



普通高中教科书

W U L I

# 物理

必修

第二册



普通高中教科书

# 物理

必修

第二册

主编 熊建文



 广东教育出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

物理：必修. 第二册 / 熊建文主编. —广州：广东教育出版社，2019.8（2022.1重印）  
普通高中教科书  
ISBN 978-7-5548-2816-8

I. ①物… II. ①熊… III. ①中学物理课—高中—教材  
IV. ①G634.71

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第091619号

编写单位 广东教育出版社

主 编 熊建文

副 主 编 王笑君 姚跃涌

本 册 主 编 熊建文

本册副主编 许桂清

核心编写人员（以姓氏笔画为序）

王 恬 艾 静 李朝明

李德安 何琴玉 张军朋

周少娜 蔡冬阳

出 版 人 朱文清

责任编辑 李敏怡 熊力闻 杨 红

责任技编 杨启承 陈 瑾

装帧设计 何 维 梁 杰

物理 必修 第二册

WULI BIXIU DIER CE

广东教育出版社出版

（广州市环市东路472号12-15楼）

邮政编码：510075

网址：<http://www.gjs.cn>

广东新华发行集团股份有限公司发行

广州市新思程印刷有限公司印刷

（广州市番禺区沙头街大富村白仙岗4号）

890毫米×1240毫米 16开本 9印张 225 000字

2019年8月第1版 2022年1月第6次印刷

ISBN 978-7-5548-2816-8

定价：10.59元

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315

著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究

如有印装质量或内容质量问题，请与我社联系。

质量监督电话：020-87613102 邮箱：[gjs-quality@nfc.com.cn](mailto:gjs-quality@nfc.com.cn)

购书咨询电话：020-87772438

# 前言

欢迎进入《物理》必修第二册的学习。

在前面的学习中，我们主要研究的是物体沿直线轨迹的运动。在生产和生活中，运动轨迹为曲线的现象随处可见，这些现象里蕴藏着许多有待探索的问题。例如，投篮时篮球的运动轨迹为什么是曲线？汽车在急转弯前为什么要先减速？……在本书的前两章，我们学习的重点是曲线运动。通过探究平抛运动、匀速圆周运动等运动形式，体会物理学中化繁为简的研究方法，拓展对运动多样性的认识，体会运动和相互作用的内在关联和应用。

接着，我们将目光从地面上的运动，转向宇宙间天体的运动，试着发散我们的思维和想象力：为什么熟透的苹果会下落，而天上的月亮既不落向地球，也不飞向茫茫宇宙离我们而去？牛顿运动定律能用于解决地面上物体的运动问题，在解决天体的运动问题上是否仍然适用？我国载人航天突出成就的背后又有着怎样的物理理论支撑？在本书的第三章，我们将了解人类对宇宙天体的探索历程，认识物理学定律在航空航天领域的应用，并从万有引力定律的普适性认识自然界的统一性。

然后，我们再将研究的方向转向功和能及其关系。我们将发现，从功和能的角度处理力学问题有时会十分方便。在本书的第四章，我们将会学习如何定量计算功和能，分析功能转化的关系，理解机械能，学会在适当条件下应用机械能转化与守恒的规律解决实际问题，以形成初步的能量观念，体会守恒观念对认识物理规律的重要性。

最后，我们的视野从牛顿力学拓展到相对论。在本书的第五章，我们将了解牛顿力学的成就与局限性。在此基础上初步了解相对论时空观，关注宇宙起源和演化的研究进展及成就，体会人类对自然界的探索是永无止境的，需要不断深入、永不停息。

从直线到曲线，从地上到天上，从力和运动到功和能，从牛顿力学到相对论，沿着这些线索，一个更加广阔的物理世界将逐渐展现在我们面前。

学习物理是一个动手动脑、体验物理学魅力的过程，为此，本书设计了一系列引人入胜的栏目。“观察与思考”栏目，锻炼我们观察、描述、分析物理现象的能力。“实验与探究”栏目，使我们体会问题、证据、解释、交流等要素在开展科学探究中的重要性。

“讨论与交流”栏目，让我们展示对物理问题的见解，感受思维碰撞的乐趣。“实践与拓展”栏目，使我们发散思维，在实践性的课题探索中提升创新能力，认识科学、技术、社

会与环境发展的关系。“资料活页”栏目，让我们感悟物理学史上科学家们的智慧，感受前沿科技的成就。“练习”和“习题”栏目，巩固我们对物理概念与规律的理解，以及解决实际问题的方法。“本章小结”栏目，通过知识结构图梳理全章的知识主线，让我们回顾和整理学习成果，反思自己的学习情况。

学习物理，不仅是为了记住物理概念和认识物理规律，而且是为了帮助我们形成正确的物理观念，指导我们认识自然万物；培养科学思维，辩证地分析实际生产和生活中遇到的问题；学会科学探究的方法，提高基于观察和实验探究自然规律的能力；形成正确的科学态度与社会责任意识。这才是物理学习的要义，让我们共同努力！

# 目 录



## 第一章 抛体运动 1

|     |             |    |
|-----|-------------|----|
| 第一节 | 曲线运动        | 2  |
| 第二节 | 运动的合成与分解    | 6  |
| 第三节 | 平抛运动        | 10 |
| 第四节 | 生活和生产中的抛体运动 | 16 |



## 第二章 圆周运动 25

|     |           |    |
|-----|-----------|----|
| 第一节 | 匀速圆周运动    | 26 |
| 第二节 | 向心力与向心加速度 | 32 |
| 第三节 | 生活中的圆周运动  | 38 |
| 第四节 | 离心现象及其应用  | 43 |



## 第三章 万有引力定律 51

|     |           |    |
|-----|-----------|----|
| 第一节 | 认识天体运动    | 52 |
| 第二节 | 认识万有引力定律  | 56 |
| 第三节 | 万有引力定律的应用 | 62 |
| 第四节 | 宇宙速度与航天   | 67 |



## 第四章 机械能及其守恒定律 78

|     |              |     |
|-----|--------------|-----|
| 第一节 | 功            | 79  |
| 第二节 | 功率           | 85  |
| 第三节 | 动能 动能定理      | 90  |
| 第四节 | 势能           | 95  |
| 第五节 | 机械能守恒定律      | 100 |
| 第六节 | 验证机械能守恒定律    | 105 |
| 第七节 | 生产和生活中的机械能守恒 | 108 |



## 第五章 牛顿力学的局限性与相对论初步 118

|     |             |     |
|-----|-------------|-----|
| 第一节 | 牛顿力学的成就与局限性 | 119 |
| 第二节 | 相对论时空观      | 123 |
| 第三节 | 宇宙起源和演化     | 130 |



## 第一章

## 抛体运动

运动是普遍的，也是多样的．仔细观察生活和生产中的各种运动，我们会发现除了直线运动，更为普遍的是曲线运动．如投出去的铅球、纸飞机等在空中所做的都是曲线运动．在生活中我们都有这样的经验：投篮时不能把球直接对准球篮，而是要斜向上投出，才能使球落入球篮．这些常见物体运动的背后，有着怎样的运动规律呢？

在物理学中，常常将复杂问题转化为简单问题进行研究．对于曲线运动，我们可以利用运动合成与分解的方法，将其转化为直线运动进行研究．

这一章我们将学习曲线运动的特征和物体做曲线运动的条件，通过实验探究平抛运动的规律，学会运用运动合成与分解的方法分析生活和生产中的抛体运动．

## 第一节

## 曲线运动



在必修第一册的学习中，我们探究的物体运动轨迹以直线为主，而在生产和生活中，不少物体的运动轨迹却是弯曲的。能否借鉴研究直线运动规律的方法来探究这一类运动的规律？

### 认识曲线运动

运输货物时，货物沿着弯曲的传送带前进；坐过山车时，会经历一个又一个的急转弯；骑自行车时，我们常常需要转弯，如图 1-1-1 所示。



图 1-1-1 生产和生活中的曲线运动

通过观察可以发现，这些物体的运动轨迹都是曲线，我们将这类运动称为**曲线运动** (curvilinear motion)。

生产和生活中的运动，都可根据其运动轨迹的特点，归入直线运动或曲线运动加以研究。

### 物体做曲线运动的速度方向

做直线运动时，物体的速度方向始终在其运动轨迹的直线方向上。那么，物体做曲线运动时的速度方向有什么规律呢？



## 观察与思考

如图 1-1-2 所示, 将塑料板切割成 6 块, 放置在水平平铺的白纸上, 组成弯曲的凹槽轨道. 把蘸有墨水的小球从入口  $O$  处滚入轨道, 让小球沿着轨道运动. 当小球从出口  $C$  处离开轨道时, 会在白纸上留下印迹, 记录小球经过出口  $C$  时的运动方向. 逐段拆去轨道, 将出口分别改为  $B$  和  $A$ , 用同样的方法记录小球经过出口  $B$  和  $A$  时的运动方向.

思考小球在经过  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个出口时的运动方向与曲线轨道的形状有什么关系.

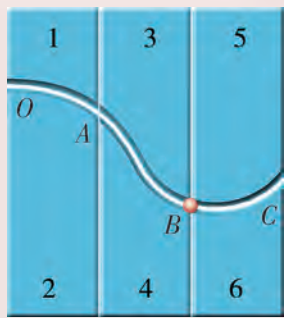


图 1-1-2 实验装置示意图

在上述实验中, 小球离开轨道出口后, 在白纸上留下的印迹呈一条直线, 并且与曲线轨道相切. 这说明小球在曲线轨道出口处的运动方向沿着该点的切线方向.

从理论上分析, 如图 1-1-3 所示, 若质点沿曲线从点  $A$  运动到点  $B$ , 过  $A$ 、 $B$  两点作直线, 这条直线称为曲线的割线. 根据位移和速度的知识, 质点在点  $A$  和点  $B$  之间的位移和平均速度的方向, 都是从点  $A$  指向点  $B$ . 设想点  $B$  逐渐向点  $A$  移动, 割线  $AB$  不断变化, 当点  $B$  非常接近点  $A$  时, 割线  $AB$  就与过点  $A$  的切线重合, 点  $A$  的速度方向与点  $A$  的切线方向一致. 这种运用“以直代曲”逐步逼近的方法, 在研究许多物理概念时经常用到.

实验和理论分析表明, 在曲线运动中, 质点在某一位置的速度方向与曲线在这一点切线方向一致.

如图 1-1-4 所示, 由于曲线上各点的切线方向不同, 所以曲线运动的速度方向时刻都在改变. 速度是矢量, 既有大小, 又有方向. 只要速度的方向发生变化, 速度矢量就发生变化, 即具有加速度. 所以曲线运动是一种变速运动.

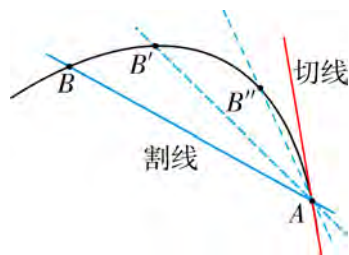


图 1-1-3 曲线的割线与切线

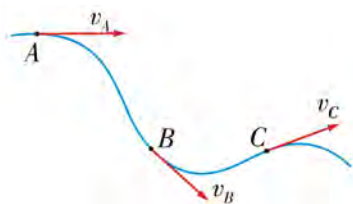


图 1-1-4 物体做曲线运动在各点的速度方向

## 物体做曲线运动的条件

物体需要满足什么条件才会做曲线运动呢? 从前面的分析可知, 物体做曲线运动时具有加速度, 根据牛顿第二定律, 此时物体所受合外力不为零. 下面从物体的运动轨迹与物体所受合外力的关系来探究物体做曲线运动需要满足的条件.



## 实验与探究

如图 1-1-5 所示, 让钢珠蘸上墨水, 使其在水平纸面上滚动并做直线运动. 探究磁铁要在什么方向上吸引钢珠, 钢珠才会偏离原来的运动方向做曲线运动.

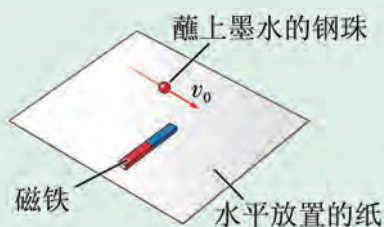


图 1-1-5 实验示意图

上述实验探究发现, 当钢珠受到磁铁的吸引力与钢珠的运动方向不在同一条直线上时, 钢珠将偏离原来的运动方向做曲线运动.

实验表明, 当物体所受合外力的方向与它的速度方向不在同一直线上时, 物体做曲线运动.



## 讨论与交流

1. 如图 1-1-6 所示是乒乓球的频闪照片, 分析乒乓球为什么会做曲线运动, 画出分析示意图.

2. 观察生活中还有哪些做曲线运动的例子, 分析该例子中的物体为什么做曲线运动.



图 1-1-6 乒乓球运动频闪照片

## 航展飞行表演中的曲线运动

中国国际航空航天博览会简称“中国（珠海）航展”或“珠海航展”，是世界五大最具国际影响力的航展之一，每两年在广东省珠海市举办一届。近年来，珠海航展发展为集专业展览与大众科普于一体的活动，吸引了来自世界各地的观众参与。

如图 1-1-7 所示是航展飞行表演中的几个精彩镜头。飞机喷出的烟雾将飞机做曲线运动的轨迹显现出来，充分展示了飞行员精湛的飞行技术。飞行员通过调整升降舵和副翼等方式，改变飞机受到的动力、重力和空气作用力的合力方向，使合力与飞机速度方向形成夹角，从而使飞机做曲线运动。



图 1-1-7 航展中飞行表演的精彩镜头



## 练习

1. 关于曲线运动，下列说法是否正确？为什么？

- (1) 曲线运动一定是变速运动.
- (2) 物体做曲线运动时，加速度一定不为零，但可以为恒量.
- (3) 物体做曲线运动时，不可能受恒力的作用.
- (4) 物体做曲线运动时，加速度方向与速度方向可能在同一直线上.

2. 跳水运动是一项优美的水上运动. 中国跳水队在国际跳水竞赛中屡创佳绩，被誉为跳水“梦之队”. 一名老师用计算机软件对一个运动员采用向前翻腾动作跳水的视频进行处理后，画出了该运动员在空中完成动作时头部的二维运动轨迹，如图 1-1-8 所示. 在图中画出运动员头部在 A、B、C、D 各点的速度方向.

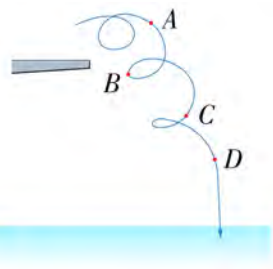


图 1-1-8

3. 在足球场上罚任意球时，高水平运动员踢出的足球在飞行中绕过“人墙”，飞向球门，使守门员难以扑救. 如图 1-1-9 所示是某次射门时足球的运动轨迹. 在图中画出足球在点 A 的速度方向和所受合外力的大致方向.



图 1-1-9

## 第二节

## 运动的合成与分解



曲线运动相对直线运动而言较为复杂，而把复杂问题转化为简单问题，是物理学中处理问题常用的研究思想。那么，如何把曲线运动转化为简单的直线运动进行研究呢？运动的合成与分解是解决这一问题的基本方法。

### 运动的分析

我们前面已经学过，根据作用效果的等效性，可以对力进行合成与分解。类比这一方法，我们也可以根据运动效果对运动进行分析。

如图 1-2-1 所示，用小锤击打弹性金属片，使球沿水平方向飞出。球从抛出点  $A$  沿曲线路径运动到落地点  $D$ 。从运动的效果来看，这一过程可以分解为两个同时进行的分运动，一个是在水平方向上从点  $A$  到点  $B$  的直线运动，另一个是在竖直方向上从点  $A$  到点  $C$  的直线运动。实际发生的运动可以看成上述两个分运动合成的结果。

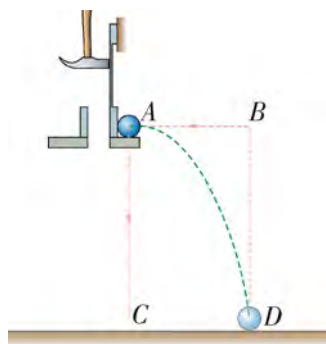


图 1-2-1 小球运动的分析

分运动之间是否相互影响呢？在上述实验中，小球从抛出点飞出后，在竖直方向上只受到重力的作用，因此可以确定小球在竖直方向做自由落体运动。为了探究运动的独立性，我们尝试增加一个做自由落体运动的小球作为参照，比较水平方向运动的变化是否影响竖直方向的运动。



### 观察与思考

如图 1-2-2 所示，用小锤击打弹性金属片，使球 1 沿水平方向飞出，完全相同的球 2 被同时松开做自由落体运动。比较两球是否同时落地。

改变小锤击打金属片的作用力大小，使球 1 沿水平方向飞出初速度的大小发生变化。重复上述实验，以球 2 为参照，比较球 1 和球 2 是否还是同时落地。

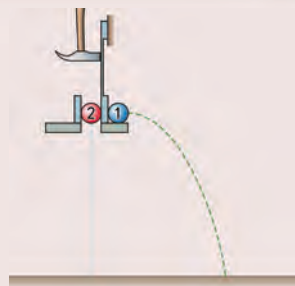


图 1-2-2 实验示意图

通过上述实验发现，虽然两球的运动轨迹不同，但无论球 1 水平飞出的初速度多大，两球几乎总是同时落地。这表明球 1 在竖直方向上的分运动是自由落体运动，且不会受到水平方向分运动的影响，球 1 在竖直和水平两个方向上的分运动具有独立性。

## 位移和速度的合成与分解

位移是描述运动的重要物理量。类比力的合成与分解的方法，位移是否可以合成与分解？下面通过实验进行探究。

### 实验与探究

如图 1-2-3 所示，在一张白纸上，让铅笔笔尖靠着直尺，沿直尺边沿横向移动，同时向前平推直尺，使其沿纵向移动。把直尺向前推一段距离之后，铅笔会画出一条不规则的曲线。

连接这段曲线的首尾，便得到笔尖走过的位移。再画出笔尖的横向位移和纵向位移。重复做几次实验，看看上述三个位移之间存在怎样的关系。

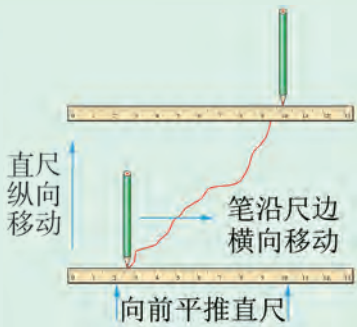


图 1-2-3 实验示意图

在上述探究实验中，笔尖走过的位移正是由笔尖的横向位移和纵向位移构成的平行四边形的对角线。

研究表明，和力的合成与分解类似，位移的合成与分解同样遵循平行四边形定则，如图 1-2-4 所示。由位移、时间和速度的关系可知，速度的合成与分解也同样遵循平行四边形定则，如图 1-2-5 所示。

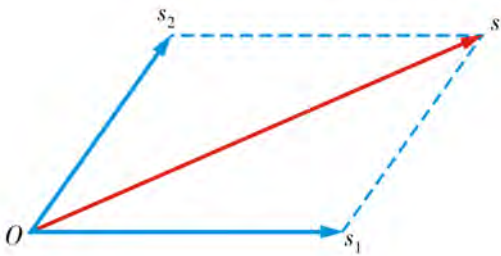


图 1-2-4 位移的合成与分解

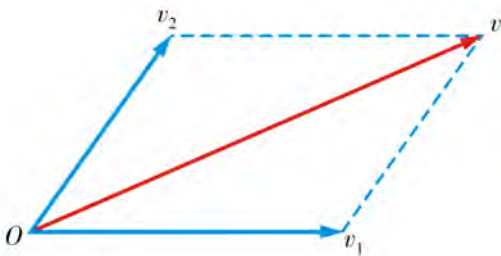


图 1-2-5 速度的合成与分解

我们可以应用运动合成与分解的方法，通过位移和速度的合成与分解，把复杂运动转化为简单运动进行研究。

小船过河模型是运动合成与分解的典型应用. 随着时代的发展, 现代化的渡轮替代了靠人工撑桨的传统摆渡小船, 但小船过河模型依然具有指导意义, 其中蕴含的物理建模与分类讨论的思想, 对于解决各类问题都具有借鉴价值.

**例题:** 小船摆渡曾是人们过河的主要方式. 设河的宽度为  $d$ , 河水匀速流动, 流速为  $v_1$ , 小船在静水中的运动速度为  $v_2$ , 且  $v_2 > v_1$ .

(1) 要使小船渡河的时间最短, 小船应如何渡河? 最短时间是多少? 到达对岸时小船的航程是多少?

(2) 要使小船渡河的航程最短, 小船应如何渡河? 渡河所用的时间是多少? 最短的航程是多少?

**分析:** 小船渡河所做的运动可以看成两个分运动的合成: 一个是小船自身的运动, 另一个是随河水流动的运动. 根据运动的独立性原理, 小船渡河的时间不会因水流速度的变化而改变, 而只与小船在静水中的速度有关. 绘制小船速度的合成示意图, 再根据需求选择小船合适的运动方向, 从而求得小船渡河所用时间和航程.

**解:** (1) 要使小船渡河的时间最短, 小船在静水中的速度应全部用于过河, 因此船头的方向应垂直于对岸. 小船速度的合成如图 1-2-6 所示, 则

$$\begin{aligned} \text{最短渡河时间 } t_{\min} &= \frac{d}{v_2}, \\ \text{小船的速度 } v &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2}. \end{aligned}$$

故到达对岸时小船的航程

$$s = vt_{\min} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \frac{d}{v_2}.$$

(2) 要使小船渡河的航程最短, 小船的合速度方向应垂直于对岸, 即船头需向上游转过一定的角度. 因为  $v_2 > v_1$ , 小船速度的合成如图 1-2-7 所示, 则

$$\begin{aligned} \text{小船的速度 } v' &= \sqrt{v_2^2 - v_1^2}. \end{aligned}$$

最短的航程即为河的宽度  $d$ ,  
故渡河所用的时间

$$t' = \frac{d}{v'} = \frac{d}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}.$$

船头方向与对岸的夹角可通过  $\cos\theta = \frac{v_1}{v_2}$  求得.

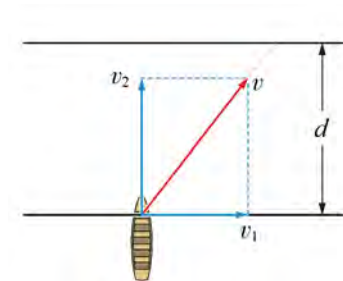


图 1-2-6 船头垂直于对岸

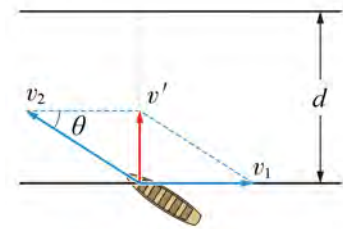


图 1-2-7 小船的速度方向垂直于对岸



## 练习

1. 小明骑自行车上学，在一段平直的公路上以  $4 \text{ m/s}$  的速度向正东方向行驶。天气预报报道当时刮的是正北风，风速也是  $4 \text{ m/s}$ 。求小明感觉到的风速的方向和大小。

2. 我国少数民族运动会上，设有跑马射箭项目（如图 1-2-8 所示）。运动员需骑马在直线跑道上奔驰，弯弓放箭，射击侧方的固定靶标。若运动员骑马以速度  $v_1$  沿直线跑道奔驰，运动员静止时射出的弓箭的速度为  $v_2$ ，直线跑道到固定靶标的最短距离为  $d$ ，要想在最短的时间内射中目标，运动员放箭处到靶标的距离应该为多少？

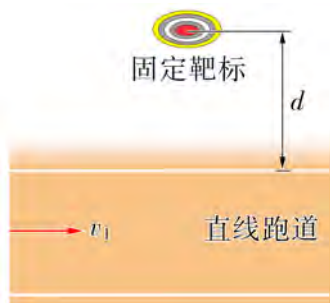


图 1-2-8

3. 如图 1-2-9 (a) 所示，在一端封闭、长约  $1 \text{ m}$  的玻璃管内注满清水，水中放一个红蜡做成的小圆柱体并塞紧管口。如图 1-2-9 (b) 所示，将玻璃管倒置，将看到除了开始的一小段位移，蜡块会沿玻璃管以近似恒定的速度上升。如图 1-2-9 (c) 所示，在蜡块上升的同时将玻璃管水平向右匀速移动。

(1) 以地面为参考系，在该过程中蜡块做什么运动？为什么？

(2) 设计实验方案，测量在玻璃管水平向右匀速移动过程中蜡块的速度大小。

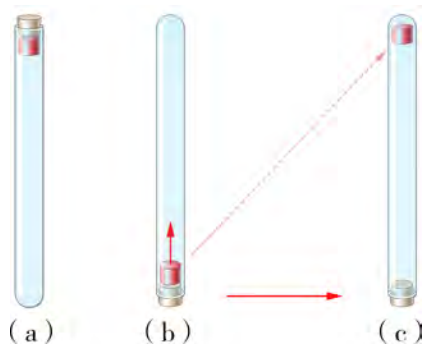


图 1-2-9

### 第三节

## 平抛运动

如图1-3-1所示，沿水平方向扔出一块橡皮，或者将一个小球从水平桌面以一定的初速度推离边沿，可以看到它们做曲线运动的轨迹是相似的。本节将探讨这一类常见曲线运动的规律。

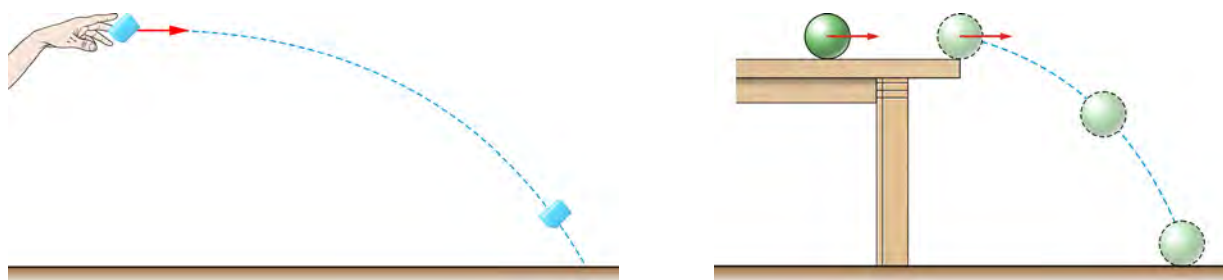


图 1-3-1 物体沿水平方向抛出

### 探究平抛运动

将物体以一定的初速度沿水平方向抛出，仅在重力作用下物体所做的运动称为**平抛运动**。与自由落体运动相似，平抛运动同样是一个忽略了空气阻力的理想化模型。这体现了物理学解决问题时抓住主要因素、忽略次要因素的研究思想。

从平抛运动的定义可知，在本章第二节图1-2-2的探究实验中，球1被弹性金属片水平击出后所做的运动正是平抛运动。根据运动合成与分解的方法，如图1-3-2所示，球1所做的平抛运动，可以分解为竖直和水平两个方向的分运动进行研究。球1与球2同时落地，表明在竖直方向上球1的分运动是自由落体运动。球1在水平方向上并没有受到力的作用，根据牛顿第一定律，球1在水平方向上的分运动是匀速直线运动。由此，我们可以初步得到平抛运动的特点。下面通过实验对平抛运动的特点做进一步探究。

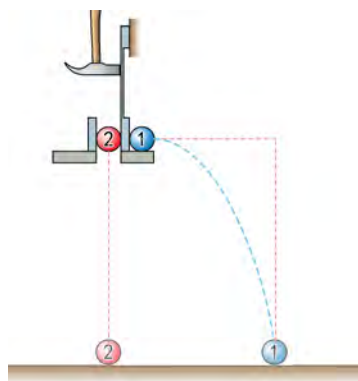


图 1-3-2 分析示意图



## 实验与探究

如图 1-3-3 所示, 在一块竖直放置的平板上固定着两个相同的弧形轨道  $A$  和  $B$ , 用于发射钢球. 两弧形轨道出口处水平, 其上分别安装了一个电磁铁  $C$  和  $D$ . 在轨道  $A$  出口处有一个碰撞开关  $S$ , 可控制电磁铁  $E$  电源的通断.

从轨道  $A$  射出的钢球做平抛运动, 从轨道  $B$  射出的钢球做匀速直线运动, 从电磁铁  $E$  处释放的钢球做自由落体运动.

### 1. 研究平抛运动水平方向分运动的特点

(1) 使电磁铁  $C$  和  $D$  分别相对各自轨道出口水平线处于相同高度. 把两个钢球分别吸在电磁铁  $C$ 、 $D$  上. 切断电源, 使两个钢球以相同的初速度同时水平射出.

(2) 改变电磁铁  $C$ 、 $D$  与各自轨道出口水平线的相对高度, 并确保高度相等.

(3) 多次重复以上步骤. 观察实验现象, 并分析平抛运动水平方向分运动的特点.

### 2. 研究平抛运动竖直方向分运动的特点

(1) 把两个钢球分别吸在电磁铁  $C$ 、 $E$  上, 并确保电磁铁  $E$  上的钢球与轨道  $A$  出口处于同一高度. 释放轨道  $A$  的钢球. 钢球在水平出口处碰撞开关  $S$ , 切断电磁铁  $E$  的电源, 使钢球从电磁铁  $E$  处释放.

(2) 改变电磁铁  $E$  的位置, 让其从  $N$  向  $M$  移动.

(3) 多次重复以上步骤. 观察实验现象, 并分析平抛运动竖直方向分运动的特点.

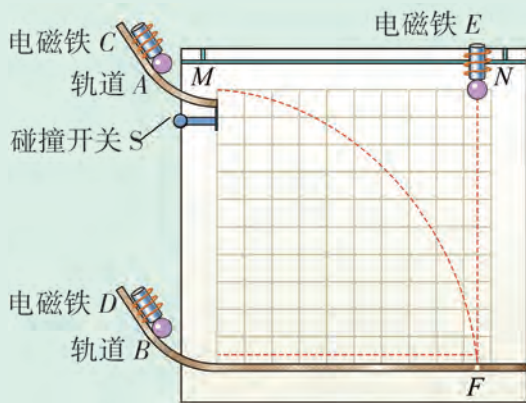


图 1-3-3 平抛运动实验器

在上述探究实验中, 当电磁铁  $C$ 、 $D$  上的钢球同时释放时, 两个钢球分别做平抛运动和匀速直线运动, 并最终发生碰撞. 这表明做平抛运动的钢球在水平方向上的分运动是匀速直线运动. 当同时释放电磁铁  $C$ 、 $E$  上的钢球时, 两个钢球分别做平抛运动和自由落体运动, 并最终同样发生碰撞. 这表明做平抛运动的钢球在竖直方向上的分运动是自由落体运动.

研究表明, 平抛运动在水平方向的分运动是匀速直线运动, 在竖直方向的分运动是自由落体运动. 运用运动合成与分解的方法, 我们可以把比较复杂的平抛运动分解为两个简单的直线运动来进行研究.

我们也可以利用频闪照相的方法, 每隔相等时间曝光一次, 在同一张照片上记录做平抛运动的物体在不同时刻的位置, 以更精确地研究平抛运动的特点.



## 讨论与交流

如图 1-3-4 所示是两个小球分别做平抛运动和自由落体运动的频闪照片。

(1) 如何利用这张频闪照片, 证明平抛运动竖直方向的分运动是自由落体运动?

(2) 如何利用这张频闪照片, 证明平抛运动水平方向的分运动是匀速直线运动?

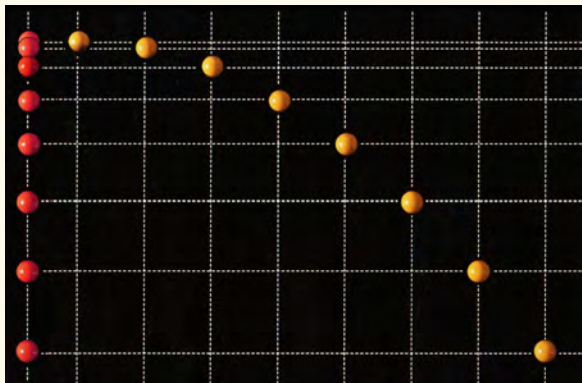


图 1-3-4 平抛运动与自由落体运动的频闪照片

## 平抛运动的规律

建立如图 1-3-5 所示的直角坐标系. 以抛出点为坐标原点  $O$ , 以水平方向为  $x$  轴, 正方向与初速度  $v_0$  的方向相同; 以竖直方向为  $y$  轴, 正方向竖直向下. 则物体在任一时刻  $t$  的位置坐标公式为

$$x = v_0 t \quad (1.3.1)$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (1.3.2)$$

根据这两个公式求出任一时刻物体的坐标, 用平滑曲线把它们连接起来, 就得到平抛运动的轨迹. 这个轨迹是一条抛物线, 如图 1-3-5 所示.

物体以初速度  $v_0$  做平抛运动, 经时间  $t$  到达点  $A$ . 如图 1-3-6 所示, 物体在点  $A$  的速度方向沿点  $A$  的切线方向, 其水平分速度  $v_x$  和竖直分速度  $v_y$  分别为

$$v_x = v_0 \quad (1.3.3)$$

$$v_y = g t \quad (1.3.4)$$

此时物体在点  $A$  速度的大小  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ , 方向可以用合速度  $v$  的方向与  $x$  轴的夹角  $\theta$  表示, 即  $\tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$ .

式 (1.3.1) 至式 (1.3.4) 描述了物体做平抛运动的规律. 下面通过例题体会上述规律的应用.

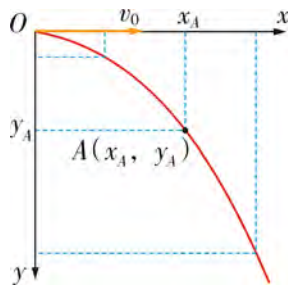


图 1-3-5 平抛运动的轨迹

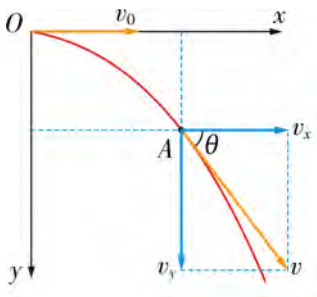


图 1-3-6 平抛运动速度的分解

**例题：**当灾害发生时，有时会利用无人机运送救灾物资。如图 1-3-7 所示，一架无人机正准备向受灾人员空投急救用品。急救用品的底面离水面高度  $h = 19.6 \text{ m}$ 。无人机以  $v = 10 \text{ m/s}$  的速度水平匀速飞行。若空气阻力忽略不计，重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。



图 1-3-7 无人机投放救灾物资

(1) 为了使投下的急救用品落在指定地点，无人机应该在离指定地点水平距离多远的地方进行投放？

(2) 投放的急救用品落到水面上时，速度的大小是多少？

**分析：**急救用品离开无人机时具有与无人机相同的水平速度，且只受重力作用。因此急救用品做平抛运动，在水平方向上做匀速直线运动，在竖直方向上做自由落体运动，并且两个分运动经历时间相同。末速度为两个分速度的矢量和。

**解：**(1) 急救用品做平抛运动，在竖直方向上做自由落体运动，有

$$h = \frac{1}{2}gt^2,$$

$$\text{得 } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

急救用品在水平方向上做匀速直线运动，在时间  $t$  内的水平位移

$$x = v_x t = v \sqrt{\frac{2h}{g}} = 10 \times \sqrt{\frac{2 \times 19.6}{9.8}} \text{ m} = 20 \text{ m}.$$

即无人机应在离指定地点水平距离 20 m 处投放急救用品。

(2) 设急救用品落到水面上时竖直方向速度的大小为  $v_y$ ，根据匀变速直线运动速度与位移的关系，有

$$v_y^2 = 2gh,$$

急救用品落到水面上时，速度的大小

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_x^2 + 2gh} = \sqrt{10^2 + 2 \times 9.8 \times 19.6} \text{ m/s} = 22 \text{ m/s}.$$



## 实践与拓展

我们可以设法描绘出物体做平抛运动的轨迹，然后通过轨迹分析平抛运动的特点。

如图 1-3-8 所示，把坐标纸和复写纸叠放在一起压入竖直平板纸夹内，使接球槽上升到合适高度。把钢球吸在固定的电磁铁上，释放钢球，钢球沿着导轨凹槽滚下并被水平抛出。钢球最终落在接球槽上，通过复写纸在坐标纸上记录落点位置。将接球槽逐次下降，重复上述操作，即可得到钢球的一系列运动点迹。

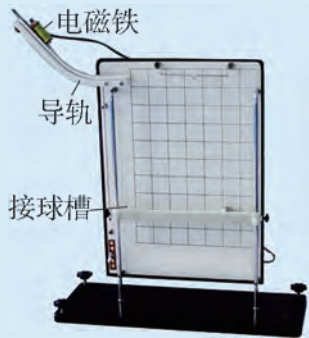


图 1-3-8 平抛运动实验器

用平滑的曲线将各点连接起来,就得到钢球做平抛运动的轨迹.

做一做并思考以下问题:

- (1) 如何保证钢球抛出后的运动是平抛运动?
- (2) 利用所绘制的钢球运动轨迹,如何计算钢球被抛出时的初速度?
- (3) 利用平抛运动的轨迹,还能进行哪些研究?

## 抛体运动研究发展历程

抛体运动作为生活和军事上常见的现象,自古以来就是自然哲学探索者们研究的主题.

### 1. 亚里士多德对抛体运动的研究

古希腊学者亚里士多德把运动分为自然运动和强迫运动,如重物下落与星辰运动是自然运动,抛体等需要外力推动的运动是强迫运动.那么,使物体离开推动者后仍能运动的外力是什么?亚里士多德认为,物体向前运动排开空气,在物体后面造成一个虚空;周围的空气立即填补这个虚空,对物体形成一个向前的推力.物体后面的空气给予推动,前面的空气给予阻碍,在二者共同作用下,抛体的运动既是连续的又是有限的.

### 2. 中世纪前后对抛体运动的研究

公元6世纪,有学者提出质疑:若与物体直接接触的空气能使物体产生和维持运动,那么只要激发石头后面的空气,石头就可以运动了,这显然是不可能的.他以一个无形的力取代了空气的推动,并认为投掷者抛掷物体时,把无形的力注入物体中,且物体离开投掷者后,这种力仍然存在.

公元14世纪,一位学者发展出“冲力说”,把冲力设想为一个由推动者传给物体的动力.同样形状和大小的铁与木头以同样的初速度抛出,铁因更稠密能储存更多的冲力,所以能对抗空气阻力,保持更长时间的运动,从而飞得更远.

### 3. 伽利略对抛体运动的研究

伽利略在前人研究的基础上,对抛体运动理论进行完善,他认为需要把运动和物体本身的属性分离开来,抛体运动应当是一种合成运动.他在著作《关于两门新科学的对话》中谈道:“设想任意一个质点沿水平面无摩擦地运动……如果这个平面是有限的,该质点就将穿过平面的边界,在它原先所做的匀速的、永恒的运动外,由于自身的重量而获得一个向下运动的倾向,产生的运动是一种水平匀速运动和另一种竖直加速运动的合成.”如图1-3-9所示,

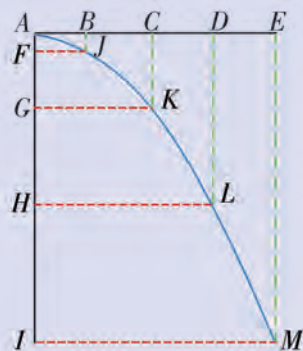


图1-3-9 平抛运动  
轨迹分析

他还利用几何工具证明了抛体运动的轨迹是一条抛物线。

以亚里士多德对强迫运动的讨论作为起点，后续学者虽然对前人的抛体运动理论持有反对意见，但都跳不出为运动找动力的观念。伽利略提出的新观念“所要研究的不是运动为什么发生，而是运动怎样发生”，将抛体运动的研究引向了正确的方向。自然科学正是在这样一种继承与批判中向前发展。伽利略所运用的思想实验与数学方法相结合的研究方法影响至今，值得我们在学习中借鉴。



## 练习

1. 如图 1-3-10 所示，某人射箭时，若将箭瞄准靶心沿水平方向射出，弓箭能射中靶心吗？为什么？

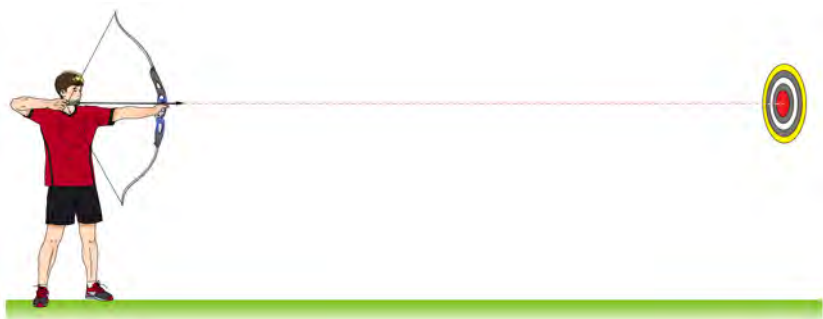


图 1-3-10

2. 如图 1-3-11 所示是小球做平抛运动的频闪照片的一部分。照片中只拍了小球运动过程中的前四个位置，根据平抛运动的规律，在图中画出小球被拍下的第五个位置。
3. 如图 1-3-12 所示，一名运动员欲骑车越过宽度  $d = 2 \text{ m}$  的壕沟  $AB$ ，现已知两沟沿的高度差  $h = 0.4 \text{ m}$ 。求车速至少多大才能安全越过壕沟。（ $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

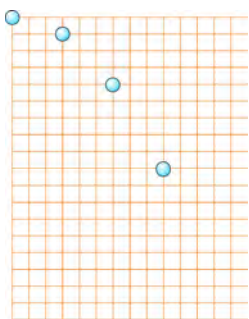


图 1-3-11

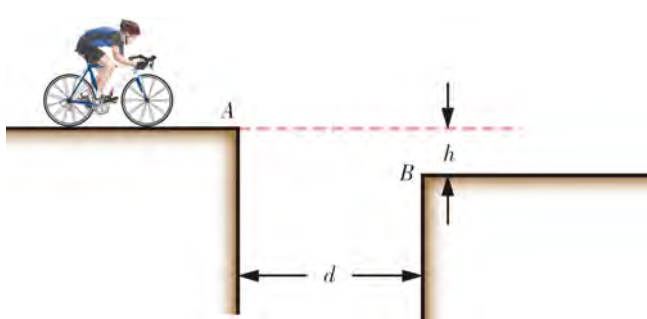


图 1-3-12

## 第四节 生活和生产中的抛体运动

将物体以一定的初速度向空中抛出，仅在重力作用下物体所做的运动称为**抛体运动** (projectile motion)。根据初速度方向是竖直向上、竖直向下、水平或与水平方向成一定的夹角，抛体运动可分为竖直上抛、竖直下抛、平抛和斜抛。它们在生活和生产中都有着广泛的应用。

### 喷泉

公园、广场等场所常常能见到喷泉，其中有的喷泉形成高高的水柱，有的喷泉形成多姿的弧线，令人赏心悦目。那么，喷泉形成这些形态可能与什么因素有关呢？

试建立物理模型对柱形喷泉进行分析。如图 1-4-1 所示，喷泉水柱由无数的水珠构成。如果忽略水珠在运动过程中受到的空气阻力，则水珠仅受重力作用，可将柱形喷泉中水珠的运动视为竖直上抛运动。

设喷泉水柱高度为  $h$ ，水珠初速度大小为  $v_0$ ，重力加速度为  $g$ 。取竖直向上为正方向，以水珠从喷出至到达最高点为研究过程。根据匀变速直线运动速度与位移的关系，有

$$v_t^2 - v_0^2 = 2(-g)h$$

水珠到达最高点时  $v_t = 0$ ，由此得出水柱高度

$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

从上式可知，对于柱形喷泉，它的高度主要由喷头的出水速度决定。



图 1-4-1 柱形喷泉

### 讨论与交流

1. 设计方案，估算柱形喷泉的水从喷出到落回喷出处所经历的时间。

2. 对于弧形喷泉（如图 1-4-2 所示），应如何建构物理模型进行研究？



图 1-4-2 弧形喷泉

## 传送带输送

传送带广泛应用于食品加工、冶金工业、矿石开采、货物运输和电子生产等各行各业,具有输送能力强、结构简单且易于维护、便于程序化控制等优点.在自动化生产中,常常需要利用传送带将物品较准确地抛落到相应的位置,因此需要应用抛体运动的相关知识.

**例题:**如图1-4-3所示是食品加工厂生产和包装饺子的一道工序,水平传送带的速度可调节.为了保证饺子能够落在水平传送带下方的槽内,请设计方案,估算水平传送带的运转速度范围.

**分析:**若空气阻力忽略不计,饺子离开水平传送带后做平抛运动,可根据平抛运动的公式,求出初速度的表达式,再测量相应的数值,根据该表达式进行估算,由此设计合理的生产方案.

**解:**选取饺子为研究对象,忽略空气阻力,饺子离开水平传送带后将做平抛运动.

设水平传送带的运转速度为 $v_0$ ,即饺子做平抛运动的初速度为 $v_0$ ,设抛出点距离落点的高度为 $h$ ,饺子到达落点前的水平位移为 $x$ ,则

在竖直方向上,有 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ,

在水平方向上,有 $x = v_0t$ .

由以上两式,可得 $v_0 = x\sqrt{\frac{g}{2h}}$ .

根据上式,设计方案如下:

第一步:分别测量从水平传送带抛出点边缘到下方接盘最外侧和最内侧的水平距离 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ .

第二步:测量水平传送带抛出点距离接盘底部的高度 $h$ .

第三步:将 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 和 $h$ 代入式子 $v_0 = x\sqrt{\frac{g}{2h}}$ ,可求得合适的传送带运转速度范围为

$$x_{\min}\sqrt{\frac{g}{2h}} < v_0 < x_{\max}\sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

在实际生产中,物品离开传送带时的运动方式更多是斜抛运动,如图1-4-4所示.同学们可以尝试建构物理模型进行相应的分析,设计出更好的输送方案.



图 1-4-3 饺子离开传送带后做平抛运动



图 1-4-4 传送带输送玉米粒

## 跳远

跳远是国际田径竞赛中的重要项目，能锻炼身体、增强体质。那么，跳远的距离与什么因素有关呢？

如图 1-4-5 所示，把人体视作质点，人从起跳到落地，在忽略空气阻力的情况下，只受重力的作用，人体做斜抛运动。

借鉴探究平抛运动时运动合成与分解的方法，可以将斜抛运动分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的竖直上抛运动。初速度的分解如图 1-4-6 所示。应用运动合成与分解的方法可以描绘出跳远时的运动轨迹，如图 1-4-7 所示。



图 1-4-5 跳远

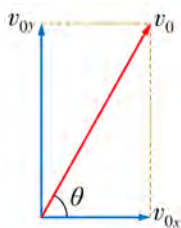


图 1-4-6 向上斜抛运动的速度分解

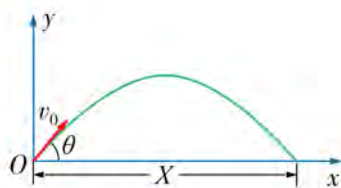


图 1-4-7 人跳远时的运动轨迹



### 讨论与交流

组建探究学习小组，通过实地跳远实验，探究影响跳远距离的因素。

(1) 尽量保持起跳速度方向与地面的夹角  $\theta$  不变，通过以不同的速度助跑，改变起跳初速度的大小  $v_0$  ( $v_1 < v_2 < v_3$ )，并将三次从起跳到落地的运动轨迹绘制在图上，如图 1-4-8 所示，从中可以发现什么规律？

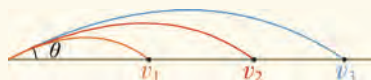


图 1-4-8 不同起跳速度的跳远轨迹

(2) 尽量保持起跳初速度的大小  $v_0$  不变，改变起跳速度方向与地面的夹角  $\theta$  ( $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$ )，并将三次从起跳到落地的运动轨迹绘制在图上，如图 1-4-9 所示，从中可以发现什么规律？



图 1-4-9 不同起跳角度的跳远轨迹

讨论除了上述因素，还有哪些因素影响跳远的距离。

我们在建构物理模型来分析问题时，需要注意物理模型的适用条件。例如，斜抛运动是一个理想化模型，它的适用条件是只受重力的作用而忽略其他阻力。因此，上述对跳远运动的分析忽略了空气阻力的影响。若空气阻力不可忽略，则需要建构新的物理模型进行分析。

 **实践与拓展**

通过网络检索、实地走访等途径，搜集一个生活或生产中抛体运动的例子（如农田喷雾灌溉或园林绿化喷淋，如图 1-4-10 所示）和相关的技术参数，应用抛体运动的知识对其设计进行分析和评价，并尝试提出相应的改进建议。



图 1-4-10 喷雾灌溉

**资料活页**

**弹道曲线**

在实际情况中，物体做抛体运动时总会受到空气阻力的影响。空气阻力的大小除了与抛体本身的形状和空气的密度有关，还与抛体的速率有关。一般来说，物体的速率低于  $200\text{ m/s}$  时，可认为空气阻力与物体速率的平方成正比；当速率达到  $400\sim 600\text{ m/s}$  时，空气阻力与速率的三次方成正比；在速率很大的情况下，阻力与速率的高次方成正比。例如，某型号加农炮所发射炮弹的初速度很大，在不计空气阻力时，其理想射程能达到  $46\text{ km}$ ；而实际上由于空气阻力的影响，其射程却只有  $13\text{ km}$  左右。

图 1-4-11 中的虚线是在没有空气的理想空间中炮弹飞行的轨迹；实线是以相同的初速度和抛射角射出的炮弹在空气中飞行的轨迹，这种曲线叫作弹道曲线。由于空气阻力的影响，弹道曲线的升弧和降弧不再对称，升弧长而平伸，降弧短而弯曲。

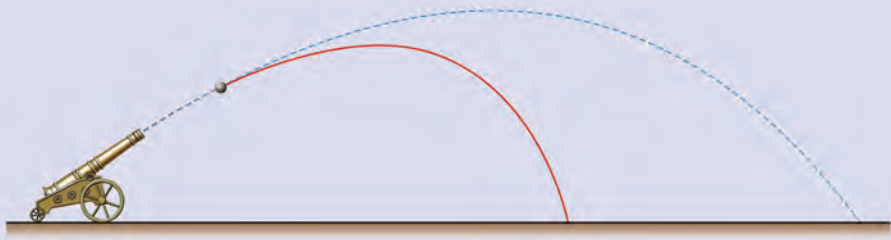


图 1-4-11 弹道曲线

弹道曲线规律只是弹道学最基础的知识. 弹道学的研究对象包括发射装药的点火、燃烧和高温高压气体对发射体的作用, 弹丸或其他发射体在空中的运动, 发射体对目标的作用等. 随着科学技术的发展, 弹道学的研究为民用工程领域提供了理论方法和应用技术.



## 练习

1. 纵跳测试仪是用来测试体能的一种仪器. 人用力从垫板上竖直跳起, 回落到垫板上, 此时仪器上会显示跳起的最大高度. 如果某人测量纵跳高度时, 仪器示数为 50 cm, 那么这个人的起跳初速度为多大? 他在空中的时间有多长?

2. 交通事故发生时, 车上的部分物品会因碰撞而脱离车体, 位于车上不同高度的物品散落到地面上的位置是不同的, 据此可求出碰撞瞬间汽车的速度. 如图 1-4-12 所示, 散落物品 A、B 分别从距地面高  $H$  和  $h$  的位置水平抛落, A、B 落地时相距为  $L$ , 重力加速度为  $g$ . 求碰撞瞬间汽车的行驶速度  $v$ .



图 1-4-12

3. 飞镖是常见的一种娱乐活动. 如图 1-4-13 所示, 靶盘竖直放置, A、O 两点等高且相距 4 m. 将飞镖从点 A 沿 AO 方向掷出, 经 0.2 s 落在靶心正下方的点 B. 不计空气阻力, 重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . 求:

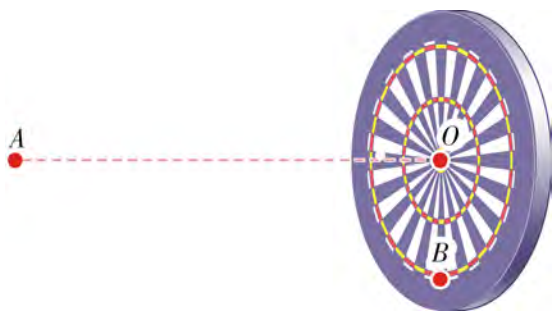


图 1-4-13

- (1) 飞镖从点 A 抛出时的速度.
- (2) 飞镖落点 B 与靶心 O 的距离.

(3) 如果要让飞镖命中靶心 O, 根据本题所给的条件, 应如何调整投掷飞镖的方法?

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。

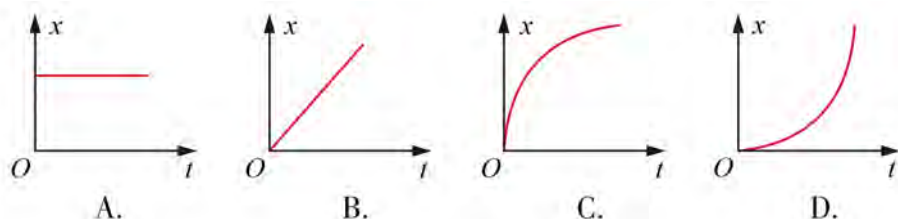


### 回顾与评价

1. 抛体运动和曲线运动的区别与联系是什么？
2. 本章学习了哪些与曲线运动相关的物理模型？
3. 生活和生产中与曲线运动相关的应用例子有哪些？分析这些例子一般采用的思路是什么？
4. 除了本章探究平抛运动特点的实验方案，还有其他探究方案吗？试设计实验方案并开展实验探究。

## 习题一

- 做曲线运动的物体，其物理量一定变化的是（ ）。  
A. 速率                  B. 速度                  C. 加速度                  D. 合力
- 某质点做曲线运动，下列说法正确的是（ ）。  
A. 该质点可能不受力                  B. 该质点可能处于平衡状态  
C. 该质点的加速度一定不为零                  D. 该质点的加速度可能为零
- 下列图像中，能正确描述平抛运动的水平位移与时间关系的是（ ）。



4. “套圈圈”是许多人喜爱的一种游戏。如图 1-1 所示，小孩和大人站在同一竖直线上的不同高度先后水平抛出小圆环，且小圆环都恰好套中前方同一个物体。假设小圆环的运动可视为平抛运动，则（ ）。

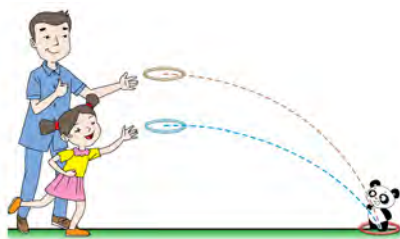


图 1-1

- 小孩抛出的圆环初速度较小
- 两人抛出的圆环初速度大小相等
- 小孩抛出的圆环运动时间较短
- 大人抛出的圆环运动时间较短

5. 如图 1-2 所示，某同学对着墙壁练习打乒乓球。若球与墙壁上的点 A 碰撞后沿水平方向弹离，恰好垂直拍面落在球拍的点 B 上。已知球拍与水平线的夹角  $\theta = 60^\circ$ ，A、B 两点间的高度差  $h = 1 \text{ m}$ 。忽略空气阻力，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，则球刚要落到球拍上时，速度的大小为（ ）。

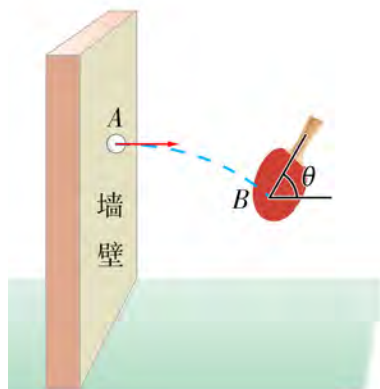


图 1-2

- $4\sqrt{5} \text{ m/s}$
- $2\sqrt{5} \text{ m/s}$
- $\frac{4}{3}\sqrt{15} \text{ m/s}$
- $2\sqrt{15} \text{ m/s}$

6. 物体以  $25\text{ m/s}$  的初速度做竖直上抛运动, 经过\_\_\_\_\_ s 到达最高点, 它在第三秒内的位移为\_\_\_\_\_ m. ( $g = 10\text{ m/s}^2$ )

7. 炮管斜向上倾斜, 与水平线的夹角为  $60^\circ$ , 炮弹从炮口射出时, 速度的大小为  $1000\text{ m/s}$ , 此时炮弹水平方向的速度大小为\_\_\_\_\_ m/s.

8. 课外实验小组的同学为了测定教学楼的高度, 他们确保实验区域无人员进出后, 在楼顶上水平抛出一小球. 测出小球从抛出到落地的时间为  $2\text{ s}$ , 小球抛出的水平距离为  $20\text{ m}$ . 忽略空气阻力, 重力加速度  $g = 10\text{ m/s}^2$ , 教学楼的高度为\_\_\_\_\_ m, 小球抛出时的初速度为\_\_\_\_\_ m/s.

9. 如图 1-3 所示, 一块橡皮用细线悬挂于点  $O$ , 现用一支铅笔贴着细线的左侧水平向右以速度  $v$  匀速移动, 运动过程中保持铅笔的高度不变, 悬挂橡皮的那段细线始终保持竖直. 在铅笔未碰到橡皮前, 橡皮在水平方向上做\_\_\_\_\_运动.

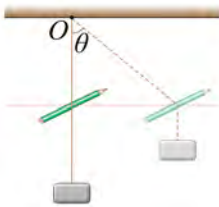


图 1-3

10. 某同学在做“探究物体的平抛运动”实验时, 让小球多次从斜槽上滚下, 并被水平抛出, 在坐标纸上依次记下小球的位置如图 1-4 所示 (点  $O$  为小球的抛出点).

(1) 在图中描出小球的运动轨迹.

(2) 图中某一点的位置有明显的偏离, 其产生的原因可能是小球从斜槽上滚下时的初始位置比其他几次偏\_\_\_\_\_ (选填“高”或“低”).

(3) 该同学从图 1-4 中测得的三组数据如表 1-1 所示, 则小球做平抛运动的初速度  $v_0 =$ \_\_\_\_\_ m/s. ( $g = 10\text{ m/s}^2$ )

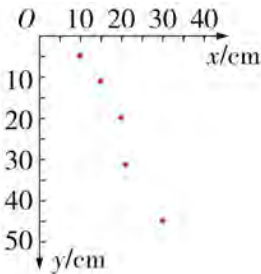


图 1-4

表 1-1

| 数据组           | 1  | 2  | 3  |
|---------------|----|----|----|
| $x/\text{cm}$ | 10 | 20 | 30 |
| $y/\text{cm}$ | 5  | 20 | 45 |

11. 摩托车飞越表演是一项惊险刺激的活动. 假设在一次飞越河流的表演中, 摩托车以  $60\text{ km/h}$  的速度离开平台, 成功落到对面的平台上, 测得两岸平台高度差为  $5\text{ m}$ , 如图 1-5 所示. 若飞越过程中不计空气阻力, 摩托车可以看成质点, 重力加速度  $g = 10\text{ m/s}^2$ . 求:



图 1-5

- (1) 摩托车在空中的时长.
- (2) 河流的最大宽度.
- (3) 摩托车落地瞬间的速度.

12. 国家射击队在进行某项模拟训练时使用的装置如图 1-6 所示. 受训运动员处于高  $H = 20\text{ m}$  的塔顶, 在距塔水平距离为  $l$  的地面上有一个电子抛靶装置, 圆形靶以速度  $v_2$  被装置竖直向上抛出. 当靶被抛出的同时, 运动员立即用枪射击, 子弹初速度  $v_1 = 100\text{ m/s}$ . 若子弹沿水平方向射出, 不计人的反应时间、抛靶装置的高度及子弹在枪膛中的运动时间, 忽略空气阻力, 且靶可以看成质点. ( $g = 10\text{ m/s}^2$ )

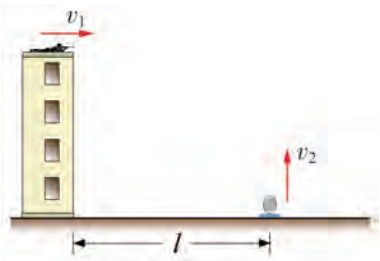


图 1-6

- (1) 当  $l$  如何取值时, 无论  $v_2$  为何值, 靶都不能被击中?
- (2) 若  $l = 100\text{ m}$ ,  $v_2 = 20\text{ m/s}$ , 试通过计算说明靶能否被击中.

13. 近年来, 我国各地都有组织游泳横渡江河的活动以倡导环保意识和体育精神. 在一次横渡珠江的游泳活动中 (如图 1-7 所示), 一名游泳爱好者以一定速率向对岸游去. 建构物理模型, 分析他到达对岸所耗时间受什么因素影响.



图 1-7

14. 根据平抛运动的原理设计实验方案, 测量弹射器弹丸的射出速度. 提供的实验器材有弹射器 (含弹丸, 如图 1-8 所示)、铁架台 (带夹具)、米尺.

- (1) 画出实验示意图.
- (2) 在安装弹射器时, 应注意什么?
- (3) 实验中需要测量的物理量有哪些? 在示意图中用字母标出.

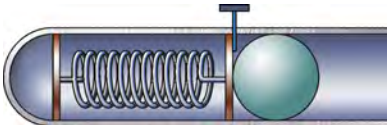


图 1-8

- (4) 求弹丸的射出速度表达式.

15. 在农田旁离地一定高度架有一水管, 如图 1-9 所示. 只用一把卷尺如何估算出水口在单位时间内流出的水量 (假设水从出水口沿水平方向均匀流出)? 结合平抛运动的知识, 设计测量方案, 并说明需测量的物理量.



图 1-9



## 第二章

## 圆周运动

圆周运动是一种特殊的曲线运动。从曲线运动到平抛运动和圆周运动的学习，体现了从一般到特殊的科学研究思路，而运用运动和相互作用观念解决问题的思想则贯穿始终。

人类很早以前就在生产实践活动中对圆周运动有所认识。早在我国西汉时期就应用平向水轮通过滑轮和皮带推动风箱为炼铁炉鼓风。时钟运行、汽车和火车转弯、游乐场过山车行进，乃至科学研究中离心分离设备的运转，都与圆周运动有着密切的关系。这其中蕴含着怎样的物理原理呢？

这一章我们将从匀速圆周运动入手，认识描述匀速圆周运动的物理量，探究物体做圆周运动的条件，并应用牛顿运动定律分析和解决生活中的圆周运动问题，体会牛顿运动定律的普适性。

## 第一节

## 匀速圆周运动



物体沿着圆形轨迹所做的运动是一种常见的曲线运动。如图 2-1-1 所示，手表的指针、摩天轮的座舱、飞机发动机的叶片，这些物体上的任一点都会绕某一轴心转动，且该点转动一圈后，其划过的轨迹是一个圆。



图 2-1-1 物体上的点绕某一轴心转动

如果质点的运动轨迹是圆，那么这一质点的运动就称为**圆周运动** (circular motion)。

### 线速度

怎样描述质点做圆周运动的快慢？我们用位移、速度和加速度这些物理量来描述直线运动，是否也可以用这些物理量来描述圆周运动呢？



#### 观察与思考

如图 2-1-2 所示，仔细观察自行车车轮同一辐条上的  $A$ 、 $B$  两点，思考下列问题：如何判断在圆周轨道上  $A$ 、 $B$  两点哪点运动得更快？



图 2-1-2 观察自行车车轮

观察上述实验现象,同一辐条上  $A$ 、 $B$  两点在相同时间内绕轴心转过的角度是一样的,但点  $A$  通过的弧长比点  $B$  通过的弧长更长. 类比瞬时速度的定义,在一段很短的时间  $\Delta t$  内,点  $A$  转过的弧长为  $\Delta l$ ,则  $\frac{\Delta l}{\Delta t}$  反映了点  $A$  沿圆周运动的快慢,称为**线速度** (linear velocity),用  $v$  表示,即

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

由上式可知,点  $A$  的线速度大于点  $B$  的线速度. 当  $\Delta t$  足够小时,弧长  $\Delta l$  与质点的位移  $\Delta s$  近似相等,如图 2-1-3 所示,此时线速度  $v$  实际上就是我们在直线运动中学过的瞬时速度.

如果做圆周运动的质点线速度的大小不随时间变化,这种运动称为**匀速圆周运动** (uniform circular motion). 质点做匀速圆周运动时,线速度的大小时时相等,此时线速度的大小  $v$  可以用质点通过的弧长  $l$  与通过这段弧长所用时间  $t$  之比来表示,即

$$v = \frac{l}{t} \quad (2.1.1)$$

线速度是矢量,既有大小,又有方向. 圆周运动也是曲线运动,因此线速度的方向沿着圆周该点的切线方向,如图 2-1-4 所示. 注意,线速度的方向时刻变化,匀速圆周运动中的“匀速”指的是速率不变.

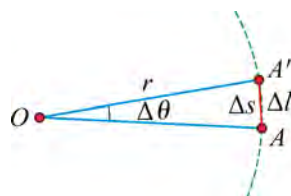


图 2-1-3 位移  $\Delta s$  与弧长  $\Delta l$  近似相等

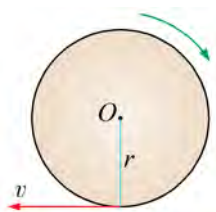


图 2-1-4 线速度的方向沿着圆周该点的切线方向

## 角速度

如图 2-1-2 所示,当自行车车轮转动时,在同一辐条上的各点虽然线速度不同,但是在相同的时间内转过的角度相等. 为了表示圆周运动的这一特征,需要引入一个新的物理量. 如图 2-1-3 所示,在一段很短的时间  $\Delta t$  内,半径  $OA$  转过的角度为  $\Delta\theta$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  反映了质点绕圆心转动的快慢,称为**角速度** (angular velocity),用符号  $\omega$  表示,即

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

物体做匀速圆周运动时,角速度不变,此时角速度的大小  $\omega$  可以用质点所在半径转过的角度  $\theta$  与所用时间  $t$  之比来表示,即

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (2.1.2)$$

角速度的单位由角度和时间的单位决定. 在国际单位制中,角速度的单位是弧度每秒,符号是 rad/s.

匀速圆周运动还有一个重要特征：它是一种周期性运动，即圆周上任意点每经过一定的时间，又回到原来的位置，其线速度的大小和方向也与原来的大小和方向一样。因此，我们还可以引入一个物理量来描述匀速圆周运动的快慢：做匀速圆周运动的质点，运动一周所用的时间称为**周期**（period），用符号  $T$  表示。周期的单位与时间的单位相同。

我们把物体转过的圈数与所用时间之比称为**转速**，用符号  $n$  表示。转速的单位是转每秒，符号是  $\text{r/s}$ ；或者转每分，符号是  $\text{r/min}$ 。在生产和生活中，我们常用转速来描述匀速圆周运动的快慢，如发电机、电动机、计算机硬盘等设备转动的快慢就常用转速来表示。

## 线速度、角速度和周期间的关系

线速度、角速度和周期都可以用来描述匀速圆周运动的快慢，它们之间有怎样的关系呢？设某一质点沿半径为  $r$  的圆周做匀速圆周运动，在一个周期  $T$  内，做匀速圆周运动的质点通过的弧长为  $2\pi r$ ，转过的角度为  $2\pi$ ，则线速度的大小与周期的关系为

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

(2.1.3)

角速度的大小与周期的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

(2.1.4)

由式 (2.1.3) 和式 (2.1.4)，可得线速度与角速度的关系为

$$v = \omega r$$

(2.1.5)

由以上三式可以看出描述匀速圆周运动快慢的三个物理量之间的关系。其中，式 (2.1.5) 表示在匀速圆周运动中，质点线速度的大小等于角速度的大小与半径的乘积。



### 讨论与交流

1. 有同学认为，匀速圆周运动是线速度不变的运动，这种说法是否正确？
2. 根据转速的定义，尝试推导转速  $n$  与线速度  $v$ 、角速度  $\omega$  和周期  $T$  之间的关系。

**例题：**某同学以自行车的齿轮传动作为探究学习的课题。该同学通过观察发现，自行车的大齿轮与小齿轮通过链条相连，后轮与小齿轮绕共同的轴转动，如图 2-1-5 所示。测得大齿轮的半径为  $r_1$ 、小齿轮的半径为  $r_2$ 、自行车后轮的半径为  $R$ 。若测得在时间  $t$  内大齿轮转动的圈数为  $N$ ，求：

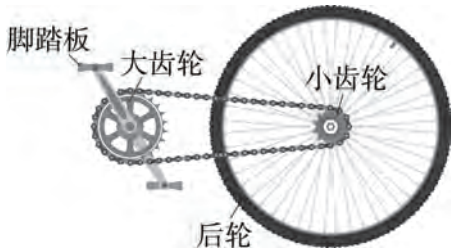


图 2-1-5 自行车的传动系统

(1) 大齿轮转动角速度的大小  $\omega$ .

(2) 自行车后轮线速度的大小  $v$ .

**分析:** (1) 根据在时间  $t$  内大齿轮转动的圈数  $N$ , 可以求出大齿轮的转动周期  $T$ , 再结合角速度与周期的关系, 从而求出大齿轮的角速度  $\omega$ .

(2) 大齿轮与小齿轮通过链条相连, 两齿轮边缘线速度的大小相等. 后轮与小齿轮同轴转动, 两者角速度的大小相等. 根据线速度与角速度的关系, 从而求出后轮线速度的大小  $v$ .

**解:** (1) 大齿轮的周期  $T = \frac{t}{N}$ , 则

大齿轮转动角速度的大小

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2N\pi}{t}.$$

(2) 大齿轮和小齿轮边缘线速度的大小相等, 有

$$r_1\omega = r_2\omega',$$

解得小齿轮角速度的大小  $\omega' = \frac{r_1\omega}{r_2}$ .

小齿轮角速度与后轮角速度的大小相等, 则

后轮线速度的大小

$$v = R\omega' = R\omega \frac{r_1}{r_2} = \frac{2\pi RN}{t} \cdot \frac{r_1}{r_2}.$$



## 实践与拓展

如图 2-1-6 所示是变速自行车的齿轮组. 查阅相关资料, 有条件的同学可以仔细观察和使用变速自行车, 了解它是如何实现变速功能的.



图 2-1-6 变速自行车的齿轮组

## 从牛力齿轮到高铁齿轮

勤劳勇敢的先辈们在生产实践中利用他们的聪明才智，发明了古老的齿轮传动技术。山西省曾经出土过秦代的齿轮。明代出版的《天工开物》一书中，有牛力齿轮（牛转翻车）的图画，如图 2-1-7 所示。这说明古人早已懂得利用两个大小不同的齿轮来达到改变转速的目的。

祖先的智慧在今天的中华大地得到继承与发扬。

中国高铁，从无到有，再到今天的“世界速度”，已经成为中国制造的一张“金名片”。齿轮传动系统是高铁列车的重要部件，其工作性能直接影响到高铁列车运行的可靠性和安全性，也是高铁列车跑出“世界速度”的关键所在。

为解决束缚高铁发展的国际性难题，我国科研人员用创新的机械结构和多学科综合优化的方法，围绕温升、振动、集成设计以及可靠性等方面开展技术攻关，研发了新型高铁列车齿轮传动系统，并实现批量生产和应用。该系统打破了国外垄断，使中国高铁的持续运行速度达到 350 km/h。

2018 年 1 月，国家科学技术奖励大会在北京召开，我国自主研发的高铁列车齿轮传动系统（如图 2-1-8 所示）荣获国家科学技术进步奖二等奖。

不忘初心，砥砺前行。从古代的牛力齿轮到现代的高铁齿轮，中国制造正一步步走向新的辉煌！

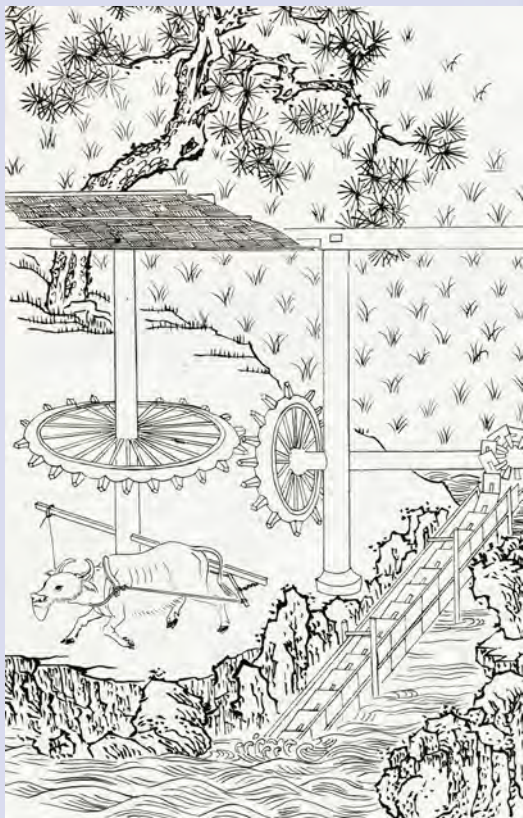


图 2-1-7 牛力齿轮（牛转翻车）

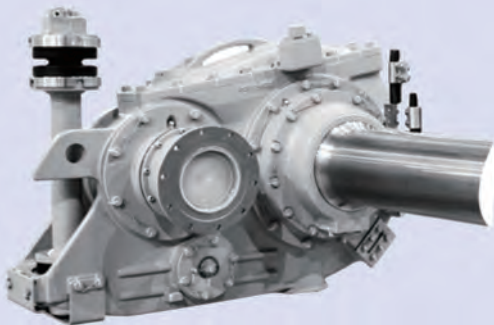


图 2-1-8 高铁列车齿轮传动系统（部分）



## 练习

1. 对于做匀速圆周运动的物体，下面的说法是否正确？为什么？

- (1) 线速度不变.
- (2) 线速度的大小不变.
- (3) 角速度不变.
- (4) 周期不变.

2. 根据如图 2-1-9 所示的时钟，回答下列问题.

(1) 秒针、分针和时针的转动周期分别是多少？角速度又是多少？

(2) 在图中标出秒针的尖端经过“3”“6”“9”“12”时刻时的线速度方向.

(3) 如果要求秒针、分针和时针尖端的线速度大小，还需要测量什么物理量？算一算家里的指针式时钟或指针式手表各指针尖端的线速度大小.



图 2-1-9

3. 皮带传动是常见的传动方式之一，可以建构如图 2-1-10 所示的物理模型来分析其传动原理. 该模型中 A、B 两轮同轴转动，A、B、C 三轮半径大小的关系是  $r_A = r_C = 2r_B$ . 若皮带不打滑，求：



图 2-1-10

- (1) 三个轮角速度的大小之比.
- (2) 三个轮边缘线速度的大小之比.

4. “飞车走壁”是一种传统的杂技艺术，杂技演员驾驶摩托车在倾角很大的“桶壁”内侧做圆周运动而不掉下来. 如图 2-1-11 所示，一杂技演员驾驶摩托车沿半径为 5 m 的圆周做匀速圆周运动，在 10 s 内运动的弧长为 200 m，求：



图 2-1-11

- (1) 摩托车线速度的大小.
- (2) 摩托车运动的周期.

## 第二节 向心力与向心加速度

物体做曲线运动的条件是，物体受到的合外力方向与速度方向不在同一直线上。匀速圆周运动是一种特殊的曲线运动，那么，物体做匀速圆周运动有什么特点？

### 感受向心力

由牛顿第一定律可知，力是改变物体运动状态的原因。物体做匀速圆周运动时的速度方向时刻在改变，即其运动状态在不断变化，这一过程中物体的受力情况有什么特点？



#### 观察与思考

如图 2-2-1 所示，绳子的一端系一小球，另一端用手固定，让小球在近似光滑的桌面上做匀速圆周运动。

- (1) 此时牵绳的手有什么感觉？
- (2) 小球受到的合外力方向如何变化？
- (3) 松手后，小球还能继续做圆周运动吗？

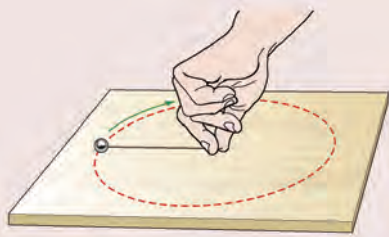


图 2-2-1 实验示意图

在上述实验中，小球受到的合外力约等于绳子的拉力。虽然小球所受合外力的方向时刻在改变，但它始终指向运动轨迹的圆心。正是合外力的作用使小球的运动方向不断改变，并使它始终维持在圆周轨道上。

大量实验表明，物体做匀速圆周运动时所受合外力的方向始终指向轨迹的圆心，这个指向圆心的合外力称为**向心力**（centripetal force）。

做匀速圆周运动的物体线速度方向沿着运动轨迹的切线方向，物体所受向心力方向始终指向圆心，总是与线速度方向垂直。所以匀速圆周运动中的向心力只改变物体线速度的方向，不改变线速度的大小。

向心力是根据力的作用效果来命名的，它可以由不同性质的力如弹力、重力、摩擦力

等提供，也可以由某一力的分力或某些力的合力提供。例如，旋转圆桌上的杯子由静摩擦力提供向心力，如图2-2-2所示；游乐场里的旋转秋千，由重力和吊绳拉力的合力提供向心力，如图2-2-3所示。



图 2-2-2 旋转圆桌上的杯子及其受力分析



图 2-2-3 旋转秋千及其受力分析

## 探究影响向心力大小的因素

匀速圆周运动的向心力大小与什么因素有关呢？下面通过实验进行探究。

### 实验与探究

**实验 1：**利用如图 2-2-1 所示的实验器材，通过牵绳的手感受绳子拉力的变化，定性探究影响匀速圆周运动向心力大小的因素。方案如下：

- (1) 保持其他因素不变，增大或减小小球旋转的角速度。
- (2) 保持其他因素不变，增大或减小小球旋转的半径（改变绳长）。
- (3) 保持其他因素不变，换一个质量较大的球进行实验。
- (4) 除了上述三个影响因素，影响向心力大小的因素还有哪些？如何利用这些实验器材检验猜想是否正确？

**实验 2：**利用向心力演示器（如图 2-2-4 所示），定量探究匀速圆周运动所需向心力的大小与物体的质量、角速度的大小和运动半径之间的关系。



图 2-2-4 向心力演示器

转动手柄可以使长槽和短槽分别随变速塔轮匀速转动，槽内的小球随之做匀速圆周运动。长槽和短槽的挡板为小球的运动提供向心力。小球对挡板的作用力通过杠杆结构使弹簧测力筒下降，露出标尺。通过标尺上红白相间等分格的数量，即可求得两个小球所受向心力的大小之比。

可以调整塔轮上的皮带，使其套到半径大小不同的塔轮上，改变长短槽旋转角速度之比。也可以将小球放在长槽不同的卡位上，改变小球做圆周运动的半径。

参考上述实验仪器原理的介绍，根据实验需要测量的物理量，设计相应的实验方案，完成下列探究活动。

**探究 1：保持两个小球质量  $m$ 、转动半径  $r$  相同，探究两个小球所受向心力  $F$  与角速度  $\omega$  之间的关系。**

(1) 如何保持  $m$  和  $r$  相同？

(2) 如何使小球以不同的角速度  $\omega$  运动？

(3) 在表 2-2-1 中记录实验数据。

表 2-2-1 实验数据记录表

| 实验次数 | 角速度之比 | 标尺格子数之比（向心力之比） |
|------|-------|----------------|
| 1    |       |                |
| 2    |       |                |
| 3    |       |                |

(4) 实验结论是\_\_\_\_\_。

**探究 2：保持\_\_\_\_\_相同，探究\_\_\_\_\_之间的关系。**

(1) \_\_\_\_\_

(2) \_\_\_\_\_

(3) 在表 2-2-2 中记录实验数据。

表 2-2-2 实验数据记录表

| 实验次数 |  |  |
|------|--|--|
| 1    |  |  |
| 2    |  |  |
| 3    |  |  |

(4) 实验结论是\_\_\_\_\_。

**探究 3：保持\_\_\_\_\_相同，探究\_\_\_\_\_之间的关系。**

参考前面的探究实验，采用控制变量法，自主完成向心力与第三个物理量之间的关系探究实验。

实验表明，小球做圆周运动的角速度、半径和小球的质量，都会影响小球做圆周运动所受向心力的大小。小球做匀速圆周运动所受向心力的大小，在质量和角速度一定时，与运动半径成正比；在质量和运动半径一定时，与角速度的平方成正比；在运动半径和角速度一定时，与质量成正比。

研究表明，物体做匀速圆周运动时所受向心力的大小  $F$  与质量  $m$ 、角速度  $\omega$  和转动半径  $r$  之间的关系可表示为

$$F = m\omega^2 r \quad (2.2.1)$$

如果将  $\omega = \frac{v}{r}$  代入式 (2.2.1)，可得

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (2.2.2)$$

## 向心加速度

根据牛顿第二定律  $F = ma$ ，加速度  $a$  与合力  $F$  的方向一致。在匀速圆周运动中， $F$  是指向圆心的向心力，所以加速度  $a$  也一定指向圆心，称为**向心加速度** (centripetal acceleration)。

由式 (2.2.1) 和式 (2.2.2)，可得向心加速度的大小

$$a = \omega^2 r \quad (2.2.3)$$

或

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (2.2.4)$$

向心力和向心加速度的公式虽然是从匀速圆周运动中得出的，但也适用于非匀速圆周运动。使用上述公式分析非匀速圆周运动时，公式中的  $a$ 、 $v$ 、 $\omega$  取瞬时值。



### 实践与拓展

下面是另外两种探究影响向心力大小因素的实验方案。在课外动手实践，比较利用生活中的器材开展探究和利用数字化实验仪器开展探究各有什么优缺点。

#### 方案1：利用生活中的器材

如图 2-2-5 所示，使细线穿过空心笔杆，一端拴住小物体，另一端用一只手牵住，另一只手抓住笔杆并用力晃动，使小物体做圆周运动。

如何利用这些生活中的物品探究影响向心力大小的因素？设计方案和实际操作，并思考如何进一步改进实验方案。

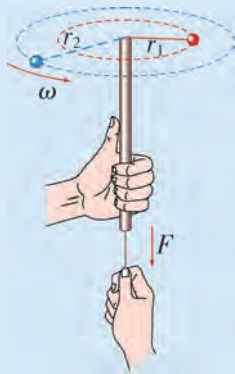


图 2-2-5 实验示意图

### 方案2：利用数据采集器

如图2-2-6所示，将光电门传感器和力传感器固定在向心力实验器上，并将其接入数据采集器。旋臂上的砝码通过轻质杆与力传感器相连，以测量砝码所受向心力的大小。拨动旋臂使之做圆周运动。挡光杆每次通过光电门传感器时，系统将自动记录砝码所受向心力的大小 $F$ ，并计算此时的角速度 $\omega$ 。

若可以更换不同质量的砝码，也可以改变砝码的运动半径，如何利用这套实验器材探究影响向心力大小的因素？用控制变量的方法设计实验方案，并开展探究。

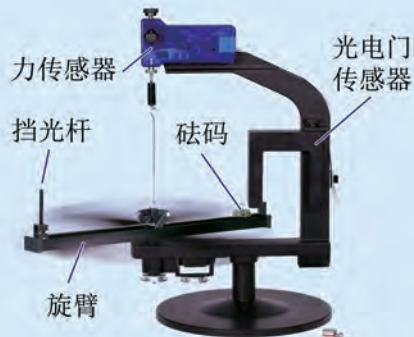
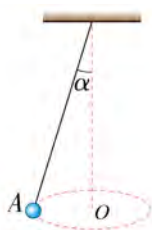


图2-2-6 接有传感器的向心力实验器

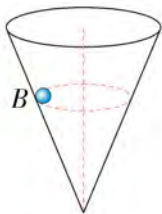


### 练习

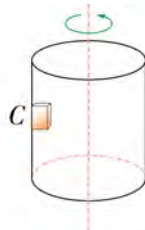
1. 物体做匀速圆周运动时，下列说法是否正确？为什么？
  - (1) 物体一定受到恒力的作用。
  - (2) 物体所受合外力必须等于零。
  - (3) 物体所受合外力的大小可能变化。
  - (4) 物体所受合外力的大小不变，方向不断改变。
2. 分析图2-2-7中物体的受力情况，并说明它们做匀速圆周运动时向心力的来源。
  - (1) 如图2-2-7(a)所示，小球A挂在细线下端，并在水平面内做匀速圆周运动。
  - (2) 如图2-2-7(b)所示，小球B在内壁光滑的固定倒立圆锥内表面做匀速圆周运动。
  - (3) 如图2-2-7(c)所示，小物块C在直立圆筒的内壁上随圆筒做匀速圆周运动。



(a)



(b)



(c)

图2-2-7

3. 飞机做特技表演时常做俯冲和拉起运动. 如图 2-2-8 所示, 飞机在某次做俯冲拉起运动过程中, 经过最低点附近时, 可看作是做半径为 500 m 的圆周运动. 若飞行员的质量为 65 kg, 飞机经过最低点时速率为 360 km/h, 这时飞行员对座椅的压力有多大? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

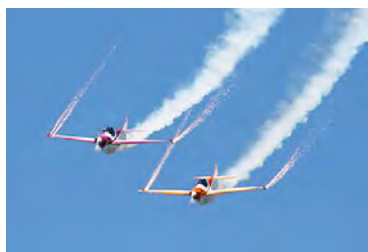


图 2-2-8

4. 某同学设计了一个用圆锥摆粗略验证向心力公式的实验, 如图 2-2-9 所示, 细线下端悬挂一个钢球, 细线上端固定在铁架台上. 将画着几个同心圆的纸平铺于水平桌面上, 使悬挂点与圆心位于同一铅垂线上. 用手带动钢球, 设法使它沿纸上的某个圆做圆周运动 (钢球恰好不触及纸面).

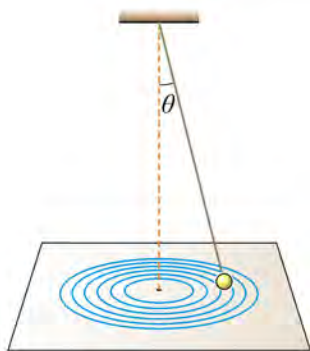


图 2-2-9

(1) 在该实验中, 通过纸上的圆测量钢球做匀速圆周运动的\_\_\_\_\_, 用天平测量钢球的质量  $m$ , 用秒表测量钢球运动周期  $T$ , 即可利用公式  $F = m\omega^2 r$  计算钢球运动时的向心力的大小.

(2) 求钢球受到的合力. 结合上一问中所测量的物理量, 只要再测出悬点与钢球间的竖直高度  $h$ , 即可计算合力  $F_{\text{合}} = \underline{\hspace{2cm}}$  (用物理量的符号表示).

(3) 若向心力  $F$  与合力  $F_{\text{合}}$  在误差范围内相等, 便粗略验证了向心力公式的正确性.

(4) 为增强实验结论的可靠性, 第 (1) 问中周期  $T$  的测量方法应如何改进?

### 第三节 | 生活中的圆周运动

在日常生活中，我们在公路弯道、铁路弯道、拱形与凹形路面等地方，常可见到与圆周运动有关的物理现象。下面结合向心力的概念和牛顿第二定律进行分析和讨论。

#### 公路弯道

如图2-3-1所示，在公路的弯道处，常会挂有减速标志牌，这是什么缘故？

从物理模型的角度思考，汽车在水平公路上转弯时相当于在做圆周运动，此时向心力由车轮与路面间的静摩擦力 $f$ 来提供，如图2-3-2所示。根据向心力的公式，有

$$F = f = m \frac{v^2}{r}$$

解得汽车转弯时的速度大小

$$v = \sqrt{\frac{fr}{m}}$$

由上式可知，如果弯道半径一定，防止汽车转弯时车轮打滑的安全行驶速度和车轮与路面间的最大静摩擦力 $f_{\max}$ 有关。雨天路滑时，车轮与路面间的最大静摩擦力 $f_{\max}$ 减小，汽车要在同一弯道安全转弯，其行驶速度也需随之减小，否则汽车会有向弯道外侧打滑的风险，容易引发交通事故。

那么，在公路弯道处，如何使汽车不必大幅减速而又能安全通过呢？我们可在公路弯道处采用外高内低的斜坡式设计（如图2-3-3所示），从而使车辆能够迅速而又安全地通过弯道。下面建构物理模型，分析其中的原理。



图2-3-1 急转弯减速标志

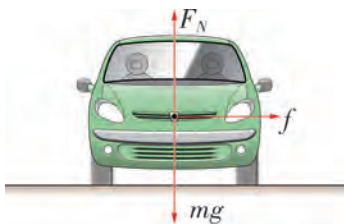


图2-3-2 汽车在水平路面上转弯时的受力情况



图2-3-3 公路弯道

如图 2-3-4 所示, 汽车在外高内低、倾角为  $\theta$  的倾斜路面弯道处以速度  $v$  行驶. 重力  $mg$  和地面支持力  $F_N$  的合力  $F$  指向弯道内侧. 若汽车在转弯的某一时刻, 车轮沿斜坡方向所受的静摩擦力为 0, 此时合力  $F$  恰好提供汽车转弯所需向心力, 根据向心力的公式, 可得

$$F = mg \tan \theta = m \frac{v^2}{r}$$

解得汽车转弯时的速度大小

$$v = \sqrt{gr \tan \theta}$$

上式表示仅由重力和支持力的合力提供向心力时的汽车速度.

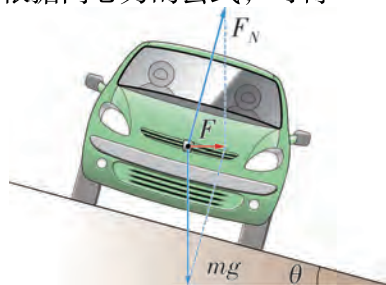


图 2-3-4 汽车在倾斜路面上转弯时的受力情况



### 讨论与交流

汽车在外高内低的弯道处转弯时, 如果速度的大小不等于  $\sqrt{gr \tan \theta}$ , 此时由哪些力的合力提供向心力? 汽车转弯的速度又受到什么因素的限制?

## 铁路弯道

火车的车轮与汽车的车轮不同, 火车在铁路弯道处又是如何转弯的?

观察火车的车轮 (如图 2-3-5 所示), 可以发现车轮有突出的轮缘, 轮缘在铁轨上可以起到限定方向的作用. 当火车在水平轨道上转弯时, 外侧车轮的轮缘挤压外轨, 车轮受外轨的横向力作用, 使火车获得转弯所需的向心力. 但是, 轮缘与铁轨间的挤压和摩擦会造成车轮磨损, 而且火车质量越大、车速越快时, 磨损程度越高, 不利于行车安全.



图 2-3-5 火车车轮的轮缘受铁轨挤压



图 2-3-6 火车通过弯道时的受力情况

为了解决这一问题, 工程师们在设计铁路时, 让弯道处铁轨的外轨略高于内轨 (如图 2-3-6 所示), 与汽车在倾斜路面上转弯的原理相似, 巧妙地借助火车受到的支持力和重力的合力提供部分向心力, 减轻轮缘对外轨的挤压. 修筑铁路时, 根据弯道的半径和规定的行驶速度, 适当选择内外轨的高度差, 可以使火车转弯时所需的向心力几乎完全由重力和支持力的合力来提供.

对于运行速度显著提升的高铁列车, 为了避免高铁列车在转弯时速度大幅降低, 根据式子  $v = \sqrt{gr \tan \theta}$ , 可以适当加大铁路弯道的半径  $r$ . 设计行驶速度为 350 km/h 的铁路一般



图 2-3-7 高铁弯道

弯道半径都在 8 km 以上。尽管也可以通过增大轨道的倾斜角  $\theta$  来提高弯道的通行速度，但如果轨道过于倾斜，就有可能导致列车重心偏离过度而发生侧翻。此外，高铁列车转弯时，还需要利用转向架来解决列车失稳等问题，其中涉及更多的物理知识和技术应用，大家可以进行更深入的了解和研究。

## 拱形与凹形路面

拱形路面是一种常见的路面形式，汽车驶过拱形路面时的运动也可以看作圆周运动。下面建构物理模型，分析汽车通过拱形路面的最高点时对路面的压力大小。

选汽车为研究对象，如图 2-3-8 所示，汽车在竖直方向上受到的重力  $G$  和支持力  $F_N$  的合力就是竖直向下的向心力，即

$$F = G - F_N$$

根据

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

得

$$G - F_N = m \frac{v^2}{r}$$

拱形路面对汽车的支持力

$$F_N = G - m \frac{v^2}{r}$$

根据牛顿第三定律，路面对汽车的支持力  $F_N$  在数值上等于路面所受的压力  $F_N'$ 。所以汽车对路面压力的大小

$$F_N' = F_N = G - m \frac{v^2}{r}$$

由此可知，汽车对拱形路面的压力  $F_N'$  小于汽车的重力  $G$ ，而且汽车的速度越大，汽车对路面的压力越小。

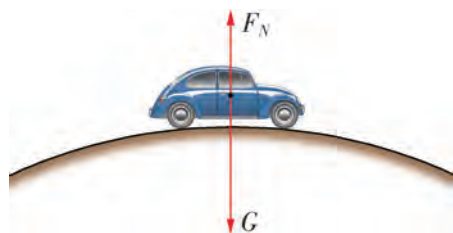


图 2-3-8 汽车过拱形路面  
最高点时竖直方向的受力情况



## 讨论与交流

某同学受到“汽车过拱形路面”问题的启发，联想起自己坐车过拱形路面最高点时，有时会有一种“飘”起来的感觉。

以小组为单位开展讨论，对上述运动状态及后续运动过程做出分析，并指出其中存在的安全问题。

汽车在通过凹形路面最低点时，对路面的压力大小又应如何分析？

选汽车为研究对象，如图 2-3-9 所示，汽车通过凹形路面最低点时，汽车在竖直方向上受到的重力  $G$  和支持力  $F_N$  的合力就是竖直向上的向心力，即

$$F = F_N - G = m \frac{v^2}{r}$$

$$F_N = G + m \frac{v^2}{r}$$

根据牛顿第三定律，汽车对凹形路面的压力

$$F_N' = F_N = G + m \frac{v^2}{r}$$

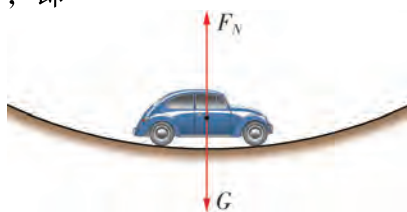


图 2-3-9 汽车过凹形路面最低点时竖直方向的受力情况

从上式可知，汽车经过凹形路面最低点时，汽车对路面的压力大于汽车所受重力，而且速度越大，汽车对路面的压力越大。因此，汽车经过凹形路面时不宜高速行驶，否则容易发生爆胎意外。



## 实践与拓展

搜集相关资料，分析人骑自行车转弯时（如图 2-3-10 所示）所需向心力由什么提供，并探究可通过什么方式安全转弯。



图 2-3-10 人骑自行车转弯

## 田径运动员的弯道跑技术

2017年7月8日,亚洲田径锦标赛上中国队在男子 $4 \times 100$  m决赛中勇夺金牌.随后在7月22日国际田联钻石联赛男子 $4 \times 100$  m决赛中,中国队再次勇夺金牌.中国运动员凭借强劲的弯道跑技术,为中国队赢得了优势.

那么,弯道跑技术涉及哪些物理知识呢?

目前,国际性田径比赛使用的是最内圈周长为400 m的标准跑道.跑道通常设8~9条分道,最内圈弯道半径(内径)为37.90 m.由于弯道在 $4 \times 100$  m接力赛中约占全程的 $\frac{3}{5}$ ,所以弯道跑技术成为制胜的关键.

根据圆周运动的知识,弯道跑中最重要的是有意识地使身体向圆心方向倾斜(如图2-3-11所示),蹬地与摆动都应向身体向圆心方向倾斜趋于一致.对于不同道次上的运动员来说,跑道半径 $R$ 不同,即使速率相同,人体的倾斜角度也不同.据估算,在相同的速率下,运动员在最内侧和最外侧跑道上比赛时,所需向心力相差可达20%,人体的倾斜角度相差近 $3^\circ$ .这也是运动员重视比赛道次安排的原因.



图2-3-11 比赛中的弯道跑



### 练习

1. 设冰面对溜冰运动员水平方向的最大作用力为运动员对冰面压力的 $k$ 倍,运动员在水平冰面上沿半径为 $r$ 的圆周滑行.

(1) 若只依靠冰面对运动员的作用力提供向心力,运动员的安全速率为多少?

(2) 如图2-3-12所示,为什么溜冰运动员在转弯处都采取向内倾斜身体的方式滑行?

2. 质量为50 kg的一名同学坐在绳长为4.0 m的秋千上,当他经过最低点时速率为2 m/s. 不计各种阻力, $g = 10 \text{ m/s}^2$ . 求当他经过最低点时,对秋千板的压力大小.

3. 一名同学看过“水流星”表演后,用一次性杯子和绳子也制作了一个“水流星”. 如图2-3-13所示,他抡动绳子让杯子在竖直平面内做圆周运动. 若杯子和水能做出完整圆周运动,估算它们经过最高点时的最小速度.



图2-3-12



图2-3-13

## 第四节 离心现象及其应用

在乘公交车时，我们常常能听到车上的广播提醒说：“车辆转弯，请乘客们坐稳扶好。”在车辆急转弯时，乘客如果没有扶好，往往会向弯道的外侧倾倒，其中的原理是什么？

### 离心现象

下面我们通过实验来探究与公交车急转弯时类似的现象。



#### 观察与思考

在一个水平圆盘上固定一条宽度略大于乒乓球直径的槽，将乒乓球放在距圆盘中心不远处的槽内，如图 2-4-1 所示。慢慢转动圆盘，并逐渐加速转动，观察乒乓球做怎样的运动。结合向心力的知识对上述现象作出解释。

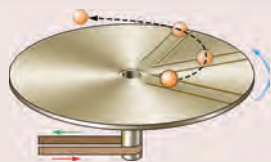


图 2-4-1 乒乓球在转动圆盘上运动

在上述实验中，慢慢转动圆盘时，乒乓球在槽里随圆盘一起转动。当圆盘转速增大时，乒乓球沿槽逐渐做远离圆盘中心的运动，最后从圆盘边缘飞出。

做圆周运动的物体由于自身的惯性，总有沿圆周切线方向运动的趋势。它之所以没有远离圆心，是因为向心力持续地把物体拉到圆周轨道上，使物体与圆心的距离保持不变。

根据向心力公式可知，实验中当圆盘转速不太大时，乒乓球在水平方向上受到的静摩擦力足以提供维持球做圆周运动的向心力，此时  $F_{\text{合}} = m\omega^2 r$ 。因此，乒乓球能够随圆盘一起转动。

当圆盘转速继续增大时，乒乓球做圆周运动所需的向心力不断增大。当乒乓球受到的最大静摩擦力不足以提供它做圆周运动所需向心力时， $F_{\text{合}} < m\omega^2 r$ ，合力已经无法将乒乓球再拉回圆周轨道上，于是乒乓球开始向外偏离圆周轨道运动（如图 2-4-2 所示），导致

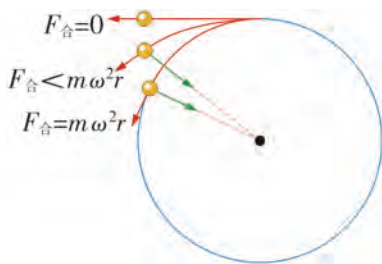


图 2-4-2 离心现象分析示意图

运动半径  $r$  继续增大. 在角速度  $\omega$  不变的情况下所需向心力继续增大, 使得乒乓球持续做半径不断增大的运动, 形成一条逐渐远离圆心的曲线运动轨迹.

公交车急转弯时, 乘客身体往往会向弯道的外侧倾倒, 与实验中乒乓球远离圆心的现象是相似的.

当使物体做圆周运动的向心力突然消失, 会发生什么情况呢? 例如, 用细绳拴着一个小物体, 使之在光滑水平面内做圆周运动. 突然松手或绳子断了, 向心力变为零, 此时小物体将沿切线方向飞出而做远离圆心的运动, 如图 2-4-3 所示.

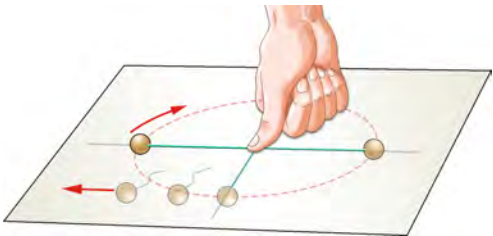


图 2-4-3 在光滑水平面内转动物体, 突然松手

做圆周运动的物体, 在所受向心力突然消失或合力不足以提供维持圆周运动所需向心力的情况下, 会做逐渐远离圆心的运动. 这种现象称为离心现象.

## 离心现象的应用

在生活和生产中, 有许多应用离心现象的例子.

例如, 在下雨天我们可以通过旋转雨伞的方法来甩掉雨伞上的水滴, 如图 2-4-4 所示. 缓慢转动雨伞时, 水滴和雨伞之间的附着力提供此时水滴做圆周运动所需的向心力, 水滴飞不出去; 雨伞转动快到一定程度时, 水滴和雨伞之间的最大附着力不足以提供水滴所需的向心力, 水滴就会做离心运动被甩出去.

又如, 田径比赛中的链球项目就是利用离心现象来实现投掷的. 链球的投掷通过预摆和旋转来完成. 如图 2-4-5 所示, 运动员手持链球链条的一端, 在链球高速旋转时, 突然松手, 向心力消失, 链球就沿圆周轨迹切线方向飞出.

利用离心现象工作的机械叫作离心机械, 如洗衣机的脱水筒和离心分离器.

将湿衣服放在洗衣机的脱水筒中, 当脱水筒转动较慢时, 水滴和衣服之间的附着力足以提供水滴运动所需的向心力, 水滴做圆周运动; 当脱水筒转速加快时 (如图 2-4-6 所示), 附着力不足以提供水滴运动所需的向心力, 水滴做离心运动, 穿过筒孔飞出筒外.



图 2-4-4 旋转雨伞, 甩掉雨伞上的水滴

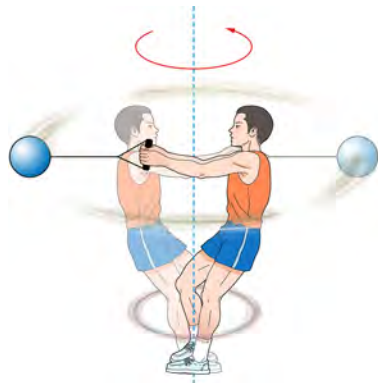


图 2-4-5 投掷链球



图 2-4-6 水从衣物上分离, 被甩出脱水筒

离心分离器是科研和生产中重要的实验装置，在生物、化工、医学、食品等行业和近代尖端技术（如制造原子弹、氢弹等）中都有广泛的应用。它可以快速分离液体样品中密度不同的成分。例如，在实验室中，常用离心分离器（如图2-4-7所示）使浑浊液体里不溶于液体的固体微粒快速沉淀下来。因为固体微粒密度较大，所以较难在液体中获得足够大的向心力而做离心运动，快速地沉淀到试管底部，提高沉淀的效率。



图 2-4-7 离心分离器

离心现象有时也会带来危害，为了防止离心现象带来的危害，通常会采取一定的措施。例如，在公路的弯道处，一般会设有减速的警示标志。再如，工厂的砂轮在使用时，有可能造成材料或砂轮破碎，使碎片飞出，甚至有可能酿成事故，因此砂轮的外侧都需要加一个防护罩，如图2-4-8所示。



图 2-4-8 砂轮及其防护罩

### 讨论与交流

从物理学的角度分析，为什么公路弯道处往往是交通事故的多发地段？应采取哪些措施预防公路弯道处交通事故的发生？

**例题：**如图2-4-9（a）所示是科技馆里一个挑战智慧的玩具：一根两端封口、中央位置上下各开一个小口的透明长圆管，里面装有两个小球。如何使两个小球分别处于圆管的两端？

**分析：**常规的想法就是把圆管左右倾斜，希望一个小球能留在—端，而另一个小球能滚到另外—端去，但这很难实现。而灵活应用离心现象的知识，却能轻易地解决这个问题，这正是创新思维的体现。

**解：**如图2-4-9（b）所示，取一根细棒，将它穿过圆管中部的小孔把小球隔开，然后转动圆管使之绕细棒旋转。随着转速增大，两个小球受到的静摩擦力不足以提供圆周运动所需的向心力，发生离心现象，两个小球很快就分别滚向圆管的两端。

想一想，利用这个器材，还能探究什么科学问题？

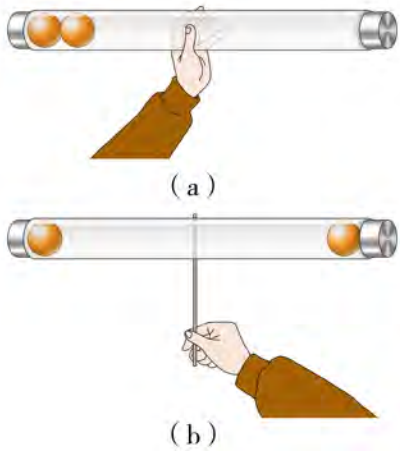


图 2-4-9 如何使小球分别处于圆管的两端



## 实践与拓展

网络上有各种详细的 DIY（自己动手制作）教程。例如搜索“自制甩干机”，就能找到制作如图 2-4-10 所示“甩干机”的详细教程。发挥创新思维，自己设计并动手制作一个“甩干机”。

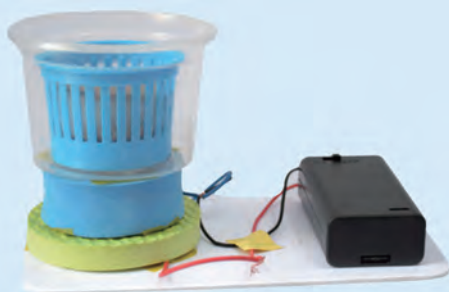


图 2-4-10 自制甩干机



## 练习

1. 如图 2-4-11 所示，游乐场的“魔盘”机动游戏受到游玩者的喜爱。试分析：“魔盘”转动起来后，转盘里的人将怎样运动？当转速不断增大时，坐在盘边上的人会有什么感觉？为什么？
2. 如图 2-4-12 所示是一种能够方便脱水的地拖桶。为拖把脱水的时候，用脚上下快速踩踏板可以迅速把脱水桶中拖把的水分脱干。请分析其脱水原理。



图 2-4-11



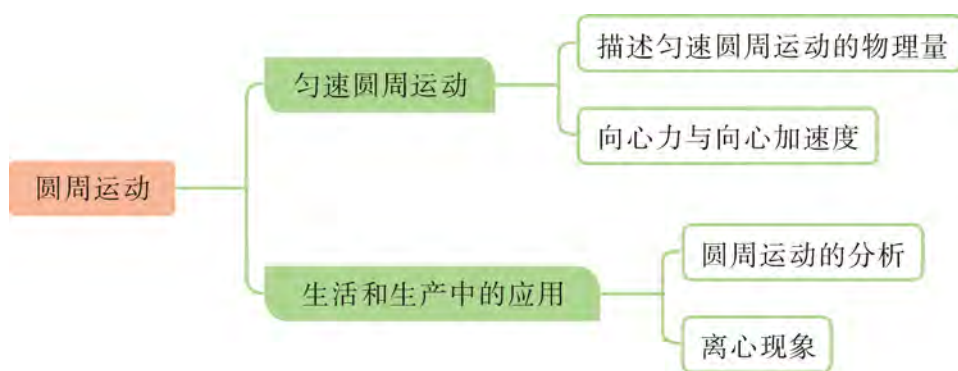
图 2-4-12

3. 一把竖直撑开的雨伞，其伞面半径为  $r$ ，伞面边缘距水平地面高度为  $h$ 。当雨伞以角速度  $\omega$  旋转时，水滴恰好自边缘甩出，落在地面上形成一个大圆圈。求这个大圆的半径。

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 本章学习了哪些与圆周运动相关的物理模型？
2. 生活和生产中有哪些事例应用了圆周运动的知识？分析这些事例所采取的一般思路是什么？
3. 在探究影响向心力大小因素的实验过程中，令我印象最深的是什么？
4. 我对本章的哪些内容提出了质疑？又产生了哪些新的想法？

## 习题二

1. 下列关于匀速圆周运动的说法中, 正确的是 ( ).

- A. 线速度的方向保持不变
- B. 线速度的大小保持不变
- C. 角速度的大小保持不变
- D. 线速度和角速度都保持不变

2. 如图 2-1 所示, 门上有两个点  $a$  和  $b$  (可视为质点), 若它们与门一起绕轴  $OO'$  转动,  $a$ 、 $b$  两个点的角速度分别为  $\omega_a$  和  $\omega_b$ , 线速度的大小分别为  $v_a$  和  $v_b$ , 则 ( ).

- A.  $\omega_a = \omega_b$ ,  $v_a < v_b$
- B.  $\omega_a = \omega_b$ ,  $v_a > v_b$
- C.  $\omega_a < \omega_b$ ,  $v_a = v_b$
- D.  $\omega_a > \omega_b$ ,  $v_a = v_b$

3. 在水平公路上转弯的摩托车, 如图 2-2 所示, 其向心力是 ( ).

- A. 重力和支持力的合力
- B. 静摩擦力
- C. 滑动摩擦力
- D. 重力、支持力、牵引力的合力

4. 炎炎夏日, 汽车轮胎在高温环境下使用, 爆胎事故时有发生. 如图 2-3 所示, 若汽车在炎热的夏天沿起伏不平的路面行驶, 其中最容易发生爆胎的点是 (假设在行驶过程中汽车的速率不变) ( ).

- A.  $a$  点
- B.  $b$  点
- C.  $c$  点
- D.  $d$  点

5. 市场出售的苍蝇拍, 拍把长约 30 cm, 拍头是长约 12 cm、宽约 10 cm 的长方形. 这种拍的使用效果往往不好, 拍头打向苍蝇, 尚未打到, 苍蝇就飞走了. 有人将拍把增长到 60 cm, 结果一打一个准, 其原因是 ( ).

- A. 拍头打苍蝇的力变大了
- B. 拍头的向心加速度变大了
- C. 拍头的角速度变大了
- D. 拍头的线速度变大了



图 2-1



图 2-2

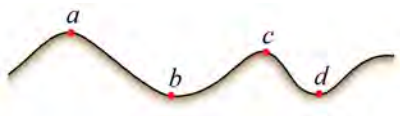


图 2-3

6. 双人花样滑冰表演时，女运动员有时会被男运动员拉着离开冰面在空中做水平面内的匀速圆周运动，如图2-4所示。通过目测估计，男运动员的手臂和水平冰面的夹角约为 $45^\circ$ 。重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，女运动员与其身上装备的总质量约为 $45 \text{ kg}$ ，据此可估算该女运动员（ ）。



图 2-4

- A. 受到的拉力约为  $450\sqrt{2} \text{ N}$
  - B. 受到的拉力约为  $450 \text{ N}$
  - C. 向心加速度约为  $10 \text{ m/s}^2$
  - D. 向心加速度约为  $10\sqrt{2} \text{ m/s}^2$
7. 如图2-5所示，小球被细绳系着在光滑水平面上做匀速圆周运动，当小球运动到点 $P$ 时，细绳突然断裂，则小球将沿着\_\_\_\_\_（选填“ $PA$ ”“ $PB$ ”或“ $PC$ ”）方向运动。

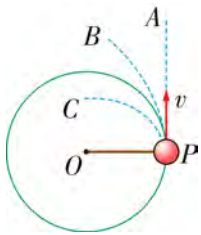


图 2-5

8. 把某一机械手表的分针与时针的运动看作匀速圆周运动。分针长度是时针长度的 $1.5$ 倍，则分针与时针角速度的大小之比是\_\_\_\_\_，分针与时针末端线速度的大小之比是\_\_\_\_\_，分针与时针末端的向心加速度大小之比是\_\_\_\_\_。

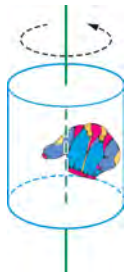


图 2-6

9. 如图2-6所示，在半径为 $r$ 的洗衣机圆桶内，有一件质量为 $m$ 的衣服贴着内壁跟随桶以角速度 $\omega$ 做匀速圆周运动。求：
- (1) 此时桶壁受到的压力。
  - (2) 若此时衣服向下匀速滑动，衣服与桶壁之间的动摩擦因数是多大？

10. 某种变速自行车有三个链轮（大齿轮）和六个飞轮（小齿轮），链轮和飞轮的齿数如表2-1所示，前后轮直径均为 $660 \text{ mm}$ 。当人骑该车行进速度为 $4 \text{ m/s}$ 时，脚踩踏板做匀速圆周运动的角速度最小值约为多少？

表 2-1

| 名称              | 链轮 |    |    | 飞轮 |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 齿数 $N/\text{个}$ | 48 | 38 | 28 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 | 28 |

11. 大雾天气，司机突然发现汽车已开到一个丁字路口，前面是一条小河，如图2-7所示。司机采取紧急刹车还是紧急转弯更有可能避免危险？



图 2-7

12. 一个有一定厚度的圆盘，可以绕通过中心且垂直于盘面的水平轴转动，用下面的方法测量它匀速转动时的角速度.

实验器材：交流电源（频率为 50 Hz），电磁打点计时器，刻度尺，纸带，复写纸.

实验步骤：

第一步：如图 2 - 8 所示，将电磁打点计时器固定在桌面上，将纸带的一端穿过电磁打点计时器的限位孔后，绕过待测圆盘的侧面. 圆盘转动时，纸带与圆盘侧面不打滑.

第二步：启动控制装置，使圆盘转动. 同时接通电源，使电磁打点计时器开始打点.

第三步：经过一段时间后，停止控制装置与电磁打点计时器，取下纸带，进行测量.

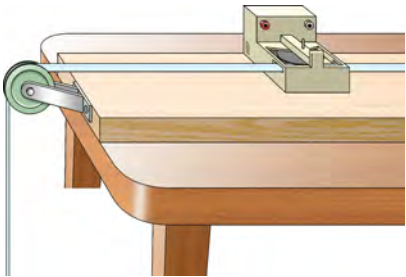


图 2 - 8

(1) 用已知物理量和测得的物理量表示圆盘角速度  $\omega =$  \_\_\_\_\_，式中各物理量的意义分别是\_\_\_\_\_.

(2) 某次实验测量圆盘半径为  $5.5 \times 10^{-2}$  m，得到的一段纸带如图 2 - 9 所示，求得圆盘转动角速度为\_\_\_\_\_.（结果保留两位有效数字）

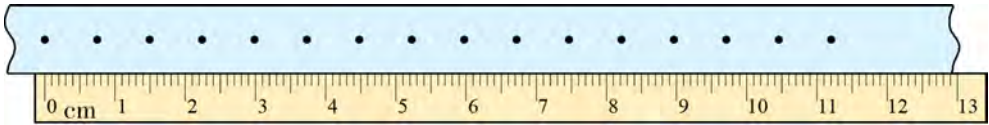


图 2 - 9

13. 为验证向心力公式，某探究小组设计了如图 2 - 10 所示的实验. 在直尺上钻一个小孔，使小孔恰能穿过一根细线，线下端挂一质量为  $m$ 、直径为  $d$  的小钢球. 将直尺固定在水平桌面上，使钢球在水平面内做圆心为  $O$  的匀速圆周运动，待钢球的运动稳定后，从直尺上方，保持视线垂直于直尺往下看，估测钢球外侧到点  $O$  的距离  $r$ . 请利用上述装置和刻度尺、秒表等器材，修改上述实验方案，并写出通过实验验证向心力公式的过程.

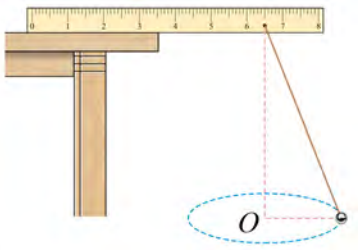


图 2 - 10



## 第三章

## 万有引力定律

自古以来，天体运动一直吸引着人类孜孜不倦地探索。那么，天体的运动有什么规律？地面物体的运动规律是否适用于宇宙中天体的运动？牛顿发现的万有引力定律把天体的运动规律与地面物体运动的研究成果加以整合，纳入统一的力学理论之中，实现了人类科学认识上的一次重大飞跃。

人类已经能利用火箭发射人造卫星、太空望远镜和航天飞船等各式各样的航天器，并正向宇宙更深处探索。在这些成就的背后，物理学规律起着怎样的指导作用？人类是如何一步步认识和利用天体运动规律的？

这一章我们将通过学习物理学史，了解人类对天体运动的认识过程，了解万有引力定律的发现过程及应用，体会科学定律对人类探索未知世界的推动作用。

## 第一节

## 认识天体运动



人类对天体运动的认识，经历了漫长的发展过程。近代科学的兴起，也是从天文学的发展开始的。一场关于宇宙观的革命，拉开了近代自然科学发展的序幕。

### 从地心说到日心说

在古代，人们根据日常的观察和经验，提出了“地心说”。他们认为地球是静止不动的，位于宇宙中心，太阳、月亮以及其他行星都绕着地球运动，同时还建立了复杂的圆上加圆的轨道模型来解释观察到的天体运动规律，显得既烦琐又欠精确，如图 3-1-1 所示。这种观点经天文学家托勒密（C. Ptolemaeus，约 90—168）发展，成为中世纪在欧洲占统治地位的宇宙观，统治人们思想达一千多年之久。

到了 16 世纪，波兰天文学家哥白尼（N. Copernicus，1473—1543）主张以简单的几何图形来描述宇宙运行的规律。他经过几十年对天体运动的观测与推算，发现若假设太阳是宇宙的中心，地球和其他行星都围绕太阳运动（如图 3-1-2 所示），对行星运动的描述将变得更加简明清晰。于是他提出了“日心说”。

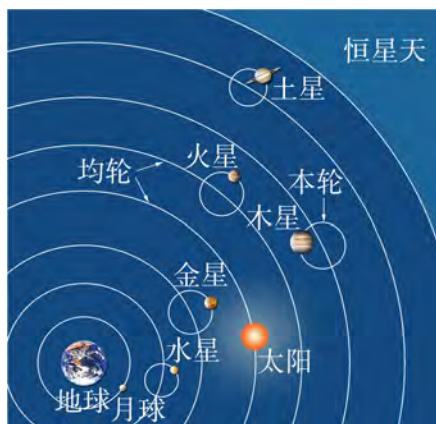


图 3-1-1 “地心说”模型

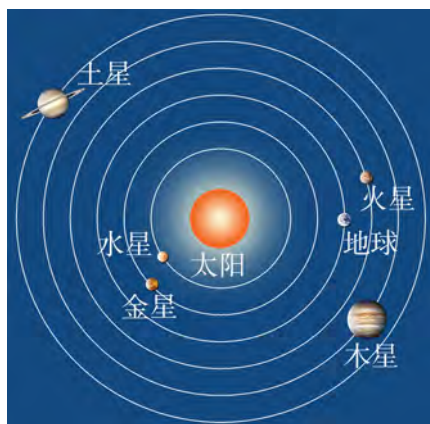


图 3-1-2 “日心说”模型

哥白尼“日心说”的提出，不仅在人类认识宇宙的历程中迈出了艰难而又重要的一步，而且冲破了“地心说”对人们思想的禁锢，使人们摆脱对神学和古代经典权威的迷信，以事实作为知识的来源，靠实践判断理论的真伪。

## 开普勒定律

不论是支持“地心说”还是“日心说”的学派，都相信天体的运动一定是完美和谐的匀速圆周运动。但德国天文学家开普勒（J. Kepler, 1571—1630）在应用行星绕太阳做圆周运动的模型描述火星的运动时，发现与丹麦天文学家第谷（T. Brahe, 1546—1601）对火星运行轨道的观测值有  $8'$  的偏差。这是第谷观测的误差，还是火星根本就不绕圆形轨道运动？

开普勒坚信第谷的观测数据是正确的，毅然否定了火星做匀速圆周运动的观点。至此，人们长期以来视为真理的天体做完美匀速圆周运动的观念，第一次受到了质疑。经过反复核算与多次拟合，开普勒发现火星在做椭圆运动，最终完成并发表了描述行星运动规律的开普勒定律。

**开普勒第一定律：**所有行星围绕太阳运行的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上，如图 3-1-3 所示。

**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时间内扫过相等的面积，如图 3-1-4 所示。

**开普勒第三定律：**所有行星的轨道半长轴的三次方与它公转周期的二次方之比都相等。

若用  $r$  表示椭圆的半长轴， $T$  表示行星的公转周期，根据开普勒第三定律，其关系可表示为

$$\frac{r^3}{T^2} = k \quad (3.1.1)$$

比值  $k$  是一个与行星无关而与太阳有关的常量。开普勒关于行星运动的规律也适用于卫星绕行星的运动，只是  $k$  值有所不同。

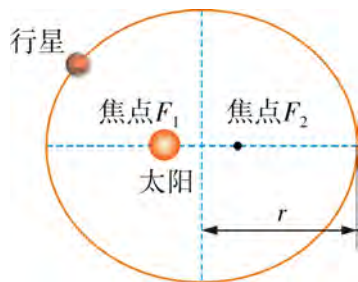


图 3-1-3 开普勒第一定律示意图

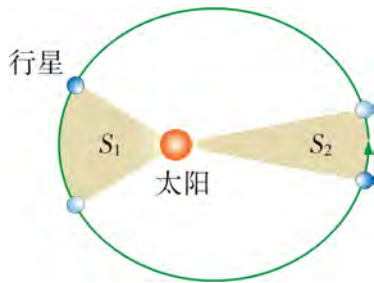


图 3-1-4 开普勒第二定律示意图



### 讨论与交流

1. 根据开普勒定律，行星绕太阳的运动在近日点速率大，还是在远日点速率大？为什么？
2. 某行星在近日点到太阳的距离为  $a$ ，在远日点到太阳的距离为  $b$ ，过近日点时行星的速率为  $v_a$ ，过远日点时的速率  $v_b$  约为多少？（提示：计算足够短的时间内行星与太阳连线扫过的面积）

开普勒定律系统地总结了行星运动规律，是精确的科学观测与严密的数学推理相结合的典范。这些定律的发现，不仅澄清了多年来人们对天体运动神秘、模糊的认识，也对推动天文学和力学的发展起了关键性的作用。开普勒是使用数学公式表达物理学定律并最早获得成功的人之一。从此，数学公式成为表达物理学定律的基本方式。

 **实践与拓展**

通过查阅相关资料，了解哥白尼、第谷、开普勒等科学家的研究过程和研究成果，思考他们的成就对天文学和社会发展产生了怎样的影响。

**中国古代天文学的成就**

资料活页

中国是世界上天文学起步最早、发展最快的国家之一，在世界天文学发展史上占据重要地位。我国古代天文学的成就主要包括三个方面：天象观测、仪器创制和历法编订。

在天象观测方面，我国有世界上最早最完整的天象记载，无论是对太阳、月亮、行星、彗星等天体，还是对日食、月食、太阳黑子、日珥、流星雨等罕见天象，都有着历史久而丰富的记载，且记录精确、描述详尽。这些记载至今仍有很高的科学价值。

在仪器创制方面，我国古代创造性地设计和制造了许多精巧的观察和测量仪器。西周时期，天文学家用圭表度量日影长度，确定冬至、夏至等一年的二十四个节气，以指导农牧业生产。东汉的张衡（78—139）创制了利用流水作为动力的水运浑象（俗称“浑天仪”）。元代的郭守敬（1231—1316）先后创制和改进十多种天文仪器，如简仪、高表和仰仪等。



图 3-1-5 南宋石刻天文图

在历法编订方面，我国古代历法不仅包括节气的推算、每月日数的分配、月和闰月的安排等，还包括日食、月食发生时刻的计算和预报、五大行星位置的推算和预报等。1281 年实施的《授时历》，采用 365.2425 日作为一个回归年的长度。这个数值与现今世界上通用的公历值相同，比西方早了 300 年。

继承我国古代天文学者的科学精神，再创我国天文学的新辉煌，是我们应有的担当。

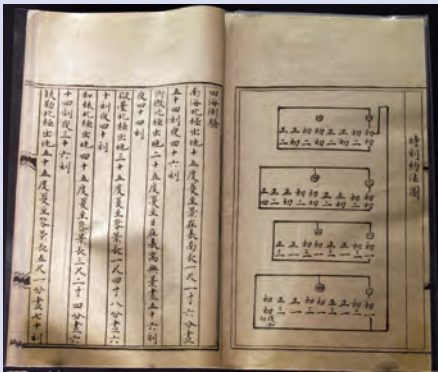


图 3-1-6 《授时历》

练习

- 如图 3-1-7 所示，利用图钉和细绳，就可以形象地画出行星的轨道和太阳的位置。如果太阳处在焦点  $F$  上，则行星在点  $A$  和点  $B$  的哪个位置时，速率比较大？为什么？
- 哈雷彗星轨道的半长轴约等于地球和太阳平均距离的 18 倍。哈雷彗星最近一次飞近地球的时间是 1986 年。根据开普勒第三定律估算它下一次飞近地球将在哪一年。
- 太阳系八大行星轨道半长轴长度和运行周期的数据如表 3-1-1 所示。利用这些数据验证开普勒第三定律，并尝试提出新的发现。

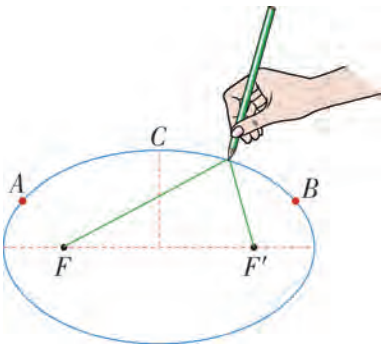


图 3-1-7

表 3-1-1

| 行星  | 平均轨道半径 $r/\text{km}$ | 公转周期 $T$ |
|-----|----------------------|----------|
| 水星  | $5.79 \times 10^7$   | 88 天     |
| 金星  | $1.08 \times 10^8$   | 225 天    |
| 地球  | $1.50 \times 10^8$   | 365.25 天 |
| 火星  | $2.28 \times 10^8$   | 687 天    |
| 木星  | $7.78 \times 10^8$   | 11.86 年  |
| 土星  | $1.43 \times 10^9$   | 29.46 年  |
| 天王星 | $2.87 \times 10^9$   | 84.01 年  |
| 海王星 | $4.50 \times 10^9$   | 164.79 年 |

数据来源：《辞海》（第六版）

## 第二节 认识万有引力定律

开普勒定律为科学家们进一步研究天体运动规律奠定了基础，但仍有不少问题需要解决。牛顿在汲取众多研究思想与成果的基础上，通过理性思考和数学演绎推理，构建了经典力学体系，用统一的力学原因去解释从地面物体到天体的所有运动和现象，而万有引力定律就是其成果之一。那么，人们对天体运动的认识是如何从开普勒定律往万有引力定律发展的？

### 行星绕日运动原因的探索

开普勒定律描述了行星绕日运动的规律，但无法解释是什么原因使它们在各自的轨道上运动。对此，科学家们在研究中提出了自己的观点，如图 3-2-1 所示。

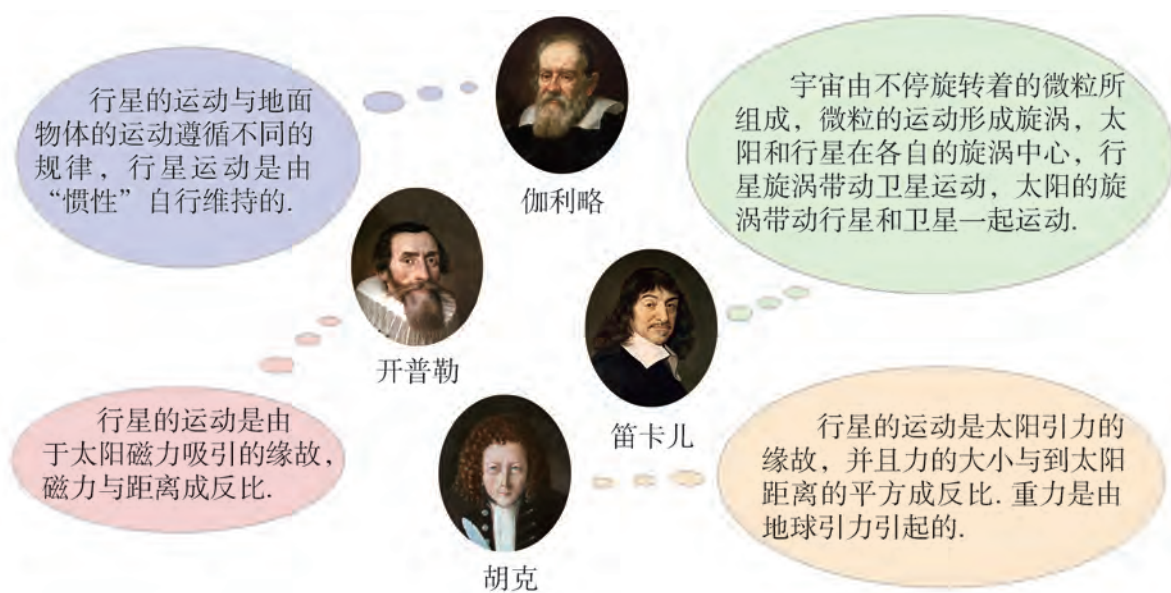


图 3-2-1 科学家们对行星运动原因的探索

一些科学家认为，力是使行星做圆周运动的原因。向心力公式成为这些科学家推导行星绕日运动规律的必由之路。其中，英国天文学家雷恩（C. Wren，1632—1723）和哈雷（E. Halley，1656—1742）按照圆形轨道，对行星与太阳间的引力问题进行了如下推导。

设行星质量为  $m$ ，绕太阳公转的周期为  $T$ 。把行星沿椭圆轨道的运动简化为匀速圆周运动，行星的轨道半径为  $r$ ，太阳对行星的引力就是行星绕太阳运动的向心力，即

$$F_{\text{引}} = m \frac{v^2}{r} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$$

根据开普勒第三定律，把  $\frac{r^3}{T^2} = k$  代入上式，得到太阳对行星的引力

$$F_{\text{引}} = 4\pi^2 k \frac{m}{r^2}$$

即

$$F_{\text{引}} \propto \frac{m}{r^2}$$

上式表明，作用于行星的引力与它到太阳的距离的平方成反比。那么这个平方反比关系是否适用于描述一切天体的运动规律呢？

1684 年，在哈雷的请求下，牛顿将关于物体运动的研究成果整合起来，写成一篇论文，明确证明了行星在椭圆轨道所受的引力与它到太阳距离的平方成反比。然而，此时牛顿还没有形成万有引力的观念，还有两个关键的问题没有解决，一个是引力与质量关系的问题，另一个是引力的普遍性问题。

## 万有引力定律的发现

牛顿在推导出行星在椭圆轨道所受引力与到太阳距离的平方成反比后，并没有停下研究的步伐。他引入了质点的概念，把庞大天体的质量集中于球心，以便于求出天体间引力的大小。根据牛顿第三定律，行星间的引力是相互的，即太阳吸引行星，行星也同时吸引太阳，如图 3-2-2 所示。根据  $F_{\text{引}} \propto \frac{m}{r^2}$  可知，太阳受到行星的引力  $F'$  应与太阳自身的质量  $M$  成正比，即

$$F_{\text{引}}' \propto \frac{M}{r^2}$$

$F_{\text{引}}$  与  $F_{\text{引}}'$  大小相等，因此有

$$F_{\text{引}} = F_{\text{引}}' \propto \frac{Mm}{r^2}$$

那么，天体受到的引力和地面上的重力是否性质相同？天上的力学和地面上的力学能否统一起来？这是牛顿在研究中一直苦思冥想的问题。对于这个问题，牛顿通过思想实验与数学推导，证明了月球受到的引力与地面上的重力是同一性质的力。

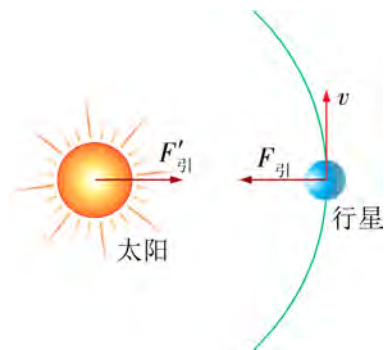


图 3-2-2 太阳与行星之间相互作用的引力大小相等

设想从山顶水平抛出一块石头（如图 3-2-3 所示）。由于重力的作用，石头会沿着弯曲的路径落到地上，并且石头的抛出速度越大，石头飞行的距离越远。由此推想，当石头抛出的速度足够大时，它将绕地球做圆周运动而不再落向地面。假设山（即石头抛出点）越来越高，甚至达到月球轨道的高度，此时石头仍然受到重力的作用。把石头以足够大的速度抛出，它将会像月球那样围绕地球运动。

如果月球绕地球运动的引力与重力是同一性质的力，都与距离的平方成反比，那么，由于月球轨道半径约为地球半径的 60 倍，所以月球轨道附近的物体受到的引力只有它在地面附近受到引力的  $\frac{1}{3600}$ ，则在相同的时间内，月球轨道附近自由落体的运动位移是地面附近自由落体的运动位移的  $\frac{1}{3600}$ 。根据月球的运行周期、轨道半径，可以算出在较短的时间内月球偏离原速度切线方向的垂直位移  $y$ （如图 3-2-4 所示），这个位移与在相同时间内月球轨道附近自由落体的运动位移相吻合。这表明，使月球绕地球运动的引力与重力是同一性质的力。

以上述证明为基础，牛顿把引力推广到所有行星，乃至所有物体之间，由此发现了万有引力定律。

这种根据已知现象，利用严密的逻辑推理和数学工具进行验证，并在已有结论的基础上进行合理延伸的科学思维方法，为牛顿在科学上的重大发现奠定了重要基础。

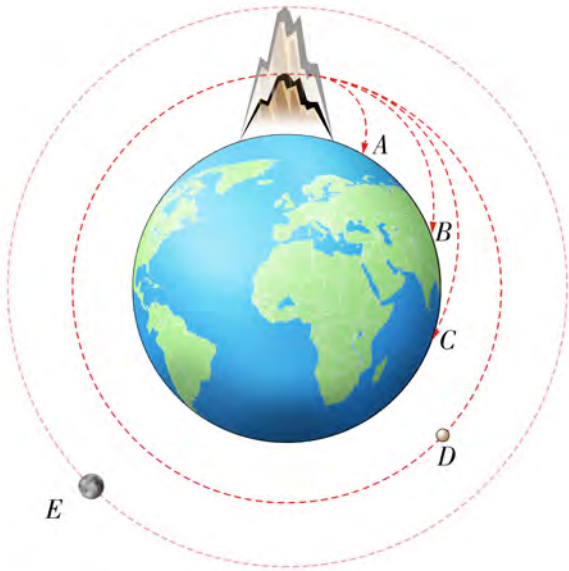


图 3-2-3 “平抛石头”思想实验

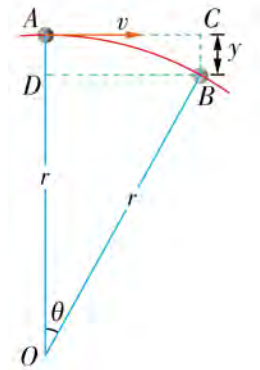


图 3-2-4 月球偏离原初速度切线方向的下落距离



### 讨论与交流

以小组为单位，讨论从牛顿发现万有引力的思维方法中可以获得什么启发。





## 实践与拓展

牛顿在其著作《自然哲学的数学原理》中，提出了哲学探索自然的四条推理法则，如图3-2-6所示。请搜索相关资料，结合具体的案例谈谈这些法则在科学探究中的应用。

法则1：寻求自然事物的原因，不得超出真实和足以解释其现象者。

法则2：对于相同的自然现象，必须尽可能地寻求相同的原因。

法则3：物体的特性，若其程度既不能增加也不能减少，且在实验所及范围内为所有物体所共有，则应视为一切物体的普遍属性。

法则4：在实验哲学中，我们必须将由现象所归纳出的命题视为完全正确的或基本正确的，而不管想象所可能得到的与之相反的种种假说，直至出现了其他的或可排除这些命题，或可使之变得更加精确的现象。



图3-2-6 牛顿提出的哲学探索自然的推理法则

## 从卡文迪许的扭秤实验到中国的引力实验中心

1687年牛顿发表了著名的万有引力定律，但没有给出引力常量 $G$ 的具体数值。受到前人实验思想的启发，英国物理学家卡文迪许为了测量地球质量，设计了扭秤实验装置（如图3-2-7所示）：借助实验转换法，将小球和大球之间的万有引力测量转化为对金属丝扭转角度的测量；又利用横杆与光学仪器，将金属丝扭转角度的测量转化为对光斑在刻度尺上移动距离的测量；再借助实验放大法，通过光路放大光斑在刻度尺上移动的距离，以提高测量精度。终于，卡文迪许在1797—1798年间测得地球质量，并推算得到当时精确度很高的引力常量 $G=6.75 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，成为对牛顿万有引力普适性的有力证明。

科学在继承中发展，我国华中科技大学引力中心三十年如一日，利用精密扭秤弱力检测技术开展引力测量研究，将卡文迪许扭秤实验中的智慧之光进一步发扬和创新。

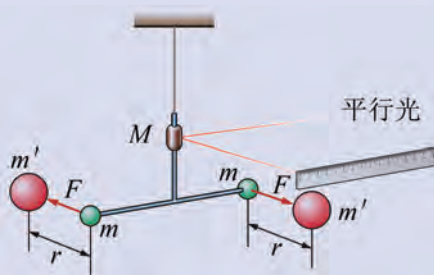


图3-2-7 扭秤实验装置示意图

“实验状态记录要翔实，不准含糊遗漏；实验流程安排要论证，不准随心所欲……”在引力中心的墙上，随处可见实验室“十要十不准”。秉承着“规范只是约束行为，但不禁锢思想，必须坚持学术自由的精神”的理念，在引力中心，学术思想的讨论从来都非常开放，为了一个学术问题，学生经常和老师争得面红耳赤。

对引力常量  $G$  的研究正是在这样严谨的科学准则和鼓励创新的氛围下进行的。2009 年，该研究团队将  $G$  的测量精度提高到 26 ppm (1 ppm 即百万分之一)，突破了当时国际上采用扭秤周期法测得的最高精度。引力中心也被外国专家称为“世界的引力中心”。

投入如此大的精力来测量引力常量，一方面是为了检验万有引力定律是否精确成立，另一方面通过精确的地面重力测量，能够了解地下物质密度分布，从而了解地下矿藏的大致分布，甚至能测绘海洋、水文、冰川出现的变化。而在不断提高  $G$  值测量精度的过程中，一批高精端的仪器设备被研发出来，在地球重力场的测量、地质勘探等方面发挥重要作用。这其中的很多关键技术也为由中国主导的空间引力波探测计划——“天琴计划”奠定了基础。

基础科学研究漫长而艰辛，引力中心研究团队数十年如一日坚持不懈地进行着地球科学基础研究和精密重力仪器研制、测量与应用研究，朝着当今世界引力研究最前沿不断前进，攀登科学研究新高峰，为解决固体地球演化、海洋与气候变化、水资源分布和地质灾害研究中的科学问题提供重要支撑，为建设世界科技强国贡献一份力量！



## 练习

1. 已知地球的质量  $m = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，太阳的质量  $M = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，地球到太阳的平均距离  $r = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ ，那么太阳对地球的引力有多大？

2. 地球的质量约是月球质量的 81 倍，若登月飞船通过月地之间的某一个位置时，月球和地球对它的引力大小相等，该位置到月球中心和地球中心的距离之比约为多少？

3. 如图 3-2-8 所示，两个质量均匀的小球，质量为  $m$ ，半径为  $r$ ，两球之间用细杆  $AB$  相连， $AB$  长度也为  $r$ 。某同学认为两球之间的万有引力  $F = G \frac{m^2}{r}$ 。该同学的看法是否正确？请说明理由。

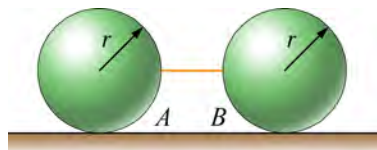


图 3-2-8

4. 尽管牛顿是伟大的物理学家，但他当时提出的万有引力定律却不能被所有人理解，甚至 18 世纪时有人画了一幅讽刺万有引力定律的漫画。从这一事件出发，谈谈对科学探索过程的认识。

### 第三节 万有引力定律的应用

万有引力定律发表后，经历了几次重大的考验，后又经过科学家们不断地科学实践检验，最后得到普遍承认。可见，一个成功理论，不仅要能解释已知的事实，更重要的是能预测未知的现象。

#### 预测地球形状

对地球形状的认识是当时对万有引力定律的第一个重大考验。牛顿通过万有引力定律的理论计算，大胆预测：地球由于自转作用，赤道部分应该隆起，成为两极扁平的椭球体。当牛顿的学说传到法国时，他的这个推论立即遭到巴黎天文台台长等人的激烈反对。他们根据笛卡儿的涡旋假说和错误的纬线测量长度，认为地球应是两极伸长的椭球体。

这场地球形状之争持续了几十年。1735 年和 1736 年，法国科学院先后派出两支测量远征队，分别在赤道地区和高纬度地区进行测量，测量结果证实了牛顿的推论。证据面前，原本持质疑态度的测量队领队等人反而成为牛顿学说的支持者。

由于地球自转及其呈椭球状，导致了一个有趣现象的出现：北极圈附近的挪威人贩鱼到赤道附近时，鱼变轻了。下面结合万有引力定律和圆周运动的知识，对该现象进行解释。

假设地球是一个半径为  $R$  且密度均匀的球体，质量为  $M$ ，在纬度  $\theta$  处相对于地球静止地悬挂着一个质量为  $m$  的物体，它受到地球的引力大小  $F = G \frac{Mm}{R^2}$ ，方向沿地球半径指向球心，如图 3-3-1 所示。该引力主要产生两大作用效果，一方面是在竖直方向上与物体受到的拉力平衡，另一方面是提供物体随地球一起自转的向心力。因此，可以将引力  $F$  分解为  $F_1$  和  $F_2$  两个分量。

分力  $F_1 = F_T$ ，就是我们所熟悉的重力。

分力  $F_2 = m\omega^2 R \cos\theta$ ，是物体随地球自转所需的向心力，其方向垂直指向地轴。

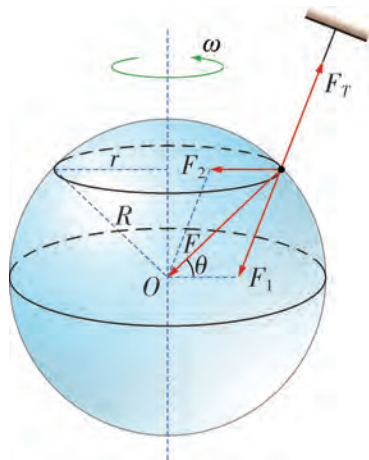


图 3-3-1 万有引力作用效果分解示意图

当物体从两极移向赤道时,随着纬度 $\theta$ 的减小, $F_2$ 增大, $F_1$ 减小,即物体从两极移向赤道时重力减小,而物体的质量不变,因此重力加速度 $g$ 随之减小.此外,由于地球呈两极略扁的椭球状,物体在两极时受到的引力比在赤道时大,从而造成物体从两极移向赤道时所受重力变小.

在图3-3-1中,万有引力是根据作用效果分解的,指向地轴的分力 $F_2$ 实际上特别小,所以一般认为地球附近的物体所受的重力近似等于地球对物体的万有引力.



### 讨论与交流

在地球表面,随着高度的增加,重力加速度随之减小,这是为什么?结合万有引力定律分析,并作出解释.

## 预测未知天体

在万有引力定律提出之前,人们主要依靠直接观察的方式来发现新的天体.1781年,英国天文学家赫歇尔(W. Herschel, 1738—1822)用自制大型反射望远镜发现了太阳系的第七颗行星——天王星(如图3-3-2所示)之后,各国天文学家都对它进行了持续的观测,结果发现,天王星的运行轨道,与根据万有引力定律计算出来的轨道之间存在明显的偏差.这是什么原因造成的呢?科学家们提出了各种猜想:

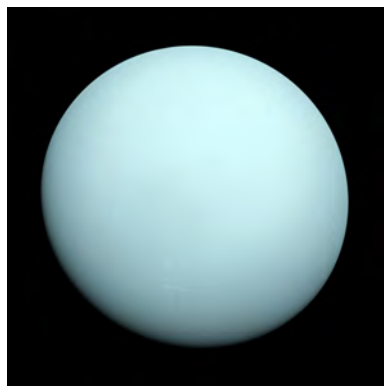


图3-3-2 天王星

- (1) 可能是以前的天文观测数据不准确.
- (2) 可能是天王星内侧的土星和木星对它的吸引造成的.
- (3) 可能是天王星外侧的一颗未知行星对它的吸引造成的.
- (4) 可能是天王星的一颗质量很大的卫星对它的吸引造成的.
- (5) 可能牛顿的万有引力定律本身就是错误的.

.....

为了检验以上的猜想,科学家们开始搜集证据.最后问题的焦点落在:要么有一颗未知的行星影响了天王星的运行,要么是牛顿的万有引力定律不正确.

英国剑桥大学的青年学生亚当斯(J. C. Adams, 1819—1892)和法国青年天文学家勒威耶(U. LeVerrier, 1811—1877)坚信万有引力定律是正确的,他们各自经过不懈的计算,并将理论计算结果与实际观测数据反复对照,不断修正,终于在1845年分别独立推算出一颗新行星的运行轨道.1846年9月23日,柏林天文台的望远镜对准他们计算出来的

轨道位置观测. 终于, 一颗新的行星——海王星 (如图 3-3-3 所示) 被发现了, 人们称其为“笔尖下发现的行星”.

海王星的发现, 以及英国天文学家哈雷根据万有引力定律预言的哈雷彗星 (如图 3-3-4 所示) “按时回归”, 确立了万有引力定律的地位, 充分显示了科学理论对实践的巨大指导作用.

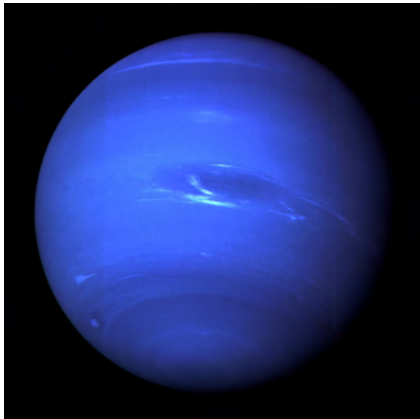


图 3-3-3 海王星



图 3-3-4 哈雷彗星

## 估算天体的质量

天体的质量不可能用天平测量, 但我们可以通过应用万有引力定律计算得出. 通过以下例题, 体会科学理论对科学探索的指导价值.

**例题:** 月球绕地球的运动可以近似看作匀速圆周运动. 设月球绕地球运动的周期为  $T$ , 月球中心到地心的距离为  $r$ , 引力常量为  $G$ , 地球半径为  $R$ , 地球表面的重力加速度为  $g$ . 利用这些已知条件, 有多少种方法可以估算地球的质量?

**分析:** 月球绕地球做匀速圆周运动所需的向心力由它们之间的万有引力提供. 地球表面的物体受到的重力近似等于地球对物体的万有引力. 根据这两个数量关系, 可分别列式求解地球的质量.

**解:**

方法一: 月球绕地球做匀速圆周运动的向心力

$$F = m_{\text{月}} \omega^2 r = m_{\text{月}} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r.$$

因为月球绕地球做匀速圆周运动所需的向心力由它们之间的万有引力提供, 所以

$$G \frac{M_{\text{地}} m_{\text{月}}}{r^2} = m_{\text{月}} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r.$$

由此可得地球的质量  $M_{\text{地}} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}.$

方法二：地球表面的物体受到的重力近似等于地球对物体的万有引力，有

$$m_{\text{物}} g = G \frac{M_{\text{地}} m_{\text{物}}}{R^2}.$$

由此可得地球的质量  $M_{\text{地}} = \frac{gR^2}{G}$ .

方法二就是“第一位称量地球的人”——卡文迪许当年所使用的方法.

已知月球绕地球运动的周期  $T = 2.36 \times 10^6 \text{ s}$ ，月球与地球之间的距离  $r = 3.84 \times 10^8 \text{ m}$ .

把数据代入例题方法一的表达式中，计算可得地球的质量

$$M_{\text{地}} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4 \times 3.14^2 \times (3.84 \times 10^8)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (2.36 \times 10^6)^2} \text{ kg} = 6.01 \times 10^{24} \text{ kg}$$

同样，知道地球半径  $R$  和地球表面重力加速度  $g$  也可以算出地球的质量. 在科学研究和实际应用中，地球质量  $M_{\text{地}} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

参考例题中估测地球质量的两种方法，我们只要知道卫星或行星绕中心天体运动的周期及两者之间的距离，或天体半径及其表面重力加速度，就可以求出该中心天体的质量.



### 实践与拓展

观测人造卫星的运动情况是测量地球质量的方法之一. 查阅我国某一颗人造卫星的有关数据，设计相应的测量方案，推算地球质量，并与科学研究中使用的值相比较.

## 冥王星从太阳系行星中被除名

### 资料活页

海王星通过推算被成功预测之后，科学家们继续采用计算、预测和观察结合的方法寻找新的天体. 由于技术的进步，人们用照相代替了肉眼的直接观察. 1930年2月18日，美国天文学家汤博(C. Tombaugh, 1906—1997)用计算、预测、观察和照相结合的方法，发现了冥王星(如图3-3-5所示). 当时错估了冥王星的质量，以为冥王星与地球质量相当，所以命名为大行星. 此后一段时间内，太阳系有九大行星(水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星)的说法也被写进了教科书.



图3-3-5 冥王星

然而，经过近三十年的进一步观测，科学家们发现冥王星的直径只有地球直径的五分之一，比月球还要小。它还能被称为行星吗？九大行星的传统观念开始动摇。2005年7月，阋神星（Eris）的发现被公布。它是七十多年来首次在太阳系内发现的比冥王星更大的天体。这是推动行星概念被重新定义的决定性发现。事情已经到了非解决不可的程度，因为如果冥王星都可以算作太阳系的行星之一，那么阋神星无疑更有资格。

2006年，国际天文学联合会订立了行星的新定义：一颗行星首先要是一个天体，它满足：

①环绕太阳运转。

②有足够大的质量来克服固体应力以达到流体静力平衡的（外形接近圆球）形状。

③能清除邻近轨道上的其他天体。

根据行星的新定义，冥王星不符合定义②，即它的质量不够大；而且它也不符合定义③，因为冥王星的轨道与海王星的轨道交叉，如果把冥王星当成行星的话，那么海王星就不是行星。因此，冥王星在被发现76年之后，国际天文学联合会决定将冥王星从大行星中除名，降级列入太阳系的矮行星。教科书中太阳系的行星数量从此被改写。

由此可见，科学理论具有相对性，而科学实践则是检验理论正确与否的唯一标准。



## 练习

1. 地球的平均半径约为 6400 km。月球绕地球的运动可以近似看作匀速圆周运动，由此能否估算出月球球心到地心的距离？若能，请用公式表示月地距离的大小，并指出公式中各量的大小；若不能，请说明理由。

2. 现代宇宙学理论告诉我们，恒星在演变过程中，可能会形成一种密度很大的天体——中子星，如图 3-3-6 所示。某一中子星物质的密度约为  $1.5 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ ，若中子星的半径为 10 km，求此中子星表面的重力加速度大小。

3. 月球的半径为  $r$ 。登上月球的宇航员想用一个弹簧测力计和一个质量为  $m$  的砝码估测月球的质量，这种做法可行吗？如果可行，请写出测量原理和实施方案。



图 3-3-6

## 第四节

## 宇宙速度与航天



从古代嫦娥奔月的传说，到如今我国“载人航天工程”“探月工程”的有序开展，人类依据万有引力定律等科学理论发展起来的航天技术，实现了人类飞向太空的梦想。那么，人类挣脱地球引力的束缚，飞向太空的壮举是怎样实现的呢？

### 宇宙速度

我们已了解牛顿的“平抛石头”思想实验。随着航天技术的发展，这个思想实验通过航天器变成现实。下面建构物理模型，估算航天器绕地球运动的速度。

若航天器环绕地球做匀速圆周运动。设地球质量为  $M$ ，航天器质量为  $m$ 、速度为  $v$ 、到地心的距离为  $r$ 。地球对航天器的引力就是航天器做圆周运动所需的向心力。因此有

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

解得

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

这就是航天器在不同轨道运行时的线速度表达式。由此可知，航天器环绕轨道半径越大，速度越小。

航天器到地心的距离  $r$  可认为近似等于地球的半径  $R$ ，把地球的质量  $M = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$  和地球平均半径  $R = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$  代入后，可得

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6.37 \times 10^6}} \text{ m/s} = 7.91 \text{ km/s}$$

我们把航天器在地面附近绕地球做匀速圆周运动所必须具有的速度  $7.9 \text{ km/s}$  称为**第一宇宙速度**（first cosmic velocity），也叫**环绕速度**。

如图 3-4-1 所示，当发射速度大于  $7.9 \text{ km/s}$ ，而小于  $11.2 \text{ km/s}$  时，航天器将沿环绕地球的椭圆轨道运动。一旦发射速度大于等于  $11.2 \text{ km/s}$ ，航天器就会挣脱地球的引力，不再绕地球运行，而是绕

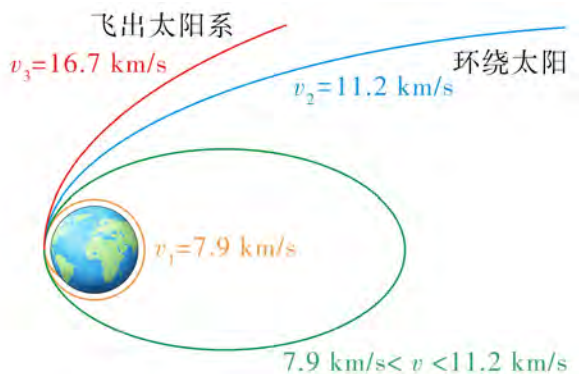


图 3-4-1 宇宙速度与航天器的运动轨迹

太阳运动或飞向其他行星。因此，人们将  $v = 11.2 \text{ km/s}$  称为**第二宇宙速度**（second cosmic velocity），又叫**逃逸速度**（escape velocity）。

达到第二宇宙速度的航天器虽然脱离了地球引力的束缚，但还受着太阳引力的束缚。如果要使航天器挣脱太阳的引力，飞出太阳系，其发射速度至少要达到  $v = 16.7 \text{ km/s}$ 。这一速度称为**第三宇宙速度**（third cosmic velocity）。

 **讨论与交流**

有人说：“围绕地球做匀速圆周运动的卫星，离地面的高度越大，其飞行线速度也越大，周期也越大。”这种说法对吗？为什么？

## 人造卫星

人造卫星是指环绕地球在宇宙空间轨道上运行的无人航天器。人造卫星的用途很广，通信卫星可以作为无线电通信中继站，把通信范围扩展至全球；测地卫星可以测量地形（如图 3-4-2 所示），勘探地下矿藏；气象卫星可以拍摄云图，观测气象变化；科学卫星可以帮助科学家在太空中做许多在地面做不了的实验；等等。因此，发射卫星甚至卫星组网是各国航天事业的工作目标之一。

北斗卫星导航系统是由中国自主建设、独立运行的卫星导航系统，是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要空间基础设施。北斗卫星导航系统开通以来，与互联网、云计算、大数据融合，提供厘米级高精度位置服务。

北斗卫星导航系统现已广泛应用于交通运输、气象预报、救灾减灾、水文监测等领域。同时，其大众应用服务也是触手可及：国内销售的智能手机中，北斗卫星导航系统正逐渐成为标准配置；共享单车装配北斗卫星导航系统，实现精细化管理；连接北斗卫星导航系统的手表、手环、学生卡等设备，正不断融入人们的日常生活中。

如图 3-4-3 所示，北斗卫星导航系统计划于 2020 年前后建成由 5 颗静止轨道和 30 颗非静止轨道卫星组网而成的全球卫星导航系统。其中静止轨道卫星又称为同步卫星，

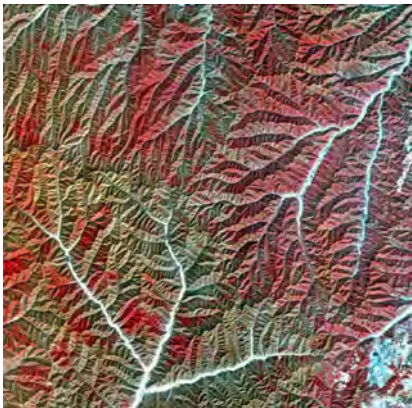


图 3-4-2 崇山峻岭  
(卫星观测图像)

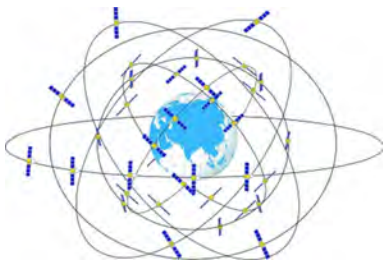


图 3-4-3 北斗卫星导航  
系统组网示意图

是指与地球相对静止的卫星. 这种卫星的轨道平面与赤道平面重合, 并且位于赤道上空一定的高度上.

**例题:** 已知地球的质量  $M = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ , 半径  $R = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$ , 自转周期  $T = 24 \text{ h}$ ,  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ .

(1) 估算同步卫星离地面的高度.

(2) 简述为什么同步卫星轨道平面要与赤道平面重合.

**分析:** (1) 地球对卫星的引力就是卫星绕地球运动所需的向心力. 列出万有引力定律与向心力公式的关系式, 即可求解.

(2) 根据同步卫星的功能, 结合万有引力定律与圆周运动的特点进行分析.

**解:** (1) 设同步卫星离地面的高度为  $h$ , 地球对同步卫星的引力就是同步卫星运动所需的向心力, 则有

$$G \frac{Mm}{(R+h)^2} = m\omega^2(R+h) = m \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 (R+h).$$

$$\begin{aligned} \text{解得 } h &= \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} - R \\ &= \left[ \sqrt[3]{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times (24 \times 3600)^2}{4 \times 3.14^2}} - 6.37 \times 10^6 \right] \text{ m} \\ &= 3.59 \times 10^7 \text{ m} \\ &= 35900 \text{ km}. \end{aligned}$$

(2) 卫星绕地球做圆周运动所需向心力等于地球对卫星的万有引力, 因此卫星轨道的圆心位于地心, 即地心位于卫星轨道平面上. “同步”的意思是卫星与地球保持相对静止, 即同步卫星运动与地球自转的角速度和方向相同. 而同时满足这两个条件的, 只有地球赤道平面. 因此, 同步卫星的轨道平面必须与赤道平面重合.



### 讨论与交流

结合同步卫星的相关知识, 参考以下问题, 提出值得探究的其他科学问题, 并尝试提出解决方案.

(1) 从例题的计算可知, 所有同步卫星所处的高度是一样的. 那么, 赤道上空的这一领域对于同步卫星的容量是多少? 应制定怎样的同步卫星管理措施来维护太空中这一重要领域?

(2) 资料表明, 至少要发射三颗同步卫星分布在同一轨道上, 才能实现全球通信. 那么, “三”这个数量是如何估算出来的?

## 遨游太空

“地球是人类的摇篮，但人类不可能永远生活在摇篮中。”这是“现代航天之父”齐奥尔科夫斯基(K. Tsiolkovsky, 1857—1935)的名言。从嫦娥奔月的远古神话，到万户飞天的尝试，人类一直梦想着在太空翱翔。基于牛顿力学的理论与实践，人类向太空迈出了探索的步伐。

1957年10月4日，苏联发射了第一颗人造地球卫星，标志着人类进入了航天时代，展开了对太空的探索。

1961年4月12日，世界第一艘载人宇宙飞船“东方1号”载着苏联宇航员加加林(Y. Gagarin, 1934—1968)环绕地球一圈，第一次实现了人类遨游太空的梦想。

1969年7月20日，美国“阿波罗11号”宇宙飞船将两名宇航员送上了月球，实现人类第一次登月，如图3-4-4所示。阿姆斯特朗(N. Armstrong, 1930—2012)说出了那句载入史册的名言：“对个人来说，这不过是小小的一步，但对人类而言，却是巨大的飞跃。”

1971年4月9日，苏联发射了“礼炮1号”空间站。两年后，美国将“天空实验室”空间站送入太空，并在空间站中进行了人类无法在地面上进行的各种科学实验，为人类对近地空间的开发开辟了广阔的前景。

1990年4月24日，哈勃空间望远镜升空，人类有了性能卓越的空间天文台，如图3-4-5所示。

自20世纪60年代起，人类就开启了探索火星的征程。火星探测充满坎坷，早期发射的探测器都无法完成它们的使命。直到1976年“维京1号”探测器成功着陆火星并发回照片数据，人类正式开始对火星的探测。此后一系列火星探测器（如“好奇号”“洞察号”“天问号”等）陆续登陆火星（如图3-4-6所示），开展各项科学考察任务。

航天事业是国家综合国力的体现，考验着一个国家全方位的科学技术水平。1970年4月24日，经过中国航天人的攻坚克难，我国第一颗人造卫星——“东方红一号”发射成功，成为全世界第五个发射人造卫星的国家，中国的航天时代由此开启。每年4月24日由此被设立为“中国航天日”。



图3-4-4 人类首次登上月球



图3-4-5 哈勃空间望远镜

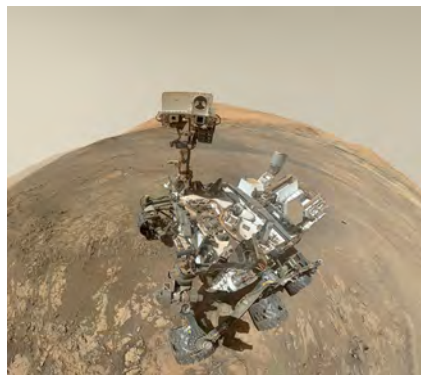


图3-4-6 “好奇号”  
火星探测器与火星地表

为打破西方国家对太空的称霸主导，20 世纪 90 年代，我国“载人航天工程”确立了“三步走”的发展战略。

第一步，发射载人飞船，建成初步配套的试验性载人飞船工程，开展空间应用实验。

2003 年 10 月 15 日，中国“神舟五号”飞船成功发射，把我国第一位宇航员杨利伟送入太空（如图 3-4-7 所示）。这是中国首次载人航天飞行。中国成为第三个依靠自己的力量将宇航员送上太空的国家。

第二步，突破航天员出舱活动技术、空间飞行器的交会对接技术，发射空间实验室，解决有一定规模的、短期有人照料的空间应用问题。

2016 年 9 月 15 日，“天宫二号”空间实验室发射成功，我国拥有了第一个真正意义上的空间实验室。

2017 年 4 月 22 日，“天舟一号”货运飞船（如图 3-4-8 所示）与“天宫二号”空间实验室完成首次推进剂在轨补加，正式宣告中国航天事业迈进“空间站”时代。

第三步，建造空间站，解决有较大规模的、长期有人照料的空间应用问题。

2021 年“天和”核心船的成功发射与入轨，标志着我国空间站（如图 3-4-9 所示）建造进入全面实施阶段。

“探月工程”也是我国另一个重要的航天工程，于 2004 年正式立项，共规划为“绕”“落”“回”三期。

绕：2007 年“嫦娥一号”卫星成功进入月球轨道，实施绕月探测。

落：2013 年“嫦娥三号”探测器成功实现月球软着陆，“玉兔号”月球车（如图 3-4-10 所示）开展自动巡视勘测。

回：实现月球样品自动取样返回探测。

从奔月到探月，从无人飞行到载人飞行，从舱内实验到太空行走，从空间实验到空间应用，中国正一步一个脚印实现自己的航天梦。

人类探索宇宙的过程，既有成功也有失败，无数科学家和探索者的艰辛和汗水铺就了人类通向宇宙的道路。科学的探索永无止境。如今，人类仍在向宇宙深处不断进发，无数宇宙的奥秘正等待我们去揭开，我国航天事业的发展需要大家的智慧和力量。

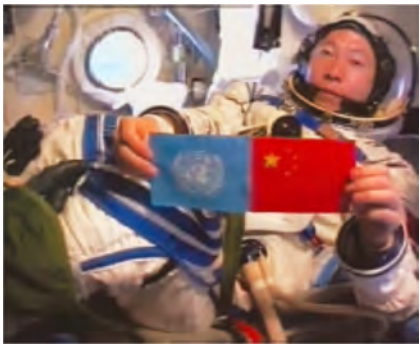


图 3-4-7 我国首位踏入太空的航天员杨利伟



图 3-4-8 “天舟一号”货运飞船



图 3-4-9 中国空间站示意图

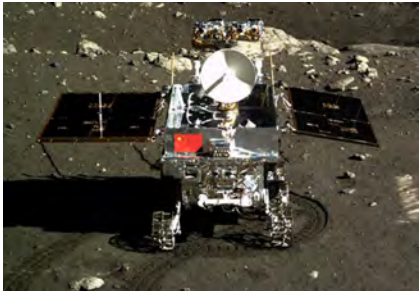


图 3-4-10 “玉兔号”月球车



## 实践与拓展

2016 年我国“神舟十一号”飞船搭载了我国香港特别行政区的中学生在太空搭载实验方案设计比赛中的三个获奖作品——“太空养蚕”“水膜反应”和“双摆实验”进入太空。这三个方案在太空中的实验都取得了很好的效果。请通过网络了解相关信息，并尝试为我国神舟飞船设计一项太空实验。



图 3-4-11 “双摆实验”设计者

## “中国航天之父” 钱学森的人生选择

在他心里，国为重，家为轻，科学最重，名利最轻。五年归国路，十年两弹成。开创祖国航天，他是先行者，披荆斩棘，把智慧锻造成阶梯，留给后来的攀登者。他是知识的宝藏，是科学的旗帜，是中华民族知识分子的典范。

——2007 年“感动中国”组委会授予钱学森的颁奖词



图 3-4-12 钱学森

钱学森（1911—2009）的传奇经历在中学时代就开始了。在中学读书的六年里，他广泛涉猎、博览群书，德智体美均衡发展。在报考大学时，钱学森做出了人生的第一次重大选择：要学铁道工程，给中国造铁路。

正当钱学森立志做詹天佑式的工程师的时候，日军的狂轰滥炸让他痛心地意识到，没有强大的航空工业，中国只能任人欺负。国难当头，他毅然做出了人生的又一次选择：改变学习方向，投身航空工业。他用业余时间把校区图书馆里所有航空方面的书都读完了。钱学森大学毕业后报考了国家第二届“庚款留学”公费生，专业是航空工程，并以当年航空专业第一名的成绩被录取，开始涉足航空工程。

钱学森到了美国麻省理工学院航空系读研究生。在学习过程中，他发现当时航空工程的工作缺少理论指导，如果能掌握航空理论，一定可以取得事半功倍的效果，因此钱学森从做一名航空工程师，转为从事航空理论方面的研究，师从冯·卡门。基于钱学森在空气动力学和超音速飞机方面取得的巨大成就，36 岁的他成为麻省理工学院最年轻的终身教授。后来钱学森成为加州理工学院教授，领导美国太空火箭的研究。

1949年10月1日，中华人民共和国的成立使客居美国的钱学森心潮澎湃。终于到了报效祖国的时候，他做出了人生的再一次重大选择：“祖国已经解放，我们该回去了。”1955年，钱学森克服重重困难回到中国，投身到我国火箭和空间事业的规划和组建工作中。国家的需要使得钱学森决定从学术理论研究转向大型科研工程建设。钱学森晚年曾经跟他的秘书说：“我比较擅长做学术理论研究，工程上的事不是很懂，但是国家让我干，我当时也是天不怕地不怕，没有想那么多就答应了。”

钱学森以他在空气动力学、火箭发动机、制导控制、总体结构、材料工艺、计算机、质量控制和系统工程等领域的渊博知识，为我国培养了大批火箭和空间技术人才，在领导我国导弹、运载火箭和航天器的研制工作中，发挥了巨大的作用，被誉为“中国航天之父”和“火箭之王”。

钱学森以有责任、有担当的态度，为我们诠释了一个科学家的人格本质，树立了一个值得我们学习的人生榜样。



## 练习

1. 若某北斗卫星在地球轨道上飞行的速度为  $7.74 \text{ km/s}$ ，已知地球表面的重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，地球的半径约为  $6400 \text{ km}$ 。该卫星离地面的高度为多少？

2. 2016年9月15日，“天宫二号”空间实验室发射成功。10月19日“神舟十一号”飞船与在距地面高度为  $h$  的圆轨道上运行的“天宫二号”交会对接成功，如图3-4-13所示。航天员景海鹏、陈冬进入“天宫二号”，驻留时长为  $t$ 。已知地球质量为  $M$ ，地球半径为  $R$ ，“天宫二号”的质量为  $m$ ，引力常量为  $G$ 。求：



图 3-4-13

- (1) “天宫二号”受到地球引力的大小。
- (2) “天宫二号”绕地球运行的向心加速度的大小。
- (3) “天宫二号”在航天员驻留时间  $t$  内通过的路程。

3. 某网站报道：“最近某国发射了一颗人造环月卫星，卫星的质量为  $1000 \text{ kg}$ ，环绕周期为  $1 \text{ h}$ ……”一名同学对新闻的真实性感到怀疑。他认为：以该国的航天技术水平，近期不可能成功发射环月卫星，而且该网站公布的数据似乎存在问题。他准备用所学知识对该数据进行验证。

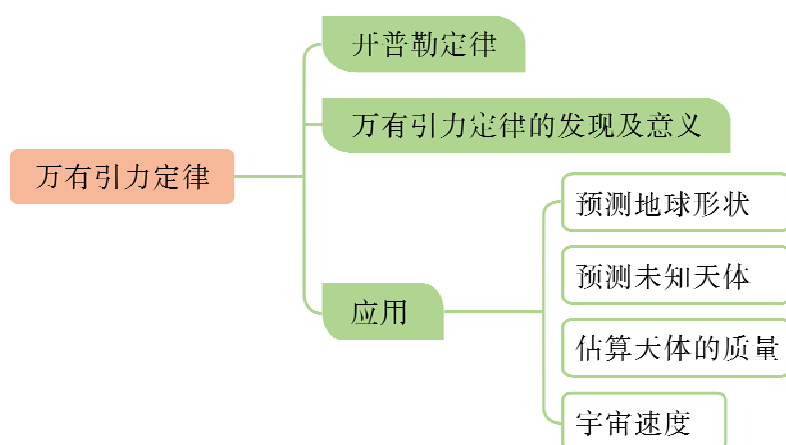
他记不清引力常量的数值且手边也没有可查找的资料，但他记得月球半径约为地球半径的  $\frac{1}{4}$ ，地球半径约为  $6400 \text{ km}$ ，月球表面重力加速度约为地球表面的  $\frac{1}{6}$ ，地球表面的重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。他利用上述这些数据经过推导分析，进一步认定该新闻不真实。

根据上述数据，运用物理学知识，写出该同学可能会质疑的内容与推导判断过程。

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 在人类认识天体运动的发展历程中，有哪些研究思想与方法？历代科学家的哪些科学态度与科学精神值得我们去学习？
2. 应用万有引力定律的例子有哪些？分析这些例子所采用的一般思路是什么？
3. 有人认为，牛顿在发现万有引力的过程中并没有开展真实的实验，因此，他在该方面的研究不能称为科学研究。这一观点是否正确？为什么？
4. 结合万有引力定律的知识，想象未来我国航天领域值得开展的一个探索项目。

## 习题三

1. 下列说法正确的是 ( ).

- A. 行星的运动和地球上物体的运动遵循不同的规律
- B. 卡文迪许通过实验测出了引力常量
- C. 月球绕地球运动时, 受到地球的引力和向心力的作用
- D. 伽利略发现了行星运动的规律

2. 如图 3-1 所示, 地球沿椭圆形轨道绕太阳运动, 所处四个位置分别对应北半球的四个节气. 根据开普勒行星运动定律可以判定, 地球绕太阳公转速度最大的节气是 ( ).

- A. 春分
- B. 夏至
- C. 秋分
- D. 冬至

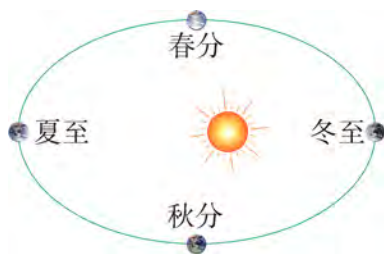


图 3-1

3. 天文学家发现了某恒星附近有一颗行星在圆形轨道上绕其运动, 并测出了行星的运行轨道半径和周期. 由此可推算出 ( ).

- A. 行星的质量
- B. 行星的半径
- C. 恒星的质量
- D. 恒星的半径

4. “天链一号 04 星”于 2016 年 11 月 22 日在西昌卫星发射中心, 通过“长征三号丙”运载火箭送入太空. “天链一号 04 星”是我国第四颗地球同步轨道数据中继卫星, 将与“天链一号 01 星”“天链一号 02 星”“天链一号 03 星”实现全球组网运行, 为航天器提供数据中继服务与测控支持. 关于“天链一号 04 星”, 下列说法正确的是 ( ).

- A. 运行速度大于  $7.9 \text{ km/s}$
- B. 离地面高度一定, 相对地面静止
- C. 质量与其他同步卫星质量不一定相等
- D. 向心加速度与静止在赤道上物体的向心加速度大小相等

5. 2016 年 8 月 16 日, 我国成功发射世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”, 这将使我国在国际上率先实现高速星地量子通信, 初步构建量子通信网络. 假定地球是半径为  $R$  的标准球体, “墨子号”卫星的质量为  $m$ , 运行在高度为  $h$  的圆形极地轨道上, 地球表面的重力加速度为  $g$ . 则关于运行在轨道上的该卫星, 下列说法正确的是 ( ).

- A. 运行的速度大小为  $\sqrt{gR}$
- B. 运行的向心加速度大小为  $g$
- C. 运行的周期为  $2\pi\sqrt{\frac{R+h}{g}}$
- D. 运行的角速度为  $R\sqrt{\frac{g}{(R+h)^3}}$

6. 如图 3-2 所示, 为了实现人类登陆火星的梦想, 2010 年 6 月我国宇航员与俄罗斯宇航员一起进行了“模拟登陆火星”实验活动. 已知火星半径约是地球半径的  $\frac{1}{2}$ , 质量约是地球质量的  $\frac{1}{9}$ , 自转周期与地球基本相同. 地球表面重力加速度是  $g$ , 若宇航员在地面上能竖直向上跳起的最大高度是  $h$ , 在忽略火星自转影响的条件下, 下述分析正确的是 ( ).



图 3-2

- A. 宇航员在火星表面受到的万有引力是在地球表面受到的万有引力的  $\frac{2}{3}$
- B. 火星表面的重力加速度是  $\frac{2}{3}g$
- C. 火星第一宇宙速度是地球第一宇宙速度的  $\frac{\sqrt{2}}{3}$
- D. 宇航员以相同的初速度在火星上竖直起跳时, 跳起的最大高度是  $\frac{3}{2}h$

7. 随着世界航空事业的发展, 深太空探测已逐渐成为各国关注的热点. 假设深太空中有一颗星球, 质量是地球质量的 2 倍, 半径是地球半径的 2 倍, 则某物体在该星球表面上所受重力是在地球表面上所受重力的 \_\_\_\_\_ 倍, 该星球上第一宇宙速度是地球上第一宇宙速度的 \_\_\_\_\_ 倍.

8. “天宫一号”目标飞行器于 2016 年 3 月 16 日终止数据服务, 通过逐渐分步降低运行速度, 于 2017 年 9 月离轨进入大气层烧毁. 若“天宫一号”飞行器每一时刻的飞行都可近似看作圆周运动, 在此过程中飞行器绕地球运行的周期将 \_\_\_\_\_, 向心加速度将 \_\_\_\_\_. (选填“变大”“变小”或“不变”)

9. “天宫二号”与“神舟十一号”在对接过程中的相对速度非常小, 可以认为具有相同速率. 它们的运动可以看作绕地球的匀速圆周运动. 设“神舟十一号”的质量为  $m$ , 对接处距离地球中心为  $r$ , 地球的半径为  $R$ , 地球表面处的重力加速度为  $g$ , 不考虑地球自转的影响, “神舟十一号”在对接时的角速度为 \_\_\_\_\_.

10. 一艘宇宙飞船飞近某行星, 并进入靠近该行星表面的圆形轨道绕行数圈后, 着陆在该行星上. 飞船上备有以下实验器材:

- A. 精确计时器一个.
- B. 已知质量为  $m$  的物体一个.
- C. 弹簧测力计一个.
- D. 天平一台 (附砝码).

已知宇航员在飞船绕行时和着陆后各对物体做了一次测量, 依据测量数据, 可求出该星球的半径  $R$  及质量  $M$ . (已知引力常量为  $G$ )

- (1) 两次测量所选用的器材分别为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_. (用  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  表示)
- (2) 两次测量的物理量分别是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_.
- (3) 用所测的物理量写出半径  $R$ 、质量  $M$  的表达式:  $R = \rule{1cm}{0.4pt}$ ,  $M = \rule{1cm}{0.4pt}$ .

11. 如图 3-3 所示, 曾经在太空运行了 15 年的“和平号”是迄今人类制造的最大的航天器, 总重量达 130 t, 已于 2001 年 3 月 23 日安全坠落在南太平洋指定海域. 按计划, 控制中心向“和平号”发出了三次制动信号, 已知第二次制动信号结束时, “和平号”做环绕地球的最后一圈飞行. 若将它的轨道近似看作圆形, 轨道距地面高度为 200 km, 那么它的周期为多少? (取地球半径为 6400 km, 地球质量为  $5.97 \times 10^{24}$  kg)



图 3-3

12. 中国自行研制、具有完全自主知识产权的“神舟”飞船, 目前已经达到或优于国际第三代载人飞船技术. 如图 3-4 所示, 其发射过程简化如下: 飞船在酒泉卫星发射中心发射, 由“长征”运载火箭送入近地点为  $A$ 、远地点为  $B$  的椭圆轨道上, 点  $A$  距地面的高度为  $h_1$ , 飞船通过变轨进入预定圆轨道. 设飞船在预定圆轨道上飞行  $n$  圈所用时间为  $t$ , 地球表面重力加速度为  $g$ , 地球半径为  $R$ , 求:

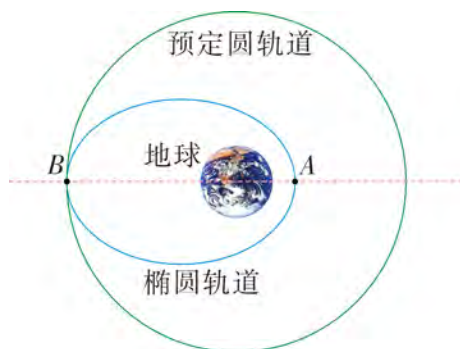


图 3-4

- (1) 地球的平均密度.
- (2) 飞船经过椭圆轨道近地点  $A$  时的加速度大小.
- (3) 椭圆轨道远地点  $B$  距地面的高度.

13. 2018 年 7 月, 天文学家宣布发现了 12 颗新的木星卫星, 使绕木星公转的卫星总数增加到 79 颗. 如果要估算木星的质量, 可以有多少种方案? 各需要测量哪些物理量? 写出用这些物理量表示木星质量的表达式.



## 第四章

# 机械能及其守恒定律

在物理学的发展史上，物理学家对寻求运动过程中保持守恒（不变）的物理量怀有浓厚的兴趣，更因此改变了物理学的认识图景。机械能守恒定律就是自然界关于运动守恒的事例，也是物理学中能量观念发展的重要体现。

“飞流直下三千尺，疑是银河落九天。”我们吟诵诗句赞美壮丽的瀑布的同时，是否对这一现象背后的物理原理有一些思考？例如，瀑布落下的过程中，能量是如何转化的？这其中是否存在守恒的物理量？又该如何建构相应的物理模型，设计相应的物理实验进行探究？

这一章我们将在牛顿运动定律的基础上，引入功和能的概念，根据功和能的关系，定量研究物体机械运动过程中的机械能及其转化，探究机械能守恒的条件，进一步理解自然界中运动形式的多样性和统一性，学会从机械能转化和守恒的角度分析问题。

## 第一节

## 功



在生产和生活中，利用机械工作的情况非常多，例如利用起重机吊起货物，用开瓶器撬开瓶盖，汽车牵引拖车前进等，如图 4-1-1 所示。



图 4-1-1 利用机械工作的实例

分析上述机械工作的过程，不难发现，尽管各种机械的构造不同，工作的对象不同，但它们在工作时都具有一个共同特征：机械给工作对象施以力的作用，并使工作对象沿力的方向发生了位移。在物理学中，如果一个物体受到力的作用，且物体在力的方向上发生了位移，就说这个力对物体做了机械功，简称**功**（work）。

那么，力、位移和功之间的关系是什么？怎样计算功？

### 功的计算

作用在物体上的力和物体在力的方向上发生的位移，是做功的两个必要因素。当力的方向与物体位移的方向一致时，如图 4-1-2 所示，功等于力的大小和位移大小的乘积。用  $F$  表示力的大小， $s$  表示位移的大小， $W$  表示力  $F$  所做的功，则有

$$W = Fs$$

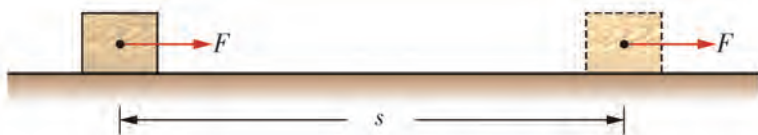


图 4-1-2 力的方向与物体位移的方向一致的情况

当力的方向与物体位移方向不一致时，如何计算功呢？



## 讨论与交流

如图4-1-3所示, 力 $F$ 的方向与物体位移 $s$ 的方向之间存在夹角 $\alpha$ . 参考力的分解示意图, 结合功的定义, 讨论如何求出力 $F$ 做的功.



图4-1-3 力的方向与物体位移的方向之间存在夹角的情况

当物体在与运动方向成 $\alpha$ 角的力 $F$ 作用下, 沿运动方向发生了一段位移 $s$ 时, 为了求出力 $F$ 所做的功, 我们先把力 $F$ 分解为两个分力: 沿位移方向的分力 $F_1 = F\cos\alpha$ , 垂直位移方向的分力 $F_2 = F\sin\alpha$ . 物体在分力 $F_1$ 的方向上发生了一段位移 $s$ , 因此分力 $F_1$ 做的功 $W_1 = F_1s = Fscos\alpha$ ; 物体在分力 $F_2$ 的方向上没有发生位移, 因此分力 $F_2$ 做的功为零.

故力 $F$ 对物体所做的功

$$W = Fscos\alpha \quad (4.1.1)$$

即力对物体所做的功等于力的大小、位移的大小以及力和位移夹角的余弦的乘积.

在国际单位制中, 功的单位为焦耳, 简称焦, 符号是J. 1 J 等于1 N 的力使物体在力的方向上发生1 m 的位移时所做功的大小, 即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

功是标量. 当物体在几个力的共同作用下发生一段位移时, 这几个力对物体所做的总功等于各个力分别对物体所做功的代数和, 也等于这几个力的合力对物体所做的功.

## 正功和负功

在式(4.1.1)中, 包含了力对物体做功时可能出现的各种情况.

(1) 当 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 时,  $\cos\alpha = 0$ ,  $W = 0$ . 这表示当力 $F$ 的方向与位移 $s$ 的方向垂直时, 力 $F$ 不做功.

(2) 当 $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ 时,  $\cos\alpha > 0$ ,  $W > 0$ . 这表示当力 $F$ 的方向与位移 $s$ 方向的夹角为锐角时, 力 $F$ 对物体做正功.

(3) 当 $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ 时,  $\cos\alpha < 0$ ,  $W < 0$ . 这表示当力 $F$ 的方向与位移 $s$ 方向的夹角为钝角时, 力 $F$ 对物体做负功.

功的正负表示对物体作用的力是动力还是阻力。动力所做的功为正，阻力所做的功为负。

一个力对物体做负功，往往可以说物体克服这个力做功。如摩擦力对行驶中的汽车做负功，可以说是汽车克服摩擦力做功；人登山（如图 4-1-4 所示）时重力对人做负功，也可以说人克服重力做功。



图 4-1-4 登山



### 讨论与交流

1. 分别就上述力对物体做功的三种情况，列举生活中的一些实例。
2. 一个力对物体做了  $-10\text{ J}$  的功，另一个力对物体做了  $5\text{ J}$  的功。有人说， $-10\text{ J}$  的功一定比  $5\text{ J}$  的功小。这种说法对吗？

## 做功与能量变化的关系

我们在初中已经学过功和能的初步知识，知道功和能是两个联系密切的物理量。一个物体能够对其他物体做功，我们就说这个物体具有能量（energy）。如挥动的铁锤能改变铁条的形状，湍急的河水能使水车转动，风能够推动帆船航行，如图 4-1-5 所示。可以说，铁锤、河水、风都具有能量。



图 4-1-5 具有能量的物体对其他物体做功

根据初中的知识我们还知道，铁锤对铁条做功时，铁锤的机械能转化为铁条的内能；河水对水车做功时，河水的机械能转化为水车的机械能；风对帆船做功时，风的机械能转化为帆船的机械能。因此，做功的过程就是能量变化的过程。做了多少功，就有多少能量发生变化。所以，功是能量变化的量度。

知道了功和能的这种关系，就可以通过计算做功的多少，定量地研究能量及其变化的问题。

**例题：**一名同学周末在家收拾客厅，在把一个木箱拉到客厅一角时，他想估算自己对这个木箱做了多少功。为了减小摩擦引起的噪声，以减轻对楼下住户的影响，他以斜向上与水平面约成  $60^\circ$  夹角的恒力，沿直线缓慢拉动木箱移动了 3 m。利用体重计称得木箱质量约为 30 kg，通过相关资料查到木头与地面的动摩擦因数约为 0.60，试估算：（取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

- （1）这名同学对木箱的拉力在该过程中所做的功。
- （2）木箱受到的外力做的总功。
- （3）木箱与地面之间的摩擦消耗了多少能量？这些能量去哪了？

**分析：**（1）根据功的计算公式，求功的大小需要知道力、位移和它们之间的夹角，而木箱缓慢移动的过程中，可以看作木箱受力平衡。由此可以求出拉力的大小。

（2）几个力共同做功时，总功等于各力做功之和，由此可以计算外力做的总功。

（3）功是能量变化的量度，可以从这一角度求解消耗的能量。

**解：**（1）木箱的受力分析如图 4-1-6 所示。木箱缓慢移动可看作箱子受力平衡。根据力的分解可知，拉力  $F$  沿水平方向的分力大小等于滑动摩擦力的大小，即

$$F \cos \alpha = f,$$

木箱在竖直方向受力平衡，地面对木箱的支持力

$$F_N = mg - F \sin \alpha.$$

根据牛顿第三定律，地面对木箱的支持力  $F_N$  等于木箱对地面的压力。

$$\text{滑动摩擦力 } f = \mu F_N,$$

联立以上式子，解得

$$\begin{aligned} F &= \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \\ &= \frac{0.60 \times 30 \times 10}{\cos 60^\circ + 0.60 \times \sin 60^\circ} \text{ N} \\ &= 176.54 \text{ N}. \end{aligned}$$

根据功的计算公式，拉力对木箱所做的功

$$\begin{aligned} W_1 &= F s \cos \alpha \\ &= 176.54 \times 3 \times \cos 60^\circ \text{ J} \\ &= 264.81 \text{ J}. \end{aligned}$$

（2）方法一：滑动摩擦力对木箱做功

$$W_2 = f s \cos 180^\circ.$$

$$\text{又因为 } f = F \cos \alpha,$$

$$\text{所以 } W_2 = -F s \cos \alpha.$$

则木箱受到的外力做的总功

$$W = W_1 + W_2 = F s \cos \alpha + (-F s \cos \alpha) = 0.$$

方法二：木箱做匀速直线运动时，所受合外力的大小为 0。根据功的计算公式，外力对木箱做的总功为 0。

（3）因为木箱所受外力做的总功为 0，而该同学对木箱的拉力做功 264.81 J，且重力不做功，所以木箱与地面之间的摩擦消耗了 264.81 J 的能量，这些能量转化为木箱与地面摩擦产生的内能。

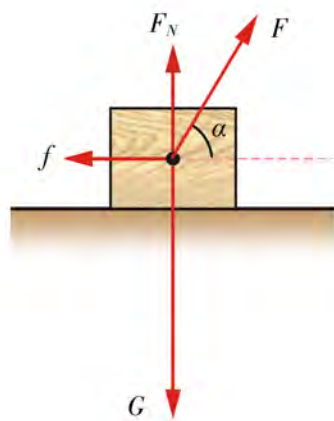


图 4-1-6 木箱  
受力分析

## “功” 的概念的发展历程

物理学中,功的概念最早是在人类使用和研究机械的过程中产生的。在一开始,“功”这一名词还不存在。那么,在物理学发展的不同阶段,人们是如何衡量机械作用效果的?

### 1. 18 世纪以前关于机械作用的观念

在欧洲文艺复兴时期,随着各类机械的实际应用逐渐增多,人们对理论指导的需求日益增加,机械工程领域的发展备受关注。16 世纪末,伽利略通过提升重物来分析各类机械(包括杆、绞盘和滑轮等)的基本原理。他注意到:用滑轮提升重物,作用力与作用力所经过距离的乘积保持不变,这其中已经包含“功”的观念。

17 世纪,科学家们根据机械使用的一般观念,从机械的“输入”和“输出”的角度探讨机械的作用效果。莱布尼茨(G. W. Leibniz, 1646—1716)受到水轮车工作效果的启发,提出两个假设:一个物体从某一高度下落到地面所获得的“力”与从地面上升到这个高度所接受的“力”相等;使 1 磅(1 磅=0.4536 千克)重的物体上升 4 英尺(1 英尺=0.3048 米)的“力”等于使 4 磅重的物体上升 1 英尺的“力”。此处对“力”的度量已暗含重力做功的观念。



图 4-1-7 莱布尼茨

### 2. 18 世纪对机械效能的量度

18 世纪,工程师们在研究机械应用的过程中,利用力和力的方向上通过的距离,作为机械有用效能的量度,对功的概念的认知通过科学实践得到发展。例如,一名英国机械工程师通过系统化的实验来研究水轮车的机械效率,他受到伽利略“功”的观念雏形的影响,认为机械的作用就是在单位时间内将重物升高一定距离,而机械的效果则是单位时间内提起物体的重量加上必要的摩擦,乘物体提升的高度。此时,功的观念已经较为清晰。

### 3. 19 世纪对功的定义

1819 年,为了能够方便比较不同机器的机械效率,纳维(C. Navier, 1785—1836)将机械的作用量定义为力乘在力的方向上通过的距离。1829 年,法国科学家科里奥利(G. Coriolis, 1792—1843)在研究动力机械效率理论的过程中,正式提出功的概念。

至此,功这一概念被正式引入物理学体系。而直到后来能量概念的形成与能量守恒定律的发现,人们才逐渐认识到功的本质:做功是能量转换的一种方式,功是能量转化的量度。



图 4-1-8 科里奥利



## 练习

1. 求下列情况中力  $F$  所做的功.

(1) 用水平推力  $F$  推质量为  $m$  的物体沿光滑水平面前进距离  $s$ .

(2) 用水平推力  $F$  推质量为  $m$  的物体沿动摩擦因数为  $\mu$  的水平面前进距离  $s$ .

(3) 光滑斜面倾角为  $\alpha$ , 用与斜面平行的推力  $F$  推一个质量为  $m$  的物体沿斜面前进距离  $s$ .

2. 试建构相应的物理模型, 说明:

(1) 摩擦力可以做负功.

(2) 摩擦力可以做正功.

(3) 摩擦力可以不做功.

3. 如图 4-1-9 所示, 自动卸货车始终静止在水平地面上, 车厢在液压机的作用下倾角  $\theta$  逐渐增大且货物相对车厢静止的过程中, 货物受到的支持力和摩擦力分别对货物做正功、负功还是不做功? 如果做功, 做功的大小如何变化?

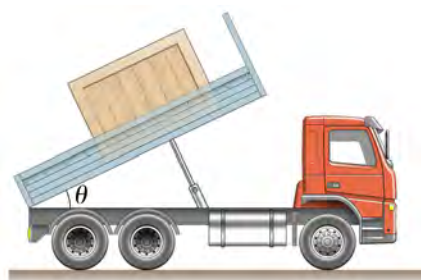


图 4-1-9

4. 一名质量为  $40\text{ kg}$  的同学, 站在自动扶梯上随扶梯斜向上做匀速直线运动. 扶梯高  $5\text{ m}$ , 倾角为  $30^\circ$ . 则该同学从扶梯底端到顶端的过程中, 受到的重力、摩擦力和支持力做的功分别为多少?

5. 拖把由拖杆和拖把头构成, 如图 4-1-10 所示. 设拖把的质量为  $m$ , 拖把头与地板之间的动摩擦因数为  $\mu$ , 重力加速度为  $g$ . 某同学用这种拖把在水平地板上拖地时, 沿拖杆方向施加力  $F$  来推拖把. 若拖杆与竖直方向的夹角为  $\theta$ , 拖把头在地板上沿直线匀速向前移动距离  $s$ , 求:

(1) 推拖把的力  $F$  做的功.

(2) 摩擦力对拖把头做的功.

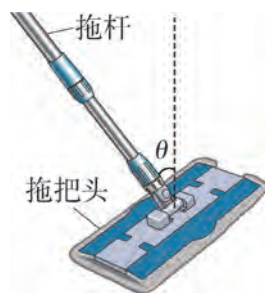


图 4-1-10

## 第二节

## 功率



在生产和生活中，机械为我们提供了许多便利，使用机械的过程，就是做功的过程。为了更好地利用机械，我们不仅关心机械做了多少功，还关心机械做功的快慢。

### 做功快慢的描述

下面通过比较人力与机械做功的快慢，探讨描述机械做功快慢的方法。



#### 讨论与交流

1. 人们经常使用机械做功来替代人力或畜力做功。请从身边寻找做功的事例，并思考机械与人力或畜力在做功快慢方面有什么差异。这种差异给生产和生活带来什么影响？

2. 在建筑工地上分别采用以下三种方式，把  $1\text{ t}$  的建材从地面运到三楼。

方式一：如图 4-2-1 所示，由搬运工分批搬运，需时  $2\text{ h}$ 。

方式二：如图 4-2-2 所示，用塔式起重机提升，需时  $8\text{ min}$ 。

方式三：如图 4-2-3 所示，用升降机提升，需时  $1\text{ min}$ 。



图 4-2-1 人工搬运建材



图 4-2-2 塔式起重机搬运建材



图 4-2-3 升降机搬运建材

请思考以下问题：

- (1) 用不同的方式运送，对建材所做的功是否相同？
- (2) 这三种方式所用的时间不同，做功的快慢如何描述？

为了描述不同物体做功的快慢，我们需要引入一个新的物理量——功率。

物理学上把力对物体所做的功  $W$  与做功所用时间  $t$  之比，称为**功率**（power），用符号  $P$  表示，即

$$P = \frac{W}{t} \quad (4.2.1)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，简称瓦，符号是 W。1 s 内做了 1 J 的功，功率就是 1 W，即

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

功是能量变化的量度，因此功率用于描述能量变化快慢的程度。由于功是标量，所以功率也是标量。

在工程技术中，功率的单位常用千瓦（kW）表示， $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ 。此外，电动机、内燃机等动力机械常常具有额定功率，这是机械长时间工作的最大允许功率，实际输出功率一般小于这个数值。

## 功率与力、速度

当物体做匀速直线运动时，若作用在物体上的某个恒力  $F$  的方向与位移  $s$  的方向相同，恒力  $F$  做的功  $W = Fs$ ，则功率  $P = \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t}$ 。又由速度  $v = \frac{s}{t}$ ，故功率也可表示为

$$P = Fv \quad (4.2.2)$$

当物体做变速运动时，若  $v$  表示在时间  $t$  内的平均速度，则  $P$  表示在这段时间内的平均功率；若  $v$  表示某一时刻的瞬时速度，则功率  $P$  表示在该时刻的瞬时功率。



### 讨论与交流

1. 公式  $P = Fv$  中的  $F$  是指合力还是某一个力？
2. 公式  $P = \frac{W}{t}$  和  $P = Fv$  都可以用来计算功率。它们在应用时有什么区别？

式 (4.2.2) 在工程上，对汽车、火车等交通工具和起重机等机械具有重要意义。

当速度  $v$  保持一定时，牵引力  $F$  与功率  $P$  成正比，所以汽车上坡时，要想保持与在水平路面行驶时相同大小的速度，则必须加大油门，增大输出功率以增大牵引力。

当发动机的功率  $P$  一定时，牵引力  $F$  与速度  $v$  成反比。要增大牵引力，就要减慢速度。所以，开手动挡汽车上坡时，司机常通过操作变速杆（如图 4-2-4 所示）换挡来减慢汽车速度以增大牵引力。

事实上,当发动机功率一定时,通过减慢速度来增大牵引力或通过减小牵引力来加快速度,其效果都是有限的.要同时加快速度和增大牵引力,必须提高发动机的额定功率,这就是高速列车、赛车和大型舰艇需要大功率发动机的原因.



图 4-2-4 手动挡汽车上的变速杆

**例题:** 某同学随家人一起出行时,家人告诉他两个开车省油的窍门:

(1) 车越重越耗油,所以要减轻汽车重量,除了必备的应急物品以外,非必要的物品最好不要放在车上.

(2) 根据前方路况,汽车需要减速时,有预见性地提前松开油门,而尽量避免猛踩刹车.

然后家人问他:“你在学校学了不少物理知识,能不能分析一下这些开车省油的窍门到底有没有道理?”请帮这名同学分析一下其中的原理.

**分析:** (1) 根据功率的计算公式,分析汽车所受重力大小与汽车输出功率的关系.

(2) 可通过牛顿第二定律和功率的计算公式,求出汽车加速度的表达式,然后进行分析.

**解:** (1) 设汽车匀速行驶,受力分析如图 4-2-5 所示,此时受到的牵引力  $F$  与阻力  $f$  相等.由功率的计算公式,可得

$$P = Fv = fv.$$

汽车越重,受到的阻力  $f$  越大.由上式可知,若汽车要以同样的速度行驶,需要加大油门以增大功率  $P$ ,因此耗油增加.

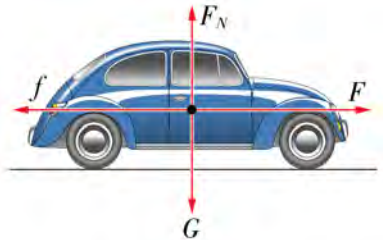


图 4-2-5 汽车受力分析

(2) 根据牛顿第二定律  $F = ma$ ,汽车的加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{F - f}{m} = \frac{\frac{P}{v} - f}{m}.$$

由上式可知,要让汽车减速,需要让加速度  $a < 0$ ,即让汽车功率  $P$  减小,或让汽车受到的阻力  $f$  增大.

高速行驶的汽车其减速过程一般分为两步.

第一步,驾驶员松开油门,汽车功率  $P$  减小,车速也随之减小.

第二步,驾驶员踩下刹车,汽车所受阻力  $f$  增大,使汽车更快地减速.

然而,在汽车实际行驶的过程中,并不是每一次汽车减速都需要减速至静止状态,有时候驾驶员甚至不用踩下刹车即可继续安全行驶.贸然猛踩刹车往往会使汽车速度降得过低,造成额外的内能损耗,导致汽车重新提速时油耗增加.

因此,有经验的驾驶员在驾驶时,会认真留意前方路况,当汽车需要减速时,往往会有预见性地提前松开油门,必要时再踩刹车,从而达到省油的目的.

## 生产和生活中常见机械的功率

在生产中，功率是衡量机械性能的重要指标。在生产和生活中有各式各样的机械，表 4-2-1 给出了一些常见机械的功率。

表 4-2-1 生产和生活中常见机械的功率

| 名称    | 功率 P/W                        | 名称         | 功率 P/W                        |
|-------|-------------------------------|------------|-------------------------------|
| 电动摩托车 | 800                           | 国产小轿车      | $(5.0 \sim 18.0) \times 10^4$ |
| 公交车   | $(8.0 \sim 15.0) \times 10^4$ | 普通火车       | $(2.4 \sim 3.0) \times 10^5$  |
| 高铁    | $(4.8 \sim 11.0) \times 10^6$ | 万吨级远洋轮船发动机 | $7.4 \times 10^6$             |
| 大型轧钢机 | $3.7 \times 10^7$             | 喷气式客机      | $2.0 \times 10^8$             |

机械功率与我们的生活密切相关。例如，骑自行车运动健身时，通过骑行功率的反馈数据，可以科学掌控运动强度，评估健身效果。

近年来，随着石油资源的紧缺和环保意识的提升，纯电动汽车（如图 4-2-6 所示）、燃料电池汽车和太阳能汽车等新能源汽车快速发展。在理论与技术的支持下，新能源汽车的各项性能指标（如发动机的输出功率等）不亚于一般的燃油汽车，已逐步得到人们的认可。

现代农业机械中，发动机作为土壤耕作机械、作物收获机械（如图 4-2-7 所示）和农业运输机械等的配套动力设备，其输出功率不断提升，减轻了农业劳动力的负担，显著提高了农业生产的效率。

在航空航天领域，发动机是航空航天设备的核心，需要满足功率大、质量小、安全性好等要求，是当今世界上研发最困难、结构最复杂的工程机械系统之一。如图 4-2-8 所示为我国自行研制的发动机，已装配在大飞机 C919 上。



图 4-2-6 新能源汽车



图 4-2-7 联合收割机



图 4-2-8 我国自主研发的航空发动机“长江 1000A”

## 国产大功率机车首次登上“世界屋脊”

2014年8月16日,中国自主研发的和谐N3型高原机车亮相青藏铁路(如图4-2-9所示),担当客运和货运牵引职责。

青藏铁路是世界上海拔最高的铁路,由于青藏高原空气稀薄,气压低,燃料无法有效释放能量,因此常规的内燃机车输出功率偏低,牵引力偏小。此外,由于地形的缘故,长坡道较多,需要更大功率的机车才能承担客车和货车的牵引重任。

中国工程技术人员迎难而上,针对高原环境适用性和高可靠性的要求,对国内既有的大功率内燃机车进行高原测试,确定优化升级方案。在满足青藏铁路牵引要求的前提下,适当进行功率修正,加大设计余量,增强可靠性,最终开发出适应高原气候环境特点的大功率机车。和谐N3型高原机车额定功率达 $3300\text{ kW}$ ,持续牵引力达 $598\text{ kN}$ ,列车最大速度可达 $120\text{ km/h}$ 。铁路牵引动力难题的征服,为周边百姓和进藏游客提供了便利的交通。



图4-2-9 和谐N3型高原机车



### 练习

1. 设汽车在行驶时发动机功率不变,试从功率的角度分析,并回答下列问题。

- (1) 为什么汽车在平坦的公路上比在崎岖的路面上行驶得更快?
- (2) 为什么在同一路面上,汽车不载货物时行驶得更快?

2. 某同学在平直路面上骑自行车,已知该同学连同书包的质量为 $50\text{ kg}$ ,自行车的质量为 $15\text{ kg}$ 。设该同学骑自行车时的功率为 $40\text{ W}$ ,所受阻力为人车总重的 $0.02$ 倍。求他在平直路面上骑行时自行车的最大速度。

3. 如图4-2-10所示是修建高层建筑常用的塔式起重机。在起重机将质量 $m = 5 \times 10^3\text{ kg}$ 的重物沿竖直方向吊起的过程中,重物由静止开始向上做匀加速直线运动,加速度 $a = 0.2\text{ m/s}^2$ 。当起重机输出功率达到其允许的最大值时,保持该功率直到重物做 $v_{\max} = 1.2\text{ m/s}$ 的匀速运动。不计额外功,求:( $g = 10\text{ m/s}^2$ )

- (1) 重物做匀速运动时,起重机的输出功率。
- (2) 重物做匀加速直线运动时的最大速度。



图4-2-10

### 第三节

## 动能 动能定理



乒乓球被球拍击打后飞向对手，子弹经火药引爆后射出枪膛，热气球在空气浮力的作用下逐渐上升，如图 4-3-1 所示。在上述情境中，乒乓球、子弹、热气球在受到力的作用后都在运动，说明它们都具有能量。这种能量的特点是什么？它们和做功有什么关系？



图 4-3-1 运动的物体

### 动能

物体由于运动而具有的能量叫作**动能** (kinetic energy)。在初中我们已经知道，物体的动能大小与物体的质量和速度大小有关。物体的质量越大，速度越大，它的动能就越大。那么，物体的动能与其质量、速度有怎样的定量关系呢？

如图 4-3-2 所示，一个质量为  $m$ 、初速度为  $v$  的物体在水平桌面上运动，因受摩擦力  $f$  的作用，运动一段位移  $s$  后静止。在这一过程中，物体克服摩擦力做功。根据功和能的关系，这个功在量值上就等于物体初始所具有的动能。

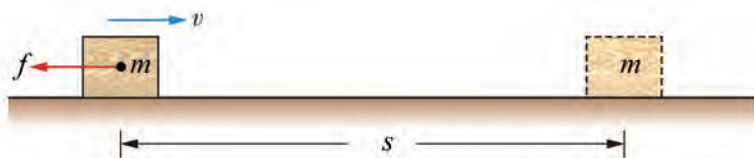


图 4-3-2 物体在水平桌面上运动

选初速度的方向为正方向，根据牛顿第二定律  $F = ma$ ，得

$$-f = m(-a)$$

注意：摩擦力和加速度的方向与正方向相反，两者皆为负。

根据运动学公式  $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ , 得

$$0 - v^2 = 2(-a)s$$

即

$$s = \frac{v^2}{2a}$$

摩擦力对物体所做的功

$$W = -fs = m(-a)\frac{v^2}{2a} = -\frac{1}{2}mv^2$$

即物体克服摩擦力做功的大小

$$W = \frac{1}{2}mv^2$$

根据功和能的关系, 上式中的  $\frac{1}{2}mv^2$  是一个具有特定意义的物理量, 这个量就是质量为  $m$ 、初速度为  $v$  的物体在初始时刻所具有的动能. 若用  $E_k$  表示物体的动能, 那么, 质量为  $m$  的物体, 以速度  $v$  运动时所具有的动能可以表示为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.3.1)$$

必须指出, 由于速度和所选参考系有关, 所以动能也与参考系有关. 对不同的参考系, 动能可能有不同的量值.

动能是标量, 动能的单位与功的单位相同, 在国际单位制中都是焦耳, 简称焦, 符号是 J.



### 讨论与交流

1. 如果物体的速度发生了变化, 其动能是不是一定会发生变化? 反之, 如果物体的动能发生了变化, 其速度是不是一定会发生变化? 为什么?
2. 一辆匀速行驶的汽车里坐着一名乘客, 他与汽车保持相对静止. 那么, 这名乘客的动能是否为零?

## 动能定理

运动的物体具有动能, 而做功可以改变物体的动能. 例如, 离站加速行驶的列车, 发动机对列车做正功, 列车的动能越来越大; 在粗糙水平面上滑行的物体, 摩擦力对物体做负功, 物体的动能越来越小. 那么, 做功与物体动能的变化有什么定量关系呢?

如图 4-3-3 所示, 质量为  $m$  的物体, 在恒定拉力  $F$  的作用下, 以速度  $v_1$  开始沿水平面运动, 经位移  $s$  后, 速度增加到  $v_2$ . 已知物体与水平面的摩擦力恒为  $f$ . 我们可以根据牛顿第二定律和运动学公式, 推导出合力对物体所做的功与物体动能变化的关系.



图 4-3-3 物体在恒定拉力  $F$  的作用下沿水平面运动

设初速度  $v_1$  的方向为正方向, 根据牛顿第二定律, 得

$$F - f = ma$$

根据运动学公式  $v_2^2 - v_1^2 = 2as$ , 得

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

合力对物体所做的功

$$W = (F - f)s = \frac{ma(v_2^2 - v_1^2)}{2a}$$

即

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

上式表明, 合力对物体所做的功等于物体动能的变化量. 这个结论叫作**动能定理** (theorem of kinetic energy).

若用  $E_{k2}$  表示物体的末动能,  $E_{k1}$  表示物体的初动能, 则动能定理可以表示为

$W = E_{k2} - E_{k1}$

(4.3.2)

由式 (4.3.2) 可知, 当外力对物体做正功时, 末动能大于初动能, 物体的动能增加; 当外力对物体做负功时, 末动能小于初动能, 物体的动能减少.

以上动能定理是在恒力做功、物体做直线运动的情况下推导出来的. 可以证明, 动能定理在变力做功或物体做曲线运动时仍然成立.

从式 (4.3.2) 还可知, 等号左侧反映的是力对物体做功的过程, 而等号右侧的动能则只涉及运动过程的初末状态, 并不涉及运动过程中对力、加速度等物理量的分析. 因此, 运用动能定理解决问题有时会比较方便.

### 讨论与交流

动能定理为我们计算力所做的功提供了新的方法. 用  $W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$  计算功和用  $W = Fscos\alpha$  计算功有什么不同?

## 动能定理的应用

航空母舰上可供战斗机起飞的跑道比较短. 为了让战斗机能够获得足够的动能起飞, 根据动能定理, 需要对战斗机做更多的功. 因此, 工程师们研发了弹射器, 使战斗机在起飞时能够获得更多的动能以缩短助跑距离, 如图 4-3-4 所示.

从安全的角度考虑, 在设计儿童滑梯 (如图 4-3-5 所示) 时, 要保证儿童从滑梯顶端滑到底部时速度不会过大. 应用动能定理分析运动过程可知, 重力做正功, 摩擦力做负功. 因此, 滑梯不能设计得过高, 以适当控制重力做功的大小; 滑梯的倾斜度也不能太陡, 以保证摩擦力做功的大小.

在高速公路上, 常常能看到车距确认标志, 提醒我们注意保持车距. 根据动能定理, 车辆从紧急刹车到静止, 动能变化量较大, 需要克服摩擦力做功, 并有一定的制动距离. 因此高速公路上, 车辆之间需要保持必要的距离, 以防止撞车意外发生.



图 4-3-4 战斗机利用弹射器起飞



图 4-3-5 儿童滑梯

**例题:** 为了交通安全, 在公路上行驶的汽车应保持必要的间距. 已知某高速公路的最高限速  $v_{\max} = 120 \text{ km/h}$ , 假设前车突然停止, 后车司机从发现情况到进行制动操作, 汽车通过的位移  $s' = 17 \text{ m}$ , 制动时汽车所受的阻力为汽车所受重力的 0.5 倍, 则该高速公路上汽车间的安全距离至少应为多大? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

**分析:** 根据动能定理, 分别列出公式中等号左侧的功和等号右侧初末状态的动能, 即可求解得到需要的物理量的值.

**解:** 汽车制动时, 阻力对汽车做负功, 有

$$W = -fs = -0.5mgs.$$

汽车的动能减小至零, 根据动能定理  $W = E_{k2} - E_{k1}$ , 有

$$-0.5mgs = 0 - \frac{1}{2}mv_{\max}^2.$$

汽车制动后滑行的距离

$$s = \frac{v_{\max}^2}{2 \times 0.5g} = \frac{\left(\frac{120 \times 10^3}{3600}\right)^2}{2 \times 0.5 \times 10} \text{ m} = 111 \text{ m}.$$

因此, 该高速公路上汽车之间的最小安全距离

$$s_{\text{安全}} = s + s' = (111 + 17) \text{ m} = 128 \text{ m}.$$

本题还可以应用牛顿第二定律和匀变速直线运动公式进行解答. 试一试, 并与上述解法做比较.



## 实践与拓展

通过查阅相关资料和访问有关部门等途径，搜集汽车制动距离与车速关系的数据，并尝试用动能定理进行分析。



## 练习

1. 如图 4-3-6 所示是游乐场中的水滑梯，可视为由倾斜的光滑轨道和水平的阻力轨道组成。水平轨道的长度为 25 m。若人从水滑梯的顶端滑下到最低点时的速度为 10 m/s，人在水平轨道上受到的平均阻力与重力成正比，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。出于安全考虑，要求人不能碰撞水平轨道的末端，则人在水平轨道上受到的平均阻力至少为重力的多少倍？

2. 风洞是研究空气动力学的实验设备，其简易模型如图 4-3-7 所示。将刚性杆水平固定在风洞内距地面高度  $H = 3.2 \text{ m}$  处，杆上套一质量  $m = 3 \text{ kg}$  且可沿杆滑动的小球。实验时，球所受的风力  $F = 15 \text{ N}$ ，方向水平向左，小球以速度  $v_0 = 8 \text{ m/s}$  向右离开杆端。假设小球所受风力不变，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求：

(1) 小球落地所需时间和离开杆端的水平距离。

(2) 小球落地时的动能。

3. 在一个带喷水口的塑料瓶中装满水，用力挤压可使水从喷口射出（如图 4-3-8 所示）。请设计方案，估测手挤压瓶时对瓶所做的功，并说明要用到哪些实验器材，需要测量哪些物理量，并写出估测所做功的表达式。



图 4-3-6

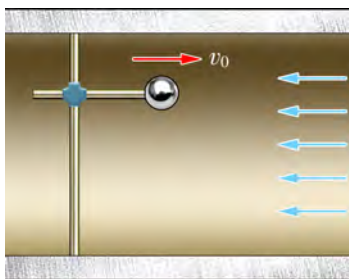


图 4-3-7



图 4-3-8

## 第四节

## 势能



耸立在峭壁上的石头落下时能在地面上砸出很深的坑，蓄能水电站水库中的水从高处被释放时能带动发动机发电，紧绷的弓弦能够把箭射出去，如图 4-4-1 所示。在上述情境中，高处的石头、水和发生弹性形变的弓弦都具有潜在的能量。那么，这种能量是什么？又具有什么特点？



图 4-4-1 具有潜在能量的物体

### 重力做功

在初中我们学过，物体由于位于高处而具有的能量叫作**重力势能**（gravitational potential energy），并且重力势能与物体的质量及所处高度有关。参考前面研究动能的思路，我们也从功和能的关系入手，研究高处的物体下落时重力所做的功。



#### 讨论与交流

如图 4-4-2 所示，一个质量为  $m$  的小球，从同一高度  $h$  处分别沿竖直方向下落、沿斜面下滑、沿水平方向抛出，最后落到同一水平面上。小球沿上述三条不同的路径运动，重力对小球所做的功相同吗？重力做功与物体运动的路径有关吗？

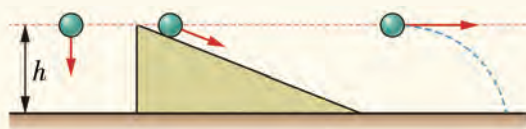


图 4-4-2 小球沿三条不同路径运动

小球沿上述三条不同的路径运动，重力对小球所做的功  $W_G$  均为  $mgh$ ，与小球运动的具体路径无关。下面我们对此进行理论分析。

如图 4-4-3 所示，一个质量为  $m$  的物体，在重力的作用下，从高度为  $h_1$  的位置 A，沿任意路径运动到高度为  $h_2$  的位置 B。我们把整条路径分割成许多很短的小段，使得每一小段都可以近似地看成一条线段。设每一小段的位移大小为  $\Delta s$ ，则重力所做的功

$$\Delta W_G = mg\Delta s \cos\alpha = mg\Delta h$$

上式中  $\Delta h = \Delta s \cos\alpha$ ，是物体位移  $\Delta s$  的高度差。物体通过整条路径时，重力所做的功等于重力在每一小段上所做的功的代数和。即在这一过程中，重力所做的功

$$W_G = \sum \Delta W_G = \sum mg\Delta h = mg \sum \Delta h = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$$

由此可知，重力做功只与运动物体的起点和终点的位置有关，而与运动物体所经过的路径无关。

根据功和能的关系，式  $W_G = mgh_1 - mgh_2$  中的  $mgh$  是一个具有特定意义的物理量，这个量的变化与重力所做的功密切相关。我们把由物体所受的重力  $mg$  和所在位置的高度  $h$  决定的物理量  $mgh$  称为物体的重力势能，常用  $E_p$  来表示，即

$E_p = mgh$

(4.4.1)

式 (4.4.1) 表明，物体的重力势能等于它所受重力的大小与所处高度的乘积。

重力势能是标量，它的单位与功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳，简称焦，符号是 J。

显然，物体的重力势能是由于物体受到地球重力的作用而产生的。因此，重力势能属于物体和地球组成的系统。

通过前面的理论推导，我们可以得到重力做功与重力势能的关系，即

$W_G = E_{p1} - E_{p2}$

(4.4.2)

其中  $E_{p1} = mgh_1$  表示物体在初位置的重力势能， $E_{p2} = mgh_2$  表示物体在末位置的重力势能。

式 (4.4.2) 表明，重力做正功时，重力势能减少；重力做负功时，重力势能增加。

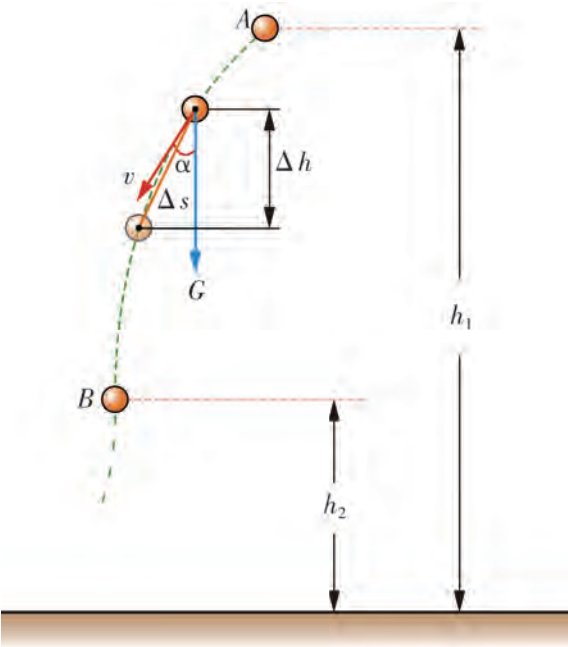


图 4-4-3 小球运动路径分析

## 重力势能的相对性

物体具有的重力势能总是相对某个水平面来说的. 我们一般把处于这个水平面上的物体的重力势能规定为零, 并把这个水平面称为参考平面. 选择不同的参考平面, 同一物体在空间同一位置的重力势能就不同.



### 讨论与交流

如图 4-4-4 所示, 相对不同的参考平面, 书柜第二层中的某一本书的重力势能有什么不同? 假设书的质量为  $m$ , 书的厚度忽略不计, 每层高度为  $h$ , 重力加速度为  $g$ .

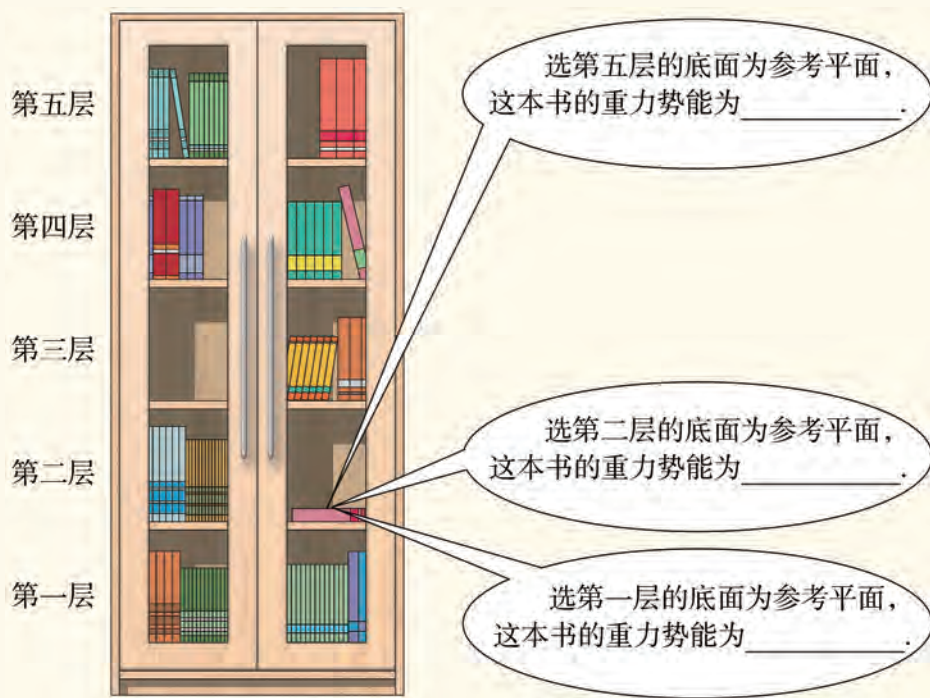


图 4-4-4 重力势能的相对性

物体重力势能的大小与其位置的高度有关. 因此, 在计算重力势能时, 应先选取一个水平面作为参考平面, 然后确定这个物体相对参考平面的位置高度. 在通常情况下, 我们选择地面作为参考平面, 但为研究问题方便, 也可以根据实际情况选择不同的平面作为参考平面.

对选定的参考平面而言, 在参考平面上方的物体, 重力势能为正值; 在参考平面下方的物体, 重力势能为负值. 重力势能为负值表示物体在这个位置具有的重力势能比在参考平面上具有的重力势能小.

选择不同的参考平面, 物体重力势能的数值虽然不同, 但人们关心的往往只是两个不同位置重力势能的差值, 这个差值并不因选择不同的参考平面而有所不同.

## 弹性势能

发生弹性形变的物体，如上紧的发条、扭绞的橡皮筋（如图 4-4-5 所示）在恢复原状过程中，能够对外界做功，因而它们具有能量，这种能量叫作**弹性势能**（elastic potential energy）。那么，弹性势能与什么因素有关呢？



图 4-4-5 储存弹性势能的物体



### 观察与思考

如图 4-4-6 所示，取两根劲度系数不同的弹簧和一个轻质小球。

(1) 分别用大小不同的力把小球压在同一根弹簧上，使同一根弹簧产生不同的形变，迅速放开手，使小球反弹，比较小球所能到达的最大高度。

(2) 将同一个小球依次放在劲度系数不同的弹簧上，使不同的弹簧产生相同大小的形变，迅速放手，使小球反弹，比较小球所能到达的最大高度。

从上述实验中，可以得到什么实验结论？

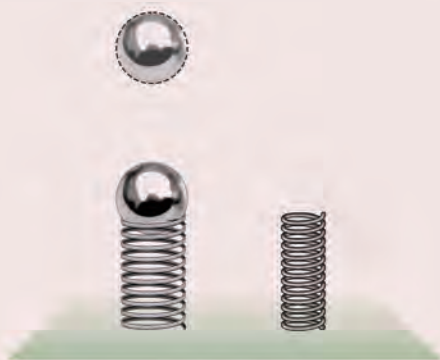


图 4-4-6 弹性势能体验实验

由上述实验可知，弹簧形变或劲度系数不同时，小球所能达到的最大高度也不同。采用同一根弹簧时，弹簧形变越大，小球弹得越高。采用不同弹簧，压缩同样形变量时，弹簧劲度系数越大，小球弹得越高。

研究表明，物体弹性势能的大小与物体的形变大小有关。在弹性限度内，同一物体发生的弹性形变越大，弹性势能越大。此外，弹性势能还与物体自身的材料有关，对于形变相同的弹簧而言，劲度系数越大，弹性势能越大。

进一步分析重力势能和弹性势能可以看到,重力势能是由地球和地面上物体的相对位置决定的,弹性势能是由发生弹性形变的物体各部分的相对位置决定的.因此,与相互作用物体的相对位置有关的能量叫作势能 (potential energy). 在以后的学习中,我们还会遇到其他形式的势能.

势能是相互作用物体组成的系统所共有的.不论是重力势能还是弹性势能,都不是物体单独具有,而是系统共有的.对于重力势能来说,若没有地球,物体不受重力,就谈不上重力势能.所以,重力势能是地球与受重力作用的物体组成的系统所共有的.我们说“地球上某一物体的势能”只是为了简述方便.同样,弹性势能也是发生弹性形变的物体与此时受弹力作用的物体组成的系统所共有的.



### 实践与拓展

请设计实验,研究在弹性限度内,当弹簧被压缩和拉长相等的长度时,所具有的弹性势能是否相等.



### 练习

1. 以生产和生活中的现象为例,比较动能和势能的不同之处.

2. 如图 4-4-7 所示,质量为 50 kg 的跳水运动员从 10 m 高跳台上以 4 m/s 的速度斜向上起跳,最终落入水中.若忽略运动员的身高,重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,求:

(1) 以水面为参考平面,运动员在跳台上具有的重力势能.

(2) 运动员从起跳到入水的全过程,重力所做的功.

3. 一根粗细均匀、长为 5 m、质量为 60 kg 的电线杆横放在地面上,如果要把它竖立起来,至少要做多少功? 它的重力势能改变了多少? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

4. 生活中常见的闭门器主要依靠弹性形变后储存的弹性势能自动将打开的门关闭,如图 4-4-8 所示. 当门打开和关闭时,弹簧的弹力分别对外做正功还是负功? 能量又如何转化?

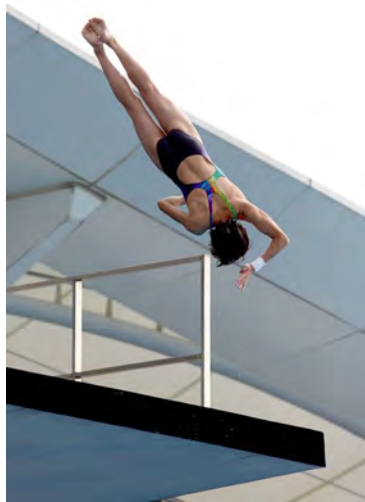


图 4-4-7



图 4-4-8

## 第五节

## 机械能守恒定律



如图 4-5-1 所示, 骑自行车下坡时, 即使没有蹬车, 车速仍然会逐渐增大. 从能量的观点来看, 该过程中自行车的重力势能减小, 动能增加. 动能和势能可以相互转化. 那么, 它们之间的转化通过什么来实现? 在转化的过程中, 动能与势能的总量是否会发生变化?



图 4-5-1 自行车下坡

### 动能与势能的相互转化

动能与势能 (包括重力势能和弹性势能) 统称为**机械能** (mechanical energy). 在一定条件下, 物体的动能与势能可以相互转化.



### 讨论与交流

如图 4-5-2 所示是一个网球竖直下落, 与地面碰撞并回弹的过程. 若网球与地面接触过程中机械能守恒, 空气阻力可忽略不计, 试分析以下过程中各有什么力做功, 动能和势能之间如何转化.

- (1) 网球下落的过程.
- (2) 网球与地面接触至下落到最低点的过程.
- (3) 网球从最低点上升至离开地面的过程.
- (4) 网球离开地面至上升到最高点的过程.

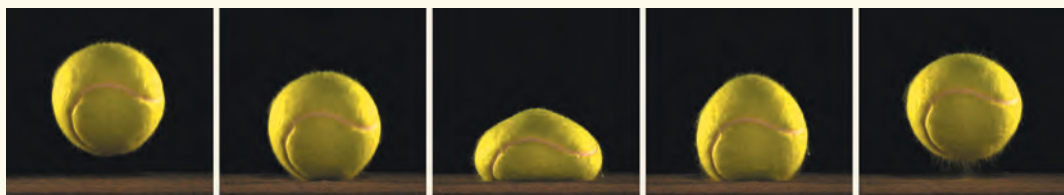


图 4-5-2 网球的运动过程

在上述情境中,网球下落的过程中,重力做正功,重力势能转化为动能;网球与地面接触至下落到最低点的过程中,重力做正功,弹力做负功,动能和重力势能转化为弹性势能;网球从最低点上升至离开地面的过程中,重力做负功,弹力做正功,弹性势能转化为动能和重力势能;网球离开地面至上升到最高点的过程中,重力做负功,动能转化为重力势能.在蹦极、撑竿跳高等过程中(如图4-5-3所示),也存在相似的动能和势能转化的过程.



图4-5-3 运动过程中动能和势能相互转化

由上述讨论我们知道,通过重力或弹力做功,机械能可以从一种形式转化成另外一种形式.

## 机械能守恒定律的理论验证

物体的动能和势能在相互转化的过程中,一种能量减小的同时,另一种能量增大.那么,减小的能量是否刚好等于增大的能量呢?或者说,物体的动能和势能的总量是否保持不变,即机械能是否守恒?

下面我们以较简单的自由落体模型为例,从理论上探究这个问题.

设一个质量为  $m$  的小球从点  $A$  开始自由下落,如图4-5-4所示.小球经过高度为  $h_1$  的点  $B$  时速度为  $v_1$ ;下落到高度为  $h_2$  的点  $C$  时速度为  $v_2$ .在自由落体运动中,小球只受到重力作用,重力做正功.设小球从点  $B$  运动到点  $C$  的过程中,重力所做的功为  $W_G$ ,则由动能定理,可得

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

上式表明,重力所做的功等于小球动能的增加量.

由重力做功与重力势能变化的关系,可知

$$W_G = mgh_1 - mgh_2$$

上式表明,重力所做的功等于小球重力势能的减少量.

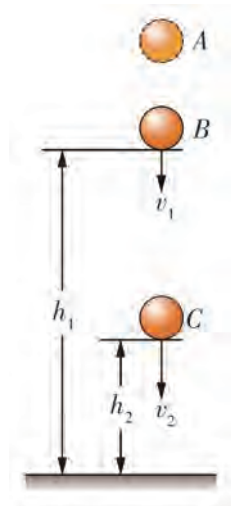


图4-5-4 小球自由下落

由以上两式, 可得

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_1 - mgh_2$$

可见, 在自由落体运动中, 重力做了多少功, 就有多少重力势能转化为等量的动能. 把上式移项后, 得到

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

即

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad (4.5.1)$$

式(4.5.1)表示, 小球在做自由落体运动的过程中, 任一时刻动能与重力势能之和都保持不变, 即它的机械能总量保持不变.

可以证明, 上述结论不仅适用于自由落体运动, 在只有重力做功的系统内, 不论物体做直线运动还是曲线运动, 上述结论都成立. 同样也可以证明, 如果只有弹力做功, 系统的机械能总量也保持不变.

**在只有重力或弹力做功的系统内, 动能和势能发生相互转化, 而系统的机械能总量保持不变. 这就是机械能守恒定律 (law of conservation of mechanical energy).**

机械能守恒定律是体现物理学中守恒观念的典型例子. 德国物理学家劳厄 (M. von Laue, 1879—1960) 说过: “物理学的任务是发现普遍的自然规律, 因为规律最简单的形式之一表现为某种物理量的不变性, 所以对于守恒量的寻求不仅是合理的, 而且也是极为重要的研究方向.” 从这一观念出发, 在探索新的物理规律时, 追寻守恒量是十分重要的研究方向, 物理学史上不少科学家正是在这一观念的指引下获得重大发现. 此外, 在解决具体物理问题时, 可以着重寻找整个过程中存在着的不变关系或不变的量, 以此作为研究这一变化过程的突破点. 例如, 在分析机械运动问题时, 如果发现只有重力或弹力做功, 我们就可以考虑机械能守恒, 从而找到解决问题的切入点.



### 讨论与交流

1. 如图4-5-5所示, 把一个悬挂的铁球贴着自己的鼻尖由静止释放, 当铁球摆回来时, 是否能碰到一动不动的自己? 为什么?

2. 有人认为, 当合外力对物体做功为零时, 机械能一定守恒. 这种观点正确吗? 请举例说明.

3. 还有其它方法可以推导机械能守恒定律吗? 请试一试.

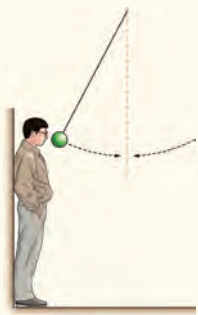


图4-5-5 摆球实验

**例题：**如图 4-5-6 所示，运动员投掷铅球时，把铅球从距离地面高度  $h = 1.8 \text{ m}$  的 A 处以  $v_0 = 12 \text{ m/s}$  的初速度投出去。

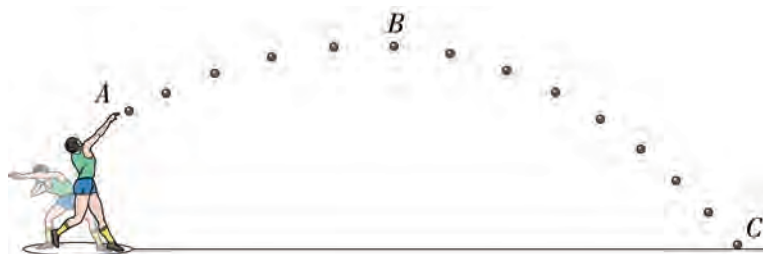


图 4-5-6 运动员投掷铅球

(1) 求铅球落到地面 C 处时速度  $v$  的大小. ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

(2) 如果投掷一架纸飞机，能否使用上述投掷铅球的物理模型分析？若不行，请说明理由。

**分析：**(1) 选择铅球为研究对象。铅球离手后，与重力相比，空气阻力可忽略不计，运动全过程可看作只有重力做功，可以运用机械能守恒定律求解。

(2) 纸飞机受到的重力较小，此时空气阻力不能忽略，因此除了重力做功，还要考虑空气阻力做功，机械能不守恒，但整个过程能量守恒。

**解：**(1) 以铅球为研究对象，从 A 处离手到落至地面，只有重力做功，机械能守恒。

以地面为参考平面。铅球在 A 处时，总的机械能为  $mgh + \frac{1}{2}mv_0^2$ ，而铅球落到地面 C 处时，总的机械能为  $\frac{1}{2}mv^2$ 。

$$\text{故有 } mgh + \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2.$$

所以铅球落地时速度

$$v = \sqrt{2gh + v_0^2} = \sqrt{2 \times 10 \times 1.8 + 12^2} \text{ m/s} = 13.4 \text{ m/s}.$$

(2) 纸飞机离手后到落地的过程中，空气阻力不能忽略，并且对纸飞机做负功，机械能不守恒，因此不能使用投掷铅球的物理模型分析。



### 实践与拓展

如图 4-5-7 所示，取一支按压式圆珠笔，将笔的按压式小帽朝下按在桌面上，放手后笔将会向上弹起一定的高度。请设计实验方案并动手实践，估算按压时圆珠笔内部弹簧的弹性势能增加了多少。



图 4-5-7 探究按压式圆珠笔内部弹簧弹性势能的变化

## 地铁线路节能设计——优化线路节能坡

地铁线路理想的纵断面是将车站设在纵断面的坡顶上，如图 4-5-8 所示。列车进站时上坡，将动能转化为势能，列车出站时下坡，再将势能转化为动能，这样有利于减少机械能的消耗，达到节能的目的。因此在进行地铁线路纵断面的设计时，应根据沿线地形、地质及施工方法等因素，尽量将地下或地面车站布置在纵断面的坡顶上，并设置合理的进出站坡度，以减少机械能消耗。

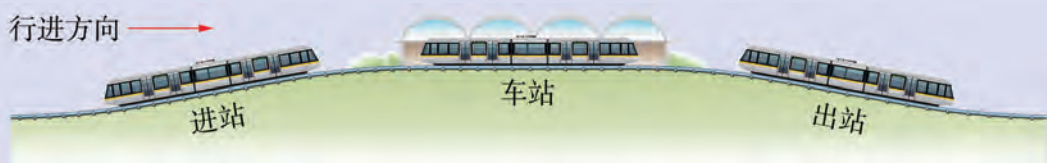


图 4-5-8 节能坡示意图

例如，广州地铁 3 号线北延段就加入了节能坡的设计。这是国内首条时速达到 120 km 的地铁，根据节能坡的原理和相关研究，节能坡的坡度（坡面的垂直高度  $h$  和水平距离  $l$  的比）维持在  $25\text{‰} \sim 30\text{‰}$ ，坡长根据最高运行速度设计为 250 ~ 350 m。



## 练习

1. 在忽略空气阻力的情况下，下列物体运动过程中是否满足机械能守恒定律的条件？为什么？

- (1) 电梯匀速下降。
- (2) 物体做竖直下抛运动。
- (3) 物体沿光滑斜面由顶端滑到底端。
- (4) 物体沿着斜面匀速下滑。
- (5) 子弹射穿木块。

2. 人造地球卫星沿椭圆形轨道运动，如图 4-5-9 所示。由开普勒行星运动定律可知，当卫星从近地点向远地点运动时，卫星的速度越来越小。试用机械能守恒定律解释这一现象。

3. 某同学的身高为 1.7 m，在学校运动会上参加跳高比赛，以背越式越过了高度为 1.6 m 的横杆。若不计阻力，估算他起跳时竖直方向上的速度大小。



图 4-5-9

## 第六节 验证机械能守恒定律



机械能守恒定律是物理学中的一条重要规律。本节我们将设计验证机械能守恒定律的实验方案，进行实验操作，观察、测量、记录和处理实验数据。

在实验时，可能会遇到许多预料不到的问题，如设计的实验方案理论上可行，但实验误差较大，或实验条件不具备，或有安全问题等，这时就需要修改和完善实验方案。经历这样的过程，我们不仅验证了物理规律，而且像科学家那样开展科学探究活动，体验发现、创造和分享的乐趣。

### 实验要求

1. 设计一种或几种能验证机械能守恒定律的实验方案。
2. 选择一种可行的实验方案，进行实际操作。
3. 撰写实验探究报告。实验探究报告的内容一般应包括实验日期、实验目的、实验器材与装置、实验原理与方法、实验过程与步骤、实验现象与数据、数据分析与处理、结论与问题讨论等。实验探究报告不宜格式化，应根据实际情况撰写。

### 实验设计指导

1. 在设计实验方案时，部分可选实验器材如表4-6-1所示，也可选用其他实验器材。

表4-6-1 部分可选实验器材

| 器材      | 器材       |
|---------|----------|
| 气垫导轨    | 电火花计时器   |
| 气源      | 纸带       |
| 数字式计时器  | 铁架台（带铁夹） |
| 光电门传感器  | 钩码       |
| 挡光片     | 夹子       |
| 滑块      | 细线       |
| 刻度尺     | 带孔小钢球    |
| 电磁打点计时器 |          |

2. 在设计实验方案时,应根据机械能守恒定律,明确实验需要测量的物理量,由此形成一个初步的实验设计方案.在动手做实验的过程中可能会发现一些问题,可将自己的方案和其他同学的方案进行比较和交流,然后再修改完善,最后形成一个可行的方案.

下面是一个实验设计参考方案.请充分利用实验器材,设计自己的实验方案并进行实际操作.

实验设计参考方案

- 1. 实验目的:利用重物的自由下落验证机械能守恒定律.
- 2. 实验器材:铁架台(带铁夹)、电磁打点计时器、刻度尺、重物、纸带、电源等.
- 3. 实验装置:如图 4-6-1 所示.
- 4. 实验原理:在只有重力做功的情况下,物体的动能和势能互相转化,但总的机械能保持不变.利用电磁打点计时器在纸带上记录物体从静止开始自由下落的高度  $h_i$ , 计算相应的瞬时速度  $v_i$ , 从而求出物体在自由下落过程中,重力势能的减少量  $\Delta E_p = mgh_i$  与动能的增加量  $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_i^2$ . 若  $\Delta E_k = \Delta E_p$  成

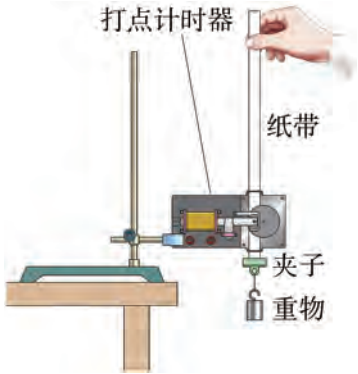


图 4-6-1 实验装置示意图

立, 即  $\frac{1}{2}mv_i^2 = mgh_i$  成立, 即可验证机械能守恒定律.

由上式看出, 只要测出下落的高度  $h_i$  和对应的瞬时速度  $v_i$ , 再利用当地的重力加速度  $g$  的值, 就能比较  $\frac{1}{2}mv_i^2$  和  $mgh_i$ . 由于只需验证  $\frac{1}{2}mv_i^2$  和  $mgh_i$  是否相等, 并不要求出  $\frac{1}{2}mv_i^2$  和  $mgh_i$  的值, 故实验不需测量重物的质量  $m$ .

- 5. 实验结果.
- (1) 在实验得到的纸带中, 选择一条点迹清晰且第一、第二点间距离接近 2 mm 的纸带, 如图 4-6-2 所示. 把静止下落的起始点记为 0, 与 0 点相隔一段距离以后的各点依次记为 1, 2, 3, ..., 用刻度尺测量对应的下落高度  $h_1, h_2, h_3, \dots$ , 记入表 4-6-2 中.

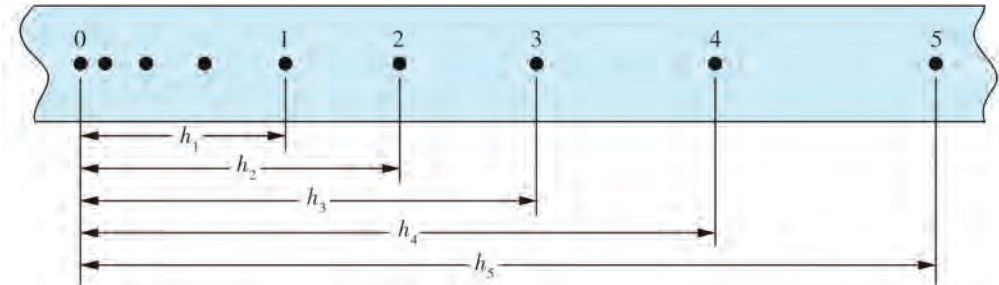


图 4-6-2 实验纸带数据处理示意图

- (2) 用公式  $v_i = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2T}$  计算各点的瞬时速度  $v_2, v_3, \dots$ , 并记录在表 4-6-2 中.

(3) 计算各点重力势能的减少量  $\Delta E_p = mgh_i$  和动能的增加量  $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_i^2$ . 将计算数据填入表 4-6-2 内, 并比较  $\Delta E_k$  与  $\Delta E_p$  的值.

表 4-6-2 实验数据记录表

| 取点编号                                       | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------------------|----|---|---|---|---|
| 各点到起始点的距离 $h_i/\text{m}$                   |    |   |   |   |   |
| 各点的瞬时速度 $v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | —— |   |   |   |   |
| 重力势能的减少量 $\Delta E_p/\text{J}$             |    |   |   |   |   |
| 动能的增加量 $\Delta E_k/\text{J}$               | —— |   |   |   |   |



### 讨论与交流

1. 上述实验设计参考方案中, 有哪些因素可能影响实验结果? 如何控制这些因素以减少实验误差?

2. 请设计其他实验方案并进行实际操作, 与其他同学交流分享实验方案和实验结果.



### 实践与拓展

利用数据采集器研究动能和重力势能转化所遵循的规律.

实验器材包括铁架台 (带铁夹)、圆柱形摆锤 (质量和半径已知)、数据采集器、光电门传感器、铅笔等. 实验装置如图 4-6-3 所示. 在铁架台上固定有带格子的圆弧形背板, 轻质杆可绕固定点  $O$  转动并固定在某一角度, 摆锤通过绳子悬挂于点  $O$ . 并可用磁铁吸附在轻质杆上. 光电门传感器固定在圆弧形背板上, 并与数据采集器相连, 可自动记录物体通过的时长.

若轻质杆的角度与光电门传感器的位置可以调节, 请设计实验方案, 探究摆锤动能与重力势能的转化规律, 并撰写研究报告.

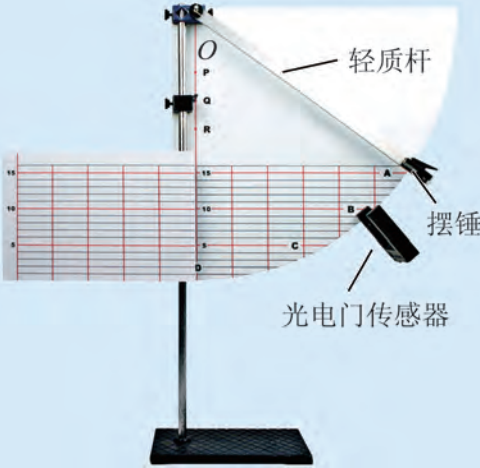


图 4-6-3 “探究摆锤动能与重力势能的转化规律”实验装置

## 第七节 | 生产和生活中的机械能守恒

生产和生活中的机械运动都离不开机械能，而从机械能转化与守恒的角度思考问题，一般只需考虑运动的初状态和末状态，可以简化对中间过程细节的分析。因此，应用能量观念也是解决实际问题的有效思路。

### 落锤打桩机

落锤打桩机是建筑物基础建设的常用工程机械。该设备利用桩锤自由落体积累的动能把管桩打入地层。高层建筑的地基如果处理不好，可能会因为地基沉降不均而危害建筑物的安全。因此，无论建筑设计者还是工程实施者，都对打桩特别重视。

落锤打桩机主要由桩锤、卷扬机和导向架组成，如图 4-7-1 所示。打桩时，桩锤由卷扬机用吊钩提升到设计高度，然后使桩锤沿导向架自由下落打击管桩。

下面通过与落锤打桩机相关的例题，体会能量观念在解决实际问题中的应用。



图 4-7-1 落锤打桩机

**例题 1：**某建筑工地准备利用落锤打桩机进行施工，该落锤打桩机的部分工作参数如表 4-7-1 所示，其中贯入度是指每受到 10 次锤击后管桩进入地层的深度。若不计空气阻力，重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，估算每一次桩锤下落时，桩锤给管桩的冲击动能是多少。

表 4-7-1 某落锤打桩机部分工作参数

| 桩锤质量 $m/\text{t}$ | 落距 $h/\text{m}$ | 贯入度 $d/\text{mm}$ |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| 8.0               | 2               | 50                |

**分析：**桩锤下落过程可视为自由落体运动，仅有重力做功，桩锤机械能守恒。桩锤击打管桩瞬间的动能可通过机械能守恒定律计算求解。

**解：**取桩锤为研究对象，桩锤自由下落过程符合机械能守恒定律。

贯入度为 50 mm，则平均每一击将管桩打入地层的深度约为 5 mm，与桩锤的落距 2 m 相比可忽略不计。

以桩顶端所在水平面为参考平面，根据机械能守恒定律，有

$$E_{p1} + 0 = 0 + E_{k2},$$

解得桩锤击打管桩瞬间的动能

$$E_{k2} = E_{p1} = mgh = 8000 \times 9.8 \times 2 \text{ J} = 1.6 \times 10^5 \text{ J}.$$

查阅相关资料，估算普通人手握铁锤敲击钉子的瞬间（如图 4-7-2 所示），铁锤动能为多少，通过对比体会落锤打桩机的实用性。



图 4-7-2 铁锤敲钉子

## 跳台滑雪

跳台滑雪是滑雪运动项目的一种。如图 4-7-3 所示，运动员跃入空中，使整个身体在空中飞行一小段时间后落在山坡上。为确保运动员的安全，同时使空中飞行的距离尽量远，需要综合考虑运动员速度、坡面倾斜度和跳台高度等要素。可通过建立物理模型做出初步的估算，从而制订运动策略。



图 4-7-3 跳台滑雪

**例题 2：**跳台滑雪筹备组考察某一雪道是否符合比赛要求。如图 4-7-4 所示是简化后的跳台滑雪雪道示意图。整条雪道由倾斜的助滑坡  $AB$  和着陆坡  $CD$ ，以及一段水平起跳平台  $BC$  组成，且  $AB$  与  $BC$  由一段平滑圆弧连接。

设质量为 60 kg 的运动员从助滑坡  $AB$  上由静止开始下滑，筹备组希望该运动员到达点  $C$  时能够以 25 m/s 左右的速度水平飞出，并希望腾空时间能够至少达到 3.5 s。设整个过程可忽略空气阻力影响，重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

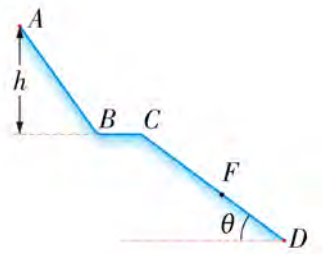


图 4-7-4 跳台滑雪雪道示意图

(1) 测得  $AB$  段的竖直高度  $h = 50 \text{ m}$ ，该高度是否符合筹备组的要求？（ $\sin 37^\circ = 0.6$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ ）

(2) 测得着陆坡  $CD$  与水平面的夹角  $\theta = 37^\circ$ ，该夹角是否符合筹备组的要求？

**分析：**（1）斜坡高度与重力势能有关。根据机械能守恒定律，运动员在斜坡顶端的重力势能与运动员从点  $C$  滑出的速度有关。可忽略摩擦力与空气阻力的作用，计算理想状况下，运动员从点  $C$  飞出的速度，并与筹备组的要求进行比较。

（2）运动员从点  $C$  滑出后，可视为做平抛运动。根据平抛运动的知识，计算腾空时间，并与筹备组的要求进行比较。

解：(1) 运动员在  $AB$  段下滑的过程中，若摩擦力和空气阻力忽略不计，全程只有重力做功，机械能守恒。以  $BC$  为参考平面，应用机械能守恒定律有

$$mgh_{AB} + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv_B^2.$$

$BC$  段距离很小，运动员的速度可近似看成不变，则有  $v_C = v_B$ 。

$$\text{解得 } v_C = v_B = \sqrt{2gh_{AB}} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 50} \text{ m/s} = 31.3 \text{ m/s}.$$

上述求得点  $C$  的速度略大于  $25 \text{ m/s}$ ，符合筹备组的要求。实际情况中，由于存在摩擦力，运动员下滑到达点  $C$  的速度会小于  $31.3 \text{ m/s}$ 。

(2) 假设运动员以  $v_0 = 25 \text{ m/s}$  的速度从点  $C$  水平飞出，落到着陆坡上的点  $F$ 。运动员从点  $C$  运动到点  $F$  的过程做的是平抛运动，假设该过程所用时间为  $t$ ，则运动员

在水平方向上做匀速直线运动，位移  $x = v_0 t$ ，

在竖直方向上做自由落体运动，下落高度  $h_{CF} = \frac{1}{2}gt^2$ ，

又由几何关系，可知  $\frac{h_{CF}}{x} = \tan\theta$ 。

综合上面三式，可求出

$$t = \frac{2v_0 \tan\theta}{g} = \frac{2 \times 25 \times \tan 37^\circ}{9.8} \text{ s} = 3.8 \text{ s}.$$

从上述结果可以得知，由  $CD$  段的倾斜程度估算出的腾空时间，满足筹备组提出的要求。



### 讨论与交流

1. 在例题 2 中，运动员落到着陆坡瞬间的动能为多少？有多少种计算方法？
2. 例题 2 中若实际测试发现，运动员从点  $A$  下滑到点  $C$  时水平飞出的速度仅为  $20 \text{ m/s}$ ，则下滑过程中克服阻力做了多少功？该过程还能否应用机械能守恒定律进行计算？

## 过山车

过山车是游乐场中常见的机动游乐设施，如图 4-7-5 所示。为了保障游客的安全，过山车必须具备完善的安全保障设施。其中，过山车的速度必须满足一定的条件，才能保证过山车沿轨道正常运行。下面以圆形回环过山车为例，分析过山车的速度条件。



图 4-7-5 过山车

**例题 3:** 如图 4-7-6 所示, 过山车轨道位于竖直平面内, 该轨道由一段倾斜轨道和与之相切的圆形轨道连接而成, 过山车从倾斜轨道上的点 A 由静止开始下滑. 圆形轨道半径为  $R$ , 可视为质点的过山车质量为  $m$ . 忽略阻力作用, 为保证过山车能够沿圆形轨道运行, 过山车的下滑起点 A 距离圆形轨道底部的高度  $h$  应满足什么条件?

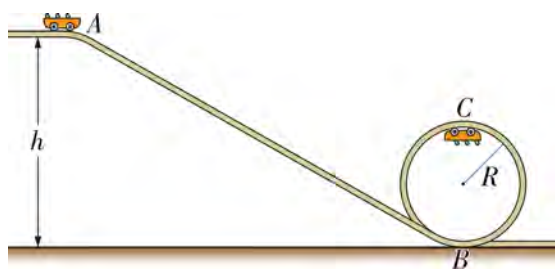


图 4-7-6 过山车模型

**分析:** 为保证过山车沿圆形轨道运行, 过山车通过最高点的速度应不小于恰能保持圆周运动的速度, 且过山车在整个运动过程中机械能守恒.

**解:** 由圆周运动的知识可知, 若过山车恰能通过圆形轨道最高点 C, 此时仅由重力提供过山车做圆周运动所需的向心力.

设过山车恰能安全通过圆形轨道最高点时的速度为  $v$ , 有

$$mg = \frac{mv^2}{R}.$$

取圆形轨道最低处所在水平面为参考平面, 对于过山车从点 A 运动到点 C 的过程, 应用机械能守恒定律, 有

$$mgh + 0 = mg \cdot 2R + \frac{1}{2}mv^2.$$

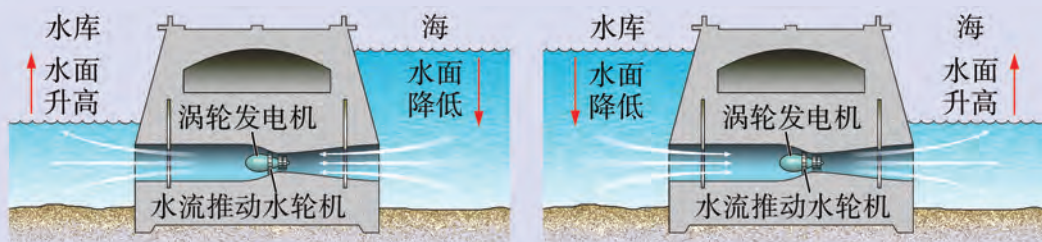
综合上述两式, 解得  $h = 2.5R$ .

因此, 为保证过山车沿圆形轨道运行, 下滑起点高度  $h$  应大于  $2.5R$ .

## 潮汐发电

由于月球、太阳的引力以及地球自转的影响, 海水和江水每天有两次涨落现象, 早上的称为潮, 晚上的称为汐. 潮汐作为一种自然现象, 为人类的航海、捕捞和晒盐等活动提供了方便.

潮汐发电是一种水力发电的形式, 其原理如图 4-7-7 所示. 在涨潮时将海水储存在水库内, 储存重力势能; 在退潮时放出海水, 利用高、低潮位之间



(a) 涨潮时

(b) 退潮时

图 4-7-7 潮汐发电原理

的落差，将海水的重力势能转化为动能，推动水轮机旋转，带动发电机发电。与河水不同的是，海水涨潮与退潮落差不大，但流量较大，并且呈间歇性。相比风能与太阳能这些受环境影响较大的能源，利用潮汐发电，工作时间可预知，能量规模庞大且稳定，能产生洁净无污染的高质量能源。

我国潮汐能资源丰富。据不完全统计，全国潮汐能蕴藏量为 1.9 亿千瓦，其中可供开发的约 3850 万千瓦。我国潮汐能发展起步较早，1957 年就在山东建成了第一座潮汐发电站。目前，我国潮汐电站总装机容量已有 1 万多千瓦，在我国优化电力结构、促进能源结构升级的大背景下，发展潮汐发电是顺应社会趋势之为。

## 练习

1. 荡秋千是一种常见的娱乐休闲活动。一小孩坐在秋千椅上荡秋千，已知秋千的绳长为 2 m，荡到最高点时，秋千绳与竖直方向成  $45^\circ$  角。

(1) 忽略空气阻力和摩擦力，求荡到最低点时秋千的速度。

(2) 从机械能的角度分析为什么荡秋千时双腿来回摆动能让秋千越荡越高。

2. 如图 4-7-8 所示，杂技演员左右手在同一水平高度，他用右手将质量为  $m$  的小球以速度  $v$  抛出，小球上升的最大高度为  $h$ ，不计空气阻力，重力加速度为  $g$ ，以双手所在水平面为参考平面，求：

(1) 小球在最高点时的重力势能。

(2) 小球刚落到左手时的动能。

3. 篮球比赛用球是有讲究的，其中一个标准是篮球充气后从 1.8 m 的高度下落至地面，反弹起来的高度不得高于 1.4 m，也不得低于 1.2 m。请分析篮球从下落到反弹至最高点的过程中，机械能是否守恒。如果不守恒，损失的机械能去哪里了？



图 4-7-8

## 本章小结

### 知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



### 回顾与评价

1. 结合实例分析并总结应用牛顿运动定律与应用能量的观念来解决物理问题有什么差别.
2. 生产和生活中有哪些例子可以分别利用机械能守恒定律和动能定理进行分析？它们的适用条件分别是什么？
3. 本章学习了几种验证机械能守恒定律的实验方案？这些实验方案各有什么优点和缺点？
4. 结合本章涉及的地铁节能设计、潮汐发电等内容，谈谈青年一代在未来国家建设中应当肩负起怎样的责任.

## 习题四

1. 下列关于功和机械能的说法中, 正确的是 ( ).
  - A. 合力对物体所做的功等于物体动能的改变量
  - B. 运动物体动能的减小量一定等于其重力势能的增大量
  - C. 在有阻力作用的情况下, 物体重力势能的减小量不等于重力对物体所做的功
  - D. 物体的重力势能是物体与地球之间的相互作用能, 其大小与参考平面的选取有关
2. 在下列实例中, 若空气阻力忽略不计, 机械能守恒的是 ( ).
  - A. 石块自由下落的过程
  - B. 电梯加速上升的过程
  - C. 抛出的铅球在空中运动的过程
  - D. 木箱沿粗糙斜面匀速下滑的过程
3. 如图 4-1 所示, 人站在自动扶梯上不动, 随扶梯匀速上升的过程中 ( ).
  - A. 人克服重力做功, 人的重力势能增加
  - B. 支持力对人做正功, 人的动能增加
  - C. 合外力对人不做功, 人的动能不变
  - D. 合外力对人不做功, 人的机械能不变
4. 蹦床是少年儿童喜欢的一种体育活动. 如图 4-2 所示, 蹦床的中心由弹性网面组成, 若少年儿童从最高点落下直至最低点的过程中, 空气阻力大小恒定, 则少年儿童 ( ).
  - A. 机械能一直减少
  - B. 刚接触网面时, 动能最大
  - C. 重力做功等于克服空气阻力做功
  - D. 重力势能的减小量等于弹性势能的增大量
5. 京沪高铁上一辆列车在某时间段内功率随时间变化的  $P-t$  图像如图 4-3 所示. 如果列车在行驶过程中受到的阻力大小恒定不变, 那么在这段时间内描述该列车的运动情况的图像可表示为 ( ).



图 4-1



图 4-2

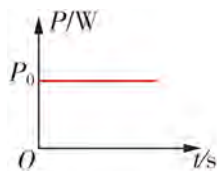
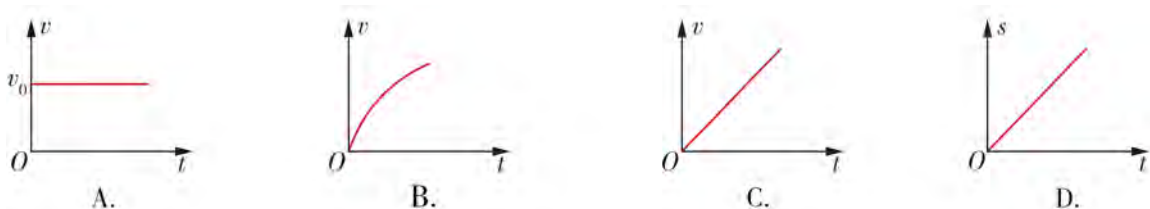


图 4-3



6. 安装在列车车厢之间的摩擦缓冲器的结构图如图 4-4 所示. 图中①和②为楔块, ③和④为垫板, 楔块与弹簧盒、垫板间均有摩擦. 在车厢相互靠近使弹簧压缩的过程中 ( ).

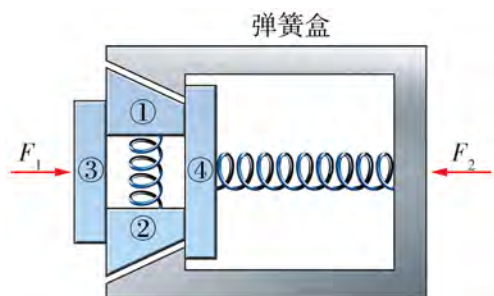


图 4-4

- A. 缓冲器的机械能守恒
- B. 摩擦力做功消耗机械能
- C. 垫板的动能转化为内能和弹性势能
- D. 弹簧的弹性势能全部转化为动能

7. 如图 4-5 所示, 某风力发电机的叶片长度为  $L$ , 已知空气的密度为  $\rho$ , 当地风速为  $v$ , 风的动能转化为电能的效率为  $\eta$ , 则该风力发电机的功率  $P =$  \_\_\_\_\_.



图 4-5

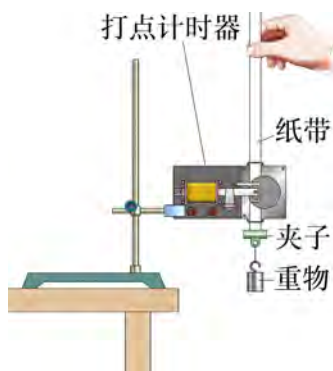


图 4-6

8. 某实验小组利用如图 4-6 所示的装置做“验证机械能守恒定律”实验.

(1) 为验证机械能是否守恒, 需要比较重物下落过程中任意两点间的 ( ).

- A. 动能变化量和势能变化量
- B. 速度变化量和势能变化量
- C. 速度变化量和高度变化量

(2) 除带夹子的重物、纸带、铁架台 (含铁夹)、电磁打点计时器、导线和开关外, 在下列器材中, 还必须使用的两种器材是 ( ).

- A. 交流电源
- B. 刻度尺
- C. 天平 (含砝码)

(3) 实验中, 先接通电源, 再释放重物, 得到如图 4-7 所示的一条纸带. 在纸带上选取三个连续打出的点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ , 测得它们到起始点  $O$  的距离分别为  $h_A$ 、 $h_B$ 、 $h_C$ .

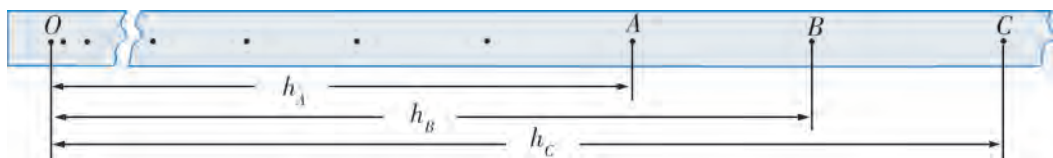


图 4-7

已知当地重力加速度为  $g$ ，电磁打点计时器打点的周期为  $T$ 。设重物的质量为  $m$ 。从打点  $O$  到打点  $B$  的过程中，重力势能变化量  $\Delta E_p = \underline{\hspace{2cm}}$ ，动能变化量  $\Delta E_k = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

(4) 如果实验结果显示重力势能的减少量大于动能的增加量，可能的原因是什么？

(5) 某同学采用以下方法研究机械能是否守恒：在纸带上选取多个计数点，测量它们到起始点  $O$  的距离  $h_n$ ，计算对应计数点的重物瞬时速度  $v_n$ ，描绘  $v^2 - h$  图像，并做如下判断：若图像是一条过原点的直线，则重物下落过程中机械能守恒。请分析论证该同学的判断依据是否正确。

9. 某同学通过实验探究功和动能变化的关系，装置如图 4-8 (a) 所示。

(1) 将橡皮筋拉伸至点  $O$ ，使小物块在橡皮筋的作用下从静止开始弹出，离开水平桌面后平抛落至水平地面上，落点记为  $P$ ，如图 4-8 (b) 所示。用刻度尺测量桌面到地面的高度为  $h$ ，抛出点到落地点的水平距离为  $L$ ，不计空气阻力，取重力加速度为  $g$ ，则小物块离开桌面边缘时的速度  $v$  为多大？

(2) 在钉子上分别套上  $n$  条同样的橡皮筋，重复步骤 (1)，小物块落点记为  $P_n$ ，若在实验误差允许范围内，小物块抛出点到落地点的水平距离  $L'$  应满足什么条件才可验证动能定理？

10. 如图 4-9 所示，把一个质量  $m = 0.2 \text{ kg}$  的小球从高度  $h = 7.2 \text{ m}$  处以与水平面成  $60^\circ$  角斜向上抛出，初速度  $v_0 = 5 \text{ m/s}$ ，不计空气阻力，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 小球在运动过程中机械能是否守恒？

(2) 求从抛出到落地过程中重力对小球所做的功  $W$ 。

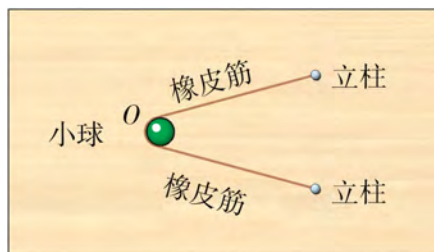
(3) 求小球落地时速度的大小  $v$ 。

11. 一辆列车总质量  $m = 500 \text{ t}$ ，发动机的额定功率  $P = 6 \times 10^5 \text{ W}$ 。列车在轨道上行驶时，轨道对列车的阻力  $f$  是车重的  $0.01$  倍，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

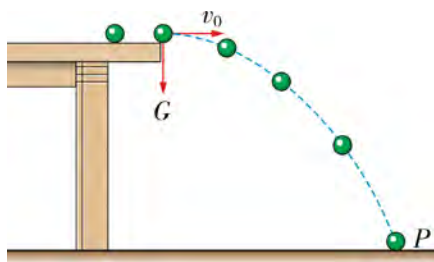
(1) 求列车在水平轨道上行驶的最大速度。

(2) 在水平轨道上，发动机以额定功率  $P$  工作，当行驶速度  $v = 10 \text{ m/s}$  时，求列车的瞬时加速度  $a$ 。

(3) 在水平轨道上以速度  $36 \text{ km/h}$  匀速行驶时，求发动机的实际功率  $P'$ 。



(a)



(b)

图 4-8

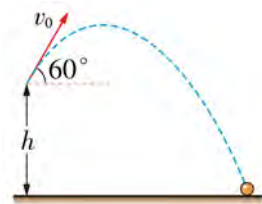


图 4-9

(4) 若火车从静止起动, 保持  $0.5 \text{ m/s}^2$  的加速度做匀加速运动, 求这一过程维持的最长时间.

12. “深坑打夯机”的工作示意图如图 4-10 所示. 首先, 电动机带动两个摩擦轮匀速转动, 将夯杆从深坑提起; 当夯杆的下端刚到达坑口时, 两个摩擦轮将夯杆松开; 夯杆在自身重力的作用下, 落回坑底; 这样周而复始地进行, 就可以达到将坑底夯实的目的. 已知两摩擦轮边缘的线速度  $v=4 \text{ m/s}$ , 对夯杆的压力均为  $F=2 \times 10^4 \text{ N}$ , 与夯杆的动摩擦因数  $\mu=0.3$ , 夯杆的质量  $m=1.0 \times 10^3 \text{ kg}$ , 坑深  $h=6.4 \text{ m}$ , 重力加速度  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , 不计夯实坑底引起的深度变化, 试计算:

- (1) 每个打夯周期中, 摩擦轮对夯杆做的功.
- (2) 每个打夯周期中, 摩擦轮与夯杆因摩擦产生的热量.

13. 如图 4-11 所示的漫画可见从高层往下抛弃杂物十分危险. 假设某人从九楼向外扔出一个苹果, 建构物理模型, 估算苹果落地时的动能, 分析高空抛物的危害性.

14. 冰壶比赛 (如图 4-12 所示) 是在水平冰面上进行的体育项目, 比赛场地示意图如图 4-13 所示. 比赛时, 运动员从起滑架处推着冰壶出发, 在投掷线  $AB$  处放手让冰壶以一定的速度滑出, 使冰壶最终的停止位置尽量靠近圆心  $O$ . 为使冰壶滑行得更远, 运动员可以用毛刷擦冰壶前方的冰面, 使冰壶与冰面间的动摩擦因数  $\mu$  减小.

请根据以上信息, 建构物理模型, 分析运动员应当如何操作, 才能够使冰壶沿虚线恰好到达圆心  $O$ .



图 4-12

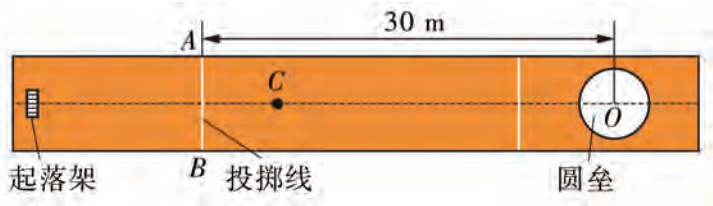


图 4-13

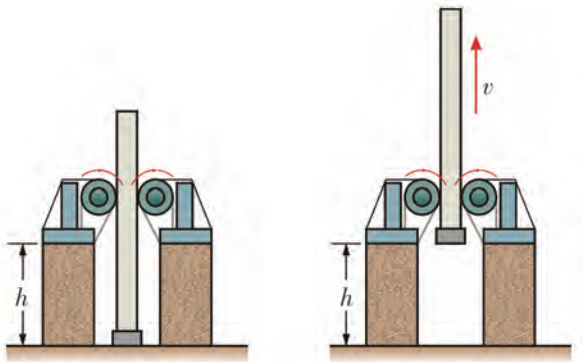


图 4-10



图 4-11

## 第五章

# 牛顿力学的局限性与相对论初步

时空观是重要的物理观念之一。牛顿提出的绝对时空观认为时间与空间是相互独立的，而且与物质及其分布没有关系；而爱因斯坦提出的相对论时空观极大地改变了人类对时间和空间常识性的观念。“同时性的相对性”“时空弯曲”等全新的认识，推动物理学发展到一个新的高度。

任何一种科学理论都是时代的产物，不可避免地存在着历史的局限性。牛顿在前人基础上创立的牛顿力学，是在日常宏观、低速的机械运动的情况下总结出来的，那么，这些规律是否能够解释高速运动和强引力场领域的客观现象？由此发现的牛顿力学的局限性，在爱因斯坦提出的相对论中又是如何解决的？

这一章我们将在领略牛顿力学取得的伟大成就的同时，认识牛顿力学的局限性，并初步了解相对论时空观以及人类对宇宙起源和演化的探索历程。



## 第一节 牛顿力学的成就与局限性

17 世纪，牛顿在伽利略、笛卡儿、开普勒、惠更斯等人研究成果的基础上，把天体运动规律和地面上的实验研究成果加以综合，通过归纳与演绎、综合与分析的方法，总结出一套普遍适用的力学运动规律——牛顿运动定律和万有引力定律，建立了完整的牛顿力学体系，并提出了与之相对应的绝对时空观。

### 绝对时空观

通过前面的学习，我们知道，要描述一个物体的运动，必须选择一个参考系，然后研究这一物体相对于参考系是如何运动的。



### 讨论与交流

如图 5-1-1 所示，在匀速直线前进的车厢顶部，有一个白色小球和一个黑色小球同时开始自由落下。甲同学相对于车厢保持静止，而乙同学相对于地面保持静止，则：

- (1) 白球相对于甲同学做什么运动？
- (2) 白球相对于乙同学做什么运动？
- (3) 白球相对于黑球做什么运动？

在上述三种参考系中，白球的运动都能够应用牛顿运动定律来描述吗？



图 5-1-1 运动的相对性

对于相对地面做匀速直线运动的甲同学和静止的乙同学，白球分别做的是自由落体运动和平抛运动，都能够用牛顿运动定律进行描述；而对于黑球而言，同样做自由落体运动的白球虽然受到重力作用，却处于静止状态，并不能用牛顿运动定律来描述。

在牛顿力学体系中，如果牛顿运动定律在某个参考系中成立，这个参考系就被称为惯性参考系 (inertial frame)，所有相对于惯性参考系静止或做匀速直线运动的参考系都是惯性参考系。

性参考系. 而牛顿运动定律不成立的参考系则称为**非惯性参考系** (non-inertial frame).

在所有的惯性参考系中, 力学规律都具有相同的形式, 这一结论被称为**伽利略相对性原理** (Galilean principle of relativity). 例如, 在图 5 - 1 - 1 中, 不管是甲同学还是乙同学所在的惯性参考系中, 计算小球下落时间的公式和结论都是相同的. 确定或找到一个使牛顿运动定律成立的惯性参考系, 成为牛顿力学体系自洽完备的关键. 于是, 牛顿引入了与任何事物都不相关的绝对空间和绝对时间.

牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中写道: “绝对的、真实的和数学的时间, 由其特性决定自身均匀地流逝着, 而与一切外界事物无关. 绝对空间的自身特性与任何外界事物无关, 它处处均匀, 永不移动.” 这就是牛顿的绝对时空观.



图 5 - 1 - 2 生活经验认为时间与空间是彼此独立的

按照这种观点, 时间和空间彼此独立、互不关联, 且不受物质或运动的影响. 这种时空观是对低速状态下的经验总结, 与人们在日常生活中对时间和空间的感受是相符的. 例如, 不管我们是在阅读、运动、听课还是在休息, 时间都在默默流逝, 并不会因我们日常的行为而改变它流逝的快慢. 我国唐代诗人李白的名句“夫天地者, 万物之逆旅也; 光阴者, 百代之过客也”, 可以说是对绝对空间和绝对时间的形象比喻.

## 牛顿力学的成就

牛顿力学把宇宙中的天体和地面上的物体的运动统一起来, 从力学上证明了自然界多样性的统一, 实现了人类对自然界认识的第一次理论大综合.

牛顿力学的建立首次告诉人们, 一个以现象观察和实验研究为基础的自然科学理论体系, 其思想观点应是明确透彻的, 其体系结构应是严密完备、自洽和谐的, 其数学表达应是严格、定量、可以操作的. 这种理论不仅能够一定范围内揭示事物的本质和规律, 作出定量的解释、推断和预言, 而且理论本身的是非真伪、成立条件、适用范围等也都可以定量地检验和界定. 这是一切自然科学理论应有的基本特征, 牛顿伟大贡献的精髓正在于此.

实践证明，从地面上的各种物体的运动到天体的运动，从大气的流动到地壳的变动，从自行车到汽车、火车、船舶（如图 5-1-3 所示）、飞机等交通工具的运动，从击打乒乓球（如图 5-1-4 所示）到发射导弹、人造卫星和宇宙飞船——所有这些都遵循牛顿力学的规律。因此，牛顿力学在科学技术发展和社会经济建设中一直起着重要的作用，推动着航空、航天、舰船、车辆、机械、土木、水利和能源等各行各业不断进步，促进着社会不断发展。



图 5-1-3 2017 年我国首艘国产航空母舰下水



图 5-1-4 运动员击打乒乓球

## 牛顿力学的局限性和适用范围

由于牛顿力学在理论和实践中的巨大成功，在 18 世纪出现了试图把力学规律和它对自然现象的描述方法推广到一切自然研究活动中去的机械自然观。这种观念，对近代自然科学的发展产生了深刻而广泛的影响，大多数物理学家都把牛顿力学看作其他自然科学的基础。其实，牛顿力学只是人类长期对自然运动规律探索的一个发展阶段，和其他理论一样，有其自身的局限性和适用范围。

首先，牛顿力学的应用受到物体运动速度大小的限制。研究表明，对于运动速度为  $10^4$  m/s 数量级的人造卫星，用牛顿力学研究它们的运动规律，所得结果与实际情况基本一致。当物体运动速度达到  $3 \times 10^7$  m/s 时，牛顿力学的计算结果与实验结果之间大概相差 1%；若物体运动速度达到  $2.9 \times 10^8$  m/s 时，牛顿力学的计算结果与实验结果的偏差可以达到 15 倍。因此，当物体运动的速率接近于真空中的光速时（如图 5-1-5 所示），牛顿力学就不再适用了。

其次，牛顿运动定律不适用于微观领域物质结构和能量不连续的现象。19 世纪和 20 世纪之交，X 射线、电子和天然放射性的发现，使物理学的研究由宏观领域进入微观领域。特别是 20 世纪初量子力学的建立，使人类对自然界有了新的认识。例如，量子力学的研究表明，微观粒子既表现为粒子性又表现为波动性，粒子的能量等物理量只能取分立的数值，粒子的速度和位置具有不确

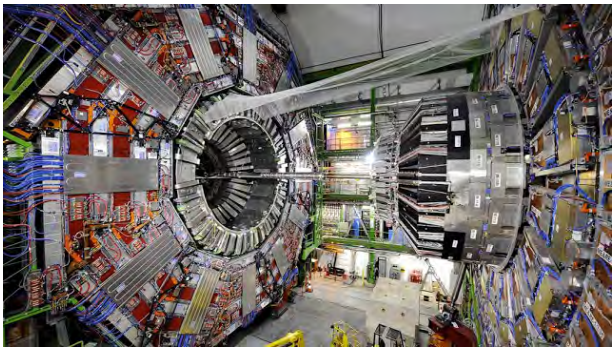


图 5-1-5 世界上最大的粒子加速器——大型强子对撞机（LHC），能使粒子速度接近光速

定性，粒子的状态只能用粒子在空间出现的概率来描述等（如图 5-1-6 所示）。微观领域的运动规律在很多情况下已无法用牛顿力学来描述。

再者，牛顿运动定律和万有引力定律对于受到强引力作用的物体的运动也不适用。

因此，牛顿力学只适用于低速（远小于光速）、宏观（人类可感知尺度）、弱引力场（如地球附近）和计量精度要求不高（如全球定位系统需要用相对论进行修正）的情况。超出以上范围，牛顿力学将不再适用，而需要用到相对论、量子力学等理论。现代物理学的发展，并没有使牛顿力学失去存在的价值，牛顿力学仍将在它的适用范围内大放光彩，而人类对自然界的探索正是这样不断地向前发展。



图 5-1-6 2017 年世界首台光量子计算机在中国诞生

### 实践与拓展

1. 查阅文献资料，比较亚里士多德、伽利略、牛顿所采用的科学研究方法的特点和区别，以及对科学发展的意义。
2. 结合牛顿力学的成就和局限性，就自己感兴趣的内容写一篇小论文。

### 练习

1. 请观察日常生活中的各种现象，列举牛顿力学的具体应用并进行解释。
2. 根据牛顿运动定律，凭借初始条件就可以确定物体过去和未来任一时刻的运动状态，牛顿由此提出了机械决定论。他认为一切自然现象都只能按照机械的必然性发生和进行。牛顿的这个观点对之后两百多年自然科学的发展产生了深刻的影响。应如何看待牛顿的这一观点？

## 第二节

## 相对论时空观



根据爱因斯坦（A. Einstein，1879—1955）的回忆，他从16岁起就开始思考一个问题：如果一个人以光速跟着光跑，将会看到什么？延续这个“追光”思想实验的思考，10年后爱因斯坦创立了狭义相对论，建立了物理学新的时空观。

### 狭义相对论的基本假设

19世纪后半叶，当人们运用牛顿力学解释光的传播等问题时，发现了一系列尖锐的矛盾。当时，光速的精确测定为光速的不变性提供了实验依据。与此同时，电磁理论也为光速的不变性提供了理论依据。然而，上述光速不变的结论却与牛顿力学的解释相抵触。

如图5-2-2所示，假设一节车厢以速度 $v$ 匀速前进，车厢后部有一个光源。根据牛顿力学中速度的合成的观点，对于站台上静止的观测者来说，她观测到的光的传播速度应为 $c+v$ 。但是观测和实验事实表明：无论光源和观测者如何运动，光速只能为 $c$ 。

为了解决上述矛盾，爱因斯坦在借鉴前人研究成果的基础上，以其独特的思考方式，于1905年提出了狭义相对论。狭义相对论以两个基本假设为前提：

**相对性原理**（relativity principle）：在所有的惯性参考系中，一切物理规律都是相同的。

**光速不变原理**（principle of constancy of light velocity）：在所有的惯性参考系中，测得的真空中的光速都相同。



图5-2-1 爱因斯坦

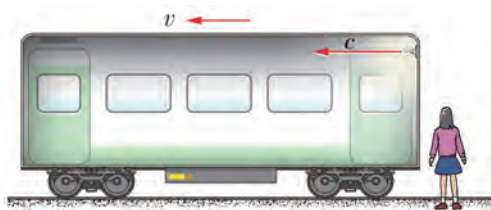


图5-2-2 常识经验与实验事实之间的矛盾

## 时空相对性

从狭义相对论的两个基本假设出发，爱因斯坦推导出不同于牛顿力学的结论。

### 同时性的相对性

在一个惯性参考系中同时发生的两个事件，在另一个惯性参考系看来是不同时的，这被称为**同时性的相对性** (relativity of simultaneity)。

下面通过一个思想实验来讨论同时性的相对性。如图 5-2-3 所示，一节做匀速直线运动的火车车厢中间顶部  $O$  处挂着一盏灯，前后门都有自动装置，使车门一接收到光信号便自动打开。车厢中部站着甲同学，站台上站着乙同学。



图 5-2-3 “同时性的相对性”思想实验

### 讨论与交流

根据狭义相对论的两个基本假设，当火车匀速前进时，电灯一亮，由车厢里的甲同学所在的惯性参考系观测，前后门是否同时打开？由站台上的乙同学所在的惯性参考系观测，前后门是否同时打开？

在车厢里的甲同学观测到前后两门同时打开。因为在车厢这个惯性参考系中，光向前、向后传播的速度都是  $c$ ，光源又在车厢的中央，所以光信号同时到达前后两个门。

站台上的乙同学则观测到后门先打开。因为她所在的站台也是一个惯性参考系，光信号相对地面向前、向后传播的速度都是  $c$ 。但发出的光信号在传递到前后门的过程中，前门和后门都前行了一段距离，导致光信号传递到前门的距离大于传递到后门的距离（如图 5-2-4 所示）。而光速不变，因此乙同学观测到光信号先抵达后门，再抵达前门。



图 5-2-4 甲同学与乙同学观测到的现象不同

可见，对车厢惯性参考系来说同时发生的事件，对站台惯性参考系来说却是不同时的。两个事件是否同时发生，与参考系的选择有关。这就是同时性的相对性。

### 时间延缓

牛顿力学认为，两个事件在不同的惯性参考系中观测，它们之间的时间间隔总是相同的。但是，从狭义相对论的两个基本假设出发，我们会发现，两个事件之间的时间间隔在不同的惯性参考系内观测有可能是不同的。

例如，一节做匀速直线运动的车厢，地板上  $A$  处有一盏灯，在灯的正上方车厢顶  $B$  处有一面镜子， $AB$  间高为  $h$ 。现在我们要完成一个光学思想实验：打开灯的开关，光信号从  $A$  处到  $B$  处，再由镜面反射回到  $A$  处。车厢里站着甲同学，站台上站着乙同学。

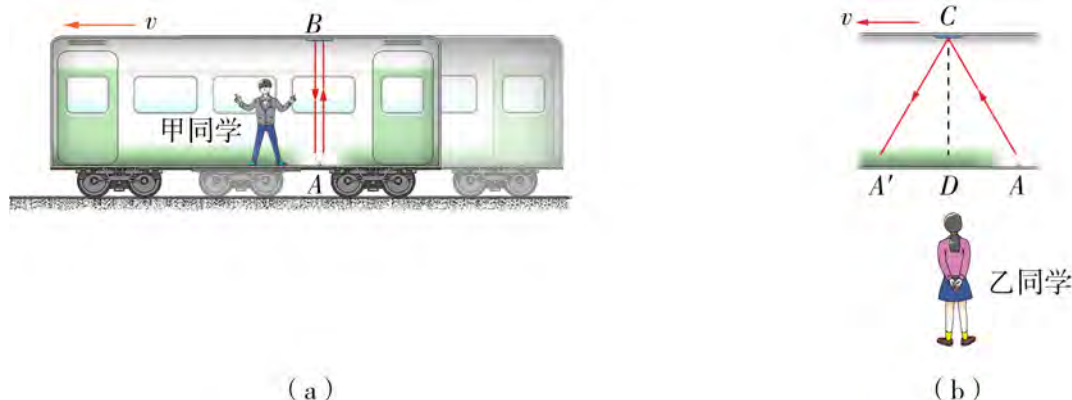


图 5-2-5 “时间延缓”思想实验

在车厢里的甲同学观测到，光信号走过的距离是  $2h$  [如图 5-2-5 (a) 所示]，因此光信号往返时间

$$\Delta t' = \frac{2h}{c}$$

而在站台上的乙同学观测到，光信号在从灯传递到镜子的过程中，火车向前移动了一段距离，镜子已跟随车厢移动到  $C$  处，灯也从  $A$  处移动到  $D$  处。光信号在从镜子反射到灯的过程中，灯已从  $D$  处移动到  $A'$  处，因此乙同学观测到光信号走过的距离为路径  $ACA'$  的长度 [如图 5-2-5 (b) 所示]。设火车的速度为  $v$ ，乙同学测得的光信号往返时间为  $\Delta t$ 。根据光速不变原理， $\overline{AC} + \overline{CA'} = c\Delta t$ ，应用勾股定理可得

$$\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 - h^2$$

这里用到了狭义相对论的第二个基本假设，即对站台惯性参考系来说光速大小都是  $c$ 。以上两式消去  $h$ ，可得

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

因为  $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$ ，所以总有  $\Delta t > \Delta t'$ 。

这是一个令人吃惊的结论：站台上的乙同学和车厢里的甲同学对光信号往返时间的测量结果并不一样，地面上的人测得的时间  $\Delta t$  要比车厢里的人测得的时间  $\Delta t'$  长些。

严格的数学推导表明，上式具有普遍意义。它表明，在站台上将观测到火车上的时间进程变慢了，车上的一切物理过程、化学过程和生命过程都变慢了。而在运动参考系里的人认为一切正常，并不感到自己周围的事件变得呆滞。这就是时间间隔的相对性，也称为“时间延缓” (time dilation)、“时间膨胀”或“钟慢效应”。

### 长度收缩

我们继续设计一个思想实验来测量一个火车站站台的长度。我们没有尺，但有一个钟。

如图 5-2-6 所示，假想有一个火车头即将匀速通过站台，已知它的速度为  $v$ 。



图 5-2-6 “长度收缩”思想实验

我们可以这样测量：设站台的两端分别是点  $A$  和点  $B$ 。记录火车头进站到达点  $A$  的时刻  $t_1$ ，然后再记录火车头出站到达点  $B$  的时刻  $t_2$ ，则火车头通过整个站台所用的时间  $\Delta t = t_2 - t_1$ ，根据  $s = v\Delta t$ ，就可以算出站台  $AB$  的长度。

假定有两名观测者：甲同学坐在火车头中，乙同学站在站台上，他们各有一个钟，分别用来测量站台  $AB$  的长度。

我们知道，由于时间延缓效应，甲同学测得的时间  $\Delta t'$ ，比乙同学测得的时间  $\Delta t$  要短，所以甲同学测出相对火车头运动的站台长度  $l' = v\Delta t'$ ，比乙同学测出相对地面静止的站台长度  $l = v\Delta t$  要短。

通过严格的数学推导可以得到， $l'$  和  $l$  有如下关系

$$l' = l \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

由于  $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$ ，所以总有  $l' < l$ 。

严格的数学推导表明，上式具有普遍意义。它表明，当物体相对于观测者运动时，在运动的方向上，观测者测量到该物体的长度要缩短，而垂直于运动方向的长度不会发生变化。这就是空间距离的相对性，也称为“长度收缩”（length contraction）或“尺缩效应”。

 **讨论与交流**

为什么在日常生活中我们从未感受到时间延缓效应和长度收缩效应？

爱因斯坦的相对论时空观是时空观发展史上的一次大变革。牛顿力学认为时间和空间是脱离物质而存在的，时间和空间之间也是没有联系的。相对论则认为有物质才有时间和空间，时间和空间与物质的运动状态有关，因而时间与空间并不是相互独立的，这在时间延缓效应和长度收缩效应中已体现出来。

我们生活在低速运动（相对于光速而言）的世界里，自然而然地接受了牛顿的绝对时空观，过去谁都未曾考虑过时间和空间的性质，只有当新的实验结论与传统观念不一致时，人们才回过头来认真思考过去对时间和空间的认识并进行修正。人类对于自然界的认识就是这样一步一步地不断前进的。

## 时空弯曲

在狭义相对论中，所有的惯性参考系都是等效的。那么，对于非惯性参考系（如加速运动的参考系）是否也是等效的呢？1907年，爱因斯坦把研究方向转向更为复杂的加速运动的相对性，并于1915年提出了广义相对论。

根据广义相对论，物体的引力场会使光线弯曲，引力场越强，光线弯曲越厉害。下面以太阳的引力场为例。如图5-2-7所示，由于太阳引力场的作用，远处一颗恒星发出的光经过太阳附近时，会由于太阳的引力而发生偏转。这样，在地球上看到这颗恒星时，看到的位置与实际位置不符，它似乎来自另外一个方向。

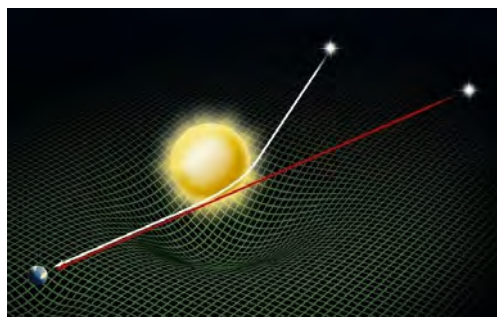


图5-2-7 太阳附近的光线偏转示意图

由于物体的引力场通常比较弱，太阳是离我们最近而又能产生较强引力场的大天体，再加上平常明亮的天空使我们无法观星，所以观测星光偏转现象的最好时机是发生日全食的时候。1919年5月29日发生日全食的当天，英国两支考察队分别在几内亚湾和巴西进行观测。在日食过程中，考察队用天体照像仪拍下太阳附近的星光照片，用加权平均的方法计算星光的偏转角，证实了爱因斯坦的预言是正确的。

现在，通过射电望远镜可以直接观测宇宙中的射电信号在太阳引力场中的偏折，而不必等待日全食这种稀有的机会，高精度的测量结果进一步证实了广义相对论的结论。

根据广义相对论，当恒星发出的光在引力场（大质量天体和黑洞）附近经过时，光线会像通过透镜一样发生弯曲，如图5-2-8所示。此类引力透镜现象也普遍被天文学家观测到。当远处天体与观测者的连线和天体“透镜”与观测者的连线之间的偏角很小时，观测者会观测到一个环绕天体“透镜”的光环，称为爱因斯坦环，如图5-2-9所示。

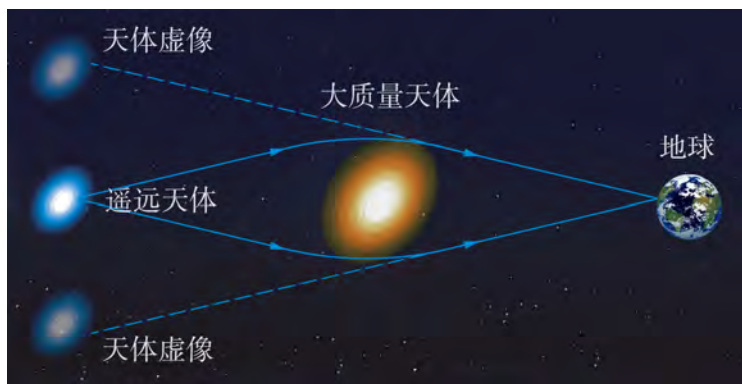


图5-2-8 引力透镜原理示意图



图5-2-9 引力透镜现象——  
爱因斯坦环

在大尺度的宇宙时空中存在许多大质量天体，如大恒星、球状星团、星系和星系团等，光线经过这些大质量天体附近时发生偏转，这说明整个空间不再是平直的，而变成弯

曲的了。此外，广义相对论还告诉我们，引力场的存在使得空间不同位置的时间进程也存在差别，也可以说时间发生了弯曲。例如在大质量天体的强引力场附近，时间进程会变慢，就像思想实验中在高速运动的火车上的时间进程变慢了一样。

另一方面，在万有引力起主导作用的宇观世界中，弯曲时空也反过来决定物质的运动。这好比在山峦起伏的丘陵中，泉水总是从山间的间隙流下，汇集成小河、大江，向低洼地区奔流，然后注入大海。总而言之，物质决定时空的弯曲，时空决定物质的运动。

狭义相对论和广义相对论建立以来，经受住了历史和实践的考验。广义相对论所揭示的物质与时空的关系，比起狭义相对论更为深刻。同时，广义相对论对于研究天体和宇宙的结构及演化也有着重要的意义，是现代宇宙学理论的基础。



### 实践与拓展

请阅读有关相对论的科普读物，如《时间简史》（霍金著）、《物理学的进化》（爱因斯坦等著）等，与同学们一起分享自己的读书心得。

## 引 力 波

### 资料活页

爱因斯坦提出广义相对论后不久，便预言在引力场中的物质发生剧烈变动时，会使引力场形成涟漪，产生以光速传播出去的引力波。理论研究表明，产生引力波的机制很弱，只有发生非常激烈的物质变动，例如超新星爆发、两超巨星互相绕转甚至碰撞合并等情况，才会产生可观的引力波。另外引力波的穿透力极强，很难探测。直到20世纪60年代，才有美国马里兰大学的韦伯教授（J. Weber, 1919—2000）认真研究和探测。我国最早研究探测引力波的机构是20世纪70年代中国科学院物理所和中山大学物理系引力物理研究室。

20世纪90年代，美国投入数亿美元建立世界上最大的“激光干涉引力波天文台”（LIGO）。经过不断改进完善，LIGO终于在2015年9月14日探测到宇宙中距离我们13亿光年的两个黑洞合并而产生的引力波，如图5-2-10所示。为此，韦斯（R. Weiss, 1932—）、巴里什（B. Barish, 1936—）和索恩（K. Thorne, 1940—）获得2017年诺贝尔物理学奖。

更令人惊喜的是，LIGO团队与国际其他探测团队合作，于2017年8月17日直接观测到引力波及其伴随的电磁信号。这是人类历史上第一次使用激光干涉引力波天文台和其他天文探测器观测到同一天体物理学事件，打开了期待已久的多信使天文学的窗口。

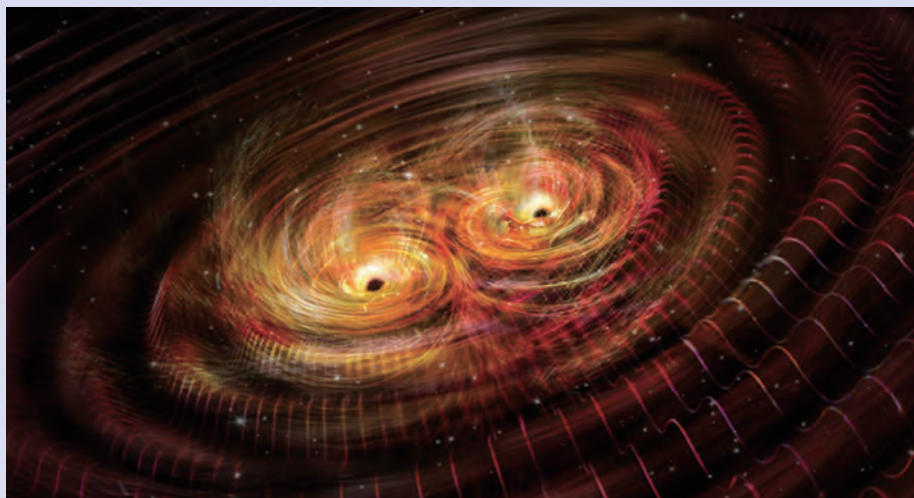


图 5-2-10 黑洞合并产生引力波（示意图）

在这次事件中，LIGO 观测到引力波信号不到 2 秒后，美国费米空间望远镜观测到一个  $\gamma$  爆信号，同时，全世界许多天文台包括我国的天文台和“天眼”等也都观测到同一空间区域不断发来的各个电磁波波段的信号。经综合分析，天文学家们认为这是由距离地球约 1.3 亿光年处的双中子星相互绕转、最后合并而产生的引力波和多波段电磁波辐射，以及原子序数比铁大的元素（如金、银、钨、铀等）的光谱线。

从科学史的角度来看，捕捉到引力波存在的直接证据，就是补上了爱因斯坦坦广义相对论实验验证的最后一块拼图。广义相对论的其他几项预言，如可见光和电磁波在引力场中的偏转、水星近日点进动、引力红移效应等此前都被实验观测证实。

就科学意义而言，证实引力波的存在，将彻底改变人类对宇宙的认知。人类将能够由此研究宇宙大爆炸事件的后续影响，还能够更精确地观测宇宙中遥远的角落。源自大爆炸的引力波，还能帮助科学家更好地理解宇宙的构成。此外引力波还为人类探索宇宙提供了全新的观察方法，相信未来将会有更多新的发现。



## 练习

1. 狭义相对论的两个前提为什么叫作假设？两个基本假设又是如何经过实践检验的？
2. 试分析伽利略相对性原理与狭义相对论中相对性原理的区别和联系。

### 第三节

## 宇宙起源和演化



人类自古以来就对斗转星移充满着敬畏和遐想。“往古来今谓之宙，四方上下谓之宇”是我国古人对宇宙的认识。在漫长的科学发展历程中，人类从未停止过对宇宙奥秘的思考和探索。经过一代代科学家的理论研究和科学观测，人类才对宇宙的起源和演化有了基本的认识，一幅不断延伸的宇宙学发展图卷逐渐展现在我们面前。

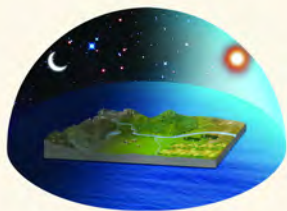
### 古代宇宙模型

在古代，人类结合自身对天文现象的观察和经验认识，建立了各式各样的模型来描述宇宙的时空结构和天体运动规律。

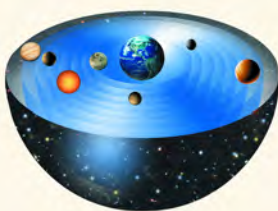


#### 讨论与交流

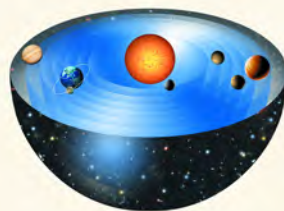
如图 5-3-1 所示是古代较有代表性的宇宙模型示意图。



(a) “盖天说”



(b) “地心说”



(c) “日心说”

图 5-3-1 古代较有代表性的宇宙模型示意图

请思考并讨论下列问题：

- (1) 上述三种宇宙模型各有什么特点，其局限性是什么？
- (2) 从上述三种宇宙模型可以看到，随着科学的发展，宇宙模型也在不断发展变化。我们从中可以获得什么启示？

在古代中国，“盖天说”认为“天圆如张盖，地方如棋局”。古希腊亚里士多德认识到地球是一个球体，其理论经托勒密等学者的进一步发展形成了“地心说”，成为中世纪在

欧洲占统治地位的宇宙观。1543 年哥白尼提出“日心说”，把宇宙的中心从地球挪向了太阳，这是人类宇宙观念的一大飞跃。此后，人类的视野逐渐从太阳系扩展到银河系，对宇宙的认识也随之拓展。

应当看到，虽然古代宇宙模型都带有时代的局限性，但这些模型在当时基本符合人们对宇宙中各类自然现象的观察结果，并且对人类的生产和生活实践起到了一定的指导作用。

## 近现代宇宙模型

进入 20 世纪，由于物理基础理论的进一步发展以及天文观测仪器制造水平的提高，宇宙学开始迅速发展。1917 年，爱因斯坦将广义相对论应用到整个宇宙，建立了现代宇宙学的第一个宇宙模型：由弯曲空间构成，没有边界、没有中心，但在整体上是有限的、静态的宇宙，如图 5-3-2 所示。

1922 年，苏联科学家费里德曼（A. Friedmann，1888—1925）提出了动态的宇宙模型，认为宇宙中的物质从宇观大尺度来说其分布是均匀的，从各个方向看都是一样的，并且随着时间的变化，宇宙在不断膨胀。1929 年，美国天文学家哈勃（E. Hubble，1889—1953）通过观测发现遥远的星系在彼此远离，说明宇宙正在膨胀，这为动态宇宙模型的观点提供了有力的证据。

第二次世界大战以后，宇宙膨胀的观点引出了两种对立的理论：其中一种理论是由英国天文学家邦迪（H. Bondi，1919—2005）、戈尔德（T. Gold，1920—2004）和霍伊尔（F. Hoyle，1915—2001）等人提出的稳恒态宇宙模型。稳恒态宇宙模型假设，随着宇宙膨胀，新的物质会不断产生，使宇宙总密度不变，从而令宇宙在任何时候看上去都基本不变化。另一种理论是由比利时科学家勒梅特（G. Lemaitre，1894—1966）提出、美籍苏联科学家伽莫夫（G. Gamow，1904—1968）完善的大爆炸理论。随后的一系列观测证据使宇宙学发展的天平逐渐向大爆炸理论倾斜。1964 年，美国无线电工程师彭齐亚斯（A. Penzias，1933— ）和威尔逊（R. Wilson，1936— ）在使用微波接收器进行测量时，意外地发现了宇宙微波背景辐射，如图 5-3-3 所示。这一发现及其确认使绝大多数科学家认为，大爆炸理论是目前描述宇宙起源和演化最好的理论。

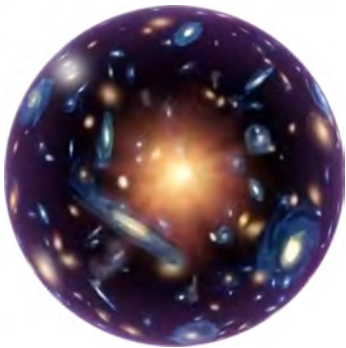


图 5-3-2 有限无界宇宙模型示意图

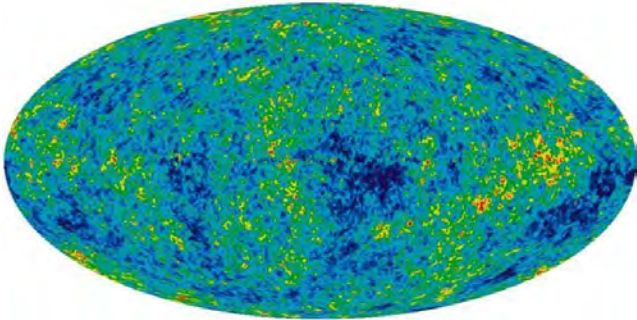


图 5-3-3 宇宙微波背景的影像

大爆炸理论认为，宇宙起源于约 138 亿年前一个体积无限小、密度无限大、温度无限高、时空曲率无限大的奇点。如图 5-3-4 所示，宇宙“爆炸”之后不断膨胀，导致温度和密度迅速下降。随着温度降低，逐步形成电子、质子、中子、原子核、原子和分子，并复合成为气体。气体逐渐凝聚成星云，星云进一步形成各种各样的恒星和星系，最终形成我们如今所看到的宇宙。一般认为，我们所居住的太阳系大约形成于 46 亿年前。

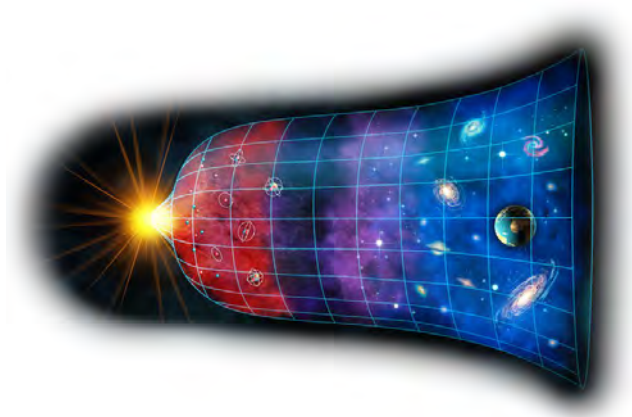


图 5-3-4 宇宙大爆炸示意图

1980 年，美国科学家固斯（A. Guth，1947— ）进一步提出暴胀理论，并指出早期宇宙的空间以指数倍的形式膨胀，暴胀过程发生在宇宙大爆炸之后的  $10^{-36}\text{s}$  至  $10^{-32}\text{s}$  之间。在暴胀结束后，宇宙继续膨胀，但是膨胀速度则慢得多。

关于宇宙的起源和演化过程，由于缺乏足够的观测证据，至今仍有很多疑难问题，有待我们去探索。

 讨论与交流

结合近现代宇宙模型的发展过程，探讨理论模型发展和科学观测之间的关系。

## 宇宙学的新进展

20 世纪后半叶至今，宇宙学研究领域取得了很多骄人的成就。特别是科学家们观测到的宇宙微波背景辐射，被誉为 20 世纪 60 年代的四大发现之一，该发现荣获 1978 年诺贝尔物理学奖。此后，天文学家们把 Ia 型超新星作为丈量宇宙的尺子，在研究宇宙减速因子时意外发现宇宙在加速膨胀，宇宙主要由暗物质和暗能量组成，由此展开了宇宙探索的新图景，该发现荣获 2011 年诺贝尔物理学奖。2016 年激光干涉引力波天文台科学合作组织宣布探测到引力波，更是打开了宇宙研究的新窗口。2017 年，中国暗物质粒子探测卫星“悟空”获得高精度的高能电子宇宙线能谱，为暗物质研究提供了新的观测资料。

下面是近年有关宇宙学研究进展的一些图片，为我们展示了一个丰富多彩的宇宙学研究的世界。



图 5-3-5 2015 年加拿大科学家观测到一个来自超大质量黑洞的耀斑（示意图）



图 5-3-6 2015 年 12 月我国成功发射暗物质粒子探测卫星“悟空”（合成图）



图 5-3-7 2016 年我国科学家发现史上最亮超新星爆发（示意图）

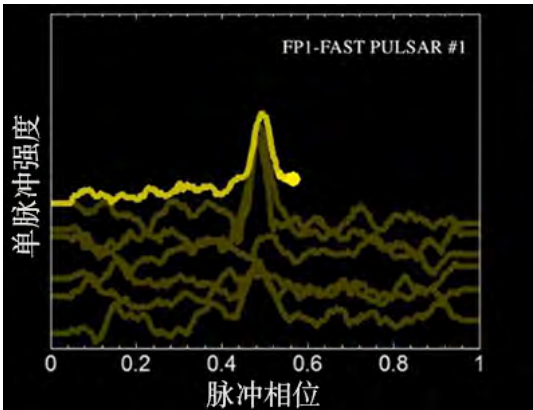


图 5-3-8 2017 年，中国“天眼”——世界最大射电望远镜（FAST）在银河系内发现了 6 颗新的脉冲星

科学在发展，技术在进步，神奇而美妙的宇宙等待着人类与它更多的“对话”。面对浩瀚的宇宙，辛勤探索的科学家们看似在“不经意之时”获得了惊人的发现，但机遇总是留给有准备的人，因此，我们都需要为自己的志向、为自己的未来做好准备。

### 实践与拓展

观看有关宇宙起源的科教专题片，了解宇宙的演化过程。

## 恒星的形成与演化

恒星是由引力凝聚在一起的球型发光等离子体。在美丽的夜空中，我们所能看见的恒星，几乎都在银河系内。恒星的种类繁多，天文学家们又是如何研究恒星的呢？

1911年，丹麦天文学家赫茨普龙（E. Hertzsprung，1873—1967）和美国天文学家罗素（H. Russell，1877—1957）先后发现恒星的光度与表面温度有一定的联系。他们把恒星的光度与表面温度分别作为纵轴和横轴，建立一个坐标系，如图5-3-9所示，这幅图后来被称为赫罗图。

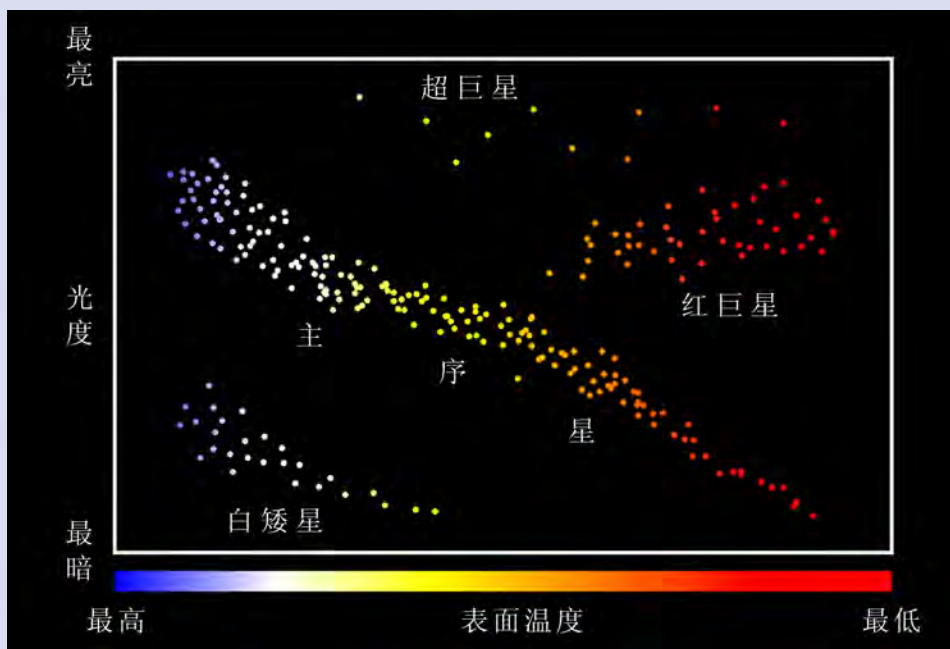


图5-3-9 赫罗图

把大量的恒星根据其特点在赫罗图上标示出来，可以发现恒星的分布有一定的规律性。赫罗图从左上方到右下方沿着对角线附近呈带状密集分布的点，占已记录恒星总数的90%，这条带上的恒星称为主序星。在赫罗图的右上方，有另一个恒星分布比较密集的区域，这里的恒星光度很大，但表面温度却不高，呈红色，且体积十分巨大，所以被称为红巨星。红巨星的上方是光度更大的超巨星。赫罗图的左下方也有一个恒星分布比较密集的区域，这里的恒星表面温度很高，呈蓝白色，光度却很小，且体积很小，所以被称为白矮星。赫罗图上的恒星分布反映了恒星演化的规律。

恒星的演化，一直是天体物理学中最基本也是解决得最好的问题之一。天文学家通过观测不同演化阶段的恒星，统计它们的特征，来推断恒星的演化规律。

如图 5-3-10 所示，一般认为，恒星是在由气体和尘埃组成的巨分子云中开始孕育的。一个巨分子云的质量可达太阳质量的数十万到数千万倍，直径最大可超过一百光年。巨分子云在环绕星系核心运动时，可能因为某些较为强烈的扰动，造成云内的物质向某些点聚拢，引发“引力坍缩”。在坍缩过程中，巨分子云分解为许多部分，其中一部分成为原恒星。

原恒星开始稳定的氢聚变反应之后，就进入主序星阶段。反映在赫罗图上，就是恒星会落在赫罗图中主序带的附近，具体的位置与恒星的质量有关。不同质量的恒星在耗尽核心中的氢元素之后，开始离开主序带。质量较小的恒星在离开主序带后，其核心的聚变反应停止，但包在核心外的氢壳层在核心坍缩时被点燃，并导致恒星外层向外膨胀演化为红巨星。而质量较大的恒星在其核心的氢耗尽后，其上的氦开始聚变，并点燃外面的氢壳层，演化为超巨星。

依据恒星质量的不同，恒星死亡之后的残骸会形成不同类型的致密天体。质量与太阳类似的恒星经历红巨星阶段之后，散去外层物质，其核心的引力坍缩，会形成白矮星。质量较大的恒星，其核心坍缩的压力使电子被质子俘获，成为中子，若中子斥力能够抵抗引力，其核心最后形成中子星；如果中子斥力也不足以抵抗引力，其理论上的归宿是黑洞。

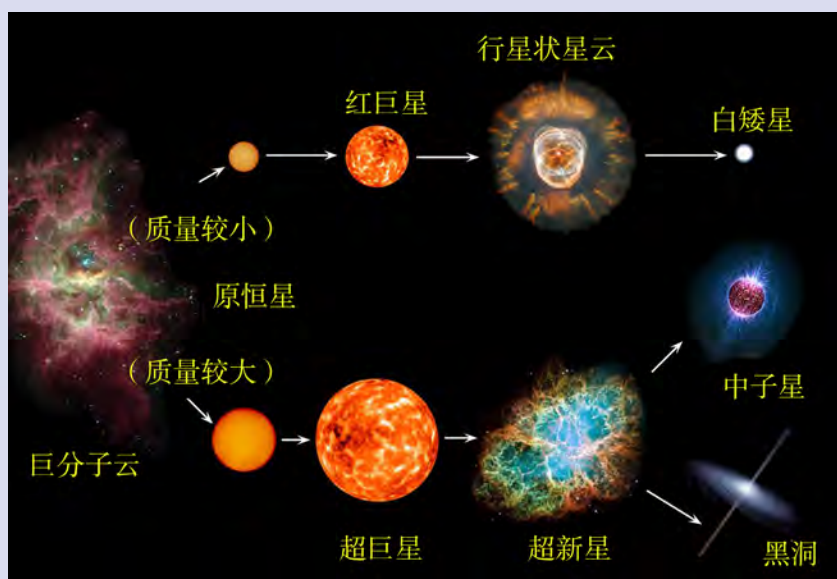
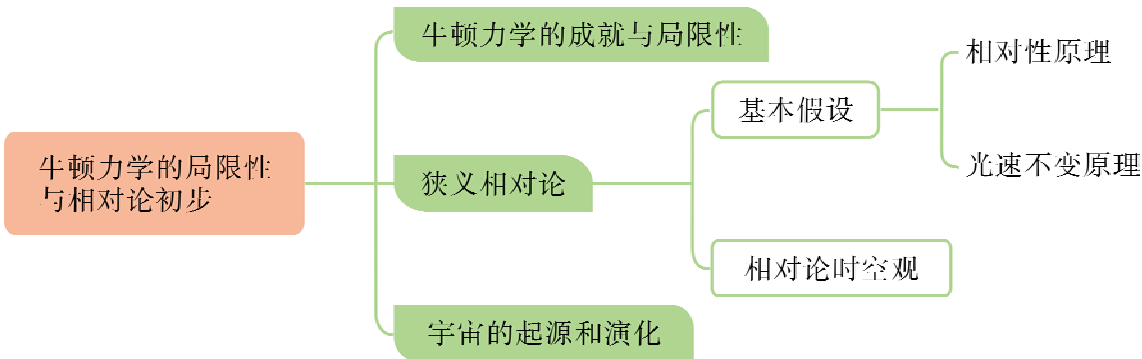


图 5-3-10 恒星的演化过程

# 本章小结

## 知识 结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识.



## 回顾与评价

1. 通过学习牛顿力学的成就与局限性的相关内容，对科学有什么新的认识？
2. 在探究相对论时空观的过程中，较多地采用了思想实验的方法，比较几个思想实验的分析过程，说说思想实验方法对问题研究的意义。
3. 面对不同的宇宙起源与演化理论，我们需要持怎样的科学态度？

## 习题五

- 下列运动中，不能用牛顿力学规律描述的是（ ）。
  - 子弹的飞行
  - “和谐号”从深圳向广州飞驰
  - 人造卫星绕地球运动
  - 粒子接近光速运动
- 关于牛顿力学的适用范围，下列说法正确的是（ ）。
  - 适用于宏观世界弱引力场中的低速运动
  - 适用于宏观世界强引力场中的高速运动
  - 适用于微观世界的低速运动
  - 适用于微观世界的高速运动
- 在狭义相对论中，下列说法正确的是（ ）。
  - 经典物理学可视为相对论在低速运动时的特例
  - 真空中的光速在不同的惯性参考系中是不相同的
  - 一条沿自身长度方向运动的杆，其观测长度总比杆静止时测量的长度长
  - 狭义相对论全面否定了经典物理学
- 如图 5-1 所示，一速度为  $0.7c$ （ $c$  为光速）的航天器  $A$  追赶正前方的另一艘航天器  $B$ ， $B$  的飞行速度是  $0.5c$ ， $A$  向  $B$  发出一束光进行联络，则  $B$  观测到该光束的传播速度为（ ）。
  - $0.4c$
  - $0.5c$
  - $0.9c$
  - $1.0c$
- 接近光速飞行的航天器上和地球上分别有一个相同的铯原子钟，航天器上和地球上的人观测这两个钟的快慢，下列说法正确的是（ ）。
  - 航天器上的人观测到航天器上的钟较快
  - 航天器上的人观测到航天器上的钟较慢
  - 地球上的人观测到航天器上的钟较快
  - 地球上的人观测到地球上的钟较慢

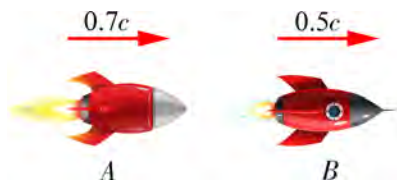


图 5-1

6. 一列火车以速度  $v$  相对于地面运动，如果地面上的观测者测得地面上某光源发出的闪光同时到达一节车厢的前门和后门，那么火车上的观测者是否测得闪光也同时到达前门和后门？为什么？

7. 时钟  $A$ 、 $B$ 、 $C$  完全相同， $A$  放在地面上， $B$  和  $C$  分别放在两艘以速度  $v_B$  和  $v_C$  朝同一方向飞行的航天器上，且  $v_B < v_C$ ，则地面上的观测者测得哪个时钟走得最慢，哪个走得最快？

8. 一艘航天器以速度  $v$  沿如图 5 - 2 所示的方向飞行. 地面观测者测得航天器经过相距为  $L_0$  的  $A$ 、 $B$  两点所耗时间为  $t_1$ ，而航天器驾驶员测得经过  $A$ 、 $B$  两点所耗时间是  $t_2$ ，则有  $t_1$  \_\_\_\_\_（选填“>”“<”或“=”） $t_2$ ，航天器驾驶员观测到  $A$ 、 $B$  两点距离  $L$  \_\_\_\_\_（选填“>”“<”或“=”） $L_0$ .

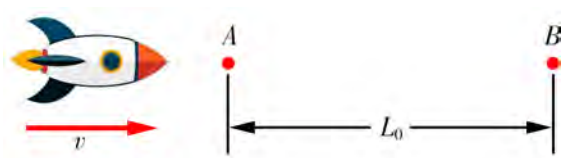


图 5 - 2

9. 如图 5 - 3 所示，某惯性参考系中有一边长为  $l$  的正方形，某飞行器相对该惯性参考系沿  $x$  轴方向以接近光速匀速飞行. 试画出在该飞行器上观测到的正方形的对应图像.

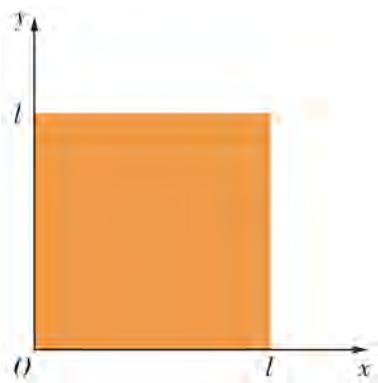


图 5 - 3



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315



定价：10.59元



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

# 985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单  
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中