状态，使物体的速度大小或速度方向发生变化，如图3-1-2（c）中原本静止的铁质小球受到磁铁的吸引力而摆动起来。

物体在力的作用下可以产生形变，如图 3-1-2（a）中跳板向下弯曲就是因为运动员对跳板施加了压力。

力的大小可以用弹簧测力计等工具进行测量。在国际单位制中，力的单位是**牛顿**，简称牛，符号是 N。

力是矢量，除了大小，力还具有方向。力的大小、方向、作用点不同，它的作用效果就不同。通常把力的大小、方向、作用点称为力的三要素。我们可以用一根带箭头的线段来表示力这个矢量。线段按照一定的比例（标度）画出，它的长短表示力的大小，它的指向表示力的方向，箭尾（或箭头）表示力的作用点，线段所在的直线叫作力的作用线，这种力的表示方法叫作力的图示。图 3-1-3 中带箭头的线段表示作用在木块上的力大小为 2N，方向为斜向左上方并与水平方向成 30°。



▲ **图3-1-3**　力的图示

分析力学问题时，在许多情况下，只需画出力的示意图，即只要表示出力的方向和作用点就可以了。

在力学范围内常见的力有重力、弹力、摩擦力，其中重力为非接触力，弹力、摩擦力为接触力。后面的学习中我们还会见到拉力、压力、支持力、动力、阻力等不同名称的力。实质上，它们是上述三种力在不同作用效果时的另一种称谓。

重力及其大小和方向

讨论交流

我们在初中已经学过有关重力的一些知识，图 3-1-4表示在地球表面上用弹簧测力计测定物体所受重力的情形。为了能更好地说明问题，这张图把一个真实的情景夸大了。请观察后思考以下问题。

1. 什么是重力？
2. 重力是如何测定的？
3. 重力的方向又如何？



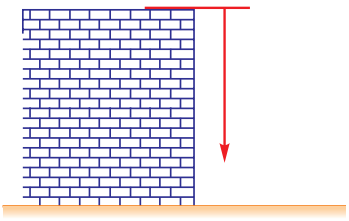
▲ **图3-1-4**　用弹簧测力计测量物体所受的重力

地球表面的一切物体都会受到地球的吸引，由于地球的吸引而使物体受到的力叫作**重力**（gravity）。初中时我们已经知道，物体所受的重力G与物体的质量m的关系是

$$G = mg$$

式中的比例系数g = 9.8 N/kg。此系数就是前面已经学习过的自由落体加速度（即重力加速度）。

重力的方向竖直向下，与水平面成垂直关系。挂有重物的细线，静止时总是沿竖直方向，利用这个特点可以制成重垂线，建筑工人可以用它来检验墙体是否竖直，如图3-1-5所示。



▲ 图3-1-5 重垂线

重心

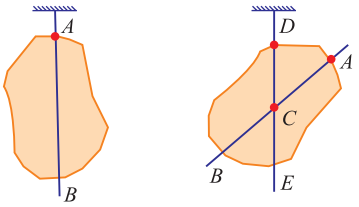
一个物体的各部分都受到重力的作用，从效果上看，可以把物体各部分受到的重力视为集中作用在某一点，这个点就是重力的作用点，叫作物体的**重心**（center of gravity）。

活动 | 确定薄板的重心

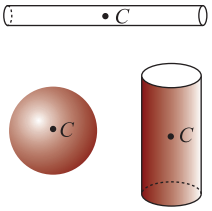
薄板的重心位置一般就位于板上某处。取一块边界不规则的薄木板，你能较快捷地找到它重心的位置吗？你采用的方法是依据了什么原理？

如图3-1-6所示，我们可以先在A点把薄板悬挂起来，通过A点画一条竖直线AB；然后再选另一处D点把薄板悬挂起来，同样通过D点画出一条竖直线DE；AB和DE的交点C就是薄板的重心。这个方法利用了二力平衡的知识，同学们可以自己分析一下其中的道理。

质量分布均匀的物体，重心的位置只跟物体的形状有关。具有中心对称的均匀物体，重心位于其对称中心处。例如，均匀细直棒的重心在棒的中心，均匀球体的重心在球心，均匀圆柱体的重心在柱体中心，如图3-1-7所示。

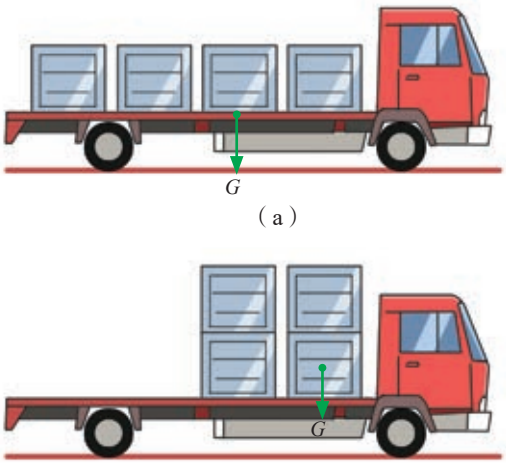


▲ 图3-1-6　寻找薄板的重心



▲ 图3-1-7　质量分布均匀的规则物体的重心

质量分布不均匀的物体，重心位置除了与物体的形状有关，还与物体内质量的分布有关。载重汽车重心的位置随着装货的多少和装货位置的变化而变化，如图3-1-8所示。



▲ 图3-1-8　载重汽车的重心

重力的测量

在实验室里，重力的大小可以用弹簧测力计测量。如图3-1-9所示，将物体竖直悬挂在测力计的挂钩下，物体静止时测力计的示数就等于物体受到的重力。商店中常用托盘秤来称量商品的重力，如图3-1-10所示就是一种常见的托盘秤。测量时，要将秤放在水平面上。

市场上普遍使用的电子秤测量的也是物体所受的重力。在秤面下方装配有力敏电阻，它在被拉伸或挤压时阻值会发生变化，能将受力大小转化为电信号。当秤面上放上物体时，电子秤内力敏电阻的阻值会发生变化，相应电流也就随之改变。这样我们就能直接从电子秤显示器上读出物体的质量了，如图3-1-11所示。

有同学疑惑："可是我从显示器上读到的明明是质量，不是重量呀？"你能给他解释一下吗？



▲ 图3-1-9 弹簧测力计



▲ 图3-1-10 托盘秤



▲ 图3-1-11 电子秤

自我评价

1. 力能脱离物体而存在吗？单个物体能否产生力的作用？举出几个实例，说明力是物体之间的相互作用，并指出每个力的施力物体和受力物体。

2. 请你用一个点代表受力物体，作出以下几个力的图示，并指出施力物体和受力物体。

（1）水平桌面对放在桌面上的书施加的5 N支持力；

（2）人用20 N的力沿与水平方向成30°角斜向上拉行李箱；

（3）沿着滑梯下滑的质量$m = 20$ kg的小孩受到的重力；

（4）斜向上抛出的质量$m = 4$ kg的铅球受到的重力。

3. 蚂蚁可称为“六脚大力士”。一只质量约为 5 mg 的蚂蚁，能举起质量是它自身质量 20 倍的树枝，蚂蚁对这个树枝的支持力约是多大？

4. 把一个放在水平地面上、长为l的匀质链条竖直向上刚好拉直时，它的重心位置升高多少？把一个放在水平地面上、棱长为a的均匀正方体，绕其一条棱翻转90°，该过程中其重心升高的最大高度是多少？

5. 几何学中把三角形三条中线的交点叫作重心。物理学中也有重心的概念。均匀等厚的三角形薄板的重心是不是与几何学上的重心位于同一点上？请你选择合适的器材，运用实验的方法对此作出判断。

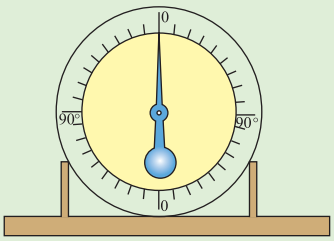
发展空间

实验室

制作倾角仪

你可以自制一只如图 3-1-12 所示的倾角仪：将竖直圆盘固定在底面平整的支架上，盘面圆周均匀划分为 360°并标上刻度。用薄铁皮剪制出指针形状后，中心打孔磨光滑，其尾端再粘接上一块小铁片，即可作为指针使用。将制作好的指针，通过中心小孔穿在一根固定于圆盘中心的水平转轴上，使之能绕轴在竖直面内自由转动，倾角仪就制作完成了。

倾角仪在使用前需要调节好圆盘刻度的位置，使仪器放置在水平台面上时指针示数为零。用该仪器不仅能检验平面是否水平，而且能测量平面的倾斜角度。



▲ **图3-1-12**　倾角仪

课外阅览

重力影响着我们的世界

在地球上，任何物体都会受到重力的作用。它们的运动和变化也会受到重力的制约（图 3-1-13 ～图 3-1-15）。

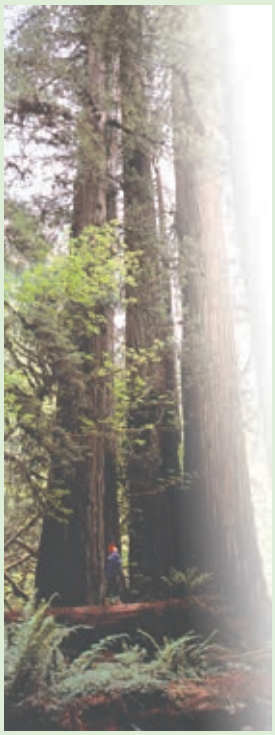
陆地上如果出现巨人，由于重力的作用，他的身体与常人相比，会变得不成比例的粗大、笨重。1638 年出版的意大利科学家伽利略所著的《关于两门新科学的对话》中，就有关于上述问题的精彩描述："在自然界也不可能产生超长尺寸的树，因为树枝会在它们的自重下折断；同样，如果人、马或其他动物增大到非常的高度，那么要构造它们的骨骼结构，并把这些骨骼结合在一起，执行它们的正常功能是不可能的，因为这种高度的增大只能通过采用一种比通常更硬更强的材料，或者增大骨骼的尺寸才能实现。这样就改变了它们的外形，以至于动物的外貌和形状呈现一种畸形。"



▲ **图3-1-13**　喜马拉雅山脉是地球上海拔最高的山脉。珠穆朗玛峰海拔达8848.86m，但由于重力作用，地球上山的高度会受到一定的限制



▲ **图3-1-14**　黑犀牛之所以不被自身的重力压垮，并能正常行动，是因为它的骨骼特别粗大

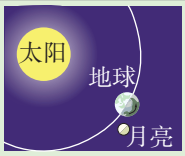
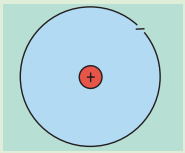


▲ **图 3-1-15**　世界上最高的植物是美洲红杉，它可高达 117 m，直径可达 11 m。但树木不能无限长高，这是因为重力的作用会使树木顶部叶子缺水，而且无限高大的树木自身的重力还会使树干碎裂

基本相互作用

现代物理学认为，自然界中所有的作用力，从本质上来说都可以归结为 4 种基本的相互作用：万有引力（gravitation）相互作用、电磁相互作用（electromagnetic interaction）、强相互作用（strong interaction）、弱相互作用（weak interaction）。物体所受的重力、天体之间的吸引力等都属于万有引力；我们平常所说的弹力、摩擦力、分子力、电荷之间的作用力、磁体间的作用力本质上都是电磁相互作用；原子核内部各质子、中子之间以核力紧紧地结合在一起，这种相互作用就是强相互作用。这种强相互作用随距离的增大而急剧减小，它的作用范围只有约 10^{-15}m；弱相互作用也是在原子核内部存在的一种相互作用，它的作用范围同样很小，但强度只有强相互作用的 10^{-12} 倍。

几种力的类型与大小

施力物体		受力物体	类型	作用力的近似值/N
太阳		地球	万有引力	3.5×10^{22}
地球		月亮	万有引力	2.0×10^{20}
氢原子核		核外电子	万有引力	4×10^{-47}
氢原子核		核外电子	电场力	8×10^{-8}
手		硬币	弹力	0.17
手		乒乓球	弹力	2.7×10^{-2}
网球拍		球	弹力	2×10^{3}
手		电灯开关	弹力	5
手		拉环	弹力	20
地面		人（起跑时，地面推动人前进）	摩擦力	3×10^{3}

❷ 弹　力

在“蹦极”运动中，人在自身所受的重力作用下下落，被拉伸的“蹦极”绳又会产生向上的力，把人拉上去。这种急剧下坠又快速上升的感觉，让人倍感新鲜刺激（图 3-2-1）。“蹦极”绳对人体的力属于弹力，下面我们一起来研究这类力。



▲图 3-2-1　“蹦极”运动

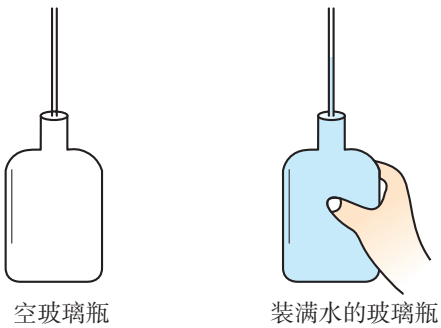
形变

物体在力的作用下形状或体积会发生变化，这种变化叫作**形变**（deformation）。在生活中，形变无处不在：拉伸的橡皮筋，弯曲的钓鱼竿，大风吹过的高层建筑，撑竿跳高中弯曲的竿子（图 3-2-2）……

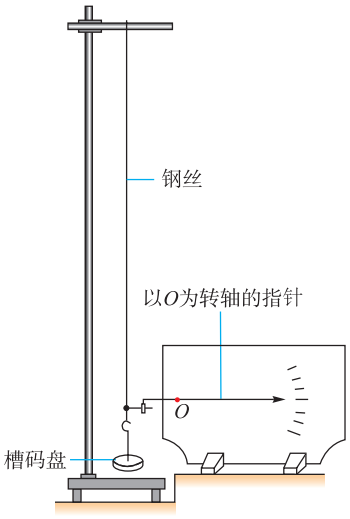


▲ 图 3-2-2　撑竿跳高

有些物体的形变很小，不容易观察，需要借助仪器将其“放大”才能观察到。如图 3-2-3 所示，当扁平玻璃瓶的瓶身受到挤压时，发生的形变肉眼不能看出。但是，将瓶中装满水，瓶口用中间插有细管的橡皮塞塞紧，再挤压瓶身时，就可以看到细管中的水柱高度在上下变化。这就是通过水柱的高度变化将微小形变“放大”了。又如图 3-2-4 所示，在槽码盘中逐渐增加槽码，可看到指针针尖向上偏转，表明钢丝在拉力作用下发生了微小的伸长形变。

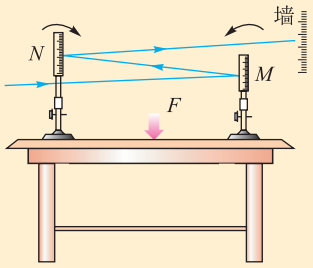


▲ 图 3-2-3　玻璃瓶的微小形变



▲ 图 3-2-4　钢丝的微小形变

观察思考



▲ **图3-2-5** 观察桌面的微小形变

如图 3-2-5 所示，在一张大桌子上放两个平面镜 M 和 N，让一束光依次被这两个平面镜反射，最后射到墙上，形成一个光点。按压两镜之间的桌面，再撤去按压的力，观察墙上光点位置的变化。这个现象说明了什么？



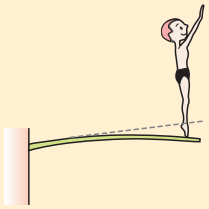
▲**图 3-2-6**

有些发生形变的物体在撤去外界的作用力后能够恢复原状，这种形变叫作**弹性形变**（elastic deformation）。如果形变过大，超过一定的限度，撤去作用力后物体不能完全恢复原来的形状，这个限度叫作**弹性限度**（elastic limit）。在弹性限度之内，橡皮筋、弹簧等发生的形变都是弹性形变。当撤去外力后物体的形变不能完全恢复原状，这种形变叫作**塑性形变**（plastic deformation）。橡皮泥的变形、铁丝的弯曲等形变都是塑性形变（图 3-2-6）。

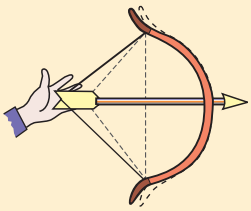
认识弹力

观察思考

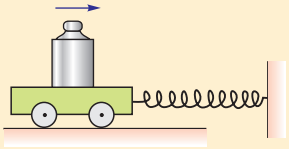
在图 3-2-7 中，人、箭、小车都受到了弹力的作用，这些弹力是怎么产生的？弹力的方向有什么特点？



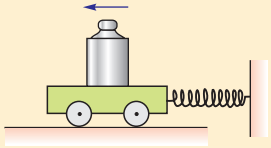
（a）压弯的跳板弹起运动员



（b）张紧的弦把箭射出



（c）伸长后的弹簧使小车向右加速

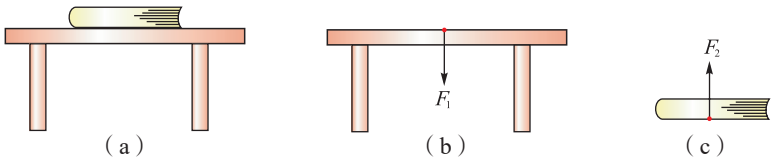


（d）压缩后的弹簧使小车向左加速

▲ **图3-2-7**

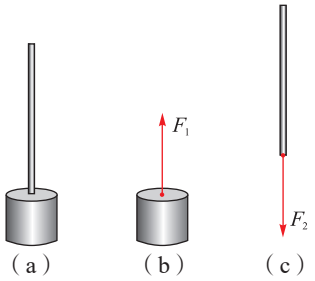
发生形变的物体，由于要恢复原状，会对与它接触的物体产生力的作用，这种力叫作**弹力**（elastic force）。通常所说的压力、支持力、拉力都是弹力。物体产生的弹力方向总是与该物体所发生的形变方向相反。

弹力无处不在。如图3-2-8所示，放在水平桌面上的书与桌面相互挤压，书和桌面都发生微小的形变：书的形变使书产生垂直桌面向下的弹力F_1，这就是书对桌面的压力［图（b）］。桌面的形变使桌面对书产生垂直桌面向上的弹力F_2，这就是桌面对书的支持力［图（c）］。由于这种相互挤压所发生的形变总是垂直于接触面，故压力和支持力的方向具有垂直于接触面而指向被压或被支持物体的特点。



▲ 图3-2-8

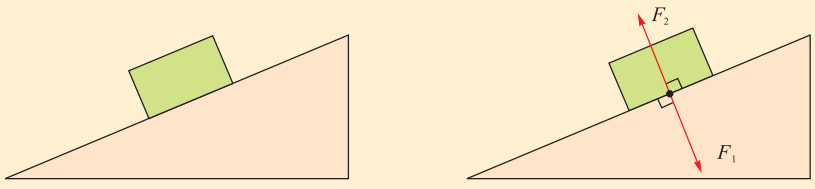
如图 3-2-9 所示，用绳子拉物体时，绳子产生了拉伸形变，致使它对物体产生弹力 F_1，这就是绳子对物体的拉力［图（b）］。物体产生的形变，致使它对绳子产生弹力 F_2，这就是物体对绳子的拉力［图（c）］。绳子对物体的拉力方向总是沿着绳子而指向绳子收缩的方向。



▲ 图3-2-9

活动

如图3-2-10（a）所示，物块放在斜面上。斜面与物块之间的弹力是怎样的？



▲ 图3-2-10

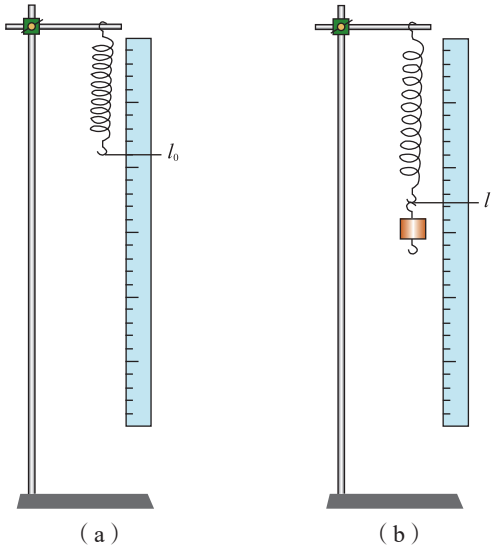
由于受到重力，物块与斜面之间相互挤压，物块与斜面在接触面上都发生了微小形变：物块的形变使它产生垂直斜面向下的弹力F_1，这就是物块对斜面的压力；斜面的形变使它对物块产生垂直斜面向上的弹力F_2，这就是斜面对物块的支持力［图（b）］。

实验：探究弹簧弹力与形变的关系

◎ 实验器材

铁架台，下端带挂钩的弹簧，100 g的钩码若干，刻度尺等（图3-2-11）。

在弹性限度之内，弹力的大小跟形变的大小有关系：形变越大，弹力也越大；形变消失，弹力随之消失。弹力与形变的关系一般来讲比较复杂，而弹簧的弹力与弹簧的伸长量（或压缩量）之间的关系则比较简单，我们可以通过实验来探究。



▲ 图3-2-11

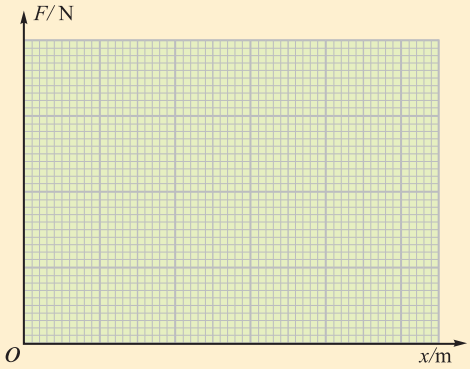
实验探究

1. 如图3-2-11（a）所示，将弹簧挂置于铁架台的横杆上，测出弹簧的原长（自然长度）l_0= _____ m。

2. 如图3-2-11（b）所示，在弹簧下端依次挂上1个、2个……相同的钩码。根据二力平衡可知，静止时弹簧弹力的大小等于钩码所受重力的大小。分别测出弹簧静止时的长度l，计算出弹簧的伸长量$x=l-l_0$。

3. 把所测得的数据填写在下列表格中。

序号	1	2	3	4	5
钩码所受重力G/N					
弹簧长度l/m					
弹力的大小F/N					
弹簧的伸长量x/m					



▲ 图3-2-12

4. 以x为横轴，F为纵轴建立坐标系，根据表中的数据，在图3-2-12的坐标纸上描点，画出F–x图像。

5. 分析弹力F与弹簧伸长量x的关系。

大量的实验研究表明：在弹性限度内，弹簧弹力 F 的大小与弹簧的伸长（或缩短）量 x 成正比。用公式表示为

$$F = kx$$

比例系数 k 称为弹簧的**劲度系数**（coefficient of stiffness），它的国际单位制单位是牛顿每米，单位的符号是 N/m。劲度系数取决于弹簧本身的结构（材料、匝数、直径等）。这个规律是胡克（图 3-2-13）发现的，叫作**胡克定律**（Hooke law）。



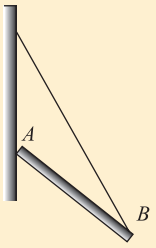
图 3-2-13　罗伯特·胡克（Robert Hooke，1635—1703），英国科学家。他提出了描述材料弹性的基本定律——胡克定律

自我评价

1. 如图 3-2-14 所示，木棒 AB 的一端支在竖直墙面上，另一端被细绳斜拉着处于静止状态。请画出木棒所受弹力的示意图。

2. 放在水平桌面上的书对桌面的压力大小等于书受到的重力。能不能说书对桌面的压力就是重力？为什么？

3. 一根弹簧在 50 N 的力的作用下，长度为 10 cm，若所受的力再增加 4 N，则长度变成 10.4 cm。设弹簧的形变均处于弹性限度之内，计算弹簧的原长及劲度系数。



▲ 图3-2-14

发展空间

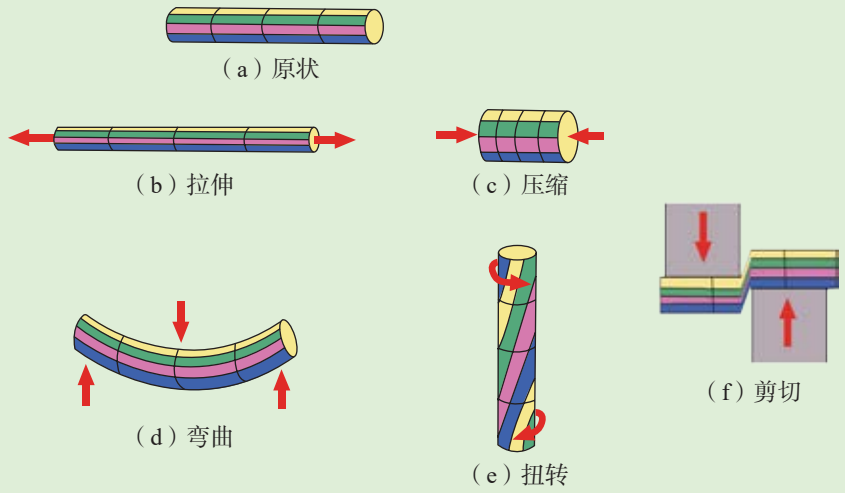
实验室

选取合适的材料（如橡皮筋），制作一把“测力计”，并写出这把“测力计”的使用说明书。

课外阅览

形变的类型

如图 3-2-15 所示是形变的几种类型。请你举例说明日常生活中利用这几种形变的实例，并说明使用的目的（如减缓振动、获得弹力等）。



▲ 图3-2-15

3 摩擦力



▲ 图3-3-1 爬杆训练

如图3-3-1所示是消防战士在进行徒手爬杆训练。战士采用双手互换握铁管的方式保持身体匀速上升，到达顶端后又采用“手握腿夹”的方式使身体匀速下滑到地面。消防战士在匀速上升和匀速下滑的两个过程中，所受到铁管的摩擦力大小和方向相同吗？摩擦力的种类相同吗？

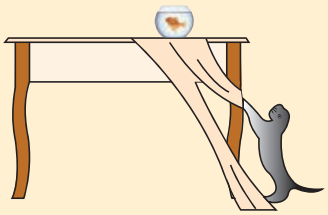
认识滑动摩擦力

两个物体相互接触并挤压，当它们沿接触面发生相对滑动时，每个物体的接触面上都会受到对方施加的阻碍相对运动的力，这种力叫作**滑动摩擦力**（sliding friction force）。滑动摩擦力的方向总是沿着接触面，并且跟物体的相对运动方向相反。

所谓相对运动方向，是指在发生相对运动的两个物体中，把其中一个物体当作参照物（视作静止）时，另一个物体的运动方向。

讨论交流

如图3-3-2所示，一只猫在桌边猛地将桌布从鱼缸下向右拉出，鱼缸在桌面上继续向右滑行了一段距离后停下。试讨论：



▲ 图3-3-2　猫拉桌布

（1）鱼缸在桌面上滑动的过程中，桌面对鱼缸底的滑动摩擦力沿什么方向？鱼缸底对桌面的滑动摩擦力沿什么方向？

（2）鱼缸在桌布上滑动的过程中，桌布对鱼缸底的滑动摩擦力沿什么方向？鱼缸底对桌布的滑动摩擦力沿什么方向？

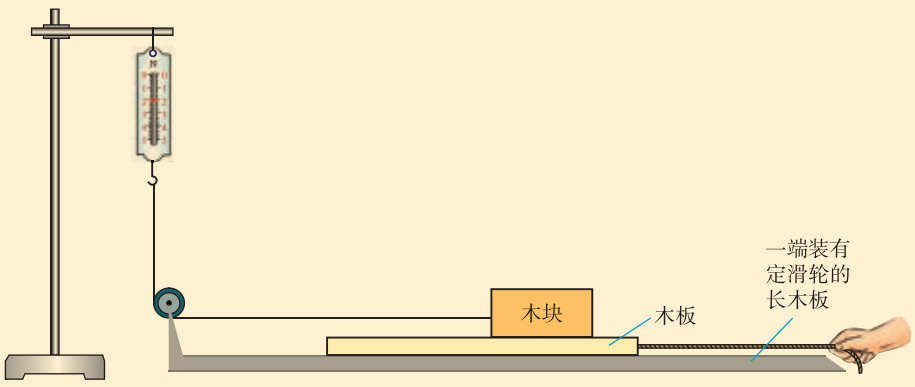
研究滑动摩擦力的大小

通过初中物理的学习我们已经知道，滑动摩擦力大小与接触面的情况、压力的大小有关。那么，它们之间有什么定量关系呢？

实验探究 | 研究滑动摩擦力的大小

如图 3-3-3 所示，将一木块和木板叠放于水平桌面上，弹簧测力计一端固定于铁架台横杆上，另一端用细线与木块相连。当拉动木板在桌面上滑动时，木块受到木板向右的滑动摩擦力 f。根据二力平衡，此力与细线对木块的拉力 F 大小相等。由于拉力 F 的大小可通过弹簧测力计示数读取，所以读出弹簧测力计示数即得到了木块受到的滑动摩擦力大小。实验可按照下列方法进行。

通过在木块上加砝码的方法改变压力 N，分别测出各次滑动摩擦力 f 的大小；



▲ 图3-3-3

把木板换成玻璃板，重复上面的实验；

把测得的数据填入下表，并完成有关计算。

压力N/N	滑动摩擦力f/N	
	木块与木板	木块与玻璃板
计算$\frac{f}{N}$		

完成上述实验后，请你和同学们讨论下列问题：滑动摩擦力f的大小与压力N的大小有什么关系？滑动摩擦力f的大小与接触面的材料有关系吗？

精确的实验研究表明：滑动摩擦力f的大小跟压力N成正比，也就是跟两个物体表面间的垂直作用力成正比，即

$$f=\mu N$$

其中比例系数μ叫作**动摩擦因数**（dynamic friction factor），它是两个力的比值，没有单位。它的大小与两个接触面的材料、粗糙程度等情况有关。

几种材料间的动摩擦因数

材　料	动摩擦因数
钢–钢	0.25
钢–木	0.40
钢–冰	0.02
木–木	0.30
木–冰	0.03
木–金属	0.20

例题示范

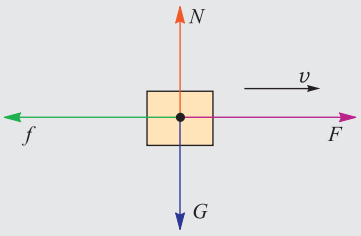
问题　在我国东北寒冷的冬季，人们常使用狗拉雪橇的方式进行交通运输，如图3-3-4所示。某一钢制滑板的雪橇，连同雪橇上的人与货物总重量为3.8×10^3 N，当狗沿着水平方向拉着它在水平冰面上匀速滑行时，需要提供多大的拉力？



▲ 图3-3-4　狗拉雪橇

分析　本题情景“狗拉雪橇”是一幅北方冬天极富特色的生活画面。为什么看起来不够高大的狗却能拉着比它们要重得多的雪橇在冰雪上飞奔？其中涉及的是一个较简单的力学问题。我们将在冰面上运动的雪橇及其上的人和货物，抽象成一个在水平面匀速运动的质点。该质点受到的滑动摩擦力由两接触面间的情况以及正压力大小所决定，匀速运动的特点表明拉力恰好与摩擦力大小相等，据此我们就能列出各物理量之间的关系式，再通过数学方法进行求解了。

解　用如图3-3-5所示的矩形表示雪橇，其在竖直方向受到重力G、冰面支持力N。在水平方向受到狗的拉力F、冰面的滑动摩擦力f。



▲ 图3-3-5

雪橇做匀速运动时，拉力F与滑动摩擦力f构成二力平衡，所以

$$F = f$$

而

$$f = \mu N$$

雪橇在竖直方向是静止状态，重力G与地面支持力N也构成二力平衡，所以

$$N = G$$

查阅上表可知：钢与冰之间的动摩擦因数$\mu = 0.02$。

代入数据后，得

$$F = 0.02 \times 3.8 \times 10^3 \text{ N} = 76 \text{ N}$$

狗要在水平方向施加76 N的力，才能拉着雪橇匀速前进。

拓展　（1）若狗在主人的驱使下猛然发力，拉力增大到100 N，此时的滑动摩擦力也会增大到100 N吗？为什么？

（2）依据本题所涉及的物理过程，你可以设计测量两页纸之间动摩擦因数的实验方案吗？

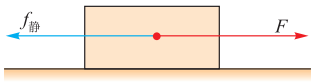
认识静摩擦力

活动

请按照如图3-3-6所示的方法，对箱子施加水平推力。在推箱子的过程中，要逐渐增加推力大小，直到将箱子推动为止。重复几次，体会每次箱子发生移动前和刚好移动时推力的情况。想一想，是什么力阻碍了箱子的移动？



▲ 图3-3-6 推箱子



▲ 图3-3-7

当我们用较小的力 F 水平向右推地面上的箱子时，箱子会保持静止状态。根据二力平衡，这时地面必然会对箱子产生一个与推力大小相等、方向相反的力，用来平衡推力。这个力就是箱子与地面之间的摩擦力，由于这时两物体之间处于相对静止状态，所以这时的摩擦力是**静摩擦力**（static frictional force），记作 $f_{静}$，如图 3-3-7 所示。

与没有受到推力作用时相比较，此时箱子虽然也没有发生移动，但推力正试图使它从静止开始运动，即箱子具有了相对地面向右运动的趋势。地面对箱子施加的这个静摩擦力，就是对这一趋势所作出的响应，从而阻碍相对运动的发生。可见，静摩擦力的方向总是沿着接触面，并且跟物体相对运动趋势的方向相反。

静摩擦力的大小及最大静摩擦力

在图3-3-6中，当我们用逐渐增大的力推箱子时，只要箱子还没有发生相对运动，都会受到地面的静摩擦力，而且静摩擦力的大小始终与推力的大小相等，推力越大，静摩擦力相应也越大。当推力突破某一特定值时，箱子将会滑动起来，此后箱子将不再受到静摩擦力。可见静摩擦力的增大存在一个极限，称为最大静摩擦力，记为 $f_{静max}$，其大小等于物体将要发生相对运动时受

到的推力。物体之间实际发生的静摩擦力 $f_{静}$ 在0与最大静摩擦力 $f_{静max}$ 之间，即

$$0 < f_{静} \leqslant f_{静max}$$

活动 | 粗测最大静摩擦力

如图3-3-8所示，将一物块放在水平桌面上，用弹簧测力计水平拉着。逐渐增大拉力大小直至物块滑动，此时拉力会突然变小。记下物块将要滑动时测力计的示数，此值即为物块与桌面间的最大静摩擦力。

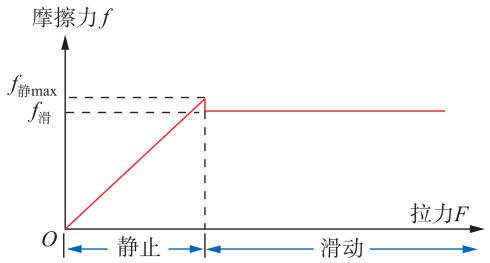
在物块上添加砝码，再次拉动物块，测量压力变化后物块与桌面间的最大静摩擦力。



▲ 图3-3-8

实验中，若在弹簧测力计的指针左侧轻塞一个小纸团，并可随指针移动，则它将可以记录指针到达的最大位置。

最大静摩擦力 $f_{静max}$ 与物体之间的正压力 N 成正比，还与接触面的材料及粗糙程度有关。在实际情况中，最大静摩擦力比滑动摩擦力略大（图3-3-9）。



▲ **图3-3-9**　物体从静止到滑动，所受摩擦力的变化情形

在人们日常生产和生活中，有许多利用静摩擦的事例。布匹是利用静摩擦将经线纬线紧密地交织在一起的；在大型超市中，站在斜坡式自动扶梯上的顾客，是利用了鞋底受到沿坡面向上的静摩擦力，来确保脚与坡面间的相对静止（图3-3-10）。在图3-3-11中，大力士能否拉动飞机，他的鞋与水平地面之间的最大静摩擦力能否达到拉动飞机时所需拉力的大小，是一个重要的因素。



▲ **图3-3-10** 自动扶梯靠静摩擦力使人一起运动



▲ **图3-3-11** 拉动飞机

自我评价

1. 滑动摩擦力的大小与哪些因素有关？它的方向如何？

2. 一只重量为 300 N 的沙发放在水平地板上，至少要用 100 N 的水平推力，才能将它推动。移动以后，只要用 90 N 的水平推力就能使它继续做匀速运动。试求：

（1）沙发与地板之间的最大静摩擦力有多大？

（2）沙发与地板之间的滑动摩擦力有多大？沙发与地板之间的动摩擦因数为多少？

（3）当用 120 N 的水平推力推沙发，沙发受到的摩擦力有多大？

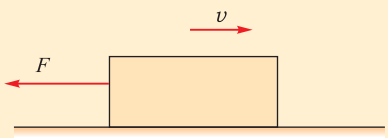
3. 一只圆柱形杯子，在下列情况下是否受到摩擦力？如果受到摩擦力，摩擦力朝什么方向？

（1）杯子放在粗糙的水平桌面上；

（2）杯子被握在手中，杯口朝上；

（3）杯子放在水平传送带上，并随传送带一起匀速运动。

4. 如图 3-3-12 所示，在水平面上向右运动的物体，所受重力为 200 N，物体和水平面之间的动摩擦因数为 0.1。在运动过程中，物体还受到一个水平向左、大小为 10 N 的拉力作用，求物体受到的摩擦力。



▲ **图3-3-12**

发展空间

走向社会

自行车（图3-3-13）是一种常用的交通工具，各部分零件的功能不同，在使用过程中，有些部分需要增大摩擦力，有些部分需要减小摩擦力。请对此进行研究，说说哪些部分需要增大摩擦力，如何增大摩擦力；哪些部分需要减小摩擦力，如何减小摩擦力。



▲ 图3-3-13　自行车

实验室

1. 如图 3-3-14 所示，将两本书逐页交叉对插在一起后，平放于桌面上。双手抓住书脊用力向两边拉，看看能否将它们分开，分析其中的原因。

2. 探究“正常步行时，脚底对地面静摩擦力的方向”。

人在水平地面上能正常步行，是靠鞋底与地面间的静摩擦力。观察人在长绒地毯上行走时留下的脚印，就能看出脚对地面的静摩擦力方向。长绒线头倒伏的方向，就是脚对地面作用的静摩擦力的方向。找一块长绒地毯试一试，看看前后脚掌对地面施加的静摩擦力方向有什么规律。



▲ 图3-3-14

感悟 · 启迪

物体间普遍存在相互作用，这是物质世界的基本特征。重力、弹力和摩擦力是力学范围内三种常见的相互作用，它们出现的场合不同，大小、方向和作用点遵循各自的规律。弄清这三种力的特性，是对机械运动的变化进行动力学研究的基础。

4 力的合成

几个力可以用一个力来替代



▲ 图3-4-1 提水

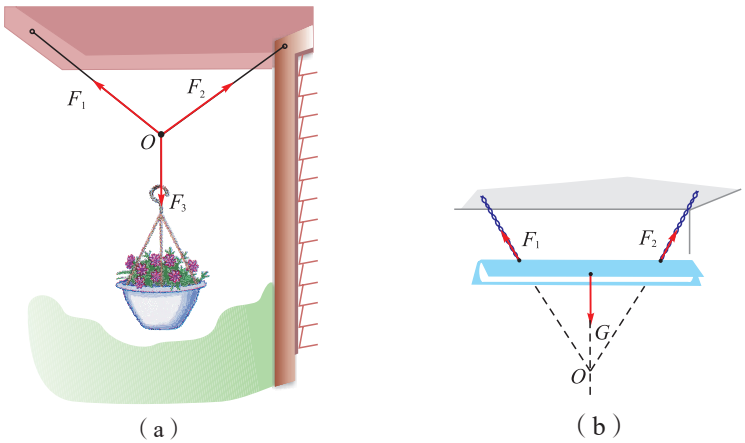
生活中常常有这样的事例：在同一个物体上，一个力的作用效果和两个或更多个力的作用效果相同。如图3-4-1所示，一个大人提一桶水让这桶水在半空中处于静止状态，两小孩提同一桶水同样可以让这桶水在半空中处于静止状态。

如果力 F 的作用效果与力 F_1 和 F_2 共同作用的效果相同，我们就称 F 为 F_1 和 F_2 的**合力**（resultant force），F_1 和 F_2 为 F 的**分力**（component force）。

求几个力的合力的过程叫作**力的合成**（composition of forces）。力的合成是一种等效替代的方法，即用一个力去替代几个共同作用的力，替代后产生的作用效果与原来相同。

等效替代是重要的科学思维方法，它可以使复杂的问题变得简单。

在这里，我们只研究**共点力**（concurrent force）的合成问题。所谓共点力，是指作用于物体上同一点，或者作用在同一个物体上且力的作用线相交于同一点的几个力。如图3-4-2所示的两种情况中的力都是共点力。把物体看成质点的情况下，作用在物体上的力都是共点力。

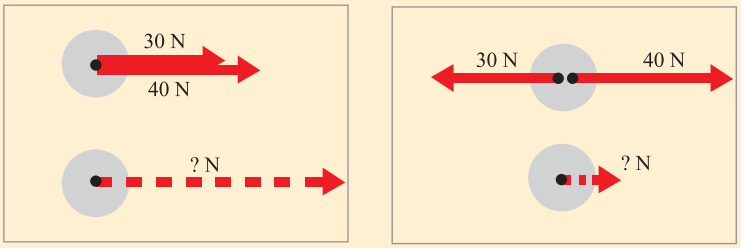


（a） （b）

▲ 图3-4-2 共点力

讨论交流

1. 同一直线上的两个力的合力怎么求？如图 3-4-3 中小球所受的合力大小是多少？合力的方向如何确定？



▲ 图3-4-3

2. 在图 3-4-1 中，假设这桶水的总重量是 100 N，大人和两个小孩提这桶水时，这桶水都处于静止状态。如果大人提这桶水时用力的大小为 F，两个小孩提这桶水时用力的大小分别为 F_1、F_2，那么 F 的大小是多少？F_1 和 F_2 两个数值相加是否等于 F？

同一直线上的两个力的合力，大小等于这两个力的大小的和或差，方向与较大的那个力的方向相同。这是我们在初中已经学习的内容。

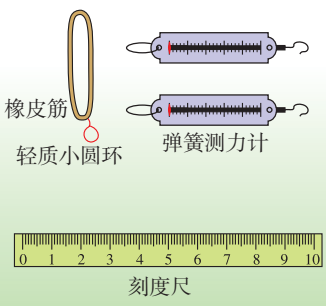
那么如果两个力互成一定角度，它们的合力大小与方向如何确定呢？这是我们要解决的问题。

实验：探究两个互成角度的力的合成规律

1. 实验所需器材如图 3-4-4 所示。在水平放置的薄木板上用图钉固定一张白纸，橡皮筋的一端固定在木板上的 K 点处，橡皮筋的自然长度为 KE。用一根细绳把橡皮筋的 E 端与轻质小圆环连接起来，如图 3-4-5（a）所示。

2. 从小圆环上再引出两根细绳，用两个弹簧测力计钩住这两根细绳，互成角度地用力 F_1 和 F_2 拉小圆环，使橡皮筋伸长。保持小圆环静止，将它此时所处的位置记为 O 点，如图 3-4-5（b）所示。用笔记下两个拉力 F_1 和 F_2 的方向，并记录它们的大小。

◎实验器材



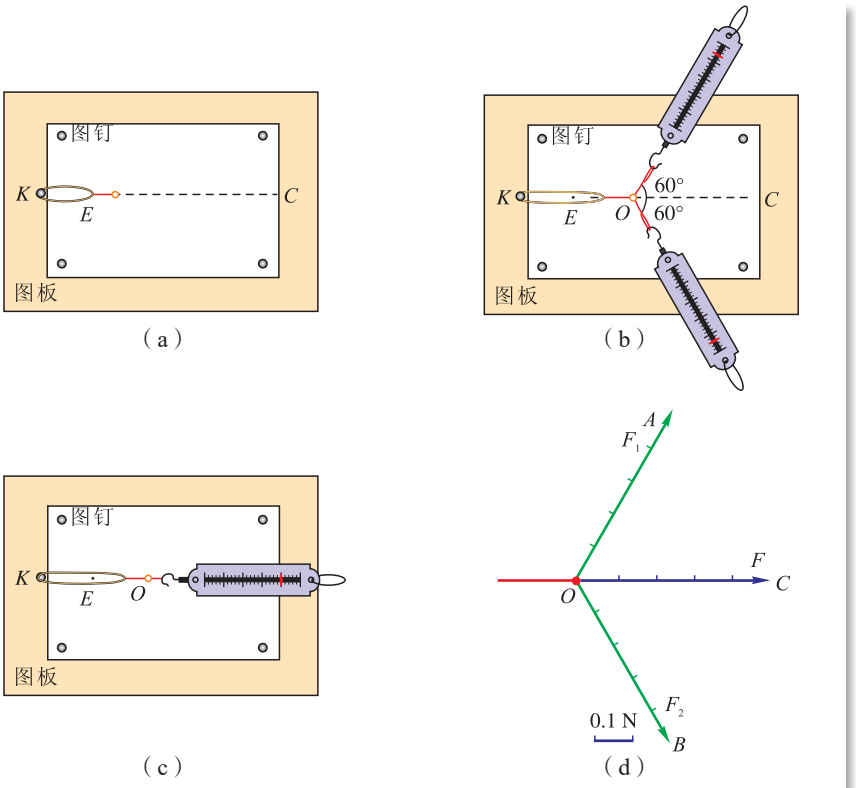
▲ 图3-4-4

我们说F_1、F_2共同作用在小圆环上产生的效果，与F单独作用在圆环上产生的效果相同，是指它们都与橡皮筋的弹力平衡，从而小圆环的运动状态不发生改变。

想一想，为什么两次要把小圆环拉到相同位置？

3. 撤去F_1和F_2，改为只用一个弹簧测力计钩住连接小圆环的细绳，用力F拉橡皮筋，使小圆环同样静止于O点处，如图3-4-5（c）所示。用笔记下拉力F的方向，并记录它的大小。

4. 取下白纸，在纸上用同一个标度分别作出力F_1、F_2及F的图示，如图3-4-5（d）所示。



▲ 图3-4-5

用虚线把F的末端与F_1、F_2的末端连接，或许你能得到启示。

5. 根据力F_1、F_2及F的图示，你能猜想F与F_1、F_2之间满足怎样的关系吗？

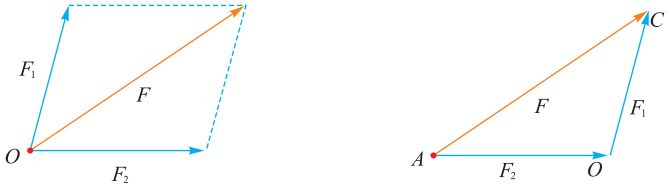
6. 如果改变F_1、F_2的大小和方向几次，使小圆环静止在其他位置，重复上述实验和作图，可以得到同样的结论吗？通过进一步的实验检验你的猜想，并写出你的结论。

平行四边形定则

研究表明，如果用表示两个共点力 F_1 和 F_2 的线段为邻边作平行四边形，那么合力 F 的大小和方向就可以用这两个邻边之间的对角线表示出来，如图 3-4-6（a）所示，

这叫作力的**平行四边形定则**（parallelogram rule）。

平行四边形的一半是三角形，在求合力的时候，也可以把表示原来两个力的有向线段首尾相接，然后再从第一个力的始端向第二个力的末端画一条有向线段，这个有向线段就可以表示原来两个力的合力，如图 3-4-6（b）所示。这种求合力的方法叫作力的三角形定则。



（a）平行四边形定则　　（b）三角形定则

▲ 图3-4-6

把这个平行四边形“压扁”，使它的各边在一条直线上，这时它的“对角线”长度和指向是怎样的？这便是我们在初中学过的同一直线上二力合成的情形，它是平行四边形定则的特殊情况。

例题示范

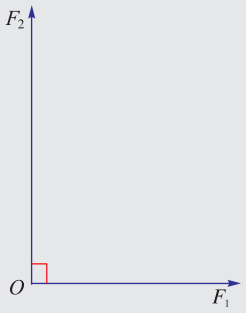
问题　如图3-4-7所示，有两个互成直角的共点力，F_1 = 30 N，沿水平方向；F_2 = 40 N，沿竖直方向。请根据平行四边形定则，分别用作图法和计算法求它们的合力。

解　（1）先用作图法求合力。

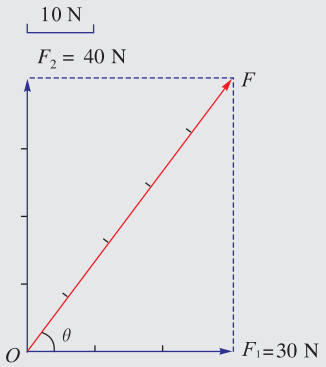
如图3-4-8所示，选择某一标度表示10 N的力，作出力F_1和F_2的图示。

以F_1、F_2为邻边，作平行四边形，再作对角线F。

用刻度尺量出F的长度，按标度算出F的大小，再用量角器量得合力F与F_1的夹角。



▲ 图3-4-7



▲ 图3-4-8

求得$F=50\ \mathrm{N}$，$\theta=53°$。

（2）再用计算法求合力。

根据勾股定理，合力的大小是

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2}$$

代入数值

$$F=\sqrt{30^2+40^2}\ \mathrm{N}=50\ \mathrm{N}$$

合力的方向可用F与F_1之间的夹角来表示。设这个夹角为θ，则

$$\tan\theta=\frac{F_2}{F_1}=\frac{4}{3},\quad \theta=53°$$

拓展 根据平行四边形定则，对于两个互成直角的共点力，除了可以用作图法求它们的合力，还可以用计算法来求它们的合力。

如果两个以上的力作用在一个物体上，也可以应用平行四边形定则求出它们的合力：先求出任意两个力的合力，再求出这个合力跟第三个力的合力，直到把所有的力都合成进去，最后得到的结果就是这些力的合力。

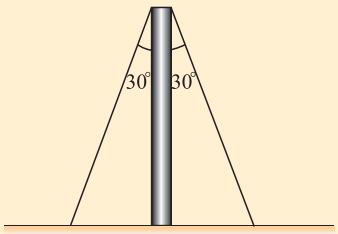
自我评价

1. 已知两共点力的大小分别为 8 N 和 10 N，当这两个力的夹角依次为 60°、90°、120°时，请用作图法依次求出它们合力的大小和方向。

2. 已知两个共点力的大小分别为 20 N 和 15 N，当这两个力的夹角为 90°时，请用计算法求出它们合力的大小和方向。

3. 已知两个共点力的大小分别为 12 N 和 5 N，它们合力的最大值是多少？最小值是多少？

4. 杨浦大桥是跨越黄浦江的斜拉索公路桥，它是中国自行设计、建造的双塔双索面叠合梁斜拉桥。假设斜拉桥中某对钢索与竖直方向的夹角都是 30°，如果每根钢索对塔柱的拉力都是 3×10^4 N。根据这对斜拉桥钢索对塔柱的拉力建立的简单模型如图 3-4-9 所示，那么它们合力的大小是多少？方向如何？



▲ 图3-4-9

5　力的分解

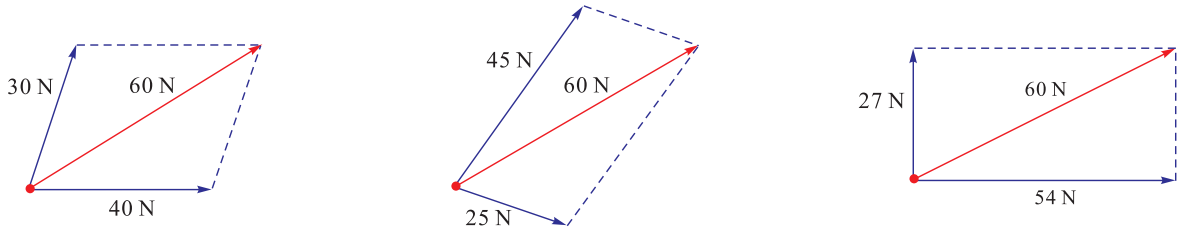
一个力可用几个力来替代

我们已经知道，几个共点力的作用可以用一个力来替代，这是力的合成。反之，一个力作用在物体上也可以用几个共同作用在物体上的共点力来等效替代，这几个力称为那一个力的分力。求一个已知力的分力叫作**力的分解**（resolution of force）。

力的分解是力的合成的逆运算，它也必然遵循平行四边形定则。

求一个力 F 的分力时，把这个力作为平行四边形的对角线，那么，与力 F 共点的平行四边形的两个邻边就是这个力的两个分力。

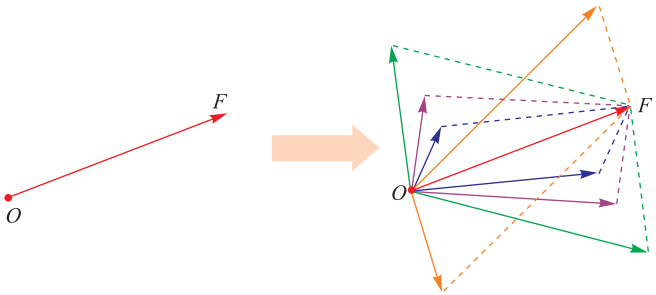
由图3-5-1可见，一个60 N的力，由于两个分力的方向不同，就会有不同的分解结果。



▲ **图3-5-1**　一个60 N的力的不同分解

一个力分解为两个力，在理论上可以分解为无数组大小、方向不同的分力，如图3-5-2所示。

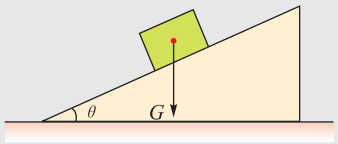
在实际问题中怎样分解一个力，要具体问题具体分析，以方便解决问题为原则。



▲ 图3-5-2

例题示范

问题 如图3-5-3所示，把一个所受重力为G的木块放在倾角为θ的粗糙斜面上，物体处于静止状态。则斜面对物体的支持力的大小和斜面对物体的摩擦力大小分别等于多少？



▲ 图3-5-3

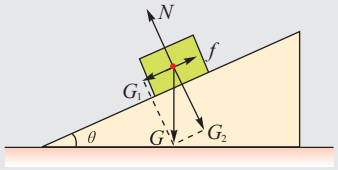
分析 放在斜面上的物体受到重力、支持力和摩擦力，在这三个力的作用下物体处于平衡状态。为了能方便地解决这个问题，我们把重力G沿斜面方向和垂直斜面方向分解。

解 如图3-5-4所示，根据平行四边形定则，作出重力的两个分力G_1和G_2，由三角关系可知

$$G_1 = G\sin\theta \qquad G_2 = G\cos\theta$$

因物体处于静止状态，故物体沿着斜面方向和垂直斜面方向分别满足二力平衡，由此可得

$$N = G_2 = G\cos\theta \qquad f = G_1 = G\sin\theta$$



▲ 图3-5-4

拓展 我们在生活中可以看到，高大的桥要造很长的引桥，如图3-5-5所示。对于这个问题，可以用力的分解知识分析其中的原因。

一座大桥的引桥，可以简化为一个斜面，引桥越长，斜面的倾角θ越小。汽车在引桥上行驶，可以把重力分解为沿着桥面方向的分力G_1和垂直桥面方向的分力G_2。上桥时，汽车所受重力的分力G_1的方向与汽车的运动方向相反，阻碍汽车前进；下桥时，汽车所受重力的分力G_1的方向与汽车的运动方向相同，会使汽车运动加快。引桥越长，重力的分力G_1的大小就越小，重力的分力G_1对汽车上桥和下桥的影响就越小。



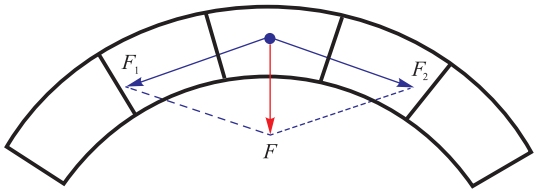
▲ 图3-5-5 引桥

力的分解的应用

在生产生活中，力的分解有着广泛的应用。

上面的例题中提到，城市里高大的立交桥建有长长的引桥，减小了坡度，使车辆所受重力沿桥面方向的分力对行驶的影响减弱，可以使上桥更容易，下桥更安全。在山区修建盘山公路，也是同样的道理。

观察桥梁结构，随处可见对力的分解进行应用的智慧。始建于隋代的赵州桥，是世界上建造年代最早的敞肩式大型石拱桥。筑成大拱的各石块间接触面与竖直方向成一定角度，石块受到的重力和来自桥面的压力可以分解为垂直于接触面的分力，产生相互挤压的作用效果（图3-5-6）。通过层层挤压，拱桥形成了稳定的结构。1400多年过去，历经多次水灾、地震，赵州桥至今还牢固地横跨在河北赵县洨河两岸，向世界展示我国古代人民的伟大创造。



▲ **图3-5-6**　拱桥中构件所受的力的分解

现代桥梁更为宏伟。1991年，上海市南浦大桥（图3-5-7）建成通车，开创了我国自主建设超大跨度桥梁的先河。大桥跨越几百米宽的黄浦江，江中没有桥墩，两岸各竖立一座56层楼高的桥塔，两塔与主梁以180根钢索相连，这就是斜拉桥。

讨论交流

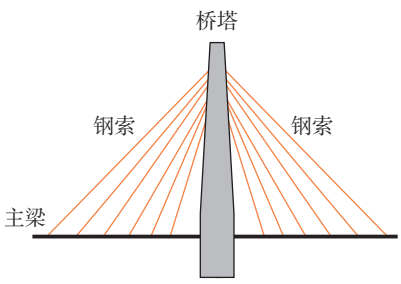
图 3-5-8 是斜拉桥的示意图。图 3-5-9 中的 F 是斜拉桥中的某一根钢索对梁上某点 P 的拉力，它与桥面（水平面）的夹角为 α，那么：

1. 钢索为什么能减轻过往车辆造成的梁体的形变？

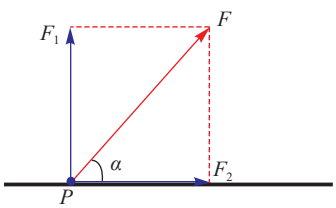
2. 在斜拉桥的设计中，为什么要建高大的桥塔？从力的分解的角度如何解释？



▲ **图3-5-7**　南浦大桥（斜拉桥）



▲ **图3-5-8**　斜拉桥示意图



▲ **图3-5-9**　某一根钢索拉力的分解

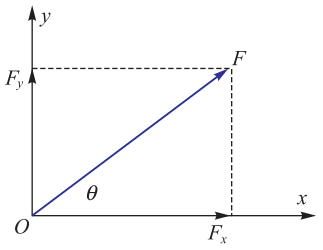
钢索拉力F可以分解为竖直向上的分力F_1和水平（桥面）方向的分力F_2。当有车辆经过P点时，车身的压力会使得梁体产生弯曲形变。此时，F_1可以抵消或减轻车辆对梁体的影响。从图3-5-9可以看出，α角是决定拉力对桥梁作用的重要因素。如果α角过小，即钢索过于倾斜，钢索拉力沿桥面方向的分力F_2也会增大，使主梁承受的纵向压力增大，这不利于梁体的稳定。因此，设计上要使桥塔具有足够的高度，使α角不至于太小，以提高桥梁的结构品质。

跨度更大的桥是现代悬索桥。我国目前悬索桥的最大跨度是武汉杨泗港长江大桥的1700m。据专家推算，悬索桥的跨度将来可以达到5000m。当然，悬索桥的设计也离不开力的分解。

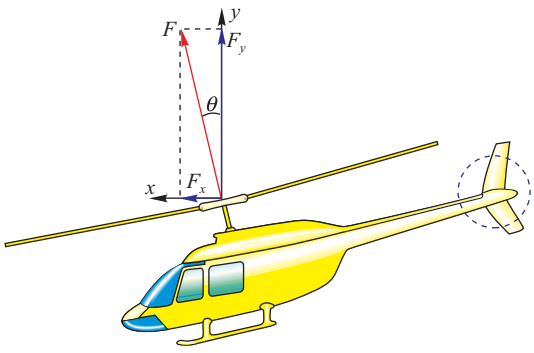
力的正交分解

将一个力沿着相互垂直的两个方向分解是应用最多的分解方法。按图3-5-10建立直角坐标系，把 F 沿x、y方向进行分解，这种方法通常称为力的正交分解。

如图3-5-11所示，当直升机倾斜飞行时，螺旋桨产生的升力 F 垂直于机身，此力可以分解为竖直方向和水平方向的两个力，竖直向上的分力$F_y = F\cos\theta$，它或与直升机的重力平衡，或者大于重力而使直升机向上加速运动；水平方向的分力$F_x = F\sin\theta$，它使直升机向前加速运动。



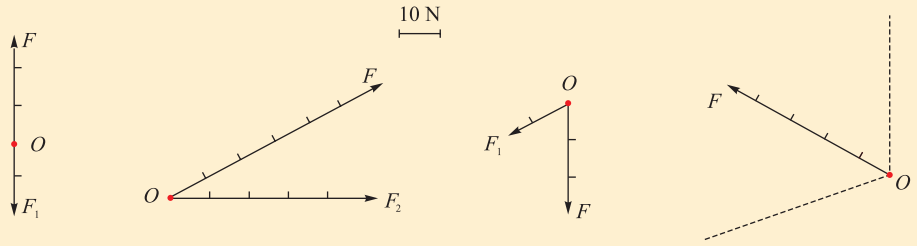
▲ 图3-5-10



▲ 图3-5-11

自我评价

1. 在图 3-5-12 中，已知合力 F 及其中一个分力 F_1 或 F_2，或知道合力及两个分力的方向，用作图法求未知的分力。



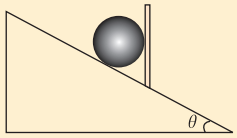
▲ 图3-5-12

2. 大力士曾创造过用牙齿拉动载重汽车的纪录，如图 3-5-13 所示。设一辆载重汽车的质量为 $m = 17$ t，大力士牙齿对绳子的拉力为 $F = 1900$ N，绳子与地面的夹角为 $\theta = 30°$，如果将绳子的拉力沿着水平方向和竖直方向分解，那么拉力的水平向前的分力和竖直向上的分力分别是多少？



▲ 图3-5-13

3. 用竖直挡板将光滑小球夹在挡板和斜面之间，如图 3-5-14 所示。小球的质量为 m，斜面的倾角为 θ，如果把小球所受的重力沿垂直斜面方向和垂直挡板方向进行分解，那么这两个分力的大小分别是多少？



▲ 图3-5-14

发展空间

实验室

按图 3-5-15 所示进行操作，测一测细丝或头发丝能承受的最大拉力。



▲ 图3-5-15

6 共点力作用下物体的平衡

共点力作用下物体的平衡状态

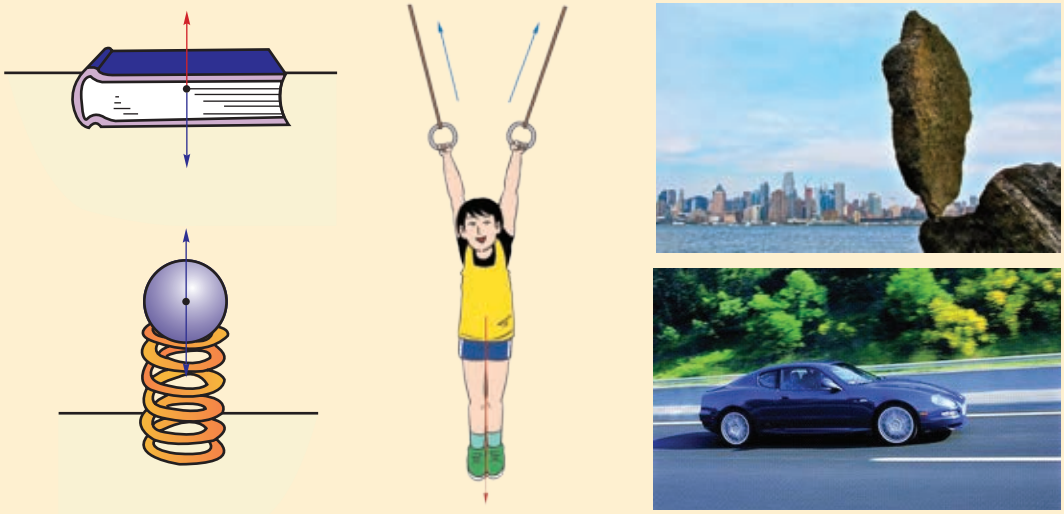
在生活中，**平衡**（equilibrium）无处不在，桌上的书本，放在弹簧上的小球，竖立的石块，拉着吊环的小孩，虽然都受到了力的作用，但仍然保持静止状态。平直公路上匀速行驶的汽车，虽然受力的作用，但仍能保持匀速直线运动。

如果物体保持静止或匀速直线运动状态，我们就说，这个物体处于**平衡状态**（equilibrium state）。

共点力作用下物体的平衡条件

讨论交流

如图3-6-1所示，书本、小球、小孩、石头和汽车都处于平衡状态，请你判断，它们各自受到哪些力的作用？你认为这些力应满足怎样的条件？为什么？



▲ 图3-6-1

要使物体保持平衡状态，作用在物体上的力必须满足一定的条件，这个条件叫作**平衡条件**（equilibrium condition）。

理论探究

我们在初中学习过“二力平衡”，它是指物体在两个共点力作用下处于平衡状态，其平衡条件是这两个力大小相等、方向相反。从力的合成法则知道，此时物体受到的合力为零。

物体在三个共点力作用下处于平衡状态时，我们可以把其中任意两个共点力用一个合力等效替代，三力平衡简化为二力平衡。因此三个共点力作用下物体的平衡条件也是物体的合力为零。

三个以上的共点力的平衡最终也都可以简化为二力平衡。

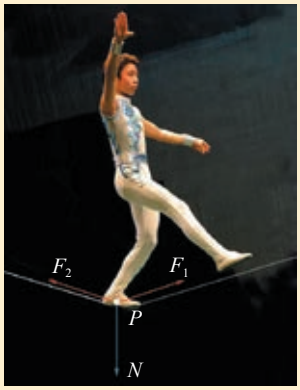
由此，你可以得出什么结论？

在共点力作用下物体的平衡条件是：物体受到的合力为零。如果用$F_{合}$表示合力，那么这个平衡条件可以写成

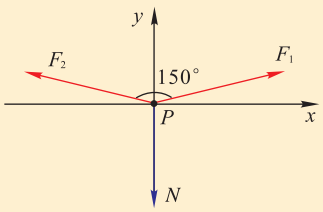
$$F_{合}=0$$

活动

走钢丝的杂技演员质量为50 kg，他单脚踩在钢丝的P点上，处于平衡状态。P点受到演员施加的压力N（与演员所受的重力大小相等）、两侧钢丝的拉力F_1和F_2这三个共点力的作用，如图3-6-2（a）所示，且$F_1=F_2$。若F_1和F_2这两个力之间的夹角为150°，请利用平衡条件计算F_1与F_2的合力的大小。



（a）



（b）

▲ 图3-6-2

如图3-6-2（b）所示，再以P点为坐标原点，沿水平方向和竖直方向建立直角坐标系。将三力分别沿x、y方向分解，则这三个力沿着x、y方向的合力各为多少？

当物体受到多个共点力（在同一平面内）的作用时，也可用正交分解的方法，将各个力沿选定的直角坐标分解，如果沿 x 轴方向的合力为零，沿着 y 轴方向的合力也为零，则物体处于平衡状态。平衡条件可写成

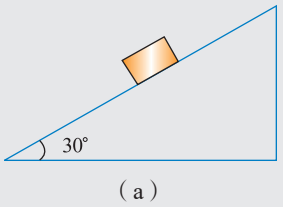
$$\begin{cases} F_{x合} = 0 \\ F_{y合} = 0 \end{cases}$$

这种分解方法，在解决多个共点力问题时经常会用到。

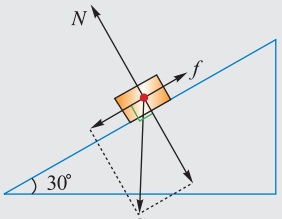
平衡条件的应用

例题示范

问题1 如图3-6-3（a）所示，质量为1 kg 物体静止在倾角为30° 的固定斜面上，则该物体受到斜面的支持力和摩擦力分别为多大？（g 取10 m/s^2）



（a）



（b）

▲ 图3-6-3

分析 物体受重力、支持力和摩擦力的作用，处于平衡状态，由平衡条件可知，该物体所受合力为零。

解 作出物体的受力示意图，并将重力分解到垂直于斜面和平行于斜面的方向，如图3-6-3（b）所示。根据共点力作用下物体的平衡条件，可得该物体所受斜面的支持力

$$N = mg\cos 30° = 8.66\ \text{N}$$

该物体所受斜面的摩擦力

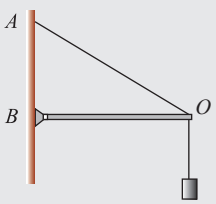
$$f = mg\sin 30° = 5\ \text{N}$$

拓展 若该物体与斜面间的动摩擦因数等于0.3，要使该物体沿斜面匀速向上滑动，则需对物体施加多大的沿斜面的推力？

问题2 在日常生活中经常会用三角形的结构进行悬挂，如图 3-6-4（a）（b）所示。图 3-6-4（c）为这类结构的一种简化模型。图中轻质硬杆 OB 可以绕通过 B 点且垂直于纸面的轴转动，钢索 OA 和杆 OB 所受的重力都可以忽略。如果悬挂物所受的重力是 G，$\angle AOB = \theta$，钢索 OA 对 O 点的拉力和杆 OB 对 O 点的支持力各是多大？


（a）


（b）



（c）

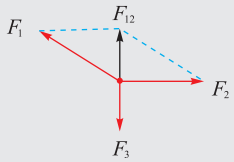
▲ 图3-6-4

分析　O点受到钢索的拉力F_1、硬杆的支持力F_2和悬绳的拉力F_3，处于平衡。

解　**方法1：利用力的合成**

由三个共点力的平衡条件，可以认为，其中两个力的合力，与第三个力大小相等，方向相反。

如图3-6-5所示，先用力的平行四边形定则，结合图示的方法在图中表示出F_1、F_2的合力F_{12}。



▲ 图3-6-5

因为结点O处的合力为零，则$F_{12}=F_3=G$

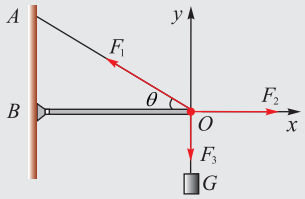
结合F_1、F_2与这两个力的合力F_{12}构成的平行四边形，可得：

$$F_1=\frac{F_{12}}{\sin\theta}=\frac{G}{\sin\theta}$$

$$F_2=\frac{F_{12}}{\tan\theta}=\frac{G}{\tan\theta}$$

方法2：利用力的分解

F_1、F_2、F_3三个力的合力为零，则这三个力在任何方向的分矢量之和一定为零。按照图3-6-6那样建立坐标系，写出三个力在x方向和y方向的分矢量，其中$F_{1x}=F_1\cos\theta$，$F_{1y}=F_1\sin\theta$。



▲ 图3-6-6

这两个方向上的平衡条件为：

$$F_2-F_1\cos\theta=0 \quad ①$$

$$F_1\sin\theta-F_3=0 \quad ②$$

由①②两式解出钢索OA的拉力F_1

$$F_1=\frac{F_3}{\sin\theta}=\frac{G}{\sin\theta}$$

硬杆OB的支持力F_2

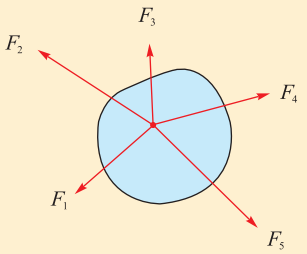
$$F_2=F_1\cos\theta=\frac{G}{\tan\theta}$$

拓展　（1）当θ很小时，$\sin\theta$和$\tan\theta$都接近于0，F_1和F_2就会很大，对材料的强度要求很高，所以钢索的固定点A不能距B太近。但A点过高则材料消耗过多，所以要结合具体情况适当选择θ角。

（2）实际的杆有质量并且要发生形变，弹力方向并不沿杆。

自我评价

1. 如图 3-6-7 所示，物体在五个共点力的作用下保持平衡。那么力 F_2 的大小和方向与其他四个力的合力的大小和方向有什么关系？



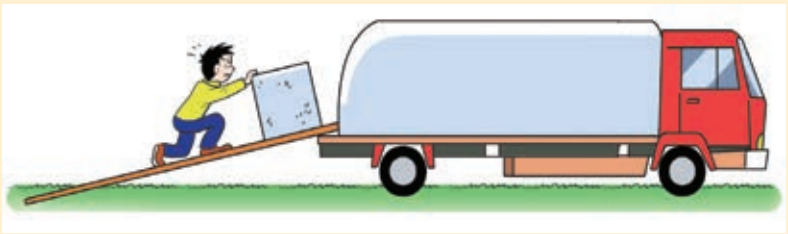
▲ 图3-6-7

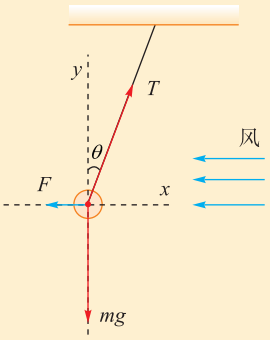
2. 如图 3-6-8 所示，某同学拉着一只重量 $G = 100$ N 的箱子在水平地面上匀速前进。绳子的拉力大小为 $F = 30$ N，绳子与水平面的夹角为 $\theta = 37°$。已知 $\sin37° = 0.6$，$\cos37° = 0.8$，那么，地面对箱子的摩擦力大小是多少？地面对箱子的支持力大小是多少？

3. 如图 3-6-9 所示，工人缓慢地把货物沿倾斜的木板推上汽车，货物重为 800 N，木板长为 5 m，木板一端离地距离为 1 m，假定工人推力的方向始终与板面平行，推力的大小为 300 N。那么工人在推动货物的过程中，木板对货物的摩擦力是多少？



▲ 图3-6-8


▲ 图3-6-9



▲ 图3-6-10

4. 在科学研究中，可以用风力仪直接测量风力的大小，其原理如图 3-6-10 所示。仪器中有一根轻质金属丝，悬挂着一个金属球。无风时，金属丝竖直下垂；当受到沿水平方向吹来的风时，金属丝偏离竖直方向一个角度。风力越大，偏角越大。通过传感器，就可以根据偏角的大小指示出风力。那么，风对小球作用力 F 的大小跟小球质量 m、偏角 θ 之间有什么样的关系呢？

5. 当你在移动放在水平地面上的箱子时，通常会采用“推”与“拉”两种方法。这两种方法的作用力方向不同：推力斜向下，而拉力则斜向上。实践证明，“推”往往要比“拉”费力，请根据物体的平衡条件分析其中的原因。

感悟 · 启迪

人类的祖先在与自然界的抗争中，在工具的发明与改进中积累了对力的认识，它像一盏明灯照亮了人类文明前行的道路。力学在自然科学中处于基础地位，同时可谓“工程技术之母”，衍生于力学的各种工程技术是当今中国关于“桥”“路”“车”“港”的超大工程建设的重要支撑。你是否想到，工程师们在设计和施工中大量地应用着我们刚刚学过的“力的合成与分解”“共点力作用下物体的平衡”的知识呢！

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 从位移、速度、加速度到力的学习，你对矢量有什么认识？想一想，为什么要引进矢量？

2. 通过这一章的学习，说说你对物质世界的“相互作用”这一基本特性的认识。

3. 等效替代的思维方法为我们研究问题提供了什么帮助？在现实中我们也会用到这样的方法吗？

• 自主小结

1. 说一说，什么是重力、弹力和摩擦力？

2. 重力、弹力和摩擦力的基本测量方法是什么？

3. 叙述胡克定律，用图像描述胡克定律 $F=kx$，说说 k 的物理意义。

4. 准确表述共点力的合成和分解所遵循的运算法则。

5. 说说共点力平衡的条件。

• 相互交流

通过调查，了解当今中国“桥”“路”“车”“港”等国际领先的超大工程的建设情况。与同学一起探讨，其中对力学知识有哪些应用。

本章复习题

1. 关于重力和重心，下列说法正确的是（　　）

A. 重力是由于地球对物体的吸引而产生的，其大小与物体的运动状态有关

B. 形状规则的物体，重心在其几何中心

C. 重力的方向总是垂直向下的

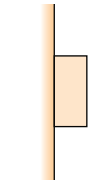
D. 物体的重心可能在物体上，也可能在物体外

2. 将书放在水平桌面上，桌面会受到弹力作用，产生这个弹力的直接原因是（　　）

A. 书的形变　　B. 桌面的形变

C. 书和桌面的形变　　D. 书受到重力

3. 如图所示，在教室里磁性黑板的竖直面上吸着一个电路元件，该元件受到哪些力的作用？试画出它的受力示意图。

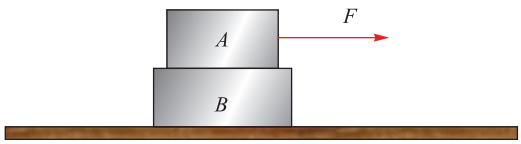


▲ 第3题图

4. 如图所示，两物块 A、B 上下叠放在一起置于水平桌面上。

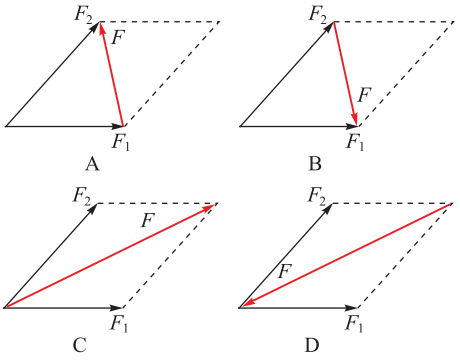
（1）当用水平向右的拉力 F 作用在 A 物体上时，A、B 两物体均保持静止状态。试分析此时两物体之间、B 物体与桌面之间摩擦力的情况。

（2）若将水平向右的拉力 F 改作用到 B 物体上时，A、B 两物体也保持静止状态。试分析此时两物体之间、B 物体与桌面之间摩擦力的情况。



▲ 第4题图

5. F_1 和 F_2 是共点力，根据平行四边形定则求合力 F，作图正确的是（　　）



▲ 第5题图

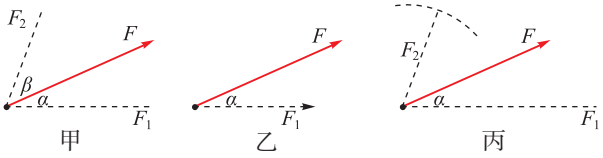
6. 已知力 F 的大小和方向，在以下三种条件下，通过作图求两个分力 F_1 和 F_2。

（1）图甲，已知两个分力的方向，即图中角 α 和 β 确定，求两力的大小；

（2）图乙，已知分力 F_1 的大小和方向，求另一个分力 F_2 的大小和方向；

（3）图丙，已知 F_1 的方向和 F_2 的大小，求 F_1 的大小和 F_2 的方向。

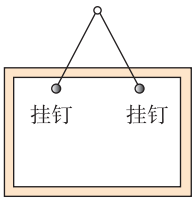
以上三种情况的解是否都是唯一的？



▲ 第6题图

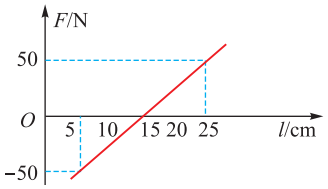
7. 一物体受到同一竖直平面内的几个共点力作用而处于静止状态，其合力为多大？若其中水平向右的力 F 大小保持不变而其方向绕垂直于该平面的轴逆时针转过 90°，其余各力不变，则此时物体所受的合力的大小和方向如何？

8. 如图所示，用一根长 1 m 的轻质细绳将一幅质量为 1 kg 的画框对称悬挂在墙上。已知绳能承受的最大张力为 10 N，为使绳不断裂，画框上两个挂钉的间距最大为多大？（$g=10$ N/kg）



▲ 第8题图

9. 由实验测得某弹簧所受弹力 F 和弹簧的长度 L 的关系如图所示，求：



▲ 第9题图

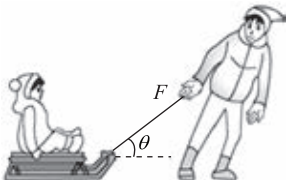
（1）该弹簧的原长为多少？

（2）该弹簧的劲度系数为多少？

10. 如图所示，质量为 30kg 的小孩坐在 10 kg 的雪橇上，大人用与水平方向成 37° 斜向上、大小为 100 N 的拉力拉雪橇，使雪橇沿水平冰面做匀速运动（$g=10$ N/kg，$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$）。求：

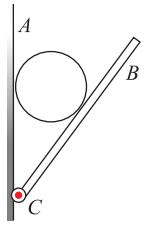
（1）雪橇对冰面的压力大小；

（2）雪橇与冰面间的动摩擦因数。



▲ 第10题图

11. 如图所示，把球夹在竖直墙 A 和木板 BC 之间，不计摩擦，球对墙的压力为 N_1，球对板的压力为 N_2。试分别用作图和解析的方法分析在将板 BC 逐渐放至水平的过程中 N_1 和 N_2 的变化情况。

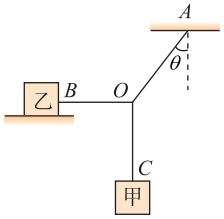


▲ 第11题图

12. 如图所示，质量为 m_1 的物体甲通过三段轻绳悬挂，三段轻绳的结点为 O。轻绳 OB 水平且 B 端与放置在水平面上质量为 m_2 的物体乙相连，轻绳 OA 与竖直方向的夹角 $\theta=37°$，物体甲、乙均处于静止状态（$\sin37°=0.6$，$\cos37°=0.8$）。求：

（1）轻绳 OA、OB 受到的拉力是多大？

（2）物体乙受到的摩擦力是多大？方向如何？



▲ 第12题图



第四章

牛顿运动定律

主题一　牛顿运动定律

- 牛顿第一定律
- 探究加速度与力、质量的关系
- 牛顿第二定律
- 力学单位制
- 牛顿第三定律

主题二　牛顿运动定律的应用

- 牛顿运动定律的应用
- 超重与失重

在学习了描述运动的基本概念及物体之间的相互作用后，你是否会提出这样的问题：物体为什么会做这样或那样的运动？物体的运动状态是如何维持或改变的？力与运动之间究竟有怎样的关系？

2000多年以前，人们就已经关注运动与力的关系了。300多年前，牛顿提出的运动定律，对宏观物体的运动作出了精确的描述，并把地上和天上的运动统一起来，实现了人类关于自然科学的第一次大综合。

本章我们将追寻历史的足迹，探究和领悟牛顿运动定律，并用它来了解自然，叩开研究运动与力的关系的动力学（dynamics）的大门。

1 牛顿第一定律

物体的运动与人类的生活密切相关。古人狩猎、耕作等各种行为都涉及运动。大量物体的运动也是人们最易观察到和引起思考的自然现象。例如，日月星辰的运动就常常使人们浮想联翩，产生了许多关于太阳、月亮及其他星辰的美丽神话。人类认识世界大概就是从认识物体的运动开始的。

如何描述物体的运动？物体为什么会做这样那样的运动？古希腊人最先提出了这些问题，并建立了最早的运动理论。

第一章

关于如何描述物体的运动，我们已经在第一章学习了一些基本概念。在这些概念基础上建立起来的物理学分支，被称为**运动学**（kinematics）。

亚里士多德的运动理论

在古希腊的众多学者中，最认真、最系统地研究运动、空间和时间问题的是亚里士多德。这些工作体现在他的《物理学》一书中，这是世界上最早的物理学著作。英语中的物理学一词“physics”就源于此书。

亚里士多德把运动分为两大类——自然运动和受迫运动。在他看来，每个物体都有自己的固有位置，如火这类轻的物体的固有位置在上，气、水在中间，土在下。偏离固有位置的物体将做趋向固有位置的运动，于是烟火向上运动，重物向下运动，这些运动无须外力的帮助，自身就能实现，属于自然运动。而对于地面上的物体，如地面上的小车和桌面上的书本，唯有依靠推、拉等外力的不断作用才能使它们运动起来。所以这类运动被称为受迫运动。外力一旦消失，受迫运动也就停止了。

亚里士多德因其在多个学术领域的成就和影响，被世人视作不可动摇的权威，这在相当程度上束缚了人们

第二章 第5节

关于“重物下落”的自然运动，亚里士多德提出了“越重的物体下落越快”的观点。我们在前面的学习中已经知道，这个观点受到了伽利略的质疑并被推翻了。

的思想。此外，他对运动的看法比较符合人们的日常直觉，当时的人们还没有掌握认识世界的正确方法，所以在此后2 000多年的漫长岁月中，人们接受了他的观点。

讨论交流

1.如图4-1-1所示的情景是不是就能支持“物体的运动是要靠力来维持的”这一观点？

2.你认为亚里士多德的运动理论经得起推敲吗？能否举出你身边一些简单的自然现象或生活现象来否定他的观点？



（a）用力推石头，才能移动它



（b）用力踢球，球才会运动起来

▲ 图4-1-1

伽利略的研究工作

跨越漫长的中世纪，欧洲迎来了突破思想禁锢的文艺复兴。1564年，现代科学的奠基人伽利略诞生于意大利。他率先对亚里士多德的运动观提出了挑战。

伽利略对亚里士多德的理论进行了深入的研究。他领悟到，将人们引入歧途的，是日常能观察到的运动中难以避免的摩擦或空气、水等的阻力。

为了得到正确的线索，除了实验和观察外，还需要抽象思维。伽利略注意到，当一个球沿斜面滚下时，其速度增大，向上滚动时则速度减小。由此他推论：当球沿水平面滚动时，其速度应不增不减。

实际上，在水平面上滚动的球，会越滚越慢，最后停下来。伽利略认为，这并非是球的“自然本性”，而是

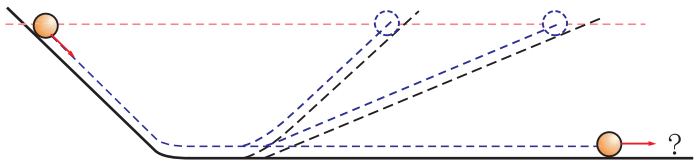
伽利略第一次用科学的实验方法改变了人类对物体运动的认识。他第一次用自制的望远镜看到了月球上的山脉、太阳的黑子、金星的盈亏、土星的光环……看到了邻近我们的这部分宇宙的面貌。

伽利略的生平我们在本书第二章第5节的“课外阅览”中进行了介绍，他在科学史上是一位不朽的伟人。

摩擦的缘故；表面越光滑，球便会滚得越远；如果没有摩擦，球将永远滚下去。在地面上所有运动物体之所以会停下来，也都是因为摩擦的缘故。为了说明这个问题，结合对摆球运动的观察，伽利略设计了如图 4-1-2 所示的理想实验。

◎理想实验

理想实验是一种以可靠的事实为依据，忽略次要因素，并把实验的情况合理外推到一种理想状态，从而来揭示自然现象本质的假想实验。



▲ **图4-1-2** 伽利略的理想实验示意图

图4-1-2中的小球沿左斜面向下运动，会越来越快；随后小球沿右斜面向上运动，会越来越慢。若摩擦可以忽略不计，小球最终会到达与左斜面同样的高度。改变右斜面的坡度，坡度越小，小球要达到同样的高度经过的坡长就会越长。由此，伽利略推测，如果右斜面变成水平面，并且没有任何阻碍，小球将达不到原来的高度，就应永远运动下去。由此，他否定了亚里士多德关于运动和力的关系的错误认识。

将小球扩展到各种物体，伽利略得到了初步的研究结果：原来运动的物体，如果没有其他物体的作用，将会一直保持运动下去。与伽利略同时代的物理学家、数学家、哲学家笛卡尔（Descartes，1596—1650）在他的《哲学原理》一书中进一步完善了伽利略的观点，指出：不受其他物体作用时，原来运动的物体将会做匀速直线运动。

观察思考



▲ **图4-1-3** 气垫导轨上的滑块受到的合力是多少

如图4-1-3所示，把滑块放在水平气垫导轨上，调节导轨使它水平，并且在滑块和导轨之间形成气垫，在这样的情况下滑块沿气垫导轨运动时受到的阻力很小。推一下滑块，观察滑块沿导轨运动的情况，判断滑块运动的性质。

牛顿第一定律　惯性

英国物理学家牛顿在总结伽利略、笛卡尔等人工作的基础上，完成了他的著作《自然哲学的数学原理》。在书中，牛顿（图4-1-4）把一切改变物体运动状态的作用定义为力，并提出了三条基本的运动定律。其中，**牛顿第一定律**（Newton first law）的内容如下：

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。

牛顿第一定律表明：一切物体都有保持匀速直线运动状态或静止状态的性质。我们把物体的这种性质，叫作**惯性**（inertia）。因此牛顿第一定律也称为**惯性定律**（law of inertia）。

当物体受到外力作用时，惯性的存在会阻碍物体自身运动状态的变化。例如当汽车启动时，车上的乘客会向后倾倒，这是因为汽车已经开始前进，乘客的脚受到汽车的作用而随车前进，由于惯性，其身体仍要保持静止状态，所以相对汽车会向后倾倒。反之，当汽车刹车时，车上的乘客会向前倾倒，这是因为乘客的脚受到汽车的作用而随车减速，由于惯性，其身体仍要保持原来的运动状态（速度）前进，所以相对汽车会向前倾倒，如图4-1-5所示。大量事实说明，任何物体，无论处于什么状态，都具有惯性。惯性是物体固有属性，物体的运动并不需要力来维持。



▲ **图4-1-4**　牛顿（Isaac Newton，1643—1727）

牛顿运动定律发表在1687年出版的〈自然哲学的数学原理〉一书中，这是牛顿撰写的一本划时代的巨著。他只用几个基本的概念和原理，就以简单而完备的方式说明了行星和卫星的运行、彗星和落体的运动、海洋的潮汐、大气的流动、车辆行驶及桥梁的受力等，使人类对大自然的了解获得了前所未有的扩展与统一。

这本书的出版，促进了自然科学各门学科的发展，同时在人类的文化领域也产生了巨大的影响。



（a）汽车启动　　（b）汽车刹车

▲ **图4-1-5**　汽车上的惯性现象

质量是惯性大小的量度

物体惯性的大小，表现为保持自身原有的运动状态不变的能力大小。经验告诉我们，在相同的力的作用下，质

◎理想化抽象

惯性定律是理想化抽象思维的产物，是无法直接用实验严格验证的。但它反映了自然界的规律和本质。理想化的抽象，是物理学的一个重要思维方式，在人们认识世界的过程中，它曾经并将不断地发挥巨大的作用。

量大的物体运动状态难改变，我们就说它惯性大；质量小的物体运动状态容易改变，我们就说它惯性小。因此，可用物体质量的大小来描述它惯性的大小，即质量是物体惯性大小的量度。

生产中常用的柴油机、电动机等机器配有沉重的底座，参加作战任务的战斗机却要抛掉副油箱（图4-1-6）以减小质量，都是通过改变质量来改变自身的惯性的。在许多体育运动项目中，也有选择性地通过改变质量来利用或克服惯性。体操运动员要求有灵活的动作表现，而相扑运动员则不希望被别人摔倒，所以体操运动员的质量比相扑运动员要小得多。从第46届世乒赛开始，乒乓球改用“大球”，即直径由之前的38 mm 改为40 mm。大球“笨重”的球体，将使得球速变慢、旋转减缓，增多了比赛的回合，带来了更丰富的技术展现，增添了比赛的观赏性（图4-1-7）。



▲ 图4-1-6



▲ 图4-1-7

自我评价

1. 有的同学说：物体不受外力作用时，才有惯性；受外力作用时，就没有了惯性。这种说法对吗?

2. 牛顿第一定律指出运动不需要力来维持，但我们骑自行车时必须不断地蹬脚踏板，才能维持车的运动，这与牛顿第一定律相矛盾吗?

3. 牛顿第一定律中的“匀速直线运动状态或静止状态”以及“改变这种状态”通常情况下都是相对什么参考系而言的?

4. 爱因斯坦曾多次阐述惯性定律：“当一物离开他物足够远时，将一直保持静止状态或匀速直线运动状态。”试将此表述与牛顿的表述进行比较。

5. 关于惯性大小，下列说法中正确的是（　　）

A. 推动原来静止的物体比推动正在运动的物体所需要的力大，所以静止的物体惯性大

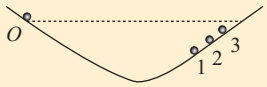
B. 正在行驶的质量相同的两辆汽车，行驶快的不容易停下来，所以速度大的物体惯性大

C. 同样的力作用在不同的物体上时，质量大的物体运动状态改变慢，所以质量大的物体

惯性大

D. 在月球上举重比在地球上容易，所以同一物体在月球上比在地球上惯性小

6. 伽利略创造的把实验、假设和逻辑推理相结合的科学方法，有力地促进了人类科学认识的发展。利用如图4-1-8所示的装置做如下实验：小球从左侧斜面上的O点由静止释放后沿斜面向下运动，并沿右侧斜面上升。斜面上先后铺垫三种粗糙程度逐渐降低的材料时，小球沿右侧斜面上升到的最高位置依次为1、2、3。根据三次实验结果的对比，可以得到的最直接的结论是（　　）



▲ 图4-1-8

A. 如果斜面光滑，小球将上升到与O点等高的位置

B. 如果小球不受力，它将一直保持匀速直线运动或静止状态

C. 如果小球受到力的作用，它的运动状态将发生改变

D. 小球受到的力一定时，质量越大，它的运动状态就越容易改变

发展空间

课外阅览

惯性参考系

在本书的学习中，我们遇到的第一个物理概念便是参考系。如果没有参照物，物体的位置、位移、速度和加速度都无法测量。参考系的确立，是对物体运动进行描述的前提。那么，对本节“自我评价”的第 3 题，你是怎么作答的呢？

我们生活在地球上，要分析周围物体的运动，通常选取地面为参考系。这大概也是同学们对上述问题的普遍回答。那么，地面参考系优越于其他参考系吗？我们以任意其他物体为参考系，可行吗？

例如，对于汽车上的乘客，以车体为参考系。当汽车匀速行驶时，车上的乘客所受合力为零，保持静止状态；当汽车急刹时，乘客所受合力为零的情况并没有改变，却身体前倾，甚至“飞”了出去！也就是说，如果选择急刹的汽车作为参考系，牛顿第一定律失效了。

为此，人们把地面、匀速行驶的汽车等牛顿运动定律在其中成立的参考系，称为**惯性参考系**(inertial frame of reference)，简称惯性系。实践表明，对于一般的工程技术中的动力学问题，地面参考系是一个很好的惯性系。但在研究大气或海洋的大范围运动、近地航天器的空间运行时，要考虑地球缓慢自转的影响，这时以地心和恒星的联结建立的参考系是更为精确的惯性系。如果要研究行星探测器的飞行，还需考虑地球的公转，这时应以太阳作为惯性系。

2 探究加速度与力、质量的关系



▲ 图 4-2-1 可以猜测，三个物理量之间存在关系

牛顿第一定律揭示了物体运动的一对矛盾：惯性是指物体具有的保持原有运动状态不变的属性，而力会产生改变物体运动状态的作用效果。

通过第一章的学习我们知道，加速度反映物体运动状态（速度）变化的快慢和方向，是描述物体运动状态变化的物理量。可以猜测，物体的加速度应与它的惯性（即质量）、它受到的力有关（图 4-2-1）。

那么，这三个量会有怎样的关系呢？

体验影响物体加速度的因素

观察思考

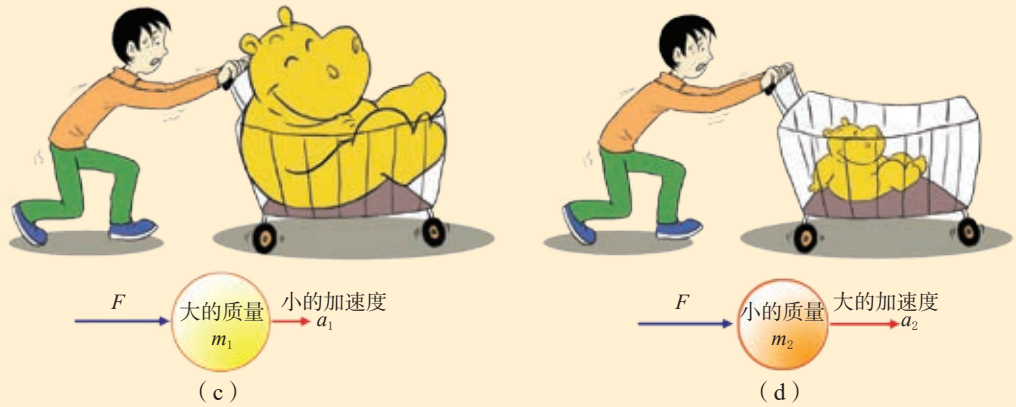
1. 目前，许多学校在积极开展“校园足球”运动。对于静止在草坪上的足球，球员用不同的力踢它，球获得的速度有什么区别？

2. 图4-1-1的问题（第四章第1节）曾经困扰着我们。那么，要改变巨石和足球的运动状态，哪一个更容易？

3. 如图 4-2-2 所示是人用力推动购物车的情形。在图（a）（b）中，被推物体的质量相同；在图（c）（d）中，人所施加的推力大小相同。对比不同的情况，你有什么看法？



▲ 图4-2-2



▲ 图4-2-2（续）

图 4-2-2 中描述的情况与我们的经验是一致的：对于质量一定的物体，受力越大，它获得的加速度越大；同样的力，施加在不同质量的物体上时，质量越小的物体获得的加速度越大。

然而物理学并不满足于这样的定性描述。物体的加速度与它受的力、它的质量有什么定量关系？请你提出猜想，并设计实验进行探究。

设计实验方案

讨论交流

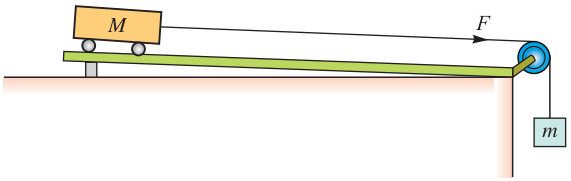
1. 你认为，加速度与作用力、物体质量会有怎样的定量关系？
2. 应该采用什么样的实验装置，重现哪些物理现象？
3. 在实验中，如何测量加速度、作用力和质量这些物理量？
4. 怎样设计表格记录采集的数据？如何处理数据可以清晰地发现其中的规律？
5. 如果你设计的方案不止一个，如何判断它们的优劣以进行取舍？

在探究一个量与几个量之间的关系时，通常的思路是采取“控制变量”的方法。例如，我们可以先让质量不变，找出加速度与作用力之间的关系；再让作用力不变，找出加速度与质量之间的关系；最后分析三者之间的关系。

1. 选择实验装置

我们要获得的物理现象是：不同质量的物体在不同大小的力的作用下做匀加速直线运动。

图4-2-3的实验装置可以呈现上述物理过程。以小车（或滑块）为研究对象，小车通过细绳跨过定滑轮与重



▲ 图 4-2-3

物（托盘和砝码）相连，在重物的牵引下做匀加速直线运动。这个过程中需要消除摩擦力的影响。如果将小车放在一端带有定滑轮的长木板上做实验，通常可以将木板适当倾斜一定角度，使小车在不受拉力作用时能在木板上近似做匀速直线运动。此时，摩擦力与小车所受重力在平行于木板的方向上的分力平衡。

如果让滑块在气垫导轨上运动，摩擦力很小，可以忽略不计。

2. 测量物体的质量及其所受的力

小车或滑块的质量可以用天平称量。

实验室中用于测量力的常见仪器是弹簧测力计，但在受力物体运动的过程中，要直接测出小车所受的拉力在操作上有一定困难。此外，在现实中，除极少数情形如在真空中自由落下的物体（可视为仅受重力）外，很难找到仅受一个力的物体。不过，我们知道，作用于物体上的几个力的合力其作用效果可以等同于一个力。因此，求得物体所受合力的大小，即可满足我们的实验需要。

利用图 4-2-3 的装置进行实验时，测出托盘和砝码的总质量（m），当被研究物体即小车的质量（M）远大于 m 时，可以近似认为其所受拉力 $F=mg$。

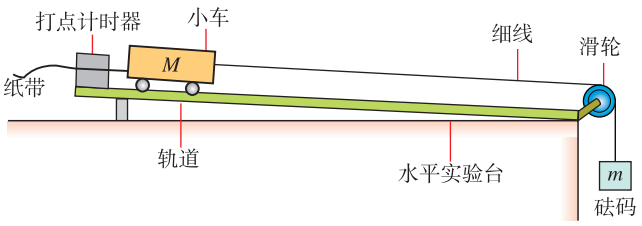
讨论交流

想一想，为什么有这样的近似关系？请与同学讨论。

3. 测量受力物体运动的加速度

在对匀变速直线运动的研究中，利用打点计时器和纸带，可以测量出物体运动的加速度。

因循这一思路，实验装置可改进为如图4-2-4所示。小车放在木板（或轨道）上，在小车后部固定一条纸带，纸带穿过打点计时器。将木板（或轨道）一端垫高，平衡打点计时器对小车的阻力及其他阻力后，若在托盘内放入砝码并从静止开始释放，小车将在拉力作用下拖动纸带沿木板（或轨道）做匀加速直线运动。



▲ 图4-2-4

第一章　第3节
打点计时器是我们分析物体运动规律的常用工具。

取下纸带，分析打点计时器在纸带上留下的点迹，即可得到小车运动的加速度。

对于纸带上的点，可以尝试每5个点取一个计数点，利用匀变速直线运动的规律求出加速度。

讨论交流

除了利用打点计时器来测量加速度外，根据你掌握的物理知识思考一下，还有其他方法吗？请提出合理的测量方案。

◎利用光电门测加速度

如图4-2-5所示，用小车在木板上做实验，小车上安装遮光板（宽度为d），测定小车通过光电门间的距离l（或时间t）及遮光板通过光电门的时间t_1、t_2，利用运动学的关系，也可以间接求出小车的加速度。在第一章第5节中，我们接触了这一方法。在本节实验中，你可以尝试着用它进行操作。



▲ 图4-2-5

4. 实验操作与数据处理

根据“控制变量”的思路，先保持物体（小车）的质量不变，改变力的大小，重复几次实验，将测得的数据记录在自己设计的表格中；再保持力的大小不变，改变物体的质量，重复进行实验，将测得的数据记录在表格中。

以图像的方式处理数据，最为直观。对于质量不变的数据组，可以以a为纵坐标，F为横坐标，作出a–F 图像。对于力的大小不变的数据组，可以以a为纵坐标，M 为横坐标，作出a–M图像。

在探究加速度与质量的关系时，你所描出的a–M图像是否是一条直线？如果不是，你猜想加速度与质量可能是什么关系？怎样能确定它们的关系呢？

尝试以质量的倒数$\frac{1}{M}$为横坐标，作出 $a - \frac{1}{M}$图像，你有什么发现？

◎ **图线的转化**

如果我们描出的图线是一条曲线，那么可以根据曲线的特点作出某种猜测，然后尝试将其中的一个坐标参量进行适当变换（如原本横坐标为 x，现在可以尝试设定横坐标为 x^2、$\frac{1}{x}$、$\sqrt{x}$等），重新作图。一旦曲线转化为直线，则二者的函数关系便清楚了。这是寻求两个量之间定量关系的一种有效方法。

实验结论

在这个实验探究中，我们根据日常经验和观察到的事实，首先猜想物体的加速度与它所受的力及它的质量有最简单的关系，即加速度与力成正比、与质量成反比：

$$a \propto F,\ a \propto \frac{1}{M}$$

如果这个猜想是正确的，那么，根据实验数据作出的 $a - F$ 图像和 $a - \frac{1}{M}$图像，都应该是过原点的直线。但是实际情况往往不是这样：描出的点并不是严格地位于某条直线上，用这些点拟合出的直线也并不准确地通过原点。

这时我们可能会困惑，自然规律真的是 $a \propto F$ 和$a \propto \frac{1}{M}$吗？如果我们能多做几次类似的实验，每次实验获得的数据都可以拟合成直线，而这些直线又都十分接近原点，那么，很可能自然规律就是如此。

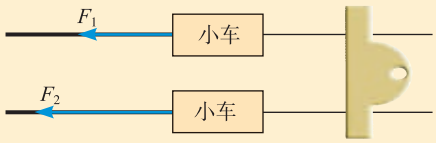
可见，到目前为止，我们的实验结论仍带有猜想和推断的性质。只有由此推导出的大量结果都与事实一致时，

结论才能成为“定律”。

由此看来，科学先驱们在根据有限的实验事实宣布某个定律时，既需要谨慎，也需要勇气。

自我评价

1. 用如图 4-2-6 所示的装置探究加速度与外力、质量的关系。取两个质量相同的小车，放在光滑的平面上，小车的前端分别拴上细绳，绳的一端跨过定滑轮，各挂着一个小盘，盘里分别放着数目不同的砝码。小车的后端各系上一根细绳，一起用夹子夹住。打开夹子，让两个小车在不同的拉力作用下，同时从静止开始做匀加速运动。经过一段时间后关上夹子，让两个小车同时停下来。改变盘里所放砝码的数目，可以改变小车所受合力的大小，我们希望通过上述实验操作，得到物体的加速度与合力之间关系的实验数据。你认为接下来要测量的物理量是什么？怎样推断加速度与合力之间的关系？为了探究合力相同时加速度与质量之间的关系，实验又该如何操作？数据又该如何分析？



▲ 图4-2-6

2. 用如图 4-2-7 所示的装置做实验。如小车静止时，小车上挡光板与光电门的距离为 x，挡光板宽度为 d（$d \ll x$），小车由静止释放后挡光板通过光电门的时间为 Δt。

（1）试推导加速度表达式（用上述物理量表示）。

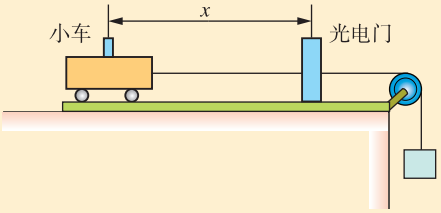
（2）保持小车的质量不变，测得小车的加速度 a 和拉力 F 的数据如下表所示。

F/N	0.20	0.30	0.40	0.50
a/（m · s^{-2}）	0.10	0.21	0.29	0.40

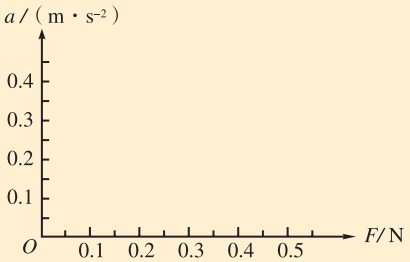
①根据表中的数据在图 4-2-8 中画出 $a-F$ 图线。

②把图线延长，看看图线是否通过原点？如果不通过原点，试分析在操作过程中可能遗漏了哪个步骤。

③这条图线在 F 轴上的截距有什么物理意义？



▲ 图4-2-7



▲ 图4-2-8

发展空间

课外阅览

利用传感器仪器探究a和F、m之间的关系

1. 实验设计思路：关于 a 和 F、m 之间关系的探究，重点和难点是研究对象（小车）所受的拉力和加速度的测量方法的突破。如果将力传感器和位移传感器的发射器装在运动的小车上，将接收器装在小车运动轨道的末端，并通过数据采集器输入计算机（图 4-2-9），就可以测出小车所受的拉力，描绘出小车的速度图像并测量出其加速度的大小。



▲ 图4-2-9

使用这一仪器的好处是力传感器可以较准确地测量小车受到的力，但难以保证“力保持不变”这个条件，因此难以“控制变量”。实验中可以多次改变小车的质量及悬挂钩码的数量，测出并记录多组 a、m 和 F 的数据，直接探究 a 与 $\frac{F}{m}$ 之间的关系。

2. 探究示例：用传感器仪器研究加速度与作用力的关系。

① 用天平测小车和传感器的质量。

② 在轨道上放置小车并安装传感器、连接线路，将细线连接小车，跨过滑轮系住小钩码。

③ 释放小车，测定拉力和加速度。

④ 记录上述测得的数据。

⑤ 改变小车的质量及悬挂钩码的数量，测出多组 a、m 和 F 的数据，并记录下来。

⑥ 分析实验数据，归纳得出结论。

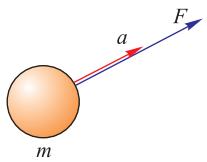
3. 本实验应注意：①轨道应倾斜，平衡摩擦力及阻力；②小车车轮与轴的摩擦力要尽可能小。

3 牛顿第二定律

关于加速度与力、质量的定量关系，有没有简洁的数学表达呢？

牛顿第二定律

综合上一节的两个实验结果，可以得到这样的结论：当小车（物体）的质量不变时，加速度跟作用在小车上的合力成正比；当小车受到的力相同时，加速度跟它的质量成反比。大量的实验和观察到的事实都支持同样的结论，由此可以总结出这样的规律：**物体加速度的大小跟它受到的作用力成正比、跟它的质量成反比，加速度的方向跟作用力的方向相同**（图4-3-1）。



▲ **图4-3-1**　加速度的方向与作用力的方向相同

这就是**牛顿第二定律**（Newton second law），牛顿第二定律可以用比例式来表示，即

$$a \propto \frac{F}{m} 或 F \propto ma$$

这个比例式也可以写成等式

$$F = kma$$

其中k是比例系数，它与力、质量和加速度这些物理量的单位有关。

为了进一步简化上述等式，人们规定作用在 1 kg 的物体上、使物体产生 1 m/s^2 的加速度的力是“一个单位的力”。也就是说，如果质量和加速度的单位分别取千克（kg）和米每二次方秒（m/s^2），力的单位取千克米每二次

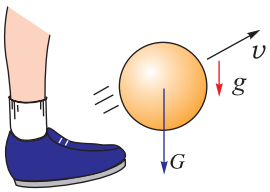
发展空间 • 课外阅读“关于牛顿第二定律导出过程的说明”。

方秒（$kg \cdot m/s^2$），则可以使等式中的比例系数 $k=1$。此时，表达式简化为

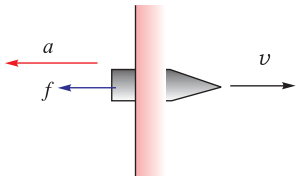
$$F=ma$$

这就是今天的牛顿第二定律的数学表达式。后人为了纪念牛顿，把单位$kg \cdot m/s^2$称为**牛顿**，用符号N表示，它是力在国际单位制中的单位，已经为我们所熟知。

公式中的各物理量是针对同一物体而言的。在通常情况下，我们讨论的对象大都是质量不变的质点。公式表明了 a 与 F 的瞬时关系。式中的 a 与 F 都是矢量，且它们在任何时刻方向都相同（图 4-3-2、图 4-3-3）。



▲ **图4-3-2** 足球一旦离开脚，就不再受到脚对它的作用力，而只受到重力的作用（若空气阻力可略去），其运动的加速度就是重力加速度g

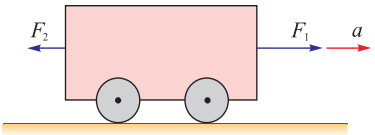


▲ **图4-3-3** 子弹射入墙壁的过程中，受到墙的阻力，子弹的加速度方向与阻力方向一致

牛顿第二定律的初步应用

牛顿第二定律描述了物体受到一个力作用时的情形。在实际中物体往往同时受到几个力的作用，此时，牛顿第二定律中的“作用力”指的是合力（图4-3-4），我们可以把牛顿第二定律的公式进一步表述为

$$F_{合}=ma$$



▲ **图4-3-4** 因为F_1大于F_2，所以小车有沿F_1方向的加速度

如果作用在物体上的各个分力在一平面内，在此平面内建立直角坐标系，分别求得各分力在x，y方向的合力$F_{x合}$、$F_{y合}$，则牛顿第二定律可写成如下形式：

$$F_{x合} = ma_x$$

$$F_{y合} = ma_y$$

牛顿第二定律说明：只有受到的合力不为零时，物体才具有加速度；力恒定不变，加速度也恒定不变；力随着时间改变，加速度也随着时间改变；在某一时刻，力停止作用，加速度随即消失，物体由于惯性将保持该时刻的运动状态不再改变。

例题示范

问题1　雪橇是我国东北地区冬天的运输工具，如图4-3-5所示是一匹马拉着总质量为100 kg的雪橇在水平方向运动。假设阻力不计，马的拉力沿水平方向，大小为120 N，那么雪橇获得的加速度有多大？从静止开始运动到5.0 s末，雪橇的速度是多少？



▲ 图4-3-5　马拉雪橇

分析　对雪橇进行受力分析，它在竖直方向上所受的重力与支持力平衡，所以只需考虑雪橇在水平方向上的受力和运动情况。在水平方向上，雪橇在恒力的作用下做匀加速直线运动。先用公式$F = ma$求出加速度a，然后用公式$v_t = at$求出v_t。

解　由牛顿第二定律$F = ma$可知，雪橇的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{120\ \text{N}}{100\ \text{kg}} = \frac{120\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{100\ \text{kg}} = 1.2\ \text{m/s}^2$$

雪橇的末速度$v_t = at = 1.2\ \text{m/s}^2 \times 5.0\ \text{s} = 6.0\ \text{m/s}$

问题2　2016年9月15日22时04分12秒，“长征二号F”火箭在酒泉卫星发射中心成功发射“天宫二号”空间实验室，全面开启中国空间实验室任务。现测得火箭起飞推力为7.5×10^6 N，已知发射塔高105 m，点火后，经8 s箭宫组合系统

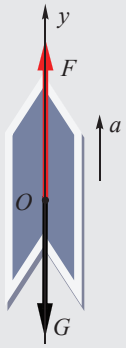
的尾部离开发射塔（图 4-3-6）。设火箭的启动阶段运动为匀加速运动，不计火箭质量变化和阻力的影响，求发射的箭宫组合系统总质量是多少？（g 取 9.8 m/s^2）



▲ 图4-3-6

分析 箭宫组合系统在竖直方向上受到两个力的作用：一个是竖直向上的大小为7.5×10^6 N起飞推力，另一个是重力。由物体向上做初速度为零的匀加速直线运动，且最初8 s内的位移为105 m，即可以求得加速度。已知推力和加速度，由牛顿第二定律，即可求得质量。

解 如图4-3-7 所示建立直线坐标系，以物体的运动方向为y轴的正方向，在图中作出起飞推力F和重力G的示意图，并标出加速度a的方向，由匀变速直线运动的位移方程得



▲ 图4-3-7

$$y=\frac{1}{2}at^2$$

$$a=\frac{2\times105\ \text{m}}{8^2\ \text{s}^2}=3.3\ \text{m/s}^2$$

对箭宫组合系统进行受力分析，它受到起飞推力F和重力G，二者合力产生加速度，根据牛顿第二定律

得 $$F-mg=ma$$

所以 $$m=\frac{F}{a+g}=\frac{7.5\times10^6\ \text{N}}{(3.3+9.8)\ \text{m/s}^2}=5.7\times10^5\ \text{kg}$$ 。

拓展 质量$m=\frac{F}{a}$是惯性大小的量度。

自我评价

1. 从牛顿第二定律我们知道，无论怎样小的力都可以使物体产生加速度，可是，我们用力提一个很重的箱子，却提不动它。这跟牛顿第二定律有没有矛盾？应该怎样解释这个现象？

2. 一个物体受到$F_1=4$ N的力，产生$a_1=2$ m/s^{2}的加速度，要使它产生$a_2=6$ m/s^{2}的加速度，需要施加多大的力？

3. 甲、乙两辆实验小车，在相同的力的作用下，甲车产生的加速度为 1.5 m/s^2，乙车产生的加速度为 4.5 m/s^2，甲车的质量是乙车的几倍？

4. 光滑水平桌面上有一个质量是 2 kg 的物体，它在水平方向上受到互成 90° 角的两个力的作用，这两个力都是 14 N。这个物体加速度的大小是多少？沿什么方向？

5. 水平路面上质量是 30 kg 的手推车，在受到 60 N 的水平推力时做加速度为 1.5 m/s^2 的匀加速运动。如果撤去推力，车的加速度是多少？

发展空间

课外阅览

关于牛顿第二定律导出过程的说明

在实验中，m一定时，$a \propto F$；F一定时，$a \propto \frac{1}{m}$。为什么能立即得出$a \propto \frac{F}{m}$（或$F = kma$）？我们不妨用如图4-3-8所示的方法进行理解。

由状态1→中间态，m不变，必有　$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_0}$　①

由中间态→状态2，F不变，必有　$m_1 a_0 = m_2 a_2$　②

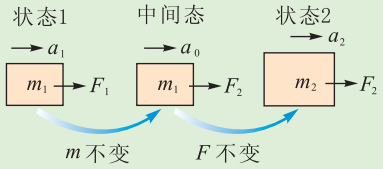
由②式得　$a_0 = \frac{m_2}{m_1} a_2$　③

将③式代入①式得　$\frac{F_1}{a_1} = \frac{m_1 F_2}{m_2 a_2}$

即　$\frac{F_1}{m_1 a_1} = \frac{F_2}{m_2 a_2}$

外推得　$\frac{F_1}{m_1 a_1} = \frac{F_2}{m_2 a_2} = \frac{F_3}{m_3 a_3} = \cdots = \frac{F}{ma} = k$

即有　$F = kma$



▲ 图4-3-8

4　力学单位制

如图4-4-1所示的情形是我们在小学数学或科学课程上就碰到的问题。数值与单位的匹配是科学学习及研究的基本要求。不过，你仔细思考过其中的道理吗？



一头大象的质量约为3.2_____。



小汽车的长度是4520_____。

▲ 图4-4-1　数值与单位的匹配

单位

我们所熟知的“单位”，是指计量事物的标准量的名称。例如，米是计量长度的单位，千克是计量质量的单位，升是计量容积的单位。

标准量来自人为设定。（发展空间 • 课外阅览“力学基本单位的规定”）

人类在漫长的社会化生活和生产中逐渐形成了数和量的概念，各个国家和民族在不同历史条件下又会逐渐形成不同的计量单位。计量制度是一个民族文化的重要组成部分。计量单位的差异，会给社会化生活的物品交流和经济往来带来障碍，从而促使人们协商建立计量单位的变通关系，形成统一的计量标准。公元前221年，秦国国君嬴政统一中国，结束了群雄割据的局面，称始皇帝。秦始皇的一项伟大之举就是统一了民族文化，即统一文字、统一度量衡。从此，“普天之下”对长度、体积和质量的计量，有了统一的单位。这一举措，扫除了地域间经济来往和文化交流的障碍，为后世中国政治制度、社会生活、经济贸易的发展，为2000多年来中华民族始终保持统一整体奠定了文化基础。

◎度量衡

度量衡本是指计量长短、容积、轻重的工具，而这里包含了计量的单位。

计量单位由混沌到统一的历史过程，同样也曾发生在世界上的其他地方。始于17世纪的近代科学，促使计量单位被提升到科学层面进行研究。

以实验为基础的物理学离不开对物理量精确的测量。倘若实验数据只有数字没有单位，则无法说明这个数字是物理量跟哪一个标准量之间的倍数关系。麦克斯韦曾说，每个物理量都可以表述为一个数值与一个单位的乘积，即“物理量＝数值×单位”。所以，精确的数字加上对应的单位，才是有价值的测量结果。

物理学通过公式描述各物理量之间的数量关系，表达自然规律。一方面，物理量选取的单位不同，会直接影响物理规律的数学形式，上一节关于牛顿第二定律公式 $F = kma$ 中比例系数 k 的讨论便可见一斑。另一方面，随着对物质世界认识的不断深入，物理学研究需要不断引入新的物理量，才能对自然现象进行科学的描述。那么，对于每一个物理量，是否都要为它定义一个独立的单位呢？物理学家的回答是：建立科学的单位制。

力学单位制

我们已经知道了一些物理量，如量度物体惯性的是质量，描述物体位置变化快慢的是速度，等等。

物理量之间是存在联系的。例如牛顿第二定律公式$F=ma$确立了力、质量和加速度之间的数量关系，速度公式$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$确立了速度、位移和时间之间的数量关系。同时，公式也确定了这些物理量的单位之间的关系。

因此，我们可以选定几个物理量为基本物理量，并把它们的单位作为**基本单位**，根据物理公式导出其他物理量的单位。例如，我们选定了位移的单位（m）和时间的单位（s），利用公式$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$可以推导出速度的单位（m/s），再利用公式$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$可以推导出加速度的单位（$m/s^2$）。如果再选定质量的单位（kg），利用公式$F=ma$就可以推导出力的单位（N）。这些推导出来的单位叫作**导出单位**。基本单位和导出单位一起组成了单位制。

在力学中，选定长度、质量和时间这三个物理量为基本物理量，用相应的基本单位就可以导出其余力学量的单位。选定这三个物理量的不同单位，可以组成不同的力学单位制。

1960年，第11届国际计量大会制订了一种国际通用的、包括一切计量领域的单位制，叫作**国际单位制**（Le Système International d'Unités，法文，简称SI）。在国际单位制中，除了米（m）、千克（kg）、秒（s）这三个基本单位外，针对热学、电磁学、光学等领域，还规定了另外的四个基本物理量和它们的基本单位，如下表所示。由这七个基本单位可以导出其他所有物理量的单位。

国际单位制的基本物理量和基本单位

基本物理量	物理量符号	基本单位	单位符号
长度	l	米	m
质量	m	千克（公斤）	kg
时间	t	秒	s
电流	I	安〔培〕	A
热力学温度	T	开〔尔文〕	K
物质的量	n（v）	摩〔尔〕	mol
发光强度	I（I_v）	坎〔德拉〕	cd

力学单位制的应用

利用单位可以对一些公式进行初步的检验。在采用统一的单位制以后，等式两边的单位应该是一致的，否则等式不成立。

例题示范

问题1 一次，小明在做物理作业时，推导出某物体运动时的位移s、初速度v_0、加速度a和时间t之间有下面的关系：$s=v_0t^2+\frac{1}{2}at^3$。他以为发现了一条新的运动规律，兴冲冲地拿去给老师看。老师只瞟了一眼，就遗憾地告诉他，这个公式是错误的，不可能有满足这个公式的运动。聪明的同学，你能很快看出该式的错误吗？

解 式子左边的单位为 m。

式子右边第一项的单位是：$(\mathrm{m/s})(\mathrm{s})^2$，运算后得 $(\mathrm{m\cdot s})$；

第二项的单位是：$(\mathrm{m/s^2})(\mathrm{s^3})=(\mathrm{m\cdot s})$；

所以式子右边的单位是 $(\mathrm{m\cdot s})$。

这样，这个式子等号左右两边单位不一致。利用单位制就可以判断出这个式子的错误。

拓展 除了能初步判断一些物理等式或计算结果的正确性外，利用单位制还可以帮助我们对关于物理规律的猜想做出判断。例如，在研究自由落体规律时，我们可以先猜测物体自由下落的时间与哪些因素有关。一般可以猜测出可能与高度、质量及当地的环境（即重力加速度）有关。这样做实验之前，我们可以先用单位制来初步分析下落时间与高度的关系。

根据国际单位制，不妨设想用字母 L、M、T 分别表示长度、质量、时间三个基本物理量。根据猜想，如果等式成立，式子左边是要找的时间，用 T 表示，式子右边为所猜测的长度、质量、重力加速度，分别用 L、M、$\mathrm{LT^{-2}}$ 表示。因不知道它们的具体关系，右边可表示为：$(\mathrm{L})^{\alpha}(\mathrm{M})^{\beta}(\mathrm{LT^{-2}})^{\gamma}$，即

$$(\mathrm{T})=(\mathrm{L})^{\alpha}(\mathrm{M})^{\beta}(\mathrm{LT^{-2}})^{\gamma}$$

对长度物理量 L，左边单位是时间单位，长度物理量不存在，则要等式成立，有

$$0=\alpha+\gamma$$

同理，对质量物理量 M，有

$$0=\beta$$

对时间物理量 T，有

$$1 = -2\gamma$$

解得：

$$\alpha = \frac{1}{2},\ \beta = 0,\ \gamma = -\frac{1}{2}。$$

从上面可以看出：质量的系数为0，也就是说下落时间和质量没有关系；而$T \propto L^{\frac{1}{2}}$，由此我们可以进一步做实验来研究下落时间与高度的正确关系。

问题2　如图 4-4-2 所示，小慧推动小车前进。已知小车的质量是 7.0 kg，假定水平推力为 16 N，阻力为 2 N，求小车的加速度和从静止开始 2.0 s 末的速度大小。



▲ 图4-4-2

分析　小车在竖直方向上所受的重力与支持力平衡，所以只需考虑小车在水平方向上的受力和运动情况。在水平方向上，小车在恒力的作用下做匀加速直线运动。先用公式 $F = ma$ 求出加速度 a，然后用公式 $v_t = at$ 求出 v。

解　小车受到的合力沿水平方向，大小为 16 N−2 N=14 N。

由牛顿第二定律 $F = ma$ 可知，小车的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{14\,\mathrm{N}}{7.0\,\mathrm{kg}} = 2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

小车的末速度 $v_t = at = 2.0\ \mathrm{m/s^2} \times 2.0\ \mathrm{s} = 4.0\ \mathrm{m/s}$

拓展　我们可以看到，只要代入的数据都用国际单位制的单位，那么得到的物理量的单位也一定是国际单位制的单位。因此，解题过程中就没有必要一一写出各个物理量的单位，只要在表达式末尾写出所求量的单位就可以了。上面的计算式，可以这样写：

$$a = \frac{F}{m} = \frac{14}{7.0}\,\mathrm{m/s^2} = 2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

小车的末速度

$$v_t = at = 2.0 \times 2.0\ \mathrm{m/s} = 4.0\ \mathrm{m/s}$$

自我评价

1. 一辆速度为 4 m/s 的自行车，在水平公路上匀减速地滑行 40 m 后停止。如果自行车和人的总质量是 100 kg，自行车受到的阻力是多大？

2. 一辆以 10 m/s 的速度行驶的汽车，刹车后经 2 s 停下来。已知汽车的质量为 4t，汽车所受的制动力有多大？

3. 一艘在太空飞行的宇宙飞船，开动推进器后，受到的推力是 900 N，开动 3s 的时间，速度的改变量为 0.9 m/s，飞船的质量是多大？

4. 小刚在课余制作中需要计算圆锥的体积，他从一本书中查得圆锥体积的计算公式为 $V=\frac{1}{3}\pi R^3 h$。小红说，从单位关系上看，这个公式肯定是错误的。她的根据是什么？

发展空间

课外阅览

力学基本单位的规定

国际单位制形成了一个严密、完整、科学的单位体系，而对基本单位进行严格定义，即准确规定“标准量”等于多少，是该体系的基础。米、千克、秒这三个力学基本单位，伴随计量手段的不断发展，历经百年的演变，目前形成以下定义：

1 米（m），等于光在真空中传播 $\frac{1}{299792458}$ s 时间间隔内所经路径的长度。

1 千克（kg），是对应普朗克常量为 6.62607015×10^{-34} J·s 时的质量单位。

1 秒（s），等于铯 -133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。

5 牛顿第三定律

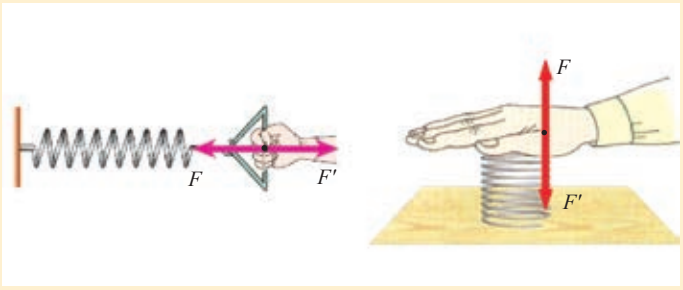
作用力与反作用力

观察思考

观察如图4-5-1所示的各种情形，想一想，相互作用的物体间的力有什么共同的特点？你还能举出哪些相类似的例子？



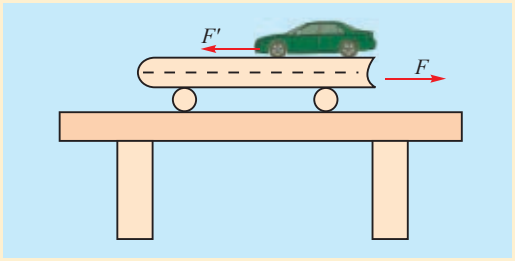
（a）两个穿着溜冰鞋的人，站在比较光滑的地面上。当其中一个人从背后轻轻地推另一个人时，两个人会同时向相反方向运动



（b）用手拉伸弹簧和压缩弹簧



（c）将两辆小车置于光滑导轨上，车上各固定一块条形磁铁，使两磁铁的同名磁极相对。用手控制两小车，使之靠近并静止，然后同时松开双手，两小车同时向相反方向运动



（d）在水平桌面上用几支圆柱形的铅笔支撑课本，将一辆开动着的四驱电动玩具车放在课本上，可以观察到，小车与课本同时向相反的方向运动

▲ 图4-5-1

观察和实验表明，两个物体之间力的作用总是相互的：甲物体对乙物体有力的作用时，乙物体也一定同时对甲物体有方向相反的力的作用。任何物体都不可能在受到力的同时，不对施力物体产生相应的反作用。

这种两个物体间相互作用的一对力叫作**作用力**（action）和**反作用力**（reaction）。我们可以把这一对力中的任一个叫作作用力，则另一个力就叫作这个力的反作用力。

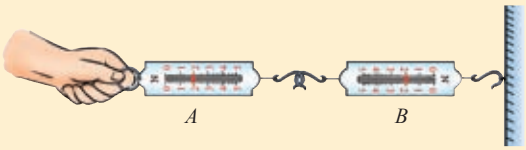
作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体上，它们总是性质相同的两个力，且同时存在，同时变化，同时消失。

牛顿第三定律

总是成对出现的物体间的作用力和反作用力究竟有怎样的定量关系呢？为了探究这个关系，我们可以做一些简单的实验。

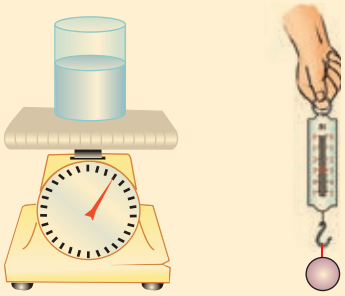
实验探究

1. 如图4-5-2所示，在水平桌面上把两个弹簧测力计A和B的挂钩勾在一起，弹簧测力计B的另一端固定，再用手拉弹簧测力计A的另一端（**注意**：要缓慢拉动，不要超过弹性限度），两弹簧测力计所受的力是一对作用力与反作用力。观察这时两个弹簧测力计上的示数情况。



▲ 图4-5-2

2. 如图4-5-3所示，台秤上放有一杯水，弹簧测力计下拴一个小球，分别读出两者的示数。将小球浸没到水中，再分别读出两者的示数。小球在水中所受浮力的大小和方向如何?该浮力的反作用力的大小和方向又如何呢?



▲ 图4-5-3

大量的现象和实验都表明：两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在同一条直线上。这就是**牛顿第三定律**（Newton third law）。用公式表示为

$$F=-F'$$

式中的负号表示作用力与反作用力方向相反。

生活和生产中，作用力与反作用力同时存在，大小相等且方向相反的例子不胜枚举。人走路时用脚蹬地，脚对地面施加一个作用力，地面同时给脚一个反作用力，使人前进。划船时桨向后推水，水就向前推桨，从而将船推向前进（图4-5-4）。发射枪弹或炮弹时，枪

身或炮身受到后坐力而反冲。汽车的发动机驱动车轮转动，由于轮胎和地面间有摩擦，车轮向后推地面，地面给车轮一个向前的反作用力，使汽车前进。火箭储存在燃料舱内的燃料被点燃后，就会产生急剧膨胀的燃气，内部燃气产生巨大的压强，它一方面把部分气体喷射出去，另一方面它压迫舱壁，正是燃气对火箭的反作用力把火箭推上太空（图4-5-5）。

◎**反冲**

当物体中的一部分向某方向抛出、射出、弹出时，其余部分就会同时向相反方向运动，这种现象叫作**反冲**（recoil）。



▲ **图4-5-4**　划龙舟



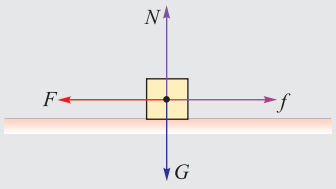
▲ **图4-5-5**　火箭发射，将“天宫二号”送入太空

例题示范

问题　重300 N的木箱静止于水平地面上。如果用手施加大小为60 N的水平向左的力推木箱，木箱静止不动。这时木箱受到哪些力的作用?这些力各是多大?它们的反作用力分别是哪些力？有哪些力是平衡力?

分析　物体处于静止平衡状态，可以分别从水平方向、竖直方向力的平衡条件入手。

解　木箱受重力G，大小为300 N，方向竖直向下；木箱跟地面接触，使地面发生形变，受到弹力（支持力）N，大小为300 N，方向垂直于地面向上；手对木箱的推力F，大小为60 N，方向向左；木箱虽静止，但在推力作用下有向左运动趋势，因而木箱还受向右的静摩擦力f的作用，大小为60 N。以上受力如图4-5-6所示。



▲ **图4-5-6**

木箱所受重力的反作用力是木箱对地球的作用力；地面对木箱的支持力的反作用力是木箱对地面的压力；手对木箱的推力的反作用力是木箱对手的推力；地面对木箱的静摩擦力的反作用力是木箱对地面的静摩擦力。

木箱所受四个力中有两对平衡力：木箱所受重力G和支持力N，木箱所受推力F和静摩擦力f。

活动

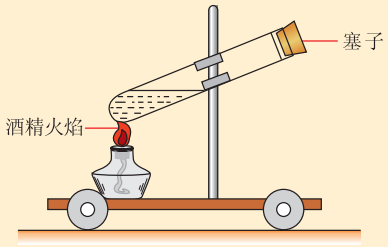
如图 4-5-7 所示，制作一辆反冲小车。观察酒精灯燃烧一段时间后，塞子喷出时小车的运动情况，并回答下列问题。

（1）小车在什么情况下能运动？为什么？

（2）小车向哪个方向运动？

（3）用牛顿第三定律进行分析，指出增大小车速度的办法有哪些。

（4）根据实验现象和生活体验，请描述反冲现象。



▲ 图4-5-7

自我评价

1. 如图 4-5-8 所示，甲、乙两船原来静止在平静的水面上，甲船上的人用力推乙船，甲船也会朝相反的方向运动，这是为什么？

2. 一对作用力和反作用力与一对平衡力有什么区别？

3. 作用力和反作用力总是成对出现的。如图 4-5-9 所示，放在地球表面的桌子上的一只足球，受到作用力和反作用力有哪几对？足球所受的力是这几对中的哪几个？地球所受的力是其中哪几个？



▲ 图4-5-8



▲ 图4-5-9

4. 甲、乙两人在冰面上“拔河”。两人中间位置处有一分界线，约定先使对方过分界线者为赢。若绳子质量不计，冰面可看成光滑，则下列说法正确的是（　　）

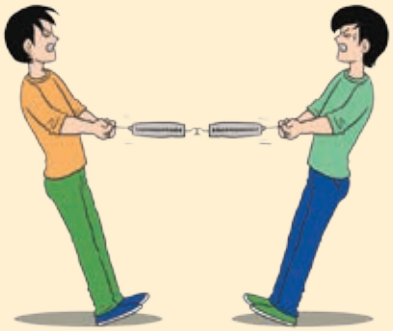
A. 甲对绳的拉力与绳对甲的拉力是一对平衡力

B. 甲对绳的拉力与乙对绳的拉力是作用力与反作用力

C. 若甲的质量比乙大，则甲能赢得“拔河”比赛的胜利

D. 若乙收绳的速度比甲快，则乙能赢得“拔河”比赛的胜利。

5. 根据图 4-5-10 的情景，讨论图中的两个问题。



（a）甲、乙两同学想通过对方所拿的弹簧测力计的示数来比出谁的力气大，这可能吗?



（b）“马拉车的力始终等于车拉马的力。”你认为这话正确吗？如果是对的，那么车为什么还能向前运动呢?

▲ 图4-5-10

发展空间

实验室

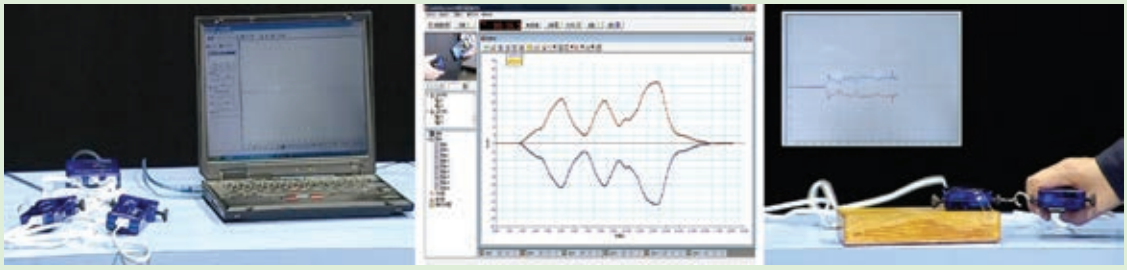
用力传感器探究作用力与反作用力的关系

力传感器可以把它受力的大小随时间变化的情况即时传到计算机上，由计算机屏幕显示出来。

如图 4-5-11（a）所示，实验时把两只力传感器同时连在计算机上，用两手握住两只力传感器并用力拉，图 4-5-11（b）中横坐标轴上下两条曲线分别表示它们受力的大小。

可以看到，两只力传感器同时受力，而且在任何时刻两个力的大小都是相等的、方向都是相反的。

我们已经知道牛顿第三定律适用于静止物体之间，那么在运动物体之间是否适用呢？如图 4-5-11（c）所示，把一只力传感器安装在一个滑块上，另一只握在手中，当通过传感器用力拉滑块时，尽管滑块的运动状态可能变化，力的大小也可能随时间变化，但在任何时刻，作用力和反作用力总保持大小相等、方向相反。这表明，牛顿第三定律所阐明的作用力与反作用力的关系，不仅适用于静止物体之间，也适用于运动物体之间，即这种关系与物体的运动状态无关。



（a） （b） （c）

▲ 图4-5-11

感悟 · 启迪

集成是创新，并且是非常重要的创新。牛顿曾坦言：“如果说我比别人看得更远些，那是因为我站在了巨人的肩上。”牛顿是科学发展史上第一位集大成者，牛顿力学是他在开普勒、笛卡尔、伽利略等科学家研究的基础上发挥自己的聪明才智的集成式创新。

学习是在汲取新知识的同时不断集成的过程。学习中，我们要注重联想，不仅加强本学科内容的纵向联系，还要注意不同学科的横向联系，不断地集成。

6 牛顿运动定律的应用

动力学方法测质量

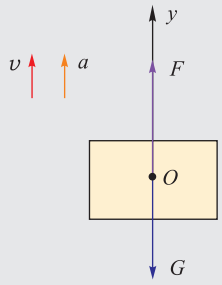
质量是物体惯性大小的量度。如果已知物体的受力情况和运动情况，可以求出它的加速度，进一步利用牛顿第二定律求出它的质量。

例题示范

问题 一个物体受到竖直向上的拉力，由静止开始向上运动。已知拉力F为640 N，物体在最初的2 s内的位移为6 m，则物体的质量是多少？（g取9.8 m/s^2）

分析　物体在竖直方向上受到两个力的作用：一个是竖直向上的大小为640 N的拉力，另一个是重力。由物体向上做初速度为零的匀加速直线运动，且最初2 s内的位移为6 m，即可以求得加速度。已知拉力和加速度，由牛顿第二定律，即可求得质量。

解　如图 4-6-1 所示建立直线坐标系，以物体的运动方向为 y 轴的正方向，在图中作出拉力 F 和重力 G 的示意图，并标出速度v和加速度 a 的方向，由匀变速直线运动公式得



▲ 图4-6-1

$$y=\frac{1}{2}at^2$$

所以

$$a=\frac{2y}{t^2}=\frac{2\times6}{2^2}\text{ m/s}^2=3\text{ m/s}^2$$

由牛顿第二定律

$$F-G=ma$$

$$F-mg=ma$$

所以

$$m=\frac{F}{g+a}=\frac{640}{9.8+3}\text{ kg}=50\text{ kg}$$

拓展　由例可知，已知物体的受力和运动情况，可求得物体的质量。1966年，科学家在地球上空完成了根据牛顿第二定律测定质量的实验。实验时用“双子星”号宇宙飞船去接触正在轨道上运行的火箭组，接触后开动飞船尾部的推进器，使飞船和火箭组共同加速。根据已知的推进器的推力，以及飞船和火箭组的运动情况，求出了飞船和火箭组的质量。

讨论交流

你知道在太空中，宇航员如何测量自己的质量吗？

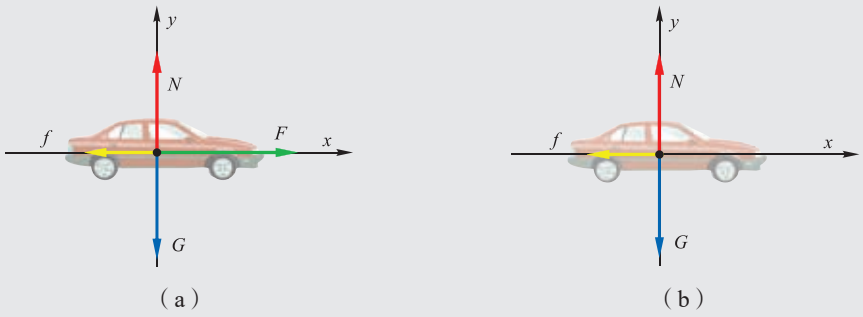
从受力确定运动情况

对于质量已知的物体，如果知道它的受力情况，可以由牛顿第二定律求出物体的加速度，再通过运动学的规律确定物体的运动情况。

例题示范

问题 某质量为1100 kg的汽车在平直路面上进行测试，现测得汽车前进中所受阻力恒为车重的0.04倍，当汽车用2000 N的牵引力起步加速时，需要多长时间速度能达到100 km/h？如汽车以100 km/h匀速前进时，关闭汽车发动机，则汽车的滑行距离是多少？（g取10 m/s^2）

分析 这是一个已知汽车受力情况，求汽车运动的问题。先分析汽车受力情况［图 4-6-2（a）］。汽车起步加速阶段，共受四个力的作用：在竖直方向上受到重力和支持力；在水平方向上受到牵引力和阻力；汽车关闭发动机后，受三个力的作用［图 4-6-2（b）］：在竖直方向上受到重力和支持力；在水平方向上受到阻力。



▲ 图4-6-2

再分析汽车的运动情况。汽车起步加速阶段，在竖直方向上，汽车的运动状态没有发生变化，水平路面对汽车的支持力N应等于汽车的重力G。在水平方向上，汽车做匀加速直线运动，初速度为零，末速度为100 km/h，合外力提供加速度，汽车的运动状态发生变化，可根据牛顿第二定律求得汽车运动的加速度a_1，再根据运动学的公式，求得汽车达到100 km/h速度所用的时间。同理，汽车的刹车阶段，在水平方向上，汽车做匀减速直线运动，初速度为100 km/h，末速度为零，合外力提供加速度，汽车的运动状态发生变化，可根据牛顿第二定律求得汽车运动的加速度a_2，再根据运动学的公式求出刹车位移。

解 如图 4-6-2（a）和（b）所示建立平面直角坐标系（注意此坐标系不随汽车运动，下面的情况也如此），在图上作出汽车受力示意图，以初始时汽车运动的方向为 x 轴的正方向，沿两个坐标轴方向分别建立方程

汽车起步加速阶段：$N - G = 0$ ①

由牛顿第二定律 $F - f = ma_1$ ②

$f = 0.04 \times 1100 \times 10\ \mathrm{N} = 440\ \mathrm{N}$ ③

将③式代入②式得 $a_1 = \dfrac{2000 - 440}{1100}\ \mathrm{m/s^2} \approx 1.42\ \mathrm{m/s^2}$ ④

由运动学公式　$v_t - v_0 = at$　⑤

将④式代入⑤式得　$t = \frac{v_t}{a_1} = \frac{27.8}{1.42}\ \text{s} \approx 19.6\ \text{s}$

汽车关闭发动机后，由牛顿第二定律　$-f = ma_2$　⑥

$a_2 = \frac{0-440}{1100}\ \text{m/s}^2 \approx -0.4\ \text{m/s}^2$　⑦

由运动学公式　$v_t^2 - v_0^2 = 2ax$　⑧

将⑦式代入⑧式得　$x = \frac{-27.8^2}{2\times(-0.4)}\ \text{m} \approx 966.05\ \text{m}$

讨论交流

汽车遇到紧急情况时，能否采用关闭汽车发动机方式来避险？还有什么更好方法可以采用？

可见，根据物体的受力和初始运动情况，由牛顿运动定律就可以确切地知道物体以后的运动。解决许多实际的运动问题，如交通问题、宇宙飞船在飞行过程中的问题与我们这里的解题思路是相似的，只是前者的分析与计算要复杂精确得多。

从运动情况确定受力

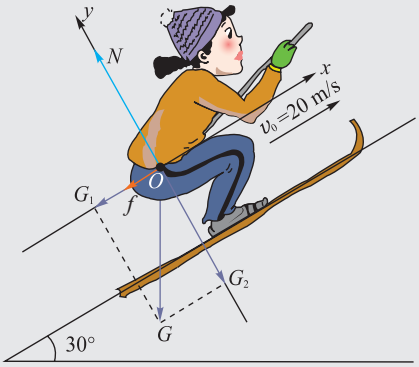
对于质量已知的物体，如果知道它的运动情况，根据运动学公式求出加速度，再根据牛顿第二定律就可以确定物体所受的力。

例题示范

问题　滑雪者以v_0 = 20 m/s的初速度沿直线冲上一倾角为30°的山坡，从刚上坡即开始计时，至3.8 s末，滑雪者速度变为零。如果滑雪器具连同滑雪者的总质量为m = 80 kg，求滑雪板与山坡之间的摩擦力是多少。（g取10 m/s^2）

分析 滑雪者在斜坡上的运动情况：初速度为20 m/s，末速度为零，运动时间为3.8 s。根据匀变速直线运动的公式，可以先求得加速度a，然后再求出滑雪板与山坡之间的摩擦力。

解 如图4-6-3所示建立平面直角坐标系，以v_0方向为x轴的正方向，把滑雪板和滑雪者看作质点，作出它的受力示意图，并将重力进行正交分解。



▲ 图4-6-3

$$G_1 = G\sin 30°$$

$$G_2 = G\cos 30°$$

在 x 方向上，f 为物体受到的摩擦力大小；在y方向上，因为物体的运动状态没有变化，所以重力的一个分力G_2与山坡提供的支持力N大小相等，即

$$G_2 = N$$

由x方向的受力和运动情况可建立方程

$$-f - G_1 = ma \qquad ①$$

又因为

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} \qquad ②$$

所以

$$a = \frac{0-20}{3.8}\ \mathrm{m/s^2} \approx -5.26\ \mathrm{m/s^2}$$

其中“－”号表示加速度方向与x轴正方向相反。

将上述结果代入①式可得

$$f = -80 \times 10 \times \frac{1}{2}\ \mathrm{N} - 80 \times (-5.26)\ \mathrm{N}$$

$$= -400\ \mathrm{N} + 420.8\ \mathrm{N}$$

$$= 20.8\ \mathrm{N}$$

可见，根据物体的运动情况，由牛顿运动定律就可推知物体的受力情况。牛顿正是在前人研究工作的基础上了解到月球、行星的运动情况，从而发现了万有引力定律。

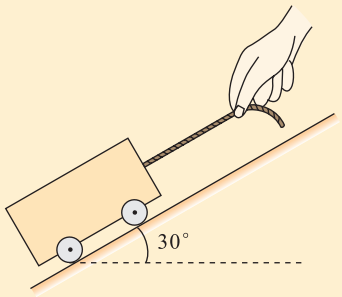
讨论交流

在解决了上面几个问题后，你能归纳出应用牛顿运动定律能解决哪些问题，以及解决问题的一般思路和方法吗？

自我评价

1. 将质量为2 kg的物体放在水平地面上，用10 N的水平拉力使它由静止开始运动，已知第3 s末物体的速度为6 m/s，则物体与地面间的动摩擦因数为多大？若这时撤去拉力，则物体继续滑行的时间和距离各为多少？（g取10 m/s^2）

2. 如图4-6-4所示，手拉着小车静止在倾角为30° 的光滑斜坡上。已知小车的质量为2.6 kg，求：



▲ 图4-6-4

（1）绳子对小车的拉力；

（2）斜面对小车的支持力；

（3）如果绳子突然断开，求车的加速度大小。

3. 网球被击出的过程，可近似地认为球从静止加速到速度大约为 50 m/s。网球的质量约为 0.06 kg，请估算球拍对球施加的力（假设球加速运动的距离为 0.3 m，且在这个过程中加速度大小不变）。

4. 枪管长0.5 m，质量为2 g的子弹从枪口射出时的速度为400 m/s，假设子弹在枪管内受到的高压气体的力是恒定的，试估算此力的大小。

5. 老式电视机的显像管中有一电子枪用于发射电子束。假设电子枪中发出的某电子从静止加速到 2×10^7 m/s 的过程中，通过了 0.01 m 的距离。请估算电子枪对电子的作用力大小。（电子质量 $m_e=9.1\times10^{-31}$ kg）

7 超重与失重



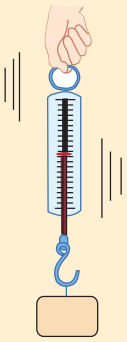
▲ 图4-7-1

小聪在“测量运动物体所受的重力”的研究性学习活动中，站在电梯中的体重计上（图 4-7-1），当电梯运动时，随电梯起动、上行或下行、减速停止。她发现体重计示数并不稳定，时而增大，时而不变，时而减小。小聪觉得很奇怪，难道人所受的重力会因电梯的运动状态变化而变化吗？你能解释这一现象吗？

对电梯实验的模拟与分析

活动

如图4-7-2所示，在弹簧测力计下挂一重物，用手提着弹簧测力计，使重物在竖直方向上做多种方式的运动。观察并记录弹簧测力计示数的变化情况。



▲ 图4-7-2 用手提着弹簧测力计的吊环向上、向下运动

运动状态	弹簧测力计的示数	加速度的方向
静止		
由静止到向上运动		
由向上运动到静止		
由静止到向下运动		
由向下运动到静止		

讨论交流

分析下列问题中重物的受力情况，并回答问题。

（1）在重物上下运动的过程中，其重力是否变化？

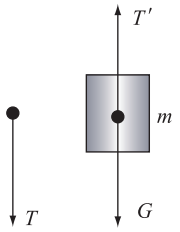
（2）弹簧测力计的示数是由哪一个力的大小决定的？

（3）在哪些情况下弹簧测力计的示数等于物体所受的重力？在哪些情况下弹簧测力计的示数不等于物体的重力？

根据牛顿运动定律推导重物的加速度为a时弹簧测力计示数的表达式。

超重与失重现象

用弹簧测力计测量物体所受重力的原理如图4-7-3所示。物体对弹簧测力计的拉力T的大小决定了弹簧测力计的示数，它和弹簧测力计对物体的拉力T'是一对作用力与反作用力，即T与T'大小相等。但是物体所受的重力与弹簧测力计对物体的拉力大小相等，即$G = T'$是有条件的。由牛顿第二定律可知，只有物体在竖直方向上加速度等于零，弹簧测力计的示数才等于物体所受的重力。



▲ 图4-7-3

如果物体具有竖直向上的大小为a的加速度，由牛顿第二定律：

$$T' - mg = ma$$

可知，弹簧测力计的示数T大于物体所受的重力。此时

$$T=m\,(g + a)$$

我们把物体对悬挂物的拉力（或对支持物的压力）大于物体所受重力的现象称为**超重**（overweight）。

如果物体具有竖直向下的大小为 a 的加速度，由牛顿第二定律：

$$mg - T = ma$$

可知，弹簧测力计的示数小于物体所受的重力。此时

$$T = m\,(g - a)$$

我们把物体对悬挂物的拉力（或对支持物的压力）小于物体所受重力的现象称为**失重**（weightlessness）。如果物体竖直向下的加速度$a = g$，那么弹簧测力计的示数就等于零，我们把物体对悬挂物的拉力（或对支持物的压力）等于零的现象称为完全失重（图4-7-4）。

物体在竖直方向做加速运动时，物体对悬挂物的拉力（弹簧测力计的示数T）或对支持物的压力（台秤示数N），通常我们称它（T或N）为**视重**。而重力是由于地球作用于物体而产生的，始终存在，大小也不会受运动状态改变影响，我们通常称它为**实重**。

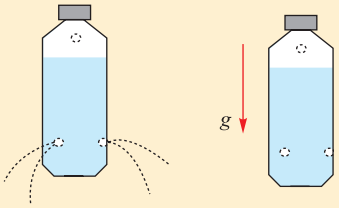


（a）台秤上放上重物，让它们一起自由下落，台秤示数为零　　（b）太空实验

▲ 图4-7-4　完全失重

活动 | “水不往低处流”

如图4-7-5所示，把矿泉水瓶的上部挖一个小孔，下部挖几个小孔，装入水后，水将射出来。用手把上部的小孔堵住时，下部小孔的水不能流出。松开手使瓶子从高处自由下落，可以发现下落过程中水不流出。做一做并解释其原因。



▲ 图4-7-5

自我评价

1. 什么情况下会产生超重、失重、完全失重现象？这些情况下物体的质量改变了吗？物体所受的重力改变了吗？

2. 在火箭竖直升空的加速阶段，当加速度达到70 m/s^{2}时，宇航员对座椅的压力大小等于自身重力的多少倍？此刻宇航员处于超重状态还是失重状态？

3. 一电梯由三楼向四楼运动，接近四楼时以0.65 m/s^{2}的加速度减速，电梯内一名乘客的质量为60 kg，则此时电梯底面对他的支持力为多少？他处于超重状态还是失重状态？电梯以多大的加速度减速时，电梯底面对他的支持力为零？

4. 一根细绳下端挂一个质量为2 kg的物体，在竖直方向上做匀变速直线运动，若绳受到物体的拉力为23.6 N，试确定物体的运动情况。若绳的拉力为15.6 N，物体的运动情况又如何？

发展空间

课外阅览

宇宙飞船里的超重和失重现象

宇宙飞船在发射升空、在轨运行、着陆返回时，宇航员都会有强烈的超重和失重感受。发射升空过程中需要获得向上的巨大加速度，飞行员会受到许多倍于自身所受重力的推力而处于超重的状态。这样的状态下，没有接受过严格训练的人会两眼发黑，动弹不得，甚至失去知觉，这是因为人体里的血液将不能正常循环。着陆返回时，会有强烈的失重感受。宇宙飞船在轨运行期间，来自地球的万有引力全部用来提供绕地球运行所需的向心力（必修第二册·第三章），此时飞行器内物体处于完全失重状态，轻轻一碰就会“飞”起来。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 在我们之前的学习中，质量指的是物体中所含物质的多少；而在这一章我们了解到，质量是表示物体惯性大小的物理量。这两种定义有区别吗？

2. 在第二章对匀变速直线运动的实验研究中，我们是怎样使小车做匀变速直线运动的？其中应用到牛顿运动定律了吗？

3. 理想实验的思维方法为我们研究问题提供了什么帮助？在现实中我们也用到这样的方法吗？

• 自主小结

1. 伽利略是如何推翻亚里士多德关于力与运动关系的观点的？

2. 准确表述惯性定律和惯性。

3. 在探究物体的加速度与受力、质量的关系时，我们用到了什么常用的实验思路？其中对哪些量的值进行了近似？

4. 准确表述牛顿第二定律及其表达式。

5. 为什么要建立力学单位制？基本单位和导出单位之间的联系是如何建立起来的？

6. 准确表述牛顿第三定律。

7. 说说对牛顿运动定律进行应用的三种常见情形。

• 相互交流

通过调查，了解各种交通工具的加速和减速性能。与同学一起探讨，为什么高铁列车可以非常精确地停靠在站台上的既定位置？

本章复习题

1. 伽利略根据小球在斜面上运动的实验和理想实验，提出了惯性的概念，从而奠定了牛顿力学的基础。早期物理学家关于惯性有下列说法，其中正确的是（　　）

   A. 物体运动的速度越大，其惯性越大

   B. 没有力的作用，物体只能处于静止状态

   C. 物体做变速运动时，没有惯性

   D. 运动物体如果没有受到力的作用，将继续以同一速度沿同一直线运动

2. 质量400 g的玩具汽车，放在水平地面上以一定的初速度开始运动，经t = 2 s通过了240 cm后停止，如果认为玩具汽车在运动过程中所受的阻力大小不变，试计算玩具汽车在运动中所受阻力的大小。

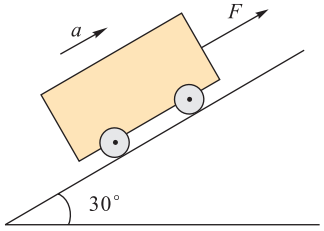
3. 用2 N的水平拉力拉一物体沿水平地面运动时，可使它获得1 m/s^{2}的加速度；用3 N的水平力拉此物体沿原地面运动时，可使它获得2 m/s^{2}的加速度。那么，若用4 N的水平力拉此物体沿原地面运动时，它获得的加速度为多大？

4. 质量为2 kg的木箱在水平恒力 F 的作用下由静止开始运动，4 s末速度达4 m/s，此时将力F撤去，又经过6 s后物体停止运动。求力F的大小。

5. 质量为2 kg的物体处于静止状态，现受到两个互成角度为120°、大小均为50 N的力的作用，此外没有其他力的作用。则2 s末物体的速度是多大？2 s内物体发生的位移是多少？

6. 质量为75 kg的人站在电梯的台秤上，当电梯以2.8 m/s^{2}的加速上升、以3.1 m/s^{2}的加速度加速下降、以4.4 m/s的速度匀速上升时，台秤的示数分别是多少？（g取10 m/s^2）

7. 沿倾角为30° 的斜坡向上拉质量为3.7 kg的小车，车沿斜坡向上的加速度大小为1.7 m/s^2。求绳子的拉力F。（g取10m/s^2，坡面对小车的阻力不计）



▲ 第7题图

8. 某城市交通部门规定汽车在市区某街道行驶时速度不得超过v_m =30 km/h。一辆汽车在该水平路段紧急刹车时车轮抱死，沿直线滑行一段距离后停止，交警测得车轮在地面上滑行的痕迹长s_m = 10 m。从手册中查出该车轮与地面间的动摩擦因数μ = 0.72，取g =10 m/s^2。

   （1）请你判断汽车是否违反规定超速行驶。

   （2）目前，有一种汽车制动装置，可保证车轮在制动时不被抱死，使车轮仍有一定的滚动。安装了这种防抱死装置的汽车，在紧急刹车时不但可以使汽车便于操控，而且可获得比车轮抱死更大的制动力，从而使刹车距离大大减小。假设汽车安装防抱死装置后刹车制动力恒为F，驾驶员的反应时间为t，汽车的质量为m，汽车正常行驶的速度为v，试推出刹车距离s的表达式。

附　录

误差和有效数字

做物理实验，不仅要观察物理现象，还要从现象中找出各物理量之间的数量关系，这就必须对物理量进行测量。在测量中，测量的结果是不可能绝对精确的，测出的数值（测量值）与真实值之间的差异叫作**误差**（error）。从误差来源上看，误差可分为系统误差和偶然误差两种。系统误差是由于仪器本身不精确，或实验方法粗略，或实验原理不完善产生的。例如，在测量质量时，由于天平两臂不严格相等或砝码不准，做热学实验时，没有考虑散热损失等，这些都会产生系统误差。系统误差的特点是，在多次重复测量时，测量值总是大于（或小于）真实值。要减小系统误差，必须校准测量仪器，改进实验方法，设计在原理上更完善的实验。



▲ **附图**　如果砝码破损或受到污物沾染，利用天平称量物体的质量时，将会产生系统误差

偶然误差是由于各种偶然因素对实验者、测量仪器、被测物理量的影响而产生的。偶然误差的特点是，测量值与真实值相比有时偏大、有时偏小，并且偏大和偏小的概率相同 。 例如，用毫米刻度尺测量物体的长度，毫米以下的数值只能用眼睛来估读，各次测量的结果就会不一致。因此可进行多次重复测量，然后求出几次测量值的平均值，通常这个平均值的偶然误差较小，更接近真实值。

为描述误差数值的相对大小，人们还把测量值与真实值的差异叫作绝对误差，把绝对误差与真实值的比值叫作相对误差。

既然测量有误差，那么测得的数值只能是近似数。例如，用厘米刻度尺测得人的身高为 160.5 cm，最末一位数字 5 就是估读出来的，是具有一定意义的近似数字。我们把通过直接读数获得的准确数字叫作可靠数字；把通过估读得到的那部分数字叫作存疑数字；把测量结果中能够反映被测量大小的带有一位存疑数字的全部数字叫作**有效数字**（significant figure）。

在有效数字中，3.2、3.20、3.200 的含义是不同的，它们分别代表两位、三位、四位有效数字。3.2表示最末一位数字2是估读的，而3.20和3.200则表示最末一位数字0是存疑数字。因此小数后的零是有意义的，不能随便舍去或添加。对于小数，如 0.92、0.085、0.0032 都是两位有效数字，非零数字前面的零是表示小数点位置的，不是有效数字。对于大的数目如 3.65×10^4 km 就表示三位有效数字，如写成 3.650×10^4 km 就表示四位有效数字。在实验中，测量时要按照有效数字的规则来读数，运算时现阶段只取两位或三位有效数字就可以了。

附　录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

B, C, D, F

标量 scalar 11

参考系 reference frame 3

超重 overweight 135

动摩擦因数 dynamic friction factor 76

分力 component force 82

反作用力 reaction 123

J

机械运动 mechanical motion 4

加速度 acceleration 24

劲度系数 coefficient of stiffness 73

静摩擦力 static frictional force 78

H

胡克定律 Hooke law 73

滑动摩擦力 sliding friction force 74

合力 resultant force 82

G, L

惯性 inertia 103

惯性定律 law of inertia 103

力 force 62

力的分解 resolution of force 87

路程 path 9

N, P

牛顿第一定律 Newton first law 103

牛顿第二定律 Newton second law 113

牛顿第三定律 Newton third law 124

平均速度 average velocity 14

平行四边形定则 parallelogram rule 85

平衡 equilibrium 92

S, T

速率 speed 14

矢量 vector 11

失重 weightlessness 135

瞬时速度 instantaneous velocity 14

弹力 elastic force 71

W, X, Y

误差 error 139

位移 displacement 9

形变 deformation 69

有效数字 significant figure 139

匀变速直线运动 uniformly accelerated rectilinear motion 33

Z

质点 mass point 5

自由落体运动 free fall 52

作用力 action 123

重力加速度 gravitational acceleration 55

重力 gravity 64

重心 center of gravity 64

后　记

为全面落实立德树人根本任务，着力发展学生的核心素养，根据《普通高中课程方案（2017 年版）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（2017 年版）》对高中物理教科书进行了全面修订。

本书在修订过程中，保留了原教科书的部分内容，并得到了许多专家、学者和老师的指导与帮助。郝柏林先生执笔了本套教科书的引言“走进物理学”；刘炳昇、钱时惕、陈琪兮、赵坚、杨树峭等同志参与了原教科书的编写；冯劲松、杜一平等同志为本书的修订进行了前期的研究；洪安生等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，吕彤、李攀文、褚寒冰、王城、习辉等同志对教科书进行了审读和试教，并提出了宝贵意见。在此，我们对所有关心、支持本书编写与修订的专家、学者和老师表示衷心的感谢。

本书选用了一些图片和文字资料，对相关作者和出版社，我们一并表示诚挚的谢意。

编者

2019 年 2 月