目 录

第五章 抛体运动……1
一、本章教材概述……1
二、教材分析与教学建议……5
第1节 曲线运动……5
第2节 运动的合成与分解……9
第3节 实验：探究平抛运动的特点……13
第4节 抛体运动的规律……17
三、“复习与提高”参考答案与提示……21
四、参考资料……25

第六章 圆周运动……28
一、本章教材概述……28
二、教材分析与教学建议……32
第1节 圆周运动……32
第2节 向心力……35
第3节 向心加速度……40
第4节 生活中的圆周运动……44
三、“复习与提高”参考答案与提示……51
四、参考资料……56

第七章 万有引力与宇宙航行……61
一、本章教材概述……61
二、教材分析与教学建议……65
第1节 行星的运动……65
第2节 万有引力定律……68
第3节 万有引力理论的成就……72

第 4 节　宇宙航行…… 75
第 5 节　相对论时空观与牛顿力学的局限性…… 78
三、“复习与提高”参考答案与提示…… 82
四、参考资料…… 86

第八章　机械能守恒定律……102
一、本章教材概述……102
二、教材分析与教学建议……105
第 1 节　功与功率……105
第 2 节　重力势能……110
第 3 节　动能和动能定理……114
第 4 节　机械能守恒定律……117
第 5 节　实验：验证机械能守恒定律……121
三、“复习与提高”参考答案与提示……125
四、参考资料……128

第五章

抛体运动

课程标准的要求

2.2.1　通过实验，了解曲线运动，知道物体做曲线运动的条件。

2.2.2　通过实验，探究并认识平抛运动的规律。会用运动合成与分解的方法分析平抛运动。体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想。能分析生产生活中的抛体运动。

一、本章教材概述

本章既要讨论曲线运动的规律，又要用牛顿运动定律对有关曲线运动的问题进行分析。可以说，本章实际上是运动学和动力学知识在曲线运动中的具体应用，是学生所学运动学和动力学知识的进一步拓展和延伸。从思维上看，本章内容与前面所学内容构成了对运动与相互作用认识由简单到复杂、由浅入深的逐渐深化过程。

教材对运动与相互作用认识的逐渐深化主要体现在两个方面：一是研究的机械运动形式从简单的直线运动到相对复杂的曲线运动；二是从对运动现象的描述到对物体之所以做曲线运动原因的解释。

具体到本章中各节的内容，则体现了循序渐进的逻辑关系，并且渗透了物理学的研究方法。各节之间的逻辑关系及研究方法如图5–1所示。

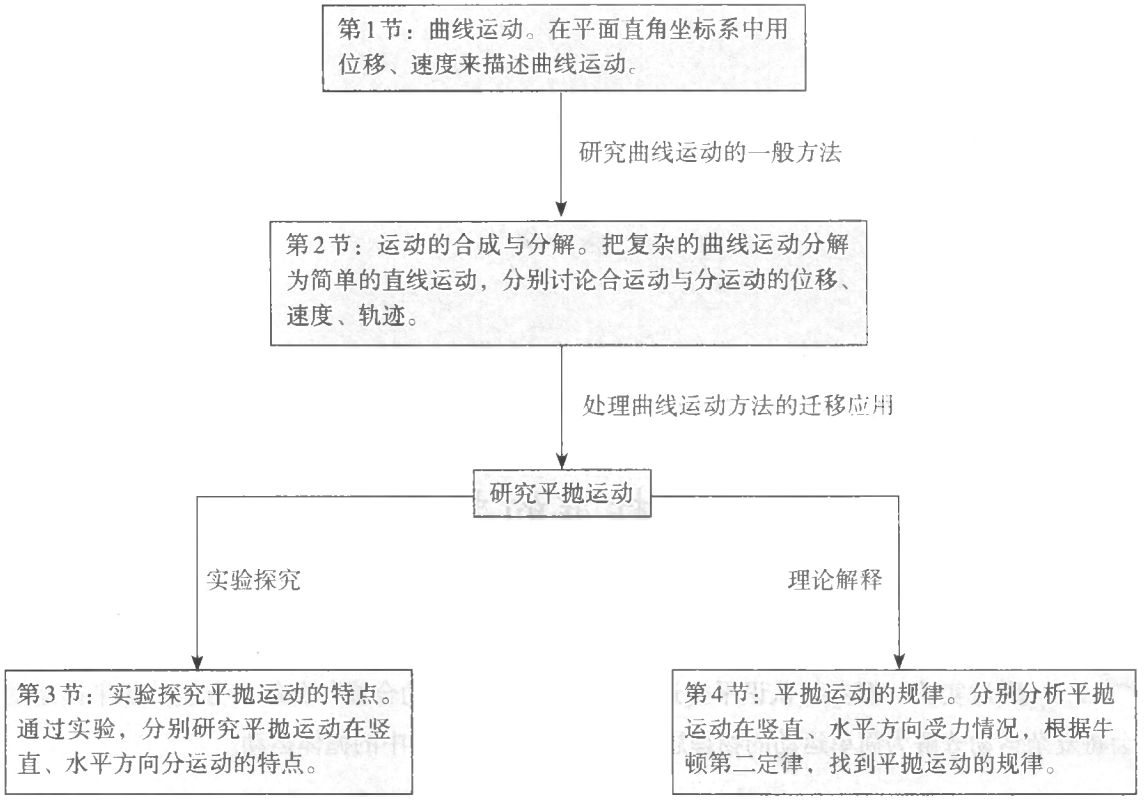


图5-1

本章内容既有物理模型的建立和分析推理过程，又有通过实验获取平抛运动特点的典型的科学探究过程。通过这些内容不仅可以发展学生的运动与相互作用观念，还可以培养学生的科学思维和科学探究素养。

本章按照“曲线运动→运动的合成与分解→平抛运动”的结构进行编排，突出了物理观念的形成，以及科学思维与科学探究素养的发展。（1）突出解决曲线运动问题的“大思路”，即把复杂的曲线运动分解为水平和竖直方向上简单的直线运动，并进一步应用这个“大思路”分析、论证平抛运动的规律。（2）强调科学探究，将“研究平抛运动”实验改为“探究平抛运动的特点”。在得出平抛运动规律之后，再从理论上做出解释，强调了实验和理论在研究客观世界中的价值和作用。（3）注意难点分散和内容编排的内在逻辑性，将“曲线运动”的内容拆分为两节。

具体来说，本章在编写时有如下考虑。

1. 关注学习内容的前后联系，深化和拓展运动与相互作用观念

物理观念的形成不是一蹴而就的，需要在物理概念、规律的学习过程中逐步巩固与拓展。在学习过程中，加强物理概念、规律的前后联系，使得新的物理概念、规律建立在原有知识的基础上得到逐渐深化和拓展，并为后续学习留下合适的“接口”。例如，在本章的章首语中就明确指出：“研究直线运动时的基本思路和方法，原则上同样可以用来处理曲线运动。”

从具体知识内容看，本章内容与前面所学知识的具体对应关系可以用图5-2表示。

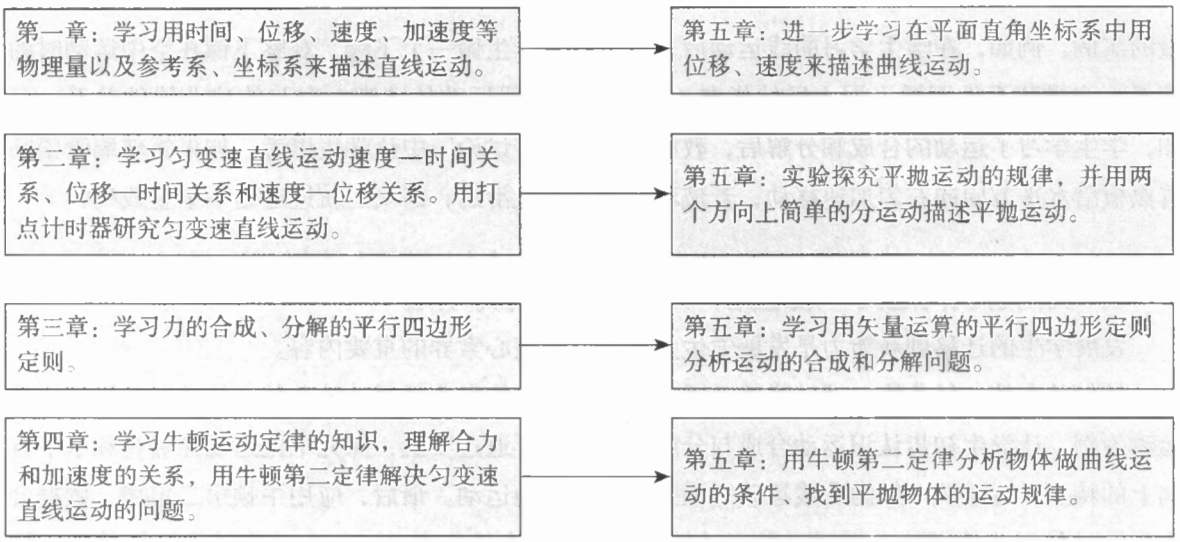


图 5-2

2. 优化物理结论的形成过程，突出科学思维和科学探究素养的培养

为了发展学生的科学思维和科学探究等素养，教材特别关注以下几点：第一，突出物理概念、规律的得出过程，并用丰富的实例引导学生在事实经验的基础上，逐步经历抽象、概括、推理的思维过程。第二，在认识物理概念、规律时，引导学生经历先定性后定量的一般认识过程。第三，在认识具体问题时，注重引导学生先通过实验探究得出结论，再进行理论解释，进而突出理论分析与实验探究的统一性。第四，突出科学思维方法的育人价值，引导学生逐步体会极限思想、等效思想等。例如，为得到曲线运动速度方向是沿曲线某点的切线方向这一结论，教材设计了如图5-3所示的过程。

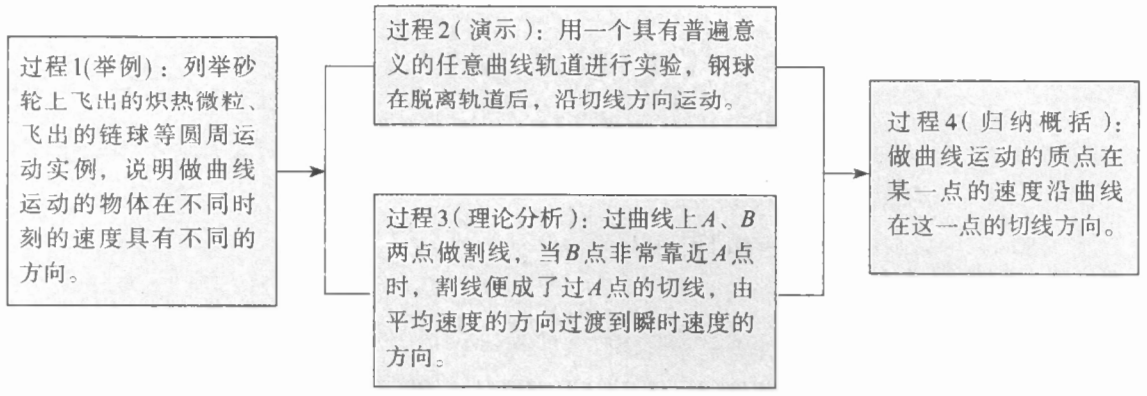


图 5-3

3. 用大量实例丰富学生的体验，加强知识与情境的联系

本章采用大量实例丰富学生对一般曲线运动和平抛运动的体验，以加强知识与情境的联系。学生经过深入思考和亲身体验后，不仅更容易领悟物理知识、加深印象，而且更容易将知识应用到具体问题中，从而提升学生在真实情境中解决问题的能力。

教材在“问题”“做一做”“演示”“思考与讨论”“例题”“练习与应用”等栏目中呈现了大量的实例。例如，在学生学习曲线运动后，教材要求学生做一个飞镖，观察飞镖在空中运动时的情景、飞镖落至地面插入泥土后的指向，以便体会曲线运动的速度方向与轨迹曲线的关系。再如，学生学习了运动的合成和分解后，教材在“思考与讨论”中让学生思考：如果将玻璃管紧贴着黑板沿水平方向向右匀加速移动，若玻璃管内壁是光滑的，蜡块的轨迹还是一条直线吗？

4. 突出解决问题的一般思路，为迁移创新打好基础

发展学生的迁移创新能力是发展学生关键能力和核心素养的重要内容。

教材首先从一般曲线运动的描述入手，定性分析物体做曲线运动的条件，然后以分析蜡块的运动为例，让学生初步认识运动合成与分解的方法，再通过实验，探究平抛运动在竖直和水平方向上的特点，逐渐从一般的曲线运动过渡到特殊的平抛运动。最后，应用牛顿第二定律，依据合成与分解的思路从理论上解释平抛运动规律。这样的安排，有助于学生形成结构良好的知识体系，也有助于学生将学到的知识迁移到新情境中解决具体问题。

在“抛体运动的规律”一节中，教材先讨论了平抛运动的速度、位移、轨迹等基本要素，最后简要讨论了一般抛体的运动。学生可以借鉴处理平抛运动的方法处理一般的抛体运动，这样不仅拓展了抛体运动的内容，也为提高学生的迁移创新能力提供了合适的载体。

课时安排建议

1. 曲线运动	1课时
2. 运动的合成与分解	1课时
3. 实验：探究平抛运动的特点	1课时
4. 抛体运动的规律	2课时

二、教材分析与教学建议

第1节　曲线运动

1. 教学目标

（1）知道曲线运动的瞬时速度方向，能运用极限思想理解瞬时速度的方向，并会在轨迹图上画出某点的速度方向。

（2）理解曲线运动是变速运动，知道物体做曲线运动的条件。

（3）能运用牛顿第二定律和分解与合成的方法分析曲线运动，进一步理解运动与相互作用的观念。

2. 教材分析与教学建议

本节是整章教学的知识基础。学生已经学过直线运动、牛顿运动定律，对力与运动的关系有了一定的认识。曲线运动与直线运动的显著区别是它的速度的方向时刻在变化，教学中可通过“生活体验→实验探究→理论认知”逐步推进的方式来解决曲线运动速度方向的确定问题。关于物体做曲线运动的条件的教学，可以让学生先依据所学知识提出猜想，然后进行实验探究。教材先研究曲线运动的方向，然后研究物体做曲线运动的条件。从知识结构上看，曲线运动的速度方向是轨迹上某点的切线方向，只反映曲线运动的运动学特征，而曲线运动的条件则是动力学特征，因此教材的安排较好地符合先研究运动特征、再分析运动原因的认识之路。从对学生知识结构建构的过程来看，知道曲线运动的方向只是知道一个事物的结果，掌握曲线运动发生的条件才能理解出现该结果的原因，这样才能在逻辑上有利于学生深刻理解本节的两个重点内容。

（1）认识曲线运动

曲线运动是生活中常见的运动。在引入新课时，可以通过图片创设一些物体做曲线运动的情境，如汽车在弯曲的引桥上的运动、做飞行表演的飞机的运动、盘山公路上汽车的运动等，让学生分析这些运动的共同点。

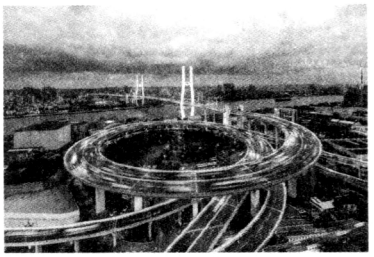
教学片段

生活中的曲线运动

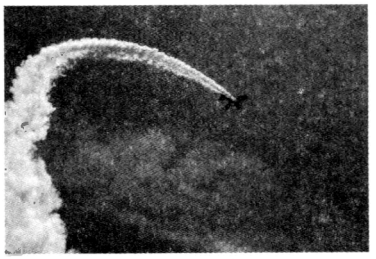
问题1. 图5-4甲中的汽车在弯曲的引桥上的运动是什么运动？为什么？

问题2. 图5-4乙中的飞机的运动是什么运动？为什么？

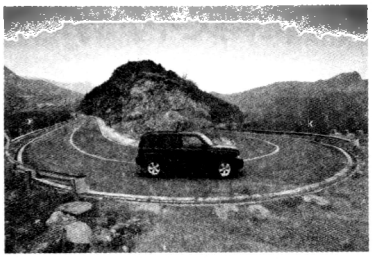
问题3. 图5-4丙中的汽车在盘山公路上的运动是什么运动？为什么？



甲



乙



丙

图5-4

问题4. 图5-4中弯曲的引桥、烟雾和公路，对于运动物体（汽车、飞机、汽车）来说，它们共同的本质是什么？

（2）曲线运动的速度方向

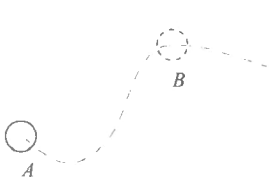
教材中选取了两幅来自实际情景的图片，并安排了一个演示实验。随后又通过从割线到切线的分析推理过程，最终确定曲线运动的方向。这样的安排充分体现了由简单到复杂、由静态到动态、由生活到实验、由实验到理论的科学认知过程。重视学生学习过程中知识的形成与发展，关注学生科学思维和科学探究过程的实施，有利于促进学生核心素养的培养。

通过观察图片，让学生得出的是感性的、直接的结论（猜想），还需要通过实验来证实。这样的设计可以强化科学探究中的问题与证据素养。在实验探究之后，教材安排了采用极限思想的理论分析，从理论上证明了做曲线运动的物体在某点的速度方向沿曲线在该点的切线方向。通过实验和理论两个视角的研究，不仅让学生明白了曲线运动速度的方向，还可使学生体会到做曲线运动的物体的速度是时刻改变的，曲线运动是变速运动。

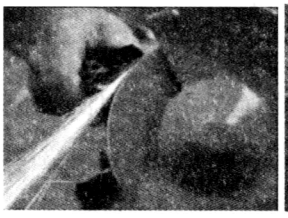
为了进一步丰富上述认识过程，可以创设如下的情境和问题。

教学片段

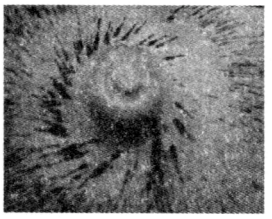
曲线运动的速度方向



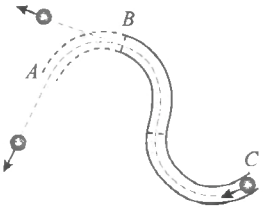
甲



乙



丙



丁

图5-5

问题1. 图5-5甲中的小球沿虚线所示的轨迹运动，小球在A、B位置时的速度方向如何？请在图上画出来。

问题2. 图5-5乙显示了砂轮打磨金属块时，脱落“火星”的运动轨迹。“火星”在脱落前瞬间的速度方向如何？

问题3. 图5-5丙显示了旋转陀螺边沿甩出的红墨水的印迹。墨水在离开陀螺边沿瞬间的速

度方向如何?

问题4. 图5-5丁是从不同（任意）出口处滚出小球留下的轨迹，你能从中归纳得到怎样的结论?

（3）物体做曲线运动的条件

速度方向确定后，教材进而引导学生研究物体做曲线运动的条件。从学生已经具有的知识和本节的新认识（曲线运动是变速运动），可以推理得到其所受的合力必不为0。是否受力就一定做曲线运动呢?这可不是依据牛顿第二定律可以直接得到的结果。学生需要提出自己的猜想，针对不同的猜想设计实验方案，进行探究性实验。教材“观察钢球的运动轨迹”的实验方案给出一个比较容易控制方向的作用力（钢球与磁铁间引力 ），可以方便地探究钢球在运动过程中受不同方向作用力后的运动情景，帮助学生认识物体做曲线、直线运动的条件。在实验现象的基础上，运用力或加速度的分解方法，就可以清晰地解释物体做曲线运动的原因，深刻理解运动与相互作用的观念。有条件的学校，可以把这个演示实验改为学生随堂实验，让学生由观看实验变成自己动手实验。

教学片段

物体做曲线运动的条件

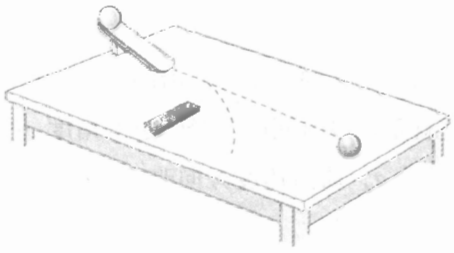


图5-6

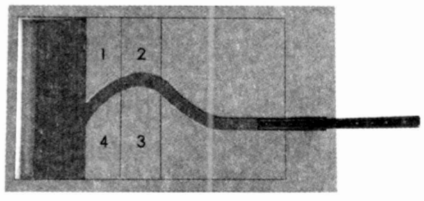


图5-7

问题1. 做曲线运动的物体的速度一定变化吗? 是否有加速度?

问题2. 做曲线运动的物体是否一定受力? 物体受力是否一定做曲线运动?

问题3. 物体是否做曲线运动可能跟什么因素有关? 用实验研究时需要控制哪些因素?

问题4. 如图5-6所示，从倾斜轨道滚下的钢球在水平面上运动，改变磁铁摆放的位置和钢球下滚的高度，你能得到怎样的结论?

问题5. 如图5-7所示，在水平面上放置倾斜的轨道和几块泡沫构成的曲线轨道，其中1、2、3、4块可撤除，当小钢球在轨道中运动时，撤除哪几块将改变小钢球的运动轨迹? 为什么? 实验结论与你的分析相符吗?

问题6. 做曲线运动的物体所受的合力方向跟轨迹弯曲情况之间存在着怎样的关系?

本节讨论了更一般的运动形式，对学生提出了更高的要求。整节教材紧紧围绕物体做曲线运动的速度方向、曲线运动的条件两个重点，把生活经验、实验探究、分析推理与现象解释有机地结合起来，层层递进，有利于学生核心素养的培养。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节配置了5道习题，其目的是让学生更好地理解所学的物理概念，能在熟悉的问题情境中应用常见的物理模型，能对比较简单的物理现象进行分析和推理，获得结论。第1题和第2题考察学生将实际问题抽象为简单的物理模型的能力，以深化对曲线运动的速度方向沿轨迹上该点的切线方向的理解和认识。第3题和第4题，要求学生理解圆周运动的速度方向沿圆周上该点的切线方向，并能进行简单的科学推理，从而获得结论。第5题要求学生掌握根据物体的受力情况判断物体的运动情况的方法，体会速度方向、合力方向与轨迹的弯曲之间的关系。

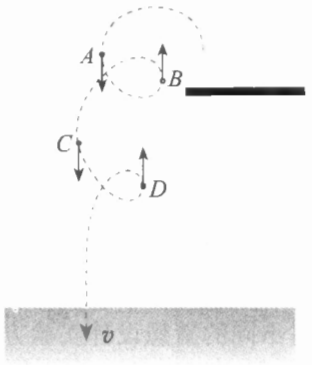


图5-8

1. 如图5-8所示，在A、C位置头部的速度与入水时的速度方向相同；在B、D位置头部的速度与入水时的速度方向相反。

提示：本题以“梦之队”为素材设置问题，加强爱国主义教育。把运动员头部的运动看作质点的运动，深化对曲线运动的速度方向沿该点轨迹的切线方向的认识。

2. 标注略。

提示：在实际问题中理解曲线运动的速度方向为该点轨迹的切线方向。

3. 汽车行驶半周速度的方向改变π。汽车每行驶10 s，速度方向改变$\frac{2\pi}{2\times60}\times10=\frac{\pi}{6}$，速度矢量的示意图如图5-9所示。

提示：将汽车的运动抽象为质点的圆周运动，理解圆周运动的速度方向沿圆周上该点的切线方向。根据几何知识，某段时间内速度方向改变的角度就是该段时间内半径转过的角度。

4. 如图5-10所示，设质点与圆心连线所扫过的角度为α，质点速度方向改变的角度为β，则$180°-\alpha=180°-\beta$，故$\alpha=\beta$。

提示：运用数学知识证明即可。圆周运动某段时间内速度方向改变的角度与该段时间内质点与圆心连线所扫过的角度相等。

5. 如图5-11所示，AB段是曲线运动、BC段是直线运动、CD段是曲线运动。

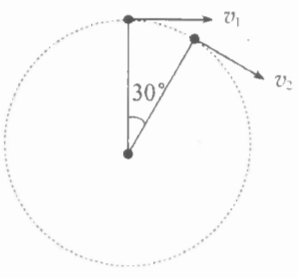


图5-9

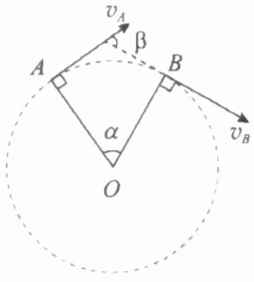


图5-10

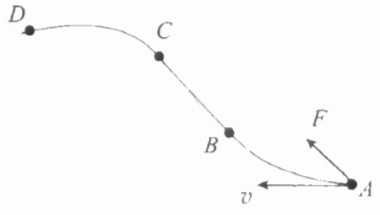


图5-11

第2节　运动的合成与分解

1. 教学目标

（1）会根据研究问题的需要建立合适的平面直角坐标系，并用函数描述直线运动。

（2）理解合运动与分运动的概念，能对简单平面运动进行合成与分解。

（3）通过运动的合成与分解，初步体会把复杂运动分解为简单运动的物理思想，并能用这个思想解决类似的简单问题。

2. 教材分析与教学建议

本节对学生的能力要求较高，着重要解决的问题是让学生建立起运动的合成与分解的思想，并用来处理简单的平面运动，为平抛与斜抛运动的研究打好基础。本节内容是学生在学习较简单的直线运动后，从定量研究直线运动规律进入定量研究曲线运动规律的转折点。虽然学生已经知道曲线运动的运动特征和受力特征，但他们不知道如何去描述曲线运动的位移、速度、加速度等运动参量。在此之前，学生已经有合力与分力的概念，力的合成与分解的知识与思想，这些对运动的合成与分解有一定的启发作用。通过本节的学习研究，学生将学会用平面坐标系描述曲线运动，并通过运动的合成与分解，把复杂运动分解成几个简单的分运动，再通过研究分运动的性质来确定物体实际运动的性质和轨迹，进一步研究复杂的曲线运动。

（1）平面运动的实例分析

教材以人在流动的河水中游泳是否能到达河的正对岸这一问题切入，引出蜡块运动实验。由蜡块运动引出合运动的概念，并引导学生猜测蜡块运动的轨迹与运动性质，尝试建立坐标系进行研究。依据蜡块沿玻璃管向上运动与随玻璃管一起水平向右匀速运动的现象，在这两个方向上建立直角坐标系。由于蜡块在这两个方向上的运动分别是匀速直线运动，可以用已有的直线运动规律进行描述，并由此得到轨迹函数和蜡块运动的速度。这样分析蜡块的运动就为合运动与分运动的教学做好了铺垫。教材的编排以情境发展为主线，主要包括“情境体验→实验探究→理论分析”等教学环节，通过逐步推进来实现运动合成与分解的知识构建。这样的编排有利于学生科学思维素养的培养。

蜡块运动实验是本节的重点之一。合运动与分运动两个概念的建立，坐标系的建立、蜡块运动轨迹的探究、蜡块运动速度的探究都基于本实验，因此教师一定要精心准备，确保实验成功。运动合成与分解知识的构建、运动等效思想是本节的另一个重点。

教材中设置了一个问题情境和一个演示实验来展开物体在平面中运动的研究，引出如何描述平面上运动物体的运动轨迹、位移、速度、加速度等问题。这样的安排有助于学生从已有知识出发，去发现新问题，形成探究的意向与目标，为解决新的问题做好准备。实验演示要与学生的思考紧密结合。例如要观察蜡块的运动方向，蜡块的运动轨迹，思考蜡块的运动性质，思考合运动与分运动之间的关系等。

教学片段

探究合运动与分运动的关系

蜡块的运动如图5–12所示，蜡块运动的视频截图如图5–13所示。

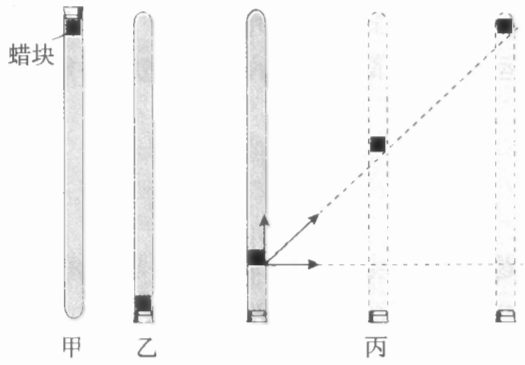


图5–12

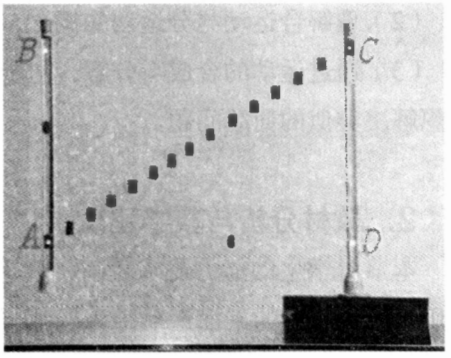


图5–13

问题1. 在图5–12丙中，蜡块同时参与了哪几个运动？蜡块实际的运动是怎样的？

问题2. 合运动与分运动所用的时间有什么关系？

问题3. 如图5–13，改变玻璃管在水平方向运动的速度，蜡块从A（底部）到B（顶端）的运动时间会变吗？玻璃管在水平方向的运动变化会不会影响蜡块在竖直方向的运动？

问题4. 根据图5–13，你能画出分运动与合运动的位移吗？它们之间满足什么关系？

问题5. 根据合运动和分运动的等时性，你觉得合速度与分速度之间是否也满足上述关系？

问题6. 飞机起飞时的速度为300 km/h，飞行方向与水平面的夹角为30°，水平分速度和竖直分速度各是多大？

问题7. 一艘炮舰沿河由西向东匀速行驶，在炮舰上发射炮弹，要击中正北岸的目标。能直接向正北方向发射炮弹吗？

做好实验是上好本课的关键。实验时，教师要提醒学生，这里的研究对象是蜡块，学生观察到的蜡块运动是合运动。实验可分几步进行。

①将玻璃管倒置并保持竖直不动，看到蜡块沿玻璃管匀速上升。

②让竖直、倒置的玻璃管水平匀速运动（蜡块始终在顶部），观察蜡块的运动。

③观察玻璃管水平匀速运动时蜡块在玻璃管内的运动。

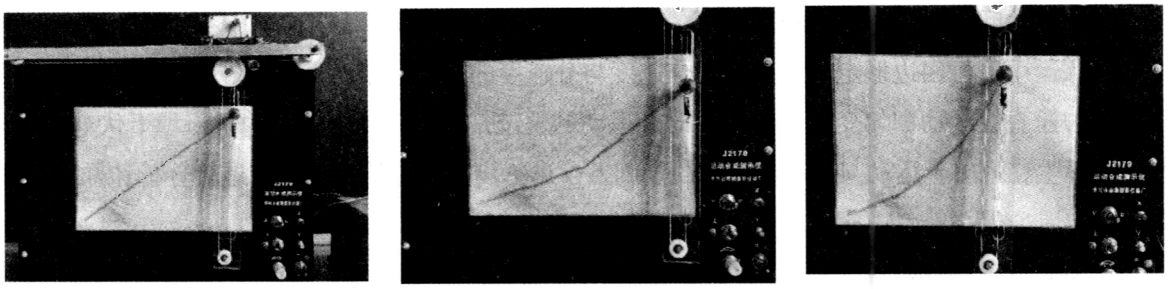
考虑到学生观察时注意力只能集中在某一处，而分析合运动与分运动的关系时需要不断变换观察的对象，可以用视频截图的方式展示动态过程。

教学片段

探究合运动的性质和轨迹

用运动合成演示仪演示笔尖的运动，如图5–14所示。

问题1. 如果保持笔尖在水平和竖直方向的运动都是匀速运动，猜想轨迹的形状。图5–14甲所示的轨迹与你的猜想一致吗？你能对此进行解释吗？



甲　　乙　　丙

图5-14

问题2. 如果保持笔尖在水平方向的运动是匀速运动，通过改变电动机的转速使笔尖竖直方向的速度在运动过程中突然变大，试猜想轨迹的形状。图5-14乙所示的轨迹与你的猜想一致吗？你能对此进行解释吗？

问题3. 如果保持笔尖在水平方向的运动是匀速运动，笔尖竖直方向的速度在运动过程中均匀增大，试猜想轨迹的形状。图5-14丙所示的轨迹与你的猜想一致吗？你能对此进行解释吗？

问题4. 两个互相垂直的直线运动的合运动一定是直线运动吗？

上述研究可分成三种情况进行。保持一个方向的运动为匀速运动，另一个方向的运动分别为匀速运动、分两段的匀速运动和速度逐渐变化的运动。第一种情况与教材介绍的蜡块运动相似，可以借此帮助学生了解实验装置，为分析第二种情况打好基础。第二种情况是承前启后的。第三种情况可以在第二种情况的基础上，采用分割成多段的方法进行定性分析。最后在定性分析的基础上，写出轨迹方程，验证定性分析。

通过运动合成演示仪可以画出笔尖运动的三种轨迹（直线、折线和曲线）。运动合成演示仪的原实验装置中只有竖直方向电机可以调速，水平、竖直两个电机共用一个电源，速度可以连续变化的时间很短，这样就导致画出的曲线效果不理想，因此要把实验装置稍加改进。将水平电机和竖直电机分别接两个独立的学生电源后，在转动竖直方向速度调节旋钮时不断改变两个电机所接电源的电压，这样就可以画出连续的曲线运动轨迹了。

（2）运动的合成与分解

通过运动的分解来研究复杂运动是高中物理中重要的思想方法，也是本节的重点和难点。教学中应避免直接讲解这一方法，可以适当增加一些体验，为学生提供更多生活情景，如商场里自动扶梯正常运行时，在其上面行走的顾客的运动；节日里盛大的焰火表演时，某个火点的运动；田径场上投出的标枪的运动，等等。通过这些情景分析，可以让学生经历运动合成与分解思想的建立过程，体会用运动合成与分解的方法处理问题的等效性。

本节最后安排了“思考与讨论”的问题：如果将玻璃管紧贴着黑板沿水平方向向右匀加速移动，若玻璃管内壁是光滑的，蜡块的轨迹还是一条直线吗？对这一问题的思考，将把前面所学内容延伸到下一节所要研究的问题，起到承上启下的作用。

3.“练习与应用”参考答案与提示

本节配置了5道习题，分别以炮弹、跳伞运动员、炮弹、蜡块、汽艇的实际运动为载体，练

习在不同的的问题情境中建构物理模型，深化对运动的合成与分解的理解和认识。前3题主要让学生熟练运用平行四边形定则定量分析合速度与分速度的关系。第4题用作图法让学生体会互成直角的匀速直线运动和匀变速直线运动的合运动的轨迹是曲线，为下一节的学习埋下伏笔。第5题是让学生在理解合运动与分运动关系的基础上，进一步对常见的物理现象进行分析和推理，获得结论。

1. 如图5-15所示。

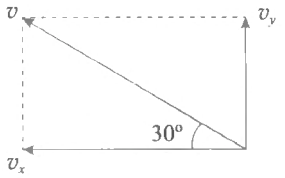


图5-15

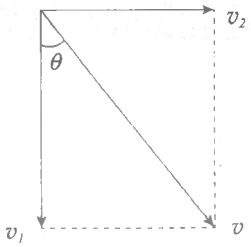


图5-16

$v_x = v\cos 30° = 800 \times \frac{\sqrt{3}}{2}$ m/s = 693 m/s，$v_y = v\sin 30° = 800 \times \frac{1}{2}$ m/s = 400 m/s。

2. 根据题意，无风时跳伞员着地的速度为v_1，风的作用使他获得水平速度v_2，落地速度为v_1、v_2的合速度v，如图5-16所示。$v = \sqrt{v_1^2+v_2^2} = \sqrt{5^2+4^2}$ m/s = 6.4 m/s。

设速度方向与竖直方向的夹角为θ，则$\tan\theta = 0.8$，$\theta = 38.7°$。

3. 炮弹的实际速度方向指向北岸的目标方向，该速度v是船的速度v_1与射击速度v_2的合速度，根据平行四边形定则可知，射击的方向偏向目标的西侧。俯视图如图5-17所示。

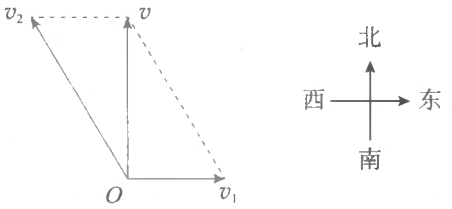


图5-17

提示：以炮弹发射为素材，理解什么是合运动，什么是分运动，练习用平行四边形定则分析合运动与分运动的关系。炮弹的实际速度方向为射击速度与船的速度的合速度的方向。

4. 如图5-18所示。

提示：根据蜡块1 s内的水平位移和竖直位移，在坐标纸上描点（4，10）、（16，20）、（36，30）、（64，40），用平滑曲线描绘蜡块的轨迹。

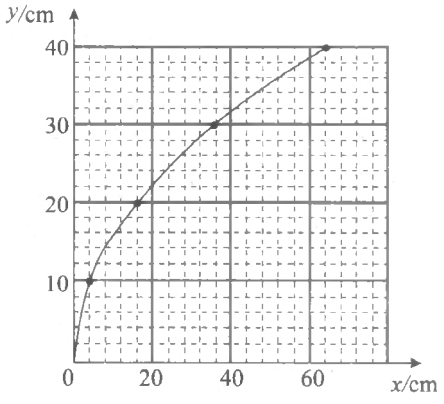


图5-18

5. 100 s；100 s；100 m

提示：无论河水是否流动，汽艇驶到对岸的时间都是$t = \frac{d}{v_1} = \frac{500}{\frac{18}{3.6}}$ s = 100 s。

由于河水流动，汽艇同时被河水冲向下游，沿河运动的速度跟河水流动的速度相同。汽艇沿河水流动方向的位移$l = v_2 t = \frac{3.6}{3.6} \times 100$ m = 100 m。

即汽艇在对岸下游100 m处靠岸。

第3节　实验：探究平抛运动的特点

1. 教学目标

（1）知道抛体运动和平抛运动，知道用运动分解的方法研究平抛运动。

（2）知道平抛运动的条件及相应控制方法，会用获得位置的方法确定多个点，并会描绘平抛运动的轨迹。

（3）会根据平抛运动的轨迹，研究平抛运动水平和竖直分运动的特点。

（4）通过探究平抛运动特点的实验，了解科学探究中获取及处理数据的方法。

2. 教材分析与教学建议

本节是整章教学的第3节，是前一节运动合成与分解方法的实际应用。学生通过前一节的学习，已知道可以从分运动的特点切入去认识曲线运动。本节以平抛运动为例，以实验方式展开探究，获得平抛运动特点。既为学生学习平抛运动规律作好铺垫，又可帮助学生加深对所学运动合成与分解方法的理解。

教材中介绍了两种方案。方案一是用频闪照相或者录制视频的方法，记录物体在不同时刻的位置，得到类似教材图5.3-1所示的照片。以小球球心作为小球位置，分别将不同位置的小球球心投影到水平方向和竖直方向的坐标轴上。考虑到频闪（截屏）时间间隔相等，根据相邻时间间隔内水平方向的位移相同，可判断水平方向是匀速运动；根据相邻时间间隔内竖直方向增加的位移相同，可判断竖直方向是匀加速运动。

方案一虽然较为方便和容易理解，但对于培养学生的实验素养来说，方案二具有独特的价值。方案二比方案一更注重实验设计，更具有转化思想，更重视实验条件的控制和实验操作。

方案二分三个步骤来开展探究。首先研究某一方向分运动的特点（可以是水平方向，也可以是竖直方向），然后设法描绘出平抛运动的轨迹，最后根据平抛运动轨迹和某一方向分运动特点分析得到另一方向分运动的特点。

可以通过比较方法先研究水平方向的分运动特点。如图5-19所示，两相同小球分别从A、B处同时滚下，一球做平抛运动，另一球沿光滑的水平轨道运动。改变小球下滑时的高度，观察两球是否始终能够相碰。在此基础上，结合平抛运动的轨迹，获取相同时间间隔的竖直方向位移，就能够确定竖直方向的分运动是匀变速运动。如果再测出小球的水平分速度，就可以确定时间间隔的具体数值，从而得到竖直分运动的加速度值。

方案二中的参考案例，是先研究竖直方向的分运动，然后设法描绘出平抛运动的轨迹，最后根据平抛运动轨迹和竖直方向分运动的特点分析得到水平方向分运动的特点。

教材给出两种方案的大体研究思路，通过问题对关键环节进行引导，帮助学生自行设计、完善实验方案。

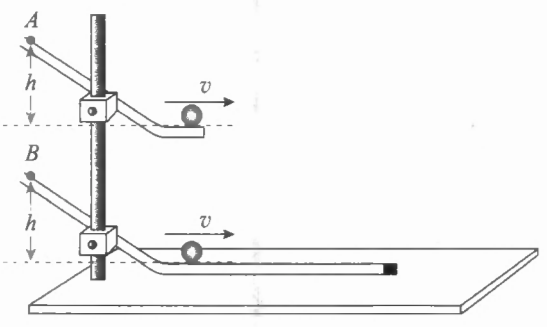


图5-19

参考案例提供的方法既考虑到利用学校已

有器材进行学生实验，又考虑到学生已经具有自由落体运动的知识。研究竖直方向的分运动时可以避免测量，只需与自由落体运动进行比较即可（不同高度同时下落，是否始终同时落地）。另外，确定竖直方向的分运动为自由落体运动后，也为探究水平方向分运动的特点打好了基础。在现有器材的情况下，我们既无法在同一个平抛运动过程中确定多个位置，也无法做到所确定的几个位置之间的时间间隔都是相等的。所以实验首先要解决的问题是如何保证多次平抛的初速度相同。另一个问题是如何找到时间间隔相等的位置，这就需要先画出轨迹，然后根据竖直方向上初速度为0的匀变速直线运动的位移特点确定时间间隔相同的点。

为培养学生的科学探究和科学思维素养，本节的重点应放在实验方案的设计与改进上。本节的难点是实验操作与数据处理。

（1）实验方案设计

教学片段

探究平抛运动特点实验的方案设计

问题1. 平抛运动的轨迹是曲线，我们应当用什么方法来研究曲线运动？

问题2. 平抛运动应分解为哪两个方向的运动？为什么？

问题3. 根据竖直方向上的受力与运动情况，你认为平抛运动在竖直方向上的分运动应是什么运动？

问题4. 若要证明你分析得出的结论，你需要哪些器材？怎样操作？

（2）平抛运动竖直方向的运动

教学片段

探究平抛运动竖直方向的运动特点

考虑到学生已有的知识（自由落体运动规律），可设计对比实验。这一实验方法的优点是无须记录具体的时间和竖直方向的位移，只要判断两小球是否同时落地即可。

问题1. 用图5-20所示装置研究平抛运动在竖直方向的运动规律时，能否保证A、B两球同时开始运动？你能否观察到两球同时落地？若不能，又该怎么办？

问题2. 一次同时落地能否说明猜想已经得到了验证？改变小球下落的高度和改变打击力度，多做几次实验的目的是什么？

问题3. 实验的结果说明了什么？你能表述平抛运动在竖直方向分运动的特点吗？

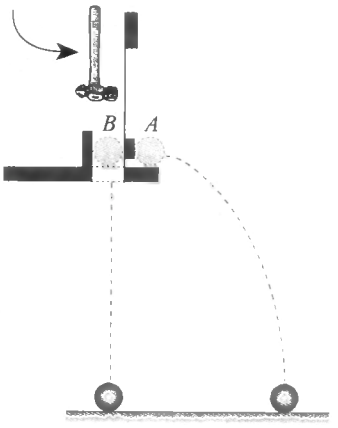


图5-20

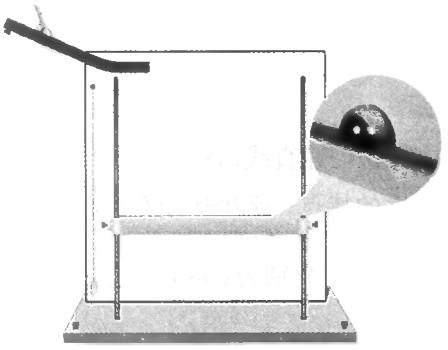
由于空间限制、小球速度较快和人眼很难同时注意两个小球的运动等因素，一般很难看到两球同时落地的现象。转化的方法有多种，比较方便的是将“看”转化为“听”，也可以让两个小球落到水槽里，看水花是否同时溅起。当然，还可以通过“先摄像，再慢放录像”的方法。

（3）平抛运动水平方向的运动

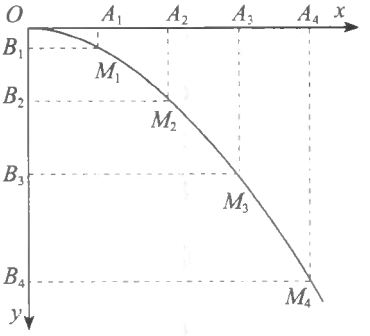
教学片段

探究平抛运动水平方向的运动特点

如果用频闪照片，可以直接从照片中发现相同时间间隔内水平方向的位移相同这一结论。教材采用了如图5-21甲所示的装置进行学生实验，一方面是考虑到实验条件，另一方面是为了培养学生的科学思维和科学探究等方面的素养。本实验的目的并不是描绘轨迹，但如果有了轨迹，我们就可以运用已有的自由落体运动知识确定这些位置。这一实验设计思路需要通过问题加以引导。



甲



乙

图5-21

问题1. 根据做平抛运动物体的受力和运动情况分析，你认为平抛运动在水平方向的分运动是什么运动？

问题2. 对于从斜槽上滚出的小球，如何保证小球水平抛出？

问题3. 你用什么方法记录小球的位置？

问题4. 你能否同时记录小球在不同时刻的位置？如果需要多次实验才能记录多个时刻的位置，你如果确保运动的同一性？

问题5. 你所记录的多个小球位置之间的时间间隔相等吗？为了获取相同时间间隔的点，你有什么办法？

问题6. 为了定量研究需要建立坐标系，坐标原点在哪里？坐标轴如何确定？

问题7. 如何画出轨迹？如何在轨迹上确定时间间隔相等的点？

问题8. 如图5-21乙所示，这些点之间的水平位移存在什么特点？说明了水平方向的运动是什么运动？你能写出水平方向的速度与位移的表达式吗？

问题9. 如果实验的结果与你的推论之间有一些差异，原因可能有哪些？

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节配置了4道习题，培养学生的科学探究能力。前两题是利用身边的器材，用两种不同的方案研究平抛运动水平分速度的特点，让学生根据已有的科学探究方案，陈述科学探究过程。考察学生能否使用所学的基本器材获得数据，对数据进行整理，得到初步的结论。第3题通过对平

抛运动录像数据的分析，得到结论。第4题练习从图像中获取数据、对数据进行分析并获得结论，培养学生的科学思维。

1. 还需要的器材是刻度尺，实验的示意图如图5-22所示。

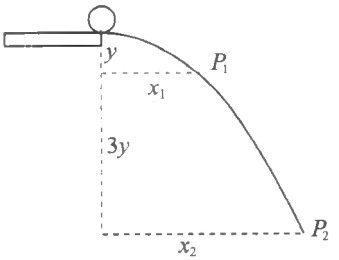


图5-22

实验步骤如下。

（1）调节木板高度，使木板上表面与水平桌面的距离为某一确定值y。

（2）让钢球从斜面上某一位置无初速释放。

（3）测量钢球在木板上的落点P_1与重垂线之间的距离x_1。

（4）调节木板高度，使木板上表面与水平桌面的距离为某一确定值$4y$。

（5）让钢球从斜面上同一位置无初速释放。

（6）测量钢球在木板上的落点P_2与重垂线之间的距离x_2。

（7）比较x_1、x_2，若$2x_1=x_2$，则说明钢球在水平方向做匀速直线运动。

提示：本题利用身边的器材研究平抛运动水平分速度的特点。平抛运动在竖直方向是自由落体运动，若小球下落时间分别是t和$2t$，由$y=\frac{gt^2}{2}$可知下落高度分别为y和$4y$。通过测量这两段时间内水平方向的位移，由$v=\frac{x}{t}$即可研究平抛运动水平分速度的特点。

2. 改变墙与重垂线之间的距离x，测量落点与抛出点之间的竖直距离y，若$x_2=2x_1$，有$y_2=4y_1$，则说明钢球在水平方向做匀速直线运动。

提示：用不同的实验方案研究平抛运动水平分速度的特点，启迪学生的科学思维，培养科学探究能力。

3. 可得到10帧照片。

提示：假设桌面离地高度$h=0.8\ \mathrm{m}$，根据$h=\frac{1}{2}gt^2$可得，下落的时间$t=\sqrt{\frac{2h}{g}}=0.4\ \mathrm{s}$，每秒拍摄25帧照片，0.4 s可拍摄10帧。

这个习题可引导学生利用身边的器材进行实验探究，巩固所学的平抛运动知识。

4. 猜想成立。分析过程如下。

如图5-23所示，在OP图线上取四点A、B、C、D，且$y_D-y_C=y_C-y_B=y_B-y_A$，测出A、B、C、D四点在x轴上的坐标x_A、x_B、x_C、x_D，若有$(x_D-x_C)-(x_C-x_B)=(x_C-x_B)-(x_B-x_A)$，则可判断物体在$y$方向做匀速直线运动，在$x$方向做匀加速直线运动。

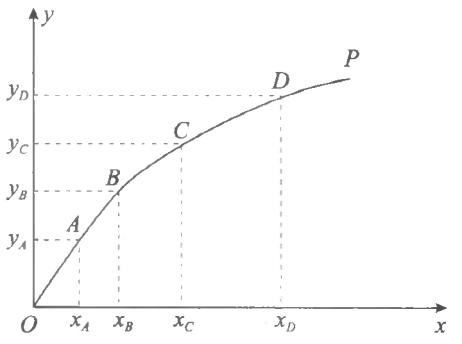


图5-23

提示：通过此题，让学生获取数据，并对数据进行分析并获得结论，培养学生对综合性问题进行分析和推理的科学探究能力。

第4节　抛体运动的规律

1. 教学目标

（1）知道抛体运动的受力特点，会用运动的合成与分解的方法对平抛运动进行理论分析。

（2）理解平抛运动的规律，知道平抛运动的轨迹是抛物线，会计算平抛运动的速度及位移，会解决与平抛运动相关的实际问题。

（3）认识平抛运动研究中等效替代的思想和“化繁为简”的思想，并能够用来研究一般的抛体运动。

（4）通过用平抛运动的知识解决和解释自然、生活和生产中的例子，认识到平抛运动的普遍性，体会物理学的应用价值。

2. 教材分析与教学建议

平抛运动是常见的曲线运动之一，可作为应用运动的合成和分解知识的典型案例，它也是研究一般抛体运动的基础。本节在前一节用实验探究平抛运动特点的基础上，进一步从理论的角度分析得出平抛运动的规律，为一般抛体运动的研究和类平抛问题的求解奠定基础。

本节既是运动和力、牛顿运动定律应用的延续，又是研究曲线运动方法的具体应用，不仅涉及运动规律、牛顿运动定律，还涉及运动分析、受力分析和分解方法，以及建立坐标系、解决问题的程序与规范等，具有很强的综合性。

为了让学生深入体验解决问题的程序与规范，在教学中应将观摩学习与主动学习相结合。首先由教师示范问题解决的过程，并提炼出相应的程序与规范，然后要求学生主动按照这一程序来解决新的实际问题。在学习过程中，教师要充分展示学生的问题解决过程，让全体学生关注解决问题的程序是否完整和规范。

（1）抛体运动的特点

通过实例，让学生分析、判断物体是否做抛体运动，进而理解抛体运动是匀变速运动。

先回顾抛体运动、平抛运动的条件，然后分析这些物体的受力情况与初速度的特点，比较排球、铅球和纸飞机所受重力与空气阻力、空气升力的大小关系，得出排球、铅球所受的空气阻力可忽略（理想化方法），这样就可以确定物体是否做平抛运动。弄清楚受力情况后，利用牛顿运动定律可确定物体运动的加速度。学生虽然不清楚升力的大小，但从纸飞机在竖直方向的运动情况可以推知升力与重力相差不大。

教学片段

抛体运动是匀变速运动

用图片或视频展示如下问题情境：排球比赛时，运动员沿水平方向将球击出；铅球运动员将铅球斜向上推出；小朋友将纸飞机水平扔出。

问题1. 物体做抛体运动、平抛运动的条件是什么？上述情境中，排球、铅球及纸飞机，哪些物体做抛体运动，哪些做平抛运动？

问题2. 若不计空气阻力，排球和铅球的运动有什么共同点？

（2）平抛运动的速度

程序与规范对于解决复杂问题来说非常重要，好的程序与规范隐含了正确的思维方式。教师要引导学生建立并掌握解决问题的合理的思路，在本节中具体表现为：①对小球进行运动和受力分析，确定其满足平抛运动的条件；②建立坐标系；③分析小球在不同方向的加速度和初速度；④将相关表述转化为平抛运动的条件；⑤在两个方向上分别应用运动学公式得出运动规律；⑥对分运动进行合成得到结果；⑦对得到的结果是否合理进行论证。

教学片段

分析并推导物体做平抛运动的速度

问题1. 为什么平抛运动在水平与竖直方向的分运动是匀速直线运动和自由落体运动？

问题2. 从运动学角度，如何证明平抛运动的加速度为g？

问题3. 打排球时沿水平方向向右击球，如果以击球位置为坐标原点，水平向右及竖直向下为两个坐标轴的正方向，你能写出两个方向的速度表达式吗？

问题4. 合速度如何表述？

学生已经知道平抛运动在水平与竖直方向的分运动分别是匀速直线运动和自由落体运动。为什么是这样？需要依据牛顿第二定律求出两个方向上的加速度，再结合两个方向上的初速度进行综合考虑。加速度是速度变化量与时间之比，考虑到水平方向的速度保持不变，平抛运动的加速度等于竖直方向的速度变化量与时间之比，即自由落体加速度。

教学片段

运用平抛运动规律解决实际问题之一

分析教材例题1

问题1. 物体受什么力？受力方向与初速度方向之间是什么关系？

问题2. 为求解本题，应如何建立坐标系？

问题3. 物体在水平与竖直方向的加速度和初速度是多大？

问题4. 求“速度方向与水平地面间的夹角”的关键是什么？

问题5. 你能写出竖直方向和水平方向的速度表达式吗？

问题6. 你得到的θ是多少？

拓展问题：你能否得到落地时的时间和速度？落地时间与抛出速度大小有关吗？为什么？

良好的解决问题习惯对于提高解题的正确率有很大关系，也是素养的体现。

（3）平抛运动的位移与轨迹

有了研究速度的基础，可以让学生尝试遵循同样的思路自主分析平抛运动的位移。

推导平抛运动的轨迹方程基本上是数学运算的过程。教学时不仅要体现数形结合，更要注重使学生从物理学角度理解轨迹方程。为此，可提出问题：若初速度增大，轨迹形状将如何改变？设想运动物体处在重力加速度比较小的环境中，轨迹又将如何改变？

教学片段

运用平抛运动规律解决实际问题之二

如图5-24所示，一桥式起重机的起重小车以速度$v_0=2$ m/s的速度向右匀速运动。假设某时刻有一颗松动的螺钉从桥式起重机上掉下，螺钉到水平地面的距离$h=45$ m，空气阻力不计，求螺钉脱落点与落地点之间的水平距离。



图5-24

问题1. 这颗松动的螺钉从匀速运动的桥式起重机上掉下时的初速度大小和方向怎样？受什么力作用？做什么运动？如何建立坐标系？

问题2. 要计算螺钉水平前进的距离，需要知道哪些物理量？

问题3. 请各位同学把自己的求解结果展示出来，是否相同？求解过程是否符合程序与规范？

拓展问题：怎样用一把刻度尺测量水从管口刚喷出时的速度大小？

提示：刻度尺可以测量水平位移和竖直位移，根据平抛运动的规律列出方程，思考如何避开测量时间而获知速度的方法。

（4）一般的抛体运动

在分析平抛运动的规律并得出轨迹方程的基础上，可通过实验或视频显示各种真实物体（水、排球等）做斜抛运动的轨迹，分析它们的轨迹特征、受力情况。从受到竖直方向的重力以及运动物体的初速度入手进行分析，抽象出一般的抛体运动模型，从而引导学生定性地描述一般抛体运动的情况。对于学有余力的学生，也可以鼓励他们进行定量研究。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节配置了4道习题，目的是让学生更好地理解平抛运动的规律，并用来对实际的物理现象进行推理和获得结论。第1题通过计算平抛运动物体的运动学参量，加深学生对平抛运动规律的理解。第2题和第3题要求学生能在实际的问题情境中应用常见的物理模型，进行分析和推理，解决实际问题。第4题要求学生能对综合性物理问题进行分析和推理，能对已学知识进行拓展和迁移，培养学生的科学思维能力。

1. A. 下落高度，$t=\sqrt{\dfrac{2h}{g}}$

B. 下落高度和初速度，$x=v_0t=v_0\sqrt{\dfrac{2h}{g}}$

C. 下落高度和初速度，$v=\sqrt{v_0^2+v_y^2}=\sqrt{v_0^2+2gh}=\sqrt{v_0^2+2gh}$

D. 下落高度和初速度，$\tan\theta=\dfrac{v_y}{v_0}=\dfrac{\sqrt{2gh}}{v_0}$

2. 测量步骤如下。

① 让小球从斜面上某一位置A无初速释放。

② 测量小球在地面上的落点P与桌子边沿的水平距离x。

③ 测量小球在地面上的落点P与水平桌面竖直距离y。

小球离开桌面的初速度$v=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$。

提示：应用平抛运动的规律进行推导，得出实验原理的表达式$v=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$，再根据表达式设计实验步骤，测量水平初速度。

3. 该车已经超速。

零件做平抛运动，在竖直方向的位移$y=\frac{1}{2}gt^2$，经历时间$t=\sqrt{\frac{2h}{g}}=\sqrt{\frac{4.9}{9.8}}\,\mathrm{s}=0.71\,\mathrm{s}$，在水平方向位移$x=vt=17.3\,\mathrm{m}$。

零件做平抛运动的初速度$v=\frac{x}{t}=\frac{17.3}{0.71}\,\mathrm{m/s}=24.4\,\mathrm{m/s}=87.8\,\mathrm{km/h}>60\,\mathrm{km/h}$，所以该车已经超速。

提示：卡车与障碍物相撞时，立即停下，车顶上松脱的零件以原来的速度离开卡车后做平抛运动。练习面对真实情境，建立平抛运动模型，应用平抛运动的规律分析解决实际问题。

4.（1）水平分速度$v_x=\frac{Ft}{m}$，竖直分速度$v_y=gt$；（2）$y=\frac{mg}{F}x$，运动轨迹为一条直线

提示：（1）物体在力F的作用下，在水平方向的加速度$a=\frac{F}{m}$，因此在时刻t的水平分速度$v_x=at=\frac{F}{m}t$。在竖直方向只受重力的作用，在时刻t的竖直分速度$v_y=gt$。

（2）水平方向$x=\frac{1}{2}at^2=\frac{Ft^2}{2m}$，竖直方向$y=\frac{1}{2}gt^2$，由这两式可得$y=\frac{mg}{F}x$。式中$\frac{mg}{F}$为一常数，因此物体的运动轨迹为一条直线。

本题要求学生能分别求出物体在水平和竖直两个方向上的速度和位移，最后写出其运动轨迹方程。练习将运动的合成与分解、平抛运动的思想方法加以拓展和迁移。

三、“复习与提高”参考答案与提示

通过章末习题加强对曲线运动、运动的合成与分解、平抛运动等基本概念的理解和应用，在中国象棋、飞机飞行、摩托车飞跃壕沟、跳伞、跳台滑雪、蜡块运动、投篮、估测排污量、飞机投弹等一系列实际问题中，练习模型建构，进行推理和论证，进一步巩固所学曲线运动的知识和方法，并能将运动的合成与分解、平抛运动的思想方法进行迁移，处理较复杂的实际问题。

A组

1.（1）棋盘上六个棋子的位置如图5-25所示。

（2）位移$l_{甲}$和$l_{乙}$如图5-26所示，$l_{甲}=-3\times3\ \text{cm}=-9\ \text{cm}$。

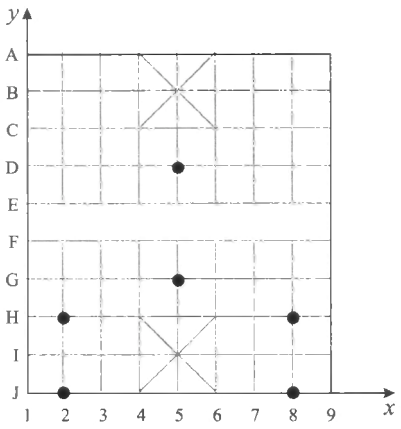


图5-25

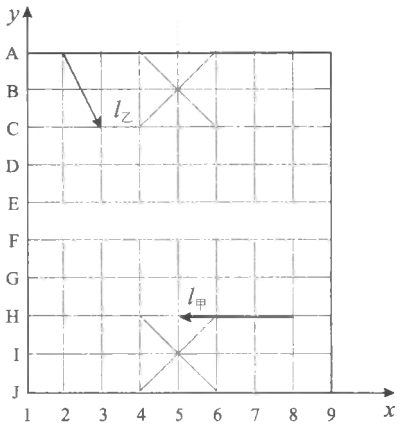


图5-26

甲在x方向的分位移为$-9\ \text{cm}$，方向与x轴正方向相反，在y方向的位移为0。

$l_{乙}=\sqrt{(3\ \text{cm})^2+(2\times3\ \text{cm})^2}=3\sqrt{5}\ \text{cm}$。

乙在x方向的分位移为3 cm，方向与x轴正方向相同，在y方向的位移为-6 cm，方向与y轴正方向相反。

提示：本题练习将实际问题中的对象和过程转换成物理模型的能力，将棋子看作质点，将棋子的移动用位移描述，理解合运动与分运动的关系。

2. 可能沿虚线a运动。

质点由A点运动到B点，F方向为指向曲线弯折方向。在B点，速度方向为过B点的切线方向，经过B点后，质点受到的力F反向后，轨迹将向合力F的方向弯曲，故可能沿虚线a运动。

提示：本题复习质点的速度方向、合力方向和轨迹的弯曲方向之间的关系，加深对力和运动的关系的理解。

3.（1）飞机飞行的方向如图5-27所示。

由题意得 $\sin\theta=\frac{v_{风}}{v_{机}}=\frac{54\ \text{km/h}}{414\ \text{km/h}}=\frac{3}{23}$，所以飞机应朝北偏东$\theta$角的方向行驶。

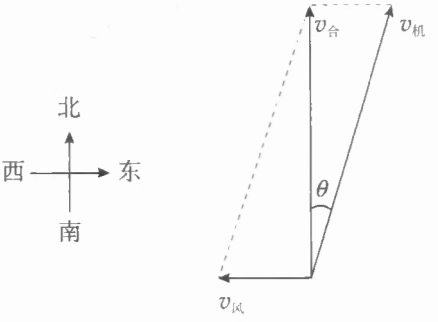


图5-27

（2）由题意可知 $v_{合}=v_{机}\cos\theta=v_{机}\sqrt{1-(\sin\theta)^2}=414\times\sqrt{1-\left(\frac{3}{23}\right)^2}\ \text{km/h}\approx 410\ \text{km/h}$。

故飞行时间 $t=\frac{x}{v_{合}}\approx 1.5\ \text{h}$。

4. 摩托车的速度至少要达到15.8 m/s才能越过壕沟。

5.（1）5 ∶ 3 ∶ 1，位置见图5-28；（2）四名运动员处在同一竖直面内的同一抛物线上

提示：（1）在竖直方向，根据 $h=\frac{1}{2}gt^2$，可得 $h_{12}\ :\ h_{23}\ :\ h_{34}=(3^2-2^2)\ :\ (2^2-1^2)\ :\ 1^2=5\ :\ 3\ :\ 1$。

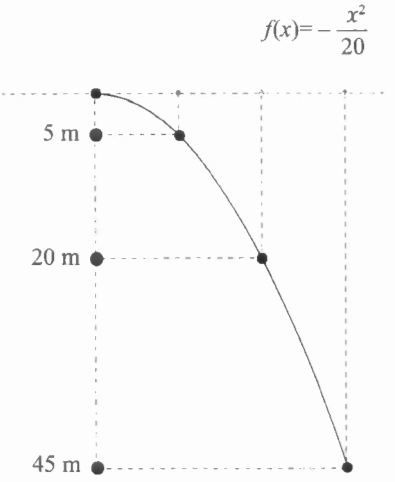


图5-28

如图5-28，第四名运动员刚离开飞机时，若以飞机为参考系，则四名运动员在飞机正下方的同一竖线上；若以地面为参考系，则四名运动员在同一抛物线上。

（2）以地面为参考系，四名运动员跳伞后在空中运动时，处在同一竖直平面内的同一抛物线上。

6. 圆柱体R的速度为 $\sqrt{37}\ \text{cm/s}$。

提示：根据运动的分解可知 $y=v_0t$，$x=\frac{v_x}{2}t$，由此解得 $v_x=\frac{2x}{y}v_0=6\ \text{cm/s}$。此时R的速度 $v=\sqrt{v_0^2+v_x^2}=\sqrt{37}\ \text{cm/s}$。

7. 运动员在A处的速度为 $10\sqrt{3}\ \text{m/s}$，在空中飞行的时间为2 s。

B组

1.（1）9.9 m/s；（2）2.45 m

提示：（1）设篮球出手和进筐的速度大小分别为 v_0 和 v，由题意可知 $v=v_0$。设篮球从出手到落入篮筐所用的时间为t，在竖直方向篮球只受重力，为竖直上抛运动，有 $-v_0\sin 45^\circ=v_0\sin 45^\circ-gt$。篮球在水平方向的分运动为匀速运动，有 $x=v_0t\cos 45^\circ$。联立解得 $v=\sqrt{98}\ \text{m/s}\approx 9.9\ \text{m/s}$。

（2）篮球投出后的最高点相对篮筐的竖直高度 $h=\frac{(v_0\sin 45^\circ)^2}{2g}=2.45\ \text{m}$。

2. 需测量管口的直径D，水平方向的位移L，竖直方向的位移h。每秒排出污水的体积为 $V=\frac{\pi D^2L}{4}\sqrt{\frac{g}{2h}}$。

提示：设水从管口落到地面的时间为t，竖直方向的位移为h，水平方向的位移为L，则有$h=\frac{1}{2}gt^2$，$L=vt$。设管口直径为D，联立解得$L=\frac{\pi D^2 L}{4}\sqrt{\frac{g}{2h}}$。

可见，需要测量D、L、h。

3. $\frac{1}{2\tan\theta}$

提示：平抛的末速度与竖直方向的夹角等于斜面倾角θ，有$\tan\theta=\frac{v_0}{gt}$。下落高度与水平射程之比$\frac{y}{x}=\frac{gt^2}{2v_0 t}=\frac{gt}{2v_0}=\frac{1}{2\tan\theta}$。

4. $\frac{\sqrt{7}v_1^2}{2g}$

提示：小球运动轨迹如图5-29所示。

A点的竖直分速度$v_{Ay}=v_1\sin 30°$，水平分速度$v_0=v_1\cos 30°$，B点的竖直分速度$v_{By}=v_0\tan 60°$，小球从A到B的运动时间$t=\frac{v_{By}-v_{Ay}}{g}$，由此解得小球从$A$到$B$的运动时间$t=\frac{v_1}{g}$。因$A$、$B$间的水平距离$x=v_0 t=\frac{\sqrt{3}v_1^2}{2g}$，$A$、$B$间的竖直距离$y=\frac{v_{By}^2-v_{Ay}^2}{2g}=\frac{v_1^2}{g}$，故$A$、$B$两点间的距离$s=\sqrt{x^2+y^2}=\frac{\sqrt{7}v_1^2}{2g}$。

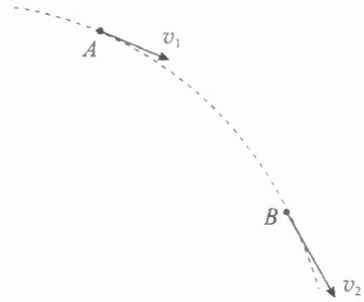


图5-29

5. 60°；$\frac{\sqrt{3}mv}{F}$

提示：质点沿x轴方向的分运动为匀速运动，沿y轴方向的分运动为先沿正方向做匀减速运动后，再沿负方向做匀加速运动。在最高点仅具有沿x轴方向的分速度v_{0x}，则$v_{0x}=v$。

（1）当质点速度大小变为$v'=2v$时，设速度方向和x轴正方向之间的夹角为θ，则$\cos\theta=\frac{v_{0x}}{v'}=\frac{v}{2v}=\frac{1}{2}$，即$\theta=60°$。

（2）$v_y=\sqrt{(2v)^2-v^2}=\sqrt{3}v$，$v_y=at$，$a=\frac{F}{m}$。由此解得$t=\frac{\sqrt{3}mv}{F}$。

6.（1）$5\sqrt{2}$ m/s，方向与x轴正方向的夹角为45°，斜向第四象限；（2）质点的位置坐标为（2.25 m，7.5 m）；（3）轨迹如图5-30所示

（1）由v-t图像可知，在x轴上质点做初速为$v_{0x}=4$ m/s的匀加速直线运动，加速度为$a_x=\frac{\Delta v}{\Delta t}=2\ \text{m/s}^2$。在时刻$t$，沿$x$轴的分速度为$v_x=v_{0x}+a_x t=(4+2t)$ m/s，方向沿x轴正方向。

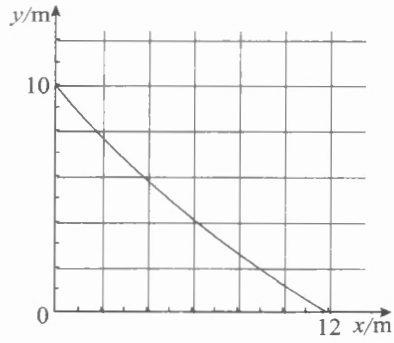


图5-30

由y-t图像可知，质点在y轴上做匀速直线运动，沿y轴的分速度为$v_y=\frac{\Delta y}{\Delta t}=-5$ m/s，方向沿y轴负方向。故当$t=0.5$ s时，$v=\sqrt{v_0^2+v_y^2}=5\sqrt{2}$ m/s，$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}=1$。该时刻质点速度方向与$x$轴正方向的夹角为45°，斜向第四象限。

（2）质点在x轴上的位置坐标$x=v_0t+\frac{1}{2}a_xt^2$，在y轴上的位置坐标$y=y_0+v_yt$。将$t=0.5$ s、$v_{0x}=4$ m/s、$a=2$ m/s^2、$v_y=-5$ m/s代入，解得$x=2.25$ m，$y=7.5$ m。故当$t=0.5$ s时，质点的位置坐标为（2.25 m，7.5 m）。

四、参考资料

1. 相对运动与运动的合成

我们知道，如果物体在静止参考系K中的速度叫绝对速度$v_{绝对}$，物体在运动参考系K'中的速度叫相对速度$v_{相对}$，运动参考系K'相对静止参考系K的速度叫作牵连速度$v_{牵连}$，则有

$$v_{绝对}=v_{相对}+v_{牵连}$$

$$v_{相对}=v_{绝对}-v_{牵连}$$

如果把这个方法应用到小船过河的问题中，则有

$$v_{船对地}=v_{船对水}+v_{水对地} \tag{1}$$

其中，$v_{船对地}$为船相对地面的速度，$v_{船对水}$为船相对水的速度，$v_{水对地}$为水流的速度。

我们研究抛体运动时，常把它看成x方向和y方向两个分运动的合运动，从速度看就是

$$v=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j} \tag{2}$$

看起来，式子（1）与式子（2）形式上相近。都是速度的合成公式，但实质上它们之间还是有区别的。（1）式是不同参考系间的速度变换关系，而（2）式是同一参考系中的速度合成关系。它们的含义不同，适用范围也不同。（2）式是在同一个参考系中由矢量运算得到的，在速度很小到速度很大（大到接近光速）的范围内仍然成立。（1）式由伽利略变换导出，因而只在低速时（远小于光速）才成立。

从狭义相对论可以知道，不同惯性参考系之间的速度变换公式为

$$v=\frac{v'+u}{1+\dfrac{v'u}{c^2}} \tag{3}$$

或

$$v'=\frac{v+u}{1-\dfrac{vu}{c^2}}$$

其中v为质点在惯性参考系K中的速度，该质点在另一惯性参考系K'中的速度为v'，K'系相对K系的速度为u，c为光速。v、v'、u都沿同一直线同方向运动。

当运动速度远小于光速时，（3）式就变为

$$v=v'+u \tag{4}$$

或

$$v'=v-u$$

参考系问题是物理学中的基本问题，教师应该特别重视。由于初学者学习相对运动问题有一定的困难，现行高中教材一般不去区分它们之间的区别。

2. 流体介质阻力对物体运动的影响

我们知道，抛射体在真空中的飞行轨迹是一条抛物线。假定弹丸的初速度为850 m/s，发射角为43°，则弹丸在真空中的射程等于73 km，而当考虑空气阻力时，弹丸的射程只有8 km左右，仅为理想射程的$\frac{1}{9}$（图5-31）。

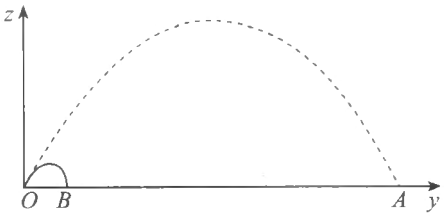


图5-31

大量实验表明，当物体在空气中的飞行速度$v<0.2$ m/s时，阻力$F=kv$；当0.2 m/s$<v<$240 m/s时，$F=kv^2$；当240 m/s$<v<$450 m/s时，$F=kv^3$。其中比例系数k反映了除物体速度以外的其他诸因素对介质阻力的影响。考虑空气阻力时弹丸的飞行轨迹如图5-32所示。容易看出，当考虑空气阻力时，弹丸的落地角β大于发射角α（在真空中落地角β等于发射角α），而且落地角接近90°。

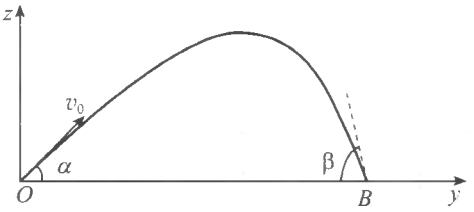


图5-32

理论计算和实际观察都已证明，物体在空气中运动一段较长时间后，将几乎竖直向下匀速降落，并趋近于它的极限速度。所谓极限速度是，在介质阻力的影响因素已经确定的情况下，物体在介质中运动需经无限长的时间才能达到的速度。在许多实际问题中，如选矿、选种和清洁谷粒等，常利用物体极限速度的不同把不同的颗粒分开。

跳伞运动员自飞行器中跳出后，如果不张开伞，则阻力系数较小，极限速度一般可达到50~60 m/s。以这个速度落地，任何人也承受不了。但如果张开伞，则阻力系数变大，极限速度一般不超过4~5 m/s。这个速度仅相当于我们从1 m多高的矮墙上跳下时按自由落体的速度公式计算所得到的落地速度。这对于普通健康的人来说，是没有危险的。战争中对伞兵的要求不仅是能安全落地，而且在空中停留的时间越短越好。为此伞兵在刚跳离飞行器后，可先不张伞，等降至一定高度后再把伞张开。

3. 地球自转对抛射体的影响

实际上，在计算落地点时，不但要考虑空气阻力的影响，还要考虑地球自转的影响。

当考虑地球自转的影响时，抛射体还将受到科氏惯性力的作用，其飞行轨迹则不再是一条平面曲线，而是一条空间曲线了。所谓科氏惯性力，它是在考虑地球自转这样的非惯性参考系中应

用牛顿第二定律时，必须附加在物体上的一项作用力，否则，物体的质量m，加速度a与作用力F之间的关系式$F=ma$不成立。实际上，即使不考虑地心每年绕太阳一周的公转运动，地球也还有每昼夜绕地轴转一周的自转运动（自转角速度为7.29×10^{-5} rad/s）。假如在北半球纬度为45°处，向正东方向以发射角43°，初速度850 m/s发射炮弹，当不考虑地球自转的影响时，炮弹在真空中的飞行轨迹如图5-33中的虚线所示，落地点为A；当考虑地球自转的影响时，炮弹在真空中飞行的轨迹如图5-33中的实线所示，落地点为C。与不考虑地球自转时相比，炮弹在真空中飞行的落地点向东偏移的距离Δy约为338 m，向南偏移的距离Δx约为454 m。一般普通炮弹的爆炸威力范围只有几十米，因此地球自转对抛射体落地点的影响也应该引起重视。

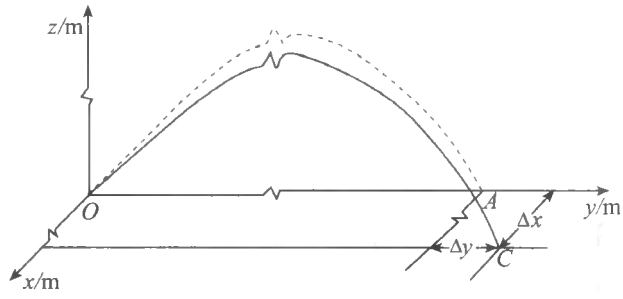


图5-33

第六章

圆周运动

课程标准的要求

2.2.3　会用线速度、角速度、周期描述匀速圆周运动。知道匀速圆周运动向心加速度的大小和方向。通过实验，探究并了解匀速圆周运动向心力大小与半径、角速度、质量的关系。能用牛顿第二定律分析匀速圆周运动的向心力。了解生产生活中的离心现象及其产生的原因。

一、本章教材概述

本章是必修课程的第六章。第五章主要以平抛运动为例，讨论处理匀变速曲线运动的方法。而本章则是处理生活中常见的一类运动——圆周运动，它属于曲线运动，但却不是匀变速曲线运动，即加速度不恒定的曲线运动。

圆周运动的研究思路与前面所学内容的研究思路是一致的，即首先描述运动的性质，然后分析做这种运动的受力条件和初速度条件。可以说，本章实际上是运动学和动力学知识在曲线运动特例——圆周运动上的具体应用，是学生所学运动学和动力学知识的进一步拓展和延伸。从整体上看，研究对象的运动和受力情况由简单到复杂，是学生对运动与相互作用认识逐步深入的过程。主要表现在两个方面：一是机械运动从简单的直线运动到相对复杂的匀变速曲线运动（平抛运动），再到非匀变速曲线运动（圆周运动）。二是物体所受的外力从恒力到变力。

本章的内容安排除了关注发展学生的运动与相互作用观念，还紧密联系生产、生活实际，涉及丰富的模型建构和推理过程。另外，本章内容也是培养学生科学思维和科学探究素养的重要载

体，是发展学生社会责任的良好素材。

本章按照“圆周运动的描述→圆周运动的受力分析→圆周运动的联系实际问题”的整体结构进行编排，突出物理观念的形成，以及科学思维与科学探究能力的发展。从内容及其结构上主要突出以下三点：（1）强调科学探究。课程标准以学生“必做实验”的形式要求“探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系”。由于要突出实验探究，教材弱化了向心加速度的理论分析，在通过实验探究得出向心力的表达式后，再根据牛顿第二定律推导向心加速度公式。（2）突出内容的弹性，为因材施教留出空间。首先讨论匀速圆周运动的向心力，再应用牛顿第二定律讨论向心加速度，最后把应用矢量运算和极限思想讨论向心加速度的方向作为“拓展学习”内容。（3）突出知识的结构化。通过问题、思考与讨论、拓展学习等栏目，揭示知识间的联系或者引入概念的物理意义。

具体来说，本章在编写时有如下考虑。

1. 多途径引导学生深层学习，促进学生物理观念的进一步发展

教材提供了丰富的现象与事实，引导学生在此基础上进行抽象、概括与推理，建构概念或者得出规律。涉及的现象与事实既包括日常生活中学生司空见惯的自行车，还包括游乐场里的游戏项目，在轨飞行的天宫二号空间实验室等。这些现象和事实不仅是学生认知的基础，也是激发学生学习兴趣的素材。

教材重视概念的建构，着力为揭示概念的物理意义做好铺垫。例如，教材在引入角速度概念时，谈到“自行车前进时，由于链条不可伸长，也不会脱离齿轮打滑，因而大、小齿轮边缘的点在相等时间内通过的弧长是相等的，即线速度大小相等。但同时也可注意到，由于两个齿轮的直径不同，相等时间内它们转过的角度不同”。教材通过这些铺垫力图引导学生理解“线速度和角速度都是描述圆周运动的物理量，两者描述的角度不同”。同样地，教材在引入圆周运动的周期概念时，也注重揭示概念的物理意义。

教材不仅注重对具体概念建构过程的引导，还通过结构调整，引导学生形成结构良好的概念体系。例如，教材的第一节从运动学的角度描述圆周运动，进一步丰富和发展了学生对机械运动的认识，这也是学生第一次认识到具有周期性特征的机械运动，让他们初步掌握了描述圆周运动的物理量。第二节实验探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系，学习影响向心力大小的因素。第三节根据牛顿第二定律分析匀速圆周运动的向心加速度。这一结构与必修1的研究思路是一致的，即首先描述机械运动，再从受力角度分析运动的条件。这种一以贯之的安排不仅有利于学生建立概念体系，也有利于学生形成分析质点力学问题的大思路，即先描述物体的运动情况，再分析质点的受力情况，最后根据牛顿运动定律建立运动与相互作用之间的关系。

教材通过设置合适的内容引导学生反省，促进所学知识的融会贯通，形成解决问题的认知策略。例如，在“向心加速度”一节的“思考与讨论”中设计了讨论向心加速度与圆周运动的半径是成正比还是反比的问题，试图引导学生明白在实际问题中物理量之间成正比或反比的条件，体会物理与数学的关系。在“生活中的圆周运动”一节中讨论了汽车过拱形桥的问题，然后在这个基础上，通过“思考与讨论”栏目，引导学生思考：如果把地球看作一个巨大的拱形桥，汽车速度达到多大时，它对地面的压力为0。这个问题为后面讨论航天器在万有引力作用下的圆周运动

做好了铺垫，也有利于引导学生展开想象的“翅膀”，激发学生的学习兴趣。

教材单独安排“生活中的圆周运动”一节，试图让学生应用圆周运动的知识解释物理现象，并解决一些实际问题，从而促进学生进一步理解运动与相互作用的关系，发展学生的运动与相互作用观念。

2. 全面发展学生的科学思维，重点突出学生的建模能力

教材借助不同内容全面体现了促进科学思维能力发展的课程目标。通过对物体做圆周运动的实际情境进行抽象、概括，形成质点在水平面和竖直平面内的圆周运动模型，以此来发展学生的模型建构能力。通过分析线速度、角速度与周期的关系，应用极限思想分析圆周运动的向心加速度等具体问题，发展学生的科学推理能力。通过分析向心加速度与圆周运动的半径之间的关系、向心力来源等问题，发展学生的科学论证能力。通过讨论向心加速度与圆周运动半径的关系，以及汽车“飞离”地面的速度等具体问题，发展学生的质疑与创新能力。

3. 丰富学生的体验，培养学生的实践意识

本章内容比较抽象，做圆周运动物体的速度在不断变化，力也在不断变化，这些都造成了教学的难点。增加学生的体验是突破难点的重要方式，而体验的获得离不开真实的物理情境。教材选择的大量实例与学生的日常生活有关，如自行车、游乐项目、汽车，等等。这些实例容易唤醒学生的体验，不仅可以帮助学习有效突破学习难点，还可以培养学生的实践意识。在探究向心力大小的表达式之前，教材在“做一做”栏目中安排了“感受向心力”的体验性实验，引导学生体验向心力大小与物体质量、圆周运动的半径、线速度等物理量之间的关系，以帮助学生在探究实验前提出有依据的猜想假设，培养学生的实践意识。

建构物理概念的意义，或者说引入物理概念的必要性，一直是学生在学习中容易忽视的，也是物理教学中的薄弱环节。教材通过“问题”等栏目，丰富学生体验，引导学生体会建立概念的必要性，体会实践与理论的关系。例如，在“圆周运动”一节中，通过比较自行车大、小齿轮边缘上的点，以及同一齿轮上到转轴距离不同的点运动的快慢，引导学生体会建立线速度和角速度等物理量来描述圆周运动的必要性。在“向心力”一节的“问题”栏目中，以游乐场里的空中飞椅项目为情境，引导学生体会做圆周运动的人的受力情况，丰富学生对向心力的感性认识，为提出向心力概念提供基础。

教材在结构安排上也体现了“从学生的体验入手，逐步上升到理性认识，再由理性认识回到生活实际中去”的基本理念。向心力相对于向心加速度更具感性特征，因此教材在描述圆周运动的基础上，先从感受向心力的大小和方向、探究向心力大小的影响因素入手，再应用牛顿第二定律分析向心加速度的大小和方向。

4. 对实例进行理性分析，培养学生的科学态度与社会责任

教材注重通过实例引导学生进行理性思维，通过分析、解决问题的过程，晓之以理，动之以情。概括起来，教材主要通过两个途径来培养学生的科学态度和社会责任。一个是在课文的正文中解释日常生活现象，引导学生认识科学的价值，培养学生的社会责任。例如，教材正文介绍了

离心运动的危害，解释了为什么在公路弯道处车辆不允许超过规定的速度，以引导学生理性认识交通规则，增强安全意识。另一个是在“练习与应用”中设置有针对性的题目，在真实的物理情境中引导学生通过计算、推理、分析、反思，引导学生情感的投入，培养学生的社会责任感。

课时安排建议

1. 圆周运动	1课时
2. 向心力	2课时
3. 向心加速度	1课时
4. 生活中的圆周运动	2课时

二、教材分析与教学建议

第1节　圆周运动

1. 教学目标

（1）认识圆周运动、匀速圆周运动的特点，了解描述圆周运动快慢的基本思路，了解转速和周期的意义。

（2）理解线速度的物理意义，知道匀速圆周运动中线速度的方向。

（3）理解角速度的物理意义，掌握线速度和角速度的关系。

（4）能在具体的情境中确定线速度和角速度。

2. 教材分析与教学建议

本节涉及圆周运动、匀速圆周运动，以及描述匀速圆周运动的线速度、角速度、周期和转速等概念。圆周运动与日常生产、生活紧密相连，学好圆周运动的知识，不仅为解释生活中的现象和解决相关问题奠定了基础，也为下一章学习万有引力定律打下了知识基础。需要指出的是，高中物理不研究刚体的转动问题。

关于“线速度”的定义常用的有两种方法，一种是沿用曲线运动速度的定义方法——将平均速度取极限，得到圆周运动线速度的大小和方向，这种方法的好处是保持了“速度”定义的统一。教材“线速度”的定义是通过“分步走”的思路建立。首先，定义线速度的大小，它是弧长与时间之比。然后，再确定线速度的方向，根据“质点做曲线运动时某点的速度方向沿该点的切线方向”，得到圆周运动在某点的线速度方向沿该点的切线方向。

在研究圆周运动时，学生可能会想：前面通过运动的分解解决了平抛运动问题，那么圆周运动是否也能运用运动分解的方法来处理呢？其实，用分解的方法也是可以研究的，得到的是用三角函数表达的位移和速度分量。教材现在采用的研究方法，从本质上来说是基于圆周运动的特点，用极坐标来描述（尽管没有明确说出来），由于在半径方向没有变化（变量转化为常量），只剩下角量一种变化。所以从逻辑上讲，径向无速度，可以先研究角速度，线速度通过换算关系得出。但考虑到与前面知识的联系，教材还是首先引入了线速度，再引入角速度。角速度也有方向，但是高中阶段并不要求学生了解。

（1）圆周运动及其快慢的描述

教材在节前“问题”栏目展示了自行车图片，引导学生通过观察自行车大齿轮、小齿轮和后轮的关联转动，提出了如何描述做圆周运动的物体运动快慢的问题。教学中可以多展示一些物体做圆周运动的场景，并把问题进一步细化、分解，引导学生层层递进地思考。

教学片段

圆周运动及其快慢的描述

教师展示钟表指针、摩天轮、秋千、自行车的图片（图6-1），并说明“圆周运动是针对质点来说的，应该选择物体上的某一点进行研究”。

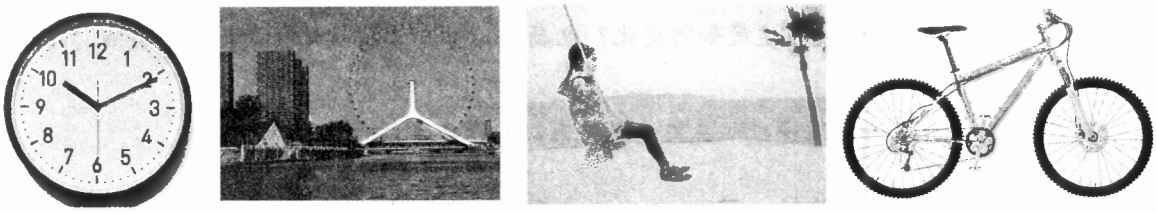


图6-1

问题1. 认真观察这些图片后思考，指针的尖端、摩天轮上的游客（可近似看作质点）、秋千座椅，它们的运动有什么共同点？

问题2. 这些物体的圆周运动有什么不同之处？

问题3. 自行车的脚踏板，小齿轮边缘上的点和后轮边缘上的点哪个运动得快？理由是什么？

问题4. 对于描述运动快慢和描述转动快慢的物理量，如何在名称上加以区分？

利用学生所熟悉的生活中的圆周运动引入课题，引导学生分析、概括这类运动的共同特点，得出圆周运动的定义。学生以前只接触运动快慢，没有涉及转动快慢，教学中可以用学生熟悉的自行车进行演示，结合问题，引发比较圆周运动快慢的不同方式的讨论。

（2）圆周运动的线速度和角速度

作为典型的概念课，本节教学的重点是线速度、角速度、周期和转速等概念，教师应构建积极有意义的情境，让学生体会到建立“线速度”“角速度”“周期”和“转速”等概念的必要性，通过问题引导学生建立这些概念。

教学片段

圆周运动的线速度和角速度

展示电扇叶片和自行车大、小齿轮的图片（图6-2）。

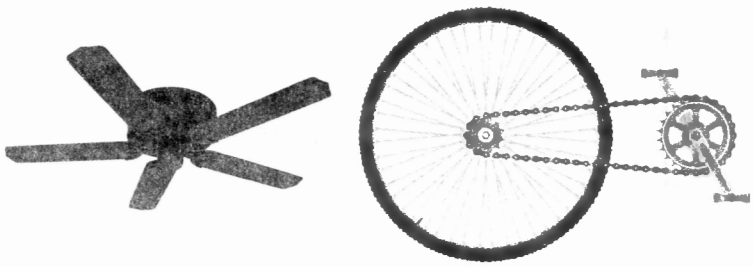


图6-2

问题1. 电扇叶片上任意点的线速度方向如何确定？该方向与半径间的关系如何？

问题2. 做圆周运动的物体的运动路径长度如何确定？线速度大小如何确定？

问题3. 匀速圆周运动的线速度变化吗？匀速圆周运动是什么性质的运动？

问题4. 转动脚踏板，自行车大、小齿轮上的边缘点线速度大小相等吗？大、小齿轮转动的快慢也一样吗？

问题5. 前面已经给描述转动快慢的物理量取了一个名字叫角速度，角速度该怎样定义呢？根据定义式得到的角速度的单位是什么？

问题6. 匀速圆周运动的角速度如何变化？电扇同一叶片上离转轴距离不同的各点，角速度是否相同？

问题7. “线速度”和“角速度”是否存在联系？怎样寻找它们之间的联系？

如果在学生初步认识“线速度”和“角速度”之后，立即让学生推导两者的关系，这样处理仅仅让学生从数学表达式的角度建立了两者的联系，而忽视了物理意义。建议引导学生思考：为什么“线速度”和“角速度”会存在联系？如果有个物理量将它们联系起来，可能的物理量是什么？结合图6-2，先做定性分析、推理和判断，再导出两者之间的关系，自然就水到渠成了。

（3）圆周运动的周期和转速

除了用线速度、角速度描述圆周运动外，教材还为我们提供了另外一种更加“宏观”的途径——研究物体转一圈所用的时间或者一秒转几圈，进而引出“周期”“转速”这两个物理量，它们也正是为表征匀速圆周运动具有重复（周期）性而引入的物理量。这四个物理量可以从不同角度去描述圆周运动的快慢，它们之间具有一定的联系。

让学生观察熟悉的电扇，体会圆周运动具有周而复始的周期性特点，思考什么样的物理量能够体现这种特点。具体来说，可以利用转一周所用的时间，即周期来比较运动的快慢，也可以用单位时间内转过的圈数即转速来比较运动的快慢，从而得出周期和转速的定义式。数学中的弧长与半径、圆心角的关系$\Delta s = r\Delta\theta$是推导的基础，通过问题可以帮助学生回忆相关知识。“线速度”“角速度”“周期”和“转速”这四个物理量的关系是教学难点，要给学生充分的时间寻找和论证它们之间的关系。

教学片段

圆周运动的周期和转速及各物理量之间的关系

问题1. 电扇叶片上的每一点都做匀速圆周运动，这种运动整体上具有什么特性？该用什么物理量来描述运动的这种重复性？

问题2. 周期的单位是什么？周期的物理意义是什么？

问题3. 转速的定义是什么？单位是什么？转速的物理意义是什么？

问题4. 选择电扇开关的不同挡位，叶片转动时的周期和转速有什么关系？你的猜想是什么？能证明吗？

问题5. 圆周中的弧长和对应圆心角之间有什么关系？

问题6. 本节学到了哪些物理量？你能列出这些物理量并推出它们之间的关系吗？

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共4道习题，前3道题让学生练习掌握角速度与周期的关系以及角速度与线速度的关系，形成物理观念。第4题是综合题，练习将实际生活中的硬盘的工作过程转换成所学的圆周运动基本模型，结合实际情况加深对匀速圆周运动的理解。

1. 位于赤道和位于北京的两个物体随地球自转做匀速圆周运动的角速度相等，都是 7.27×10^{-5} rad/s。位于赤道的物体随地球自转做匀速圆周运动的线速度 $v_1=\omega R=465.28$ m/s，位于北京的物体随地球自转做匀速圆周运动的线速度 $v_2=\omega R\cos40°=356.43$ m/s。

2.（1）12 ∶ 1；（2）16.8 ∶ 1

提示：分针的周期为 $T_1=1$ h，时针的周期为 $T_2=12$ h。

（1）分针与时针的角速度之比为 $\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{T_2}{T_1}=\frac{12}{1}$。

（2）分针针尖与时针针尖的线速度之比为 $\frac{v_1}{v_2}=\frac{\omega_1 r_1}{\omega_2 r_2}=\frac{16.8}{1}$。

3.（1）A、B两点线速度相等，角速度与半径成反比。

（2）A、C两点角速度相等，线速度与半径成正比。

（3）B、C两点半径相等，线速度与角速度成正比。

提示：引导学生理解传动装置不打滑的物理意义是接触点之间线速度大小相等，进而认识到同缘传动时边缘点的线速度大小相等，同轴转动时角速度大小相等。

4.（1）10^{-6} s；（2）5.12×10^{8}

提示：（1）磁盘转动的周期为 $T=\frac{1}{120}$ s，扫描每个扇区的时间 $t=\frac{T}{8\,192}=1.0\times10^{-6}$ s。

（2）每个扇区的字节数为 $n_0=512$ 个，1 s内读取的字节数为个 $n=n_0\times\frac{1}{t}=\frac{512}{1.0\times10^{-6}}$ 个 $=5.12\times10^{8}$ 个。

以硬盘为背景，引导学生结合硬盘存储信息的基本原理，根据匀速圆周运动中转速和周期的关系，在新的问题情境中根据需要选用恰当的模型分析解决生活中的物理问题。

第2节　向心力

1. 教学目标

（1）知道向心力是根据力的效果命名的，会分析向心力的来源。

（2）感受影响向心力大小的因素，通过实验探究它们之间的关系。

（3）掌握向心力的表达式，能够计算简单情境中的向心力。

（4）知道变速圆周运动和一般曲线运动的分析方法。

2. 教材分析与教学建议

本节的编排遵循从特殊到一般、从定性到定量的科学探究过程。本节内容可以看作牛顿运动定律在曲线运动中的应用，进一步深化了运动和相互作用观念。在教学过程中要加强新旧知识的

对比与联系，帮助学生再次体会力是改变运动状态的原因，促进对知识的同化，完善知识结构。

本节教学的重点与难点是建立与理解向心力的概念，以及对向心力来源的分析。本章后面的学习都将围绕向心力的概念展开，它也是分析天体的圆周运动、带电粒子在磁场中的运动的知识基础。

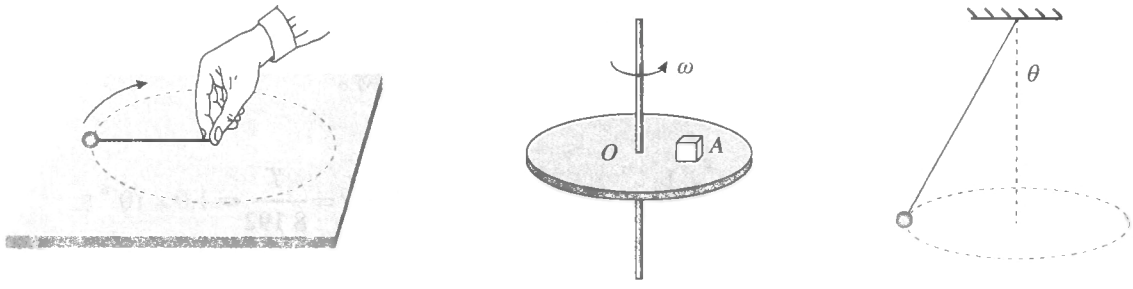
学生第一次接触变力作用下的曲线运动，这是一个新的情境，教学中应注意控制难度，可以把这一节拆分成两课时。第一课时侧重在感性体验的基础上建立向心力的概念，并完成对向心力公式的探究。第二课时侧重分析匀速圆周运动向心力的来源并进行定量的计算，要提供一些典型案例作为支撑。

（1）向心力

教材先从力与运动关系的角度说明做匀速圆周运动的物体一定受力，再结合具体实例进行受力分析，进而归纳出做匀速圆周运动的物体所受合力指向圆心这个一般规律，并把这个力命名为向心力，最后以“问题”中的空中飞椅为例分析了实际问题中的向心力的来源。

教学片段

向心力的来源及其命名



甲　　乙　　丙

图6-3

问题1. 如图6-3甲所示，小球在细绳的牵引下在光滑的水平桌面上做匀速圆周运动。如果绳子断了，小球还能做圆周运动吗？为什么？

问题2. 在运动过程中，竖直方向的重力与支持力是什么关系？绳子给小球的作用力在整个运动过程中有什么特点？

问题3. 如图6-3乙所示，物块在水平圆盘上随圆盘做匀速圆周运动。如果圆盘光滑，物块还能做圆周运动吗？什么力对物块做圆周运动起了作用？

问题4. 图6-3乙中的物块与图6-3甲中的小球运动情况相同吗？它们的受力是否也应该相似？你想到了什么？

问题5. 如图6-3丙所示，小球在细绳的牵引下在空中做匀速圆周运动。小球运动轨迹的圆心在哪？

问题6. 图6-3丙中的小球与图6-3甲中的小球和图6-3乙中的物块运动情况相同吗？它们的受力是否也应该相似？你想到了什么？

问题7. 图6-3丙中的小球是否真的受到一个指向圆心的力？从力的合成角度看，这个力是什么？从力的分解角度看，这个力又是什么？

问题8. 向心力是否一定是一个真实力？向心力是否可以是几个力的合力或某个力的分力？

图6–3甲中的小球所受的向心力方向可根据绳子受力特点确定（沿绳方向）。对图6–3乙中的物块，可先从运动角度确定它的运动与图6–3甲中小球的运动相同，再根据力与运动关系，判断其受力应该也相似。对图6–3丙中的案例，分析思路与前面相同，但需要结合力的合成与分解知识，得到合力或分力均可提供向心力的结论。

对这三个案例的总结与概括，已经可以让学生认识向心力的特点和本质。向心力可以是弹力、摩擦力、引力中的任一个力、也可以是某几个力的合力或者某一个力的分力，它是一个效果力。在分析具体实例时应该先作受力分析，从中“找”出什么力提供了向心力，而不应凭空“画”出向心力。

（2）向心力的大小

在定量研究之前，教材安排了“感受向心力”的沙袋实验，让学生通过体验获得直接的感性认识。研究拉力（近似为向心力）与半径的关系时，要保持转速（角速度）一定，可以用喊口令的方法控制转动的快慢。研究拉力与转速（角速度）的关系时，慢慢增大或减小转速就可以体验到拉力的变化。这个实验需要比较大的空间，很难在课堂上让学生完成，建议课前让学生找开阔的地方体验。

通过“感受向心力”这个活动，让学生体验影响向心力的因素，为接下来进行的“探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系”实验设计提供了方向。

教学片段

向心力的定量研究

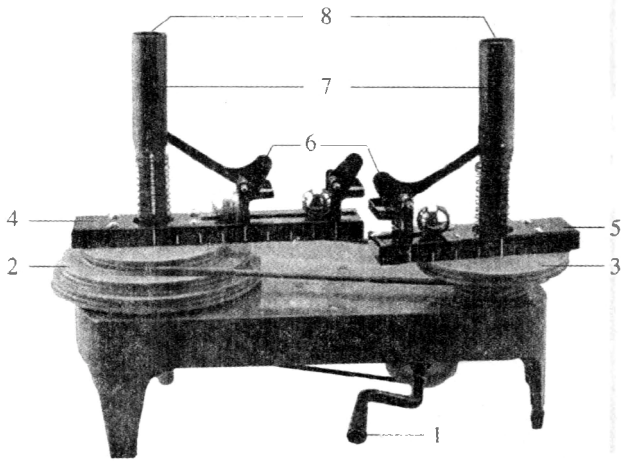


图6–4

问题1. 在如图6–4所示的向心力演示仪中，向心力的大小怎样测量？

问题2. 如何改变物体的质量？如何设定轨道半径？

问题3. 如何控制或测定物体的角速度？

问题4. 你安排的实验步骤是怎样的？

问题5. 得到了怎样的实验结果？根据已有知识，你还能写出怎样的表达式？

小球做圆周运动的向心力由横臂的挡板对小球的压力提供。小球对挡板的反作用力，通过横臂的杠杆作用使弹簧测力套筒下降，从而露出标尺，标尺上露出的红白相间等分格子就可以显示出两个小球所受向心力的比值。通过控制变量法，分别研究向心力F和质量m、转动半径r以及角速度ω之间的关系。先让r和ω不变，用大小相同的铝球和铁球，研究向心力与质量之间的关系。再让m和r不变，将皮带套在不同的转动轮上，研究向心力和角速度之间的关系。最后让m和ω不变，将铁球放在不同的位置，研究向心力和半径之间的关系。

（3）变速圆周运动和一般曲线运动的受力特点

这部分内容可以让学生在更一般、更广阔的背景下认识圆周运动和曲线运动。将向心力的知识从匀速圆周运动推广到变速圆周运动和一般曲线运动，从力的分解角度了解圆周运动速度大小与方向改变的原因，从极限的角度了解一般曲线运动的研究方法。建议教师在教学时把握好难度，学生能够了解物体受到的力的法向分力和切向分力的作用就可以了，不要求掌握这些概念，不要求定量研究。

教学片段

变速圆周运动和一般曲线运动中的受力分析

问题1. 链球运动员在掷出链球之前的加速过程如图6-5所示，能近似看作圆周运动吗？还是匀速圆周运动吗？

问题2. 做圆周运动需要什么方向的力？速度变大需要什么方向的力？你能画出相应的图示吗？



图6-5

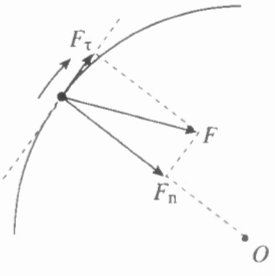


图6-6

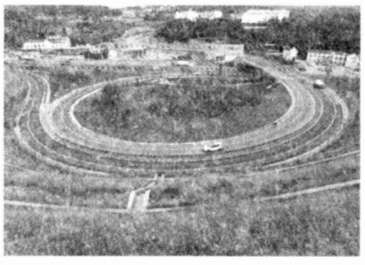


图6-7

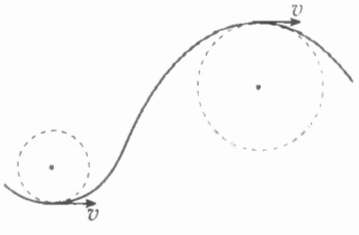


图6-8

问题3. 图6-6中的F_n、F_τ来源于哪里？绳子与速度方向还垂直吗？

问题4. 如图6-7所示，汽车在水平弯曲的道路上行驶时，能近似看作圆周运动吗？它的运动是匀速圆周运动吗？

问题5. 你能大致分析汽车的受力情况吗？

问题6. 汽车在图6-7所示的道路上行驶，如果从速度计读出了汽车运动的速度，为了计算汽车的向心力，还需要知道什么物理量？

问题7. 向心加速度与向心力公式是否只适用于匀速圆周运动？试结合图6-8进行说明。

图6-5和图6-7呈现的都是真实的问题，这类问题的处理首先要引导学生通过受力、运动分析确定模型。如果直接确定模型有困难，还需要综合运用等效、转化、微元等方法。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共5道习题，涵盖了向心力在生活中应用的各个层面，通过本节练习，让学生能综合应用所学向心力知识解决实际匀速圆周运动问题。第1题应用向心力公式计算引力。第2题和第3题研究向心力来源不同的情形下，尝试用已有的物理知识解释水平面内的圆周运动问题。第4题通过分析变速圆周运动中最低点的绳子拉力突变问题，发现规律，用向心力公式分析绳子拉力并对现象进行解释，培养学生的科学探究意识。第5题通过定性分析汽车转弯时的合力方向，获得结论并作出解释，培养科学思维。

1. 3.6×10^{22} N

提示：由于地球在太阳的引力作用下做匀速圆周运动，地球公转周期为$T=365\times24\times3\,600$ s$=3.15\times10^{7}$ s。设引力为F，则$F=m\omega^2r=m\frac{4\pi^2}{T^2}r=6.0\times10^{24}\times\frac{4\times(3.14)^2}{(3.15\times10^{7})^2}\times1.5\times10^{11}$ N$=3.6\times10^{22}$ N。

知道将地球绕太阳的运动简化为匀速圆周运动模型，理解地球绕太阳做匀速圆周运动的向心力来源于太阳对地球的引力，在解答时应注意挖掘题目中的隐含条件（地球公转周期）。本题可以为下一章的学习埋下伏笔。

2. 小球在漏斗壁上的受力如图6-9所示。小球所受重力G、漏斗壁对小球的支持力F_N的合力提供了小球做圆周运动的向心力。

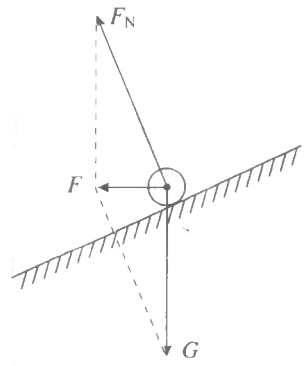


图6-9

提示：求解本题时，要知道向心力的来源，明确向心力是做圆周运动的物体指向圆心方向的合力，理解向心力是一种效果力。此类模型可用于解决火车转弯、飞机转弯、绳拉小球做圆周运动等问题。

3.（1）0.16 N；（2）甲的意见是正确的。静摩擦力的方向与物体相对接触面运动的趋势相反，假设在匀速转动过程中，圆盘突然变得光滑，小物体因为惯性将会沿切线方向飞出。从相对运动的视角来看，小物体有相对圆盘沿半径方向向外运动的趋势，故静摩擦力的方向指向圆心。

提示：练习用向心力公式$F=m\omega^2r$求小物体所受向心力的大小，用假设法推理分析向心力的来源。此类模型可用于解决汽车在水平路面上转弯以及洗衣机匀速转动等问题。

4. 设小球的质量为m，钉子A与小球的距离为r。小球从一定高度摆下，虽然每次钉子的位置不同，但是由于每次释放的高度相同，小球在竖直线以左的运动规律完全相同，故小球通过最低点的速度相同，设为v。小球通过最低点时做半径为r的圆周运动，绳子的拉力F_T和重力mg的合力提供了向心力，即$F_T-mg=m\frac{v^2}{r}$，由此得$F_T=mg+m\frac{v^2}{r}$。在m，v一定的情况下，r越小，F_T越大，即绳子承受的拉力越大，绳子越容易断。

提示：练习用$F_{向}=\frac{mv^2}{r}$求细绳的拉力，加深对向心力的理解，培养学生将物理知识应用于生活和生产实践的意识。理想绳是高中阶段常见的研究模型，细绳的形变量极小，形变量发生变化几乎不需要时间，故认为细绳的拉力可以发生突变。本题中绳系小球摆动，绳碰到钉子的瞬间，圆周运动半径变化，但速度大小不变，故拉力发生突变。

5. 丙图正确。汽车在行驶中速度越来越小，所以汽车在轨迹的切线方向做减速运动，切线方向所受合力方向如图6–10中的F_τ所示。同时汽车做曲线运动，必有向心加速度，向心力如图6–10中的F_n所示。汽车所受合外力F为F_τ、F_n的合力，如图中的F所示。丙图正确。

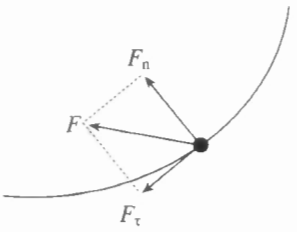


图6–10

提示：以汽车减速运动为背景，让学生学会分析做一般曲线运动的物体的受力情况。物体做曲线运动的条件是合外力的方向与速度的方向不在一条直线上。如图6–11所示，设$F_{合}$与速度v的夹角为θ，根据牛顿第二定律和力的独立作用原理可知，切向合外力F_τ只产生切向加速度a_τ，法向合外力F_n只产生法向加速度a_n，则$F_\tau=F_{合}\cos\theta=ma_\tau$，$F_n=F_{合}\sin\theta=ma_n$。

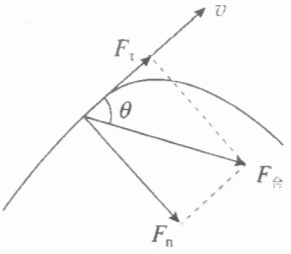


图6–11

在$0°<\theta<90°$时，a_τ和v同向，物体做加速曲线运动。在$90°<\theta<180°$时，a_τ和v反向，物体做减速曲线运动，切向合外力F_τ的作用就是改变线速度v的大小的原因，切向加速度a_τ的大小只反映线速度v大小变化的快慢。法向合外力F_n的作用是改变线速度v的方向的原因，法向加速度a_n的大小反映线速度v方向变化的快慢。

第3节　向心加速度

1. 教学目标

（1）知道匀速圆周运动中向心加速度大小的表达式，理解向心加速度与半径的关系，并会用来进行简单的计算。

（2）了解分析匀速圆周运动速度变化量时用到的极限思想。

（3）能根据问题情景选择合适的向心加速度的表达式。

2. 教材分析与教学建议

向心加速度是描述匀速圆周运动的又一重要概念，教材在“问题”栏目中，从运动和力的关系出发，确定做圆周运动的物体具有加速度。本节是前一节“向心力”的拓展，同时又是学好后一节“生活中的圆周运动”的前提，具有承上启下的作用。

本节的重点是向心加速度的方向和大小。教材从动力学角度出发，根据“从力推知加速度”的思路，在前一节确定的向心力方向和大小的基础上，得出向心加速度的方向和大小。这种叙述的好处是降低了教学的难度，使学生可以较容易地掌握向心加速度的概念。

教材在“拓展学习”栏目中根据加速度定义式推导向心加速度的方向和大小，在推理过程中渗透极限思想。这是为学有余力的学生开的“窗口”，并不是所有学生需要达到的要求。这种编写思路不仅体现了学习的层次性，也让学生经历多角度认识问题的思维过程，体验多角度分析问题的方法，有利于提升学生科学思维的素养。

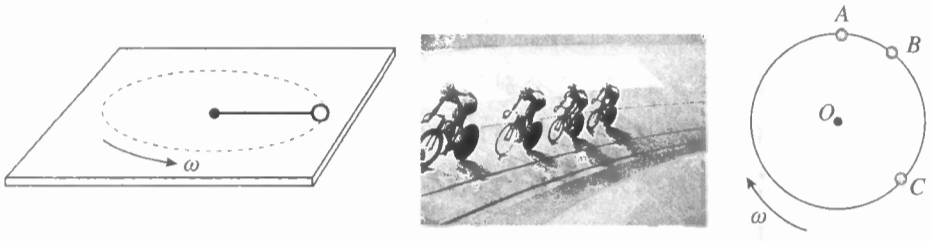
（1）匀速圆周运动的加速度方向

从动力学的角度得到向心加速度的方向难度并不大。从培养学生科学思维的角度，还可以引导他们从运动学角度分析向心加速度的方向。教材中这部分内容放在“拓展学习”栏目中，对于学有余力的学生，也可以在课堂上进行。

在从运动学角度学习向心加速度的概念时，学生可能会遇到来自三个方面的困难。①已有经验的阻碍作用。受直线运动中加速度概念的影响，学生会认为匀速圆周运动速度大小没有改变，没有加速度。②相关知识经验的不足。学生知道速度是矢量，但对不共线矢量减法运算的知识储备不足，对确定速度变化量的方向感到困难。③不理解近似、极限思想。对小角度时采用的近似、极限处理有很大困难。这就需要教师精心设计问题，并让学生进行充分的讨论。

教学片段

探究匀速圆周运动加速度的方向



甲　　乙　　丙

图6-12

问题1. 图6-12甲中的小球与图6-12乙中的运动员正在做匀速圆周运动，是否具有加速度？

问题2. 做匀速圆周运动的物体的加速度方向如何确定？你的依据是什么？

问题3. 除了用牛顿第二定律确定向心加速度的方向外，你还有什么方法可确定向心加速度的方向？

（2）匀速圆周运动的加速度大小

教学片段

探究匀速圆周运动的加速度大小

问题1. 图6-12甲中的小球正以角速度ω做半径为r的匀速圆周运动，它的向心加速度大小是多少？

问题2. 计算向心加速度的公式除了$a=\omega^2 r$外，还有其他表达式吗？

问题3. 根据$a=\omega^2 r$与$a=\dfrac{v^2}{r}$，请分析向心加速度与半径究竟是成正比，还是成反比？该如何

理解这一问题？

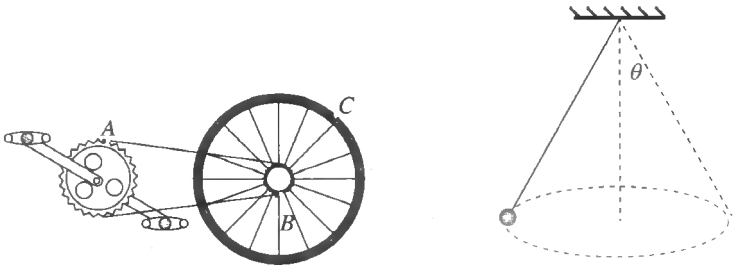
问题4. 物体做变速圆周运动时，向心加速度的表达式$a=\omega^2 r$与$a=\dfrac{v^2}{r}$是否成立？为什么？

问题5. 我们可以从牛顿第二定律推导出向心加速度大小的表达式，是否还有其他方法？

从牛顿第二定律角度推导向心加速度的表达式是比较容易的。对于基础较好的学生，可以通过问题5启发他们，尝试自己推导。

教学片段

运用向心加速度的公式解决实际问题



甲　　乙

图6–13

问题1. 如图6–13甲所示，A、B、C分别是大齿轮、小齿轮边缘上的点和后轮边缘上的点，当转动脚踏板时，这三点间的加速度大小如何比较？你选择公式的依据是什么？

问题2. 如图6–13乙所示，长为l的绳子拴有质量为m的小球，在同一水平面内做匀速圆周运动，绳与竖直线的夹角为θ。小球的加速度方向指向哪里？

问题3. 小球受几个力的作用，是什么力提供了向心力？

问题4. 生活经验告诉我们，如果转动得快，绳与竖直线的夹角θ就大，你能够给出理论依据吗？

比较A、B两点的加速度时，考虑到链条的约束，两点的线速度大小相等，应选择$a=\dfrac{v^2}{r}$进行比较，得$a_A<a_B$。比较B、C两点的加速度时，考虑到是同轴转动，角速度相同，应选择$a=\omega^2 r$进行比较，得$a_B<a_C$，综合可得$a_A<a_B<a_C$。分析圆锥摆时，首先应进行运动和受力分析，建立圆周运动模型。明确圆周是哪个圆？圆心在哪？向心加速度方向如何？在此基础上，再明确什么力产生了向心加速度，最后再列式求解。

教学片段

从运动学视角确定向心加速度的方向

问题1. 如图6–14甲所示，物体做直线运动，初速度为v_1，末速度为v_2，如何用矢量图表示速度变化量？

问题2. 如图6–14乙所示，物体做曲线运动，初速度为v_1，末速度为v_2，如何用矢量图表示

速度变化量？

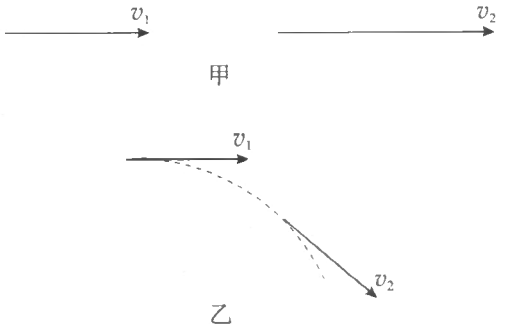


图6-14

问题3. 匀速圆周运动也是曲线运动，如何在图6-15甲中，作出质点从A点到B点速度变化量的矢量图呢？

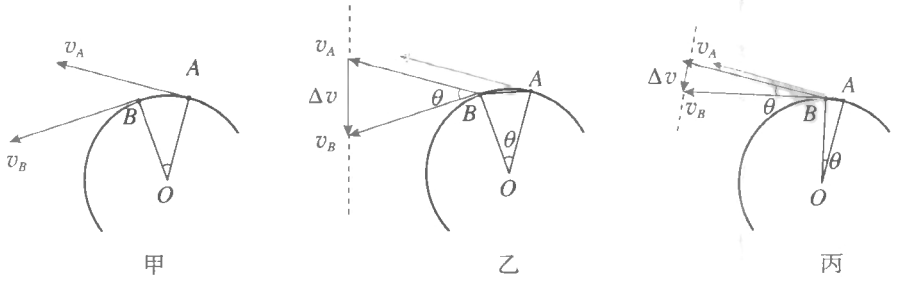


图6-15

问题4. 如果A、B两点之间是整数个圆周，则Δv等于多少？如果A、B两点之间是半个圆周，则Δv等于多少，方向如何？如果A、B两点之间是四分之一个圆周，则Δv等于多少？其方向如何？

问题5. 如何确定图6-15乙中物体的加速度方向？

问题1主要是帮助学生回忆直线运动中如何表示速度的变化量。问题2以平抛运动为例，慢慢渗透矢量平移的思想。问题3是迁移问题2中所用的方法，将矢量平移运用到圆周运动中速度变化量的求法。问题4从几个特殊的位置看速度变化量，降低学生认识的台阶，遵循从特殊到一般的认知规律。问题5主要是渗透极限的思想，从运动学的角度解释为什么加速度的方向是指向圆心的。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共4道习题，第1题根据向心加速度的不同表达形式，理解向心加速度以及向心加速度公式中各物理量之间的相互关系。第2题和第4题让学生在熟悉的圆周运动情境中建构模型，进行科学推理。第3题研究实际皮带传动模型，练习选择恰当的公式解决简单的问题。

1. A.乙；B.甲；C.甲；D.甲

提示：甲、乙线速度相等时，利用$a_n=\dfrac{v^2}{r}$，半径小的向心加速度大。甲、乙周期相等时，利用$a_n=\dfrac{4\pi^2}{T^2}r$，半径大的向心加速度大。甲、乙角速度相等时，利用$a_n=v\omega$，线速度大的向心

加速度大。甲、乙线速度相等时，利用$a_n=v\omega$，角速度大的向心加速度大。由于在相等时间内甲与圆心的连线扫过的角度比乙大，所以甲的角速度大，甲的向心加速度大。

2. $2.7\times10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$

提示：月球公转周期$T=27.3\times24\times3600\ \mathrm{s}=2.36\times10^{6}\ \mathrm{s}$，月球公转的向心加速度$a_n=\dfrac{4\pi^2}{T^2}r=\left(\dfrac{2\times3.14}{2.36\times10^{6}}\right)^2\times3.84\times10^{8}\ \mathrm{m/s^2}=2.7\times10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$。

以月球公转为背景，练习用$a_n=\dfrac{4\pi^2}{T^2}r$求解月球的向心加速度，计算量较大，为下一章的学习埋下伏笔，培养学生对太空探索的兴趣。

3.（1）3 ∶ 1；（2）$0.05\ \mathrm{m/s^2}$；（3）$0.3\ \mathrm{m/s^2}$

提示：（1）由于皮带与两轮之间不发生滑动，所以两轮边缘上各点的线速度大小相等。

设电动机皮带轮与机器皮带轮边缘上质点的线速度大小分别为v_1、v_2，角速度大小分别为ω_1、ω_2，边缘上质点运动的半径分别为r_1、r_2，则$v_1=v_2$，$v_1=\omega_1r_1$，$v_2=\omega_2r_2$，又$\omega=2\pi n$，所以n_1 ∶ $n_2=\omega_1$ ∶ $\omega_2=r_2$ ∶ $r_1=3$ ∶ 1。

（2）A点的向心加速度$a_{nA}=\omega_2^2\times\dfrac{r_2}{2}=0.10\times\dfrac{1}{2}\ \mathrm{m/s^2}=0.05\ \mathrm{m/s^2}$。

（3）电动机皮带轮边缘上质点的向心加速度$a_n=\dfrac{v_1^2}{r_1}=\dfrac{v_2^2}{r_2}\times\dfrac{r_2}{r_1}=0.1\times3\ \mathrm{m/s^2}=0.3\ \mathrm{m/s^2}$。

皮带传动是教学中的一个难点，教学中要注意引导学生根据题设条件挖掘隐含条件，如同轴转动的角速度大小相等，同一皮带上各处的线速度大小相等。

4. 2 ∶ 1

提示：A、B两个快艇做匀速圆周运动，由于在相等时间内它们通过的路程之比是4 ∶ 3，所以它们的线速度之比为4 ∶ 3。由于它们在相等时间内运动方向改变的角度之比是3 ∶ 2，所以它们的角速度之比为3 ∶ 2。由于向心加速度$a_n=v\omega$，所以它们的向心加速度之比为2 ∶ 1。

以快艇在湖面上做匀速圆周运动为背景，练习用$a_n=v\omega$求向心加速度，加深对线速度、角速度物理意义的理解。

第4节　生活中的圆周运动

1. 教学目标

（1）能根据所学知识分析生活中的各种圆周运动现象，在此过程中体会模型建构的方法。

（2）知道航天器中的失重现象。

（3）观察生活中的离心现象，知道离心运动产生的原因，了解其在生活中的应用，并知道离心运动所带来的危害。

2. 教材分析与教学建议

本节旨在通过丰富的实例，让学生通过受力分析、运动分析建立圆周运动模型，再运用牛顿

运动定律和圆周运动知识求解一些具体问题。教材选择了与生活联系紧密，学生易于观察的火车转弯、汽车过拱形桥和凹形桥等例子，另外，教材还分析了航天器中的完全失重状态以及离心运动现象。既有水平面内的匀速圆周运动，也有竖直平面内的圆周运动，能引起学生观察和探究的浓厚兴趣。从地上的圆周运动，到天上的圆周运动，既帮助学生感受物理规律的统一性，也为下一章作了铺垫。

通过对实例的分析，要让学生逐步掌握处理圆周运动的基本方法，引导他们学会确定运动轨迹、圆心和半径，能根据圆心位置确定向心加速度方向，再进行受力分析，确定向心力的来源，并建立力与运动联系的方程。这个过程就是先将实际问题转化为圆周运动的模型，再对问题进行求解。

学生在前面的学习中，已经能用牛顿第二定律求解直线运动的一些问题，对运动与相互作用观有了初步的认识。本节对圆周运动进行分析，本质上仍然是应用牛顿第二定律来解决问题，两者求解的思路是相同的。教学中指出这种相同性不仅有利于学生建构自己的知识结构，也会进一步深化运动与相互作用的观念。

（1）火车转弯

解决实际中的汽车和火车转弯问题首先需要建立正确的模型。这个过程的关键是进行运动和受力分析，在这一过程中需要忽略一些次要因素，以建立力与加速度之间的联系。考虑到生活中汽车转弯很常见，教学中也可以引导学生先讨论汽车转弯问题，再讨论火车转弯的问题。汽车在水平面上转弯的模型比较简单，可以先让学生讨论，最后再讨论斜面上汽车转弯的问题。

教学片段

汽车转弯问题分析

问题1. 如图6–16甲，汽车在水平圆弧路面上做匀速圆周运动。你能确定汽车向心加速度的方向吗？

问题2. 图6–16甲中的汽车受到哪几个力的作用？什么力提供了向心力？

问题3. 你所列的表达式是怎样的？汽车做匀速圆周运动的最大速度与什么因素有关？

问题4. 如图6–16乙，汽车在倾斜的圆弧路面上做匀速圆周运动。你能确定汽车轨道所在平面和向心加速度的方向吗？理由是什么？

问题5. 若图6–16乙中的汽车相对地面既没有向外，又没有向里运动的趋势，此时汽车受到哪几个力的作用？向心力的来源是什么？

问题6. 你所列的表达式是怎样的？汽车做匀速圆周运动的速度是由什么因素决定的？若汽车的速度大于或小于该值，汽车的受力有什么变化？



甲



乙

图6–16

问题7. 分析汽车在水平面内转弯与在斜面内转弯两种情况，它们的相同点与不同点各是什么？

图6-16乙中汽车在倾斜的圆弧路面上做匀速圆周运动，运动平面与向心加速度方向的确定是个难点。如果是盘山公路，圆轨道并不在同一水平面上。因此，通常认为圆轨道在同一水平面上，这其实也是一种理想化处理。

教学片段

火车转弯问题分析

问题1. 图6-17甲是火车转弯时的情景，你是否见过火车在水平面上转弯的情景？为什么游乐园内的小火车可以在水平面内转弯而大火车不行？

问题2. 如图6-17乙所示，为什么火车的轮子都有突出的轮缘，有何作用？

问题3. 如图6-17甲所示，火车转弯时，圆周运动平面是哪个？圆心在哪里？向心加速度的方向向哪？向心力的来源是什么？

问题4. 如图6-17乙所示，若轮缘与轨道没有接触，车轮与轨道间的摩擦力与火车所受重力相比可忽略不计。火车受几个力的作用？向心力的来源是什么？你能画出示意图吗？

问题5. 此时火车运行的速度由什么因素决定？

问题6. 如果火车速度大于或小于前面求得的速度，会出现什么情况？

问题7. 火车转弯与汽车转弯中的哪一种情况有相似之处？



甲



乙

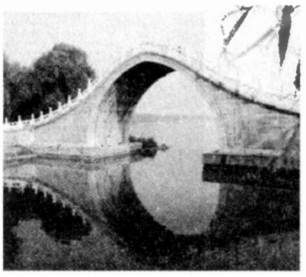
图6-17

（2）汽车过拱形桥和凹形路面

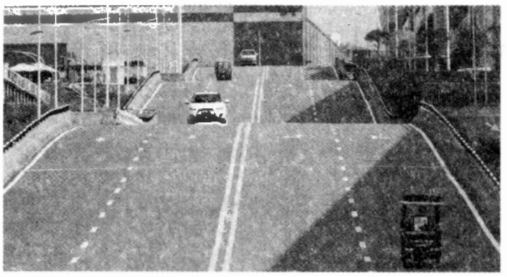
学生一般有在拱形桥和凹形路面上乘坐汽车的经历，最好先让学生建立生活体验与路面状态的对应关系，再通过建立物理模型，用物理知识加以解释。

教学片段

汽车过拱形桥和凹形路面问题分析



甲



乙

图6-18

问题1. 当你坐汽车经过如图6-18甲所示的桥面时，你有什么感觉？汽车在最高点时对桥的压力会有什么特点？

问题2. 在分析这个问题时桥面可近似看作什么形状？汽车过桥可近似看作是什么运动？受力情况怎样？

问题3. 若质量为m的汽车在拱形桥上以速度v行驶，桥面的圆弧半径为R。则汽车对桥的压力多大？

问题4. 如果汽车速度不断变大，会出现什么情况？

问题5. 当你坐汽车经过如图6-18乙所示因下陷形成的凹形路面时，你有什么感觉？汽车在最低点时对路面的压力会有什么特点？

问题6. 为了求解前面的问题，凹形路面可近似看作什么形状？汽车过凹形路面可近似看作是什么运动？受力情况怎样？

问题7. 若质量为m的汽车在凹形路面上以速度v行驶，路面的圆弧半径为R。则汽车对凹形路面最低点的压力多大？

问题8. 汽车对拱形桥的压力小于汽车的重力与汽车对凹形路面的压力大于汽车的重力的原因是什么？与电梯中的超、失重现象背后的原因是否相同？

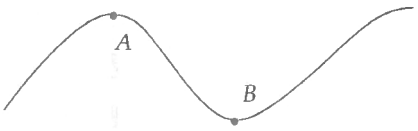


图6-19

问题9. 汽车以恒定的速度v通过图6-19中所示的地段，在哪个位置更容易爆胎？

对问题8的讨论有利于知识的联系和对本质的把握，也为下面超、失重问题的讨论做了准备。

（3）航天器中的失重现象

教材中的“思考与讨论”以“把地球看作一个巨大的拱形桥”为基础，引出航天器中的失重现象的讨论，引导学生用类似的处理方法解决航天器中的失重现象。这也是超重和失重问题在太空情景中的延续。

教学片段

探究航天器中的失重现象

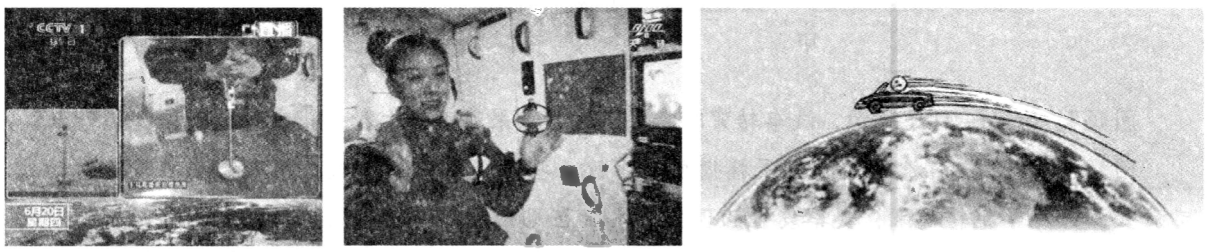

甲　　乙　　丙

图6-20

问题1. 如图6-20甲、乙所示，太空中的小球与陀螺相对于太空舱处于静止状态，没有下落。它们受到地球对它的引力吗？为什么？

问题2. 如图6-20丙所示，如果把地球看作一个巨大的拱形桥，汽车速度多大时，支持力会变成0？此时汽车是否就成了环绕地球飞行的物体？

问题3. 如图6-20乙所示，站在太空舱中的王亚萍对太空舱的作用力有多大？要回答这个问

题首先应该做什么？

问题4. 王亚萍相对地球做什么运动？半径近似为多少？受什么力的作用？向心加速度的方向指向哪？

问题5. 你所列的方程是怎样的？所得的答案是什么？

问题6. 蹦极、过拱形桥和在太空中环绕地球飞行都可能出现完全失重现象（压力或拉力为0），它们的本质相同吗？

通过观察太空中发生的现象，认识完全失重现象。先通过用汽车过拱形桥类比，再建立运动模型后求解。从小球、陀螺到汽车，再到航天员，要注意引导学生关注研究对象的变化。

（4）离心现象

学生在生活中都观察过类似的现象，所以认识这种运动并不困难，困难的是如何用科学的概念和规律解释离心运动。学生用生活语言分析离心现象时，经常错误地将“惯性”当成“力”，从生活语言到物理语言是一个逐步发展的过程，教师既要引导学生用自己的语言解释实际现象，又要适时纠正学生不合理的表述，使表述逐步科学规范。

汽车滑移、洗衣机脱水和洗完手后甩几下等，都是生活中较常见的现象，要引导学生用所学的知识分析、解释这些现象。

教学片段

理解离心现象



甲　　乙

图6-21

问题1. 如图6-21甲所示，汽车转弯时需要限速，如果速度过大，会出现什么现象？为什么？

问题2. 在图6-21乙所示的甩干桶模型中，放一些沾满水的餐巾纸，用来模拟衣服，启动转动装置，让甩干桶转起来，观察发生的现象。水滴在甩出来之前做圆周运动的向心力是多大？向心力是由谁提供的？随着转速的增大，提供的向心力和需要的向心力两者之间会发生什么变化？

问题3. 洗完手后我们经常会甩手，让我们一起来做做（集体甩手）。这样做的目的是什么？甩手的时候，是因为水滴不受力了才被甩出去的吗？

问题4. 生活中还有哪些地方利用了离心现象？

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共5道习题，根据所学知识，通过模型建构、推理论证分析解决实际生产、生活中的圆

周运动问题。第1题求飞轮上螺丝钉的向心力大小。第2题依据$F=m\omega^2r$结合受力情况分析角速度ω与夹角θ的关系。第3题研究水平面上汽车所受最大静摩擦力是否能保证其安全转弯，让学生恰当地使用证据证明已经发生侧滑的结论。第4、第5题研究竖直面上做变速圆周运动的物体在最高点和最低点的受力问题。

1. 7.9×10^4 N

提示：小螺丝钉做匀速圆周运动所需要的向心力F由转盘提供，根据牛顿第三定律，小螺丝钉将给转盘向外的作用力，转盘在这个力的作用下，将对转轴产生作用力，大小也是F。$F=m\omega^2r=m(2\pi n)^2r=7.9\times10^4$ N。

联系生活实际，运用向心力公式$F=m\omega^2r=m(2\pi n)^2r$求转轴受到的力。通过学习圆周运动规律在生活中的具体应用，结合日常生活中的某些体验，进一步理解圆周运动的规律，加深物理知识在头脑中的印象，使物理课堂更贴近生活，使物理知识真正走近学生，据此激发学生的问题意识，拓宽学生的思维空间。在生活中，手机的震动器（图6-22）就是利用偏心装置在旋转时产生震动进行工作的。

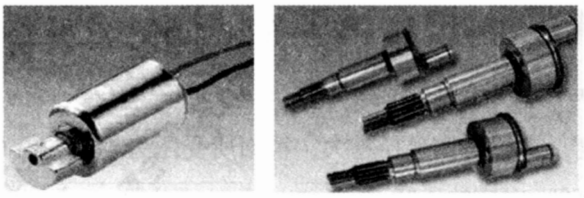


图6-22

2. $\omega=\sqrt{\dfrac{g\tan\theta}{r+L\sin\theta}}$

提示：如图6-23所示，由向心力公式$F=m\omega^2r$得$mg\tan\theta=m\omega^2(r+L\sin\theta)$，则$\omega=\sqrt{\dfrac{g\tan\theta}{r+L\sin\theta}}$

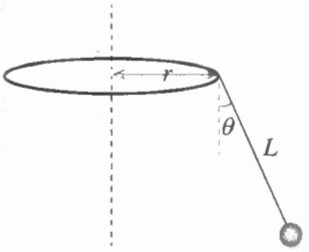


图6-23

以游乐项目“飞椅”为素材，练习根据$F=m\omega^2r$分析角速度ω与夹角θ的关系。

3. 会发生侧滑。

提示：解这个题有两种思路。

第一种：假设汽车不发生侧滑，由于是静摩擦力提供的向心力，所以向心力应有最大值，根据牛顿第二定律，有$F=ma=m\dfrac{v^2}{r}$，所以一定对应有最大拐弯速度，设为v_{max}，则$v_{max}=\sqrt{\dfrac{F_{max}r}{m}}=\sqrt{\dfrac{1.4\times10^4\times50}{2.0\times10^3}}$ m/s $=18.7$ m/s ≈ 67 km/h <72 km/h。所以，如果汽车以72 km/h的速度拐弯时，将会发生侧滑。

第二种：假设汽车以72 km/h的速度拐弯时不发生侧滑，所需向心力为F，则$F=m\dfrac{v^2}{r}=2.0\times10^3\times\dfrac{20^2}{50}$N $=1.6\times10^4$ N $>1.4\times10^4$ N。汽车以72 km/h的速度拐弯时，静摩擦力不足以提供相应的向心力，将会发生侧滑。

以汽车转弯为背景，重力与支持力平衡，侧向静摩擦力提供向心力，将所需要的静摩擦力与

最大静摩擦力比较，或者将最大静摩擦力对应的最大转弯速度与72 km/h比较，或者比较半径，从而判断汽车是否发生侧滑。通过实例分析，让学生在巩固知识的同时，拉近物理与生活、模型与实际的距离，培养学生从不同视角分析同一问题的素养和发散思维。同时，从不同角度的分析也能使学生了解交通安全常识，如为保证安全过弯，可以在转弯处设置限速标志、也可以采用摩擦系数更大的轮胎来增大最大静摩擦力，等等。

4.（1）7.44×10^3 N；（2）79.6 km/h；（3）半径越大越安全；（4）7.9 km/s

提示：（1）如图6–24所示，汽车在桥顶部做圆周运动，重力mg和支持力F_N的合力提供向心力，即$mg-F_N=m\dfrac{v^2}{r}$。汽车所受支持力$F_N=mg-m\dfrac{v^2}{r}=800\times\left(9.8-\dfrac{5^2}{50}\right)\text{N}=7.44\times10^3$ N。

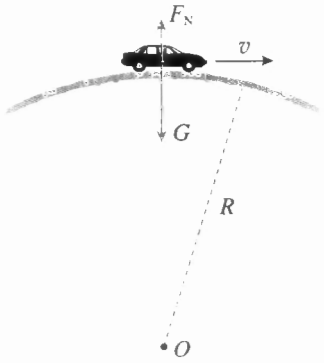


图6–24

根据牛顿第三定律，汽车对桥顶的压力大小也是7.44×10^3 N。

（2）根据题意，当汽车对桥顶没有压力时，即$F_N=0$，对应的速度为v，则$v=\sqrt{gr}=\sqrt{9.8\times50}\text{ m/s}=22.1\text{ m/s}=79.6\text{ km/h}$。

（3）汽车在桥顶部做圆周运动，重力mg和支持力F_N的合力提供向心力，即$mg-F_N=m\dfrac{v^2}{r}$。汽车所受支持力$F_N=mg-m\dfrac{v^2}{r}$。

对于相同的行驶速度，拱桥圆弧半径越大，桥面所受压力越大，汽车行驶越安全。

（4）根据第二问的结论，对应的速度$v=\sqrt{gR}=\sqrt{9.8\times6\,400\times10^3}\text{ m/s}=7.9\times10^3\text{ m/s}=7.9\text{ km/s}$。

以汽车过拱桥最高点为背景，通过计算和分析，使学生认识到汽车过拱桥时的速度不能过大。拱桥圆弧半径越大，桥面所受压力越大，汽车行驶越安全。想象若拱桥的半径增大到地球半径，则汽车从“桥面”上腾空的最小速度为7.9 km/s，可以帮助学生展开思维，培养学生的想象能力和创新思维，为下一章的学习埋下伏笔。

5. 500 N

提示：小孩在重力和秋千板的支持力两个力的作用下做圆周运动，在最低点有$F_N-mg=m\dfrac{v^2}{r}$，由此得$F_N=mg+m\dfrac{v^2}{r}=500$ N。

小孩对秋千板的压力与秋千板对他的支持力大小相等，也是500 N，方向竖直向下。

以荡秋千为素材，练习用向心力公式求秋千板对小孩的支持力，用牛顿第三定律求小孩对秋千板的压力。

三、“复习与提高”参考答案与提示

A、B两组共14道习题，大致可分为三个层次。

第一层次的习题。让学生系统理解与圆周运动相关的物理概念和规律，形成物理观念，并进行科学推理。如让学生用思维导图理解、并对运动进行分类，计算圆周运动各个物理量的规律及其相互关系，进行向心加速度方向和公式的理论推导。

第二层次的习题。将各种实际问题转换为一个或者多个物理模型，通过计算推理得出结论，培养学生的科学思维、探究精神，让学生逐步形成对身边观察到的现象进行抽象进而应用物理规律解决实际问题的科学态度。如在空间站中模拟重力，两种洗衣机脱水过程的受力分析，频闪照相中匀速圆周运动的追击问题，圆周运动径向连接体问题，水平面内圆锥摆问题，与平抛运动结合的竖直面内圆周运动的临界问题。

第三层次的习题。练习将实际问题中的对象转换成物理模型的能力，对综合性问题进行分析推理获得结论，并采用不同的方式对同一问题进行分析论证，对学生的能力要求较高。如水平面内圆锥摆问题，杆连接体竖直面内的圆周运动，将竖直面内圆周运动和平抛运动结合并讨论平抛运动的极值问题，场地自行车问题中正交分解法的灵活应用。

A组

1. 如图6–25所示。

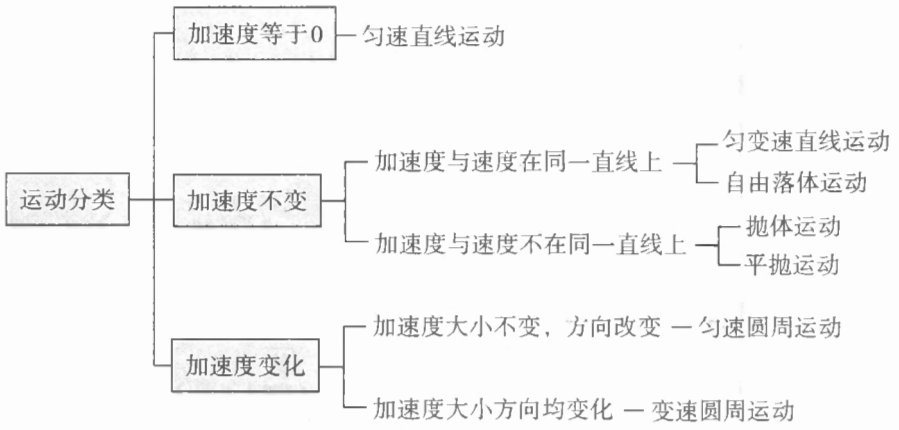


图6–25

2. $v_A : v_B : v_C : v_D = 2 : 1 : 2 : 4$，$\omega_A : \omega_B : \omega_C : \omega_D = 2 : 1 : 1 : 1$；$a_A : a_B : a_C : a_D = 4 : 1 : 2 : 4$

提示：在皮带传动中，同轴转动的角速度大小相等。同一皮带轮缘的线速度大小相等，以此为突破口分析线速度、角速度与半径之间的关系，向心加速度与线速度和角速度之间的关系。

3. $\sqrt{\dfrac{g}{r}}$

提示：宇航员站在地球表面时有$F_N=mg$，要使宇航员站在旋转舱内圆柱形侧壁上，受到与他站在地球表面时相同大小的支持力，则$F_N=mr\omega^2$，由此解得$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{r}}$。

4. $m\omega^2L$

提示：小球A受到重力、支持力和杆向右的拉力F_A，根据牛顿第二定律有$F_A=\dfrac{3m\omega^2L}{2}$。小球$B$受到重力、支持力和杆向左的拉力$F_B$，根据牛顿第二定律有$F_B=\dfrac{m\omega^2L}{2}$。根据牛顿第三定律，小球$A$对杆的拉力大小$F_A'=F_A=\dfrac{3m\omega^2L}{2}$，方向水平向左。小球$B$对杆的拉力大小$F_B'=F_B=\dfrac{m\omega^2L}{2}$，方向水平向右。轻杆受$F_A'$、$F_B'$、转轴对杆的拉力$F$，根据平衡条件得$F_A'=F+F_B'$，由此解得$F=m\omega^2L$，方向向右。根据牛顿第三定律，杆对转轴的拉力大小$F'=F=m\omega^2L$。

本题从运动学角度看连接的各物体有相同的角速度、周期和圆心，从力学角度看彼此间通过轻杆有拉力相互作用，解题的关键是明确研究对象，用隔离法进行正确的受力分析，列方程求解。

5. 滚筒洗衣机的脱水筒匀速旋转时，附着在筒壁上的衣服做圆周运动的向心力由重力和弹力提供。衣服在最高点时，附着在潮湿衣服上的水的重力和衣服与水之间的分子力的合力提供向心力。对比最高点和最低点水的受力情况可知，在同一转速的情况下，水在最低点所受到的分子力更大，所以更容易在最低点从漏水孔甩出，做离心运动。

6. 0.06 N；3.55 N

提示：分析硬币的受力情况如图6-26所示。

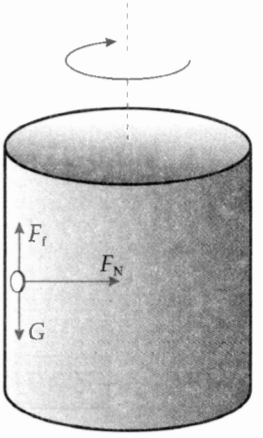


图6-26

由表格中的数据可知，脱水桶的转速$n=600$ r/min$=10$ r/s，脱水桶的直径$D=0.3$ m，则半径$r=0.15$ m。在水平方向由弹力提供向心力，即$F_N=m\omega^2r$，得$F_N=3.55$ N。

在竖直方向上，摩擦力与重力平衡，故$F_f=G=0.06$ N。

让学生分析并计算生活中常见的波轮洗衣机中物体的受力情况，以培养学生应用理论知识解决实际问题的能力。

7. $\sqrt{\dfrac{2g}{R}}$

提示：小物块不受摩擦力，由重力和支持力的合力提供向心力。小物块在水平面内做匀速圆周运动，故其半径为$R\sin 60°$，再根据向心力公式求得$\omega=\sqrt{\dfrac{2g}{R}}$。

B组

1.（1）2 m/s；（2）0.8 m

提示：（1）小球在B点速度最小时，小球与半圆环轨道间的弹力恰好等于0，此时小球仅受竖直向下的重力作用，根据牛顿第二定律有$mg=m\dfrac{v_{min}^2}{R}$，解得$v_{min}=\sqrt{gR}=2$ m/s。

（2）小球从B点水平飞出后做平抛运动，小球以最小速度平抛时距离最小，设小球做平抛运动的时间为t，AC间最小距离为x，则水平方向有$x=vt$，竖直方向有$2R=\frac{1}{2}gt^2$。由此解得$t=0.4\ \mathrm{s}$，$x=0.8\ \mathrm{m}$。

2.（1）$\frac{l\theta}{t^2}$；（2）$\frac{\Delta v}{t}$

提示：（1）质点做圆周运动的半径$r=\frac{l}{\theta}$，角速度$\omega=\frac{\theta}{t}$，向心加速度的大小$a_n=r\omega^2=\frac{l\theta}{t^2}$。

（2）如图6–27甲所示，设物体在A点时速度为v_A，经过很短的时间Δt运动到B点，速度为v_B，转过的角度为θ，速度变化量$\Delta v=v_B-v_A$，如图6–27乙所示。

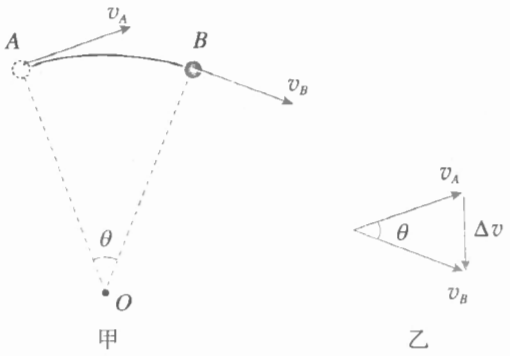


图6–27

比值$\frac{\Delta v}{\Delta t}$是物体在$\Delta t$时间内的平均加速度，方向与$\Delta v$的方向相同。当$\Delta t$趋近于0时，$\frac{\Delta v}{\Delta t}$就表示物体在$A$点的瞬时加速度。在图示的矢量三角形中，$v_A=v_B=v$，当$\Delta t$趋近于0时，$\theta$也趋近于0，$\Delta v$的方向趋近于跟$v_A$垂直，且指向圆心，所以向心加速度的方向沿半径指向圆心。由以上分析知，向心加速度大小$a_n=\frac{\Delta v}{t}$。

向心加速度的方向和公式的推导是一个难点内容，本题用三角形法则较好地突破了速度与速度变化量的方向关系的难点，并结合极限思想推导向心加速度公式，加强用数学工具解决物理问题的训练，培养学生严谨的科学态度和科学推理能力。

3. 观察到白点逆时针转动，周期为1 s。

提示：圆盘转动一周所需要的时间为$T_1=\frac{1}{20}\ \mathrm{s}$，频闪光源每隔$T_2=\frac{1}{21}\ \mathrm{s}$闪一次，所以频闪光源每闪一次，白点尚未运动一周，故观察到白点逆时针转动。每次闪光，白点与原位置相差的角度$\Delta\theta=2\pi-\omega_1 T_2=2\pi-\frac{2\pi}{T_1}\times T_2=\frac{2\pi}{21}$，所以白点转动的周期$T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{2\pi}{\frac{\Delta\theta}{T_2}}=1\ \mathrm{s}$。

本题实际上是两个质点以不同的角速度做匀速圆周运动的追击问题，即$\frac{1}{T}=\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}=n_2-n_1$。学生在分析问题时，会错误地认为频闪比圆盘转动的快，看到白点的转动会更快，其实应当分析每次闪光时白点所在位置的变化才能判断白点转动的方向，并计算出白点转动的周期。

4.（1）因转动的角速度大小未知，故小球在最高点时，杆对球的作用力F_1方向不能确定。

假设F_1的方向竖直向下。根据$F_1+mg=m\omega^2 l$解得$F_1=m(\omega^2 l-g)$。

若$\omega>\sqrt{\dfrac{g}{l}}$，杆对小球的拉力大小为$F_1=m(g-\omega^2 l)$，方向竖直向下。

若$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{l}}$，$F_1=0$，杆对小球恰好无作用力。

若$\omega<\sqrt{\dfrac{g}{l}}$，杆对小球的支持力大小为$F_1=m(g-\omega^2 l)$，方向竖直向上。

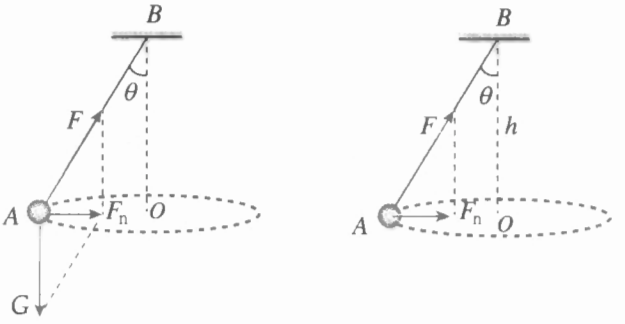
（2）小球运动到水平位置A处时，杆对球的竖直方向分力$F_y=mg$，水平分力$F_x=m\omega^2 l$，故杆对球的作用力大小$F_2=\sqrt{F_x^2+F_y^2}=\sqrt{m^2\omega^4 l^2+m^2 g^2}$。设该作用力与水平方向夹角为$\theta$，则有$\tan\theta=\dfrac{F_y}{F_x}=\dfrac{mg}{m\omega^2 l}=\dfrac{g}{\omega^2 l}$。

故在位置A处杆对球的作用力方向斜向右上，与水平方向夹角为$\theta=\arctan\dfrac{g}{\omega^2 l}$。

提示：对于竖直平面内的圆周运动，要注意在最高点，杆对球的作用力可能是拉力，也可能是支持力，还可能无作用力。通过分类讨论，以培养学生的发散思维和全面分析问题的能力。第（2）问求在A点杆对球的作用力时，要注意该作用力是杆对球在水平和竖直两个方向的分力的合力。

5.（1）$m\omega^2 l$；（2）ω与l无关；（3）成正比

提示：（1）如图6-28甲所示，小球受到重力和沿细绳方向的拉力，设细绳与竖直方向的夹角为θ。沿水平方向轴方向有$F_n=F\sin\theta=m\omega^2 l\sin\theta$，解得细绳对小球的拉力$F=m\omega^2 l$。



甲　　乙

图6-28

（2）如图6-28乙所示，小球受到重力和细绳拉力的合力指向圆心，有$mg\tan\theta=m\omega^2 h\tan\theta$，解得$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{h}}$。可见，轨迹圆的圆心$O$到悬点$B$的距离$h$不变，改变绳长$l$时，角速度$\omega$保持不变，与绳长$l$无关。

（3）由第（1）（2）两问的结论$F=m\omega^2 l$和$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{h}}$，解得$F=\dfrac{mgl}{h}$。可见，细绳的拉力$F$与绳长$l$成正比。

6.（1）$\dfrac{11}{3}mg$；（2）绳长为$\dfrac{d}{2}$，最大水平距离为$\dfrac{2d}{\sqrt{3}}$

提示：（1）已知手与球之间的绳长为$\dfrac{d}{4}$，平抛的水平位移为d，设小球在最低点时绳能承受

的最大拉力为F_{max}，根据向心力公式和平抛运动规律，有$F_{max}-mg=\dfrac{mv^2}{\dfrac{d}{4}}$，$d=vt$，$d-\dfrac{d}{4}=\dfrac{1}{2}gt^2$。

由此解得$F_{max}=\dfrac{11}{3}mg$。

（2）如图6–29所示，设手与球之间的绳长为r，平抛的水平位移为x，由第1问可知绳能承受的最大拉力为$F_{max}=\dfrac{11}{3}mg$，根据向心力公式和平抛运动规律，有$F_{max}-mg=\dfrac{mv^2}{r}$，$x=vt$，$d-r=\dfrac{1}{2}gt^2$，由此解得$F_{max}=mg+\dfrac{x^2}{2r(d-r)}mg$。当$F_{max}=\dfrac{11}{3}mg$时，代入上式有$x^2=\dfrac{16}{3}r(d-r)$，则当$r=\dfrac{d}{2}$时，$x_{max}=\dfrac{2d}{\sqrt{3}}$。

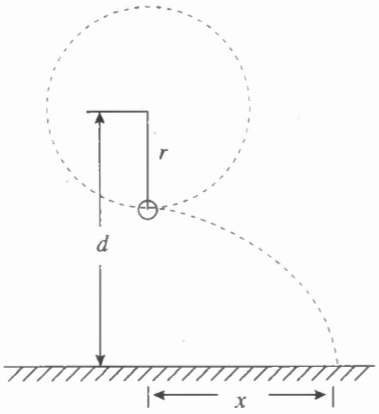


图6–29

根据临界状态下圆周运动和平抛运动表达式求解最大拉力，并进一步建立二次函数表达式进行分析讨论，体现数理结合的方法。

7.（1）12.7 m/s；（2）263 N，方向沿着倾斜路面指向内侧

提示：（1）自行车恰好不受摩擦力时，运动员和自行车所受重力及赛道支持力的合力提供向心力，根据牛顿第二定律有$mg\tan 15°=m\dfrac{v_0^2}{r}$，解得$v_0=\sqrt{gr\tan 15°}=12.7$ m/s。

（2）运动员骑自行车以$v_1=18$ m/s做匀速圆周运动时，因$v_1>v_0$，故赛道给自行车的静摩擦力F_f沿斜面向下，受力分析如图6–30所示。

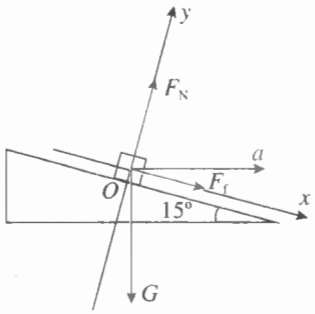


图6–30

在x轴方向由牛顿第二定律可知$F_f+mg\sin 15°=ma_x$。将自行车水平加速度沿x轴分解得$a_x=a\cos 15°$，再根据向心加速度公式$a=\dfrac{v^2}{r}$，联立解得$a=5.4$ m/s^2，$a_x=5.22$ m/s^2，$F_f=263$ N。

摩擦力方向沿着倾斜路面指向内侧。

以场地自行车比赛圆形赛道为背景，在新的情景中巩固处理火车转弯问题的思路和方法。当恰好无摩擦力时，赛道的支持力和重力的合力提供向心力，当圆周运动的速度超过临界速度时，向心力增大，使赛道提供向内的静摩擦力。实际上，场地自行车赛道并不是圆形，各处的坡度和对应的曲率半径也不相同，所以应是特指在赛道上的某一处，且不能说做匀速圆周运动。

四、参考资料

1. 速度方向变化的快慢

（1）怎样描述速度的方向和方向变化的快慢？

速度是矢量，一般情况下它们的方向都用表示速度的有向线段与坐标轴的夹角表示。对于平面运动可在平面上选定一轴Ox，速度方向由速度矢量与Ox轴的夹角φ表示，φ也称为速度的方位角，如图6–31所示。

当质点做曲线运动时，速度方向时时改变，方位角亦随之改变。设t时刻速度为v，方位角为φ。$t+\Delta t$时刻速度为v'，方位角为$\varphi'=\varphi+\Delta\varphi$。方位角的改变量$\Delta\varphi=\varphi'-\varphi$就表示速度的方向在$\Delta t$时间内的变化。比值$\dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t}$表示方位角的变化快慢，称为速度方向的平均变化率，取此值的极限得

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}=\frac{d\varphi}{dt}$$

它表示在t时刻速度方向的变化率。所以速度方向的变化快慢，由速度的方位角对时间的导数来描述。

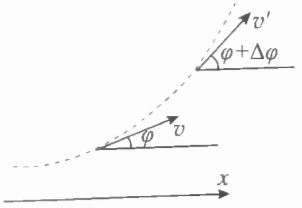


图6–31

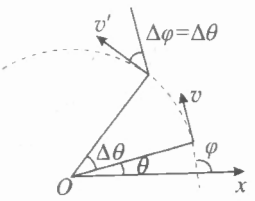


图6–32

设质点作圆周运动，如图6–32所示建立Ox轴，则质点速度的方位角φ与角坐标θ之间的关系为

$$\varphi=\theta+\frac{\pi}{2}$$

所以有

$$\frac{d\varphi}{dt}=\frac{d\theta}{dt}=\omega$$

即速度方向的变化率等于质点的角速度ω。可见，对于圆周运动，角速度就表示了速度方向变化的快慢。

（2）向心加速度不描述速度方向变化的快慢

向心加速度$a_n=\dfrac{v^2}{r}=v\omega$，即向心加速度等于速率与角速度之积。前面已指出，角速度描述

速度方向变化的快慢，因而不能说向心加速度描述了速度方向变化的快慢。

例如，有三个质点做匀速率圆周运动，它们的角速度ω相同，半径不同，分别为r_1，r_2和r_3。由$a=r\omega$可知，它们的向心加速度不同。而速度方向的变化率$\omega=\dfrac{d\theta}{dt}$却相同，如图6-33所示。

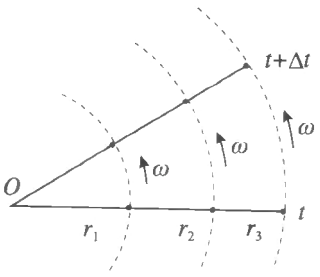


图6-33

又如两个质点作匀速率圆周运动，一个半径为r_1，角速度为ω_1；另一个半径为$r_2=4r$，而角速度$\omega_2=\dfrac{1}{2}\omega_1$，它们的向心加速度相同，即$r_1\omega_1^2=r_2\omega_2^2$。它们的速度方向的变化率之比为2 ∶ 1。

可见，不能认为向心加速度描述了速度方向变化的快慢。

根据公式$a_n=\dfrac{v^2}{r}=v\omega$，只能说，对速率相同的质点，向心加速度的大小可描述速度方向变化的快慢。

（3）怎样正确理解向心加速度的意义

向心加速度（或法向加速度）是由速度的方向变化引起的。根据定义可知

$$a_n=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta v|}{\Delta t}$$

其中Δv是由于速度方向变化而引起的速度矢量的改变量，$|\Delta v|$既与速度方向的改变量$\Delta\theta$有关，又与速度的大小v有关。所以a_n不只是表示方向角的变化$\Delta\theta$。

根据向心加速度的定义，向心加速度或法向加速度的物理意义是：它描述了由于速度方向的变化而引起的速度矢量的变化率。

2. 离心运动的应用

一池污水，若顺其自然靠重力沉降，往往需要几个月才能清浊分明。微粒的沉降，由于存在着分子热运动的干扰作用，靠重力作为推动力不仅极其缓慢有时甚至是不可能的。例如，在蔗糖水溶液中，蔗糖分子要沉降1 mm就需要100年。啤酒、果汁何以清澈透亮？如何从牛奶中提取奶油？如何将油田中喷出的油水混合液进行油水分离？如何将血液中的血细胞和血浆分开？究竟依靠的是何种推动力呢？

（1）离心分层现象

在一个盛有清水的圆筒形容器（转鼓）中，倒入一组同样大小的钢球和木球，然后启动电机使其绕轴高速旋转。此时，由于离心力的大小正比于物体的质量（在体积相同的正比于它的密度），所以钢球很快被甩到最外层，而木球则被推向转轴，清水则占据了“中间地带”（图6-34）。可见，一旦转鼓高速转动起来，容器中的物质就会按密度分层排列。密度小者（轻相）聚集在“中央”即转轴附近，密度大者（重相）则分散在“边区”即转鼓壁附近。这种现象称为离心沉降。如果在转鼓上开满小孔，则其中的液体就会在离心力作用下通过小孔被“驱逐出境”，而固体颗粒则停留在转鼓壁面上，从而达到脱水的目的，这种现象称为离心过滤。例如，奶油的提取，啤酒、酒、果汁的澄清，污水的净化，就属于离心沉降；而煤、矿石和海盐的脱水等则属于离心过滤。

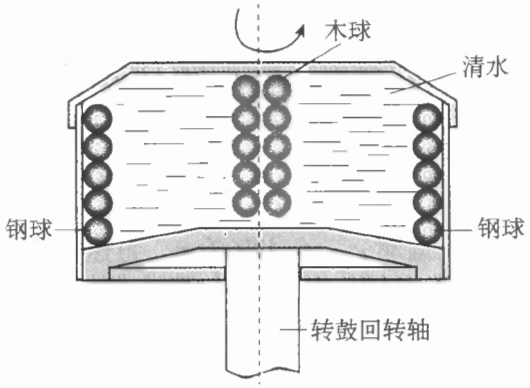


图6-34

上面这个实验告诉我们，要将存在密度差的两种物体（液体或固体）高效地分离开来，可以依靠惯性离心力，它是由物体做高速转动所产生的。瑞典科学家斯维伯格和比姆斯曾使用比重力场大五万至十万倍的离心力场，高效地完成像细菌、病毒等超细微粒（直径只有万分之几乃至十万分之几毫米）的沉降，将它们从水状悬浮液中分离出来。

（2）离心分离术

啤酒何以清澈透亮？原来，这也与离心分离密切相关。在麦汁中含有一种极不稳定的冷凝固物，应尽量减少其含量才能保证成品啤酒不致出现冷混浊现象。然而这种冷凝固物的粒子极其微小，直径仅有0.1~0.5 μm，很难除净。若采用高速离心机进行处理，就比较容易实现净化。因为这种粒子虽然极微小，但由于它与液相之间存在密度差，所以一旦进入强大的离心力场后，二者立即“分道扬镳”，从而可以很容易把冷凝固粒子剔除。

一种名叫“离心浇铸”的先进技术，也得益于这种分离术。当模具绕一固定轴旋转达到500 r/min时，将熔化了的金属倒入其中，夹杂在液态金属里的气体和熔渣，由于其密度远小于液态金属，因此它们将从金属里被分离出来跑向模具的空处。按此法浇铸出的金属零件密实、均匀，可以大大提高使用寿命。

3. 高速转动物体的极限转速

转动物体内各媒质元都做圆周运动，因而都需要向心力。这些向心力由它与周围媒质元的相互作用提供。因此，在转动物体内形成一种因转动而产生的应力。当转速过高时，物体会因应力过大而断裂。那么，高速转动的物体断裂前的极限转速是多大呢？

设一个半径为R、厚度为a、密度为ρ的匀质圆盘，以角速度ω绕过盘心的固定轴转动。在圆盘上任取一半径为r（$r<R$），宽度为$\mathrm{d}r$的细圆环（见图6-35），由对称性知，环上各处应力相同。在环上再任取一小段$\mathrm{d}l$，其质量为$\mathrm{d}m$，$\mathrm{d}l$所对应的张角为$\mathrm{d}\theta$。可以看出，$\mathrm{d}l=r\mathrm{d}\theta$。而且

$$\mathrm{d}m=\rho a\mathrm{d}l\mathrm{d}r=\rho ar\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta$$

它所受到的向心力为

$$F=\omega^2r\mathrm{d}m=\rho ar^2\omega^2\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta \qquad (1)$$

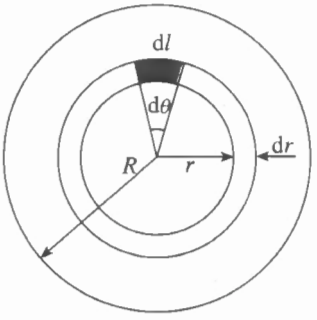


图6-35

而其他媒质元对它的作用应力F_T可看作是沿切线且方向相反的一对力（见图6-36）。从几何关系可以看出，这对力产生的合力F指向圆心，大小为

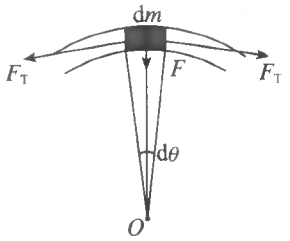


图6-36

$$F=2F_T\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)=\rho ar^2\omega^2 dr d\theta \qquad (2)$$

当$d\theta$足够小时，$\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)\approx\frac{d\theta}{2}$。联立求解式（1）与式（2）得切应力为

$$F_T=\rho ar^2\omega^2 dr$$

又因为$\omega=2\pi n$(n为转速)，则

$$F_T=4\pi^2n^2\rho ar^2 dr$$

可见F_T与r^2成正比，应力最大处应在圆盘边缘，即最大切应力为

$$F_{Tmax}=4\pi^2n^2\rho aR^2 dr$$

对于一根棒（或杆）来说，若对其施以拉力F_T，则F_T与棒的截面积A之比称为抗张强度。当拉力与截面积之比超过某一临界值时，棒就会断裂。这个临界值S称为极限抗张强度，所以转动物体的极限抗张强度S为

$$S=\frac{F_{Tmax}}{a dr}=\frac{4\pi^2n^2\rho aR^2 dr}{a dr}=4\pi^2n^2\rho R^2 \qquad (3)$$

由式（3）解得极限转速n_{max}为

$$n_{max}=\frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{S}{\rho}} \qquad (4)$$

例如，某砂轮的外径D为400 mm、安全工作线速度v为50 m·s^{-1}。根据线速度与转速的关系，可以求出安全工作转速n为

$$n=\frac{60v}{2\pi R}=\frac{60v}{\pi D}=2\,389\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$$

这种砂轮的极限抗张强度S约为1.50×10^7 N·m^{-2}，密度ρ约为2.5×10^3 kg·m^{-3}。由式（4）知它的极限转速n_{max}为

$$n_{max}=\frac{1}{\pi D}\sqrt{\frac{S}{\rho}}=61.7\ \text{r}\cdot\text{s}^{-1}=3\,700\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$$

为了保证砂轮在高速磨削过程中有足够的强度不破裂，出厂前应按安全工作转速的1.5倍进行检测。

4. 匀速率圆周运动的向心力、频率和半径

选一根圆珠笔杆，取一根2.5 m长的尼龙丝，一端系一个橡胶塞（或小沙袋）；另一端穿过圆珠笔杆，然后吊上6个1 cm外径的铁垫圈或两个M10的螺母，最后再在尾端打一死结。用一枚曲别针穿过死结，作为防止垫圈滑脱的阻挡物，见图6-37。调节尼龙丝，使橡胶塞距圆珠笔杆的顶口（笔尖部）的线长为1 m。握住圆珠笔杆，并在头的上方尽量使橡胶塞在一个水平面内做匀速圆周运动。此时垫圈或螺母的重力成为橡胶塞圆周运动的向心力。为了检查转

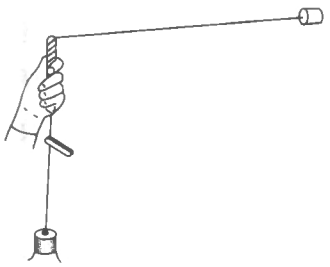


图6-37

动是否平稳，可用一个鳄鱼夹夹在圆珠笔杆下口的线上。记录垫圈的个数和使橡胶塞保持匀速转动的频率。调节水平部分线的长度，使旋转半径先增加$\frac{1}{2}$倍，然后再减小$\frac{1}{2}$，分别数出使橡胶塞仍能做匀速转动的频率。看频率的增减与旋转半径的变化相同还是相反？是否成正比？取下曲别针，先后增加垫圈的数量至最初的1.5倍和2倍（这相当于增大了向心力），保持初态的半径1 m，分别数出橡胶塞匀速转动的频率，看向心力如何影响转动的频率。

5. 用圆锥摆验证向心力的表达式

用电动机做一个电动的圆锥摆，可以改变摆长、转速以及小球的质量，做到转速稳定、半径不变、摆角θ不变。

选用220 V交直流电动机（有电刷），如图6–38所示，加长转轴，加长轴的端部有螺杆和螺母，用薄铁片做一个圆片中间打一个圆孔套在轴杆的螺杆上，两侧各打一个小孔做悬挂小球的支架。用直径1 mm左右的铁丝穿过小球做成图中所示的形状，选择不同的长度和不同的小球可以完成不同半径、不同质量的实验。电动机选择不同的低压直流电压，并且用滑动变阻器调速，可获得不同的转速，以改变小球的线速度与角速度。在转动的小球下方靠近轴的位置水平放置一根刻度尺，可以确定摆角。

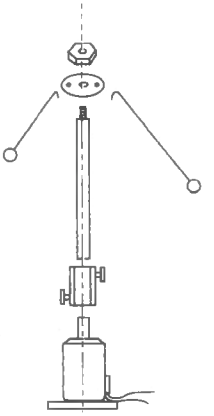


图6–38

6. 拱形桥、凹形桥的压力实验

用3 mm的粗铁丝做成如图6–39所示的凹形桥和拱形桥，两个桥的宽度由所用的钢球直径而定，为2~3 cm，小于钢球直径。钢球直径选择在3~4 cm、质量在200 g左右。

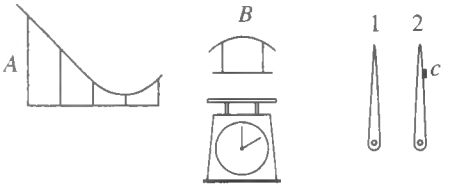


图6–39

将弹簧台秤（测力计）的玻璃卸下，再卸下指针。把薄铁片剪成指针的形状，侧面留出一小块铁皮c如图中2所示，向上弯折与指针垂直，作为记忆指针，记忆指针的轴孔略大于原指针1。将记忆指针安装在原指针的下面。

实验时先将拱形桥B用夹子固定在台秤上，记下示数，再将钢球放在台秤上，记下示数，将记忆指针推回指针1的位置。将凹形桥A安装在铁架台上，并使出口弧线与拱形桥B的入口弧线相切，留2~3 mm的间隙，钢球从A的某处释放，并能从拱形桥B上通过。当钢球从拱形桥B通过后，可以看到记忆指针的位置小于钢球静止放在台秤上的示数。改变钢球在凹形桥上的高度，台秤失重的示数也会改变。

将凹形桥固定在台秤上，让钢球从某处开始滚下，可以看出记忆指针的位置所指示的示数大于钢球静止时的示数。改变钢球的高度，超重的数值也会改变。

第七章

万有引力与宇宙航行

课程标准的要求

2.2.4　通过史实，了解万有引力定律的发现过程。知道万有引力定律。认识发现万有引力定律的重要意义。认识科学定律对人类探索未知世界的作用。

2.2.5　会计算人造地球卫星的环绕速度。知道第二宇宙速度和第三宇宙速度。

2.3.1　知道牛顿力学的局限性，体会人类对自然界的探索是不断深入的。

2.3.2　初步了解相对论时空观。

2.3.3　关注宇宙起源和演化的研究进展。

一、本章教材概述

本章是必修课程的第七章。本章既有人类对天体运动规律的探究过程，又介绍了经典力学的一座丰碑——万有引力定律，还涉及人类的太空之旅。牛顿运用其运动定律研究天体运动并结合开普勒定律建立了伟大的万有引力定律，展现了科学发展过程中科学家们富有创造而又严谨的科学思维和科学态度。

本章教材的第一个主题是回顾过去，介绍人类对行星运动规律的认识过程和牛顿建立万有引力定律的过程。这是落实物理学科素养的好素材。教材介绍了托勒密的地心说、哥白尼的日心说、第谷的观测和开普勒定律，形象、生动地呈现了科学家们实事求是、坚持真理、勇于创新的科学精神。同时体现了科学的思维方法，如建立模型的方法——把行星运动轨道简化为圆。在推

得太阳和行星相互作用力表达式的基础上，牛顿进一步追求物理规律的普适性，放眼天地和宇宙，建立了适用于自然界中任何两个物体间的万有引力定律。

本章教材的第二个主题是展示现在，即应用万有引力定律所取得的巨大成就。如称量地球的质量、发现未知天体和宇宙航行问题等。教材增加了哈雷彗星及潮汐、重力探矿等，使学生对万有引力定律的重要意义和作用有更全面的了解。在载人航天与太空探究领域，我国近期发展很快，教材丰富了我国在这一领域的进步与发展。

本章教材的第三个主题是展望未来，指出万有引力定律与任何其他理论一样，有其局限性。“相对论时空观与牛顿力学的局限性”这节的目的是让学生知道牛顿力学只适用于低速、宏观的情况，让他们初步了解相对论时空观，关注宇宙起源和演化的进展，体会人类对自然界的探索是不断深入的。

本章各部分间的逻辑关系如图7-1所示。

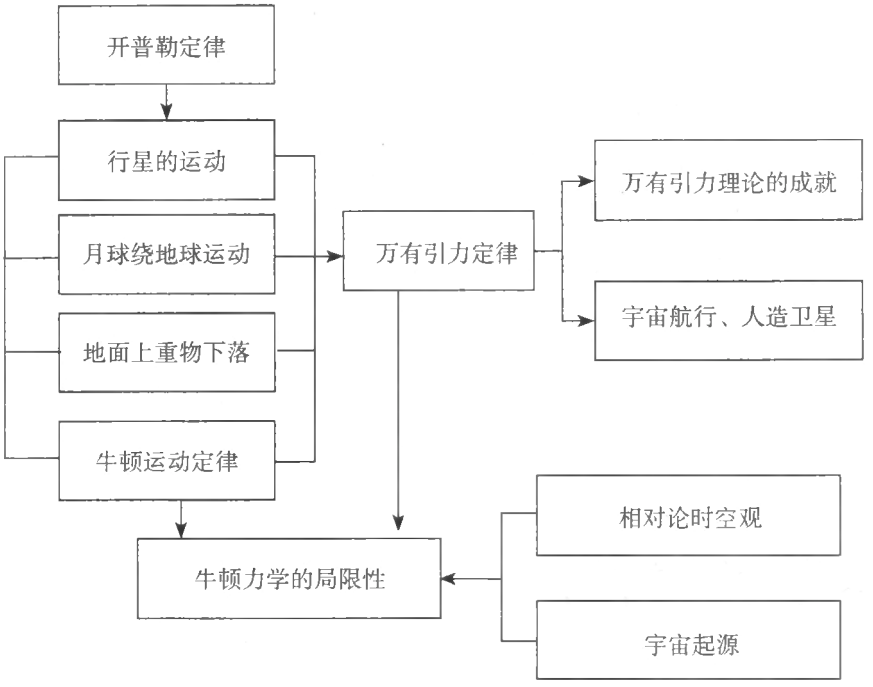


图7-1

具体来说，本书编写时有以下考虑。

1. 把学生作为学习、探究的主人

本章内容与原来相比，虽然知识内容相差不多，但编写理念有了明显变化。教材在以下几个方面进行了加强。

（1）每节在开始就通过图片和问题引导学生的思维。

（2）教材的叙述顺序更符合学生的认知发展。例如，在“太阳与行星间的引力”这节，原教材先叙述了万有引力大小(公式)的推导过程，后补充说明“太阳与行星间的引力的方向沿着两者的连线”。新教材则先构建了行星绕太阳做匀速圆周运动的模型，再根据学生已有的知识基础，确定力的方向，最后推导万有引力大小的表达式。

（3）对学生能够利用已有知识和能力解决的问题，教材尽量避免直接叙述，而是采用“思考与讨论”的方式，鼓励学生自己解决。例如，对于“相对论时空观与牛顿力学的局限性”中的知识，学生学习会有一定难度，教材从学生已有知识和认知的角度考虑，设计了如下的“思考与讨论”。

已知μ子低速运动时的平均寿命是3.0 μs。当μ子以0.99c的速度飞行，若选择μ子为参考系，此时μ子的平均寿命是多少？对于地面上的观测者来说，平均寿命又是多少？

2. 重视物理学科素养的培养

（1）重视“物理观念”素养的培养

本章中有许多内容可以成为“物理学科素养”培养的素材。在编排“行星的运动”这部分内容时，教材既有从运动的视角的探究——开普勒三个定律，又有从力的视角的探究——对行星运动原因的探究，强化了运动与相互作用观。

（2）重视“科学思维”素养的培养

“模型建构”是科学思维的重要内容。学生对实际问题的求解普遍感到困难，这是由于学生缺乏模型建构的经历、方法和策略，教材力求在问题解决过程中，展示模型建立的思维过程。

例如，关于“称量”地球的质量，教材指出：“称量”地球的质量时，我们应选择哪个物体作为研究对象？运用哪些物理规律？需要忽略的次要因素是什么？对这些问题的思考和讨论其实就是模型建构的过程。

又如，关于宇宙速度的求解，教材将其表述为：“我们可以从运动和受力分析入手，用万有引力定律和牛顿第二定律进行求解。”启发学生自己先进行运动和受力分析。在学生思维之后，指出“物体在地球附近绕地球运动时，太阳的作用可以忽略”。

（3）重视“科学探究”素养的培养

例如，开普勒为什么会将行星做匀速圆周运动的观念修改为做椭圆运动？教材在“科学漫步”中介绍：“在他对火星轨道的研究中，70余次尝试所得的结果都与第谷的观测数据有至少8′的偏差。是第谷测量错了吗？开普勒对第谷数据的精确性深信不疑。他想，这不容忽视的8′也许正是因为行星的运动并非匀速圆周运动。”体现了科学探究中的“证据、解释”素养。

又如，在“发现未知天体”中，教材在叙述根据万有引力定律计算出来的轨道与实际观测的结果总有一些偏差后写道“是天文观测数据不准确？是万有引力定律的准确性有问题？是天王星轨道外面还有一颗未发现的行星？”显然，这一段表述体现了科学探究中的“问题”素养。

3. 正确评价牛顿力学

万有引力定律的发现过程犹如一部壮丽的科学史诗，它歌颂了前辈科学家的科学精神，也展现了科学发展过程中科学家们富有创造而又严谨的科学思维，牛顿时代的科学家们围绕着万有引力的研究，经历了大量曲折而又闪烁智慧的科学实践。牛顿力学取得了巨大的成就，然而人们发现在高速、微观领域，牛顿力学已经无法解决所有问题。教材在这部分介绍了相对论的两个效应、量子力学的初步知识，尽管这些具体内容对全体学生来说有一定难度，但通过介绍这些内容，可以让学生知道科学总是在不断发展的。当然，一个新的科学理论的建立并不意味着对原有

科学理论的否定，而是原有科学理论在一定条件下成为新理论的一部分。从这个角度看，科学结论的普适性总是相对的，科学就是在不断探索更广泛适用的理论中得到发展的。

课时安排建议

1. 行星的运动	1课时
2. 万有引力定律	1课时
3. 万有引力理论的成就	1课时
4. 宇宙航行	2课时
5. 相对论时空观与牛顿力学的局限性	1课时

二、教材分析与教学建议

第1节　行星的运动

1．教学目标

（1）了解人类对行星运动规律的认识历程，知道开普勒行星运动定律及其科学价值。

（2）知道行星绕太阳运动的原因，知道引力提供了行星绕太阳做匀速圆周运动的向心力。

（3）认识到科学研究一般从最基本的观念开始，凭借对现象的观测、模型的构建以及模型与事实之间的相互作用，不断修正原有的观念和模型，使其逐步接近真实，获得物理规律。

（4）认识到相信自然的简单和谐是科学家研究的动力之一，尊重客观事实、坚持实事求是是科学研究的基本态度和社会责任。

2．教材分析与教学建议

本节内容是全章知识的先导，更是学习万有引力定律的基础。本节知识内容本身很难进行探究和思维，但包含十分丰富的科学史料。因此，本节的教学设计应立足于对学生进行科学态度与责任、科学思想方法的教育。让学生通过了解科学家关于天体运动问题的研究历史，感悟科学家求真、求简的科学思想方法和科学精神。学生对有关科学家的事例可能略知一二，但对科学家的发现、创造过程还缺乏系统的了解。因此，本节教学一般来说有以下两种处理方法：一种是教师讲述的方法；另一种是学生先阅读（查询），再由师生共同总结归纳的方法。对于程度较好的学生可采用后一种方法，在上课之前先给学生布置一些学习任务，如：①阅读科学漫步栏目“人类对行星运动规律的认识”；②查找有关描述天体运动的历史资料。在课堂教学中，先让学生交流各自获得的资料，再让学生提出仍需讨论的问题，由教师择要进行分析讨论，最后师生共同归纳出人类认识天体运动的大致进程，使学生对全章有一个概括性的认识。这样做，一方面可以培养学生获取资料、分析资料、合作交流的素养；另一方面，在整体的背景下实施教学，有利于提高学生的认知水平。

本节先从运动学的角度描述天体的运动，从介绍托勒密的地心说到哥白尼的日心说，再提出开普勒的行星运动定律。按照人类认识天体运动的发展历史学习本节内容，较符合学生认知发展的规律。在学完开普勒行星运动定律后，教师可以引导学生思考：行星为什么会这样运动呢？为下一节做好铺垫。

（1）地心说与日心说争论

问题是思维的发动机和导航器。在教学设计时教师应寻找人类认识行星运动的历史事实与学生认知的契合点，进行问题设计，引导学生的探究与思维。下面列举几例。

教学片段

托勒密的地心说和哥白尼的日心说

人类对行星运动规律的认识过程充满着曲折与艰辛，人们的宇宙观代表着与这个时期社会大背景相适应的主流观念和意识。从地心说的直接经验开始，到日心说的转变，不是简单的参考系的变化，这是人类思想的一次重大解放，从此人类的视角超越了地球。为此，教师可设置以下问题。

问题1. 托勒密的地心说和哥白尼的日心说的基本观点分别是什么？

问题2. 关于运动的描述，托勒密的地心说和哥白尼的日心说有哪些相似的地方？

问题3. 从运动学的角度来看，托勒密的地心说和哥白尼的日心说的区别是什么？

问题4. 为什么日心说最终战胜了地心说？

在学生思考回答的基础上教师再作如下适当介绍。地心说认为地球是静止不动的，太阳、月球及其他行星围绕地球运动。日心说则认为太阳是静止不动的，地球和其他行星围绕太阳运动。在哥白尼之前，欧洲流行的是以地球为中心的“地心说”：地球位于天体的中心，月球、水星、金星、太阳、火星、木星、土星等都围绕地球旋转。虽然地心说在解释火星的逆行现象时需要用到复杂的本轮、均轮，但由于它符合宗教教义，因此得到了教廷的支持。尽管哥白尼提出的日心说可以用更简洁的理论来解释逆行现象，却遭到禁止。开普勒用了20年的时间研究了丹麦天文学家第谷的行星观察资料，发现了行星运动的规律。

（2）开普勒行星运动定律

开普勒第一定律：所有行星绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上。说明行星运动的轨道特征。

开普勒第二定律：对任意一个行星来说，它与太阳的连线在相等的时间内扫过的面积相等。说明行星运动速度变化的规律，靠近太阳的时候行星运动得快，远离太阳的时候行星运动得慢。开普勒第二定律还蕴含着行星与太阳之间的相互作用力在行星与太阳的连线上这一结论。

开普勒第三定律：所有行星轨道的半长轴的三次方跟它的公转周期的二次方的比都相等。这个定律的得出比前两个要晚一些，需要通过对所有行星围绕太阳运动的轨道半长轴与公转周期的比较，才能得出$\frac{a^3}{T^2}=k$。这个公式蕴含着行星运动的动力学关系，是牛顿得出万有引力定律的基础。

开普勒三个行星运动定律是一个整体，它对行星运动规律的描述有一个从定性到定量的过程，开普勒第一定律是其余两个定律的基础。但三个定律描述的内容又是各自独立的，并不重复。

为了让学生感受k值的特点，可以列表给出各大行星的轨道半长轴、公转周期，让学生观察并发现规律。

在理解开普勒行星运动定律的基础上，应向学生指出：开普勒三个行星运动定律不但适用于行星绕太阳的运动，也适用于卫星绕行星的运动，但k值不同。

教学片段

开普勒行星运动定律的发现过程及其意义

法国著名科学方法论学者阿雷说过："科学基本活动就是探究和制定模型。"行星运动模型的建立、修正与发展的历史，是培养学生科学思想方法与物理建模的极好材料。日心说虽然战胜了地心说，但仍保留了人们认为的完美图形———圆，这在一定程度上代表了古代人的审美观。开普勒能够最终放弃这一世世代代为人们所信奉的完美图形，不仅与他坚信第谷观测数据的精确有关，也与他把观察数据放在首位有关。这体现了实证的思想，也就是科学态度和科学精神。为此，教师可设置以下问题。

问题1. 开普勒能够得到行星运动定律的原因有哪些？

问题2. 开普勒第一、第二、第三定律描述的关键问题是什么？

问题3. 教材通过画图说明"行星绕太阳的轨道十分接近圆"，到底有多接近呢？

问题4. 开普勒行星运动定律对地球卫星的运动是否适用？

（3）行星绕日运动的原因

教学片段

对行星绕日运动原因的初步探究

虽然教材对行星运动原因的探究的内容是在下一节课，但在本节课后提出，可以让学生提前进行自主探究。这一探究的目的并不是获取物理知识，而是让学生认识科学发展的艰辛历程。为此，教师可设置这两个问题。行星为什么会绕着太阳运动？历史上科学家是怎么认识的？

3. "练习与应用"参考答案与提示

本节配置了4道习题。第1题介绍天文单位，应用开普勒第三定律计算火星的公转周期，意在将火星与地球的公转周期作比较。第2题将开普勒行星运动规律进行推广，让学生认识规律具有一般性、普遍性和局限性。第3题反思研究力和运动关系的两种方法，注重科学思维和方法的培养。第4题突出物理实验和观察在解释自然规律中的重要作用。

1. 671d

提示：将行星绕太阳的运动轨迹按圆来处理，根据开普勒第三定律有$\frac{r_{地}^3}{T_{地}^2}=\frac{r_{火}^3}{T_{火}^2}$，由此解得$T_{火}=T_{地}\sqrt{\frac{r_{火}^3}{r_{地}^3}}=365\times\sqrt{\frac{1.5^3}{1^3}}\ \mathrm{d}\approx 671\ \mathrm{d}$。

根据开普勒第三定律，所有行星轨道的半长轴的三次方跟它的公转周期的二次方的比值都相等。实际上行星的轨道十分接近圆，在中学阶段的研究中我们按圆轨道处理。即所有行星轨道半径的三次方跟它的公转周期的二次方的比值都相等。通过计算，感受火星上的一年相当于地球上的多少天。

2. 在近地点的速度比较大。

提示：开普勒三定律虽然是在研究行星运动规律时发现的，但它的适用范围并不局限于行星绕恒星的运动，也适用于卫星绕行星的运动。开普勒第二定律背后蕴含着更深刻的规律——角动量守恒。开普勒第三定律中的轨道半径的三次方与周期的平方之比是个常数，这个常数与中心天体有关，与环绕天体无关。

3. 这节的讨论属于根据物体的运动探究它受的力（力与运动的关系）。平抛运动的研究属于根据物体的受力探究它的运动，而圆周运动的研究属于根据物体的运动探究它受的力。例如，研究物体在光滑斜面上下滑时，是根据受力情况来推测物体的运动；研究物体在水平圆盘上随盘匀速转动时，是根据物体做匀速圆周运动来推测其所受静摩擦力的方向（牛顿第二定律的应用）。

提示：力和运动的关系是力学研究的中心问题。通过实例的学习，不断丰富和加深学生对牛顿运动定律的理解，使学生对牛顿定律的认识逐渐螺旋上升。

4. 这个无法在实验室验证的规律就是开普勒第三定律$\frac{r^3}{T^2}=k$。由于天体的尺寸之大，使得天体运动是无法在实验室中重现的，而第谷的长期精确观测记录的数据为人们揭示天体的运动规律奠定了基础，第谷的数据和开普勒的数据几何化，终于清晰地呈现了行星运动的规律。在科学探究中实验、观察、分析、逻辑推理等都是得出规律的要素。

提示：通过思考本题提出的问题，可以引导学生体验万有引力的发现过程，体会科学定律对人类探索未知世界的作用。

第2节　万有引力定律

1. 教学目标

（1）知道万有引力存在于任意两个物体之间，知道其表达式和适用范围。

（2）理解万有引力定律的推导过程，认识在科学规律发现过程中大胆猜想与严格求证的重要性。

（3）知道万有引力定律的发现使地球上的重物下落与天体运动完成了人类认识上的统一。

（4）会用万有引力定律解决简单的引力计算问题。知道万有引力定律公式中r的物理意义，了解引力常量G的测定在科学史上的重大意义。

2. 教材分析与教学建议

从行星运动规律到万有引力定律的建立过程，是本章的重要内容，是极好的科学探究素材。教材将“太阳与行星间的引力”与“万有引力定律”合编为一节，包括问题的提出、演绎、假设与推理、结论的得出、检验论证等，是一个比较完整的探究过程。需要指出的是，万有引力定律虽然是本章的重点知识，但万有引力定律的理解并不困难。从培养学生科学思维、科学探究素养的角度，让学生经历万有引力定律的推导过程是最有价值的。教师要避免自己边讲边推导的教学方式，而要通过问题引导，激励学生根据已有的知识经历推理的过程。

历史上牛顿是在椭圆轨道情形中导出了万有引力定律，但考虑学生的知识基础不够，在中学阶段只能将椭圆轨道近似为圆形轨道才能导出万有引力定律。在万有引力定律的推导过程中，要让学生明白，万有引力定律的得出虽然需要演绎推理，但并不是依靠已有规律加上演绎推理就能够得到的，其中需要“大胆的假设”。如从相互作用的角度，太阳与行星的地位是相同的（从运动的角度地位并不相同），太阳对行星的引力与行星对太阳的引力应具有相似的关系式，这体现了牛顿的科学智慧。牛顿是一位对概念、规律的普遍意义极其敏感的大科学家，从研究太阳与行星之间的引力，想到天上与地上引力的统一，再到万有引力，他一直不满足于一个具体规律的发现，而是在探寻自然界的和谐与统一。

（1）太阳对行星的引力

教学片段

关于行星运动原因的探究

从学生已有的知识结构来看，学生在学习万有引力定律之前，应该对力、质量、速度、加速度、向心力、向心加速度等概念有较好的理解，并且掌握自由落体、抛体和匀速圆周运动的运动学规律，能熟练运用牛顿运动定律解决动力学问题。针对上节课结束时探究的问题，学生通过查询，并了解众多科学家对行星运动原因的推测过程，可以从动力学的角度提出行星运动的原因，教师可以再进一步提出下列问题。

问题1. 阻碍科学家获得正确认识的原因主要是什么？

问题2. 牛顿是怎么认识的？他获得成功的原因是什么？

为了使探究有深度，对于基础比较好的学生，教师可以对学生的分析、推理过程进行追问，如“当时并没有认识到运动和力的关系，你怎么办？”“当时还没有牛顿第一定律和惯性概念，你怎么办？”让学生回到科学家当时面临的情况进行思考与探究。

教学片段

引力方向和大小的探究

历史上真实的万有引力定律的推导过程是高中生很难理解的。从学生发展核心素养的角度，应该让学生经历必要的推导过程，获得思维素养的提升。为此，可参考下面的问题设计，以激发学生的深度思维。

问题1. 若行星绕太阳的运动可看作是匀速圆周运动，太阳与行星间引力的方向是什么方向？为什么？

问题2. 引力大小与什么因素有关？表达式又是怎样的呢？

（因天文观测难以直接得到行星运动的速度v，可以测得行星公转的周期T，可得到$F=m\frac{4\pi^2 r}{T^2}$）

问题3. 如果我们要通过天文观测验证上述公式，该怎么办呢？

问题4. 力与距离成正比吗？相距越远的物体受到的力可能越大吗？

问题5. 在我们学过的知识中，有描述轨道半径r与周期T之间关系的公式吗？

问题6. 太阳对行星的作用力只跟行星质量有关吗？还能从什么角度帮助我们向前更进一步？

问题7. 牛顿第三定律能否够帮助我们得到$F' \propto \frac{m_{太}}{r^2}$？

问题8. 想到$F' \propto \frac{m_{太}}{r^2}$的原因是什么？这是推理还是创新？

问题9. 根据$F \propto \frac{m}{r^2}$、$F' \propto \frac{m_{太}}{r^2}$和$F = F'$，你能归纳出什么？

在上述推导过程中，我们大多时候是在圆周运动公式、牛顿运动定律和开普勒行星运动定律的基础上进行推理，但仅仅靠推理是得不到万有引力定律的。要得到这一规律，还需要大胆的假设——太阳对行星的作用与行星对太阳的作用“地位”是平等的，规律应有相似性。物理学上许多重大突破，不是简单的逻辑推理或实验结果的总结，它需要深刻的洞察力，而这种深刻的洞察力常常也是艰辛探索过程的结果。

教学片段

月—地检验

考虑到直接证明“月球绕地球运动的力与使苹果下落的力是同一种力”有一定难度，可采用“分步走”的策略，“假设地球对月球的作用力与太阳对行星的作用力是同一种力”“假设地球对苹果的力也是同一种力”。对分析推理过程，教师可以采用问题启发与讲解结合的方法。可参考下面的问题设计。

问题1. 假设地球对月球的作用力与太阳对行星的作用力是同一种力，其表达式是怎样的？

问题2. 月球在这个力的作用下做什么运动？其向心加速度的表达式是怎样的？

问题3. 假设地球对地面上的苹果的力也是同一种力，其表达式是怎样的？

问题4. 苹果在这个力的作用下做什么运动？其加速度的表达式是怎样的？

问题5. 这两个加速度之比是多少？

问题6. 已知月球与地球之间的距离$r = 3.8 \times 10^8$ m，月球公转周期$T = 27.3$ d，重力加速度$g = 9.8$ m/s^2，$\frac{a_{月}}{g}$是多少？它与理论推导值相等吗？

用数据说明上述设想的正确性，牛顿的大胆设想经受了事实的检验。至此，平方反比律已经扩展到太阳与行星、地球与月球、地球与地面物体之间。

上述想法有一定的观察事实作为依据，也有一定的假设和猜想，这些想法的正确性要由事实来检验。在牛顿的时代，自由落体加速度已经能够比较精确地测定，当时也能比较精确地测定月球与地球的距离、月球公转的周期，从而能够算出月球运动的向心加速度，进行“月—地检验”。

（2）万有引力定律

万有引力定律的发现，是17世纪自然科学最伟大的成果之一。它把地面上物体运动的规律

和天体运动的规律统一了起来，对以后物理学和天文学的发展具有深远的影响。它第一次解释了一种基本相互作用的规律，在人类认识自然的历史上树立了一座里程碑。

万有引力定律的发现对文化发展也有重大意义：使人们建立了有能力理解天地间的各种事物的信心，解放了人们的思想，在科学文化的发展史上起了积极的推动作用。

（3）引力常量

牛顿在推出万有引力定律时，没能得出引力常量G的具体值。G的数值于1789年由卡文迪什利用他所发明的扭秤得出。卡文迪什的扭秤实验，不仅是对万有引力定律的最直接验证，同时也让此定律有了更广泛的使用价值。这一实验曾被美国《物理世界》杂志评为“十大经典实验”。这一实验为万有引力定律的普遍意义奠定了强有力的基础。物理学史上每一个物理常量的发现都代表着一段重要的科学历史，应向学生说明引力常量G测出的重要意义，即如果没有测出G的数值，万有引力定律的应用将受到限制。正是由于卡文迪什通过巧妙的实验设计测出了引力常量G，才使得万有引力定律在天文学的发展上起了重要的作用。教学中应注意引导学生了解和体会前人是如何巧妙地将物体间非常微小的力显现和测量出来的，同时注意向学生说明灵活运用所学知识的重要意义。

关于引力常量的测量，教师可用课件向学生展示和介绍，使学生学习和体会其中精巧的实验方法，如采用“光杠杆”原理使微小物理量放大的方法等。

3.“练习与应用”参考答案与提示

本节配置了4道习题。前2道题分别从身边物体之间的万有引力，再到星系之间的万有引力，说明引力在不同质量尺度的物体上，表现的影响是不同的，厘清主次，形成数量级的概念。第3题通过直接应用万有引力定律进行计算，感知与我们朝夕相处的太阳和月球对地球的引力。第4题通过计算木卫二的周期，学会分析卫星的运动周期与哪些因素有关。

1. 假设两个人的质量都为60 kg，相距1m，则它们之间的万有引力大约为$F=G\frac{m^2}{r^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{60^2}{1^2}\text{N}\approx2.4\times10^{-7}\text{N}$。

这样小的力我们是无法察觉的，所以我们在分析物体受力时通常不需要考虑物体间的万有引力。

提示：上面的计算是一种估算。通过练习，让学生体会到地球上物体之间的万有引力很小。两个人相距1 m时不能把人看成质点，简单套用万有引力公式。

2. $1.19\times10^{28}\text{N}$

提示：根据万有引力定律有$F=G\frac{m_{太}m_{小}}{r^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{2\times10^{40}\times2\times10^{39}}{(5\times10^4\times365\times24\times3\,600\times3.0\times10^8)^2}\text{N}=1.19\times10^{28}\text{N}$。

可见天体之间的万有引力是很大的。

3. 设太阳、月球、地球的质量分别是$m_{太阳}$、$m_{月球}$、$m_{地球}$，太阳和月球到地球的距离分别为r_1和r_2。由万有引力定律可知太阳对地球的引力为$F_1=G\frac{m_{太阳}m_{地球}}{r_1^2}$，月球对地球的引力为$F_2=$

$G\frac{m_{月球}m_{地球}}{r_2^2}$，所以$\frac{F_1}{F_2}=\frac{m_{太阳}r_2^2}{m_{月球}r_1^2}=\frac{2.7\times10^7}{(3.9\times10^2)^2}\approx178$。

提示：天体间的引力不可忽略，月地距离虽然比日地距离近，但太阳的质量比月球大，太阳对地球的引力远大于月球对地球的引力，所以地球“携带”月球绕太阳运转。但月球对地球的引力也在地球上产生了种种影响，比如潮汐等。

4. 木卫二绕木星做匀速圆周运动，设木星的质量为$m_{木}$，木卫二绕木星做匀速圆周运动的轨道半径为r，木卫二绕木星运动的周期为T，木卫二的质量为m。木星对木卫二的万有引力提供向心力，依据牛顿第二定律有$\frac{Gm_{木}m}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2r$，所以$T=2\pi\sqrt{\frac{r^3}{Gm_{木}}}$。将$r=6.7\times10^8\,\mathrm{m}$、$m_{木}=1.9\times10^{27}\,\mathrm{kg}$、引力常数$G=6.67\times10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$代入得$T=3.06\times10^5\,\mathrm{s}$，约为85 h。

第3节　万有引力理论的成就

1. 教学目标

（1）理解“称量地球质量”的基本思路，了解万有引力定律在天文学上的重要应用。

（2）理解计算太阳质量的基本思路，能将天体问题中的对象和过程转换成相关模型后进行求解。

（3）认识万有引力定律的科学成就，体会科学的迷人魅力，进一步认识运动与相互作用观念。

2. 教材分析与教学建议

本节通过具体的案例使学生认识发现万有引力定律的重要意义，认识科学定律对人类探索未知世界的作用。通过具体问题的解决，让学生认识到万有引力定律经受了实践的检验，取得了巨大成功。本节是应用性的内容，应着重引导学生建立物理模型，并明确求解思路。通过本节的学习，重点要使学生深刻体会科学定律对人类探索未知世界的作用，激起学生对科学探究的兴趣。

（1）“称量”地球的质量

“称量”地球的质量对学生来说，既是一个具有挑战性的问题，又是一个学生运用所学的知识和方法可以解决的实际问题，值得教师进行精心设计。

教学片段

如何称量地球的质量？

问题1. 称量质量的工具有哪些？测量质量的方法有哪些？依据的原理各是什么？

问题2. 地球的质量如何称量？我们该从什么角度思考这一问题？

问题3. 如何从万有引力定律的角度，考虑地面上的物体，“测出”地球的质量？

问题4. 地面上的物体的运动情况如何？受力情况又如何？

问题5. 为了“测出”地球的质量，我们需要做怎样的简化？能简化吗？

问题6. 你能够推出地球质量的表达式吗？式中的量是否可观测？

问题7. 为什么卡文迪什将自己的实验说成是“称量”地球的重量?

由于地球半径和重力加速度在卡文迪什实验之前已经被测出，这样只要根据公式就可以算得地球的质量，这不能不说是个奇迹。引得著名文学家马克·吐温的赞叹：“科学真是迷人。根据零星的事实，增添一点猜想，竟能赢得那么多收获！”教师要引导学生仔细体会这句名言，感悟科学的力量。

需要说明的是，用万有引力定律算得的“质量”，是引力质量，而用牛顿第二定律算得的质量是惯性质量，爱因斯坦曾把这两种质量的等同作为他建立广义相对论的出发点。有关引力质量与惯性质量的关系问题，教师不必向学生作详细介绍，可以布置任务，让学有余力的学生自己去查找资料学习。

（2）计算天体的质量

计算天体质量的思路与前面计算地球质量的思路不同，它需要将万有引力定律与牛顿第二定律结合起来进行处理。由于学生已经具有一定的知识储备，教师应通过问题引导的方法，让学生自主探究。

教学片段

计算天体的质量

问题1. 我们能否用称量地球质量的方法计算天体(如太阳)的质量? 难点在哪里?

问题2. 天体的质量如何计算? 我们该从什么角度思考这一问题?

问题3. 为了运用牛顿第二定律，我们需要寻找怎样的、可观测的情境?

问题4. 行星的运动情况如何? 受力情况又如何?

问题5. 为了计算太阳的质量，我们需要做怎样的简化? 能简化吗?

问题6. 你能够推导出太阳质量的表达式吗? 式中的量是否可观测?

问题7. 上述方法是否可用于计算地球的质量、火星的质量、月球的质量? 需要的条件是什么?

问题8. 上述方法能否求出环绕天体的质量?

问题9. 能否在得到天体质量的基础上得到天体的平均密度?

（3）发现未知天体

预言并发现未知天体，是万有引力理论威力和价值的生动例证。1871年赫歇耳偶然发现天王星，并且经过测量算出其轨道半径和周期，证明它是太阳系成员之一。观测数据表明，天王星的运动有某些极小的不规则性。是什么原因造成的? 英国的亚当斯和法国的勒维耶独立地对此进行研究，计算出这颗新行星即将出现的时间和地点，德国天文学家伽勒在天文观测中认出了这颗新行星，与预计的轨道只差1度。海王星就这样在笔尖下被发现了。1930年汤姆波夫根据海王星自身运动不规则的记载又发现了冥王星。教材也提供了部分供学生思考探究的内容，教师应用好这些素材。

是天文观测数据不准确?

是万有引力定律的准确性有问题?

是天王星轨道外面还有一颗未发现的行星?

……

教师也可以引导学生对多种可能性进行发散性思考，并进行讨论。

（4）预言哈雷彗星回归

哈雷利用万有引力定律解释了在1531年、1607年和1682年三次出现的彗星，实际上是同一颗彗星的三次回归，它出现的周期为75年或76年。由此，他预言这颗彗星于1759年会再次出现。1759年，虽然哈雷已去世17年，但全世界的天文台都在等待着这颗彗星。果然，1759年3月13日，这颗明亮的彗星拖着长长的尾巴出现在星空，后来人们根据哈雷的计算，预测这颗彗星将于1835年 、1910年、1986年回归地球，结果它都如期而归，这就是人人皆知的“哈雷彗星”。人们预计它在2061年还将回归地球。让我们等待着它的出现吧！

“许多自然科学的理论之所以被称为真理，不但在于自然科学家们创立这些学说的时候，而且在于为以后的科学实验所证实的时候。”

（5）万有引力定律的其他应用

牛顿发现的万有引力定律，开始包含着假设，也是在其后百多年间，由于不断被科学实验所证实，才逐渐得到普遍承认。对万有引力定律最有效的实验验证之一，是关于地球形状的预测。16世纪初，航海家麦哲伦率船队环球航行，历时三年，终于成功，这足以证明地球为一球体。那么，地球是不是一个半径处处相同的标准球体呢？在无法从地球之外观察地球全貌，也无法在地面上进行实际测量的情况下，只能借助某些现象作一些预测。牛顿依据万有引力定律与其他力学规律通过理论计算，大胆预言：由于地球的自转，赤道部分的物质应向外隆起，使地球成为两极稍扁的扁球体，犹如一个橘子。笛卡儿根据涡旋假设作出预言，地球应是两极伸长的扁球体，犹如一个柠檬。这场“橘子与柠檬”之争持续了几十年，直到1735年，法国科学院派出两个测量队，分赴赤道地区和高纬度地区测量后才一锤定音。牛顿胜利了，万有引力定律也经受住了考验。

另外，牛顿用万有引力定律解释了潮汐现象，用万有引力定律还可以解释地球表面重力加速度微小差异的原因，并用于指导重力探矿。

正像物理学家冯·劳厄所说：“没有任何东西像牛顿引力理论对行星轨道的计算那样，如此有力地树立起人们对年轻的物理学的尊敬。从此以后，这门自然科学成了巨大的精神王国……”

利用这些素材，教师可激发学生学习物理的兴趣。

3.“练习与应用”参考答案与提示

本节配置了4道习题。前2道习题围绕求解不同星球表面的自由落体加速度、同一星球上不同海拔处的自由落体加速度，意在将万有引力定律和牛顿第二定律结合起来，以帮助学生弄清自由落体加速度的来源及决定因素，想象在月球上由于自由落体加速度的变化对人的举止的影响。第3题利用人造地球卫星的运行参数，计算中心天体地球的质量，以巩固对典型模型的掌握，这也是课文“观测人造地球卫星的运动，是测量地球质量的重要方法之一”的具体落实。第4题将彗星和地球进行比较，进一步复习开普勒行星运动定律。预测彗星的周期也是万有引力理论的成

就之一。地球和彗星都是围绕太阳运动的，地球的轨迹可以近似为圆，彗星的轨迹虽然是椭圆，但是同样遵循万有引力定律，同样绕太阳运动，这也为下一节学习宇宙速度埋下伏笔。“相互作用观”“运动观”，在一个个生动的实例研究中得以潜移默化地形成。

1. 1.68 m/s^2；6 m

提示：在月球表面有$G\frac{m_{月}m}{R_{月}^2}=mg_{月}$，解得$g_{月}=G\frac{m_{月}}{R_{月}^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.3\times10^{22}}{(1.7\times10^3\times10^3)^2}\ \text{m/s}^2=1.68\ \text{m/s}^2$。$g_{月}$约为地球表面重力加速度的$\frac{1}{6}$，在月球上人感觉很轻，习惯在地球表面行走的人，在月球表面行走时是跳跃前进的。宇航员在月球上最多能举起的物体质量为$m'=6m$。

2. 在地球表面，对于质量为m的物体有$G\frac{m_{地}m}{R^2}=mg$，解得$g=G\frac{m_{地}}{R^2}$。对于质量不同的物体，得到的结果是相同的，即这个结果与物体本身的质量m无关。根据万有引力定律$G\frac{m_{地}m}{r^2}=mg$，高山的r较大，所以在高山上的重力加速度g值就较小。

3. 5.9×10^{24} kg

提示：卫星绕地球做圆周运动的向心力由地球对卫星的万有引力提供，有$G\frac{m_{地}m}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2r$，解得地球质量$m_{地}=\frac{4\pi^2r^3}{GT^2}=\frac{4\pi^2\times(6.8\times10^6)^3}{6.67\times10^{-11}\times(5.6\times10^3)^2}\ \text{kg}=5.9\times10^{24}\ \text{kg}$

4.（1）18；（2）在近日点的速度大，$\frac{r_2^2}{r_1^2}$

提示：（1）由题知哈雷彗星的运行周期为75年。根据开普勒第三定律$\frac{r_{地}^3}{T_{地}^2}=\frac{a_{彗}^3}{T_{彗}^2}$，得到$\frac{a_{彗}}{r_{地}}=\sqrt[3]{\frac{T_{彗}^2}{T_{地}^2}}\approx18$。故哈雷彗星轨道的半长轴约为地球公转半径的18倍。

（2）由开普勒第二定律可知，哈雷彗星在近日点速度大于远日点速度，即$v_1>v_2$。设太阳的质量为$m_{太}$，由万有引力定律和牛顿第二定律可知$G\frac{m_{太}m}{r^2}=ma$。则$a=G\frac{m_{太}}{r^2}$，哈雷彗星在近日点和远日点的加速度大小之比为$\frac{a_1}{a_2}=\frac{r_2^2}{r_1^2}$。

第4节　宇宙航行

1. 教学目标

（1）了解人造地球卫星的最初构想，会推导第一宇宙速度。

（2）知道同步卫星和其他卫星的区别，会分析人造地球卫星的受力和运动情况并解决涉及人造地球卫星运动的较简单的问题。

（3）了解发射速度与环绕速度的区别和联系，理解天体运动中的能量观。

（4）了解宇宙航行的历程和进展，感受人类对客观世界不断探究的精神和情感。

2．教材分析与教学建议

本节介绍了万有引力定律的实践性成就，要求学生知道万有引力理论使人类实现了“飞天”梦想。重点理解第一宇宙速度。通过人类对太空探索和我国在载人航天和宇宙探索方面的成就与进展的介绍，增强学生的民族自豪感，落实“科学态度与责任”这一核心素养。

本节的教学过程可以参考以下方式展开。

（1）宇宙速度

多大的发射速度才能成功发射人造地球卫星？这个话题最早是牛顿的设想。教学中应以牛顿的设想为问题情境，引导学生建立模型，进行推理得出结论。

教学片段

多大的速度才能成功发射人造地球卫星？

问题1. 按照牛顿的设想，在忽略空气阻力的情况下，在地面上以越来越大的水平速度抛出物体，物体还做平抛运动吗？

问题2. 物体如果不落地，它将怎样运动？

问题3. 物体绕地球做圆周运动的向心力由什么力提供？是否需要考虑太阳对它的引力？

问题4. 你能否推出物体绕行的速度？

问题5. 地球表面有大气层，为什么月球表面没有大气层呢？

关于第二宇宙速度和第三宇宙速度，学生需要了解它们的物理含义，考虑到学生的知识基础，可由教师进行介绍性讲授。

（2）人造地球卫星

随着全球人造卫星数量和技术迅猛发展，人造卫星与人的生活联系日益紧密，增加“人造卫星”的学习是非常必要的。教材简要地介绍了“多级火箭使人造卫星发射梦想成真”和“地球同步卫星的数据”，考虑到发射人造卫星是物理知识的综合运用，教师可设置一个探究点，了解人造卫星的相关知识。

教学片段

人造卫星的发射与运行

问题1. 你所知道的人造卫星有哪些类型？

问题2. 对于在稳定轨道上做匀速圆周运动的人造卫星来说，它的轨道中心在何处？

问题3. 如果人造卫星的发射速度大于第一宇宙速度，它可能做圆周运动吗？它的轨道有何特点？此时的运行速度如何求解？与第一宇宙速度相比，哪个更大？

问题4. 为什么发射速度越大，运行速度反而更小呢？是否违反了能量守恒定律？

问题5. 高轨道运行的卫星与低轨道运行的卫星相比，角速度、周期和向心加速度更大吗？最小周期对应什么情况？

问题6. 地球同步卫星的轨道和周期具有什么特点？

问题7. 发射人造卫星时，实际上是火箭把人造卫星送入轨道的，那么发射速度又该怎样理解呢？

在完成上述讨论的基础上，教师可以根据学生实际作进一步拓展。发射高轨道卫星时，一般先利用火箭将卫星发射到近地轨道运行，然后在空中点火加速，卫星进入转移轨道（实际情况需要多次加速、转移），到达需要的高度（轨道），再次利用空中点火加速。当引力和向心力相等时，人造卫星稳定在高轨道运行。

（3）载人航天与太空探索

在载人航天与太空探索领域，我国近年来发展很快。教师可结合图片、视频，如我国女宇航员在太空授课的录像片段等素材进行展示和讲解。

（4）STSE：航天事业改变着人类的生活

航天事业正在改变着我们的日常生活。教师应引导学生阅读，拓宽视野，激发爱科学、学科学、用科学的兴趣。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节配置了4道习题，按照由一般到特殊（一般的人造卫星、神舟五号飞船、同步卫星）、由近及远、由此及彼（地球、金星）的逻辑编排，意在通过解析一个个典型实例，使学生提高对规律的认识。第1题通过对公式的辨析讨论人造地球卫星的运行速度由哪些因素决定。第2题以我国首次载人航天的神舟五号为背景材料，计算神舟五号的飞行高度。第3题计算地球同步卫星的向心加速度。同步卫星是一种重要的人造地球卫星，对了解我们的地球，以及地球上的人类生产生活有着广泛而重要的作用。要满足“同步”的要求，就要限定卫星的运行高度、速度、轨道平面等参数，从而让学生体会物理量在遵循规律时的相互制约条件。第4题将地球和金星进行比较，计算金星的“第一宇宙速度”。

1. 只有ω一定时，r增大2倍，v才增大2倍。实际上，随着r的增大，由$\frac{r^3}{T^2}=k$可知周期T增大，则$\omega=\frac{2\pi}{T}$减小，而不能保持一定。即ω也是r的函数，函数关系为$\omega=\frac{v}{r}=\sqrt{\frac{Gm}{r^3}}$。

提示：人造卫星绕行星做匀速圆周运动时由万有引力提供向心力。由此可推出，卫星的线速度，角速度，加速度，周期都与轨道半径一一对应，即轨道半径变化时，上述四个量都会变化。

2. 300 km

提示：神舟五号绕地球运动的向心力由其受到的万有引力提供，即$G\frac{m_{地}m}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r$，即$r=\sqrt[3]{\frac{Gm_{地}T^2}{4\pi^2}}$。其中$T=\frac{24\times60-(2\times60+37)}{14}\ \text{min}=91.64\ \text{min}$。代入数据解得$r=\sqrt[3]{\frac{6.67\times10^{-11}\times6.0\times10^{24}\times(91.64\times60)^2}{4\pi^2}}\ \text{m}=6.7\times10^6\ \text{m}$。

神舟五号距离地面的高度$h=r-R=(6.7\times10^6-6.4\times10^6)\ \text{m}=300\ \text{km}$。

3. $\sqrt[3]{\frac{16\pi^4gR^2}{T^4}}$

提示：设同步卫星的质量为m，环绕地球的轨道半径为r，由万有引力定律和牛顿第二定律得$G\frac{m_{地}m}{r^2}=ma$，地球上物体受到重力与万有引力大小近似相等，故$mg=G\frac{m_{地}m}{R^2}$，同步卫星的向心加速度$a=\omega^2r=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2r$，联立解得$a=\sqrt[3]{\frac{16\pi^4gR^2}{T^4}}$。

4．8.9 m/s^2；7.3 km/s

提示：（1）设金星质量为$m_{金}$、半径为$R_{金}$、金星表面自由落体加速度为$g_{金}$，在金星表面有$G\frac{m_{金}m}{R_{金}^2}=mg_{金}$。设地球质量为$m_{地}$、半径为$R_{地}$、地球表面自由落体加速度为$g_{地}$，在地球表面有$G\frac{m_{地}m}{R_{地}^2}=mg_{地}$。联立解得$\frac{g_{金}}{g_{地}}=\frac{m_{金}}{m_{地}}\times\frac{R_{地}^2}{R_{金}^2}$，故$g_{金}=\frac{m_{金}}{m_{地}}\times\frac{R_{地}^2}{R_{金}^2}g_{地}=\frac{0.82\times9.8}{0.95^2}\ \text{m/s}^2=8.9\ \text{m/s}^2$。

（2）根据$G\frac{m_{金}m}{R_{金}^2}=m\frac{v_{金}^2}{R_{金}}$解得$v_{金}=\sqrt{\frac{Gm_{金}}{R_{金}}}$，则$\frac{v_{金}}{v_{地}}=\sqrt{\frac{0.82}{0.95}}=0.92$。金星的第一宇宙速度$v_{金}=0.92v_{地}=7.3\ \text{km/s}$。

第5节　相对论时空观与牛顿力学的局限性

1．教学目标

（1）感受牛顿力学在高速世界与事实的矛盾，知道牛顿力学只适用于低速、宏观物体的运动。知道相对论、量子论有助于人类认识高速、微观领域。

（2）知道爱因斯坦狭义相对论的基本假设，知道长度相对性和时间间隔相对性的表达式。

（3）了解宇宙起源的大爆炸理论，知道科学真理是相对的，未知世界必将在人类不懈的探索中被揭开更多的谜底。

2．教材分析与教学建议

本节的教学重点是“相对论时空观”和“牛顿力学的局限性”。

相对论建立之前的整个经典物理学（包括牛顿力学）都是建立在绝对时空观的基础之上，绝对时空观认为空间和时间是两个独立的观念，彼此间没有联系。这个观念在人类活动的低速范围内是正确的。在该观念下，牛顿力学、伽利略变换和力学相对性原理三者是自洽的、和谐一致的。但是在这个范围以外，牛顿力学的结论就与观测结果不一致，它揭示了牛顿力学内在的某些基本矛盾。爱因斯坦系统全面地审查了牛顿力学和麦克斯韦电磁场理论的基础，洞察出内在的基本矛盾集中在时空观念与物质运动之间的联系上，找到了克服困难的途径，确立了崭新的时空观，并建立了把力学和电磁学统一起来的自洽和谐的新的物理理论——狭义相对论。

本章前几节从牛顿发现万有引力定律，到海王星、冥王星的发现，再到宇宙航行等，介绍了万有引力理论的辉煌成就。此时介绍经典力学的局限性，目的在于使学生在拓展知识、开阔视野的同时，正确认识物理学理论的发展与适用范围。教材从低速到高速、宏观到微观两方面简单介绍了经典力学的局限性。要学生认识到：牛顿力学具有坚实的实验基础，作为某些条件下的特殊

情形，它被包括在新的科学成就之中。尽管万有引力定律取得了辉煌的成就，但真理是相对的，在新的领域还有新的规律等待我们去发现。

课标要求“关注宇宙起源和演化的研究进展”。教材在“科学漫步”栏目中介绍了宇宙学的研究和进展，以及恒星的演化、黑洞的简单知识。

（1）绝对时空观

教学片段

绝对时空观与光速不变实验之间的矛盾

发生在高速世界中的现象是学生陌生的，也是很难想象的。这部分内容的教学可以用问题引导、学生阅读和师生讨论的方式来进行。

问题1. 图7-2为高速列车行驶时车厢内显示的列车速度，列车上的乘客观察到车厢内的时间、长度与地面上的观察者看到的相同吗？时间和空间都不会因为物体的运动而改变的观念叫什么？

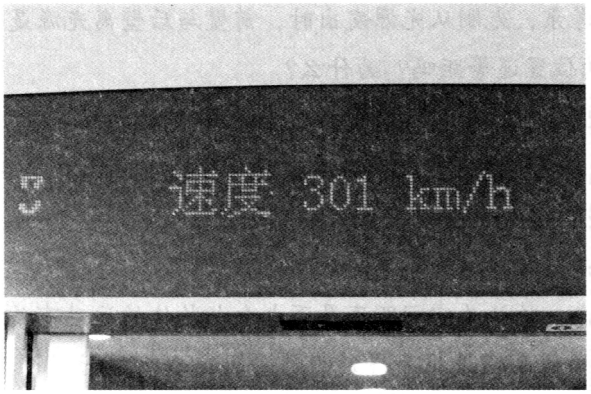


图7-2

问题2. 假如测得的光速是1.2c，这与之前我们知道的光速c是自然界最快的速度矛盾吗？

问题3. 电磁波（光）传播的速度是c。有没有指明这个速度是相对哪个参考系的？如果没有指明说明了什么？有实验证据吗？

问题4. 迈克耳孙－莫雷实验的直接结果是什么？这一结果与我们熟悉的速度合成相同吗？

问题5. 在力学理论与实验结果有矛盾时，不同的物理学家处理的方法有何差异？

问题6. 为了解决上述矛盾，爱因斯坦做了什么？两个假设的内容是什么？

对问题1，考虑到学生已有的生活经验，可让学生独立回答，先让学生了解经典时空观的基本含义，再根据经典力学中的速度合成规则推导物体在不同参考系中的速度。对问题2、3，可以让学生小组讨论后回答，揭示绝对时空观的矛盾。对问题4，可以让学生阅读相关素材，结合自己的思考回答。对问题5、6，可让学生阅读相关素材后回答，教师再进行点拨和补充。

（2）相对论时空观

狭义相对性原理揭示了绝对空间和绝对时间是不存在的。这就跟牛顿力学的时空观有本质的区别。之所以大家很难发现其中的问题，是由于日常生活中所涉及的运动速度都是很低的（与光速相比），通常看不出相对论效应。

教学片段

同时的相对性

根据光速不变性，学生不难推导同时的相对性。由于很难理解与生活经验不一致的这一结论，更需要在初始阶段运用逻辑的力量充分展开思维过程。

如图7-3所示，一列火车以速度v相对于地面高速运动，位于火车正中间的光源，某一时刻发出了一个闪光。

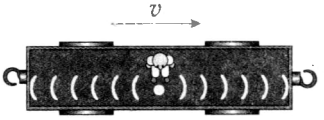


图7-3

问题1. 以火车为参考系，闪光是否同时到达前壁和后壁？

问题2. 以地面为参考系，光刚从光源发出时，前壁与后壁离光源是否等距？经过时间Δt后，前壁与后壁离光发出时的位置还等距吗？为什么？

问题3. 根据光速不变原理，光到达前壁与后壁还同时吗？

问题4. 火车内观察者观察到光同时到达前壁和后壁，在地面观察者看来并不同时，你相信这是真的吗？你要否定它，首先需要否定什么？

问题5. 时间间隔还是与物体运动无关的独立存在吗？

问题6. 除了时间观念，你认为空间距离是否也会与物体的运动有关？

问题7. 爱因斯坦基于两个假设推导得到的时间间隔Δt和杆长l的表达式是怎样的？它们表达了怎样的结果？

问题8. 上述表达式有没有得到实验的证明？对于地面观测者来说，μ子的平均寿命约为多少？

问题9. 为什么说爱因斯坦的相对论是革命性的？

（3）牛顿力学的局限性

说爱因斯坦的相对论是革命性的，主要理由是爱因斯坦的相对论改变了经典时空观念，揭示了高速运动物体遵循的规律，指出了牛顿力学的局限性。牛顿力学在历史上曾经完美地解释了物体的运动规律，并将天上的力与地上的力统一起来，当爱因斯坦的狭义相对论的时空观提出后，它是否还有价值？它的适用条件是什么？

3.“练习与应用”参考答案与提示

本节配置了3道习题，分别涉及同时的相对性、时钟变慢效应和尺缩效应，通过简明的实例，了解相对论时空观。

1. 按照火车上的人测量，闪光先到达前壁。由于地面上的人测得闪光同时到达前、后壁，而在光向前、后壁传播的过程中，火车要相对于地面向前运动一段距离，所以光源发出的位置一定离前壁较近。这个事实对于车上、车下的人都是一样的。在车上的人看来，既然发光点离前壁较近，各个方向的光速又是一样的，当然闪光先到达前壁。

提示：本题的结论与光源安放在车上还是地上没有关系。图中有意识地把光源画在地面上，为的是给长度的相对性做些准备。

2. 1 min

提示：$\Delta t=\dfrac{\Delta\tau}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}=\dfrac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{8\times10^3}{3\times10^8}\right)^2}}\text{min}\approx1\text{ min}$

通过这个题目可以看到，即使对于人造卫星的运动这样快的速度，相对论效应也是微不足道的。

3. 30 m，30 m；26 m，30 m

提示：由 $l=l_0\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}$，可得 $l=30\times\sqrt{1-\left(\dfrac{3\times10^3}{3\times10^8}\right)^2}\text{ m}\approx30\text{ m}$。

火箭速度为3 km/s时，观察者测得火箭的长度约为30 m，火箭上的人测得火箭的长度为30 m。

由 $l'=30\times\sqrt{1-\left(\dfrac{\frac{c}{2}}{c}\right)^2}\text{ m}=15\sqrt{3}\text{ m}\approx26\text{ m}$ 可知，火箭速度为 $\dfrac{1}{2}c$ 时，观察者测得火箭的长度约为26 m，火箭上的人测得火箭的长度为30 m。

三、“复习与提高”参考答案与提示

A组配置了7道习题。第1题辨析卫星的向心力公式，练习理想模型的构建。第2题通过对卫星发射场选址的分析，一方面明确了人造地球卫星的运行速度是相对于地心而不是地表，另一方面也为下一章从节能的角度渗透科学态度和责任方面的要求。第3题比较太阳和地球对人的万有引力大小，通过计算结果分析太阳引力和地球引力对人的影响。第4题地球和月球之间有一个平衡点，通过求平衡点的位置，可以适当拓展介绍拉格朗日点。第5题求海王星的第一宇宙速度。第6题要求学生完成在月球上测月球质量的实验设计，具有一定的开放性。第7题求中子星表面的自由落体加速度和中子星的第一宇宙速度，研究对象有卫星、行星、恒星、中子星（恒星的不同演化阶段），从这些数据中认识到恒星质量和密度大到一定程度时发生的现象，进而预测和解释黑洞等问题。

B组配置了6道习题。第1题要求学生完成在月球上测月球质量的另一种方法。第2题要求学生证明ρT^2是一个常量。第3题用割补法计算万有引力，是典型模型的转化。第4题求三颗同步卫星对应地球的最小自转周期，将卫星的周期与地球的自转联系起来，找到“最小”这个临界条件，并将它转化为卫星轨道的表达。第5题是潮汐现象的一种解释，理论联系实际。第6题涉及行星冲日现象，从定性到定量逐渐认识行星运行速率与轨道半径的关系，解释和预测行星冲日现象，达到学以致用的目的。

A组

1. 第二个同学说的对，第一个同学说错了。

根据万有引力提供向心力可知$G\frac{m_{地}m}{r^2}=m\frac{v^2}{r}$，$v=\sqrt{\frac{Gm_{地}}{r}}$，即当半径增大到2倍时，$v$变为原来的$\frac{1}{\sqrt{2}}$。

2. 在发射卫星时，相对于地心的速度越大，越容易发射出去，相对于地心的发射速度等于相对于地面的发射速度加上地球自转的线速度。地球上不同地方角速度大小相等，赤道处半径最大，由$v=\omega R$可得出赤道处自转的线速度最大。故发射场一般选择在尽可能靠近赤道的地方。

提示：进一步明确卫星的速度是相对于地心的速度，而不是相对于地表的速度，为了节省能量，可以利用地球的自转，合理选址。引导学生读新闻报道时关注卫星发射地所在的纬度。

3. 地球半径6.4×10^6 m与地球到太阳的距离1.5×10^{11} m相比，相差近10万倍，因此人距太阳的距离可以认为也是1.5×10^{11} m。故人受太阳的引力$F=G\frac{m_{太}m}{r^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{1.99\times10^{30}\times60}{(1.5\times10^{11})^2}$ N=0.35 N。

人受地球的引力$F'=mg=60\times9.8$ N=588 N。

可以看到，人受太阳的引力远小于人受地球的引力。因为引力不仅仅与物体质量有关，还与物体之间的距离有关，所以尽管太阳质量很大，但是距离很远，所以对处于地球上的人的引力很小。

4. 9 ∶ 1

提示：设月球的质量为m_0，则地球的质量是81 m_0，假设飞行器距离地心距离为R，距离月心距离为r，飞行器的质量是m，月球的质量是m_0，那么飞行器和地球间的引力为$F_1=G\dfrac{81m_0m}{R^2}$，飞行器和月球间的引力为$F_2=\dfrac{Gm_0m}{r^2}$，由于$F_1=F_2$，故$R:r=9:1$。

5. 16.3 km/s

提示：宇宙飞船的运行半径等于海王星的半径R，其线速度v为近地卫星的线速度，根据万有引力提供向心力可知$G\dfrac{m_{海}m}{R^2}=m\dfrac{v^2}{R}$，得出$v=\sqrt{\dfrac{Gm_{海}}{R}}$。同理地球的第一宇宙速度$v_1=\sqrt{\dfrac{Gm_{地}}{R_{地}}}$，由此联立解得$\dfrac{v}{v_1}=\sqrt{\dfrac{m_{海}R_{地}}{m_{地}R_{海}}}=\dfrac{\sqrt{17}}{2}$。即$v=\dfrac{\sqrt{17}}{2}v_1=\dfrac{\sqrt{17}}{2}\times7.9\ \text{km/s}\approx16.3\ \text{km/s}$。

6. 方案一：用测力计测出钩码重力$W_{钩}$，则月球表面重力加速度$g'=\dfrac{W_{钩}}{m}$，由万有引力定律可得$g'=\dfrac{Gm_{月}}{R^2}$，联立解得月球的质量$m_{月}=\dfrac{W_{钩}R^2}{Gm}$。

在此方案中，需要使用的测量工具是测力计。

方案二：将钩码从空中适当高处由静止释放，测出其下落高度h和下落时间t，则$h=\dfrac{1}{2}g't^2$，由万有引力定律可得$g'=\dfrac{Gm_{月}}{R^2}$，联立解得月球质量$m_{月}=\dfrac{2R^2h}{Gt^2}$。

在此方案中，需要使用的测量工具是刻度尺和停表。

提示：测天体的质量，所求天体一定要位于中心天体的位置。已知万有引力常量G，环绕天体的轨道半径、线速度、角速度、周期四个量中知道任意两个就可以求出中心天体的质量。本题已知天体半径R，两种方案都是围绕测出天体表面的重力加速度来进行设计，即相当于已知轨道半径和加速度，求中心天体的质量。

7. （1）$1.3\times10^{12}\ \text{m/s}^2$；（2）$1.1\times10^{8}\ \text{m/s}$

提示：（1）设中子星表面的自由落体加速度为g，由$\dfrac{Gm_{中}m}{R^2}=mg$解得$g=\dfrac{Gm_{中}}{R^2}=1.3\times10^{12}\ \text{m/s}^2$。

（2）贴近中子星表面，沿圆轨道运动的小卫星的速度为v，由万有引力提供向心力可知$\dfrac{Gm_{中}m}{R^2}=m\dfrac{v^2}{R}$，又因$\dfrac{Gm_{中}m}{R^2}=mg$，联立解得$v=\sqrt{gR}=\sqrt{1.3\times10^{12}\times10^4}\ \text{m/s}=1.1\times10^8\ \text{m/s}$。

计算了金星、地球、海王星等行星表面的重力加速度和第一宇宙速度，再计算中子星表面的重力加速度和第一宇宙速度，引导学生认识到由于天体密度的不同会导致一些神奇的现象，如黑洞、光线弯曲，等等。

B组

1. 用刻度尺测出某点距月球表面的高度为h，用停表测出小球从这点下落高度h时所用的时间t，则$h=\dfrac{1}{2}g't^2$，由万有引力定律可得$g'=\dfrac{Gm_{月}}{R^2}$。联立得出月球质量$m_{月}=\dfrac{2R^2h}{Gt^2}$。

2. 将行星看作球体，设半径为R，质量为$m_{星}$，则行星的密度为$\rho=\dfrac{m_{星}}{V}=\dfrac{m_{星}}{\dfrac{4\pi R^3}{3}}$。

卫星贴近行星表面运行时，运动半径为R，由万有引力提供向心力可知$\dfrac{Gm_{星}m}{R^2}=m\dfrac{4\pi^2}{T^2}R$，即$m_{星}=\dfrac{4\pi^2R^3}{GT^2}$。由此可以解得$\rho T^2=\dfrac{3\pi}{G}$，式中$G$为万有引力恒量，可见$\rho T^2$是一个对任何行星都相同的常数。

提示：贴着行星表面飞行，只要有一个计时工具就可以知道行星的密度。

3. $\dfrac{7Gmm'}{36R^2}$

提示：根据万有引力定律，质量为m的球体对质点m'的万有引力$F_1=G\dfrac{mm'}{(2R)^2}$。挖去的球体的质量$m_0=\dfrac{\dfrac{4}{3}\pi\left(\dfrac{R}{2}\right)^3}{\dfrac{4}{3}\pi R^3}m=\dfrac{m}{8}$，那么质量为$m_0$的球体对质点$m'$的万有引力$F_2=\dfrac{Gm_0m'}{\left(R+\dfrac{R}{2}\right)^2}=\dfrac{Gm_0m'}{18R^2}$。剩余部分对质点$m'$的万有引力$F=F_1-F_2=G\dfrac{mm'}{4R^2}-G\dfrac{mm'}{18R^2}=\dfrac{7Gmm'}{36R^2}$。

质量分布均匀的球体之间的万有引力可以等效为质量集中在两球心的两个质点之间的万有引力，直接代公式可求。本题采用先填补成完整的球体，再减去补上的小球部分产生的引力。

4. 4 h

提示：地球自转周期变小，卫星要与地球保持同步，则卫星的公转周期也应随之变小，由$\dfrac{Gm_{地}m}{r^2}=m\dfrac{4\pi^2}{T^2}r$，可得$T=\sqrt{\dfrac{4\pi^2r^3}{Gm_{地}}}$，故卫星离地球的高度变小。卫星的周期由轨道半径决定。要想仅用三颗同步卫星来实现地球赤道上任意两点之间保持无线电通信的目的，最小的轨道半径对应的几何关系为卫星连线正好和地球相切。由此关系可推出最小半径，得到最小周期。要实现三颗卫星覆盖全球的目的，当卫星的几何关系如图7-4所示时，卫星的公转周期最小，地球的自转周期也最小。

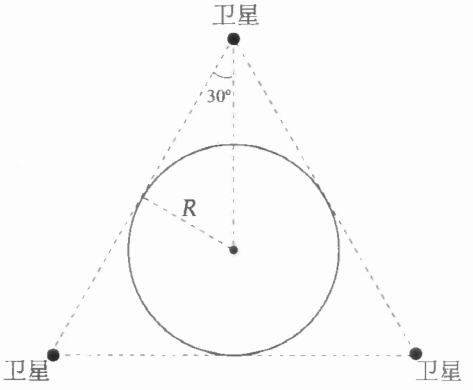


图7-4

由几何关系可知，卫星的轨道半径$r=\dfrac{R}{\sin 30°}=2R$，由开普勒第三定律可知$\dfrac{r_1^3}{T_1^2}=\dfrac{r_2^3}{T_2^2}$，代入

题中数据得$\frac{(6.6R)^3}{24^2}=\frac{r^3}{T_2^2}$，由此解得$T_2\approx 4\ \mathrm{h}$。

5. 对同一片海水来说，太阳对海水的引力、月球对海水的引力，分别是海水重力的6.1×10^{-4}倍、3.4×10^{-6}倍。

提示：设太阳的质量为$m_{太}$，太阳与地球的距离为R_1。月球质量为$m_{月}$，月球与地球的距离为R_2。地球的质量为$m_{地}$，地球半径为R，一片海水的质量为m。

根据万有引力定律，太阳对海水的引力为$F_1=\frac{Gm_{太}m}{R_1^2}$，月球对海水的引力为$F_2=\frac{Gm_{月}m}{R_2^2}$，地球对海水的引力为$F=\frac{Gm_{地}m}{R^2}$。因此，$\frac{F_1}{F}=\frac{m_{太}}{m_{地}}\left(\frac{R}{R_1}\right)^2=\frac{2.0\times10^{30}}{6.0\times10^{24}}\times\left(\frac{6.4\times10^6}{1.5\times10^{11}}\right)^2=6.1\times10^{-4}$，$\frac{F_2}{F}=\frac{m_{月}}{m_{地}}\left(\frac{R}{R_2}\right)^2=\frac{7.3\times10^{22}}{6.0\times10^{24}}\times\left(\frac{6.4\times10^6}{3.8\times10^8}\right)^2=3.4\times10^{-6}$。

本题简要介绍了对潮汐现象的一种解释，估算了太阳和月球对同一片海水的引力与重力的比较，让学生初步尝试用万有引力定律解释潮汐现象。

6. 1.1年，海王星相邻两次冲日的时间间隔最短。

提示：行星相邻两次冲日的时间间隔就是地球比该行星多运动一周的时间，设相邻两次冲日的时间间隔为t，有$\frac{t}{T_{地}}-\frac{t}{T_{行}}=1$，即$t=\frac{1}{\frac{1}{T_{地}}-\frac{1}{T_{行}}}=\frac{T_{地}}{1-\frac{T_{地}}{T_{行}}}$，再根据开普勒第三定律有$\frac{R_{地}^3}{T_{地}^2}=\frac{R_{行}^3}{T_{行}^2}$，即$\frac{T_{地}}{T_{行}}=\left(\frac{R_{地}}{R_{行}}\right)^{\frac{3}{2}}$，故$t=\frac{T_{地}}{1-\sqrt{\frac{R_{地}^3}{R_{行}^3}}}$，由此可得$t\approx1.1$年。海王星的轨道半径最大，海王星相邻两次冲日的时间间隔最短。

行星冲日现象可类比田径场跑道上的运动员的追击相遇问题。轨道半径越大的行星周期越长，轨道半径越小的行星周期越短，周期短的不断超越周期长的。地外行星的周期都比地球的周期长，地球的周期最短，每超越一次就发生一次冲日。行星与地球的周期相差越大，冲日的周期就越短。

四、参考资料

1．引力的特性

物理学主要研究物质运动的普遍规律和物质的基本构成，核心的问题是物质间的相互作用。宇宙万物种类繁多、形状各异，它们的相互作用极其复杂。现代科学已经证明，自然界中一切物质间的相互作用都可以归结为四种基本的作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。作为四种最基本的自然力之一的引力，与另外三种力相比较，又有其独特之处。

（1）引力是普遍存在的

在我们周围，地球上的任何物体，包括我们自身，都受到地球的引力作用。人类最早注意到的力就是地球的引力，它与我们的日常生活息息相关。任何两个质量不等于0的物体之间，都存在着引力相互作用。电磁相互作用只存在于带电的粒子或带电的宏观物体之间，在使两个物体产生电力作用以前，至少要使其中的一个物体带电；在使两个物体产生磁力作用之前，至少要使其中的一个物体磁化。强相互作用和弱相互作用则只存在于微观粒子之间，如质子、中子、介子等。唯有引力是普遍存在的，因此，引力也被称为“万有引力”。

（2）引力作用的范围大

引力和电磁力都是长程力，而强相互作用和弱相互作用都是短程力，作用范围都很小。强相互作用所及的范围小于10^{-15} m，当两个相邻的强子[①]间的距离超过10^{-15} m时，强相互作用就小到可以忽略不计的程度。弱相互作用的范围更小，小于10^{-17} m，而且作用力比强相互作用要小得多。因此，在大尺度的情况下，特别是在宇宙天体之间，由于天体的质量非常大，所以万有引力起着主要作用。

（3）引力无法屏蔽

不论我们在一个物体与地球之间设置什么样的屏障，都不能屏蔽地球对物体的引力。另外，在地球上某一固定位置，一个物体所受到的地球的引力是不变的，不会由于物体与地球之间的屏障而有所减弱。而电力和磁力都可以屏蔽，并且可以通过增减物体的带电量，或改变电荷的运动状态等方法来改变电磁相互作用的强弱。

（4）引力的相对强度小

在四种基本相互作用中，万有引力最弱。在天体运动和宏观现象中，引力起重要作用，但在原子核和粒子间的作用中，引力是十分微小的，甚至可以忽略不计。其他三种相互作用中，强相互作用最强，它比电磁相互作用大100多倍。四种基本相互作用的相对强度、作用范围等特征的比较见表7-1。

① 强子是能直接参与强相互作用的粒子的统称。

表7-1　四种基本相互作用的比较

作用名称	产生作用的物体	相对强度	媒介	作用范围
强相互作用	强子（核子、介子等）	1	胶子	$<10^{-15}$ m
电磁相互作用	电荷	10^{-2}	γ光子	无限远
弱相互作用	大多数微观粒子	10^{-12}	$W^{\pm}$、Z^{0}	$<10^{-17}$ m
引力相互作用	一切有质量的物体	10^{-37}	引力子	无限远

（5）引力的线性叠加性

两个质点间的引力作用只与这两个质点有关，而与其他质点是否存在毫无关系，这就是我们通常所说的引力的独立作用原理，这一物理规律表明引力具有线性叠加性。并不是所有的力都具有线性叠加性，例如，强相互作用就没有这种性质。

（6）这种相互作用只有引力而没有斥力

我们知道，两个静止的点电荷之间存在着相互吸引或者相互排斥这两种作用，运动的电荷之间除了电力相互作用外，还有磁力相互作用。磁力实际上是电力的一种表现，或者说，磁力和电力具有同一本源。磁力也有相互吸引和相互排斥两种作用。强相互作用也有吸引和排斥两种作用。自然界的四种最基本的相互作用都随距离的增大而减弱，但它们随距离变化的关系却不大相同。强相互作用在粒子间的距离小于10^{-15} m时，彼此间的作用力很强，在四种相互作用力中占最主要的地位。正是由于这种作用力足以克服原子核内质子间的电磁斥力，把原子核内的质子和中子紧紧地束缚在一起，保持了原子核的稳定。这时强相互作用表现为引力。但当核子间的距离减小到大约4×10^{-16} m时，强相互作用就表现为斥力。但引力相互作用却只有吸引，没有排斥。

（7）既是保守力，又是有心力

万有引力是保守力，因此可以引入引力势能的概念，并用引力势来描述引力场。当物体仅在万有引力作用下运动时，系统的机械能守恒。同时，万有引力又是有心力，当物体仅在万有引力作用下运动时，系统的角动量守恒。

2. 引力问题在物理学中所占的地位

物理学形成一门独立的学科，成为自然科学的基础，是从经典力学开始的。在此之前，人类的文明史中虽有不少有关物理的、有价值的创造和发现，但并没有形成完整的理论体系，也就是说，还没有构成独立的物理学。16世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了迅速的发展。航海事业促进了天文观测，天体运行的大量精确的数据资料为揭示行星运动的规律奠定了基础。17世纪，牛顿总结了以开普勒、伽利略为代表的许多物理学家的研究成果，建立了牛顿运动定律和万有引力定律，标志着经典力学的诞生。牛顿建立的力学体系经过伯努利、拉格朗日、达朗贝尔等人的推广和完善，形成了系统的理论，得到了广泛的应用并进一步发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支，使经典力学成为自然科学中的主导和领先学科。

由此可以看出，有关引力问题的研究是物理学发展的一块重要的基石。

在牛顿力学创建以后，万有引力定律经受了实践的检验，取得了很大的成功。到19世纪，经典力学已经相当成熟，特别是海王星的发现，证明了牛顿引力理论的巨大威力，使人们坚信牛顿力学是不可动摇的。

在物理学蓬勃发展的过程中，有关引力问题的研究从来也没有停止过。20世纪初，爱因斯坦建立狭义相对论以后，深入探讨了引力问题，建立了广义相对论。广义相对论既是狭义相对论的发展，又是牛顿引力理论的发展。爱因斯坦证明了牛顿引力理论是广义相对论的一级近似，而广义相对论是更具有普遍意义的更完善的引力理论。爱因斯坦首先用它解释了用牛顿引力理论不能完全解释的水星轨道近日点进动问题。接着，他计算了太阳引力场对星光的弯曲，所得结果比用牛顿引力理论计算的结果大一倍，不过它与后来天文观测的结果非常接近。爱因斯坦在创建了现代引力理论后，又据此提出了新的宇宙模型，这标志着相对论宇宙学的诞生，也是现代宇宙学研究的开始。随着中子星的发现、3 K宇宙背景辐射的确认等一系列科学上的重大进展，现代引力理论及在此基础上建立起来的大爆炸宇宙模型得到了普遍的接受。近20年来，现代天文学在广义相对论的基础上得到了蓬勃发展。在基础理论方面，量子引力，大尺度时空的拓扑结构等都正在深入研究中。在这种背景下，广义相对论也自然地成了现代物理学中一门重要的基础学科。

可以看出，从牛顿万有引力定律，到爱因斯坦广义相对论，有关引力的理论，形成了物理学中理论发展的一条鲜明的主线。它既是一个古老的课题，又是前沿的领域；既是物理理论最早建立的基础，又是当今理论研究的焦点之一。

3. 重力加速度的变化

地球上某一地区的重力加速度与海拔高度、地理纬度、周围的地形地貌及地质结构等许多因素都有关系。根据万有引力定律可以推断出在地球表面附近重力加速度的大致变化规律，还可进一步根据重力加速度的异常探测矿藏、分析地质结构等。

（1）重力加速度与高度的关系

假定地球是一个质量均匀分布的球体，设质量为m的物体在距海平面高度为h处（$h \geq 0$），由于受到地球的万有引力而做自由落体运动，重力加速度为g，由于惯性质量与引力质量相等，故有

$$mg = G\frac{mm_{地}}{(R+h)^2} \tag{1}$$

式中$m_{地}$为地球质量，R为地球半径，G为万有引力常量。因而

$$g = \frac{Gm_{地}}{(R+h)^2} = \frac{Gm_{地}}{R^2}\left(1+\frac{h}{R}\right)^{-2} \tag{2}$$

由二项式定理有

$$\left(1+\frac{h}{R}\right)^{-2} = 1-\frac{2h}{R}+\frac{2h^2}{R^2}-\cdots$$

在地面附近，$h \ll R$，所以$\frac{h}{R}$的高次项可以忽略不计，于是得到

$$g=\frac{Gm_{地}}{R^2}\left(1-\frac{2h}{R}\right)=g_0\left(1-\frac{2h}{R}\right) \tag{3}$$

式中$g_0=\frac{Gm_{地}}{R^2}$为海平面处的重力加速度。上式表明，重力加速度随物体所在的位置距海平面的高度h的增大而减小。这种变化是非常缓慢的。例如，在世界最高的珠穆朗玛峰之巅，重力加速度比海平面处减小还不到千分之三。

在低于海平面的高度为h处，式（1）不再成立。这是由于质量均匀分布的球壳，对壳内质点的万有引力的合力为0。设质量为m的物体在低于海平面的竖直距离为h处，由于受地球的万有引力而做自由落体运动，重力加速度为g，则有

$$mg=G\frac{m_{地}m'}{(R-h)^2} \tag{4}$$

式中m'为半径为（$R-h$）的球体质量，如将地球看作质量均匀分布的球体，则

$$m'_{地}=\frac{4}{3}\pi(R-h)^3\times\frac{m_{地}}{\frac{4}{3}\pi R^3}=\frac{(R-h)^3}{R^3}m_{地} \tag{5}$$

将式（5）代入式（4）得

$$g=\frac{Gm_{地}}{R^2}\left(\frac{R-h}{R}\right)=\frac{Gm_{地}}{R^2}\left(1-\frac{h}{R}\right)=g_0\left(1-\frac{h}{R}\right) \tag{6}$$

式（6）表明在低于海平面处，重力加速度随距海平面的高度h的增大而减小。即离地心越近，重力加速度越小。在地心处，$h=R$，则$g=0$。设想如果将一个物体放在地心处，由于受到地球各方向的引力作用，其合力必为0，因此物体没有重力，重力加速度自然为0了。

（2）重力加速度与纬度的关系

在前面的讨论中，我们没有把物体受到地球的万有引力与物体的重力加以区分。但是严格说来，二者是有差别的。在实际测量中，测出物体自由落体的加速度g，就可以根据牛顿第二定律得知物体所受的力为$G=mg$，并把G称为物体所受的重力。如果把物体悬挂在弹簧测力计上，物体静止不动，根据牛顿第二定律就可得出，弹簧对物体的拉力F_N与重力平衡，二者大小相等，方向相反，因此物体的重力为$G=-F_N$；如果把物体放在地面或其他支持物上，那么地面的支持力F_N就和重力的大小相等。这样测量出来的重力并不是地球对物体的万有引力，故有时称为“表观重力”或“视重”。这是由于牛顿第二定律只适用于惯性参考系，而我们的测量是在固定于地面的参考系（有时称为“实验室参考系”）中进行的。由于地球在自转，固定于地面的参考系不是惯性参考系，而在非惯性系中要应用牛顿第二定律就必须考虑惯性力。真实力与惯性力的合力常称为表观力。

物体的重力G与物体所在处的纬度有关，它是物体所受地球的万有引力F和惯性离心力$F_{惯}$的矢量和。设在纬度为λ处，有一质量为m的物体静止在地面上。由于物体随地球一起以角速度ω绕地轴转动，所以物体受到的惯性离心力$F_{惯}$的方向如图7-5所示，大小为

$$F_{惯}=m\omega^2R\cos\lambda \tag{7}$$

式中R为地球半径，$R\cos\lambda$为物体绕地轴做圆周运动的半径，即图7-5中的r。物体受到地球的万有引力为F，方向指向地心。F和$F_{惯}$的合力

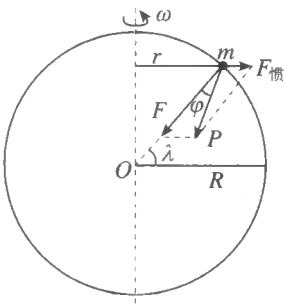


图7-5

就是物体的重力G。因此有[①]

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{F}_{惯} \tag{8}$$

实际上，惯性离心力$F_{惯}$比万有引力要小得多，它们的大小的比值为

$$\frac{F_{惯}}{F}=\frac{m\omega^2R\cos\lambda}{G\dfrac{mm_{地}}{R^2}}=\frac{\omega^2R}{g_0}\cos\lambda$$

式中$\omega=\dfrac{2\pi}{24\times3\,600}\ \mathrm{s}^{-1}=7.3\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$为地球自转的角速度，$g_0$为不受地球自转影响时的重力加速度。代入数值，得

$$\frac{F_{惯}}{F}=\frac{(7.3\times10^{-5})^2\times6.4\times10^6}{9.8}\cos\lambda\approx3.5\times10^{-3}\cos\lambda \tag{9}$$

可见$F_{惯}\ll F$。G的方向与F的方向之间的夹角φ实际上也很小。

根据余弦定理可得到

$$G=(F^2+F_{惯}{}^2-2FF_{惯}\cos\lambda)^{\frac{1}{2}}=F\left[1+\left(\frac{F_{惯}}{F}\right)^2-2\frac{F_{惯}}{F}\cos\lambda\right]^{\frac{1}{2}}$$

因为$F_{惯}\ll F$，所以$\left(\dfrac{F_{惯}}{F}\right)^2$可忽略不计，于是有

$$G=F\left(1-\frac{F_{惯}}{F}\cos\lambda\right)^{\frac{1}{2}}$$

利用二项式定理将上式展开，并略去$\dfrac{2F_{惯}}{F}\cos\lambda$的高次项，得

$$G=F\left(1-\frac{F_{惯}}{F}\cos\lambda\right)=F(1-0.003\,5\cos^2\lambda) \tag{10}$$

因而

$$g=\frac{G}{m}=\frac{F}{m_{地}}(1-0.003\,5\cos^2\lambda)=\frac{Gm_{地}}{R^2}(1-0.003\,5\cos^2\lambda) \tag{11}$$

式（11）反映了重力加速度g随地理纬度λ变化的规律，如果我们把地球看作质量均匀分布的球体，R与λ无关，则g随λ增大而增大，变化的原因就是由于地球自转造成在不同的纬度处，地面参考系的加速度不同。实际上，地球并不是圆球，而是更接近于椭球。如果将地球看作质量分布均匀的椭球，则式（11）中的R也与λ有关。由于R随λ增大而减小，同时考虑式中λ与R的变化，结论仍然是g随λ增大而增大。在赤道上，$\lambda=0$，且R最大，故g最小；在两极处，$\lambda=90°$，且R最小，故g最大；在其他地区，重力加速度介于上述二极值之间，g随λ增大而增大的变化是单调的。严格地说，地球也不是真正的椭球，且质量分布也不是均匀的，因此，实际上g随λ的变化规律还要复杂得多。

由图7-5可知，根据正弦定理，应有

$$\frac{F_{惯}}{\sin\varphi}=\frac{G}{\sin\lambda}$$

由于φ角很小，$\sin\varphi\approx\varphi$，得到重力$G$与万有引力$F$之间的夹角$\varphi$可表示为

$$\varphi=\frac{F_{惯}\sin\lambda}{G}=\frac{m\omega^2R\cos\lambda\sin\lambda}{mg}=\frac{\omega^2R\sin2\lambda}{2g} \tag{12}$$

① 此式为矢量式。

式（12）说明重力的方向与万有引力的方向之间的偏差也与物体所在处的纬度λ有关。在$\lambda=0$或$\lambda=90°$时，即在赤道和两极，$\varphi=0$，重力与万有引力的方向相同；而在$\lambda=45°$处，φ最大，其值为

$$\varphi_{\max}=\frac{\omega^2 R}{2g}=\frac{(7.3\times10^{-5})^2\times6.4\times10^6}{2\times9.8}\ \text{rad}\approx1.7\times10^{-3}\ \text{rad}\approx6'$$

（3）精密测量重力加速度的变化

重力加速度除了与高度和纬度有关之外，还受到地形地貌和地壳物质结构等因素的影响。例如，在地下埋藏有某种矿藏时，该地区的重力加速度就会明显异常。因此，利用现代化的精密仪器，准确地测量出重力加速度的微小变化，就可以探测地下的矿藏或地质结构的特点，这已成为现代地球物理勘探中非常有价值的手段，称为重力勘探。能够精密测量重力加速度变化的仪器是重差计。

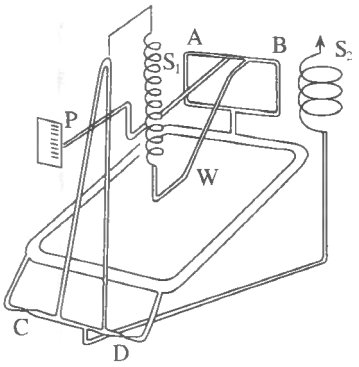


图7-6

图7-6是一种用熔凝石英制成的灵敏重差计的基本结构示意图，主要用来感受重力变化的是悬挂在支架AB和弹簧S_1之间的臂W。指针P和支架AB固连在一起，随W的平衡位置的微小变化而同步偏转，由刻度盘上即可直接显示重力加速度的变化。弹簧S_1的灵敏度极高，当W所受重力有微小变化时，S_1伸长的长度就会有改变，使W的平衡位置发生相应的改变。S_2是经校准过的用来调整读数零点的另一个弹簧。当重差计由某处移动到另一地点时，由于重力加速度的变化导致W的重力和平衡位置发生微小变化，这一变化还可以用更灵敏的光学方法或电学方法来测量。例如，把W做成某一调谐电路的一部分，当W的位置变化时就会引起调谐回路的电容发生变化，因而固有频率发生变化，我们可以精确地测量回路的频率，从而得知重力加速度变化的数值。用这种方法测量的精度可达10^{-8}，即只要重力加速度变化$10^{-7}\ \text{m/s}^2$，仪器就能显示出来，这相当于在地球表面上高度变化约3 cm时所引起的重力加速度的变化。

目前实际应用的重差计几乎都是静态的。如果把重差计与计算机连接，连续改变重差计的位置，就可以由计算机直接绘制出类似于等高线那样的等重力线，为进一步分析地下的矿藏或地质结构提供数据和图像。

4. 引力常量的实验测定

（1）卡文迪什实验（扭秤平衡法）

引力常量是第一个用物理实验的方法在实验中测得的基本物理常量。由于缺乏灵敏度足够高的测量工具，牛顿当时只验证了引力常量的普适性，但没有能够测量出它的数值。在万有引力定律发表大约一百年后，英国的米切尔首先设计了一种专门用来进行引力实验的仪器，称为扭秤。这个装置的特点是通过测量微小的扭转角度，以显示微弱的引力，从而使在实验室中测定引力常量成为可能。这是米切尔的贡献，但他并没有亲自做过测定引力常量的实验，因为在扭秤还没有制造完成时，他就去世了。

1798年，卓越的英国物理学家卡文迪什在米切尔的基础上完成了扭秤的制作，而且作了

重要的改进。由于扭秤悬丝的扭转角度非常微小，一般不易直接观察出来，更难以比较准确地量度，卡文迪什在悬丝上附加一平面镜，镜面随悬丝的扭动而偏转，偏转角可用光学方法加以显示，就能测得比较准确。卡文迪什用改进后的扭秤完成了历史上第一个测定引力常量的实验。他的实验装置如图7-7所示。将两个直径约2英寸、质量均为m的小铅球，固定在一根长l约为6英尺的木杆两端，用一根长约3英尺的镀银铜丝通过杆的中心将木杆水平悬挂起来，在悬丝上固定一小平面镜。将另外两个直径约为12英寸、质量均为m'的大铅球，分别放在两个小铅球附近，使每一对大、小铅球中心间的距离均为d、中心连线与木杆垂直、球心均在同一水平面内。用细光束照射悬丝上的小平面镜并反射到带有刻度的标尺上，当悬丝扭转时，其偏转角α可由反射光照在标尺上位置的变化求得。

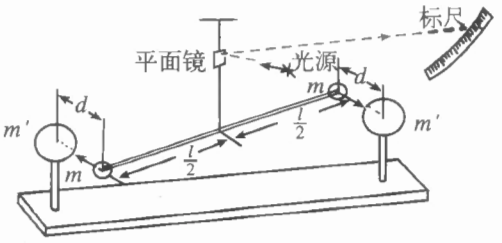


图7-7

由于大、小铅球间的引力作用，木杆将受到引力产生的力矩，使杆以悬丝为轴转动。杆的转动使悬丝发生扭转形变，因而产生阻碍杆转动的弹性恢复力矩，当两个力矩相等时达到平衡，这时悬丝上的小平面镜相对于没有放大铅球时的位置偏转了α角。根据万有引力定律

$$l \cdot G\frac{mm'}{d^2}=K\alpha \tag{1}$$

式中K为悬丝扭转单位角度时所产生的力矩，称为扭转系数，其数值可由杆（包括两个小铅球）的转动惯量I和振动周期T求出。方法是先将大铅球移开，使其不影响杆的自由振动。以悬丝为轴水平扭转木杆，设角位移为θ，这时悬丝对木杆施加力矩$-K\theta$（负号表示力矩的方向与形变的方向相反），木杆产生角加速度$\frac{\mathrm{d}^2\theta'}{\mathrm{d}t^2}$，由刚体动力学规律可知

$$I\frac{\mathrm{d}^2\theta'}{\mathrm{d}t^2}=-K\theta \quad 或 \quad \frac{\mathrm{d}^2\theta'}{\mathrm{d}t^2}+\frac{K}{I}\theta=0 \tag{2}$$

（2）式表明，在悬丝的弹性力矩作用下，木杆的运动为简谐振动，其振动的角频率为$\omega=\sqrt{\frac{K}{I}}$，因而周期为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \tag{3}$$

得到

$$K=\frac{4\pi^2 I}{T^2} \tag{4}$$

将（4）式代入（1）式，得到

$$G=\frac{4\pi^2 d^2 I\alpha}{mm'T^2 l}$$

式中右端均为可以直接测量或计算得到的量，从而可以准确地推算出G的数值。卡文迪什的实验开始于1797年夏，于1798年完成。他当时测得的结果，经过单位换算后所得的数值为

$$G=(6.754\pm0.041)\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$$

在当时的技术条件下能测得这样精确的结果，是十分难能可贵的。

卡文迪什实验开启了测量引力常量的历史行程，奠定了实验基础。两百多年来，人们采用

各种不同的方法来更加精确地测定引力常量，在公开发表的文献中对引力常量的测定已超过200次。其中有的从测量技术上对卡文迪什所用的扭秤偏转法作了改进；有的又设计出了新的实验装置和方法。下面仅对其中比较成功的方法作一些简要的介绍。

（2）天平法

在一架精密的天平两盘中各放质量为m的物体，达到平衡。如果将质量为m'的一个大物体放在天平一侧质量为m的物体下面，由于m与m'间的引力作用将破坏原来的平衡状态，必须在另一侧盘中增加质量为Δm的小砝码才能使天平恢复平衡。根据Δm及其他天平的有关参数就可以计算出引力常量G的数值。这一方法最早于1891年被英国的坡印亭所采用，但20世纪以来已经很少为人们所用了。

（3）扭秤周期法

这种方法的原理是根据扭秤的摆动周期在引力的作用下会发生变化。在图7-7中，若将两个质量为m'的大铅球放在木杆的延长线上，使m与m'中心连线沿杆的方向，则扭秤的摆动周期将会缩短；若将m'放在垂直于杆的位置上，使m与m'中心连线与杆垂直，则扭秤的摆动周期将会增大。由两次摆动周期的差值及其他有关参量可以计算出引力常量G的数值。这种方法在历史上曾多次被人们采用过。

（4）扭秤共振法

把图7-7中两个质量为m'的大铅球也用一杆连接作为一扭秤悬挂起来，形成两个扭摆系统，其中一个扭摆的质量大，另一个扭摆的质量小。当m'摆动时，由于引力的作用也将引起m摆动。当调节两个扭摆的参量，使二者的周期相等时，可以证明m摆与m'摆的振幅之比是正比于G的。因而，由摆的振幅即可求出引力常量G。

除以上几种方法外，还有许多其他方法，如加速度法等，就不再一一列举了。到目前为止，在我们已知道的自然界的基本常量中，引力常量仍然是测得最不精确、了解最少的一个。原因是实验很难做，一方面引力是四种基本相互作用中最弱的一种，另一方面引力是万有的，不能屏蔽，这就意味着干扰很多，不容易排除。

（5）G值的确定

为了促进全球各个研究领域对提高科技数据的有用性和有效性进行合作，国际科学联合会于1969年成立了国际科技数据委员会（CODATA），并一直致力于基本物理学常数的评估工作。CODATA于1973年根据Heyl等人的测量结果给出了第一个万有引力常数G值的推荐值，并分别于之后的1986年、1998年、2002年、2006年、2010年和2014年汇总世界上各个实验组的G值测量结果并给出推荐值。

国际科技数据委员会2014年后推荐的G值为$(6.674\ 08 \pm 0.000\ 31) \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$，相对不确定度为47 ppm。推荐的$G$值由收录的14个实验室给出的$G$值确定，其中精度好于50 ppm的有8个。

我国华中科技大学引力中心团队于2009年测得G值的不确定度为26 ppm，是当时采用周期法给出的最高精度的结果，被CODATA收录并被命名为HUST-09。2009年之后，该团队历时十年采取两种方法——扭秤周期法和扭秤角加速度反馈法，进行万有引力常数G的测量，每种方法均给出了当时国际上最高精度的实验室G值，不确定度均达到0.001 16%。该成果入选2018年中

国高等学校十大科技进展项目、2018年中国十大科技进展新闻和2018年度中国科学十大进展。

5. 惯性质量与引力质量

（1）惯性质量及其测量

我们先来分析一下惯性质量概念建立的逻辑过程。

牛顿第一运动定律指出，一切物体都有惯性，力是改变物体运动状态，即产生加速度的原因。这里已经给出了力的定义，但只是定性的。为了确定力和加速度之间的定量关系，必须先规定力的量度方法，制作出测力的仪器，然后用实验测量出力和加速度的数值，找出它们之间的关系。为此，先任意选定一个物体作为标准物体，并规定，标准物体所受作用力的方向与所产生的加速度的方向相同，标准物体所受作用力F的大小与所产生的加速度a的大小成正比。于是，对于标准物体，有

$$F \propto a \text{（标准物体）} \tag{1}$$

然后再规定，当标准物体的加速度大小为a_0时，所受力的大小为一个单位，可称为“单位力”。根据这样的规定，我们就可以用标准物体的加速度来定量地确定作用在标准物体上的任何作用力了。例如，当标准物体产生的加速度为a_1时，它所受的作用力为$F_1 = a_1/a_0$单位力。

上述规定虽然能量度作用在标准物体上的力，但还不能量度作用在非标准物体上的力。为了测量作用在任何物体上的力，我们可以借助物体其他的特性来制作一个测力计。例如，利用弹簧受力会发生弹性形变的特性，用弹簧的伸长或缩短来测力。先把弹簧与标准物体连接，然后拉弹簧使其伸长Δl_1，这时便有弹性力F_1作用在标准物体上，使之产生加速度a_1，由a_1的大小和$F_1 = a_1/a_0$单位力可得出F_1的大小，F_1就是弹簧伸长为Δl_1时所产生的弹性作用力。用这种方法可以得出一系列Δl_i与弹力F_i之间的对应关系（$i = 1, 2, 3, \cdots$），以F_i作为刻度就成为一个经过标定的弹簧测力计，用它可以测出任何物体所受作用力的大小。

解决了力的量度问题以后，就可以通过实验来确定加速度与力的关系。大量实验结果表明，对任何物体，它所受的作用力F都与由此力引起的加速度a成正比，因此可将（1）式推广到任何物体，即

$$F \propto a \text{（任何物体）} \tag{2}$$

（1）式只适用于标准物体，并且这种正比例关系是人为规定的；而（2）式则适用于任何物体，而且这一正比例关系是实验结果，不是从（1）式导出来的。

通过对实验数据的分析发现，以相同的力作用在不同的物体上，它们所产生的加速度不同。这表明物体的加速度不仅与外加的作用力有关，而且与物体本身的性质——惯性有关。加速度较大的物体，反映出它的运动状态比较容易改变，也就是说惯性较小；加速度较小的物体，反映出它的运动状态相对来说不容易改变，也就意味着其惯性较大。为了定量地描述物体惯性的大小，我们引入惯性质量的概念，并规定每个物体的惯性质量的大小与它们在相等外力作用下所获得的加速度的大小成反比。如果用$m_{惯}$表示惯性质量，则有

$$m_{惯} \propto \frac{1}{a} \tag{3}$$

为了对惯性质量赋予定量的数值，同样需要先选定一个标准物体，规定它的惯性质量为一个单

位，可称为“惯性质量单位”。这样，就可以用相等的力分别作用在标准物体和另一个待测物体上，测出二者的加速度之比，从而确定待测物体的惯性质量。实验证明，当外力的大小改变时，尽管标准物体和待测物体的加速度的大小都随之改变，但二者的比值却是恒量。这一方面说明，惯性质量是由物体本身的性质所决定的，与外力无关；另一方面也说明加速度与惯性质量成反比的关系是具有普遍性的客观规律。

在物理教学中，引入一个新的物理概念时，往往直接给出概念的定义，很少涉及建立这一概念的前因后果。造成这种现象既有客观上的原因，如教材篇幅的限制、课堂教学时间少与教学内容多的矛盾等；又有主观上的原因，如有的教师把教学目的限定在使学生掌握概念的定义上。从提高教师自身的科学素质的角度考虑，教师应首先理解概念提出的逻辑系统，然后根据学生的接受能力，用通俗的语言作适当的介绍，做到既不失科学、严密，又能深入浅出。在教学中注意培养学生的科学思维能力，其意义并不亚于掌握概念本身的定义。从前面的分析可以看出，在惯性质量这一概念的背后，竟有如此严密的逻辑体系，这里，既体现了逻辑思维和科学推理的过程，又展示了严密的科学体系和研究方法。

前面介绍的测定物体惯性质量的方法，在操作上有一定的困难，因为在实验中直接测量物体运动的加速度，不容易测得很准确。下面介绍一种专为测量物体的惯性质量而设计的仪器，叫做惯性秤。其构造如图7-8所示。图中1是两个完全相同的弹簧片，两端分别固定在两个托盘上，其中一个托盘用固定支架5固定在桌面上，另一个托盘2沿水平方向伸出桌面外，成为秤的自由端。将被测物体用螺栓固定在自由端托盘2上。将此自由端沿水平方向拨动一小段距离然后放开，由于弹簧片的弹性恢复力的作用，自由端托盘与被测物体一起做周期性振动。被测物体同时受到重力和弹性恢复力的作用，但由于重力始终垂直于物体的运动方向，而且又与托盘施加的支持力相互平衡，所以重力对物体的振动没有影响，相当于物体仅受弹性恢复力的作用。由牛顿第二定律可知，物体的惯性质量越大，在受到同样大小的弹性恢复力作用时，其加速度就越小。由实验得知，在弹簧片的长度和自由端托盘拨离平衡位置的距离一定时，其振动的周期T的平方与加速度a成反比，即

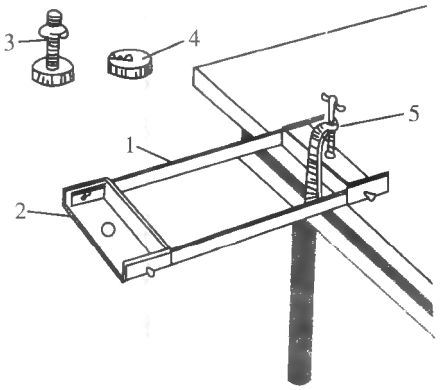


图7-8　惯性秤装置示意图
1-弹簧片；2-自由端托盘；
3-固定被测物体用的固定螺栓；
4-被测物体；5-惯性秤固定支架

$$T^2 \propto \frac{1}{a} \tag{4}$$

由（3）式和（4）式可知

$$m_{惯} \propto T^2 \tag{5}$$

这样，就可以根据被测物体在惯性秤上的振动周期与被选为惯性质量单位的物体的振动周期之比来确定被测物体的惯性质量。

（2）引力质量及其测量

下面我们再来分析引力质量的概念是怎样建立的。

从万有引力定律可知，任何一个物体都会对其他物体产生引力作用，因此，任何物体都是一个引力源；同时，任何物体也都会受到其他物体对它产生的引力作用，因此，任何物体也都是一个引力接受者。如果把两个质点间的引力作用规律与两个静止的点电荷间的电力作用规律进行类比，就会发现二者有许多相似之处。在电学中，我们把产生静电力的源称为“电荷”，把一个带电体所具有的“电荷”的多少称为它所带的“电荷量”。1785年，法国物理学家库仑通过对实验结果的分析，总结出如下的规律，称为库仑定律：真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力F的大小与它们所带电荷量q_1、q_2的乘积成正比，与它们之间的距离r的二次方成反比。用数学公式可表示为

$$F=k\frac{q_1q_1}{r^2} \tag{6}$$

式中k为比例系数，称为静电力常量。

为了概念上清晰起见，仿照产生静电力的源称为“电荷”，我们不妨将产生引力的源称为“引力荷”。这样，我们就可以认为，两个带电体之间存在静电力作用，是因为它们各自都具有一定数量的“电荷”；同样，两个物体之间存在引力，也是因为它们各自都具有一定数量的“引力荷”。为了定量地反映物体间产生引力的能力的强弱，应当对“引力荷”赋予数值的意义，把一个物体具有“引力荷”的多少称为“引力质量”。一个物体的引力质量大，就表示它具有的“引力荷”多，它产生或接受引力作用的能力就强；反之，物体的引力质量小，就表示它具有的“引力荷”少，它产生或接受引力作用的能力就弱。所以，引力质量是反映一个物体引力性质强弱的物理量。

测量物体引力质量的方法是直接比较待测物体和标准物体所受地球的引力。在待测物体和标准物体都与地球保持相等的距离时，如果二者受到地球的引力相等，那么待测物体的引力质量也与标准物体的引力质量相等。为此，先要选定一个标准物体，规定它的引力质量为一个单位，可称为“引力质量单位”。测量引力质量大小的量具是天平，天平是根据杠杆原理制成的。天平的种类很多，实验室中常用的是等臂天平。将待测物体放在天平的左盘中，在天平的右盘中放适当的、引力质量已知的若干个砝码，当地球对待测物体的引力与地球对右盘中全部砝码的引力之和相等时，天平达到平衡。此时，待测物体的引力质量就等于右盘中全部砝码的引力质量的总和，日常生活和生产中所用的台秤、磅秤、杆秤等都相当于不等臂天平。杆秤利用引力质量固定的秤砣在秤杆上移动，调节力臂的大小，使杆秤达到平衡。

综上所述，我们可以看出，引力质量与惯性质量是两个各自独立的物理概念。它们都反映物体的某种性质，前者反映的是产生和接受引力作用强弱的本领；后者反映的是惯性的大小。而这两种性质又是各自独立的，从经典物理学的观点看是互不相干的、没有联系的。

（3）惯性质量与引力质量的关系

在前面介绍万有引力定律建立的历史过程时，我们曾经认为太阳对行星的引力是行星绕太阳运动、产生向心加速度的原因，这时只考虑了太阳对行星的引力；在分析月球绕地球的运动时，认为地球对它的引力是使月球绕地球运动、产生向心加速度的原因，这时只考虑了地球对月球的引力。实际上，这样的分析是不严格的，因为月球不仅受地球的引力作用，而且同时也要受太阳的引力作用。有人认为，太阳与月球的距离远大于地球与月球的距离，因此太阳对月球的引力远小于地球对月球的引力，二者相比，可以忽略太阳对月球的引力。果真如此吗？我们只

要通过粗略的计算就可以得出结论。根据现在已知的数据，太阳的质量约为$m_{太}=1.99\times10^{30}$ kg，地球的质量约为$m_{地}=5.98\times10^{24}$ kg，月球的质量约为$m_{月}=7.35\times10^{22}$ kg，太阳与月球的平均距离约为$r_{月太}=1.50\times10^{11}$ m，地球与月球的距离约为$r_{月地}=3.84\times10^{8}$ m，取引力常量$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$。得到太阳对月球的引力$F_{月太}$约为

$$F_{月太}=G\frac{m_{月}m_{太}}{r_{月太}^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.35\times10^{22}\times1.99\times10^{30}}{(1.50\times10^{11})^2}\ \mathrm{N}=4.3\times10^{20}\ \mathrm{N}$$

地球对月球的引力$F_{月地}$约为

$$F_{月地}=G\frac{m_{月}m_{地}}{r_{月地}^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.35\times10^{22}\times5.98\times10^{24}}{(3.84\times10^{8})^2}\ \mathrm{N}=1.99\times10^{20}\ \mathrm{N}$$

二者相比，不但数量级相等，而且太阳对月球的引力还大于地球对月球的引力。可见太阳对月球的引力不能作为小量加以忽略，上述说法明显是错误的。

为什么只考虑地球对月球的引力，而没有考虑太阳对月球的引力作用，仍能得出正确的结果呢？原因在于太阳对月球的作用效果与太阳对地球的作用效果是完全一样的。这就是说，假如地球和月球之间没有引力作用，那么，在太阳引力作用下，地球和月球的轨道完全一样，在地球上来看，月球和地球的相对位置始终保持不变，好像根本不存在太阳的作用一样。因此，当我们研究地球和月球的相互关系时，可以不考虑太阳的作用，而只要考虑地球和月球之间的相互作用就可以了。

上面所说的“作用效果完全一样”，用数学的语言来表述，就是地球绕太阳运动的线速度$v_{地}$与月球绕太阳运动的线速度$v_{月}$相等，即$v_{地}=v_{月}$。由牛顿运动定律可知

$$G\frac{(m_{月})_{引}(m_{太})_{引}}{r^2}=(m_{月})_{惯}\frac{v_{月}^2}{r}\tag{7}$$

$$G\frac{(m_{地})_{引}(m_{太})_{引}}{r^2}=(m_{地})_{惯}\frac{v_{地}^2}{r}\tag{8}$$

在上面两式中，r为太阳与月球的平均距离，也等于太阳与地球的平均距离；两式等号左端的质量都是引力质量，等号右端的质量则是惯性质量，我们在括号外以下标“引”表示引力质量，下标“惯”表示惯性质量。

由（7）式和（8）式可知，要求$v_{地}=v_{月}$，则必然存在着下列关系，即

$$\frac{(m_{月})_{惯}}{(m_{月})_{引}}=\frac{(m_{地})_{惯}}{(m_{地})_{引}}\tag{9}$$

（9）式就是我们在研究地球与月球关系时可以不考虑太阳作用的根据，把上述论证加以推广，对任何物体A和B，都有

$$\frac{(m_A)_{惯}}{(m_A)_{引}}=\frac{(m_B)_{惯}}{(m_B)_{引}}\tag{10}$$

因此，对任一物体，它的惯性质量与引力质量之比都应等于一个常量，这一常量与物体本身的性质无关，为普适常量。这样，我们可以去掉下标A、B，写成

$$\frac{m_{惯}}{m_{引}}=\text{普适常量}\tag{11}$$

只要选择适当的单位，总可以使这个普适常量为1。例如，规定惯性质量和引力质量的单位都是千克，则有

$$m_{惯}=m_{引} \tag{12}$$

6. 地球同步卫星的发射与椭圆转移轨道

发射人造地球卫星的运载火箭一般为三级，其发射后的飞行过程大致包括垂直起飞、转弯飞行和进入轨道这样三个阶段，如图7-9所示。

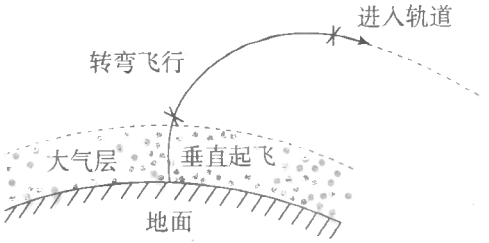


图7-9

由于在地球表面附近大气稠密，对火箭的阻力很大，为了尽快离开大气层，通常采用垂直向上发射（垂直发射的另一个优点是容易保持飞行的稳定性）。到第一级火箭脱离时，火箭已穿出稠密的大气层。此后第二级火箭点火继续加速。当第二级火箭脱离后，火箭已具有足够大的速度，这时第三级火箭并不立即点火，而是靠已获得的巨大速度继续升高，并在地面控制站的操纵下，使火箭逐渐转弯而偏离原来的竖直方向，直至变为与地面平行的水平方向。当火箭到达与预定轨道相切的位置时，第三级火箭点火，火箭继续加速达到卫星在其轨道上运行所需的速度而进入轨道。至此，火箭已完成了其运载任务，随即与卫星脱离。刚脱离时，卫星与第三级火箭具有相同的速度并沿同一轨道运动。由于在卫星轨道处仍有稀薄气体存在，而卫星与火箭的外形不同，致使两者所受阻力不同，因而两者的距离逐渐拉开。此后，一般卫星将按预定计划沿椭圆轨道运行，火箭则在落回地球时与稠密的大气层摩擦而烧毁。

地球同步卫星的轨道平面与地球赤道平面重合，绕地球一周所需的时间与地球自转周期严格相等，为$T=23\ \mathrm{h}\ 56\ \mathrm{min}\ 4\ \mathrm{s}$。这样，每隔24 h，地球与同步卫星一起转过一圈再加上在地球公转轨道上（绕太阳）转过360°的1/365。所以从地面上看，卫星好像是静止在赤道上空某点的正上方固定不动，因此称为地球轨道静止同步卫星，简称地球同步卫星或同步卫星。

同步卫星轨道离地面的高度h和运行速度v可由匀速圆周运动的规律求出。设地球质量为$m_{地}$、半径为R、自转周期为T，卫星的质量为m，则有

$$G\frac{m_{地}m}{(R+h)^2}=m\frac{v^2}{R+h} \quad 和 \quad T=\frac{2\pi(R+h)}{v}$$

由以上两式解出v和h，并代入已知数据$m_{地}$、T、R和G，得

$$h=\left(\frac{Gm_{地}T^2}{4\pi^2}\right)^{1/3}-R=3.578\,6\times10^7\ \mathrm{m}$$

$$v=\left(\frac{Gm_{地}}{R+h}\right)^{1/2}=3.075\times10^3\ \mathrm{m/s}$$

这表明同步卫星的轨道半径和运行速度都是严格确定的，因此，发射同步卫星时的精度要比一般卫星高得多。

发射同步卫星通常采用一个椭圆形的中间转移轨道作为过渡。卫星可在地面上任何地点发射。首先由运载火箭的第一级和第二级依次启动，使火箭垂直向上加速。到第二级火箭脱离后，转弯进入一个高度较低的圆形轨道作短暂停泊，这一轨道称为初始轨道或停泊轨道。在此轨道上运行少许时间后，第三级火箭点火，使装有远地点发动机的卫星进入一个椭圆形的轨道，称为转移轨道，又叫霍曼轨道。该轨道所在平面与赤道平面的夹角因发射地点不同而异，但椭圆的远

地点和近地点都在赤道平面内，远地点与同步轨道相交，如图7-10所示。进入转移轨道后，卫星与第三级火箭脱离，同时启动卫星两侧的切向喷嘴，使卫星开始自旋。在转移轨道上绕行几圈的过程中，地面控制站要对卫星的姿态进行调整。当卫星到达转移轨道的远地点时，启动卫星上的远地点发动机，使它改变航向，进入地球赤道平面；同时加速卫星，使之达到在同步轨道上运行所需的速度。然后还需对卫星的姿态作进一步调整，这样才能准确地把卫星定点在赤道上空的同步轨道上。

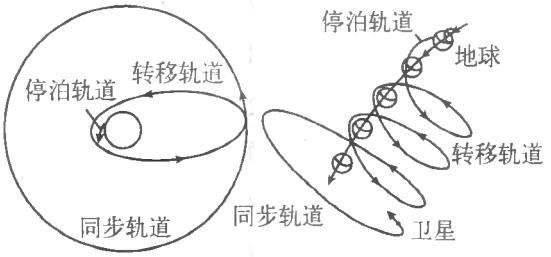


图7-10

椭圆转移轨道不仅用于发射地球同步卫星，而且可用于各种航天器的轨道转移。

7. 潮汐作用

（1）对潮汐现象的解释

在万有引力定律发现之前，虽经伽利略等人的探索，潮汐现象始终是个不解之谜。牛顿首先应用万有引力定律对白昼的潮和半月一次的大潮作了解释，他认识到月球和较小范围内的其他天体会对海洋中的最近部分有吸引力，这是引起涨潮的原因。

我们以太阳所引起的潮汐作用为例，来说明万有引力对潮汐现象的解释。我们以地球中心O为原点，以指向太空的任一固定方向为坐标轴的参考系来考察地球表面上覆盖的海水的受力情况。地球是一个做加速运动的非惯性参考系，其加速度就是地球中心绕太阳公转的向心加速度，方向指向太阳，大小为$a=\frac{Gm_{太}}{r^2}$，$m_{太}$为太阳的质量，r为地球中心与太阳中心的距离。

假设在地球的固态物质的表面上覆盖着一层海水，在海洋中的A、B、C、D四点处各取质量相等的海水，我们来考察位于这四点处的质量为m的海水的受力情况，如图7-11甲所示。忽略地球自转对海水的粘滞力，在A点处，质量为m的海水受太阳的引力$F_A=G\frac{mm_{太}}{r_A^2}$和惯性力$F_{A惯}=-ma=-G\frac{mm_{太}}{r^2}$，两者方向相反。由于$A$点到太阳中心的距离$r_A=r-R<r$（$R$为地球半径），所以$|F_A|>|F_{A惯}|$，合力$F_A'$的方向与$F_A$相同，使$A$点处的海水受到向左的合力。

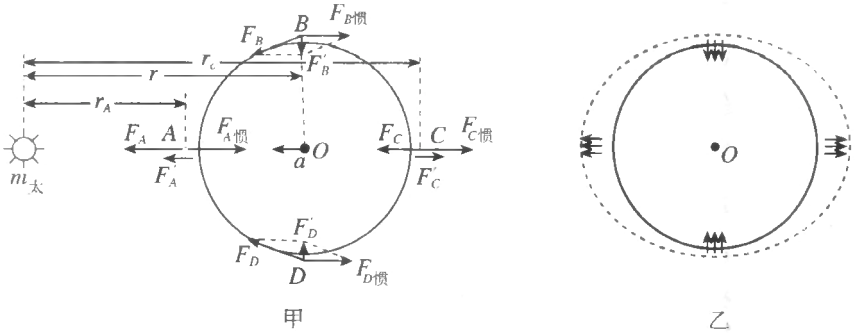


图7-11

C点处的情况与A点相反，$|F_C|<|F_{C惯}|$，使C点处的海水受到向右的合力F_C'。

在B点处，由于$r_B\approx r$，海水所受引力F_B与惯性力$F_{B惯}$的大小几乎相等（严格说来，r_B略大

于r，F_B略小于$F_{B惯}$），但F_B与$F_{B惯}$的方向略有差异，不在同一条直线上，故二者的合力F_B'方向向下，但合力的大小比A、C两点处合力的大小要小。

D点的情况与B点处相似，合力F_C'的方向向上。

从以上四个特殊点的情况不难看出，地球表面各点的海水所受的合力的大致分布如图7-11乙所示。在地球对海水的重力和太阳引力与惯性力的合力的共同作用下，最后使海水表面呈现图中虚线所示的形状，使A、C两处附近的海水“上涨”，海面隆起，周围的海水向这一区域流动，形成潮流。

在上面的讨论中我们没有涉及月球的引力作用。实际上，由于月球离地球远比太阳离地球要近得多，因此由于地球半径这一距离的差所造成的月球对海水的引力与惯性力之和形成的引起潮汐的作用力（通常称为引潮力或潮汐力），要比太阳引起的潮汐作用力更大，效应更明显。由于地球自转的缘故，涨潮的位置并不是在月球或太阳的正下方，而是在看到月亮或太阳越过头顶之后的某个时刻才会遇到海水中某处的潮。当地球自转一周时，地球上除两极以外的任一点都会两度遇到海面的涨落变化。另一次潮大约发生在12小时之后，即潮汐现象同时发生在地球的两对面，或者说，一昼夜内每个地方都有两次涨潮和落潮。

由于太阳、月球和地球的中心每月有两次几乎在同一条直线上（分别在新月和满月时），所以太阳和月球的引潮力也在同一直线上，这两个力合在一起产生了最强的潮汐作用，称为大潮。大潮每半个月发生一次，在两次大潮之间，太阳和月球的潮汐作用可以部分抵消，形成小潮。

潮汐现象的确切形态在很大程度上取决于海岸线和海洋底部的地形。因此，在海边实际观察到的大小潮并不一定准确地在朔日（农历初一）和望日（农历十五），而会出现滞后现象。例如，在我国沿海的大潮多发生于农历初三和农历十八。在喇叭形海湾或河口湾中，潮流可以激起怒潮。我国的钱塘江口、亚洲的波斯湾、南美的麦哲伦海峡和北美的芬地湾都以潮高著名。钱塘江口和波斯湾潮高可达10 m，麦哲伦海峡和芬地湾潮高超过20 m。

潮汐现象对一些河流和港口的航运具有重要意义。大型船舶可利用涨潮进出河流和港口。此外，潮流还可用以发电，包括我国在内的不少国家都已建成潮汐电站。

地球的固体部分也同海水一样受到月球或太阳产生的引潮力，所以也有类似于海水的潮汐现象，不过十分微弱，称为固体潮。在精密的天文观测及精确的实验中必须考虑这种现象。

（2）潮汐摩擦对地球自转的影响

前面提到，由于地球的自转，涨潮的位置并不是在月球或太阳的正下方，并指出月球的潮汐作用比太阳大得多。现在我们以月球的潮汐作用为例，来讨论潮汐作用对地球自转的影响。

我们在以地球中心为原点，并与地球一起自转的参考系上来考察月球产生的潮汐现象。在这一参照系中，月球的视运动是绕地球自东向西旋转，如图7-12所示（图中月球顺时针旋转）。由于月球绕地球旋转的方向与地球自转的方向基本相同，在现在的参考系中，月球绕地球运行一周的时间略大于一天。月球对海水的潮汐力使海水在向着月球和背着月球的两处隆起，使水面成图中虚线所示的形状。这两处隆起的部分跟随月球一起旋转，这就是每天两次的潮汐现象形成的原因，两次潮汐之间相隔约12小时。但是由于水的粘滞作用，使隆起部分的旋转运动比原来预期的要落后一段时间，结果就使海面的实际形状如图中的实线所示。两隆起部分A、B的连线与地、月中心连线不相一致，隆起部分跟随月球的旋转运动与其余海水跟随地球自转的运动不相一致，

这必然会引起海水内部的摩擦损耗。这种摩擦损耗最终将使地球自转的能量减少，从而使地球自转速率减慢。

从角动量的观点来看，由于隆起部分A比B离月球更近，使月球对这两部分的引力大小不同，而有$F_A > F_B$。又因为隆起部分在运动上的时间滞后，使A、B连线与地、月中心连线不相重合，于是F_A与F_B对地球中心产生的力矩大小不等，最终有一个顺时针方向的净力矩作用在地球（包括海水）体系上，这一力矩使地球的自转角动量减少，自转速率减慢。与此同时，F_B和F_B的反作用力F_A'和F_B'均作用在月球上，它们的合力对月球施加一逆时针方向的净力矩，此力矩使月球相对于地—月体系质心C的角动量增大，以保持地—月体系的总角动量守恒。这一效应的实际效果是地球上每一天的时间间隔持续增大，即日长增长；同时月球与地球间的距离将因此缓慢增加。

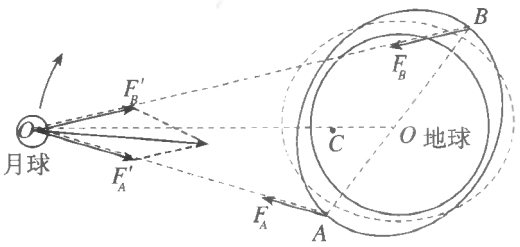


图7-12

日长的持续增长虽然是十分微小的（其数量级为每100年增加几毫秒），但这种变化的积累已被精确的测量（与铯钟比较）所证实，而且与古代的日食记录及珊瑚化石的生长环数目相一致。天文学家发现，两千年前古人记录的日食发生的时间，要比根据日长不变所推算的早大约3小时。由此推算地球自转速率从古代到现在正逐渐变慢，使日长平均每100年增长1.6毫秒。如果按这一减慢效应速率推算到更长的时间跨度上，则距今3.5亿年以前的泥盆纪，一年的天数约达400天，这与泥盆纪珊瑚化石的生长环的数目相符（珊瑚的生长环每一天长一环）。

8. 冥王星是矮行星

2006年8月在布拉格举行的国际天文联合会第26届大会上，与会代表投票决定太阳系的八大行星为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星，并将冥王星划入矮行星的行列。

按以前的认识，人们对大行星的定义是：在轨道上绕太阳运动，质量不超过木星质量的50倍，不能自身发光而只能反射太阳光的天体。这个定义并未对大行星的质量、大小规定下限。冥王星的直径只有2 300 km，是月球的2/3，质量是地球的3‰。如果将接近这一大小和质量的行星都称作大行星的话，2004年发现的塞德娜直径为1 700 km，接近冥王星。2005年美国天文学家布朗发现的2003UB313，直径约2 400 km，难怪布朗称他发现了太阳系第十大行星。另外，直径在1 000 km左右的还有不少。照此下去，新发现的大行星会不断增加，还存在着将原来归入小行星的“大个子”升格为大行星的可能。

天体质量决定着恒星的分类、恒星的演化和最终归宿。一个天体的质量如果大于木星质量的50倍，将会成为本身能发光的恒星。如果天体的质量足够大，它将由于自身引力大而演化为一个球形天体，不是挤走就是吸收了在它轨道上的其他天体，从而可以形成自己独立的轨道。冥王星由于质量太小，它的轨道与海王星轨道交叉，没有形成自己独立的绕日运行轨道，故归类于矮行星。矮行星并未改变它围绕太阳旋转，受太阳引力制约的性质，只是表明其影响力不能与其他行星相比。

第八章

机械能守恒定律

课程标准的要求

2.1.1　理解功和功率。了解生产生活中常见机械的功率大小及其意义。

2.1.2　理解动能和动能定理。能用动能定理解释生产生活中的现象。

2.1.3　理解重力势能，知道重力势能的变化与重力做功的关系。定性了解弹性势能。

2.1.4　通过实验，验证机械能守恒定律。理解机械能守恒定律，体会守恒观念对认识物理规律的重要性。能用机械能守恒定律分析生产生活中的有关问题。

一、本章教材概述

本章是必修力学部分的最后一章，讲述功和能的概念，以及动能定理和机械能守恒定律。这一章可视为牛顿力学的进一步展开，在牛顿运动定律的基础上，通过引入功和能的概念，得出有关机械能的规律，特别是机械能守恒定律，使学生对自然的认识更加深入，为解决力学问题开辟了新的途径。因此，这一章是力学部分的重点章。

相对于2014年版高中物理教材，新教材在内容编排上做了一些调整。

2014年版教材将“追寻守恒量”放到了具体的概念如重力势能、弹性势能、动能之前，即从追寻守恒量出发引出能量概念，把守恒思想的渗透贯穿于能量学习的全过程。通过调查发现，这种写法尽管立意很高，得到了一些教师的认同，但也有很多教师由于课时等原因，并没有单独安排这节课的教学，因此并没有达成预期的效果。从方便教师开展教学的角度，新教材没有把“追寻守恒量”单独编为一节，而是放在第四节“机械能守恒定律”中。

学生在初中已经对功和功率有了初步了解，知道力和物体运动方向相同时功的计算。高中阶段把功的概念扩展到力与运动方向有一定角度的情况，并引入正功、负功的概念。考虑到初、高中阶段知识的延续性，新教材没有用过多的篇幅回顾初中知识，把功和功率合编为一节。

2017年版课程标准删去了“通过实验，探究恒力做功与物体动能变化的关系”这一内容。教材也进行了相应的调整，删去了原来的第六节“实验：探究功与速度变化的关系”。另外，根据课程标准的安排，把普遍的能量守恒定律及能量转化和转移的方向性问题放在后续的模块，等学生了解了更多能量形式后再进一步学习。

教材编写时还有以下考虑。

1. 为学生能量观的发展打好基础

课程标准指出，能量观是物理观念的要素之一。能量观的核心内容是：自然界中一切物质都具有能量；能量有多种形式，能够从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体；在能量转化和转移的过程中，各种形式能量的总量保持不变。能量守恒定律是自然界最基本的规律和最普遍的法则，支配着迄今我们知道的一切自然现象——从原子核反应到石块的下落以至宇宙的演化，为我们看待自然现象提供了统一的观点。

本章是高中学生建立能量观念的第一章。学生在初中阶段已经初步、定性地接触了动能、势能、电能等概念。在高中阶段，他们将进一步从定量的角度学习并发展这些概念，并且逐步深入地理解能量守恒定律。学好本章，将为后续的学习打下坚实的基础。

能量概念是在人们追寻“守恒量”的过程中发展起来的。能量概念之所以重要，就是因为它是一个“守恒量”。近代物理学的发展更是伴随着对守恒量的追求。基于这一认识，教材在讲机械能守恒定律之前，先通过提出伽利略斜面实验背后隐含的问题，引导学生思考：在小球的运动过程中，有哪些物理量是变化的？哪些是不变的？你能找出不变的量吗？然后进一步通过“追寻守恒量”这个小标题的叙述，让学生体会守恒关系是自然界中客观存在着的一种十分重要的关系，而能量概念的引入是科学前辈们追寻守恒量的一个重要事例。在上述认识的基础上再学习机械能守恒定律，逐步学会从能量的观点和守恒的观点来分析力学问题，有利于学生把关于机械能的具体知识进行提升，帮助他们逐步形成能量观。

2. 注重功能关系的梳理

功能关系指做功的过程是能量转化的过程，做了多少功，就有多少能量发生转化。知道了功和能的这种关系，就可以通过做功的多少，定量地研究能量及其相互转化。逐步深入地理解功和能的概念以及功能关系，是学习本章的基本线索。

在本章章首语中就指出：“能量的转化与功的概念紧密相连。”在第二节，通过研究物体沿不同路径运动时重力做功的特点，定义“mgh”为重力势能。第三节，通过研究恒力做功与物体速度变化之间的关系，发现$\frac{1}{2}mv^2$这个量在过程终了与过程开始时的差正好等于力对物体做的功，从而定义了动能。在机械能守恒定律的建立过程中，同样也是从研究力做功的情况切入的。

学生如果能够结合具体问题逐步理解这一线索，不但有助于把这一章的知识融会贯通，而且有助于今后从能量的观点学习其他部分的知识。

3. 重视渗透方法教育

通过对瞬时速度概念、匀变速直线运动位移公式的学习，学生已经初步了解了极限方法。本章在功和能的情境下进一步应用极限方法。

功的一般公式、动能定理、机械能守恒定律都是在恒力和直线运动的情况下推导出来的。考虑到动能定理和机械能守恒定律的应用并不限于恒力和直线运动，所以教材在叙述中有意识地作了扩展。例如，讲功的计算时，介绍了计算变力做功的思路。讲解动能定理时，指出不论外力是否为恒力，也不论物体是否做直线运动，动能定理都成立。讲功率的计算时，指出计算平均功率的公式$P=Fv$同样适用于瞬时功率。讲解重力势能时，分析了重力做功与路径无关的问题。由此可知，从直线运动推导出来的重力势能的变化与重力做功的关系，对曲线运动的情形同样适用。在以上教学过程中，都涉及了极限方法的应用。

演绎推理是科学研究中的重要方法之一，也是学生最广泛进行的学习活动。演绎推理是从一般性结论推出个别性结论的方法，即从已知的某些一般原理、定理、法则、公理或科学概念出发，通过逻辑推理（包括数学推导）得出结论的一种思维活动。学生通过力学部分的学习，对此已经有了较多的体验，有可能也有必要进行一定的小结。因此，教材在第三节“动能和动能定理”结束时，专门安排了科学方法栏目，结合动能定理的推导过程介绍了演绎推理方法。

课时安排建议

1. 功与功率	2课时
2. 重力势能	1课时
3. 动能和动能定理	2课时
4. 机械能守恒定律	2课时
5. 实验：验证机械能守恒定律	1课时

二、教材分析与教学建议

第1节　功与功率

1．教学目标

（1）理解功的概念，掌握功的计算式。

（2）知道功是标量，理解正功、负功的含义。知道几个力对物体所做的总功，是各个力分别对物体做功的代数和。

（3）理解功率的概念，会运用极限思想得到瞬时功率表达式$P=Fv$。关注生产生活中常见机械做功、功率大小及其意义。

（4）能分析汽车发动机功率一定时，牵引力与速度之间的关系，并能分析、解释实际生活中的现象。

2．教材分析与教学建议

功和功率是建立功能关系的重要概念。功是为进一步提出“能”这个更为广泛、更为重要的概念服务的。做功过程反映了能量的变化过程。只有准确理解“功”才能更好地促进能量概念的建构。

教材在初中知识的基础上，以节前“问题”引出：当位移的方向与力的方向不一致时，应当如何计算功？接着讨论正功和负功的概念。在功的概念的基础上进一步讨论做功的快慢，引出功率的概念。最后，通过分析汽车发动机功率一定时牵引力与速度之间的关系，联系生活实际，加深对功率概念的理解。

本节教学的重点与难点为理解功的概念、正功与负功的意义、瞬时功率的概念。主要原因有以下几个方面：①学生对力、位移矢量的分解还不够熟悉；②学生对标量、矢量的认识不到位导致不能很好地理解功是标量；③从平均功率过渡到瞬时功率对极限思想的应用要求较高；④汽车发动机功率、牵引力、速度三者关系的分析比较复杂。因此教师应在教材内容的基础上，针对难点的突破进行教学设计。可以从以下几个问题展开教学。

（1）问题引入

教材采用由特殊到一般的思路，先分析力与位移同方向时做功的情况，再逐步深入力与位移成一角度时做功的情况，最后通过矢量分解推导功的表达式。结合教材中的问题引入，可以让学生回忆和复习初中已学过的功的概念，让学生举例说明什么是做功过程。例如，学生会提出起重机在向上提升重物时对物体做功了，汽车在平直公路上前进时发动机的牵引力对汽车做功了，等等。然后，进一步分析起重机提着重物静止不动时拉力对货物是否做功，汽车在平直公路上前进时地面对汽车的支持力是否做功等。通过讨论，使学生明确做功的两个不可或缺的因素，即力和

物体在力的方向上的位移。进而归纳得出：力和位移在同一方向时功的计算公式为$W=Fl$。如果力与位移的夹角是90°，则该力对物体不做功。在此基础上进一步研究力与位移成一定角度时功的计算。

（2）功的概念的建立

教师可以在节前“问题”的基础上，通过对矢量相关知识的回顾，提升对矢量概念的理解。为得出功的计算式构建一个良好的知识结构，并为分析功的标量性打下基础。这样的教学设计有利于学生物理观念的形成。

教学片段

推导功的一般表达式

当力的方向与物体的位移方向相同时，力对物体做的功为力的大小与物体位移大小的乘积。那么，物体的位移方向与力的方向不一致时，应当怎样计算功呢？

让学生就此问题展开讨论，提出解决的思路和方法。经过讨论，学生可能会采用教材给出的方法得出功的表达式：$W=Fl\cos\alpha$（图8-1）。对于基础较好的学生，在教学中应活跃和开阔他们的思路。位移l是矢量，也可以分解（图8-2），即可以把位移分解成平行于力F和垂直于力F的两个分位移$l_1=l\sin\alpha$、$l_2=l\cos\alpha$，利用已有的知识同样可以得出$W=Fl\cos\alpha$。得出功的表达式之后，仍应引导学生进行讨论，使学生理解什么情况下力F做的功最大，什么情况下力F不做功。这样能与前面所说的做功的两个因素相呼应，又可以将特殊情况下的结论纳入一般情况下的结论，帮助学生构建一个良好的知识结构。

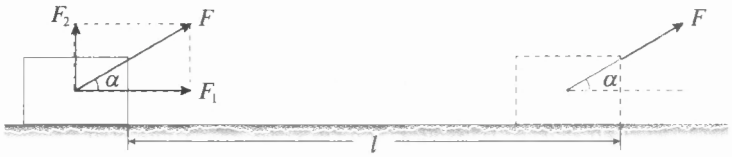


图8-1

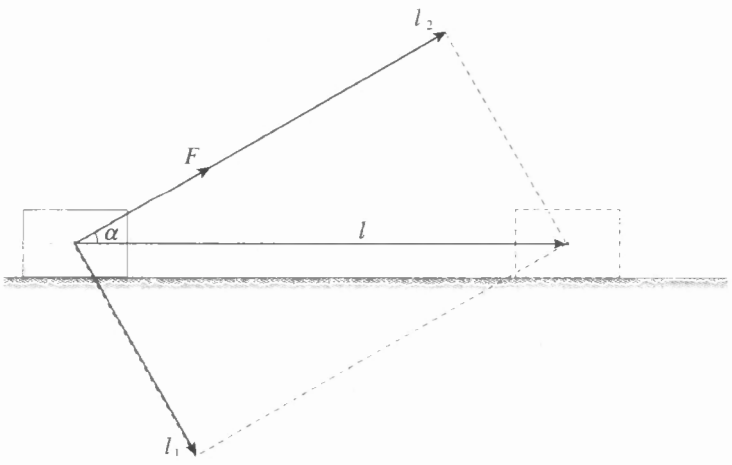


图8-2

$W=Fl\cos\alpha$只适用于大小和方向都不变的恒力做功。对学有余力的学生，可以通过举一个变力做功的实例来说明，如弹簧弹力做功。一则作为问题激发学生的思维，二则为后续内容的学习埋下伏笔。

（3）正功和负功

由于$\cos\alpha$可正可负，从功的计算式可以看出，功W可正可负。教学中可结合功和能的联系进行说明。学生在初中已经认识到，做功的过程就是能量转化的过程，在此基础上可以建构负功的概念。

首先说明引入负功的必要性，让学生体会力做负功的含义。例如：一物体在相同的水平拉力作用下分别在光滑和粗糙的水平面上加速运动，如果运动相同的距离，物体速度的变化量相同吗？动能的变化量相同吗？拉力做的功相同吗？学生可以用之前学过的牛顿运动定律顺利解决。物体所受合力不同，加速度不同，得出速度的变化量不同，动能的变化量不同。隐含的问题在于：既然拉力做的功一样，为什么动能的变化量不一样呢？通过激发学生的认知冲突，引发对做功的深入思考。这样处理，会使学生隐约感到此时摩擦力做了“相反”的功。在前面分析说明的基础上，可让学生讨论正功与负功对物体动能产生的影响，引导从能量转化的角度认识其意义。然后从力和运动的角度看，摩擦力为阻力，有阻碍物体运动的作用。摩擦力对物体做负功。

由于力和位移都是矢量，因此学生对于“功不是矢量，没有方向”的认识是难点。可参考以下教学片段。

教学片段

功是标量

如图8-3所示，在光滑水平面上，物体受两个互相垂直的大小分别为$F_1=3\ \mathrm{N}$和$F_2=4\ \mathrm{N}$的恒力，从静止开始运动，位移$l=10\ \mathrm{m}$，求每个力做的功和合力做的功。

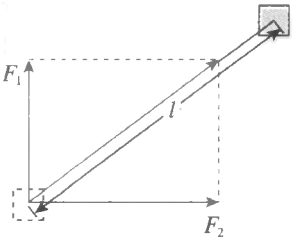


图8-3

根据力的平行四边形定则，合力$F_{合}=\sqrt{F_1^2+F_2^2}=5\ \mathrm{N}$，合力方向即物体的运动方向，可以得出位移的方向与$F_1$的夹角为53°，与$F_2$的夹角为37°。

所以$W_1=F_1 l\cos 53°=18\ \mathrm{J}$

$W_2=F_2 l\cos 37°=32\ \mathrm{J}$

$W_{合}=F_{合} l\cos 0°=50\ \mathrm{J}$

通过上述分析可知，$W_{合}=W_1+W_2\neq\sqrt{W_1^2+W_2^2}$，由此可以看出，功的运算不符合平行四边形定则，符合标量的计算法则。故功为标量。

（4）功率

功率是反映做功快慢的物理量。学生在初中已经学过功率的概念。教材限于篇幅采用“从开始计时到时刻t”的处理方法，得出功率的概念。教学时，可采用与前面速度、加速度等概念相似的处理方式。让学生体验用比值定义功率的过程与思维方法，得出$P=\frac{W}{t}$，进而体会到凡是描述快慢的物理量，都可以采用类似的方式进行。还可以让学生完成其他的活动，如观察自己身边事物，通过研究性课题测定人上楼梯、跳绳等活动时的平均功率等。

在得出$P=\frac{W}{t}$的基础上进一步讨论，功率的表达式$P=Fv\cos\alpha$。若力的方向与速度方向相同，则$P=Fv$。这里的功率是指从计时开始时刻到时刻t的平均功率。如果时间间隔取得非常非常小，上述速度就可以看作瞬时速度。这个关系式也就可以反映瞬时速度与瞬时功率的关系。从平均功率过渡到瞬时功率过程中体现的极限思想要逐步渗透，让学生加深对这一思维过程的理解。

教学片段3

推导$P=Fv\cos\alpha$

如果物体受到的力为F，从开始计时到时刻t这段时间内发生的位移是l，力F的方向与位移的方向的夹角为α，则在这段时间内力做功的功率$P=\frac{W}{t}=\frac{Fl\cos\alpha}{t}=Fv\cos\alpha$。若力的方向与速度方向相同，则$P=Fv$。这里的功率是指从计时开始到时刻$t$这段时间内的平均功率。

如果时间间隔取得非常非常小，上述速度就可以看作瞬时速度。这个关系式也就可以反映瞬时速度与瞬时功率的关系。针对推导公式过程中所涉及的极限思想在讲瞬时速度时已有所渗透，教师应启发学生回忆瞬时速度的定义方法，让学生自行将瞬时速度的定义方法迁移到瞬时功率的定义中来，以增加对瞬时功率的理解。

汽车发动机的额定功率、牵引力与速度之间关系的分析是难点，但围绕汽车启动的两种情况进行讨论意义不大。一是启动方式不符合实际情况，二是为了减轻学生的学习负担。对于$P=Fv$的理解，教师可组织学生通过讨论、交流，正确理解公式中三个物理量之间的关系，并进一步分析汽车上坡时为什么要换挡减速行驶。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共7道习题，要求学生能理解功和功率的概念，能运用$W=Fl\cos\alpha$计算功的大小，能运用$P=\frac{W}{t}$和$P=Fv$进行有关计算。前3题通过具体情境让学生知道$W=Fl\cos\alpha$中各个物理量的含义，练习用$W=Fl\cos\alpha$计算功。第4题是让学生知道处理数学问题与物理问题的区别。第5题练习用$P=Fv$进行简单的计算。第6题练习用$P=\frac{W}{t}$求功率和用$W=Pt$计算功。第7题定性分析生活实例，将P、F、v之间的对应关系应用于动态分析，培养学生的物理思维。

1. 图甲中，$W=Fl\cos(180°-150°)=10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\text{J}=17.32\text{J}$。图乙中，$W=Fl\cos(180°-30°)=-10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\text{J}=-17.32\text{J}$。图丙中，$W=Fl\cos30°=10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\text{J}=17.32\text{J}$。

提示：以物体在水平面上运动为情景，用功的定义式计算物体水平运动时三种情况下力F做的功，着力区别图中的θ和公式中的α的区别，虽然受力情况不同，但力F做功的绝对值却一样，加深对功的概念的理解，学习计算功的基本方法。

2. $1\times10^5\text{J}$；$-1\times10^5\text{J}$；0

提示：重物被匀速提升时，合力为0，故$F=G=2\times10^4\text{N}$。钢绳拉力所做的功$W_1=Fl\cos0°=2\times10^4\times5\text{J}=1\times10^5\text{J}$。重力做的功$W_2=Gl\cos180°=-2\times10^4\times5\text{J}=-1\times10^5\text{J}$。物体克服重力所做的功为$1\times10^5\text{J}$，这些力做的总功为0。

本题练习用功的定义式求每个力的功，用每个力的功之和求总功。通过计算，进一步理解正功、负功、总功的物理意义。

3. 重力做功$6.0\times10^3\text{J}$；支持力做功0 J；阻力做功$-1.0\times10^3\text{J}$；总功为$5.0\times10^3\text{J}$

提示：如图8–4所示，滑雪运动员受到重力、支持力和阻力的作用，运动员的位移$l=\dfrac{h}{\sin 30^\circ}=20\ \mathrm{m}$，方向沿斜坡向下。所以，重力做功$W_G=mgl\cos 60^\circ=60\times 10\times 20\times\dfrac{1}{2}\ \mathrm{J}=6.0\times 10^3\ \mathrm{J}$。支持力所做的功$W_N=F_Nl\cos 90^\circ=0$。阻力所做的功$W_f=Fl\cos 180^\circ=-50\times 20\ \mathrm{J}=-1.0\times 10^3\ \mathrm{J}$。

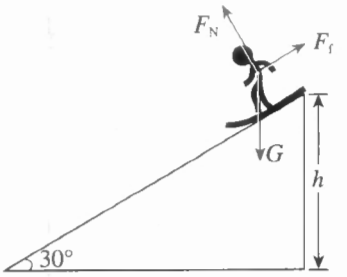


图8–4

这些力所做的总功$W_{总}=W_G+W_N+W_f=5.0\times 10^3\ \mathrm{J}$。

提示：以物体在斜面上加速运动为情景，通过计算各个力做的功、合力的功，在题1、题2的基础上，使学生认识到一个力对物体做的功与物体的运动状态、是否有其他的力对物体做功无关。通过求合力的功，为后面学习动能定理奠定基础。

4．此人推导的前提不明确。

根据$P=Fv$，若F增大，则P增大的前提是v不变。

根据$v=\dfrac{P}{F}$，若P增大，则v增大的前提是F不变。

根据$F=\dfrac{P}{v}$，若v增大，则F减小的前提是P不变。

提示：通过讨论$P=Fv$中三个量之间的关系，加深对物理量之间关系的理解，让学生明确在应用物理规律分析解决问题时要注意物理量之间的相互制约关系。

5．$3.7\times 10^{-2}\ \mathrm{m/s}$

提示：在货物匀速上升时，$F=G=2.7\times 10^5\ \mathrm{N}$。由$P=Fv$可得$v=\dfrac{P}{F}=\dfrac{10\times 10^3}{2.7\times 10^5}\ \mathrm{m/s}=3.7\times 10^{-2}\ \mathrm{m/s}$。

6．$3\times 10^3\ \mathrm{W}$；$5.4\times 10^6\ \mathrm{J}$

提示：这台抽水机的输出功率$P=\dfrac{W}{t}=\dfrac{mgh}{t}=\dfrac{30\times 10\times 10}{1}\ \mathrm{W}=3\times 10^3\ \mathrm{W}$，它半小时能做功$W=Pt=3\times 10^3\times 1\,800\ \mathrm{J}=5.4\times 10^6\ \mathrm{J}$。

本题以抽水机抽水为情景，通过由功求功率、由功率求功，加深学生对功和功率的认识，形成正确的物理观念。

7．（1）汽车的加速度减小，速度增大。因$P=F_{牵}v$，v增大，故$F_{牵}$减小，而$a=\dfrac{F_{牵}-F}{m}$，所以加速度减小。

（2）当汽车的速度为v、加速度为a时，汽车的牵引力$F_{牵}=ma+F$。发动机的额定功率$P=F_{牵}v=(ma+F)v$。当加速度减小到0时，汽车做匀速直线运动，$F_{牵}=F$。所以汽车行驶的最大速度$v_{max}=\dfrac{P}{F}=\dfrac{(ma+F)v}{F}$。

提示：通过讨论汽车以恒定功率启动直至最后做匀速运动的过程中，速度和加速度的变化，使学生能综合运用所学的物理知识分析解决实际问题，知道物理规律之间的相互关系。

第2节　重力势能

1．教学目标

（1）通过不同路径重力做功的分析，归纳出重力做功与路径无关的特点。

（2）理解重力势能的表达式。通过重力做功与重力势能变化的关系体会功能关系。

（3）知道重力势能的大小与参考平面的选取有关，即重力势能具有相对性，但重力势能的变化量与参考平面的选取无关。

（4）了解弹性势能的决定因素。

2．教材分析与教学建议

“重力势能”是建立功能关系，体现“功是能量转化的量度”这一思想的重要一节。上一节学习的功的概念的重要意义在于它可以决定能量的变化。教材对力学中功能关系的讨论给予了极大的重视。

本节从重力做功和重力势能的变化视角，讨论功能关系。在得出重力势能表达式的过程中，不仅要告诉学生结论，更为重要的是该结论是怎样得出来的。这就是科学思维之路，对培养学生的逻辑思维能力和研究方式都是非常重要的。

教材以节前“问题”复习初中所学过的关于重力势能的知识。物体的质量越大、所处的位置越高，重力势能就越大。在此基础上让学生猜想重力势能的表达式，以体现科学探究中“提出问题、形成猜想和假设、获取和处理信息、基于证据得出结论”等要素。

本节教学的重点与难点为“重力做功与路径无关”“重力势能表达式的得出过程”“重力势能的相对性及系统性”。主要原因有以下几个方面：①从概念建立的逻辑上讲学生感觉比较困难。为什么只有认识了重力做功与路径无关后，才能引入重力势能。②重力势能的概念及重力做功与重力势能变化的关系较难理解。③重力势能的相对性和重力势能属于物体和地球组成的系统等知识较难分析。

因此教师应在教材内容的基础上，针对难点的突破进行教学设计。可以从以下几个问题开展教学。

（1）问题引入

教材没有生硬地给出“功是能量转化的量度”，而是让学生根据“重力势能与物体的质量及位置有关”猜想重力势能的表达式。这是想让学生经历理论探究的过程来认识重力势能的概念，为后来根据物理规律定义重力势能奠定基础。

（2）重力做功的特点

功和能的变化是紧密联系的，教师应通过对物体下落过程的分析，引导学生发现物体的高度发生变化时，重力要做功。重力势能随高度的变化而变化，两者有紧密联系。让学生认识到研究重力势能可以从重力做功的角度入手，通过研究重力做功来探究重力势能的概念。教材由浅入深地逐步设置情景，以得出重力做功与路径无关的特点。

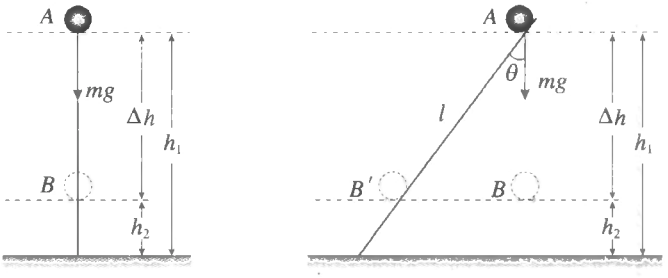
教学片段

重力做功的特点

物体所在的高度发生变化时，重力要做功。物体下降时重力做正功，重力势能减少。物体被举高时重力做负功，重力势能增加。认识重力势能不应脱离对重力做功的研究。关于重力做功的特点可以从以下几个问题逐步开展，循序渐进。

问题1. 如图8–5甲所示，一个质量为m的物体，从与地面高度为h_1的位置A，竖直向下运动到高度为h_2的位置B，这个过程中重力做的功是多少？

问题2. 质量为m的物体仍然从上向下运动，高度由h_1降为h_2，但这次不是沿竖直方向，而是沿着一个斜面向下运动到B'，再水平运动到B（图8–5乙）。物体沿斜面运动的距离为l，在这一过程中重力做的功是多少？



甲　　乙

图8–5

综上得出：物体运动时，重力对它做的功只跟它的起点和终点的位置有关（高度差），而跟物体运动的路径无关。功的大小等于重力跟起点高度的乘积mgh_1与重力跟终点高度的乘积mgh_2两者之差。对于学习基础较好的学生，可以让他们自主学习教材中“拓展学习”中的内容。

（3）重力势能

通过重力做功与路径无关的特点，从而引出重力势能的表达式，然后让学生体会教材中所写的“看起来，物体所受的重力mg与它所处位置的高度h的乘积mgh，具有特殊的意义”。它的特殊意义在于它一方面与重力所做的功密切相关，另一方面它随着高度的变化而变化，与前面的猜想相呼应。对学习基础较好的学生，可以让他们对教材中“思考与讨论”中的问题进行讨论。从而使学生理解，正是因为重力做功与路径无关，才引入了重力势能的概念，而对于摩擦力则不能引入相应的摩擦力势能的概念。

如果没有地球对物体的吸引，就不会有重力做功，也就不存在重力势能，所以重力势能是属于系统的。重力势能mgh中的m为物体的质量，g为地球的重力场强度，h为物体和地球的相对位置关系，所以表达式mgh充分表达了重力势能属于物体和地球组成的系统。平常所说的“物体”的重力势能，只是一种简化的说法。

关于重力势能的变化与重力做功关系的讨论可以创设问题情境，设计具体的问题，让学生算一算，重力做功与重力势能变化的关系。

教学片段

重力势能变化与重力做功的关系

教师将手中粉笔头（质量为m）竖直上抛，上升的高度为h。然后让学生分析其上升和下落过程中重力做功与重力势能的变化。可以看出，上升过程中，重力做功为$-mgh$，重力势能增加mgh；下落过程中，重力做功为mgh，重力势能减少mgh。还可以让学生分析上述情景中如有空气阻力存在（上升高度仍是h），结论是否会发生变化。最后启发学生总结出以下结论：重力做多少正功，重力势能就减少多少；重力做多少负功，重力势能就增加多少。即重力做功等于重力势能的减少量。上述关系可表达为$W_G=E_{p1}-E_{p2}=-\Delta E_p$，等式左边是重力做的功，等式右边是重力势能变化量的相反数。

通过分析，还应让学生得出：重力势能的变化只与重力做功有关，和其他力做功无关，即重力势能的变化只是由重力做功引起的。

（4）重力势能的相对性

重力势能的相对性和对势能为负值的理解是本节的难点之一。教师在分析重力势能具有相对性时，可结合实际例子先认识高度的相对性。高度的相对性决定了重力势能具有相对性。一般以解决问题时简便为原则来选择参考平面。同时要向学生说明，重力势能的变化与参考平面的选取是无关的。

教学片段

重力势能的相对性

由于高度有相对性，所以重力势能也应该有相对性，因此在研究一个物体重力势能时应该选择一个参考平面，在这个平面上物体的重力势能值为0。

质量为1 kg的小球，从桌面上$h_1=1.2$ m的A点落到地面上的B点，桌面高$h_2=0.8$ m。请按要求填写下表。（$g=10\ \mathrm{m/s^2}$）

参考平面	小球在A点的重力势能	小球在B点的重力势能	小球下落过程中重力做功	小球下落过程中重力势能的变化
桌面	12 J	−8 J	20 J	减少20 J
地面	20 J	0	20 J	减少20 J

重力势能总是相对于某个水平面来说的，这个水平面叫参考平面。参考平面选取不同，重力势能的数值就不同。可见，重力势能具有相对性。选择哪个水平面作为参考平面，可视研究问题的方便而定，通常选择地面作为参考平面。选择不同的参考平面，物体的重力势能的数值是不同的，但并不影响研究有关重力势能的问题，因为在有关的问题中，有确定意义的是重力势能的差值，这个差值并不因选择不同的参考平面而有所不同。

对选定的参考平面而言，上方物体的重力势能是正值；下方物体的重力势能为负值。大小为负值的重力势能，表示物体在这个位置具有的重力势能要比在参考平面上具有的重力势能小。

（5）弹性势能

在教学中可通过各种与弹性势能相关的情景，如观察弹簧、钟表或玩具里的发条，或分析拉弓射箭和撑竿跳高等过程，提出弹性势能的概念。关于弹性势能的决定因素，可结合教材，通过实验定性说明：弹簧的弹性势能与弹簧的劲度系数和形变量有关，劲度系数越大，形变量越大，则弹性势能越大。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共4道习题，要求学生知道重力做功与路径无关，理解重力势能的概念，明确重力做功与重力势能变化的关系。知道重力势能具有相对性和系统性，能用重力势能的定义式进行计算。

1．设斜面高度为h，对应于倾角为θ_1、θ_2、θ_3的斜面长分别为l_1、l_2、l_3。由功的公式可知，在倾角为θ_1的斜面，重力与位移的夹角为$\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)$，重力所做的功为$W_G=mgl_1\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)=mgl_1\sin\theta_1=mgh$。

同理可证，在倾角分别为θ_2、θ_3的斜面上，重力所做的功都等于mgh，与斜面倾角无关。

提示：通过物体沿不同的斜面下滑时重力做功大小的计算，认识重力做功的特点，形成重力做功与路径无关，只与始末位置有关的正确观念。

2．$-mgh$，mgh；mgh，mgh

提示：（1）足球由位置1运动到位置2时，重力所做的功为$-mgh$，足球的重力势能增加了mgh。

（2）足球由位置2运动到位置3时，重力做的功为mgh，足球的重力势能减少了mgh。

以足球做曲线运动为情景，加深对重力做功与重力势能改变的关系的认识。重力势能的变化是与重力做功相对应的，重力做了多少功，重力势能就变化多少。重力做正功时重力势能减少，重力做负功时重力势能增加。

3．（1）正确。物体在拉力的作用下向上运动，如果做匀加速直线运动，这时拉力的功大于重力势能的增加量。如果物体做匀减速直线运动，这时拉力的功小于重力势能的增加量。

（2）错误。物体匀速上升，拉力的大小等于重力的大小，拉力的功一定等于重力势能的增加量。

（3）错误。根据$W_G=E_{p1}-E_{p2}$可知，重力做-1 J的功，物体重力势能的增加量为1 J。

（4）错误。重力做功只与起点和终点的位置有关，与路径无关，A、B两点的位置不变，从A点到B点的过程中，无论经过什么路径，是否还受到其他的力，重力的功都是相同的。

提示：通过辨析在不同情景下拉力、摩擦力和重力做的功，强调重力势能的变化只与重力做功相对应，让学生在解决实际问题的过程中进一步理解重力做功与重力势能改变的关系，理解重力做功与物体的运动状态、运动路径、是否有其他的力做功无关。

4．（1）

所选择的参考平面	小球在A点的重力势能	小球在B点的重力势能	整个下落过程中小球重力做的功	整个下落过程中小球重力势能的变化量
桌面	5.88 J	−3.92 J	9.8 J	9.8 J
地面	9.8 J	0	9.8 J	9.8 J

（2）如果下落过程中有空气阻力，表格中的数据不变。

提示：让学生体会“重力势能跟零势能面的选取有关，而重力势能的变化跟零势能面的选取无关”，进一步形成重力做功跟是否有其他的力做功无关的正确观念。

第3节　动能和动能定理

1．教学目标

（1）通过力对物体做功的分析确定动能的表达式，加深对功能关系的理解。

（2）能够从功的表达式、牛顿第二定律与运动学公式推导出动能定理。

（3）理解动能定理。能用动能定理解释生产生活中的现象或者解决实际问题。

2．教材分析与教学建议

本节的教学内容具有承前启后的作用。通过本节的学习，既深化了对功的概念的理解，使学生对“功是能量变化的量度”有了进一步的理解，拓展了求功的思路，也为机械能守恒定律的学习打下了基础，为用功能关系处理问题打开了思维通道。

本节从合力做功的分析开始，在得出动能表达式的基础上，推出动能定理。推导动能定理的出发点是已知的牛顿第二定律，教材结合运动学公式，经历数学推导，得到了动能定理。这种演绎推理是从已知的某些一般原理、定理、法则、公理或科学概念出发，推出新结论的思维过程。

本节教学的重点与难点为动能表达式的得出过程、动能定理的推导过程。因此教师应在教材内容的基础上，针对难点的突破进行教学设计。可以从以下几个方面展开教学。

（1）问题引入

教材在复习初中关于动能的已有知识的基础上，提出炮筒内的炮弹在推力的作用下速度越来越大，动能增加，是因为推力对物体做了功。然后让学生举出其他类似的例子，说明动能变化和力是否做功有关，为后面的定量研究动能做好铺垫。对该问题的讨论实际上也为定量研究动能指明了方向。

（2）动能的表达式

通过前述问题的引入，可以得出使物体速度变化的根本原因是由于物体受到了力的作用而且发生了位移。在前面的学习中，学生已经知道，用牛顿第二定律和运动学公式可以把力学量和运动学量联系起来。因此，在得出动能表达式时，可创设一个运动与力联系的情景，利用学生已积累的知识和经验来开展教学。让学生经历理论推导的过程，并进一步分析，定义动能的表达式。这种方法有利于学生理解牛顿第二定律与动能定理的联系与区别。

在得出动能表达式$\frac{1}{2}mv^2$之后，要引导学生进行类比分析，让学生认识到动能是标量，动能是状态量。也可以举例分析：如一个做匀速直线运动的物体动能是否变化？做匀速圆周运动的物体的动能是否变化？等等。帮助学生理解动能虽与速度有关，但速度是矢量，动能是标量。

（3）动能定理的推导

动能定理是一个适用范围很广的物理规律。教材在推导这一定理时，仅从一个恒力做功引起物体动能变化的实例出发，得出“力在一个过程中对物体做的功，等于物体在这个过程中动能的变化”的结论。对于基础较好的学生，教师在开展教学时，可以讨论多力做功、物体做曲线运动等不同情景。

教学片段

推导动能定理

若水平面是粗糙的，且摩擦因数为μ，则合力做功与动能变化的关系又如何？

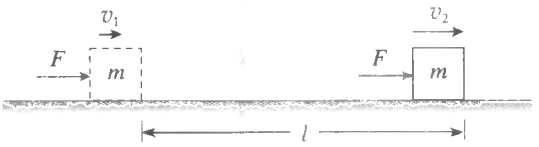


图8-6

如图8-6所示，根据牛顿第二定律有

$$F-F_f=ma，而 F_f=\mu mg$$

又因 $v_2^2-v_1^2=2al$，故 $l=\dfrac{v_2^2-v_1^2}{2a}$

又因 $Fl-\mu mgl=\dfrac{1}{2}mv_2^2-\dfrac{1}{2}mv_1^2$

$W_1=Fl$；$W_2=-\mu mgl$

故 $W_1+W_2=\dfrac{1}{2}mv_2^2-\dfrac{1}{2}mv_1^2$

也就是说，如果物体受到几个力的共同作用时，动能定理应表述为：力对物体做的总功，等于物体的动能变化。即 $W_{总}=E_{k2}-E_{k1}=\Delta E_k$。

（4）动能定理的应用

在例题教学中，建议教师按以下步骤展开教学活动。先让学生对教材中的例题运用牛顿运动定律与运动学公式求解，再让学生用动能定理求解，最后教师引导学生对这两种方法进行比较，让学生体会到应用动能定理处理问题的优点与不足。

在教学过程中，教师要帮助学生利用动能定理形成正确的解题思路，并注意解题的规范性。

①认真审题，确定研究对象。

②通过受力分析和运动分析对物理情景进行分析，画出物体运动的示意图。

③确定研究过程及始末状态，分析该过程中各力做的功及始末状态动能的变化量。

关于合力的功的计算，应强化“几个力对物体做功的代数和等于这几个力的合力所做的功”。关于动能的变化，这个变化是指末状态的动能减去初状态的动能，动能的变化量为正值说明物体的动能增加了，反之则动能减少了。

④根据动能定理列方程，然后求解。并对结果进行必要的讨论。

对解题过程进行反思总结，逐渐形成分析、解决问题的能力。明确做功的过程是能量的一种形式转化为另一种形式的过程，或者从一个物体转移到另一个物体的过程。通过分析思考，逐渐形成正确的能量观。

（5）科学方法：演绎推理

归纳方法是一种从个别事实中概括出一般概念、一般规律的思维方法。和归纳法相反，演绎是从一般到个别的推理方法。作为出发点的一般性判断称为“大前提”，作为演绎中介的判断称为“小前提”，把由“大前提”和“小前提”推演出来的结果称为演绎的结论。

演绎推理在物理学中有着广泛的应用。动能定理的推导过程就是将牛顿第二定律作为前提，经过一系列的数学推导演绎得出的。运用这种方法可以帮助我们更好地理解和掌握物理规律。我们解物理习题的过程，大部分都是演绎推理的过程。

3.“练习与应用”参考答案与提示

本节有5道习题。第1题巩固动能的概念。第2题属于应用动能定理处理问题的基本题型。第3题属于变力做功的问题。第4题可以使学生体会应用动能定理解决问题的优越性。第5题是一道涉及变力做功、多力做功的问题，让学生利用动能定理求解，可以培养学生综合分析问题的能力。

1．A．动能是原来的4倍。B．动能是原来的2倍。C．动能是原来的8倍。D．动能不变。

提示：理解物体的动能与质量、速度的关系。

2．由动能定理 $W=E_{k2}-E_{k1}=\frac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2)$ 可知，在题目所述的两种情况下，$(v_2^2-v_1^2)$ 较大的，需要做的功较多。速度由10 km/h加速到20 km/h时，$v_2^2-v_1^2=(20^2-10^2)(\text{km/s})^2=300(\text{km/s})^2$。速度由50 km/h加速到60 km/h时，$v_2^2-v_1^2=(60^2-50^2)(\text{km/s})^2=1\,100(\text{km/s})^2$。

可见，后一种情况所做的功比较多。

提示：练习动能定理的简单应用，领会用动能的变化求总功的大小。

3．6.4×10^3 N

提示：设平均阻力为 F，根据动能定理有 $-Fs=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，解得 $F=6.4\times10^3$ N。

用动能定理求阻力，初步认识到动能定理不仅适用于恒力做功，也适用于变力做功，体会“化变为恒”的思想。

4．3.46 m/s

提示：人在下滑过程中，重力和阻力做功，设人受到的阻力为 F，根据动能定理 $W=\Delta E_k$，即 $mgh-Fs=\frac{1}{2}mv_t^2$，$v_t=\sqrt{2gh-\frac{2Fs}{m}}=2\sqrt{3}$ m/s=3.46 m/s。

解决这类问题既可以用牛顿运动定律，也可以用动能定理，通过这两种方法的比较，使学生在分析解决实际问题的过程中进一步理解物理规律之间的相互关系，认识到物理学是不断发展的。

5．100 J

提示：设人将足球踢出的过程中，人对足球做的功为 W，人踢足球到足球上升至最大高度的过程中，根据动能定理有 $W-mgh=\frac{1}{2}mv_t^2$，$W=\frac{1}{2}\times0.4\times20^2$ J+$0.4\times10\times5$ J=100 J。

足球先后经历了运动员的脚与足球作用和足球在空中飞行两个过程，在脚与足球作用的过程

中，脚对足球的作用力是变力，且此力的变化规律和足球的位移均未知，故不能用功的定义式计算功，但是，若能求出足球离开脚时的速度v_0，则可用动能定理$W=\frac{1}{2}mv_0^2$求出变力做的功。

第4节　机械能守恒定律

1．教学目标

（1）通过机械能守恒定律的学习，初步建立能量观念、体会守恒思想。

（2）会用能量观念分析具体实例中动能与势能（包括弹性势能）之间的相互转化。

（3）理解机械能守恒定律的推导过程。

（4）会从做功和能量转化的角度判断机械能是否守恒，能应用机械能守恒定律解决有关问题，体会利用机械能守恒定律解决问题的便利性。

2．教材分析与教学建议

从知识发展的线索来看，本节的教学内容是对前面几节内容的总结，也是对学习能量守恒定律所作的铺垫。本节内容将加深学生对功是能量转化的量度的理解，也为学生从能量角度处理力学问题提供了途径。

本节从伽利略斜面实验的讨论开始，在实验过程中分析变化量与不变量，在此基础上讨论动能与势能的相互转化。然后推理出机械能守恒定律，将推理过程与对机械能守恒条件的深入理解结合起来。

本节教学的重点与难点是：①促进学生对“功是能量转化的量度”的理解。②机械能守恒定律的推导和运用机械能守恒分析相关问题。③守恒条件的判断和机械能守恒定律的理解等。

教师应在教材内容的基础上，针对难点的突破进行教学设计。可以从以下几个方面展开教学。

（1）追寻守恒量

学生在前面的学习中已经见过伽利略斜面实验。现在换个角度重新讨论，可以降低难度。另外，伽利略斜面实验也是探究机械能守恒定律的典型案例。在该典型案例的分析与讨论中，要充分展开学生的思维过程。目的是对学生进行方法和观念的培养，使学生理解守恒思想的重要性，并希望学生在今后的学习中用这样的方法和观念去认识问题。

能量转化与守恒定律虽然是适合各个领域的普遍关系，但考虑学生的基础，教学内容宜限定在学生比较容易理解和接受的机械能范围。教师教学时可围绕以下几个方面展开：①举例说明生活中的一些守恒关系。②分析伽利略理想斜面实验，了解动能、势能及其转化。③让学生认识到守恒思想是物理学研究的重要方法。

（2）动能与势能的相互转化

动能与势能概念比较抽象，应通过实例分析的方法，说明动能和势能之间可以相互转化。这样就把抽象的内容具体化、形象化了。教学中，要有意识地补充实验视频等素材，帮助学生借助形象思维有效地完成思维活动。通过实例的分析，使学生了解势能和动能相互转化的定性关系，知道一种能量减少，必然导致另一种能量的增加。最后提出动能和势能转化有什么定量关系，让

学生进行讨论与交流并提出猜想，调动学生的积极性，加强师生的互动性。

教学片段

动能与势能的相互转化

在粉笔头下落的过程中，重力势能和动能都有变化，自然界中动能和势能变化的事例很多，下面我们共同观察这类现象，并思考动能和势能的变化。

实验1：滚摆实验。

出示滚摆，并简单介绍滚摆的构造及实验的做法。事先应在摆轮的侧面某处涂上鲜明的颜色标志，告诉学生观察颜色标志，可以判断摆轮转动的快慢。

引导学生复述并分析实验中观察到的现象。开始释放摆轮时，摆轮在最高点静止，此时摆轮只有重力势能，没有动能。摆轮下降时其高度降低，重力势能减少。摆轮旋转着下降，而且越转越快，其动能越来越大。摆轮到最低点时，转动最快，动能最大，其高度最低，重力势能最小。在摆轮下降的过程中，它的重力势能逐渐转化为动能。仿照摆轮下降过程的分析，得出摆轮在上升过程中，摆轮的动能逐渐转化为重力势能。

实验2：单摆实验。

此实验摆绳宜长些，摆球宜重些。最好能挂在天花板上，使单摆在黑板前平行于黑板振动，以便在黑板上记录摆球运动路线中左、右最高点和最低点的位置。分析单摆实验时，摆球高度的变化比较直观，而判断摆球速度大小的变化比较困难。可以从摆球在最高点前后运动方向的不同分析摆球运动到最高点时的速度为0，作为这一难点的突破口。

综述实验1、2，说明动能和重力势能是可以相互转化的。之所以能够相互转化是因为物体受到重力的作用，是重力做功的结果。

实验3：弹性势能和动能的相互转化。

实验可分两步做。首先手持着小球将弹簧片推弯，而后突然释放小球，小球在弹簧片的作用下在水平槽内运动。在此过程中，弹性势能转化为动能。第二步实验，让小球从斜槽上端滚下，让学生观察小球碰击弹簧片的过程。然后分析动能转化为弹性势能和弹性势能转化为动能的过程。得出：动能和弹性势能也是可以相互转化的，之所以能够相互转化是因为弹簧弹力的作用，是弹簧弹力做功的结果。

自然界中动能和势能相互转化的事例很多。其中有一些比较直观，例如，物体从高处落下、瀑布流水等，这些都能说明动能和势能的转化。有些事例比较复杂，例如，踢出去的足球在空中沿一条曲线（抛物线）运动时，动能和势能是如何转化的呢？（画足球轨迹，依图分析）首先可分析足球离地面的高度的变化，这是判断足球重力势能变化的依据。在上升过程中足球的重力势能增加，在下降过程中足球的重力势能减少。接着再分析足球的速度。足球在最高点时不再上升，说明它不能再向上运动。所以，足球在上升过程中，速度逐渐变小，在下降过程中速度又逐渐变大。通过以上分析，可以看到足球在上升阶段动能转化为重力势能，在下降阶段重力势能转化为动能。

（3）机械能守恒定律

要有意识地通过分析，让学生明白机械能守恒定律的成立是有条件的。如教材中思考与讨论：一个小球在真空中做自由落体运动，另一个同样的小球在黏性较大的液体中由静止开始下落（图8–7）。它们都由高度为h_1的地方下落到高度为h_2的地方。在这两种情况下，重力做的功相等吗？重力势能的变化相等吗？动能的变化相等吗？重力势能各转化成什么形式的能？前者由于只有重力做功，机械能守恒。后者机械能尽管不守恒，但能量的总量也是保持不变的。从而使学生领悟到机械能既不可能凭空产生，也不会无缘无故消失，机械能的增减是除了重力和弹簧弹力以外的力做功的必然结果。

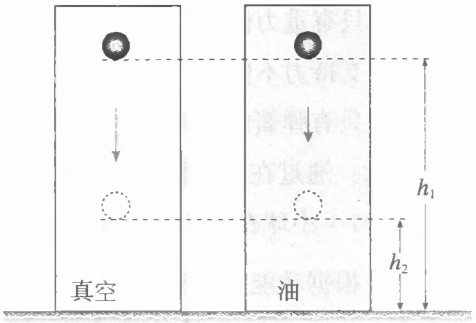


图8–7

守恒定律不仅给处理问题带来方便，而且有更深刻的意义。世界是千变万化的，但人们发现有些物理量在一定条件下是守恒的，机械能就是其中之一。所以在物理学中寻求“守恒量”已经成为研究工作的一个重要方面。

关于机械能守恒定律的推导，除了教材中提供的物体沿光滑曲面下滑的场景外，教学中还可以分析物体做竖直上抛运动及平抛运动时的受力情况、做功情况及能量转化情况，并做进一步归纳总结。在只有重力做功的情况下，不论物体做直线运动还是曲线运动（如竖直上抛运动、平抛等），物体的机械能总量保持不变。

对于只有弹簧弹力做功情况下的机械能守恒，仅通过举例定性说明。例如，在光滑的水平面上，放开一根被压缩的弹簧，它可以把跟它接触的小球弹出去，这时弹簧的弹力做功，弹簧的弹性势能转化为小球的动能。在弹性势能和动能的相互转化中，如果只有弹力做功，动能和弹性势能之和保持不变，即机械能守恒。

在分析运用机械能守恒定律求解的例题时，教师首先要引导学生通过受力分析和运动分析展示清晰的物理情景，其次要抓住机械能守恒的条件进行分析判断，最后在满足守恒条件的情况下，运用机械能守恒定律列式求解。如果不满足，则运用动能定理或牛顿运动定律去分析求解。在此基础上，教师要引导学生对牛顿运动定律、动能定理和机械能守恒定律的解题思路进行比较，更好地理解机械能守恒定律。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共6道习题，主要围绕机械能守恒的条件和机械能守恒定律的应用展开，目的是帮助学生掌握用机械能守恒定律解决问题的基本方法，领悟用机械能守恒定律解决问题的优越性。第1题通过生活中的各种实例，加深理解机械能守恒的条件。第2题帮助学生揭示规律之间的联系和区别，弄清楚物理规律的来龙去脉。第3题帮助学生认识到对于做曲线运动的物体系统，有时从能量的角度入手往往会简便的多。第4题使学生的认识由单个物体（实际上是该物体和地球组成的系统）机械能守恒的表达式过渡到多个物体机械能守恒的表达式。第5题通过实例培养学生善于根据物理过程的发生、发展和变化过程进行物理情景展示的能力，使学生认识到展示清楚物理情景是解题的关键，根据物理情景和物理条件来选择相应的物理规律解题是处理物理问题的基本

原则。第6题通过联系实际让学生体验物理学在生活生产中的应用，培养学生应用物理知识分析解决问题的能力，使学生在运用微元法处理具体模型的过程中提升学科素养。

1．A中除重力外还有空气阻力做功，机械能不守恒。

B中只有重力做功，机械能守恒。

C中支持力不做功，但除重力外还有拉力做功，机械能不守恒。

D中只有弹簧的弹力对小球做功，小球和弹簧组成的系统机械能守恒。

提示：通过在具体物理现象中判断机械能是否守恒，加深对机械能守恒条件的认识。

2．（1）小球在从A点下落至B点的过程中，只有重力做功，曲面的支持力与速度方向垂直，不做功。根据动能定理有$mg(h_1-h_2)=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$。

（2）小球在从A点下落至B点的过程中，只有重力做功，由重力做功与动能变化的关系$mg(h_1-h_2)=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$可得$mgh_1+\frac{1}{2}mv_1^2=mgh_2+\frac{1}{2}mv_2^2$。等式左边表示物体在$A$点时的机械能，等式右边表示物体在$B$点时的机械能，小球从$A$点运动到$B$点的过程中，机械能守恒。

3．（1）石块从抛出到落地的过程中，只有重力做功，所以机械能守恒。设地面为零势能面，落地时的速度为v_t，根据机械能守恒定律有$\frac{1}{2}mv_0^2+mgh=\frac{1}{2}mv_t^2$，$v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}=\sqrt{5^2+2\times10\times10}\ \text{m/s}=15\ \text{m/s}$。

若根据动能定理可得$mgh=\frac{1}{2}mv_t^2-\frac{1}{2}mv_0^2$，$v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}=15\ \text{m/s}$。

（2）由$v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}$可知，石块落地时速度的大小与石块初速度大小和石块抛出时的高度有关，与石块的质量和石块初速度的仰角无关。

提示：练习分别应用动能定理和机械能守恒定律解决实际问题，并通过函数表达式讨论物理量之间的关系，让学生感受守恒定律不仅给处理问题带来方便，而且在一定条件下可以用这些“守恒量”来表示物理世界变化的规律。

4．$\sqrt{gh}$

提示：设A球的质量为m，以A球、B球和轻绳组成的系统为研究对象，根据机械能守恒定律有$3mgh-mgh=\frac{1}{2}(m+3m)v^2$，解得$v=\sqrt{gh}$。

对A球由动能定理可得$W_T-mgh=\frac{1}{2}mv^2$，对B球由动能定理可得$3mgh-W_T=\frac{1}{2}(3m)v^2$，然后得到系统机械能守恒的表达式$3mgh-mgh=\frac{1}{2}(m+3m)v^2$，然后进行求解。

5．（1）小球从位置A至位置C的过程开始阶段，弹性势能逐渐减少，动能和重力势能逐渐增大，当弹簧对小球向上的弹力大小与小球所受重力大小相等时，小球动能最大。之后，弹性势能继续减小，动能开始减小，重力势能逐渐增大。当弹簧恢复到自然长度时，弹性势能为0，之后，重力势能仍然逐渐增大，动能逐渐减小，到达C点时，动能减少到0，重力势能达到最大。

（2）小球从位置A运动到位置C的过程中，机械能守恒。故在位置A，弹簧的弹性势能$E_P=mg(h_{AB}+h_{AC})=0.2\times10\times(0.1+0.2)\ \text{J}=0.6\ \text{J}$。小球在最高点$C$的速度为0，故小球在位置$C$的动能为0。

提示：以竖立弹簧模型为情景，通过小球合力的变化分析速度大小的变化，通过速度大小的变化分析动能的变化，通过高度的变化分析重力势能的变化，通过弹簧形变量的变化分析弹性势能的变化，通过机械能守恒分析小球的动能、势能和弹簧弹性势能之间的相互转化，以进一步理解相关的物理概念和规律，培养学生根据物理情景和物理条件选择相应的物理规律分析问题的良好思维习惯。

6. 4.6×10^5 W

提示：每层楼按3 m计算，对质量为m的水，设喷射速度为v，从离开喷口至最高点的过程中，由机械能守恒定律得$mgh=\frac{1}{2}mv^2$，由此解得$v=\sqrt{2gh}\approx49$ m/s。

在喷管喷水口处，设经过Δt的时间喷出水的质量为Δm，那么$\Delta m=\rho\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2v\Delta t$，$\Delta t$时间内电动机做功转化为水的动能$P\Delta t=\frac{1}{2}\Delta mv^2$。计算得$P=4.6\times10^5$ W。

通过喷泉喷出水柱的场景让学生体验物理学在生活中的应用，通过小水柱竖直上抛运动求抛出时的初速度，再利用微元法处理小水柱Δm从电动机做功转化为水的动能，以培养学生的建模能力。

第5节　实验：验证机械能守恒定律

1. 教学目标

（1）理解验证机械能守恒定律的原理。会设计实验方案，确定需要测量的物理量，采用正确的方法测量相关的物理量。

（2）能够控制实验条件，正确进行实验操作，获取物体下落的高度和速度大小等数据，会分析动能增加量小于重力势能减少量的原因，并采取相应措施，以减小实验误差。

（3）树立实事求是的科学态度，培养认真严谨的科学精神。

2. 教材分析与教学建议

本节的目的是让学生在理论上学习机械能守恒定律之后，通过对实验数据的分析处理，对机械能守恒定律及守恒条件有更深刻的认识。

本节先从实验思路的讨论开始，创设机械能守恒的情景。研究对象确定后，根据实验目的测量相应的物理量，然后进行数据的分析、处理。

本节教学的重点与难点是实验的设计思路、瞬时速度的测定及数据的处理及误差分析。教师应在教材内容的基础上，针对难点的突破进行教学设计。可以从以下几个方面展开教学。

（1）实验思路

机械能守恒的前提是“只有重力或弹簧弹力做功”，因此创设的情景一定要满足这一条件。学生可以提出自由落体运动、竖直上抛运动、平抛运动、物体沿光滑斜面的运动、单摆等符合机械能守恒的情景，在充分讨论后确定合适的方案。教材提供的案例一个是自由落体运动，一个是

滑块沿斜面下滑的运动。如果实验条件允许的话，也可以采用其他方案。

（2）物理量的测量

对于需要测量的物理量应从实验目的、实验原理及实验方案入手，让学生根据原理明确需要测量高度差和速度大小。在引导学生把握好瞬时速度的测定、计数点的选择等几个关键环节后，就应该放手让学生进行实验。

（3）数据分析

得到纸带后，可用问题和讨论的方式来解决数据处理的难点。如在处理实验数据时，最好选择哪两个位置作为过程的开始和终结点？如何测量瞬时速度？引起误差的原因有哪些？为了尽可能减小实验误差，应该在哪些方面进行改进？写实验报告时应该包括哪些内容？在这些问题都得到解决之后，放手让学生完成实验报告。

教学片段

通过实验验证机械能守恒定律

一、实验目的

通过实验验证机械能守恒定律

二、实验原理

如图8–8所示，质量为m的物体从O点自由下落，以地面作为零重力势能面，如果忽略空气阻力，下落过程中任意两点A和B的机械能守恒，即

$$\frac{1}{2}mv_A^2+mgh_A=\frac{1}{2}mv_B^2+mgh_B$$

$$\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2=mgh_A-mgh_B$$

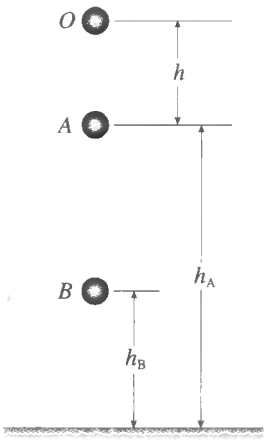


图8–8

等式说明，物体重力势能的减少等于动能的增加。为了方便，可以直接从开始下落的O点至任意一点(如图8–8中的A点)来进行研究，这时应有$\frac{1}{2}mv_A^2=mgh$，即为本实验要验证的表达式，式中h是物体从O点下落至A点的高度，v_A是物体在A点的瞬时速度。

三、实验器材

打点计时器，低压交流电源，带有铁夹的铁架台，纸带，复写纸，带夹子的重物，刻度尺，导线两根。

四、实验步骤

1. 安装置：按图8–9将检查、调整好的打点计时器竖直固定在铁架台上，接好电路。

2. 打纸带：将纸带的一端用夹子固定在重物上，另一端穿过打点计时器的限位孔用手提着纸带使重物静止在靠近打点计时器的地方。先接通电源，后松开纸带，让重物带着纸带自由下落。

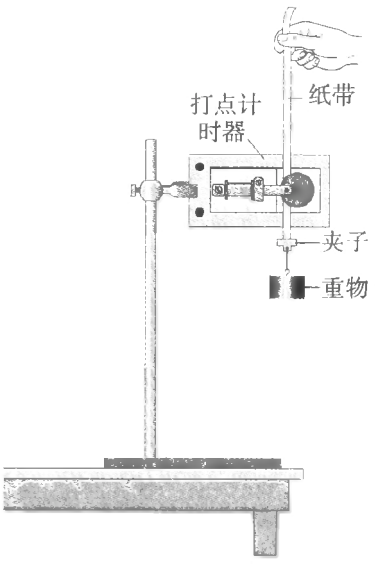


图8–9

更换纸带重复做3~5次实验。

五、数据处理

方法一：利用起始点和第n点计算

代入mgh_n和$\frac{1}{2}mv_n^2$，如果在实验误差允许的条件下，mgh_n和$\frac{1}{2}mv_n^2$相等，则验证了机械能守恒定律。

方法二：任取两点计算

（1）任取两点A、B测出h_{AB}，算出mgh_{AB}。

（2）算出$\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2$的值。

（3）在实验误差允许的条件下，若$mgh_{AB}=\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2$，则验证了机械能守恒定律。

方法三：图像法

从纸带上选取多个点，测量从第一点到其余各点的下落高度h，并计算各点速度的平方v^2，然后以$\frac{1}{2}v^2$为纵轴，以h为横轴，根据实验数据作出$\frac{1}{2}v^2-h$图线。若图线是一条过原点且斜率为g的直线，则验证了机械能守恒定律。

六、误差分析

1. 本实验中因重物和纸带在下落过程中有各种阻力(如空气阻力、打点计时器阻力)做负功，故动能的增加量ΔE_k稍小于重力势能的减少量ΔE_p，即$\Delta E_k<\Delta E_p$，这属于系统误差。改进的办法是调整器材的安装，尽可能地减小阻力。

2. 本实验的另一个误差来源于长度的测量，属偶然误差。减小误差的办法是测下落距离时都从O点量起，一次将各打点对应的下落高度测量完，或者多次测量取平均值来减小误差。

七、注意事项

1. 打点计时器要稳定固定在铁架台上，打点计时器平面与纸带限位孔调整在竖直方向，以减小摩擦阻力。

2. 应选用质量和密度较大的重物，增大重力可使阻力的影响相对减小，增大密度可以减小体积，可使空气阻力减小。

3. 实验中，需保持提纸带的手不动，且保证纸带竖直，待接通电源，打点计时器工作稳定后，再松开纸带。

4. 测下落高度时，要从第一个打点测起，并且各点对应的下落高度要一次测量完。

5. 速度不能用$v_n=gt_n$或$v_n=\sqrt{2gh_n}$计算，因为只要认为加速度为g，机械能一定守恒，即相当于用机械能守恒定律验证机械能守恒定律，况且用$v_n=gt_n$计算出的速度比实际值大，会得出机械能增加的结论，而因为摩擦阻力的影响，机械能应该减小，所以速度应从纸带上直接测量计算。同样的道理，重物下落的高度h，也只能用刻度尺直接测量，而不能用$h_n=\frac{1}{2}gt_n^2$或$h_n=\frac{v_n^2}{2g}$计算得到。

3. “练习与应用”参考答案与提示

本节共两道习题，在学习了机械能守恒定律的基础上，通过实验测量及数据处理，加深对机械能定律及其应用条件的认识，让学生具有设计探究方案和获取证据的能力，会使用多种方法和手段分析、处理信息，描述、解释探究结果和变化趋势。具有交流与合作的意愿与能力，能准确表述、评估和反思探究过程与结果。第1题根据实验要求和实验方案选择实验器材，并完成实验，通过对实验误差的分析培养学生对实验结果进行反思的能力。第2题在第1题的基础上，让学生熟悉测定瞬时速度的方法，培养学生采集、处理数据的能力。

1.（1）A、B；（2）减少mgh_B，增加$\frac{m(h_C-h_A)^2}{8T^2}$；（3）存在空气阻力和摩擦阻力的影响

提示：练习根据实验要求和实验方案选择实验器材完成实验，通过对实验误差的分析培养学生对实验结果进行反思的能力。

2.（1）mgl；（2）滑块和挡光条的总质量$m_{总}$；（3）$mgl=\frac{1}{2}(m_{总}+m)\left(\frac{d}{t}\right)^2$。

三、“复习与提高”参考答案与提示

通过章末习题加强对功、功率、动能、重力势能、弹性势能等基本概念的理解，巩固计算变力做功的方法，练习应用动能定理、机械能守恒定律、能量守恒定律分析解决实际问题，能将实际问题中的对象和过程转换成所学的物理模型，并运用能量守恒的观点对综合性物理问题进行分析和推理，获得结论作出解释。

A组

1. 6.3 m/s

提示：从将球向下抛出到球上升到最高点，小球减小的动能$\Delta E_k=\frac{1}{2}mv_0^2$，小球增加的重力势能$\Delta E_p=mg\Delta h$，由机械能守恒定律有$\Delta E_k=\Delta E_p$，解得$v_0=\sqrt{2g\Delta h}=\sqrt{2\times9.8\times2}$ m/s = 6.3 m/s。

以小球先下降、后上升的往返运动为背景复习机械能守恒定律的简单应用。在应用机械能守恒定律分析解决问题时，只需考虑运动的初状态和末状态，不必考虑两个状态间过程的细节。

2.（1）2.4×10^4 W；（2）4.8×10^4 W

提示：（1）起重机匀加速上升的加速度$a=\frac{v}{t}=\frac{4}{2}\text{ m/s}^2=2\text{ m/s}^2$，由$F-mg=ma$得起重机的牵引力$F=mg+ma=1\times10^3\times(10+2)\text{ N}=1.2\times10^4\text{ N}$，起重机在2 s内上升的高度$h=\frac{1}{2}at^2=4$ m，起重机在这2 s内的输出功率$P=\frac{Fh}{t}=\frac{1.2\times10^4\times4}{2}\text{ W}=2.4\times10^4\text{ W}$。

（2）起重机在2 s末的输出功率$P=Fv=1.2\times10^4\times4\text{ W}=4.8\times10^4\text{ W}$。

以起重机将货物匀加速竖直吊起为情景，根据初、末速度和时间可求加速度、位移、平均速度，根据牛顿第二定律可求牵引力，根据功的定义或动能定理可求牵引力的功，根据$P=\frac{W}{t}$或$P=Fv$可求功率，培养学生综合应用物理知识、从多个视角分析解决物理问题的能力。

3.（1）如图8-10所示。

（2）$F_N=mg\cos\theta$，$F_f=\mu F_N$。重力做功$W_G=-mgx\sin\theta$，推力做功$W_F=Fx$，支持力做功$W_N=0$，摩擦力做功$W_f=-F_fx=-\mu mgx\cos\theta$。

（3）总功$W_{总}=W_F+W_G+W_f+W_N=Fx-mgx\sin\theta-\mu mgx\cos\theta$。

（4）合力$F_{合}=F-mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta$。

（5）合力做功$W_{合}=F_{合}x=(F-mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta)x$，显然$W_{总}=W_{合}$。

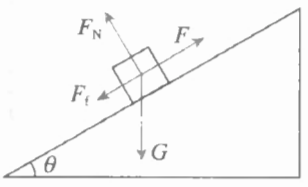


图8-10

4. $\frac{P}{v}$；$\frac{3P}{mv}$

提示：（1）当汽车的牵引力等于受到的阻力时，汽车达到最大速度，即$F=F_f$。由$P=Fv$得行驶过程中汽车受到的阻力大小$F_f=F=\frac{P}{v}$。

（2）当汽车的车速为$\frac{v}{4}$时，汽车的牵引力$F=\frac{4P}{v}$。由$F-F_f=ma$解得汽车的瞬时加速度的大小为$a=\frac{3P}{mv}$。

5.（1）$\frac{v_0^2}{2g}$；（2）$\frac{v_0^2}{6g}$；（3）$\frac{v_0^2}{4g}$；（4）$\frac{v_0^2}{3g}$；（5）$\frac{3v_0^2}{8g}$

提示：（1）抛出时物体的机械能$E_0=\frac{1}{2}mv_0^2$，物体上升到最高点时的机械能$E_1=mgh$，由机械能守恒定律可知$E_0=E_1$。联立解得$h=\frac{v_0^2}{2g}$。

（2）物体的重力势能为动能的一半时的机械能$E_2=mgh_1+E_{k1}$。由题设条件知$mgh_1=\frac{1}{2}E_{k1}$，再由机械能守恒定律知$E_0=E_2$。联立解得$h_1=\frac{v_0^2}{6g}$。

（3）物体的重力势能和动能相等时的机械能$E_3=mgh_2+E_{k2}$，由题设条件知$mgh_2=E_{k2}$，再由机械能守恒定律知$E_0=E_3$。联立解得$h_2=\frac{v_0^2}{4g}$。

（4）物体的动能是重力势能的一半时的机械能$E_4=mgh_3+E_{k3}$，由题设条件知$E_{k3}=\frac{1}{2}mgh_3$，再由机械能守恒定律知$E_0=E_4$。联立解得$h_3=\frac{v_0^2}{3g}$。

（5）物体的速率为$\frac{v_0}{2}$时的机械能$E_5=mgh_4+\frac{1}{2}m\left(\frac{v_0}{2}\right)^2$，由机械能守恒定律知$E_0=E_5$，联立解得$h_4=\frac{3v_0^2}{8g}$。

6.（1）$\frac{1}{2}mv_1^2$；（2）$\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2+2mgR$

提示：（1）物体由A到B的过程中机械能守恒，弹簧压缩至A时的弹性势能$E_p=\frac{1}{2}mv_1^2$。

（2）物体由B到C的过程中，阻力做功为W_f，由动能定理知$-2mgR+W_f=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，由此解得$W_f=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2+2mgR$。

B组

1.（1）$mgl(1-\cos\theta)$；（2）$\sqrt{2gl(\sin\theta+\cos\theta-1)}$

提示：（1）小球从P点缓慢地移动到Q点的过程中，水平拉力F变大，由动能定理可知$W_F-mgl(1-\cos\theta)=0$，解得$W_F=mgl(1-\cos\theta)$。

（2）小球在水平恒力$F=mg$的作用下从P点运动到Q点，故$Fl\sin\theta-mgl(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv^2$，解得$v=\sqrt{2gl(\sin\theta+\cos\theta-1)}$。

2. 2∶1；4∶1

提示：由动能定理可知$W_A=0-\frac{1}{2}m_Av_0^2$，$W_B=0-\frac{1}{2}m_Bv_0^2$，解得$\frac{W_A}{W_B}=\frac{m_A}{m_B}=\frac{2}{1}$。由图8-11可知A的位移$x_A=\frac{v_0}{2}t$，B的位移$x_B=v_0t$。又因$W_A=$

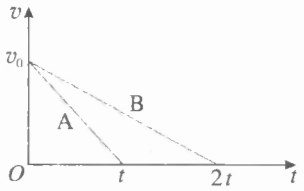


图8-11

$-F_A x_A$，$W_B=-F_B x_B$。联立解得$\frac{F_A}{F_B}=\frac{W_A x_B}{W_B x_A}=\frac{4}{1}$。

通过由动能定理求功、由速度图像求位移、由功的定义式求力，培养学生综合应用所学的物理知识解决实际问题的能力。

3.（1）7 536 m^3/s；（2）1.63×10^5 J/s；（3）1.63×10^4 W

提示：（1）Δt时间内冲击叶片圆面的气流的体积为$\Delta V=Sv\Delta t$，又因$S=\pi r^2$，故$\frac{\Delta V}{\Delta t}=v\pi r^2=7\,536\ m^3/s$。

（2）Δt时间内冲击叶片圆面的气流的动能为$\Delta E_k=\frac{1}{2}\rho\Delta V v^2$，单位时间内气流的动能$\frac{\Delta E_k}{\Delta t}=\frac{1}{2}\rho\frac{\Delta V}{\Delta t}v^2=1.63\times10^5$ J/s。

（3）风力发电机发电的功率$P=\eta\frac{\Delta E_k}{\Delta t}=1.63\times10^4$ W。

通过对风力发电情景的分析，培养学生建立流体模型的能力。

4. 小木块在斜面上受到的滑动摩擦力$F_1=\mu mg\cos\theta$，在水平面上受到的滑动摩擦力$F_2=\mu mg$。整个过程中滑动摩擦力做功$W_f=-F_1\frac{h}{\sin\theta}-F_2\left(x-\frac{h}{\tan\theta}\right)$，重力做功为$W_G=mgh$，由动能定理得$W_G+W_f=0$，联立解得$x=\frac{h}{\mu}$。由此可知，$x$与斜面倾角$\theta$无关。

5.（1）$l-\frac{mg}{k}$；（2）$mg(h+x)$

提示：（1）铁球在下落过程中先加速后减速，当铁球速度最大（动能最大）时加速度为0，此时弹簧的压缩量为x_1，对小球有$mg-kx_1=0$。铁球距地面的高度为$H=l-x_1$，因此解得$H=l-\frac{mg}{k}$。

（2）铁球下落到最低点时速度为0，则铁球下落到高度为（$h+x$）处时，铁球的动能变化量为0。根据机械能守恒定律，弹簧的弹性势能的增加量等于铁球重力势能的减少量，故铁球下落到最低点时，弹簧的弹性势能最大，大小为$mg(h+x)$。

6. $\sqrt{\frac{2}{5}gh}$

提示：A受到的拉力是B受到的拉力的两倍，A上升。当A上升$h_A=h$时，B下降$h_B=2h$，设此时A、B的速度分别为v_A、v_B，则$v_B=2v_A$。再根据A、B组成的系统机械能守恒$mgh_B=mgh_A+\frac{1}{2}mv_A^2+\frac{1}{2}mv_B^2$，解得$v_A=\sqrt{\frac{2}{5}gh}$。

7. 10^{10} J

提示：坝内水的质量$m=\rho(h_1-h_2)S=2.0\times10^9$ kg，这一部分水的重力势能$E_p=mg\frac{h_1-h_2}{2}=2.0\times10^{10}$ J。发电时减少的重力势能$\Delta E_p=E_p-0$，一次落潮所发的电能$E=\eta\Delta E_p=0.5\times2.0\times10^{10}$ J$=10^{10}$ J。

四、参考资料

1. 能量守恒定律的确立

早在17世纪初，伽利略提出的观点中就有机械能守恒思想的萌芽。后来，莱布尼茨又引入“活力”的概念并明确提出“活力守恒”的观念。不过，一直到19世纪初，始终没有哪一位科学家提出能量守恒定律。到了19世纪30年代，蒸汽机的应用帮助人们在热运动与机械运动方面积累了丰富的知识。另外，电学、化学和生物学等各方面的进展，以及人们尝试制造永动机的失败也启示人们慢慢开始想到了能量的守恒。到了19世纪40年代初，分属于不同国家、不同专业的数十位科学家，分别通过不同的途径，各自独立地在这个方面的研究中取得了进展。

1840年，德国的迈尔在一艘从荷兰驶往东印度的船上当随船医生。当船航行到热带地区时，他发现海员患者的静脉血比在欧洲时要红。在拉瓦锡燃烧理论的启示下，他认为这是由于血液含氧较多的缘故。因为在高温的情况下，人的机体只需要吸收食物中较少的热量，所以机体中食物的燃烧过程减弱了，而在静脉血里留下了较多的氧。由此出发，迈尔认为，食物所含的化学能，就像机械能一样，可以转化为热。他还听到海员们闲谈时说，暴风雨时海水比较热，这也启发他联想到热与机械运动的相当性。他认为落体在重力影响下获得“活力”，与气体受压缩时产生热具有类似性。于是，在1841年航行结束后，他写了一篇论文《论力的量和质的测量》，论述各种自然力之间的相互转化。可惜由于缺少精确的实验数据而未获发表。这激励迈尔发奋自学了数学和物理，并接受朋友的劝告，决心用实验来证实自己的思想。1842年他在德国《化学与药学年刊》杂志上发表了题为《论无机界的力》的论文。文中迈尔从“无不生有，有不变无”的哲学观念出发，得出了“力就是不灭的、能够转化的、无重量的客体”的结论。他所说的“力”就是“能量”的意思。他把这个思想运用到“落体力”（势能）、“运动的力”（动能）和热的转化与守恒，并根据气体比热的测量值，在世界上第一个得出了热的机械当量（即热功当量）为3.58焦耳每卡。1845年，迈尔又自费出版了一篇更重要的论文《论有机运动与新陈代谢》。文中他首先说明了“力”的守恒和转化定律，认为它是支配宇宙的普遍规律；接着考察了5种不同形式的“力”，即“运动的力”“下落力”“热”“电”和“化学力”；描写了运动转化的25种情况，并将热功当量的值由3.58焦耳每卡修改为3.60焦耳每卡。1848年，迈尔发表了《通俗天体力学》一文，文中他解释了陨石的发光是由于它们在大气中损失了动能，并应用能量守恒定律解释了潮汐的涨落。

焦耳是曼彻斯特一个酿酒师的儿子。为了提高他父亲所创办的酿酒厂的工作效率，他企图以电磁机（即磁电式发电机）代替蒸汽机，他很早就关心各种物理力，特别是在当时已显示出其发展前景的电力的应用价值的研究。焦耳一开始就沿着正确的道路前进，他倾力于实验工作，在1840年就发现了关于电流热效应的焦耳定律。在实验过程中他认识到机械、热、电、化学力等

是相当的，并可以互相转化，于是他致力于热功当量的实验测定，初步成果反映在1843年8月21日宣读的一篇论文《磁电的热效应和热的机械值》中。可是，这里已被焦耳用实验证实了的热只是能量变换的一种形式的结论以及焦耳所透露的普遍的能量守恒定律的思想，却遭到一些物理学家的质疑。焦耳决心以更多、更精确的实验证明他的结论。1849年6月，英国皇家学会刊印了焦耳的重要论文《论热的机械当量》，这是焦耳进行了摩擦生热的实验后写成的。文中焦耳总结了自己以往的工作，并介绍了现在经常被写入教材上的那个利用摩擦生热测定热功当量的经典实验。此后，焦耳还继续进行他的实验测量，一直到1878年，他前后用了近40年的时间，做了多次实验，确定了热功当量的精确数值，为能量守恒定律的建立提供了坚实可靠的实验基础。

军医出身的德国生理学家和物理学家亥姆霍兹在数学和物理上造诣深厚。他积极倡导用物理学和化学的技术来发展生理研究。他认为，生命力论实际上是赋予了生命体以永动机的性质。所以他的论证也是由永动机不可能实现入手的。在1847年自费出版的《论力的守恒》一书中，亥姆霍兹论述了活力守恒原理和力的守恒原理。他把永动机之不可能同中心力（即有心力）的保守性相联系，得出在这种力的作用下“系统中的张力和活力之和是始终不变的”。他所说的“张力”和“活力”就分别指的是势能和动能。亥姆霍兹把他所得出的能量守恒原理推广到光、热、电磁现象、化学运动以及生物机体内进行的过程上，指出“这一定律与自然科学中任何一个已知现象都不矛盾”。亥姆霍兹的著作中包括了迈尔的深刻思想，采用了焦耳等人的实验数据，充分地运用了精确的数学方法和严密的逻辑推理，使用了物理学家惯用的语言，因而便于被物理学家所理解和接受。他在促使人们最终确认能量守恒定律上起了重大的作用。

除了上述这三个人以外，发现能量守恒定律思想的众多科学家中还有英国的电化学家格罗夫、丹麦工程师格尔丁、法国的工程师赫因和卡诺以及德国化学家莫尔等。

2. 机械功的定义和计算

机械功是所有广义功中最基本，也是最重要的一类。实际上，顾名思义，广义功的概念是由机械功推广而来的。由于机械功是系统机械能传递与转化的量度，所以把它与能量，特别是机械能分开来讨论是不可能的。以下我们把机械功简称为功。

一个质点m，在恒力$\boldsymbol{F}$的作用下发生了一段有限的直线位移$\Delta\boldsymbol{r}$，$\boldsymbol{r}$是质点m相对于所选的参考系固定的任意点O的位置矢量，$\Delta\boldsymbol{r}$与$\boldsymbol{F}$之间的夹角为θ，如图8-12，则力$\boldsymbol{F}$对该质点所做的功W被定义为

$$W=\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{r}=F\cdot|\Delta\boldsymbol{r}|\cdot\cos\theta \tag{1}$$

这个定义式是说，恒力对质点在一段直线位移上所做的功，等于该力与质点位移的标积，或说等于力的大小、位移的大小及力与位移间夹角的余弦三者的乘积。

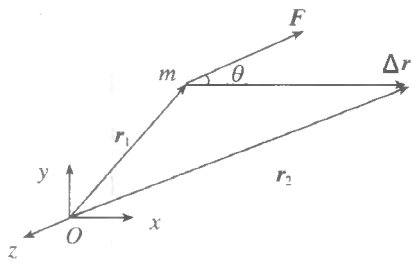


图8-12

由这个定义式可以讨论几个问题。

（1）质点是一种理想模型，实际中并不存在，对质点定义功，是为了概念和计算的精确。在功的定义中涉及的（线）位移，原则上也只对质点有定义。经推广，可用于做平动的

刚体及一般力学系统的平动分运动。

但是，在现行的初中物理教材中没有介绍过质点模型。高中教材中虽做了介绍，但在其力学的动力学部分中根本没有使用，所以把做功与被做功的对象统称为“物体”。这样做的一个好处是，可以使初学者更容易理解“功是能量变化的量度”这一本质。“能量变化”是必定要发生在实际物体之中或实际物体之间的。

（2）凡是把被做功的对象称之为“物体”的教材，对做功过程中发生的位移都说是“力的作用点的位移”或“物体的位移”。

力的作用点也称为物体的受力点，这也是一个抽象的概念，实际中不存在物体的受力部位是一个没有尺寸大小的几何点的情况。如果物体的受力部位比较集中，那么在一定条件下可以把受力部位视为一个点，这就是力的作用点。例如，用一根细绳牵引物体，那么物体上与绳的连接部位就可以视为绳对物体的拉力的作用点。这里，绳为细绳是条件。所以，所谓“作用点的位移”，一般应理解为物体受力部位能视为质点时该质点的位移。

如上所言，位移只对点有定义。所以，所谓“物体的位移”是指物体可以视为质点时的位移。例如，对一个只做平动的刚体就可以言及它的位移，对于一般物体的平动分运动也可以言及位移。如果这样的位移是在某个力的作用下发生的，就可以用（1）式计算这个力在该位移上对物体做的功。前面已经提过，在现行的初、高中教材中都把被做功的对象称为“物体”，如说“物体在力的方向上通过的距离”“物体……在力的方向上发生一段位移”等，这里的“物体”都应理解为可以抽象成质点的。

（3）功的计算与参考系的选择有关，（1）式须对指定参考系应用。（按习惯，凡不特别说明的，都是以地面参考系为指定参考系。）

做功的两个必要因素——力和位移与参考系的关系是不同的。力学中常见的作用力，有的只和相互作用的质点间的距离有关，如万有引力（含重力）、弹性力，而摩擦力本质是分子力和库仑力，它们也是由相互作用的质点间的距离决定的。有的由宏观上看只与质点间的相对速度有关，如介质阻力。但由经典力学的伽利略变换可知，质点间的距离与彼此间的相对速度与参考系的选择无关。所以，在经典力学范围内，作用力与参考系的选择无关。但是位移作为一个运动学的量，与参考系的选择有明显的关系。这样，综合起来看，一个作用力的功有相对性，即与参考系的选择有关，这是由受力质点的位移有相对性决定的。

（4）在注意了功的相对性之后，再来讨论一个有关位移的问题。由于实际中被做功的对象都是有大小尺寸的物体，所以有时会发生力的作用点（受力质点）在物体上改变位置的情况。作用点的位置改变，不算为作用点对指定参考系发生位移，在这个改变上该力没有对物体做功。例如，如图8-13所示，手捏住一端固定于墙壁上的绳并在绳上滑动，绳上不同点顺次充当手对绳的摩擦力$\boldsymbol{F}$的作用点，但各作用点均未对指定参考系（地面）发生位移，故这个摩擦力对绳不做功。又如，如图8-14所示，子弹头射入一固定于地面的木块中，弹孔壁上的不同点（实际上是一圈）顺次充当子弹对

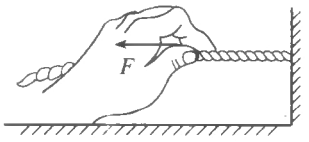


图8-13

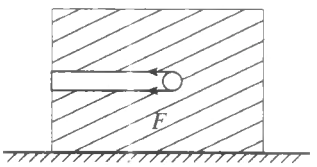


图8-14

木块的摩擦力$\boldsymbol{F}$的作用点，但各作用点均未对指定参考系发生位移，故这个摩擦力对木块不做功。但是，若木块不固定，在子弹射入并停止在其中的过程中，相对地面发生了一段直线平动位移$\Delta \boldsymbol{r}$，则在这个位移上$\boldsymbol{F}$对木块做功，若将$\boldsymbol{F}$视为恒力，则这个功为$\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{r}$。

（5）不同的书中会出现“力做功”及“物体做功”两种提法。那么，这两种提法究竟有没有区别呢？首先应该说，从原则上讲这两种提法是通用的，没有什么不同，说物体做功，也是说物体对被做功的对象所施的力在做功。但仔细玩味，二者还是有些细微差别的。由功是能量的传递与转化的量度这一角度来看，提“物体做功”更实际一些，所以认为它只是“力做功”的简单说法似乎粗糙了一些。另外，对初中学生来说，“力做功”太抽象了，不如“物体做功”容易接受。当到了高层次的学习阶段，所遇到的做功的情况复杂起来了。用“力做功”的提法分析起来就会更精确。什么“作用力的功”“反作用力的功”“合力的功”“分力的功”等都能分得很清楚，表达得很简明。所以，“力做功”的提法会更好用。例如，对“合力的功等于诸分力功的代数和”这一定理的表述和证明，改用“物体做功”的提法就很难进行。

（6）在（1）式中，若有$\frac{\pi}{2}<\theta\leqslant\pi$，则有$W<0$，即力对物体做负功。由动能定理来看，力对物体做负功，是使物体的动能减少。

在习惯上，对这个问题还有一种提法，叫做“物体克服阻力做了功”。对这种提法存在着不同的理解。例如，某书中说：“一个力对物体做了负功，是因为这个力阻碍物体的运动，成为物体运动的阻力。在这种情况下，我们也常常说成是物体克服这个力做了功(取绝对值)。所以，摩擦力对前进中的机车做负功，也可以说成是机车克服摩擦力做了功。向上抛出的物体在向上运动时，重力对物体做负功，也可以说成是物体克服重力做了功。”由这段话可以看出，这里是把这两种提法视为是两件事，在前一件事中被做了负功的物体，在后一件事中成了对外做等值正功的物体，而隐含的转换条件就是“作用力的功与反作用力的功等值异号”。但是，这条“规律”并不是普遍存在的。所以有人对此提出异议，提出了“滑动的物体在克服摩擦阻力前进的过程中，究竟是物体的哪一个力做了正功；物体在克服重力上升的过程中，究竟是物体的哪个力做了正功”等问题。

3. 研究弹簧的弹性势能与形变量的关系

弹性势能无法直接测量。本实验先把弹性势能转换为物体的动能，然后通过测量物体的动能来比较原来弹性势能的大小。具体操作步骤如下。

（1）把两弹簧的一端与滑块连接，另一端固定在导轨的两端。在滑块上装上一个挡光框，待滑块静止后，将光电门放在平衡处，使挡光框正好挡住光线。

（2）将毫秒计的功能开关置S_2挡，时间选择开关用最小的一挡。使滑块偏离平衡位置10.0 cm（从导轨的标尺上可看出），由静止释放。滑块经过光电门时，毫秒计记下挡光时间t，如果挡光框两前沿之间的距离为d，则滑块经过光电门时的速度$v=\frac{d}{t}$。如果滑块的质量是m，则滑块的动能$E_k=\frac{1}{2}mv^2=\frac{md^2}{2t^2}$。

（3）改变滑块偏离平衡位置的距离x（如15.0 cm，20.0 cm，…），重复操作（2），得到若干

组（x，E_k）值。

（4）作E_k-x^2图，得到一条过原点的直线，就可以说明弹簧的弹性势能与它形变量的平方成正比。

4. 实验验证机械能守恒定律

（1）用单摆做定量测量。装置如图8-15所示。在长l约0.5 m的细线下端拴一个质量为m的金属球，细线的上端用两片形状如图中N所示的木片夹牢，木片由烧瓶夹固定在铁架（图中未画出）的上部。水平木条T也装在铁架上部，铁架下部装一个刀片D，刀片平面取水平方向，刀刃应与摆线的运动方向v斜交而不要垂直（见俯视图），这样才能迅速把线割断。仔细调整刀刃的位置，使之恰好能在球摆到最低点时把线割断，割断处应尽量靠近摆球。在水平地面上放一张白纸，上面再放一张复写纸，即图中的E。

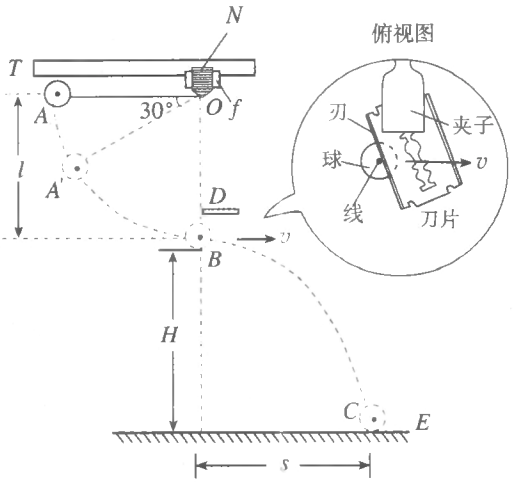


图8-15

实验方法是：在摆球静止时，量出摆长l（悬点O到球心距离）和球的下缘到地面的竖直高度H。以木条T为基准，把摆拉成水平，自A点由静止开始释放。摆到最低点B时，线被割断，球被平抛出去，落在复写纸E上，打出痕迹，记录下落地点C，再量出水平射程s。利用平抛运动规律求出球在B点的速度$v=\dfrac{s}{\sqrt{\dfrac{2H}{g}}}$，再计算球由$A$到$B$过程中动能的增加量$\Delta E_k=\dfrac{1}{2}mv^2$，由$l$值计算球由$A$到$B$过程中重力势能的减少量$\Delta E_k=mgl$，最后看$\Delta E_k$是否与$\Delta E_p$近似相等。

（2）用气垫导轨做实验。先仔细地把导轨调成水平，然后如图8-16所示用垫块把导轨的一端垫高H。滑块m上面装$l=3$ cm的挡光框，使它由轨道上端任一处滑下，测出它通过光电门G_1和G_2时的速度v_1和v_2，就可算出它由G_1到G_2这段过程中动能的增加量$\Delta E_k=\dfrac{1}{2}m\,(v_2^2-v_1^2)$。由图可知$\dfrac{h}{s}=\dfrac{H}{L}$，由已知的$L$值和所取的$H$、$s$值可算出$h$值，再算出滑块由$G_1$到$G_2$这段过程中重力势能的减少量$\Delta E_p=mgh$。由实验结果可看出$\Delta E_k\approx\Delta E_p$，从而证明机械能守恒。实验时，$s$值要取得小些，可减少滑块克服阻力做的功，使结果$\Delta E_k$与$\Delta E_p$两个值更接近。

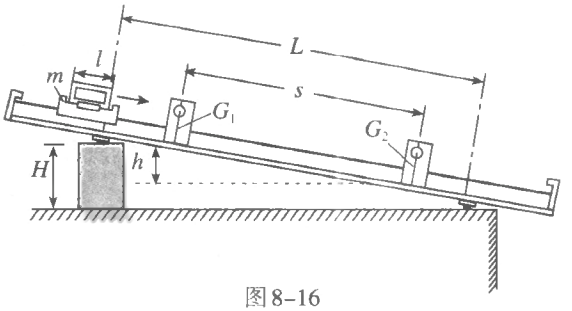


图8-16

（3）也可以用相反的过程来验证，如图8-17所示。用轨道下端支架上的橡皮筋把滑块以足够的初速度（但不宜太大）弹出，使之沿轨道向上端运动，测定它由G_1到G_2过程中动能的减少量和势能的增加量，看两者是否相等，测算方法同前。也可以测算若干点的总机械能，看是否相等。方法如图8-18所示，令滑块m从轨道上端某一点A由静止开始下滑，重复多次，改变光电

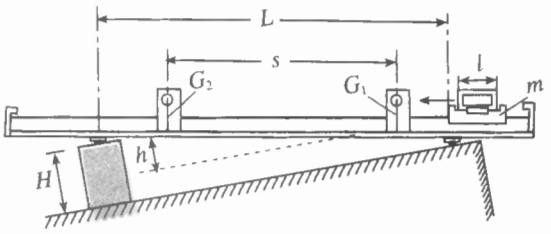


图8-17

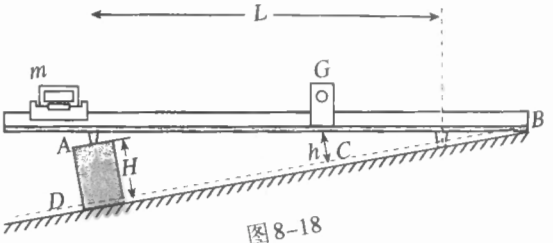


图8-18

门G的位置C，测出滑块到达不同点的速度v。以轨道末端的水平面BD为零势能面，确定所测各点的高度h，$h=\overline{BC}\times\frac{H}{L}$。最后计算出每一点的总机械能$E=E_k+E_p$，看它们是否相等。注意要使$C$点距$A$点近一些，这样实验结果的误差较小。