



普通高中教科书

# 物理

WULI

## 必修

第二册



上海科学技术出版社

普通高中教科书

# 物理

必修

第二册

上海科学技术出版社



主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：朱 臻

编写人员：(以姓氏笔画为序)

朱 臻 李希凡 杨鸣华 杨 炯 徐建军 廖 灿 谭一宁

责任编辑：金波艳 李林高

美术设计：房惠平

## 普通高中教科书 物理 必修 第二册

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

---

出 版 上海世纪出版（集团）有限公司 上海科学技术出版社  
（上海市闵行区号景路 159 弄 A 座 9F-10F 邮政编码 201101）

发 行 上海新华书店

印 刷

版 次 2021 年 1 月第 版

印 次 2025 年 1 月第 次

开 本 890 毫米 × 1240 毫米 1/16

印 张 7.75

字 数 161 千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5219-4/G · 1024

定 价 元

---

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使本产品任何部分·违者必究

如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn

全国物价举报电话：12315

**声明** 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定，我们已尽量寻找著作权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

# 目 录

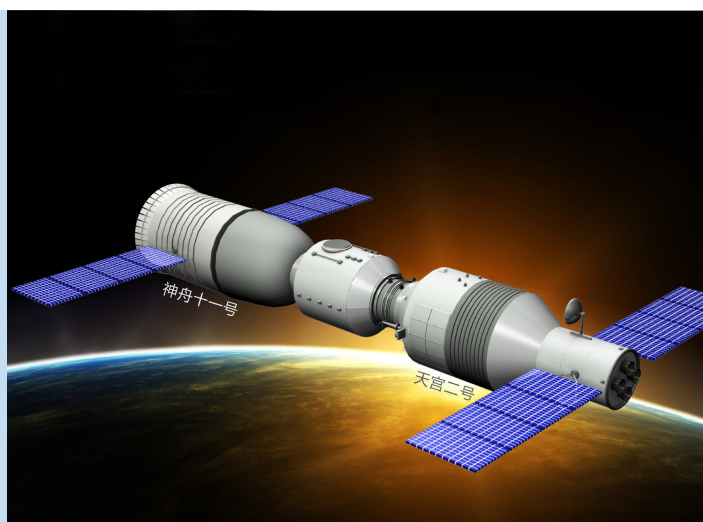
## 第五章 · 曲线运动 / 1

- 第一节 曲线运动 / 2
- 第二节 平抛运动 / 6
- 第三节 圆周运动 / 13
- 第四节 向心力 向心加速度 / 18
- 第五节 圆周运动的应用 / 25

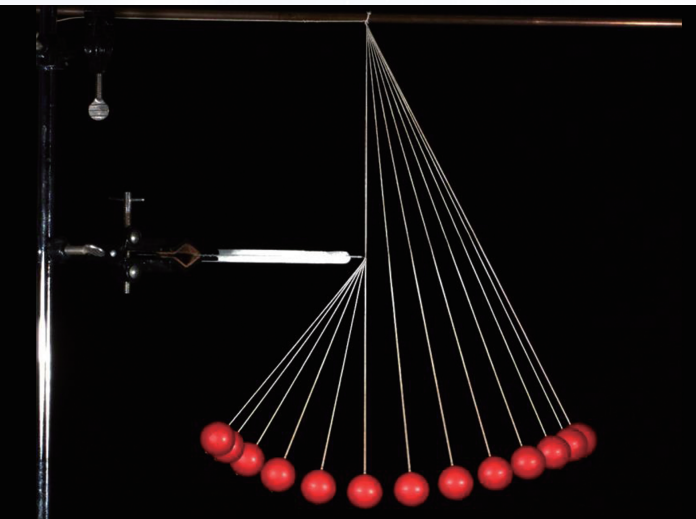


## 第六章 · 万有引力定律 / 35

- 第一节 行星的运动 / 36
- 第二节 万有引力定律 / 40
- 第三节 万有引力定律的应用 / 44







## 第七章 · 机械能守恒定律 / 54

---

第一节 功 / 55

第二节 功率 / 62

第三节 动能 动能定理 / 68

第四节 重力势能 / 73

第五节 机械能守恒定律 / 80



## 第八章 · 牛顿力学的局限性与相对论初步 / 91

---

第一节 牛顿力学的局限性 / 92

第二节 相对论初步 / 96

第三节 宇宙的起源与演化 / 107





图示为游乐场内过山车的照片。过山车是一种颇受人们欢迎的游乐项目，过山车上的游客随过山车沿轨道做曲线运动。曲线运动与之前学过的直线运动有不同的特点，具有更复杂的规律。过山车上的游客在运动过程中的速度、加速度是如何变化的？受力情况又是怎样的？

## 第五章

# 曲线运动

- 在本章中我们将：

1. 了解物体的曲线运动及其条件，认识平抛运动规律，用线速度、角速度和周期等概念描述匀速圆周运动。
2. 通过实验探究平抛运动和匀速圆周运动的规律。
3. 运用运动合成与分解的方法分析生活中的抛体运动，运用牛顿第二定律分析匀速圆周运动，了解离心现象及其成因。

- 本章的学习中将用到匀变速直线运动的规律和牛顿第二定律。

- 本章的学习有助于运动观念的进一步提升，并为分析实际生活中的复杂运动奠定基础。





图 5-1 滑雪

## 第一节 曲线运动

在日常生活中，物体的运动轨迹一般是比较复杂的曲线。物体沿曲线所做的运动叫**曲线运动 (curvilinear motion)**。图 5-1 中的滑雪运动员、图 5-2 (a) 中投出的篮球和图 5-2 (b) 中行驶的自行车所做的运动都是曲线运动。

做曲线运动的物体，在不同时刻、不同位置的运动方向一般都是不同的。



(a)



(b)

图 5-2 常见的曲线运动

## 如何确定做曲线运动物体速度的方向？

### 自主活动

如图 5-3 所示，用牙签和圆形硬纸板制作一个纸板陀螺，在纸板边缘滴上墨水，将陀螺放在白纸上，旋转陀螺使墨水飞出，观察墨水在白纸上留下的径迹。

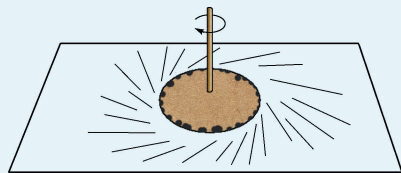


图 5-3 纸板陀螺

可以观察到，墨水沿圆纸板的切线方向飞出。

大量事实表明，做曲线运动的物体，其速度的方向是时刻改变的，物体在某一点的瞬时速度方向沿曲线在该点的切线方向，如图 5-4 所示。

速度是矢量，不论速度的大小是否改变，只要速度的方向改变，就表示速度发生了变化，所以曲线运动是变速运动，做曲线运动的物体具有加速度。

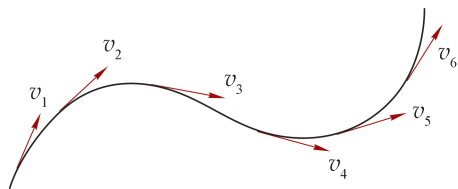


图 5-4 曲线运动速度的方向

## 物体做曲线运动的条件是什么？

对投出的篮球进行分析，可以发现篮球受到的重力与速度方向是不同的，如图 5-5 所示。

根据牛顿第二定律，物体的加速度方向与物体受到的合力方向一致。当合力的方向与速度方向不同时，加速度方向也就与速度方向不同，物体运动的速度方向就会发生改变而做曲线运动。

可见，物体做曲线运动的条件是：物体所受合力的方向与其速度方向不在同一直线上。

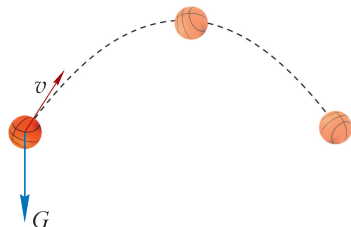


图 5-5 重力使投出的篮球做曲线运动

### 自主活动

在水平桌面上，一个乒乓球沿斜面滚下后做直线运动。如图 5-6 所示，从侧面用力吹乒乓球，使乒乓球运动经过指定位置，应该如何吹才能完成任务？

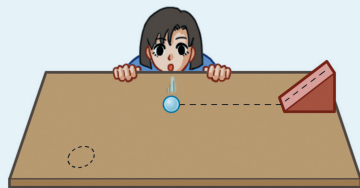


图 5-6 吹乒乓球



## 如何研究曲线运动?

早在 17 世纪,伽利略就已经提出了研究曲线运动的方法,他认为可以把曲线运动分解为两个相互垂直方向的运动。设想石块从一艘匀速行驶的帆船桅杆顶部下落;并假定当船停着不动时,石块从桅杆顶部落到甲板需要的时间相当于脉搏跳动 2 次的时间。当船向前匀速航行时,使石块从桅杆顶部同一位置落下,石块落到甲板上时间不变,石块的运动轨迹就是一条曲线,如图 5-7 所示。

石块所做的曲线运动可看成是由竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速直线运动组合而成的。这两个运动称为石块的分运动,而它们的合运动就是石块所做的曲线运动。

在研究曲线运动时,通常把它看成两个简单直线运动的组合,从而使问题变得容易研究。

既然一个运动可以看成两个分运动的组合,那么只要知道每个分运动的规律,就可以得到合运动的规律。由于描述物体运动的位移、速度和加速度等物理量都是矢量,那么,两个分运动在一段时间内的位移、速度和加速度等物理量的矢量和就是该段时间内物体合运动的位移、速度和加速度。这种已知分运动求合运动的方法,称为**运动的合成**。

反之,由已知的合运动求分运动的方法,称为**运动的分解**。

把石块开始下落的点设为坐标原点  $O$ ,以水平向右和竖直向下分别为  $x$  轴和  $y$  轴的正方向建立平面直角坐标系,如图 5-8 所示。然后,分别研究  $x$  轴、 $y$  轴这两个方向的分运动——直线运动的规律,得出两个分运动的位移、速度和加速度。最后根据矢量合成的平行四边形定则,得到石块合运动的位移、速度和加速度。

岸上的人看到的石块运动路径

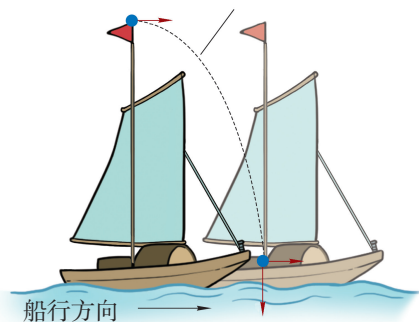


图 5-7 行驶的帆船

### 助一臂

#### 运动的叠加原理

理 · 一个运动可以看成两个或几个运动的合成或叠加,这两个或几个运动是同时进行的且互不干扰。

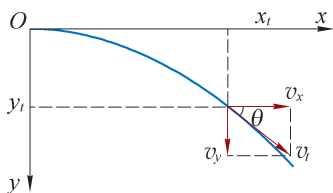


图 5-8 运动的分解与合成

## 自主活动

设江水的流速为  $6 \text{ km/h}$ ，轮船在静水中行驶的速度为  $12 \text{ km/h}$ 。当驾驶员驾驶轮船垂直向对岸方向航行时，轮船实际行驶的方向如何？速度大小为多少？如果江面宽  $200 \text{ m}$ ，轮船将行驶到对岸何处？

可见，在研究比较复杂的运动问题时，运用运动合成与分解的方法往往是十分有效的。同时，这一方法的运用要注意合运动与分运动之间、各分运动之间都具有等时性的特点。

## 问题与思考

- 如图 5-9 所示，图中的虚线为某同学投出篮球的运动轨迹。请标出篮球在图示位置所受的力和速度矢量。
- 运动员以  $10 \text{ m/s}$  的速度沿与水平面夹角为  $30^\circ$  的方向斜向上推出一铅球。这个速度在水平方向和竖直方向的分速度分别是多大？画出速度分解的图示。
- 如图 5-10 所示，一质点沿  $AB$  方向做匀速直线运动，当质点运动到  $B$  点时加上一个力  $F$ 。此后该质点的运动轨迹最接近图中哪条虚线，简述理由。
- 一艘渡船在宽为  $d$  的河中航行。现从码头出发，船头垂直于河岸，以速度  $v$  匀速向对岸行驶。问：
  - 若河水的流速处处为  $u$ ，渡船将停靠在对岸哪个位置？
  - 若越靠近河中央水的流速越大，试定性画出该船行驶的轨迹示意图。
- 某飞机以  $30^\circ$  仰角起飞，起飞时初速度大小为  $100 \text{ m/s}$ 。假设其做加速度大小为  $1 \text{ m/s}^2$  的匀加速直线运动。则：
  - 起飞后  $10 \text{ s}$  末飞机离地面多高？
  - 此刻飞机距起飞点的水平距离为多少？
- 在学校趣味运动会“运动击杆”的比赛中，要求运动员坐在一辆由西向东运动的小车上抛出一小球，击中位于小车左侧（北边）路边的一根旗杆。运动员应如何抛出小球才能击中目标？试画出示意图并说明理由。



图 5-9

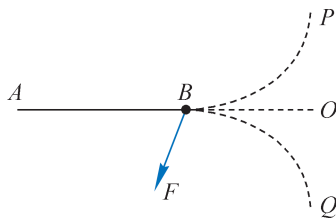


图 5-10





图 5-11 黄果树瀑布

## 第二节 平抛运动

如图 5-12 所示，将乒乓球向上抛出，将排球水平击出，将足球斜向踢出，这种以一定速度抛出，在空气阻力可以忽略、只在重力作用下的运动叫做抛体运动。若抛出物体的初速度沿水平方向，该物体的运动叫做**平抛运动**。图 5-11 中瀑布顶端飞出的水滴，图 5-12 (b) 中水平击出的排球所做的运动，都可以近似看作平抛运动。

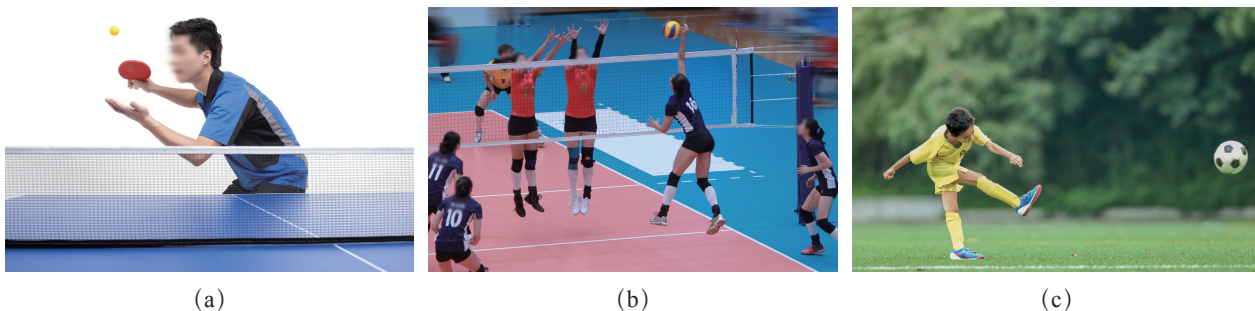


图 5-12 常见的抛体运动

### ? 平抛运动有什么规律?

复杂的曲线运动可以看成是两个或多个简单运动的合成。下面，我们用运动合成与分解的方法通过实验来探究平抛运动的规律。

学生实验

探究平抛运动的特点

提出问题

平抛运动有何特点？

实验原理与方案

做平抛运动的物体初速度沿水平方向，只受重力作用，可以将平抛运动分解为水平和竖直方向上的两个直线运动来研究。

实验装置与方法

如图 5-13 所示的装置包含摆锤、弹性金属片和两个小球。当摆锤敲击弹性金属片时，小球 A 和 B 同时开始运动，小球 A 由于受到水平撞击做平抛运动，而小球 B 从原处落下做自由落体运动。通过比较做平抛运动和自由落体运动的小球落地先后，探究平抛运动竖直方向分运动的规律。

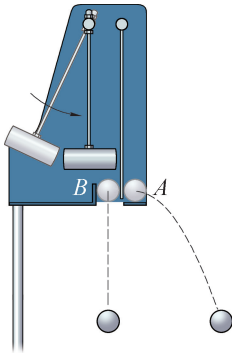


图 5-13 探究平抛运动  
竖直方向分运动的规律

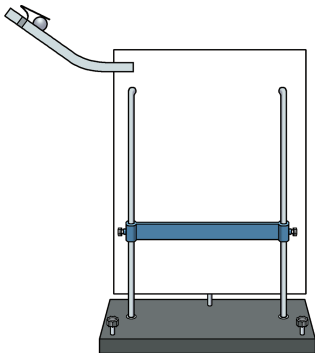


图 5-14 探究平抛运动  
水平方向分运动的规律

如图 5-14 所示的装置包含底部水平的斜槽、可以固定方格纸和复写纸的竖直板，以及可以上下移动的带凹槽的挡板。当小球从斜槽水平飞出后落在挡板的凹槽中时，由于小球受到凹槽的挤压会通过复写纸在方格纸上留下落点的位置。通过小球落点的位置，探究平抛运动水平方向分运动的规律。

实验操作与数据收集

(1) 将摆锤拉开一定角度后释放，摆锤击中弹性金属片，记录两个小球落地的先后。分别改变摆锤的释放角度和小球距地面的高度，重复实验，将数据结果记录到表 5-1 中。

表 5-1 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5
两个小球落地的先后					

(2) 在竖直板上依次附上方格纸和复写纸，记录小球飞出点的位置，并标上水平方向和竖直方向。将挡板固定在某一高度，让小球由静止沿斜槽滚下，记录小球的落点位置；改变挡板的高度，使小球从斜槽的同一高度由静止滚下，再次记录小球的落点位置；重复实验，可以在方格纸上得到小球平抛运动过程中的多个落点位置。



### 数据分析

比较做平抛运动和自由落体运动的小球落地先后，归纳平抛运动竖直方向分运动的规律。

用平滑曲线连接各落点位置，得到小球做平抛运动的轨迹。以小球飞出点为原点，建立合适的平面直角坐标系。根据竖直方向分运动的规律，设法在轨迹上取一组时间间隔相等的点，根据这些点的坐标，分析平抛运动水平方向分运动的规律。

### 实验结论

平抛运动竖直方向上的分运动为 \_\_\_\_\_；水平方向上的分运动为 \_\_\_\_\_。

### 交流与讨论

各组就数据分析的具体过程进行交流，比较、分析实验结果的异同及其原因。

本实验也可选用如图 5-15 所示的装置，包含电磁定位板、弹射器、平抛物体（含信号源）、接球槽等。平抛物体被弹射器水平射出后，每隔相同的时间发射一次信号，电磁定位板接收信号并记录该时刻平抛物体的位置信息，通过计算机对采集到平抛物体的位置信息进行处理，即可得到平抛物体在水平方向和竖直方向分运动的规律。

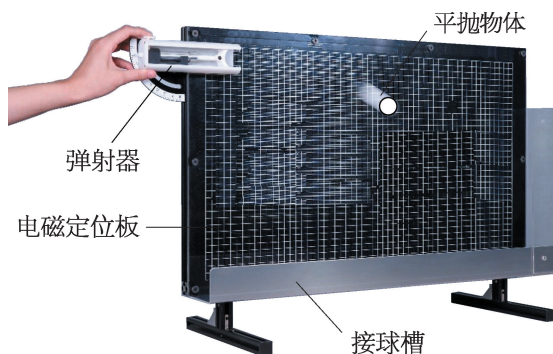


图 5-15 探究平抛运动的另一种装置

通过大量实验，我们发现平抛运动可以分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动。可见，平抛运动的加速度就是重力加速度，所以平抛运动是一种匀变速曲线运动。

## 如何描述做平抛运动物体的位移和速度？

如图 5-16 所示，对一个做平抛运动的物体，我们以抛出点为坐标原点、水平抛出的初速度方向为  $x$  轴正方向、竖直向下为  $y$  轴正方向，建立平面直角坐标系。物体做平抛运动的规律就可以用  $x$  轴和  $y$  轴两个方向的分运动的规律来表示。

通常将物体由原点沿  $x$  轴正方向抛出的时刻作为初始时刻，则经过时间  $t$ ，做平抛运动的物体在  $x$  轴和  $y$  轴方向的分运动的位移随时间  $t$  变化的规律分别为

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \\ y &= \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned}$$

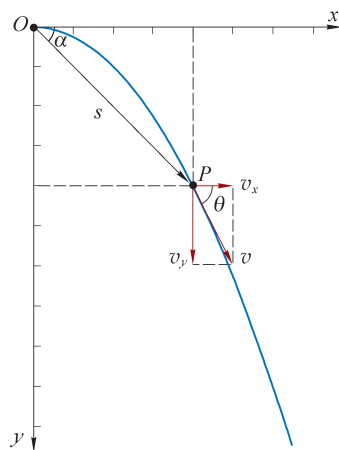


图 5-16 平抛运动的分解



物体做平抛运动的位移是这两个分运动位移的矢量和。根据平行四边形定则，位移的大小为

$$s = \sqrt{x^2 + y^2}$$

位移方向可用其与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  表示，则

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} = \frac{gt}{2v_0}$$

由于将抛出时刻作为初始时刻，做平抛运动的物体在任一时刻沿  $x$  轴和  $y$  轴两个分运动的速度大小分别为

$$v_x = v_0$$

$$v_y = gt$$

根据平行四边形定则，物体在该时刻的速度是两个分运动速度的矢量和，其大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$

速度方向可用其与  $x$  轴的夹角  $\theta$  表示，则

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{gt}{v_0}$$

### 大家谈

距地面相同高度，将几个物体以不同的初速度自同一点水平抛出，这些物体飞行的时间相等吗？

### 拓展视野

根据平抛运动在  $x$  轴、 $y$  轴两个方向分运动的位移公式  $x = v_0 t$ 、 $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，消去时间  $t$ ，就可以得到  $y$  与  $x$  之间的关系： $y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$ 。在该式中，重力加速度  $g$  与平抛初速度  $v_0$  都不随时间变化，即  $\frac{g}{2v_0^2}$  与  $x$ 、 $y$  无关，因此，上式具有二次函数  $y = ax^2$  的形式。数学中把二次函数的图像叫抛物线，就是从抛体运动而来的。

**示例** 如图 5-17 所示，一架小型运输机以  $v_0 = 180 \text{ km/h}$  的速度水平飞行，在  $h = 320 \text{ m}$  高空向灾区投放救灾物资包。（不计空气阻力， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ）

(1) 为了将物资包准确投到目标位置, 应当在离该位置的水平距离多远处释放物资包?

(2) 物资包落地时, 速度的大小和方向如何?

**分析:** 救灾物资包做平抛运动。运用运动分解的方法, 可以先算出物资包在竖直方向分运动(自由落体运动)的时间, 这就是物资包平抛运动的飞行时间, 也是水平方向运动的时间。在这段时间内, 运输机水平匀速飞行的距离就是释放物资包的位置与目标位置之间的水平距离。

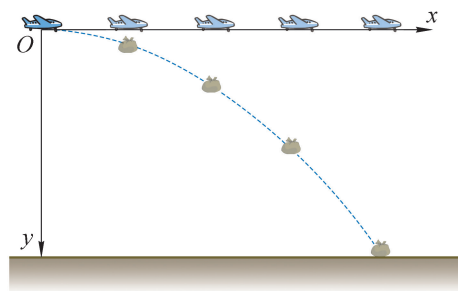


图 5-17 空投物资包

**解:** (1) 物资包被投放后做平抛运动。建立如图 5-17 所示的坐标系, 根据平抛运动在竖直方向分运动的规律, 物资包在竖直方向的位移  $y$  与其运动时间  $t$  的关系为

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

当  $y = h$  时, 物资包落到地面, 可知救灾物资包的飞行时间

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 320}{10}} \text{ s} = 8 \text{ s}$$

根据平抛运动在水平方向分运动的规律, 可知物资包投放后到达目标位置的水平位移

$$x = v_0 t$$

又  $v_0 = 180 \text{ km/h} = 50 \text{ m/s}$ , 得

$$x = 50 \times 8 \text{ m} = 400 \text{ m}$$

所以, 为准确地将物资包投送到目标位置, 应当在离目标位置水平距离 400 m 处提前投放。

(2) 物资包落地时速度的水平分量和竖直分量的大小分别为

$$v_x = v_0, \quad v_y = gt = \sqrt{2gh}$$

因此, 物资包落地的速度大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

代入数据, 得

$$v = \sqrt{50^2 + 2 \times 10 \times 320} \text{ m/s} \approx 94.3 \text{ m/s}$$

物资包落地时速度的方向与水平方向夹角  $\theta$  的正切为

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{\sqrt{2gh}}{v_0}$$

代入数据, 得

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{2 \times 10 \times 320}}{50} = 1.6$$

故

$$\theta \approx 58^\circ$$

因此, 救灾物资包落地时速度的大小为 94.3 m/s, 速度的方向与水平面的夹角约为  $58^\circ$ 。

## 大家谈

上例分析中忽略了空气阻力的影响。实际的空投作业往往是一项复杂的、需要综合考虑各种因素的工作。如果飞机飞得比较高，救灾物资包会因为落地速度很大而受损。为安全地实施空投，你能否给出一些设想和方案？

## 问题与思考

1. 判断下列物体的运动是否属于抛体运动，并说明理由。

- (1) 洒水车喷出的水。
- (2) 运动员推出的铅球。
- (3) 向空中抛出的一张纸。
- (4) 竖直向下扔出的一粒石子。
- (5) 运动员发球时竖直向上抛出的网球。

2. 做平抛运动的物体在任意 1 s 内速度变化量的大小是多少？方向如何？

3. 水平匀速飞行的飞机上连续投下一系列物体，站在地面上的人看到的情景是否如图 5-18 所示？飞机上的人看到的又是怎样的情景？



图 5-18

4. 极限运动员想驾驶摩托车以 30 m/s 的水平初速度做飞越河谷表演，河谷的尺寸如图 5-19 所示。不计空气阻力，摩托车能否越过该河谷？简述理由。

5. 以初速度  $v_0$  水平抛出一小球，忽略空气阻力。如图 5-20 所示，某同学画出了该小球经历连续相等时间后速度矢量  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  的关系图。对该同学所画的图作出评价。

6. 在“探究平抛运动的特点”实验中，某同学得到了如图 5-21 所示的数据轨迹线，则该平抛运动的初速度大小为多少？

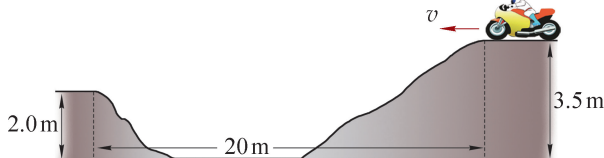


图 5-19

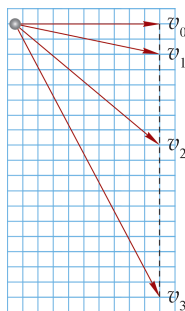


图 5-20

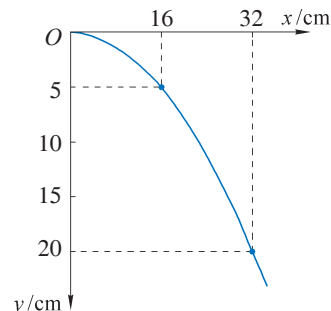


图 5-21



7. 奥运会 50 m 步枪射击项目所用靶的直径为 154.4 mm。如图 5-22 所示，若某步枪运动员沿水平方向射击，正好对准靶的中心。分析说明：

- (1) 若子弹飞出枪膛的速度为 600 m/s，能否击中靶？
- (2) 若子弹飞出枪膛的速度为 350 m/s，能否击中靶？
- (3) 实际射击时，运动员应该如何瞄准才能取得更好的成绩？

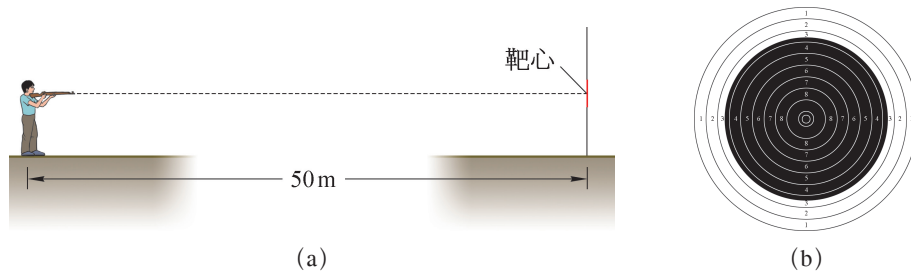


图 5-22



图 5-23 摩天轮

### 第三节 圆周运动

如果物体运动的轨迹是圆周，我们就说物体在做圆周运动。当我们坐在图 5-23 所示的摩天轮上，从高空饱览美丽风光的同时，就正在做圆周运动。

在生产、生活和自然界中，许多过程都涉及圆周运动，例如，图 5-24 (a) 所示的家用洗衣机工作时转筒上的各点，图 5-24 (b) 所示的旋转餐厅的座椅，图 5-24 (c) 所示时钟上时针、分针、秒针上的各点等。



(a)



(b)



(c)

图 5-24 常见的圆周运动

物体做圆周运动时，如果在任意相等时间内通过的弧长总是相等，这种运动就叫做**匀速圆周运动**（uniform circular motion）。

做匀速圆周运动的物体每经过一段时间会重复之前的运动状态，匀速圆周运动具有周期性，因此，描述匀速圆周运动的方法与描述直线运动、抛体运动的方法相比，有自己的特点。

## ❓ 如何描述匀速圆周运动的快慢？

如图 5-25 所示，做匀速圆周运动的物体从  $A$  点运动到  $B$  点，可以用  $A$ 、 $B$  两点之间弧长  $\Delta s$  与所用时间  $\Delta t$  的比来表示速度的大小，即

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

当  $\Delta t$  足够小时，弧  $AB$  与线段  $AB$  几乎没有差别， $\Delta s$  就等于物体由  $A$  运动到  $B$  的位移大小，这时的  $v$  就是物体在这一位置的瞬时速度大小。

与所有曲线运动一样，物体做圆周运动时，它在任意位置的速度方向就是该位置圆周的切线方向，如图 5-26 所示。

物体做匀速圆周运动的速度大小不变，方向不断变化，因此，匀速圆周运动是变速运动，这里的“匀速”指的是速率不变，即速度大小不变。

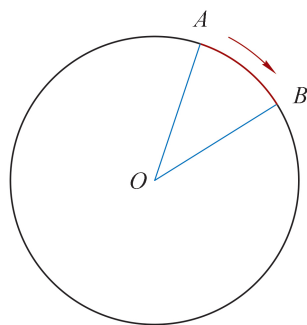


图 5-25 物体沿圆周从  $A$  运动到  $B$

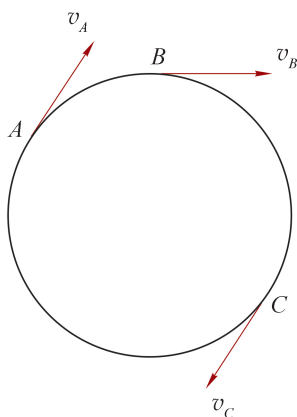


图 5-26 圆周运动的速度方向

## 大家谈

月球绕地球的运动和地球绕太阳的运动，都可近似看成是匀速圆周运动。

地球说：“你怎么这么慢？我绕太阳运动 1 s 能走 29.79 km，你绕我运动 1 s 才走 1.02 km。”

月球说：“你可别这么说，你要用一年时间才绕太阳一圈，我 28 天就走了一圈。到底谁快谁慢？”

关于上述对话，你有什么看法？



如图 5-27 所示的小电扇转动时，每个叶片转得一样快，同一叶片上的各点也转得一样快，但是这些点的速度大小不一定相同。

可见，做圆周运动的物体既可看作沿着圆弧做曲线运动，也可看作绕圆心转动，仅用速度来描述圆周运动的快慢是不够的。物理学中用**角速度 (angular velocity)** 来描述物体转动的快慢。

如图 5-28 所示，做匀速圆周运动的物体从  $A$  点运动到  $B$  点，可以用圆弧  $AB$  所对应的圆心角  $\Delta\varphi$  与所需时间  $\Delta t$  的比来表示角速度大小。角速度用  $\omega$  表示，则有

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

在国际单位制中，角度的单位是弧度 (rad)，时间的单位是秒 (s)，角速度的单位是弧度 / 秒 (rad/s)。

做匀速圆周运动物体的角速度保持不变。

研究圆周运动时，为了区别于角速度  $\omega$ ，速度  $v$  又可叫做**线速度 (linear velocity)**。



图 5-27 小电扇

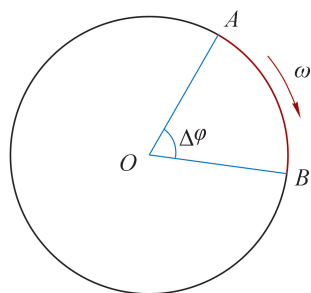


图 5-28 匀速圆周运动的角速度

### 拓展视野

角的单位制有角度制和弧度制两种。

弧度制规定圆周上长度等于半径的一段弧长所对的圆心角为 1 rad，圆周所对的圆心角为  $2\pi$  rad。

弧度制与角度制的换算关系是  $1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx 57^\circ 17' 45''$ 。

匀速圆周运动具有周期性，做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫做**周期 (period)**，用符号  $T$  表示。在国际单位制中，周期的单位是秒 (s)。

技术上常用转速描述圆周运动的快慢。物体沿圆周运动的圈数与所用时间的比叫做转速，常用符号  $n$  表示。转速的常用单位是转 / 秒 (r/s)。

与线速度和角速度相比，周期更容易被观察和测量，常用来比较圆周运动的快慢，周期越小，转动越快。

### ❓ 线速度、角速度、周期之间有怎样的关系？

线速度、角速度、周期都可以描述匀速圆周运动的快慢。一个做匀速圆周运动的物体，设运动的半径为  $r$ ，则其做匀速圆周运动的周期  $T$  与角速度  $\omega$ 、线速度  $v$  之间的关系为

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

其运动的线速度与角速度大小的关系为

$$v = \omega r$$

### 拓展视野

当物体绕固定轴转动时，物体上各点都在做圆周运动，且各点的角速度都相等。但各点的线速度大小不一定相等，只有到转轴距离相等的各点的线速度大小才相等。在同一个转动物体上，各点线速度的大小与其到轴的距离成正比。所以，在研究物体绕固定轴转动时，一般不能将物体视为质点。

**示例** 已知地球的半径  $R = 6.37 \times 10^3 \text{ km}$ ，上海位于北纬  $30^\circ$  附近。问：

(1) 位于赤道上的物体随地球自转的角速度和线速度分别是多大？

(2) 位于上海的物体随地球自转的线速度是多大？

**分析：**地球自转时，随地球一起运动的所有物体都在绕着地轴做匀速圆周运动，因此，它们的角速度、周期均与地球的相同。而线速度的大小则与物体所处位置的地理纬度有关，如图 5-29 所示。

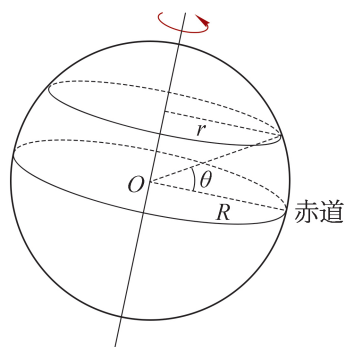


图 5-29 地球的自转

**解：**(1) 物体随地球自转的周期  $T = 24 \text{ h}$ 。根据做匀速圆周运动物体的角速度与周期的关系，可得赤道上物体的角速度为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{24 \times 3600} \text{ rad/s} \approx 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

设赤道上的物体随地球转动的线速度为  $v_1$ ，运动半径为  $r_1$ ，则有  $r_1 = R$ 。根据做匀速圆周运动物体的线速度与角速度的关系可得

$$v_1 = \omega r_1 = 7.27 \times 10^{-5} \times 6.37 \times 10^6 \text{ m/s} \approx 463 \text{ m/s}$$

(2) 设位于上海的物体随地球转动的线速度为  $v_2$ ，运动半径为  $r_2$ ，由上海所在纬度，则有  $r_2 = R \cos 30^\circ$ 。根据做匀速圆周运动物体的线速度与角速度关系可得

$$v_2 = \omega r_2 = 7.27 \times 10^{-5} \times 6.37 \times 10^6 \times \cos 30^\circ \text{ m/s} \approx 401 \text{ m/s}$$

### 大家谈

上海“东方明珠”电视塔的高度约为 468 m，它随地球转动的线速度大小是多少？甲同学认为电视塔塔顶和底部的旋转半径不同，需要分别计算；乙同学认为答案就是上例中的  $v_2$ 。你同意哪个观点？试说明理由。



## 问题与思考

- 对于做匀速圆周运动的两个物体，下列说法是否正确？试说明理由。
  - 角速度大的物体，线速度也一定大；
  - 周期大的物体，角速度也一定大。
- 如图 5-30 所示，餐桌上的自动转盘在电动机的带动下匀速转动，转盘上放有  $A$ 、 $B$  两个茶杯。一位客人说两个茶杯运动得一样快，这个判断是否正确？简述理由。
- 钟表的时针针尖和秒针针尖的运动都可看作匀速圆周运动，试比较它们运动的周期和角速度的大小。
- 某飞机在空中等待降落时，近似以  $80\text{ m/s}$  的速度做平行于地面的匀速圆周运动，圆周半径为  $4\ 000\text{ m}$ 。计算飞机运动的周期和角速度的大小。
- 如图 5-31 所示，一辆变速自行车有 3 个链轮和 6 个飞轮，链轮和飞轮的齿数如表 5-2 所示。该自行车的前后轮周长均为  $2\text{ m}$ ，设人脚踩踏板的转速为  $1.5\text{ r/s}$ 。
  - 当采用的链轮和飞轮齿数分别为 48 和 24 时，该自行车的行驶速度为多大？
  - 假设踏板的转速不变，通过选择不同的链轮和飞轮，该自行车行驶的最大速度与最小速度之比为多少？

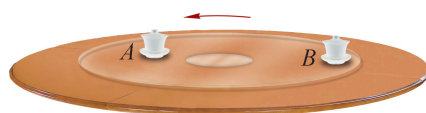


图 5-30

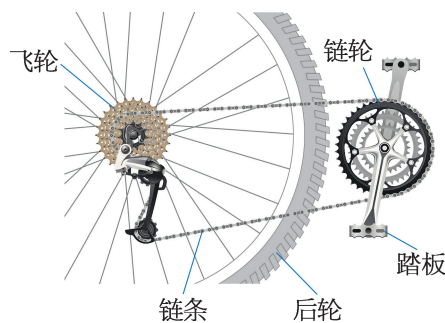


图 5-31

表 5-2

名称	链轮			飞轮					
齿数	48	38	28	15	16	18	21	24	28

- 我们知道飞机的飞行速度远大于鸟的飞行速度。但我们观察近处的飞鸟和远处的飞机时，往往会觉得鸟比飞机飞得快。试解释这种现象。



图 5-32 链球运动

#### 第四节 向心力 向心加速度

在链球比赛中，为了使链球飞得更远，运动员会拉着链条的一端旋转，使系在链条另一端的链球跟着做圆周运动，如图 5-32 所示。经过 3~4 圈加速旋转，运动员猛然松手使链球飞出。

#### ❓ 物体做匀速圆周运动的条件是什么？

##### 自主活动

如图 5-33 所示，在细绳的一端系一个小球，用手捏住绳子另一端，使小球在水平放置的玻璃平板上绕被捏住的绳子一端转圈。

细绳对小球拉力的方向与小球的速度方向有什么关系？将手松开，观察小球是否能继续转圈。

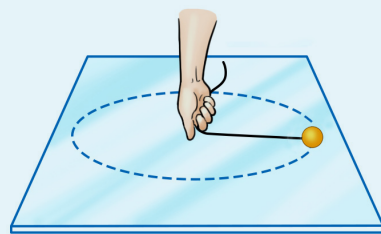


图 5-33 转圈的小球

上述活动中，当手松开后，小球不再受拉力作用，脱离圆周，沿切线方向飞出。

研究表明，物体做匀速圆周运动的条件是受到与物体的速度方向垂直、指向圆心且大小不变的合力作用，这个力叫做**向心力**（centripetal force）。

**示例 1** 游乐场里有一种旋转飞椅，当飞椅以一定的速率旋转时，游客和飞椅一起在水平面内做匀速圆周运动，如图 5-34 所示。将飞椅和游客视为整体，分析其受到的向心力的来源。



图 5-34 旋转飞椅

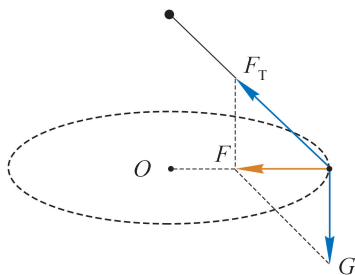


图 5-35 受力示意图

**分析：**以某一游客和所坐的飞椅为研究对象，将其视为质点，其受力情况可抽象成如图 5-35 所示的示意图。根据质点做匀速圆周运动的轨迹，可确定运动所在圆周的圆心，进而可确定质点所受向心力的方向。对质点进行受力分析，所受力的合力就是质点做匀速圆周运动的向心力。

**解：**如图 5-35 所示，以飞椅和游客整体为研究对象，其在水平面内做匀速圆周运动，受到的向心力一定指向轨迹的圆心  $O$ 。根据受力分析，飞椅和游客整体受到重力  $G$  和沿吊绳向上的弹力  $F_T$  的作用，两个力的合力  $F$  就是其所受的向心力，该合力一定在水平面内，并且指向  $O$  点。

向心力是根据作用效果命名的力，重力、弹力、摩擦力或者这些力的合力都可以作为向心力。

## 向心力的大小与哪些因素有关？

### 大家谈

在前面的自主活动中，改变小球运动的快慢、细绳的长度与小球的质量，感受手上拉力大小的变化，猜测向心力的大小可能与哪些因素有关。

我们猜想：向心力的大小可能与做匀速圆周运动物体的圆周半径、运动快慢和质量都有关，它们有什么定量关系呢？这需要通过定量的实验来研究。



## 学生实验

### 探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

#### 提出问题

物体做匀速圆周运动时所受向心力的大小与物体运动的圆周半径、运动快慢及质量有关，向心力大小与这些因素之间有何定量关系？

#### 实验原理与方案

向心力大小  $F$  与半径  $r$ 、角速度  $\omega$ 、质量  $m$  都有关，本实验需要采用控制变量法。分别研究：(1)  $\omega$  与  $m$  一定时， $F$  与  $r$  的关系；(2)  $r$  与  $m$  一定时， $F$  与  $\omega$  的关系；(3)  $r$  与  $\omega$  一定时， $F$  与  $m$  的关系。

综合三个实验研究的结论，探究向心力大小  $F$  与半径  $r$ 、角速度  $\omega$ 、质量  $m$  的关系。

#### 实验装置与方法

图 5-36 所示的实验装置可供本实验选用。在电动机控制下，悬臂可绕轴在水平面内匀速转动，在悬臂的转轴上固定一个无线力传感器；水平连杆的一端与无线力传感器相连，连杆上可固定砝码；无线光电门传感器安装在悬臂的一端，挡光片固定在支架上。当悬臂匀速转动时，砝码随之做匀速圆周运动。实验中力传感器测出对连杆的拉力大小等于砝码受到的向心力大小；砝码的运动半径可由悬臂上的刻度读出；测出光电门通过挡光片的瞬时速度，进而可得到悬臂旋转的角速度，即砝码的角速度。

本实验采用作图的方法分析数据，研究物理量间的函数关系。

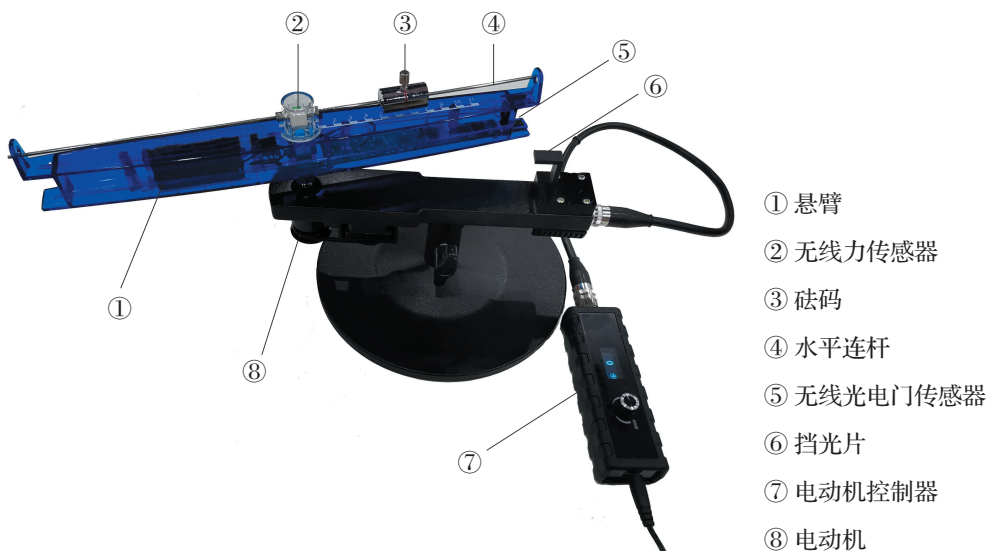


图 5-36 研究向心力的实验装置

#### 实验操作与数据收集

根据实验原理与方案的要求，使悬臂带动砝码做匀速圆周运动，测量并记录相关实验数据，填入表 5-3、表 5-4 和表 5-5。

表 5-3 实验数据记录表 ( $\omega$ 、 $m$  一定)

实验序号	1	2	3	4	5
$r/m$					
$F/N$					

表 5-4 实验数据记录表 ( $r$ 、 $m$  一定)

实验序号	1	2	3	4	5
$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$					
$F/N$					

表 5-5 实验数据记录表 ( $\omega$ 、 $r$  一定)

实验序号	1	2	3	4	5
$m/\text{kg}$					
$F/N$					

数据分析

根据实验数据，选择合适的坐标系描点作图，研究相关物理量间的关系。

实验结论

做匀速圆周运动的物体，当：

- (1)  $\omega$  与  $m$  一定时，\_\_\_\_\_；
  - (2)  $r$  与  $m$  一定时，\_\_\_\_\_；
  - (3)  $\omega$  与  $r$  一定时，\_\_\_\_\_。
- 向心力  $F$  与  $r$ 、 $\omega$ 、 $m$  的关系是：\_\_\_\_\_。

交流与讨论

- (1) 各组就实验数据进行交流，比较、分析实验结果的异同及其原因，探讨实验的改进方法。
- (2) 线速度、角速度都可以描述物体做匀速圆周运动的快慢，用本实验装置能否直接研究向心力大小与半径、线速度、质量的关系？

大量的研究表明，做匀速圆周运动的物体受到的向心力  $F$  的大小等于物体的质量  $m$ 、圆周半径  $r$  和角速度  $\omega$  的二次方的乘积，即

$$F = m\omega^2 r$$

将  $v = \omega r$  代入上式, 即可得

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

## ❓ 做匀速圆周运动物体的加速度如何确定?

物体做匀速圆周运动时受到的合力始终指向圆心, 根据牛顿第二定律, 它的加速度也始终指向圆心, 与线速度的方向垂直, 如图 5-37 所示。因此, 匀速圆周运动的加速度叫做**向心加速度 (centripetal acceleration)**, 向心加速度只改变速度的方向, 不改变速度的大小。

由向心力公式和牛顿第二定律可以得出向心加速度的表达式为

$$a = \omega^2 r \text{ 或 } a = \frac{v^2}{r}$$

在匀速圆周运动中, 由于  $r$ 、 $v$  和  $\omega$  的大小是不变的, 所以向心加速度的大小不变, 但向心加速度的方向始终指向圆心, 一直在变化, 因此, 匀速圆周运动是变加速运动。

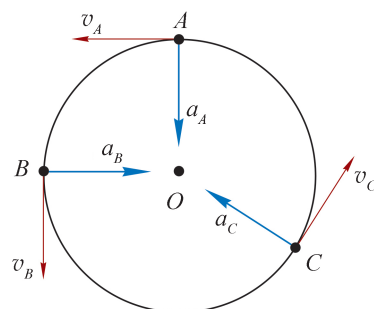


图 5-37 向心加速度

**示例 2** 如图 5-38 所示, 质量  $m = 3 \text{ kg}$  的物体放在水平的转盘上, 在半径  $r = 2 \text{ m}$  的圆周上以  $v = 4 \text{ m/s}$  的速度随转盘做匀速圆周运动。求:

- (1) 物体的向心加速度大小;
- (2) 物体受到的静摩擦力。

**分析:** 由匀速圆周运动的线速度和半径, 可直接求出向心加速度。对物体进行受力分析, 根据运动状态可确定物体受到的重力和支持力在竖直方向平衡, 平台对物体的静摩擦力提供物体做匀速圆周运动所需的向心力。根据牛顿第二定律可求出物体受到的向心力, 即静摩擦力。

**解:** (1) 由于物体随转盘一起做匀速圆周运动, 其向心加速度的大小

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{4^2}{2} \text{ m/s}^2 = 8 \text{ m/s}^2$$

(2) 如图 5-39 所示, 物体受到三个力的作用, 其中重力  $G$  和支持力  $F_N$  平衡, 转盘对物体的静摩擦力  $F_f$  指向圆心, 作为物体受到的向心力。

因此, 由牛顿第二运动定律, 物体受到的静摩擦力

$$F_f = ma = 3 \times 8 \text{ N} = 24 \text{ N}$$

静摩擦力的方向始终指向圆心。

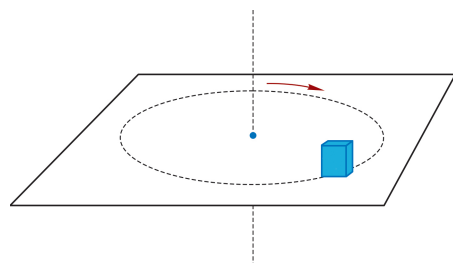


图 5-38 物体随转盘匀速转动

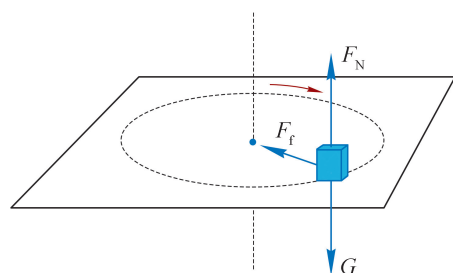


图 5-39 物体的受力分析



### 拓展视野

一般情况下，做曲线运动的物体，其速度的大小和方向都在改变，它受到的合力可以沿切线方向和法线方向分解，如图 5-40 所示。切线方向的力改变速度的大小，法线方向的力改变速度的方向。

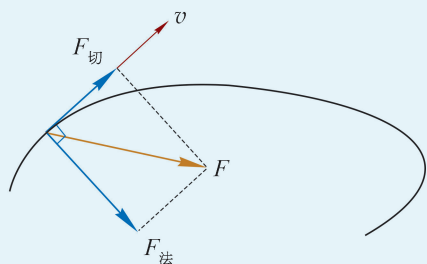


图 5-40 曲线运动中合力的分解

### 问题与思考

1. 试根据力、质量、速度和半径的单位，判断向心力公式  $F = m \frac{v^2}{r}$  是否合理。
2. 关于向心加速度与半径的关系，甲同学认为，根据公式  $a = \omega^2 r$  可得  $a$  与  $r$  成正比；乙同学认为，根据公式  $a = \frac{v^2}{r}$  可得  $a$  与  $r$  成反比。试对这两种截然不同的说法作出评价。
3. 由于地球的自转，地球上的物体都有向心加速度，试回答：
  - (1) “在地球表面各处的向心加速度的方向都是指向地心的”，这种说法是否正确？为什么？
  - (2) 在赤道和极地附近的向心加速度哪个大？为什么？
  - (3) 在上海的物体由于地球自转而产生的向心加速度为多大？
4. 有一种游乐项目，游客进入一个大型圆筒状容器后，紧靠竖直筒壁站立（图 5-41）。当圆筒开始转动后，转速逐渐增大，游客会感到自己被紧紧地压在筒壁上；当转速增大到一定数值时，底板突然下落了几厘米，游客们惊奇地发现自己竟然没有跟着底板一起下落！解释这一现象。
5. 若旋转餐厅转动一周的时间约为 1 h，某顾客坐在离转轴距离约为 20 m 的座位上。计算该顾客受到的向心力与重力的比值。
6. 线的一端系一个重物，手执线的另一端使重物在光滑水平桌面上做匀速圆周运动。在使重物运动周期相同的条件下，使用长线易断还是短线易断？为什么？

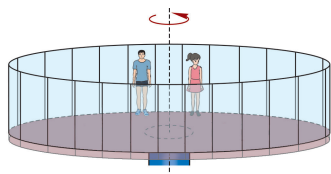


图 5-41

7. 在如图 5-42 所示的装置中,  $A$ 、 $B$  两个小球穿在光滑杆上并可沿杆滑动, 两球之间用一根细线连接。甲、乙两位同学就“装置绕轴匀速转动时, 如何能使两球相对光滑杆静止”这一问题展开讨论。甲认为, 两个小球放置在任意位置都可以。乙则认为, 两个小球只有放置在特定位置才可以。你赞同哪个观点? 试为这个观点作进一步论证。

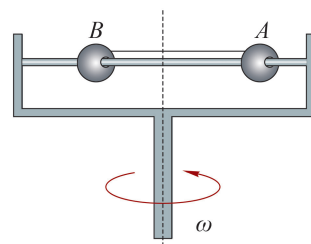


图 5-42



图 5-43 转弯的火车

## 第五节 圆周运动的应用

圆周运动的运动规律和物体做圆周运动的条件，在生活、生产和科学研究等方面有很广泛的应用。

### ❓ 如何测定分子速率？

我们知道，组成物质的分子总是在做永不停息的无规则运动。分子速率的测量对于分子热运动的研究具有重大意义。

1920 年，美国物理学家史特恩 (O. Stern, 1888—1968) 提出了一种应用圆周运动规律测定气体分子速率的方法。史特恩实验装置如图 5-44 所示。 $A$ 、 $B$  为双层共轴圆筒形容器，内筒  $A$  半径为  $r$ ，外筒  $B$  半径为  $R$ ，内外筒可同时绕转轴  $K$  以同一角速度高速旋转；容器内部抽成高度真空，沿转轴  $K$  装有一根镀银的铂丝，铂丝通电加热使银蒸发成气体，一些银原子穿过筒  $A$  的狭缝  $a$  射出，最终落于筒  $B$  的内表面。由于银原子由内筒运动到外筒需要一定时间，若容器不动，这

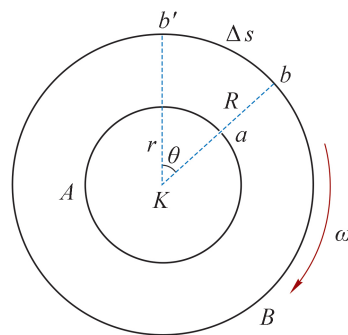


图 5-44 史特恩实验装置示意图



些原子将到达外筒内壁上的  $b$  点；若容器以角速度  $\omega$  旋转，这些原子将到达外筒内壁上的  $b'$  点。

设待测银原子的速率为  $v$ ，则原子由内筒运动到外筒所需的时间为

$$\Delta t = \frac{R - r}{v}$$

而在此时间内，外筒上的  $b'$  点转过的弧长为

$$\Delta s = R\theta = R\omega\Delta t$$

由以上两式可得

$$v = \frac{(R - r)R\omega}{\Delta s}$$

实验中只需测得  $R$ 、 $r$ 、 $\omega$ 、 $\Delta s$ ，即可求得银原子的速率。

## ❓ 车辆转弯时如何获得向心力？

汽车、火车等在运动中经常会转弯（图 5-43），转弯时的运动可以看成局部的圆周运动，转弯必须有足够的向心力作用才能完成。

汽车在水平地面上转弯时，受重力、支持力和地面对车轮的静摩擦力，竖直方向的重力与支持力平衡，只有地面对车轮的静摩擦力提供汽车转弯所需的向心力。

如图 5-45 所示，火车轨道弯道处的外轨通常略高于内轨。当火车通过弯道时，车身会向弯道的圆心倾斜很小的角度  $\alpha$ ，这时火车受到的支持力  $F_N$  与重力  $G$  的合力  $F$  沿水平方向，提供了火车转弯所需的向心力。

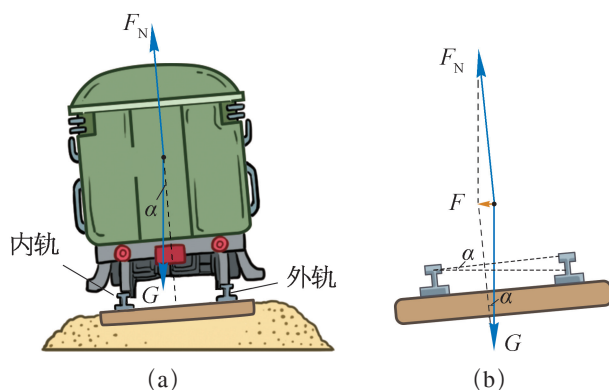


图 5-45 火车转弯时的受力分析

## ❓ 什么是离心现象？

全自动洗衣机进入甩干程序后，在电动机的带动下，洗衣机的内筒会绕轴高速旋转。随着转速的增加，附着在衣物上的水需要的向心力越来越大，当衣物对水的附着力小于水

需要的向心力时，水就会离开衣物，从筒壁的小孔中飞出，一会儿衣物上的水就基本被甩掉了。

图 5-46 所示是制作棉花糖的情景。砂糖颗粒在加热腔中融化成糖液，当加热腔高速旋转时，由于缺少足够的向心力，糖液无法维持圆周运动，便从加热腔壁上的小孔飞出，遇冷凝结成固态的糖丝，聚成一团就成了棉花糖。



图 5-46 棉花糖的制作

从上面的事例我们可以看到，做圆周运动的物体，如果受到的力不足以提供所需的向心力，物体就会远离圆心，这就是**离心现象**。

生活、生产中的离心现象有着广泛的应用，但有时也会造成危害，需要设法防范。

当汽车在道路上转弯时一定要减速慢行，尤其在雨雪天气、路面湿滑时，更要减速慢行，以防因摩擦力不足而发生离心现象——车辆发生侧滑，酿成车祸。

### 大家谈

某报道说：“冬天路面有积雪，转弯时驾驶员必须小心地平衡向心力和离心力，以免出现打滑。”试指出该报道中的科学性错误，并从理论上分析车辆打滑与哪些因素有关，再提出一些防止车辆打滑的建议。

高速转动的砂轮、飞轮等，都不得超过额定的最大转速。如果转速过高，砂轮、飞轮内部的相互作用力不足以提供需要的向心力，砂轮、飞轮的某些组成部分会被高速甩出，这类离心现象可能酿成人身伤害等事故。

飞机由俯冲拉起或翻筋斗时，飞行员的血液由于离心运动会流向下肢，造成飞行员大脑缺血，感觉四肢沉重，这种现象叫做过荷。过荷太大时，飞行员会暂时失明，甚至晕厥。飞行员可以通过加强训练、增强体质来提高抗荷能力。图 5-47 所示就是飞行员进行提升抗荷能力训练的载人离心机。



图 5-47 载人离心机

## STSE

利用离心现象的原理可以设计各种离心机械，离心节速器就是其中一种。

离心节速器的主要构件是离心式飞锤，图 5-48 所示是离心式飞锤的结构示意图。在转速增大时，重锤的离心运动使上拉杆张开一定角度，并通过下拉杆使套在竖直转轴上的套筒向上移动，带动相关的调速部件运作。转速越大，上拉杆张角越大，套筒向上移动的距离也越大。离心式飞锤具有测速、调速等多方面的用途。

在热电站里，要求汽轮机的转速能自动调节以保证在用电量变化的情况下发电机转速仍能保持稳定。采用离心式飞锤就可以随机轴转速的增减自动调节进入汽轮机的蒸汽流量，确保转速不变。如图 5-49 所示，当机轴因负载减小而转速增大时，飞锤转动加快，套筒上拉，通过杠杆将蒸汽阀门下压，使进入汽轮机的蒸汽流量减小，机轴的转速下降到额定的数值以达到稳定转速的效果。

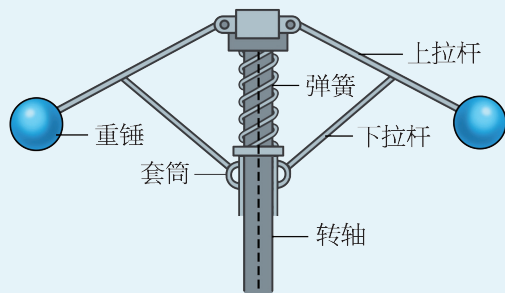


图 5-48 离心式飞锤的结构示意图

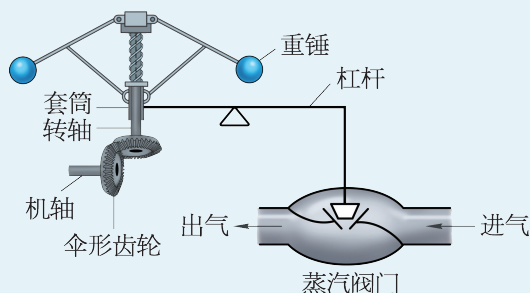


图 5-49 汽轮机转速的调节示意图

## 问题与思考

1. 图 5-50 (a)、(b) 所示是高速公路上常见的限速标志，为什么在弯道出口处的限速往往与其他路段的限速有如此大的差异？



图 5-50

2. 试解释下列常见现象。

- (1) 舞蹈演员在表演旋转动作时，裙子会张开。
- (2) 在雨中转动伞柄，伞面上的雨水会很容易被甩掉。



(3) 满载黄沙的卡车急转弯时，部分黄沙会被甩出。

3. 公路上有一段半径  $r = 50 \text{ m}$  的水平弯路，一辆质量  $m = 2.0 \times 10^3 \text{ kg}$  的汽车，其轮胎与路面间的最大静摩擦力  $F_{\text{fmax}} = 1.4 \times 10^4 \text{ N}$ ，该汽车在这段弯路上行驶的最大安全速度为多大？
4. 列举一些生活中与离心现象有关的例子。
5. 图 5-51 所示是一种可用于测定子弹速度的装置示意图，纸质圆筒绕中心轴  $OO'$  以角速度  $\omega$  旋转，子弹以一定速度沿与轴线平行的方向从圆筒一个底面上的  $A$  点射入，从另一个底面上的  $B$  点射出，射出时  $A$ 、 $B$  两点在圆筒上的位置如图中所示。若  $A$  点与  $B$  点所在半径的夹角为  $\theta$ ，圆筒的长度为  $l$ ，求子弹的速度大小  $v$ 。

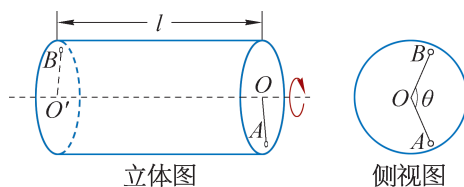


图 5-51

## 学期活动

研究自行车中的圆周运动。

自行车是日常生活中常用的交通工具。当用力蹬踏板时，后车轮就会转动，从而使自行车前进，自行车运动时许多部件都在做圆周运动。以小组为单位探究一辆自行车各转动部件的传动关系；根据匀速圆周运动的知识，计算自行车的踏板每转动一周自行车前进的距离，并通过实验测量该距离。

活动要求：

- (1) 以小组为单位（不超过 4 人）开展研究活动，进行人员分工。
- (2) 制定研究方案。
- (3) 计算踏板每转动一周自行车前进的距离。
- (4) 进行实验，记录并处理数据。
- (5) 归纳总结得出结论。
- (6) 撰写并交流研究报告。

## 小结

### • 基本概念和基本规律

曲线运动的速度方向：做曲线运动物体的速度方向是时刻改变的，物体在某一点的瞬时速度方向沿曲线在该点的切线方向。

物体做曲线运动的条件：物体所受合力的方向与其速度方向不在同一直线上。

运动的合成：已知分运动求合运动的方法。

运动的分解：已知合运动求分运动的方法。

平抛运动：以一定速度将物体水平抛出，只在重力作用下所做的运动。

平抛运动的规律：平抛运动是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动。

匀速圆周运动：物体在任意相等时间内通过的弧长总是相等的圆周运动。

角速度：物体做匀速圆周运动时转过的角度与所用时间的比。

线速度：物体做匀速圆周运动时通过的弧长与所用时间的比。

周期：做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间。

向心力：物体做匀速圆周运动时受到的与速度方向垂直、始终指向圆心的力。

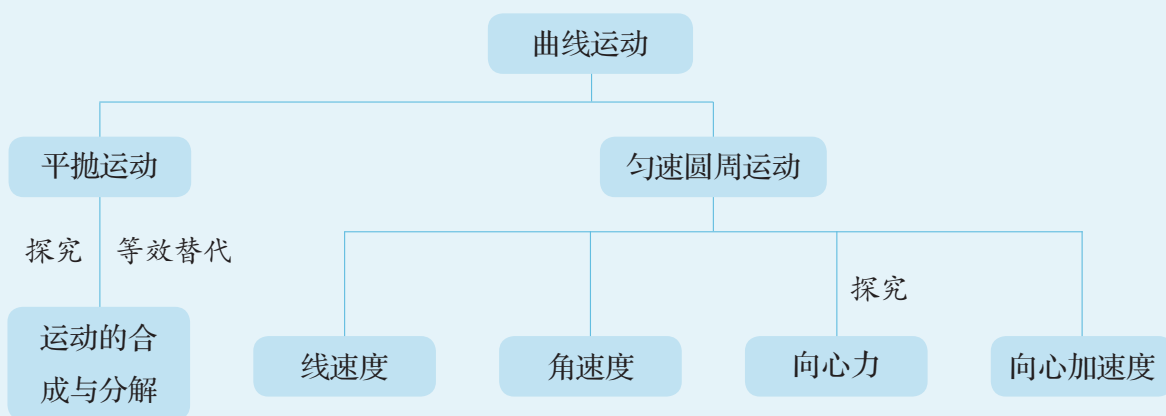
向心加速度：物体做匀速圆周运动时的加速度。做匀速圆周运动的物体在任一点的加速度都指向圆心。

### • 基本方法

通过研究平抛运动、匀速圆周运动等运动形式，认识化繁为简的研究方法。

通过探究向心力大小的实验，体会控制变量的方法。

### • 知识结构图





## 复习与巩固

1. 如图 5-52 所示, 一质点在恒力  $F$  的作用下, 由坐标原点以初速度  $v_0$  沿曲线运动至  $A$  点。质点在  $A$  点的速度  $v_t$  方向恰与  $x$  轴平行, 判断恒力  $F$  的方向是否可能沿  $x$  轴正方向或  $y$  轴正方向, 并说明理由。

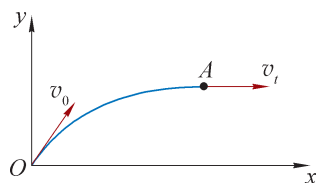


图 5-52

2. 两块相同的木块  $A$ 、 $B$  置于水平转盘上, 木块  $A$  到转轴的距离大于木块  $B$ 。在转盘越转越快的过程中, 木块  $A$  先飞离转盘, 分析说明造成这种现象的原因。
3. 三个物体  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别静止在北京、上海、广州。关于三个物体随地球自转的运动, 试分析:
- (1) 角速度  $\omega_A$ 、 $\omega_B$ 、 $\omega_C$  的大小关系;
  - (2) 线速度  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  的大小关系;
  - (3) 周期  $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$  的大小关系。
4. 有一款手摇削笔器如图 5-53 所示, 手柄的  $BO$  段长为  $l$ ,  $AB$  段长为  $d$ 。一位同学转动手柄削铅笔, 在时间  $t$  内匀速转动了  $n$  圈。
- (1) 写出手柄  $A$  处角速度和线速度大小的表达式;
  - (2) 根据日常经验估算角速度和线速度的大小。

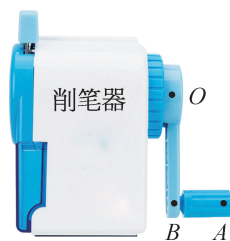


图 5-53

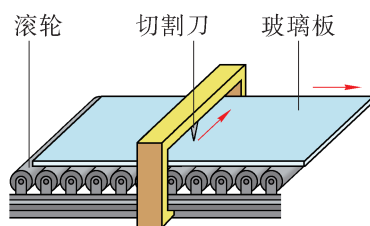


图 5-54

5. 如图 5-54 所示, 在一条玻璃生产线上, 宽  $9\text{ m}$  的成型玻璃板以  $2\text{ m/s}$  的速度向前匀速平移。在切割工序处, 垂直于流水线的刀架上的金刚石切割刀的移动速度为  $10\text{ m/s}$ 。为使割下的玻璃板呈矩形, 问:
- (1) 切割刀的移动轨迹与玻璃板平移方向的夹角应为多大?
  - (2) 切割一块玻璃需要多少时间?
6. 一架飞机在无风的天气里以  $120\text{ m/s}$  的速度在距地面  $250\text{ m}$  处水平匀速飞行, 向受雪灾影响的牧区投下成捆的干草。若忽略空气阻力, 干草经过多少时间到达地面? 干草落地时速度大小为多少?

7. 以速度  $v_0$  沿水平方向抛出一物体。

(1) 抛出多少时间后，物体水平方向和竖直方向的分速度大小相等？求此时物体的速度大小和方向。

(2) 抛出多少时间后，物体水平方向和竖直方向的分位移大小相等？求此时物体的位移大小和方向。

(3) 至少从多高处水平抛出物体，才会分别出现第 (1) 小题和第 (2) 小题中的情况？

8. 如图 5-55 所示，半径为  $r$  的圆筒  $A$  绕竖直中心轴匀速转动，筒的内壁上有一个质量为  $m$  的物体  $B$ 。物块  $B$  一边随圆筒  $A$  转动，一边以竖直向下的加速度  $a$  下滑。若物体与筒壁间的动摩擦因数为  $\mu$ ，圆筒  $A$  转动的角速度为多大？

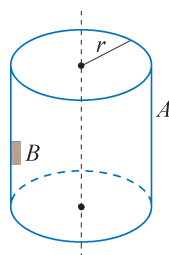


图 5-55

9. 用如图 5-56 (a) 所示的装置可以测定分子速率。在小炉  $O$  中，金属银熔化并蒸发。银原子束通过小炉的圆孔逸出，经过狭缝  $S_1$  和  $S_2$  进入真空的圆筒  $C$ 。圆筒  $C$  可绕过  $A$  点且垂直于纸面的轴以一定的角速度转动。

(1) 若已测出圆筒  $C$  的直径为  $d$ 、转动的角速度为  $\omega$ ，银原子落在玻璃板  $G$  上的位置到  $b$  点的弧长为  $s$ ，写出银原子速率的表达式；

(2) 若  $d = 1 \text{ m}$ ， $\omega = 200\pi \text{ rad/s}$ ， $s$  约为圆筒周长的  $\frac{1}{4}$ ，估算银原子速率的数量级；

(3) 如图 5-56 (b) 所示，银原子在玻璃板  $G$  上堆积的厚度各处不同。比较靠近  $b$  处与靠近  $e$  处的银原子速率哪个大，并说明理由。

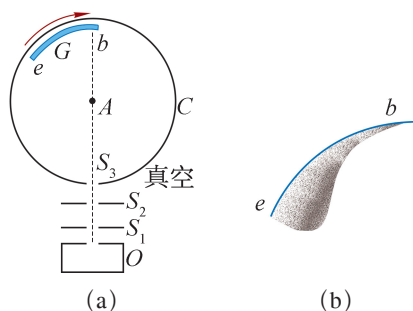


图 5-56

10. 某同学利用电磁定位板研究某物体的抛体运动，得到了如表 5-6 所示的一组数据，相邻数据对应的时间间隔均为  $0.02 \text{ s}$ 。类比平抛运动的研究过程，分析说明这个物体的运动在水平方向和竖直方向上的运动特点。

表 5-6

$x/\text{m}$	0.009	0.036	0.062	0.088	0.114	0.140	0.166	0.192	0.217	0.243	0.268	0.293
$y/\text{m}$	0.004	0.025	0.040	0.052	0.061	0.065	0.065	0.062	0.055	0.044	0.028	0.010

11. 如图 5-57 所示, 将小球从倾角为  $45^\circ$ 、高 1.8 m 的斜面顶端  $A$  处水平抛出, 刚好落在斜面底端  $B$  处。

(1) 抛出后经过多少时间, 小球的速度方向恰好与斜面平行?

\* (2) 小球在运动过程中离斜面的最大距离是多少?

\*12. 如图 5-58 所示为排球比赛场地示意图。球场总长 18 m, 网高 2.43 m。运动员在离网 3 m 处 (前排 3 m 线) 跳起并沿水平方向将排球击出, 击球点的高度为 3.23 m。试讨论击出排球的水平初速度在什么范围内才能使排球既能过网又不会出界?

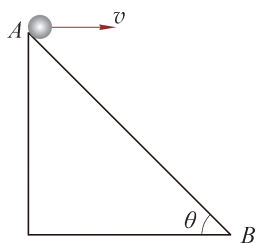


图 5-57

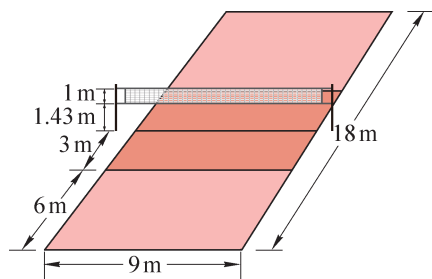
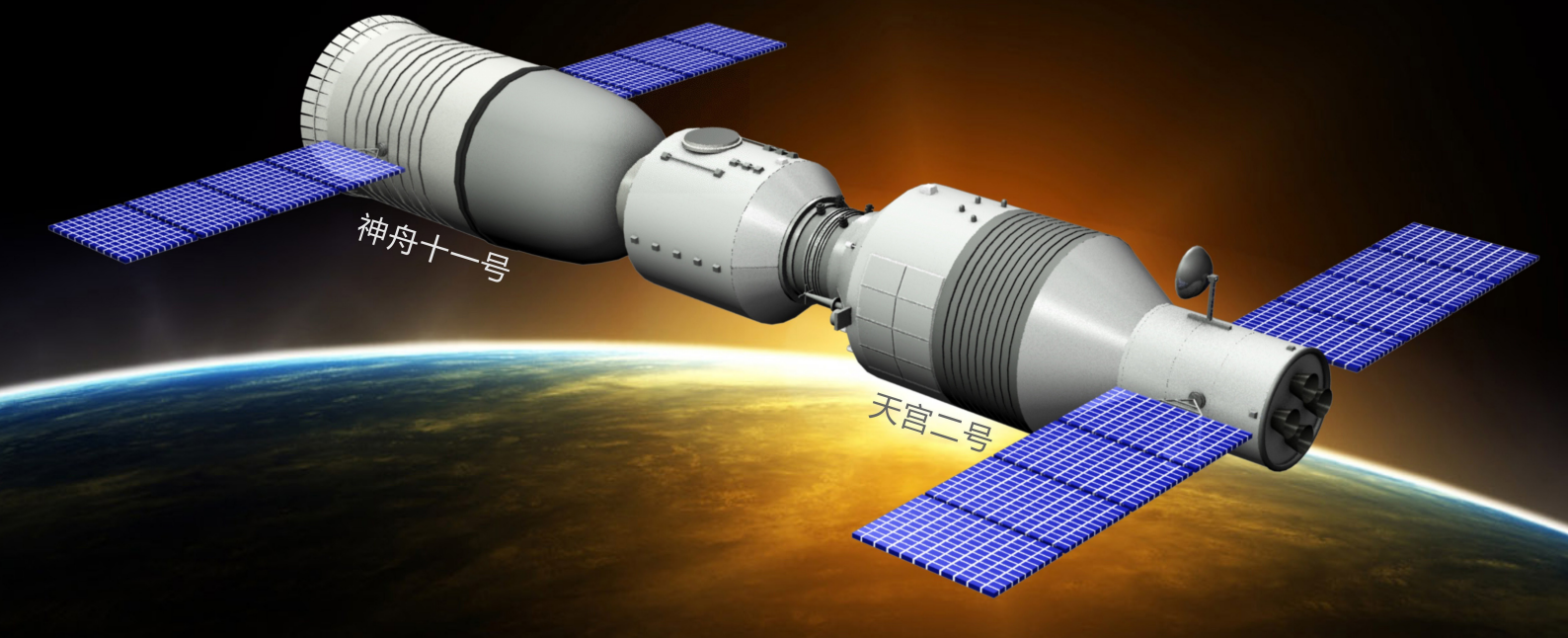


图 5-58





图示为我国“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接过程的模拟图。“神舟十一号”与“天宫二号”的对接过程仿佛是在太空中穿针引线，要让两个航天器在约  $7.67 \text{ km/s}$  的速度下完美对接，是一个非常复杂的过程。你知道图示情境中的对接处距地面有多高吗？

## 第六章

# 万有引力定律

- 在本章中我们将：

1. 知道万有引力定律。
2. 了解万有引力定律的发现过程，认识其重要意义以及科学定律对人类探索未知世界的作用。
3. 运用万有引力定律分析简单的天体运动问题。

- 本章的学习将用到匀速圆周运动规律和牛顿第二定律。

- 本章的学习有助于通过物理定律的普适性认识自然界的统一性，体会人类对自然规律的探索历程，加强运动和相互作用的观念。

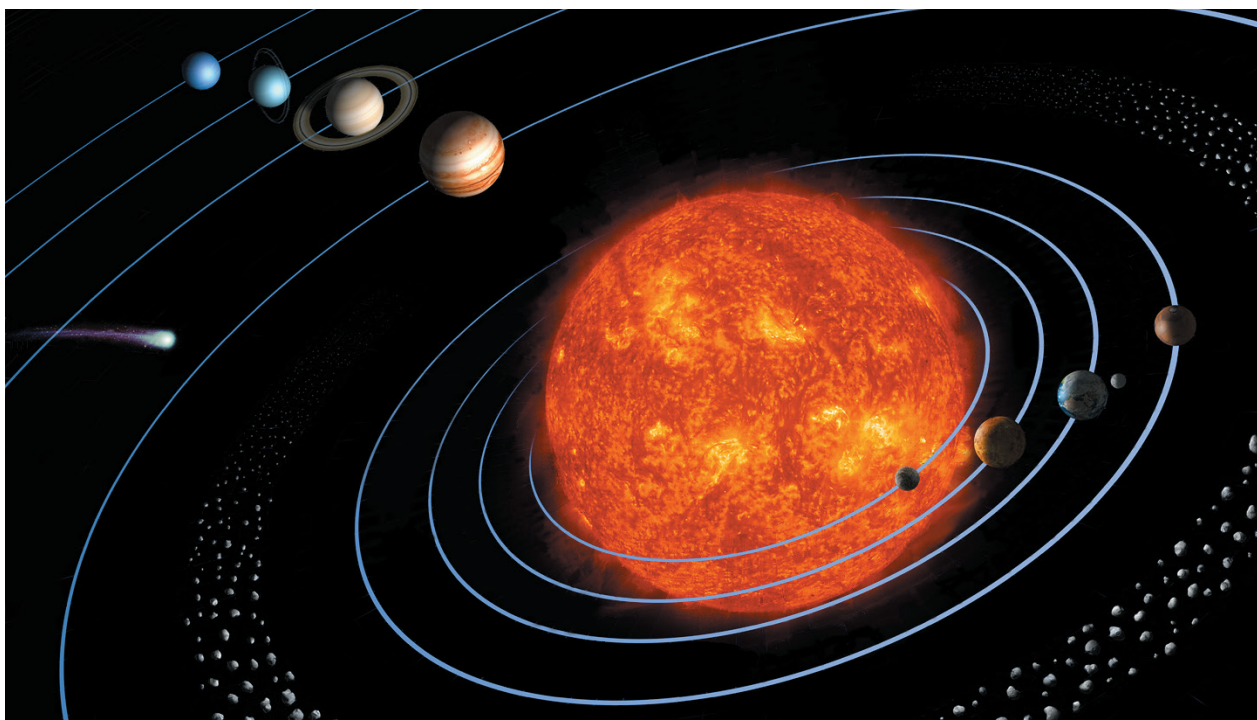


图 6-1 太阳系模型图

## 第一节 行星的运动

日升月落，斗转星移。自古以来人类仰望天空，对各种天文现象充满好奇，并试图破解其中的奥秘。大约在公元前 500 年，作为科学的天文学开始起步，人类开始探寻对这些现象的进一步认识，对天空的认知也从太阳系（图 6-1）逐步走向浩瀚的宇宙。

### ❓ 人类在早期是如何认识天体运动的？

地心说和日心说是历史上关于天体运动的两种重要学说。

地心说经过几个世纪的发展，到公元 2 世纪由古代天文学家托勒密（图 6-2）进一步完善而成。地心说认为地球静止不动，是宇宙的中心；太阳、月亮和行星等所有天体都绕地球运动。地心说能解释一些天文现象，符合人们的日常经验。

地心说延续了一千多年之后，随着生产和航海事业的发展，天文观测的资料日益丰富，人们发现地心说的理论与实际的观测资料并不完全一致，也不能准确解释某些天文现象。

16 世纪，波兰天文学家哥白尼（图 6-3）利用前人积累的天文资料，经过近 40 年的观测和研究，提出了日心说。日心说



图 6-2 托勒密  
(C. Ptolemy, 约 90—168)

认为太阳是宇宙的中心，地球和其他行星围绕太阳运动（图 6-4）。哥白尼的学说能简洁地解释“火星逆行”等行星运动的现象，可以简单明了地说明许多天文学的问题。虽然日心说受到当时社会的阻挠和禁止，但还是很快传播开来。哥白尼日心说的提出，不仅铺平了通向近代天文学的道路，而且开创了自然科学的新时代。

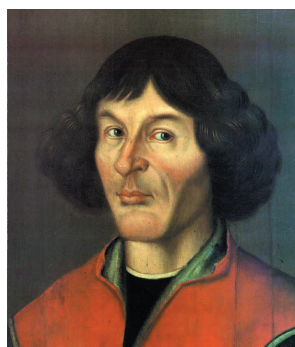


图 6-3 哥白尼 (N. Copernicus, 1473—1543)

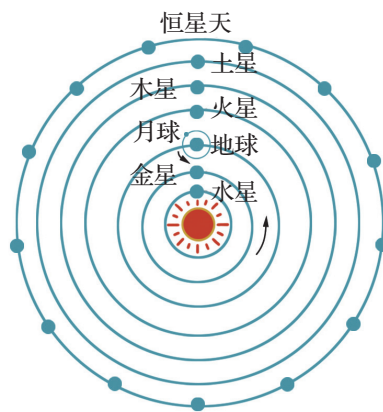


图 6-4 哥白尼日心说示意图

直到 17 世纪初，伽利略用自己发明的望远镜观察天空，发现了围绕木星运动的“月球”，从而证明地球并非所有天体的中心。至此，地心说才真正退出历史舞台。

### 拓展视野

通常观察到火星在天空中的运动是沿着同一个方向缓慢而稳定地在遥远的背景星前面移动。但大约每过两年，地球会在绕日的轨道上超越火星，在此期间火星显得非常大而亮，这段时间内观察火星会发现火星在天空上倒着走，这个现象称作火星逆行。如图 6-5 所示的是火星逆行的示意图。地心说在解释这一现象时遇到了很大的困难，用日心说对该现象进行解释则简洁许多。

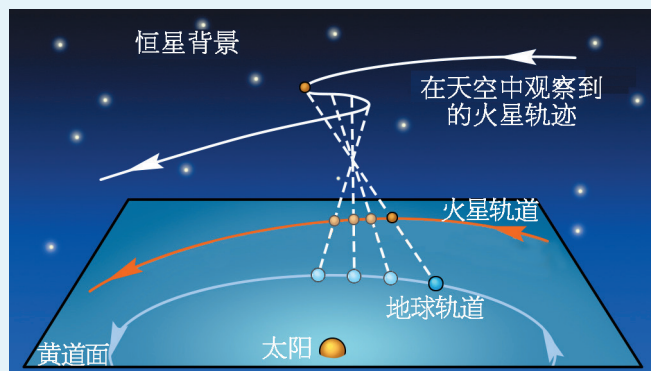


图 6-5 火星逆行现象示意图

## 行星的运动有什么规律？

德国天文学家开普勒（图 6-6）支持哥白尼的日心说，他仔细研究了丹麦天文学家第谷（T. Brahe, 1546—1601）花了连续 20 年对行星仔细观测积累的资料，经过 4 年多的



刻苦计算，最后发现行星运动的真实轨道不是圆，而是椭圆。1609年，开普勒发表了著名的开普勒第一和第二定律。开普勒第一定律把太阳的位置精确标定在椭圆的一个焦点上，各行星都在椭圆轨道上绕太阳运行。开普勒第二定律也叫“面积定律”，提出了行星与太阳的连线在相等时间内扫过的面积相等，这就解释了行星在近日点运动快、在远日点运动慢的原因（图6-7）。1619年，开普勒又在《宇宙和谐论》一书中发表了开普勒第三定律，即行星绕太阳运行的椭圆轨道半长轴  $a$  的三次方与周期  $T$  的二次方之比是一个常量，即

$$\frac{a^3}{T^2} = k$$

式中， $k$  是一个与行星无关的常量。



图 6-6 开普勒 (J. Kepler, 1571—1630)

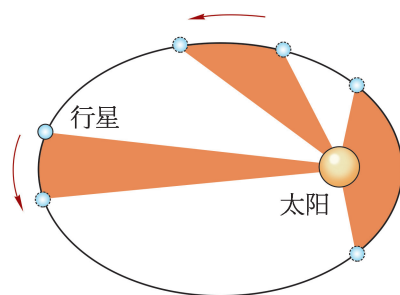


图 6-7 开普勒第二定律

实际上，行星的椭圆轨道都接近于圆，在中学阶段的研究中我们一般可近似地按圆轨道处理。因此，若用  $r$  表示行星圆轨道的半径，则有

$$\frac{r^3}{T^2} = k$$

### 拓展视野

可以用一根细绳和两枚钉子来画椭圆，如图6-8所示。绳的两端用钉子固定在纸上，再用笔尖保持绳始终绷紧画线，绕中心  $O$  一圈所画的线就形成了椭圆。两枚钉子的位置就是椭圆的焦点，焦点所在的较长的虚线就是椭圆的长轴，其长度的一半就叫半长轴，常记为  $a$ 。半长轴是中心到椭圆的最大距离。

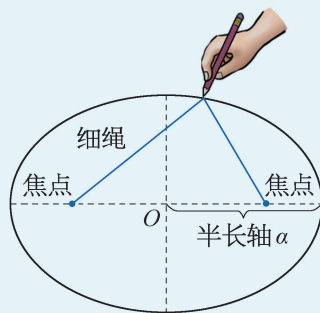


图 6-8 椭圆的绘制

开普勒的成就表明，观察是科学研究的开端。观察激发思考，进而发现科学规律，建立新的理论，这些规律和理论又引发新的观察和思考，人类就是这样在科学的大道上前行。开普勒三定律已经传达了重大的“天机”，蕴涵着更为简洁、更为普遍的规律，其中的奥秘直到牛顿万有引力定律的建立才最终被“破译”出来。

### 问题与思考

1. 人类对天体运动的认识在不断发展，简述托勒密、哥白尼、第谷和开普勒对天文学发展作出的贡献。
2. 17 世纪，天文学家哈雷观察到一颗彗星，这颗彗星绕太阳运行的轨道示意图如图 6-9 所示。彗星最近飞临地球的时间是在 1986 年。在如图位置飞临地球阶段，彗星运动速度的大小如何变化？简述理由。

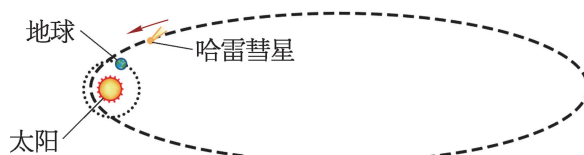


图 6-9

3. 判断下列关于行星绕太阳运动的描述是否正确，并说明理由。
  - (1) 太阳处于椭圆轨道的中心。
  - (2) 所有行星在同一椭圆轨道上运动。
  - (3) 轨道半长轴越短的行星周期越长。
  - (4) 行星从近日点运动到远日点过程中速率逐渐减小。
4. 天文学家发现一颗小行星沿近似圆形轨道绕太阳运行，测得该轨道的平均半径约为地球公转轨道半径的 3 倍。这颗小行星绕太阳运行的周期大约是多少年？



图 6-10 浩瀚宇宙与万有引力

## 第二节 万有引力定律

1665 年 8 月，22 岁的牛顿为躲避英国剑桥的鼠疫回到家乡林肯郡。这期间他研究了许多科学问题，包括开普勒的行星运动定律。在此基础上，牛顿经过长期研究，最终发现了茫茫星空中的天体与地球上的物体共同遵循的物理规律——万有引力定律（图 6-10）。

据传，当牛顿在思考月亮绕地球运行的原因时，看见窗前一棵树上落下一个苹果，这引起了他的思考。为什么苹果会落下来，而月亮却没有落下来？

### ❓ 什么力使月亮绕地球运行？

牛顿认为，或许使苹果下落的力同样使月亮向地球“下落”，而就是这个“下落”才使月亮不断改变方向而始终保持在绕地球运行的轨道上。

牛顿的思考是：水平抛出一个苹果，它将沿曲线落回地面；苹果抛出得越快，它就会落得越远。如果把苹果抛出得足够快，它就可以绕过地球表面的大部分圆周，甚至能永远不会落回地面而变成绕地球运行（图 6-11）。

牛顿的思考并未就此止步，月亮到底受到什么力的作用才使其绕地球运行？这个力与行星绕太阳运行所受的力是否类似？用这种力能不能解释开普勒三定律？

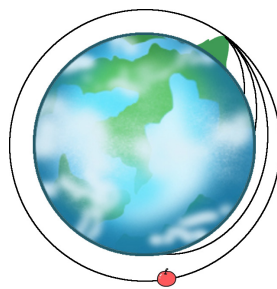


图 6-11

从苹果到月亮



牛顿在大胆猜想的基础上,经过大量严谨的推演,终于揭开了天体运动的神秘面纱。1684年,牛顿得出,不论是天上的两个天体之间还是地上两个物体之间都存在与距离的二次方成反比的引力,正是由于这个引力导致苹果落地和行星在不同的轨道上运动。就这样,地面上物体运动的规律和天体运动的规律统一了。

牛顿认为,地球对苹果的引力、地球对月亮的引力与太阳对行星的作用力本质上都完全相同,而且无论天上、地上还是天地之间的任何两个物体之间全都存在这种引力。牛顿把这种所有物体之间都存在的相互吸引力叫做**万有引力 (universal gravitation)**。

牛顿的这种统一观念是物理学中普适性的经典,鼓舞了很多有才华的青年走上了物理学研究的道路。诺贝尔物理学奖获得者李政道(1926— )曾说,物理法则既适用于地球上你卧室里的现象,也适用于火星上的现象,这一思想对学生时代的他来说是新颖的,激发了他的兴趣,物理法则的普适性深深打动了她。

## 🔍 万有引力的大小如何确定?

牛顿发现了万有引力,并推出**万有引力定律 (law of universal gravitation)**:自然界中任何两个物体都相互吸引,相互间引力的大小与物体质量的乘积成正比,与它们之间距离的二次方成反比。

若用  $m_1$ 、 $m_2$  分别表示两物体的质量,  $r$  表示两物体间的距离,则万有引力定律可表示为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中,质量的单位为 kg,距离的单位为 m,力的单位为 N。 $G$  是比例系数,叫做**引力常量 (gravitational constant)**,是一个既有数值又有单位的常量,  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ,适用于任何两个物体之间的引力。

这里所说的距离  $r$  是指可以看成质点的两物体间的距离,若是质量均匀分布的球体则是两个球心间的距离。

### 拓展视野

许多大行星的椭圆轨道非常接近圆轨道。设太阳的质量为  $m_1$ ,行星的质量为  $m_2$ ,行星公转的轨道半径为  $r$ 、周期为  $T$ ,太阳对行星的引力大小为  $F$ 。行星公转运动的线速度大小  $v = \frac{2\pi r}{T}$ 。

由于  $F$  提供了行星绕太阳做圆周运动的向心力,则  $F = m_2 \frac{v^2}{r} = m_2 \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ 。

由开普勒第三定律可知,  $T^2 \propto r^3$ , 则  $F \propto \frac{m_2}{r^2}$ 。

根据牛顿第三定律, 太阳受到行星的引力大小  $F' = F$ 。也就是说, 在引力的存在与性质上, 行星和太阳的地位完全相当, 因此, 既然  $F \propto \frac{m_2}{r^2}$ , 必有  $F' \propto \frac{m_1}{r^2}$ 。

所以,  $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 。

## 引力常量是如何测得的?

1798 年, 英国物理学家卡文迪什 (H. Cavendish, 1731—1810) 巧妙地利用扭秤装置, 第一次在实验室里比较精确地测出了引力常量。

卡文迪什扭秤的主要结构和原理如图 6-12 所示, 装有平面镜  $M$  和两个相同小球  $a$ 、 $b$  的 T 形架, 用石英丝悬吊起来, 当小球  $a$ 、 $b$  被大球  $c$ 、 $d$  吸引时, T 形架和石英丝会发生极其微小的扭转, 利用平面镜对光的反射能测出这个微小的扭转角, 进而测量出大球与小球间极微小的万有引力。卡文迪什由此验证了万有引力定律, 并测出了引力常量  $G$  的数值。

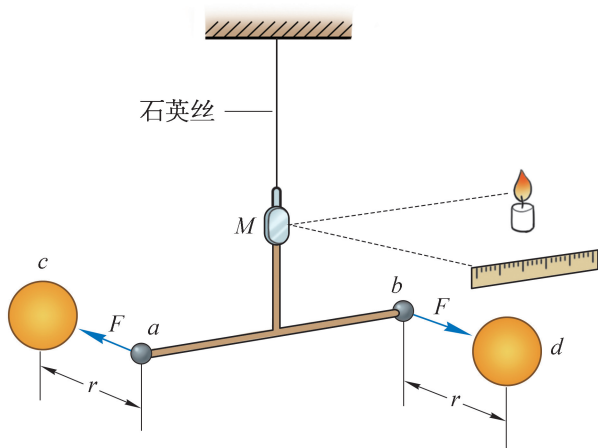


图 6-12 卡文迪什扭秤实验示意图

### 大家谈

如果万有引力突然消失, 世界将会变成什么样子?

**示例** 已知地球的质量  $m_{\text{地}} = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$ , 地球半径  $r_{\text{地}} = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ 。利用万有引力定律计算地球表面重力加速度  $g$  的大小。

**分析:** 地球表面的物体所受到的重力近似等于地球对物体的万有引力。由引力常量、地球质量和半径可以计算地球表面的重力加速度。

**解:** 设地球上有一物体的质量为  $m$ , 物体所受重力为  $mg$ , 地球对物体的万有引力为  $G \frac{m_{\text{地}} m}{r_{\text{地}}^2}$ , 由  $mg = G \frac{m_{\text{地}} m}{r_{\text{地}}^2}$  可得

$$g = G \frac{m_{\text{地}}}{r_{\text{地}}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{5.972 \times 10^{24}}{(6.371 \times 10^6)^2} \text{ m/s}^2 \approx 9.81 \text{ m/s}^2$$

在上例的计算中，之所以能认为物体受到的重力近似等于地球对物体的万有引力，是由于忽略了地球自转的影响，但是这样计算得到的重力加速度的值与实验中测得的地球表面重力加速度的平均值 ( $9.80 \text{ m/s}^2$ ) 非常接近。

### 问题与思考

1. “我们说苹果落向地球，而不说地球向上运动碰到苹果，是因为地球的质量比苹果大得多，地球对苹果的引力比苹果对地球的引力大得多。”这种说法对吗？为什么？
2. 简述如何在卡文迪什扭秤实验中用“放大法”测量 T 形架转动的微小角度。
3. 根据天文观测，在距离地球 430 l.y. 处有两颗恒星，它们的质量分别为  $1 \times 10^{31} \text{ kg}$  和  $6.4 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，半径分别为  $4.86 \times 10^{10} \text{ m}$  和  $2.4 \times 10^9 \text{ m}$ ，它们之间的距离为  $7.57 \times 10^{12} \text{ m}$ 。能否用万有引力定律直接计算它们之间的万有引力大小？(l.y. 为长度单位光年的符号，即光在一年内传播的距离， $1 \text{ l.y.} \approx 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$ )
4. 氢原子是由一个质子和一个电子组成的，质子的质量是  $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量是  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。在氢原子中，电子和质子相距约  $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，两者间的万有引力有多大？
5. 我们知道，任何两个物体间一定存在万有引力。为什么图 6-13 中放在水平地面上的两个铅球没有因为万有引力而吸引在一起？它们的万有引力与重力之比约为多少？
6. 地球的质量约为月球质量的 81 倍。假设月球探测器“嫦娥一号”沿地月连线飞行，当地球对它的引力和月球对它的引力大小相等时，“嫦娥一号”与地心和月心之间的距离之比是多少？



图 6-13



图 6-14 “嫦娥四号”探测器

### 第三节 万有引力定律的应用

自古以来，人类除了感叹宇宙的深奥莫测，也期盼能离开地球飞向宇宙。万有引力定律揭示了天体运动的规律，是研究天体运动的重要理论依据。20 世纪 50 年代兴起的航天技术，也是以万有引力定律作为重要的理论基础。万有引力定律的建立对天文学和航天技术的发展起了很大的推动作用。

#### 🔍 如何“称量”地球和太阳的质量？

地面上质量为  $m$  的物体受到的重力近似等于地球对该物体的万有引力

$$mg = G \frac{mm_{\text{地}}}{r_{\text{地}}^2}$$

式中， $m_{\text{地}}$  是地球的质量， $r_{\text{地}}$  是地球半径。由此可得

$$m_{\text{地}} = \frac{gr_{\text{地}}^2}{G}$$

在卡文迪什测出引力常量之前，人们已经测得  $g$  和  $r_{\text{地}}$ ，所以一旦测得引力常量  $G$ ，就可以通过上式算出地球质量  $m_{\text{地}}$ 。因此，卡文迪什把自己的实验说成是“称量地球质量的实验”。



## 大家谈

月球绕地球公转的周期为 27.3 天，若要计算地球的质量和平均密度，还需要知道哪些条件？

运用万有引力定律不仅可以“称量”地球的质量，还可以“称量”太阳的质量。

假设太阳的质量为  $m_{\text{日}}$ ，某个行星的质量为  $m$ ，两者间的距离为  $r$ ，行星绕太阳公转的角速度为  $\omega$ ，周期为  $T$ ，行星与太阳之间的万有引力为  $F$ ，则有

$$F = G \frac{mm_{\text{日}}}{r^2}$$

由于行星做匀速圆周运动的向心力  $F$  由太阳对行星的万有引力提供，根据向心力表达式，则有

$$F = m\omega^2 r = m \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r$$

将两式联立可得

$$m_{\text{日}} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

天文观测表明，地球绕太阳公转的轨道半径为  $1.49 \times 10^{11} \text{ m}$ ，周期为  $3.16 \times 10^7 \text{ s}$ ，代入上式得

$$m_{\text{日}} = \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.49 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (3.16 \times 10^7)^2} \text{ kg} \approx 1.96 \times 10^{30} \text{ kg}$$

如果已知卫星绕行星公转的周期以及卫星和行星之间的距离，利用同样的方法，我们也可以“称量”行星的质量。

## 🔍 万有引力定律对天文学还有什么突出贡献？

1705 年，英国天文学家哈雷 (E. Halley, 1656—1742) 在整理彗星观测记录时发现，1682 年、1607 年和 1531 年出现的 3 颗彗星轨迹看起来如出一辙。他猜测这三次出现的彗星可能是同一颗彗星，他继续查询更早的记录，发现每隔 76 年左右都会有相同的观测记录。在此基础上，哈雷运用万有引力定律反复推算，验证自己的猜测，最后预言这颗彗星将于 1759 年再次出现。

虽然哈雷于 1742 年去世了，但全世界的天文学家都在 1759 年等待哈雷预言的这颗彗星。3 月 13 日，这颗明亮的彗星果然拖着长长的尾巴出现在夜晚的星空中。为了纪念哈雷，人们用他的名字来命名这颗彗星。早在公元前 613 年（春秋时期），我国就发现了哈

雷彗星并载入《春秋·文公十四年》：“秋七月，有星孛入于北斗。”到1910年，哈雷彗星共计34次回归，我国史籍中的记录就多达31次，从公元前240年至公元1910年有连续29次的观察记录。哈雷彗星最近一次回归的时间是1986年（图6-15）。



图6-15 哈雷彗星

海王星的发现是应用万有引力定律的另一个重大成就。

到18世纪，人们已经知道太阳系有7颗行星，而且发现天王星的运行轨道总是与万有引力定律的计算结果有比较大的偏离。当时有人推测，在天王星的轨道外侧可能还有一颗未被发现的行星，正是这颗行星对天王星的引力作用导致了上述偏离。

英国剑桥大学的学生亚当斯和法国的天文爱好者勒维烈根据天王星的观测资料，各自独立地运用万有引力定律计算出这颗“新”行星的轨道。

1846年9月23日晚，德国天文台的加勒在勒维烈预言的位置附近观察到了这颗行星。这就是太阳系的第八颗行星——海王星。人们称其为“笔尖下发现的行星”。

## ❓ 什么是“第一宇宙速度”？

按照牛顿设想，以足够大的速度水平抛出的苹果可以绕地球做圆周运动。那么，究竟要多大的速度才能使苹果成为地球的“人造卫星”？

假设地球的质量为 $m_{\text{地}}$ ，人造卫星的质量为 $m$ ，其绕地球做匀速圆周运动的线速度大小为 $v$ ，人造卫星到地心的距离为 $r$ 。若要使人造卫星不“落回地面”，则

$$G \frac{mm_{\text{地}}}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

由此可得

$$v = \sqrt{\frac{Gm_{\text{地}}}{r}}$$

近地卫星一般在离地面100~200 km的高度飞行，与地球半径相比这个高度可以忽略不计，因此可以用地球半径 $r_{\text{地}}$ 近似代替近地卫星到地心的距离 $r$ 。代入数据可得

$$v = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6.37 \times 10^6}} \text{ m/s} \approx 7.9 \times 10^3 \text{ m/s} = 7.9 \text{ km/s}$$

这就是物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动的速度，叫做**第一宇宙速度**（**first cosmic velocity**）。若以第一宇宙速度水平抛出苹果，苹果将不再落回地面，而成为地球的“人造卫星”。

**示例** 我国于 1970 年 4 月发射的第一颗人造地球卫星“东方红一号”(图 6-16)可近似看成沿圆轨道做匀速圆周运动,这颗卫星离地球表面的平均高度  $h = 1.41 \times 10^6 \text{ m}$ 。已知地球半径  $r_{\text{地}} = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$ ,地球质量  $m_{\text{地}} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ ,求该卫星绕地球运行的速度和周期。

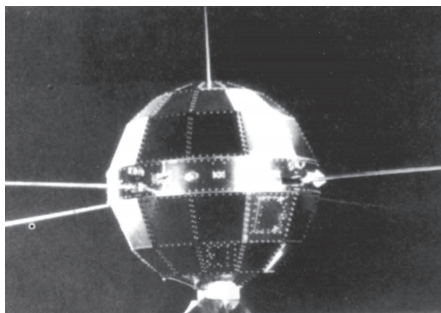


图 6-16 人造卫星“东方红一号”

**分析:** 卫星受到地球的万有引力提供其绕地球运行的向心力。根据万有引力定律和向心力表达式,可以计算卫星的速度和周期。

**解:** 卫星绕地球做匀速圆周运动轨道的平均半径

$$r = r_{\text{地}} + h = (6.37 \times 10^6 + 1.41 \times 10^6) \text{ m} = 7.78 \times 10^6 \text{ m}$$

设卫星质量为  $m$ , 卫星绕地球运行速度为  $v$ , 由于卫星受到地球的万有引力即为其绕地球运行的向心力, 有

$$G \frac{m_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

则

$$v = \sqrt{\frac{G m_{\text{地}}}{r}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{7.78 \times 10^6}} \text{ m/s} \approx 7.15 \times 10^3 \text{ m/s}$$

由匀速圆周运动的周期公式,得卫星绕地球运行的周期

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3.14 \times 7.78 \times 10^6}{7.15 \times 10^3} \text{ s} \approx 6.83 \times 10^3 \text{ s} \approx 114 \text{ min}$$

### 大家谈

上例中计算出的卫星运行速度为什么小于第一宇宙速度?

由万有引力定律可知,卫星的线速度增大,地球对卫星的引力并不会增大。若引力不足以提供向心力使卫星做匀速圆周运动,卫星就会产生离心现象远离地球。进一步的理论计算表明,如果发射卫星的初速度大于  $7.9 \text{ km/s}$  而小于  $11.2 \text{ km/s}$ , 卫星绕地球运行的轨道将是椭圆轨道,如图 6-17 所示。

如果初速度超过  $11.2 \text{ km/s}$ , 卫星就能完全摆脱地球引力的束缚,成为围绕太阳运行的“人造行

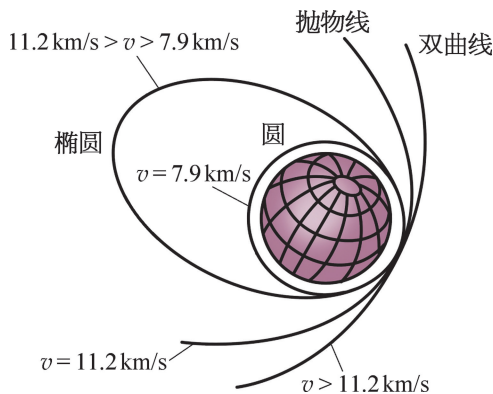


图 6-17 卫星的轨道与发射速度的关系

星”。通常将  $11.2\text{ km/s}$  这一速度叫做**第二宇宙速度**（**second cosmic velocity**）。

若要摆脱太阳引力的束缚，飞到太阳系以外的宇宙空间去，发射卫星的初速度必须达到  $16.7\text{ km/s}$ ，这个速度叫做**第三宇宙速度**（**third cosmic velocity**）。

## 🔍 我国的航天事业取得了哪些成就？

经过 60 多年的奋斗，我国航天事业取得了以人造卫星、载人航天、深空探测等为标志的辉煌成就。

### • 航天运载系统

长征系列运载火箭是我国自行研制的航天运载工具，为我国航天事业提供了强有力的支撑。长征系列运载火箭起步于 20 世纪 60 年代。1970 年 4 月 24 日，“长征一号”运载火箭首次将“东方红一号”卫星送入预定轨道。2016 年，新一代运载火箭“长征五号”的成功首飞标志着运载火箭完成升级换代。应用该型火箭发动机的“长征六号”“长征七号”新型运载火箭实现首飞，以及“长征十一号”固体运载火箭成功发射使我国航天运载系统进一步完善。

### • 人造地球卫星

自 1970 年 4 月发射第一颗人造地球卫星“东方红一号”以来，我国已经发射了数百颗人造卫星，如“风云”“海洋”等系列对地观测卫星，“亚太”“中星”等系列通信卫星，“天通一号”移动通信卫星，以及由三颗“天链一号”卫星组成的第一代数据中继卫星系统。由我国自主建设、独立运行的北斗卫星导航系统已建成开通。

### • 载人航天

2003 年 10 月，“神舟五号”载人飞船首次把我国航天员杨利伟送上太空，绕地球运行 14 圈后安全返回地球。2012 年 6 月和 2013 年 6 月，“神舟九号”和“神舟十号”载人飞船先后成功发射，与“天宫一号”目标飞行器实施对接。2022 年 10 月 31 日，梦天实验舱发射成功，与天和核心舱、问天实验舱组成空间站“T”字基本构型，

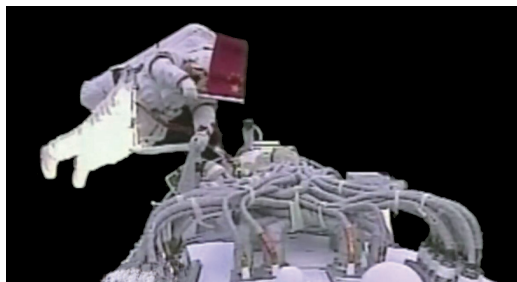


图 6-18 航天员翟志刚首次空间出舱

标志着我国空间站的建设又迈出了关键一步。我国已掌握了载人天地往返、空间出舱（图 6-18）、空间交会对接、组合体运行、航天员中期驻留等载人航天领域的重大技术。

### • 月球探测

2007 年 10 月，我国第一个月球探测器“嫦娥一号”成功发射；2012 年 12 月，“嫦娥



二号”成功实施小行星“飞越探测”；2013年12月，“嫦娥三号”完成月球表面巡视探测。2014年11月，月球探测工程三期飞行试验的圆满成功，标志着我国完全掌握航天器以接近第二宇宙速度“再入返回”的关键技术。

2019年1月3日10时26分，“嫦娥四号”探测器自主着陆在月球背面，实现了人类探测器首次在月球背面软着陆（图6-14），这也意味着中国成为世界上首个在月背实施软着陆的国家。其携带的“玉兔二号”月球车已开始对月球背面进行科学探测（图6-19）。这是每位中国人深受鼓舞并为之骄傲的。

我国航天事业从无到有、从弱到强、飞速跨越发展，离不开以钱学森（图6-20）为代表的一大批热爱祖国、艰苦奋斗、无私奉献、勇于登攀的科学家。1934年，钱学森从上海交通大学毕业后，先后在美国麻省理工学院和加州理工学院深造，1938年获博士学位。为报效祖国，钱学森克服了当时美国政府的重重阻挠，于1955年辗转回到祖国。在钱学森的带领下，我国于1960年成功发射了第一枚近程导弹，1970年成功把中国第一颗人造卫星“东方红一号”送入预定轨道……2003年，“长征二号”运载火箭将“神舟五号”载人飞船送入太空……钱学森为组织领导我国火箭、导弹和航天器的研究发展工作发挥了巨大作用，对我国航天事业和国防事业的迅速发展作出了卓越的贡献，被誉为“中国航天之父”。

为传承航天精神、激发创新热情，自2016年起，我国将每年4月24日设立为“中国航天日”。未来，我国的航天事业将继续蓬勃发展，并不断加强与世界各国的联系与合作，为人类的和平与安全、生存与发展贡献力量。

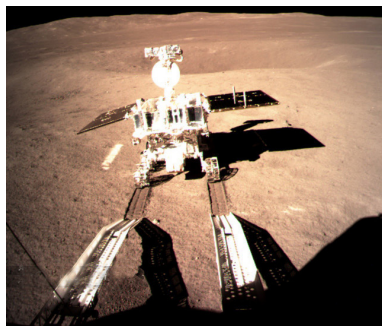


图6-19 “玉兔二号”月球车



图6-20 钱学森（1911—2009）

### 问题与思考

1. 已知月球半径为  $1.7 \times 10^6 \text{ m}$ ，质量为  $7.3 \times 10^{22} \text{ kg}$ ，则月球表面的重力加速度为多大？猜想并描述登月航天员在月球表面的行动会是怎样的情形。
2. 已知海王星以近似圆轨道绕太阳运行，半径为  $4.50 \times 10^{12} \text{ m}$ 。已知太阳的质量为  $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，试计算海王星绕太阳运行的周期。
3. 若某人造地球卫星因某种原因绕地球运行的圆形轨道半径逐渐减小，分析说明该卫星运行速率和周期的变化情况。

4. 根据章首图的说明和地球质量与半径的数据, 估算“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接处距地面的高度。
5. 在北斗卫星导航系统中, 北斗 - G6 卫星在赤道上方约  $3.59 \times 10^4 \text{ km}$  处的圆形轨道上运行, 恰好相对于地球表面静止不动, 是一颗“地球同步卫星”。分析说明该卫星为什么是“静止不动”的。
6. 在牛顿“抛苹果”的理想实验中, 用于抛苹果的装置必须安置在距地面高  $150 \text{ km}$  的“高山之巅”(地球半径为  $6.37 \times 10^3 \text{ km}$ ), 才能忽略空气阻力。抛出苹果的初始速率达到多大时, 苹果才能回到原处? 苹果再次回到装置处需要多少时间?

## 小结

### • 基本概念和基本规律

万有引力：任何物体之间都存在的相互吸引的力。

万有引力定律：自然界中任何两个物体间都相互吸引，相互间引力的大小与物体质量的乘积成正比，与它们之间距离的二次方成反比。

第一宇宙速度：物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动的速度。

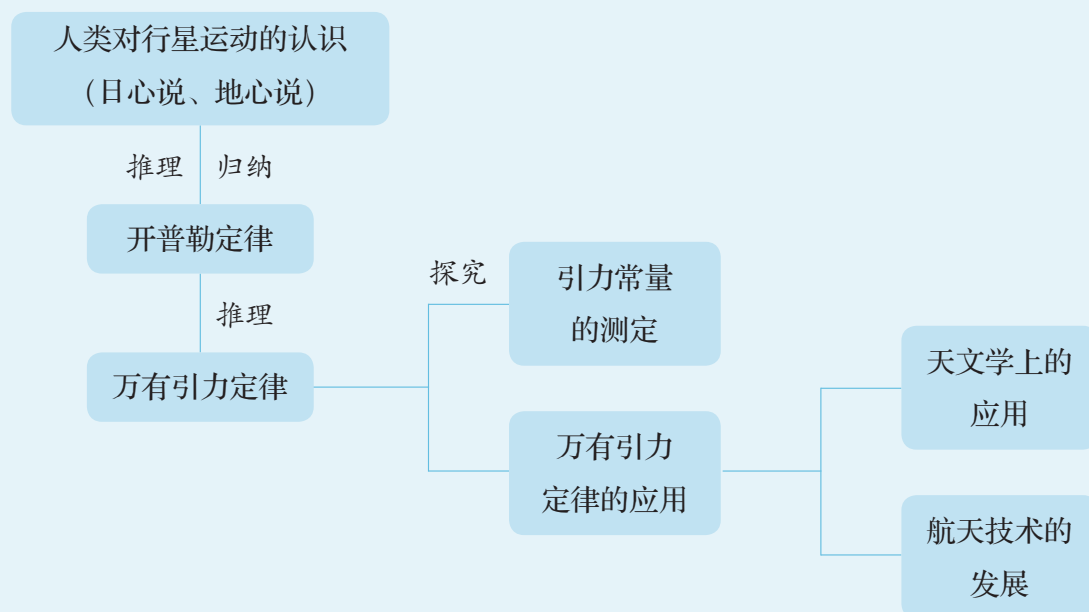
### • 基本方法

通过了解开普勒关于行星运动定律的发现过程，感悟归纳的方法。

通过了解万有引力定律的发现过程，感悟物理学规律普适性、统一性的思想方法。

通过了解卡文迪什实验方案，体会物理实验中微小量放大的科学方法。

### • 知识结构图



## 复习与巩固

1. 根据万有引力定律证明开普勒第三定律。
2. “火卫一”“火卫二”沿近似圆形轨道绕火星运行的周期分别是 7 h 39 min 和 30 h 18 min。分析比较“火卫一”“火卫二”向心加速度的大小。
3. 分析说明,为什么第一宇宙速度是人造地球卫星绕地球做匀速圆周运动的最大线速度?
4. 月球绕地球运行是因为万有引力的作用,那么质量较大的地球吸引月球的力是否比月球吸引地球的力更大些呢?试作出解释。
5. 质量为  $m$  的人造地球卫星,在距地面  $h$  高处绕地球做匀速圆周运动。已知地球半径为  $R$ ,求:
  - (1) 该卫星受到的向心力大小;
  - (2) 该卫星绕地球运行的速率;
  - (3) 该卫星绕地球运行的周期。
6. 在太阳系中,火星与木星轨道之间的空间由小行星带占据,该小行星带轨道半径的延伸范围约从 2.5 AU 到 3 AU (1 AU 为地球到太阳的平均距离)。试计算该空间内小行星绕太阳运行的周期范围。
7. 为了研究如图 6-21 所示的木星“大红斑”,要发射一颗能绕木星同步运行的卫星进行观测。已知木星的自转周期约为 9.8 h,质量约为地球质量的 320 倍,半径约为地球半径的 11 倍,又已知地球同步卫星的轨道半径约为地球半径的 6.65 倍,则这颗木星同步卫星的轨道半径约为木星半径的多少倍?
8. 若某天体飞临某个行星并进入行星表面附近的圆形轨道,观测到该天体绕行星运行一周所用的时间为  $T$ ,如何估算这颗行星的密度?
9. 阅读材料:“神舟五号”是我国第一艘载人飞船,总长 9.2 m,总质量  $7.79 \times 10^3$  kg,装有 52 台发动机,能精确调整飞船的飞行姿态和运行轨道。其返回舱直径 2.5 m,容积约为  $6 \text{ m}^3$ 。“神舟五号”飞船在太空中在轨运行了 14 圈,历时 21 h 23 min,经受了  $180^\circ\text{C}$  的温差考验,最终“神舟五号”的返回舱安全返回地面。  
已知地球半径为  $6.37 \times 10^6 \text{ m}$ ,请根据以上信息,计算“神舟五号”在轨运行时距地面的高度,以及飞船运行时的速度大小。

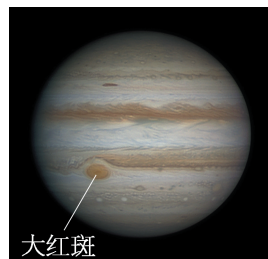


图 6-21



\*10. 简要论述地球同步卫星在轨正常运行时需要满足的物理条件。

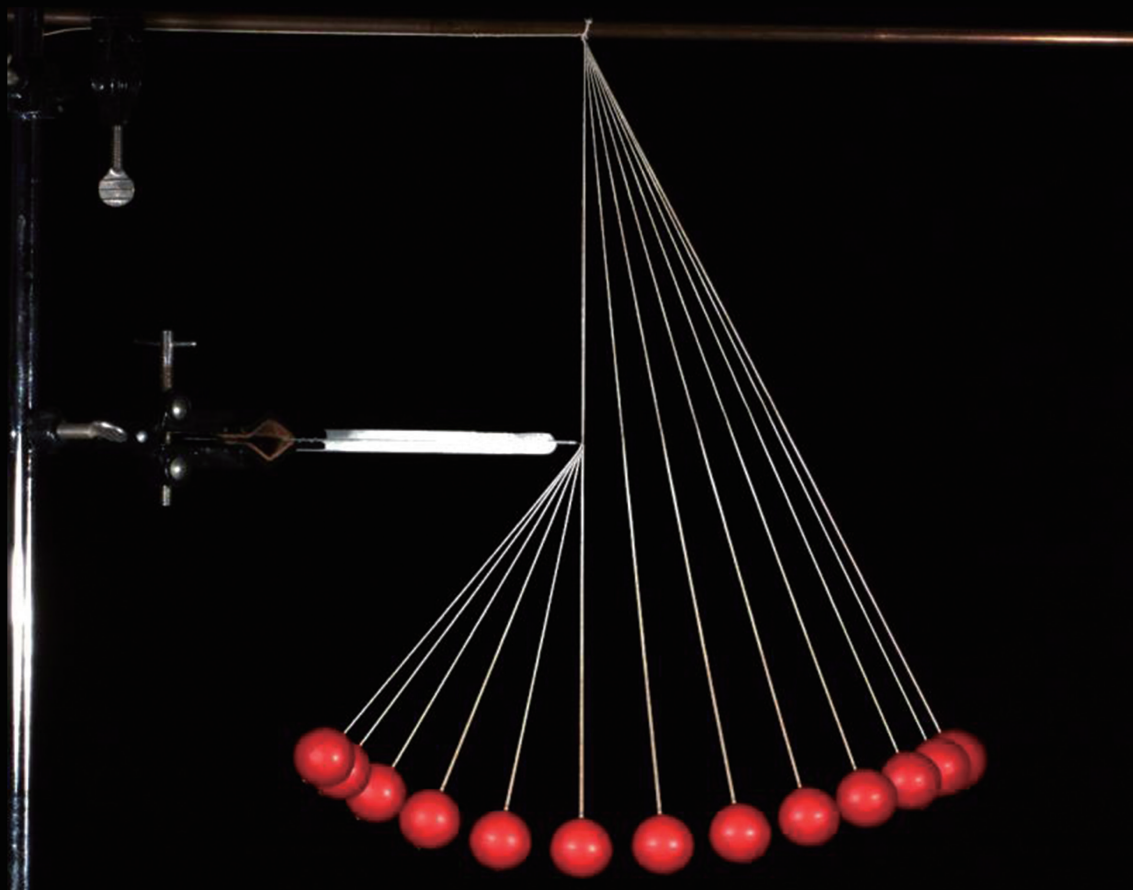
\*11. 通过对前人观测记录的艰苦研究，开普勒终于从大量复杂的观测数据中发现了行星运动的规律。如今，我们借助现代化的数据处理技术，可以快捷地获得太阳系八颗行星的轨道半径（将行星的轨道近似看成圆形轨道）与绕日公转周期之间的关系。太阳系行星轨道的平均半径  $R$  和行星绕日公转周期  $T$  的现代测量值如表 6-1 所示。将表中的  $R$  和  $T$  分别取常用对数，分析  $\lg R$  与  $\lg T$  之间的关系并回答以下问题。

(1) 如何运用上述数据分析的结果验证开普勒第三定律？

(2) 在数据处理的过程中，为什么用  $\lg R$  与  $\lg T$  的关系替代  $R$  与  $T$  的关系？简述理由。

表 6-1

行星	轨道的平均半径 $R/\times 10^6 \text{ km}$	绕日公转周期 $T/\text{年}$
水星	57.9	0.24
金星	108	0.615
地球	150	1.00
火星	228	1.88
木星	778	11.9
土星	1 430	29.5
天王星	2 870	84.0
海王星	4 500	165



图示为用细线悬挂的小球在竖直平面内左右摆动的频闪照片。图中的小球自右侧初始位置释放后沿圆周摆至最低点，由于尺子对细线的阻挡，小球继续向左侧摆动，圆周轨道半径减小。我们发现，小球在左右两侧所能到达的最大高度大致相等；小球自高处向低处运动时，相邻影像之间的间隔越来越大。这两个现象背后的物理原理是什么呢？

## 第七章

# 机械能守恒定律

### • 在本章中我们将：

1. 理解功、功率、动能、重力势能等概念，理解动能定理，知道重力势能的变化与重力做功的关系，定性了解弹性势能，理解机械能守恒定律。
2. 根据牛顿定律推导动能定理，通过实验验证机械能守恒定律。
3. 运用动能定理、机械能守恒定律分析、解释生产生活中的有关问题和现象。

### • 本章的学习将用到物体的匀变速直线运动、曲线运动规律和牛顿定律。

### • 本章的学习有助于能量观念和守恒思想的形成，为运用功能关系、守恒定律分析较为复杂的运动过程奠定基础。

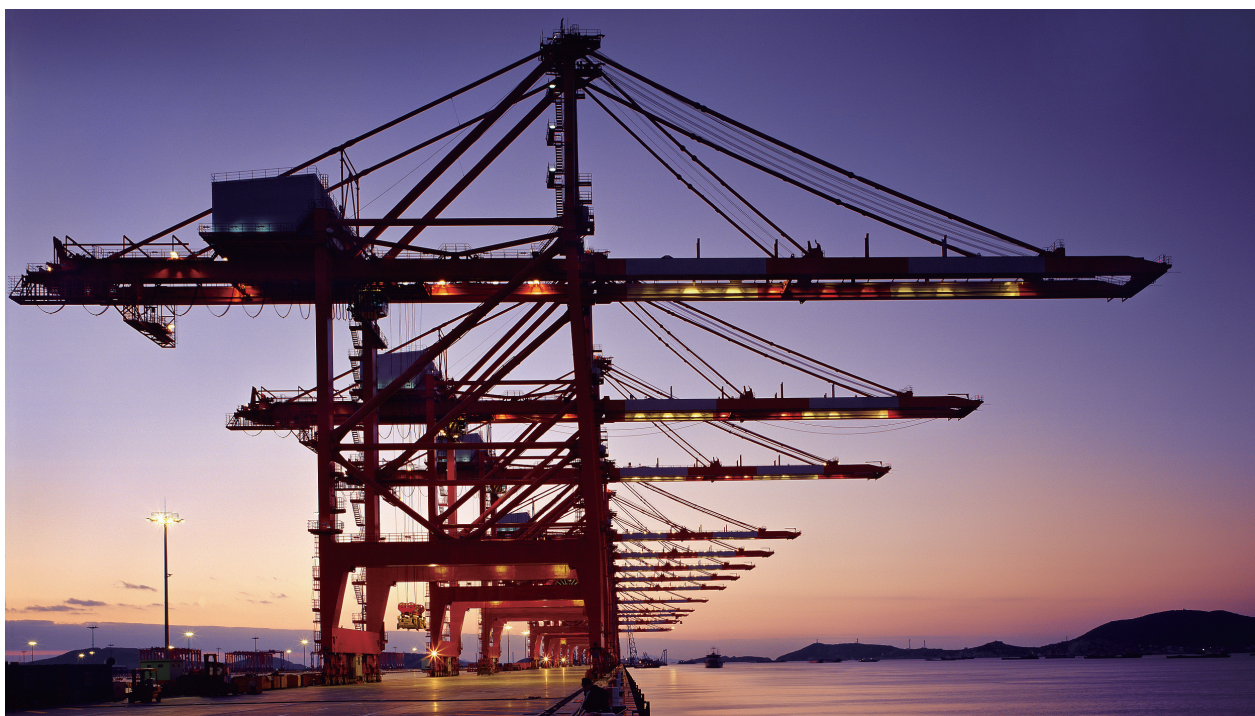


图 7-1 上海洋山深水港大型吊装机械

## 第一节 功

马车由静止开始沿水平地面向前做加速运动，是因为马对车做了功。在初中已经学过功的概念以及简单机械的知识。无论是图 7-1 中现代化港口的大型吊装机械，还是图 7-2 中我国古代的提水机械——桔槔，都是通过做功来提升重物的。不仅机械可以做功，所有的物体甚至人体自身都能做功。做功需要力，重力、弹力和摩擦力都能做功。物理学中，把这些力所做的功叫做**机械功**（**mechanical work**），简称功。

### ❓ 力怎样才能做功？

第一次工业革命时，人们为了比较蒸汽机的效益建立了功的概念。1826 年，法国物理学家科里奥利（G. Coriolis, 1792—1843）引入“功”一词，并将其定义为用机器“举起物体的重量与高度的乘积”。现在，这一定义已经大为扩展了。

在初中，我们所学的计算功的公式是

$$W = Fs$$



图 7-2 《天工开物》中的桔槔图

式中,  $F$  表示物体受到的力的大小,  $s$  是物体在力的方向上通过的距离。现在将  $s$  定义为物体在力的方向上发生的位移大小, 因此, 当物体在力的方向上发生位移时, 称力对物体做了功。功是标量。在国际单位制中, 力的单位是  $\text{N}$ , 位移的单位是  $\text{m}$ , 功的单位就是  $\text{N}\cdot\text{m}$ 。为了纪念英国物理学家焦耳 (图 7-3), 将功的单位命名为“焦耳”, 用符号  $\text{J}$  表示, 即  $1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$ 。



图 7-3 焦耳

(J. Joule, 1818—1889)

## 自主活动

图 7-4 所示分别为举重运动员训练的四种情况: 图 (a) 为缓慢上举过程; 图 (b) 为举着不动; 图 (c) 为缓慢向前移动; 图 (d) 为缓慢下蹲过程。请你说说在这四种情况下运动员都对杠铃做功吗? 你认为怎样才能做功?

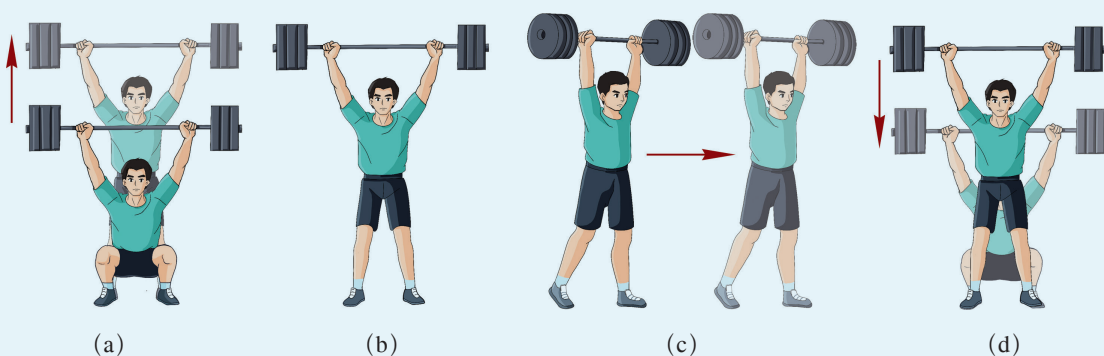


图 7-4 举重运动员训练的四种情况

利用初中所学的功的计算式, 我们可以讨论图 7-4 (a)、(b) 和 (c) 中运动员对杠铃做功的情况。图 7-4 (d) 中, 杠铃向下移动, 而运动员对杠铃的作用力向上。这时, 运动员是否对杠铃做功呢?

## 怎样计算恒力的功?

在一般情况下, 作用在物体上的力与物体位移的方向不一定相同, 这时可以用矢量分解的方法来分析力做功的情况。

如图 7-5 所示, 物体受恒力  $F$  的作用由  $A$  沿直线运动到  $B$ ,  $F$  与物体位移  $s$

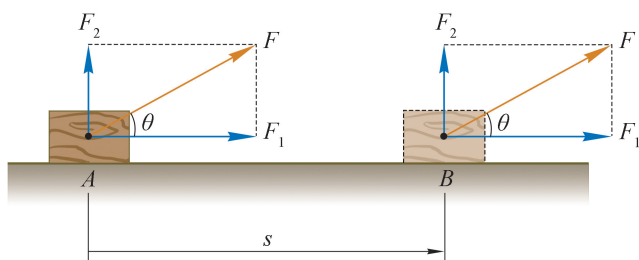


图 7-5 恒力对物体做功



成  $\theta$  角。这时可以将  $F$  沿  $s$  方向和与  $s$  垂直的方向分解成两个分力  $F_1$ 、 $F_2$ 。其中,  $F_1$  与  $s$  在同一直线上, 则  $F_1$  对物体做功。由于  $F_1 = F\cos\theta$ , 故  $F_1$  对物体做功为  $W = F_1s = F\cos\theta$ 。 $F_2$  与  $s$  垂直, 物体在  $F_2$  的方向上无位移, 故  $F_2$  对物体做功为零。

综上所述, 物体做直线运动时, 恒力对物体所做的功等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角  $\theta$  的余弦三者的乘积, 即

$$W = F\cos\theta$$

### 大家谈

能否通过分解位移获得恒力做功的计算式?

物体做曲线运动时, 恒力对物体所做的功怎样计算呢?

如图 7-6 (a) 所示, 物体沿任意曲线路径由  $A$  运动到  $B$ , 作用于物体的恒力  $F$  与物体位移  $s$  所成角为  $\theta$ 。

如图 7-6 (b) 所示, 将物体途经的曲线路径分割成无限多微小段, 物体经过每一微小段的运动可视为直线运动。图 7-6 (b) 中第  $i$  个微小段的位移  $\Delta s_i$  与恒力  $F$  所成的夹角为  $\theta_i$ , 在这段微小位移上, 恒力  $F$  做的微小功  $\Delta W_i = F\Delta s_i\cos\theta_i$ 。将  $\Delta s_i$  沿  $F$  方向和与  $F$  垂直的方向分解成两个分位移  $\Delta s_{i1}$  和  $\Delta s_{i2}$ ,  $\Delta s_{i1} = \Delta s_i\cos\theta_i$ ,  $\Delta s_{i2} = \Delta s_i\sin\theta_i$ 。因此,  $\Delta W_i = F\Delta s_{i1}$ 。

物体从  $A$  沿曲线运动到  $B$  过程中, 恒力  $F$  对物体所做的功  $W$  就是每一段微小位移上恒力  $F$  所做功的代数和, 即

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \cdots = F\Delta s_{11} + F\Delta s_{21} + \cdots = F(\Delta s_{11} + \Delta s_{21} + \cdots)$$

从几何角度而言, 上式中的  $(\Delta s_{11} + \Delta s_{21} + \cdots)$  即每一微小段位移沿  $F$  方向分量的累加, 其结果等于图 7-6 (a) 中位移  $s$  沿  $F$  方向的分量  $s_1$ ,  $s_1 = s\cos\theta$ 。

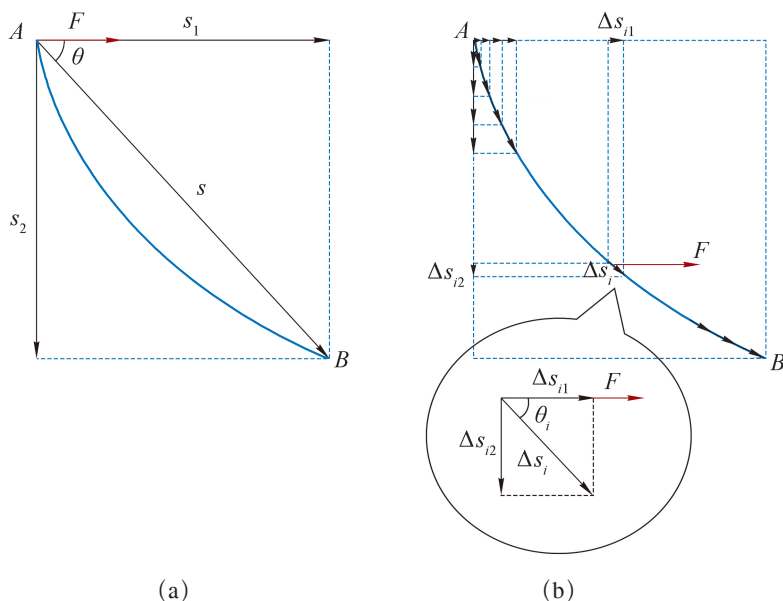


图 7-6 曲线运动中恒力对物体做的功

综上所述,物体做曲线运动时,恒力对物体所做的功也等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角的余弦三者的乘积,即

$$W = F s \cos \theta$$

由此可见,恒力所做的功不仅取决于恒力的大小和位移的大小,还取决于恒力和位移之间的夹角。

当  $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$  时,  $\cos \theta > 0$ ,  $W > 0$ , 称恒力做正功;

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时,  $\cos \theta = 0$ ,  $W = 0$ , 称恒力不做功;

当  $\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$  时,  $\cos \theta < 0$ ,  $W < 0$ , 称恒力做负功,或称物体克服恒力做功。

如图 7-4 (d) 所示,运动员对杠铃的作用力与杠铃位移的夹角为  $\pi$ ,运动员对杠铃做负功。

实际情况下,物体往往受到多个力的作用,从而需要计算多个力对物体所做的总功。由于功是标量,故无论物体是受多个力先后作用还是受多个力同时作用,所有力对物体所做的总功等于各个力对物体所做功的代数和。若物体可以被视作质点且受多个力同时作用,则所有的力均为共点力,它们所做的功也等于所有力的合力所做的功。

**示例** 如图 7-7 所示,工人将重  $G = 100 \text{ N}$ 、装满棉花的包裹沿离地高  $h = 1 \text{ m}$  的水平平台由静止开始从  $A$  处推至平台边缘  $B$  处, $A$ 、 $B$  间的距离为  $4 \text{ m}$ ;工人对包裹施加恒定的推力,推力大小  $F = 50 \text{ N}$ ,推力与水平面的夹角  $\theta = 37^\circ$ ;包裹到达  $B$  处时,撤去推力,包裹随即在重力作用下

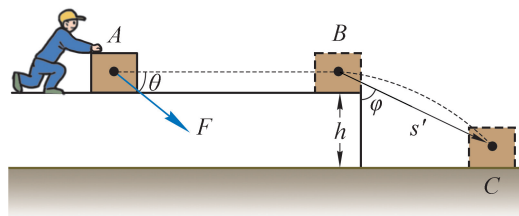


图 7-7 工人推包裹

下落至水平地面上的  $C$  处。若包裹与平台间的动摩擦因数  $\mu = 0.2$ ,分别求出作用于包裹的各个力所做的功,以及这些力所做的总功。(忽略空气阻力)

**分析:**包裹自  $A$  处被推至  $B$  处的过程中受四个大小与方向均不变的力作用,包裹由  $B$  落至  $C$  的过程中仅受重力作用。因此,只要明确各个力与位移的夹角,即可利用恒力做功的公式计算各力所做的功,这些力所做功的代数和就是它们对包裹所做的总功。

**解:**以包裹为研究对象,包裹由  $A$  运动至  $B$  过程中的受力分析如图 7-8 所示,包裹受到大小与方向均不变的推力  $F$ 、平台的支持力  $F_N$ 、摩擦力  $F_f$  和重力  $G$  的作用。

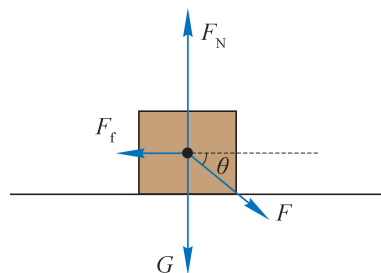


图 7-8 包裹的受力分析

设包裹由  $A$  至  $B$  的位移为  $s$ ,  $G$ 、 $F_N$ 、 $F_f$  与  $s$  的夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ , 则  $s = 4 \text{ m}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 180^\circ$ 。

根据竖直方向的力平衡关系可得

$$F_N = G + F \sin \theta = (100 + 50 \times \sin 37^\circ) \text{ N} = 130 \text{ N}$$

则

$$F_f = \mu F_N = 0.2 \times 130 \text{ N} = 26 \text{ N}$$

由已知条件和恒力做功的计算式可知, 包裹由  $A$  被推至  $B$  的过程中:

重力做功

$$W_G = G s \cos \alpha = 100 \times 4 \times \cos 90^\circ \text{ J} = 0$$

支持力做功

$$W_N = F_N s \cos \beta = 130 \times 4 \times \cos 90^\circ \text{ J} = 0$$

推力做功

$$W_F = F s \cos \theta = 50 \times 4 \times \cos 37^\circ \text{ J} = 160 \text{ J}$$

摩擦力做功

$$W_f = F_f s \cos \gamma = 26 \times 4 \times \cos 180^\circ \text{ J} = -104 \text{ J}$$

包裹由  $B$  落至  $C$  的过程中, 只有重力做功, 设包裹的位移为  $s'$ , 重力与位移的夹角为  $\varphi$ , 则重力做功

$$W_G' = G s' \cos \varphi = G h = 100 \times 1 \text{ J} = 100 \text{ J}$$

整个过程中, 包裹受到的作用力所做的总功为

$$W = W_F + W_G + W_N + W_f + W_G' = (160 + 0 + 0 - 104 + 100) \text{ J} = 156 \text{ J}$$

## ❓ 如何用图像表示功?

当力的方向与受力物体的位移沿同一直线时 (力与位移的夹角为  $0$  或  $\pi$ ), 力对物体所做的功可以用图像来表示。

图 7-9 所示为恒力与位置的关系图像。图中横坐标  $x$  表示物体的位置, 纵坐标  $F$  表示力。该图像称为力-位置图像, 即  $F-x$  图。图线下阴影面积表示在一段位移上力做的功。

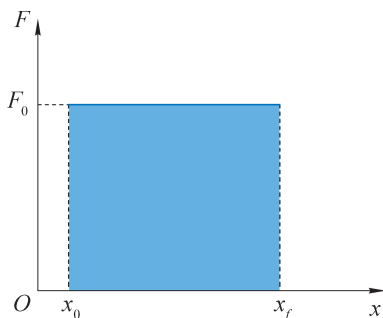


图 7-9 恒力的力-位置图像

## 拓展视野

如图 7-10 (a) 所示, 物体从  $x = x_0$  处沿直线运动到  $x = x_f$  处的过程中, 力  $F$  的方向始终和物体的位移方向一致, 但其大小随物体的位置  $x$  变化。

在此情形下, 将物体在整个过程中的位移分为无限多微小位移  $\Delta x (\Delta x \rightarrow 0)$ 。在每一段  $\Delta x$  中,  $F$  的变化很小, 可视为恒力。对于图中第  $i$  段微小位移  $\Delta x_i$ ,  $F_i$  做的微小功  $\Delta W_i = F_i \Delta x_i$ , 即图 7-10 (a) 中蓝色窄条矩形的面积。物体从起点运动到终点的过程中,  $F$  对物体做的功为所有微小功的累加, 即

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \cdots = F_1 \Delta x_1 + F_2 \Delta x_2 + \cdots$$

从几何角度而言, 上述累加表示将图 7-10 (a) 中无限多窄条矩形的面积进行累加, 其结果正好等于图 7-10 (b) 中从起点到终点之间图线下方的面积。

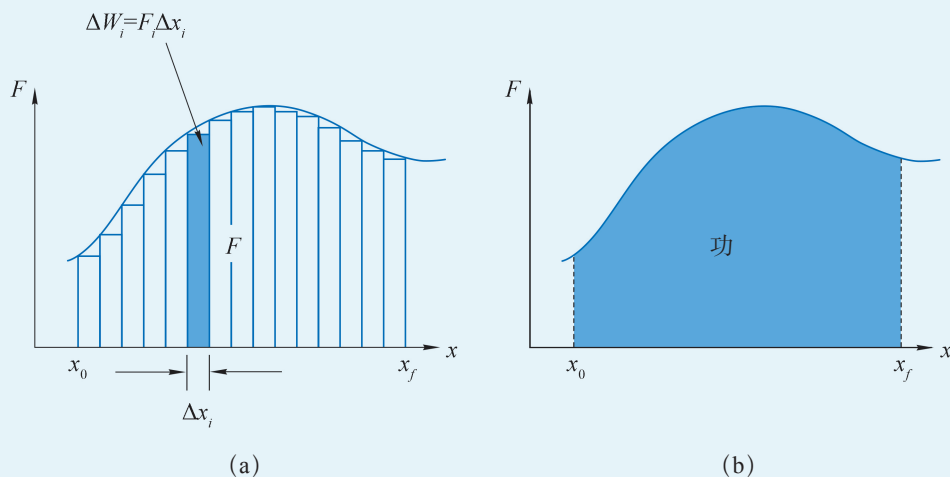


图 7-10 变力的力 - 位置图像

## 问题与思考

1. 运动员用 100 N 的力将球踢出, 球滚出的距离是 10 m。某同学根据  $W = Fs$  得出运动员踢球做的功是 1 000 J。这种算法是否正确? 简述理由。
2. 周末, 小明在家打扫卫生, 他先把沙发推开, 清洁地面后再把沙发推回原位。有同学认为, 整个过程中沙发的位移为零, 所以滑动摩擦力对沙发做的功也是零。这种观点是否正确? 简述理由。
3. “周一早上, 小明提起书桌上的书包背到肩上, 出门去学校。他乘电梯下楼后, 走到一个十字路口正好遇到红灯, 便站立等待。绿灯亮起后, 小明加速通过横道线, 走到校门口。进入校门后, 他放慢脚步走向教学楼, 然后走楼梯到达三楼的



教室。他走到自己的课桌前，从肩上取下书包并放到椅子下面，然后坐好等待上课。”在上述情境中，小明有时对书包做正功，有时对书包做负功，有时则不做功。从上述情景中选出有关实例并简述理由。

4. 总质量  $m = 2.0 \times 10^3 \text{ kg}$  的电梯在钢绳的牵引下匀速上升至  $h = 10 \text{ m}$  处，此过程中钢绳拉力和电梯所受的重力分别做了多少功？这两个力做的总功是多少？
5. 如图 7-11 所示，质量  $m = 30 \text{ kg}$  的儿童从滑梯顶端  $A$  点滑下，经长  $l = 12 \text{ m}$  的旋转滑道到达底端  $B$  点， $A$ 、 $B$  两点间的水平距离  $x = 4 \text{ m}$ ，高度差  $h = 3 \text{ m}$ 。若下滑过程中阻力  $F_{\text{阻}}$  的大小恒为  $60 \text{ N}$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ，求下滑过程中重力  $G$  和阻力  $F_{\text{阻}}$  对儿童所做的总功。
6. 如图 7-12 所示，长度  $l = 1 \text{ m}$ 、质量  $m = 5 \text{ kg}$  的均质硬杆一端由光滑铰链固定于天花板上的  $O$  点。在杆的另一端施加水平恒力  $F = 10 \text{ N}$ ，使杆由竖直位置绕  $O$  点转过角度  $\theta = 37^\circ$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ，求此过程中各力对杆所做的总功。

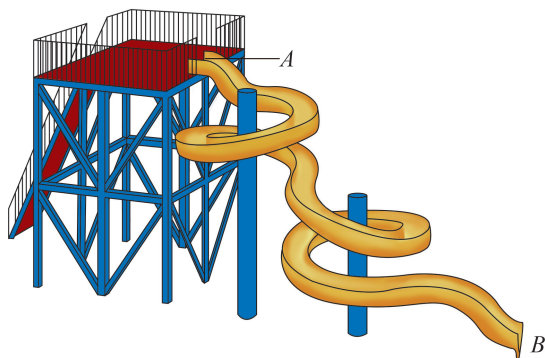


图 7-11

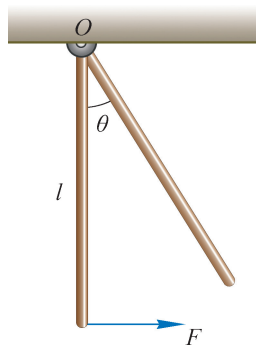


图 7-12



图 7-13 “复兴号”动车组

## 第二节 功率

人类设计、制造机械的主要目的是借助机械代替人力完成做功的过程。家住大楼高层的人们一般都乘电梯上楼，当然也可以徒步登楼，这两种方式克服重力做功相等，但乘电梯上楼更快捷，说明克服重力做功更快。驾驶汽车或骑自行车通过相同的距离，汽车发动机所做的功较多，所需的时间却更少，说明汽车发动机做功更快。

生活中的大量事例表明，在做功的过程中，做功的快慢也是人们关注的问题。

### ❓ 如何描述做功的快慢？

#### 自主活动

建筑工人在 1 min 内将质量为 20 kg 的水泥搬到 6 m 高的三楼；工地上的起重机在 20 s 内将质量为 1 t 的建筑材料匀速提升 10 m。比较建筑工人和起重机做功的快慢并简述理由。

时间相等的情况下，做功越多表示做功越快；做功相同的情况下，所花时间越短，做功越快。在初中我们已经知道，做功的快慢用**功率（power）**描述。一般情况下，做功可能时快时慢，这时可以用一段时间内做的总功  $W$  与做功时间  $t$  的比来反映做功的快慢，这个比叫做平均功率。平均功率用  $\bar{P}$  表示，即

$$\bar{P} = \frac{W}{t}$$

平均功率表示做功的平均快慢，类似于用平均速率表示物体位置变化的平均快慢。在国际单位制中，功的单位是 J，时间的单位是 s，所以功率的单位是 J/s。为了纪念英国发明家瓦特（图 7-14），将功率的单位命名为“瓦特”，用符号 W 表示，即  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ 。功率的常用单位还有千瓦（kW）。功率是标量。

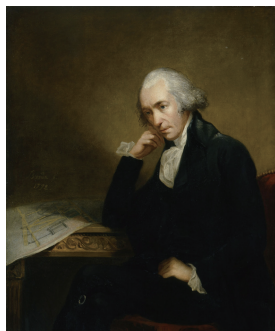


图 7-14 瓦特  
(J. Watt, 1736—1819)

### 拓展视野

18 世纪后期，瓦特为了测定蒸汽机功率，引入“马力”这一功率单位。当时，瓦特认为一匹马能以 180 磅（相当于 800 N）的力拉着转动半径为 12 英尺（相当于 3.7 m）的磨轮以 144 圈/时的转速转动。由此定出 1 马力功率为 32 572 磅·英尺/分，经四舍五入后取为 33 000 磅·英尺/分。由于这是根据英制计量标准所得，故称为英制马力，即 745.7 W。可是同一时期，德国等采用公制单位的国家对英制计量标准有些“水土不服”，他们采用公制马力作为功率单位。公制马力也称为米制马力，定义为：一匹马于 1 min 内将 75 kg 的物体提升 60 m，即 735.5 W。由于英制马力和公制马力的不一致，在工业革命发展初期给各国的工业生产造成麻烦。

对于恒力与位移方向相同的情况，将功的计算式代入平均功率的定义式，可得

$$\bar{P} = \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t} = F\bar{v}$$

式中， $F$  为恒力的大小， $\bar{v}$  为物体在时间  $t$  内的平均速度的大小。

### 大家谈

回顾以平均速度概念为基础建立瞬时速度概念的过程，如果以平均功率概念为基础，能否建立瞬时功率概念呢？

在生活实际中,有时还需要关注力在特定时刻做功的快慢。物理学中,用瞬时功率表示力在某一时刻做功的快慢。当力与瞬时速度的方向相同时,力的大小  $F$  与瞬时速度大小  $v$  的乘积就是瞬时功率  $P$ ,即

$$P = Fv$$

功率是生活中常用的物理概念。例如,人类心脏跳动的功率约  $1.4 \sim 1.5 \text{ W}$ ;手机充电器的功率约  $5 \text{ W}$ ;人在运动状态下所消耗功率的数量级为  $10^2 \text{ W}$ ;运动员的最大瞬时输出功率、家用微波炉和摩托车的输出功率数量级均为  $10^3 \text{ W}$ ;而家用轿车、万吨级巨轮和喷气式客机输出功率的数量级分别为  $10^5 \text{ W}$ 、 $10^6 \text{ W}$  和  $10^8 \text{ W}$ ;全球能源总消耗功率的数量级为  $10^{13} \text{ W}$ ,太阳辐射总功率的数量级则为  $10^{26} \text{ W}$ 。图 7-15 所示为这些功率的数量级“阶梯”。

## 助一臂

随时间变化的物理量都有平均值和瞬时值之分,例如,平均速度和瞬时速度。瞬时值可以看成微小时间段(趋于零的时间段)内的平均值的极限。

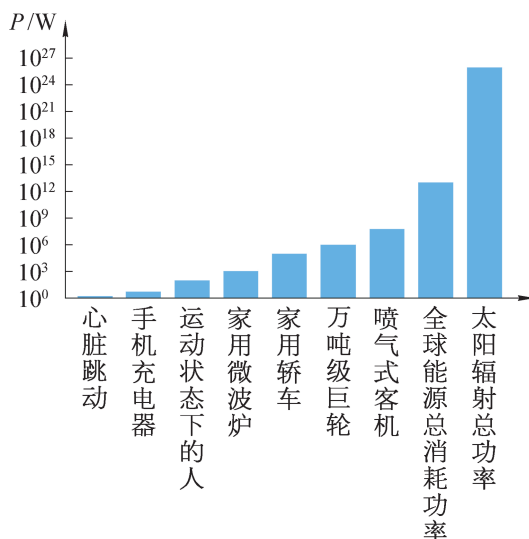


图 7-15 功率的数量级“阶梯”

## STSE

我国铁路的发展,从国产机车动力功率的提升可以窥其一斑。20 世纪 70 年代的上游型蒸汽机车和东方红型内燃机车功率约  $1\,000 \text{ kW}$ ,80 年代的东风型内燃机车功率约  $1\,300 \text{ kW}$ ,90 年代的韶山型内燃机车功率约  $4\,000 \text{ kW}$ ;2007 年投入运营的和諧号 CRH1 型电力动车组功率约  $5\,000 \text{ kW}$ ;2017 年投入运营的“复兴号”动车组(图 7-13)功率则可达  $10\,000 \text{ kW}$ 。与此同时,列车运行速度也飞速提升。以从上海到北京的列车为例,70 年代约需  $20 \text{ h}$ ,2000 年缩短到约  $10 \text{ h}$ ,2017 年“复兴号”运行后仅需约  $4.5 \text{ h}$ 。我国铁路技术的迅猛发展,已实现古人“千里江陵一日还”的梦想。



## 机械工作时的功率有限制吗？

机械做功的快慢与机械的结构和性能有关，每一台机械在正常状态下长时间工作的功率不应超过某一最大值，这个最大值称为机械的额定功率。

机械实际运行时的功率叫做实际功率。如果实际功率长时间超过额定功率就可能损坏机械或缩短机械的使用寿命。

**示例** 一台起重机以  $2.1 \times 10^3 \text{ N}$  的牵引力将质量  $m = 200 \text{ kg}$  的货物由静止开始竖直向上匀加速提升。如果该起重机的额定功率  $P_0 = 5 \times 10^3 \text{ W}$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 求货物做匀加速运动的时间。

(2) 起重机达到额定功率后即保持瞬时功率  $P_t$  不变，分析此后货物的运动情况。

**分析：**货物向上做匀加速运动的过程中，牵引力保持不变，所以，牵引力的瞬时功率不断增大。当牵引力的瞬时功率增大至额定功率时，若继续保持牵引力大小不变，则牵引力的瞬时功率将突破额定功率。因此，当牵引力的瞬时功率等于额定功率时，匀加速运动阶段结束。此后，起重机若以额定功率运行，则牵引力逐渐减小，但速度继续增大；当牵引力大小等于货物重力大小时，货物将开始匀速上升。

**解：**(1) 以货物为研究对象，它受到重力与牵引力两个力的作用，以向上为正方向，设牵引力为  $F$ ，货物由静止开始向上做匀加速运动的加速度为  $a$ 。由牛顿第二定律可得

$$F - mg = ma$$

$$\text{则 } a = \frac{F - mg}{m} = \frac{2.1 \times 10^3 - 200 \times 10}{200} \text{ m/s}^2 = 0.5 \text{ m/s}^2$$

以货物从静止开始运动为初始时刻，经过时间  $t$ ，起重机瞬时功率达到额定功率，货物的匀加速运动阶段结束，则货物的瞬时速度

$$v_1 = at$$

牵引力的瞬时功率为  $P_t = P_0 = Fv_1 = Fat$

$$\text{则 } t = \frac{P_0}{Fa} = \frac{5 \times 10^3}{2.1 \times 10^3 \times 0.5} \text{ s} \approx 4.8 \text{ s}$$

(2) 由于起重机保持额定功率运行，故 4.8 s 后牵引力减小，速度继续增大，牵引力与速度乘积保持不变。由牛顿第二定律可知，货物做加速度减小的加速运动。当牵引力减小到与重力相等时，货物将匀速上升。此时

$$F = mg$$

$$\text{则 } v_2 = \frac{P_0}{F} = \frac{P_0}{mg} = \frac{5 \times 10^3}{200 \times 10} \text{ m/s} = 2.5 \text{ m/s}$$

即货物最终以 2.5 m/s 的速度匀速上升。

在解决上述问题的过程中,我们默认起重机的实际功率就是牵引力对货物做功的功率。事实上,除了提升重物做功以外,由于克服内部机件的摩擦等,起重机做的功还会消耗在其他方面。

为了简化起见,一般情况下我们也默认汽车发动机的功率即驱动力的功率。所以,当汽车上坡或阻力较大时,若发动机以额定功率工作,驾驶员往往通过使汽车减速来获得更大的驱动力。

### 拓展视野

汽车发动机输出的功率有一部分用于水泵的运作及热损耗,输入至传动和驱动系统的功率只是发动机输出功率的另一部分。即使如此,传动和驱动系统内部机件的运作也会消耗一部分功率,余下的才是真正意义上的驱动功率。

### 问题与思考

1. 用表格或图示的方式列举额定功率的数量级分别为  $10^0 \text{ W}$ 、 $10^1 \text{ W}$ 、 $10^2 \text{ W}$  和  $10^3 \text{ W}$  的家用电器。
2. 判断下列关于功率的说法是否正确,并简述理由。
  - (1) 做功时间越长,功率越小。
  - (2) 做功越多,功率越大。
  - (3) 作用力越大,功率越大。
  - (4) 物体速度越大,功率越大。
3. 某同学从一楼到二楼,第一次走上去,第二次跑上去,比较两次克服重力做功的功率。
4. 2018 年上海中心国际垂直马拉松赛于 11 月 25 日上午盛大举行,近千名选手参加比赛。我国一位女选手用时  $20 \text{ min } 55 \text{ s}$  抵达终点。上海中心大厦(图 7-16)楼高  $632 \text{ m}$ ,共计 127 层,比赛赛道终点设在 119 层,选手们经历了 3 398 级台阶的考验,在终点  $552 \text{ m}$  的高空俯瞰最美的上海全城风光,顿时忘却了疲劳,纷纷在上海之巅记录自己的成功时刻。  
根据上述材料,试估算该女选手比赛过程中克服重力做功的平均功率。



图 7-16

5. 举重运动员在图 7-17 所示的抓举过程中，将 150 kg 的杠铃举高了 63 cm，所用的时间是 0.8 s。求这一过程中运动员举杠铃的平均功率。



图 7-17

6. 两个物体从离地相同高度处先后做自由落体运动和平抛运动并落至水平地面。试比较这两个物体在落至水平地面过程中重力的平均功率。

- \*7. 某电动汽车的部分动力性能参数如表 7-1 所示。若该汽车沿平直公路由静止开始做加速度  $a = 1.5 \text{ m/s}^2$  的匀加速直线运动，当车速达到  $v_1 = 72 \text{ km/h}$  时，电机恰好以额定功率工作，此后电机的功率保持不变。假设行驶过程中汽车受到的阻力大小恒定。

- (1) 分析说明电机达到额定功率后，汽车的加速度和速度的变化情况。
- (2) 电机以额定功率工作时，汽车的最大速度为多少？
- (3) 该汽车充满电后，以上述方式运动的总时间为多少？

表 7-1

动力电池容量 / (kW·h)	48.3
电机额定功率 / kW	85
整车质量 / kg	1 710



图 7-18 长江三峡水利枢纽

### 第三节 动能 动能定理

在初中我们已经知道，物体由于运动而具有的能量称为**动能 (kinetic energy)**。运动物体的动能与物体的质量和速度有关。人类活动中，利用动能的实例很多。图 7-18 所示的长江三峡水利枢纽，主要就是利用水流由高处下落后的巨大动能发电。图 7-19 所示是明代宋应星所著《天工开物》中记载的我国古代的一种农业机械——水碾，水碾也是利用水的动能做功的装置。

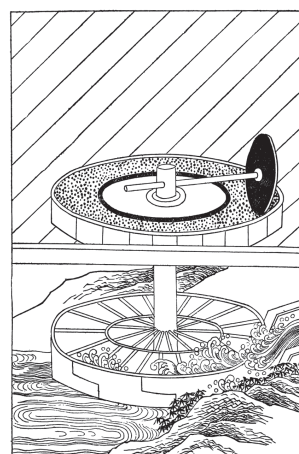


图 7-19 水碾

#### ❓ 如何计算动能？

如图 7-20 所示，质量为  $m$  的物体沿水平面向右做匀加速直线运动。物体在初始位置  $A$  时的瞬时速度为  $v_0$ ，经过位置  $B$  时的瞬时速度为  $v_t$ 。物体的位移为  $s$ 。

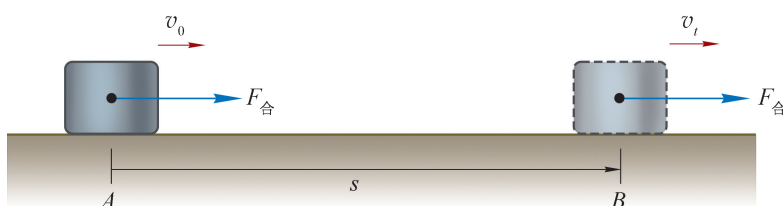


图 7-20 物体向右做直线运动



由于物体做匀加速直线运动，所以物体所受合力  $F_{\text{合}}$  为恒力，设物体的加速度为  $a$ ，根据牛顿第二定律

$$F_{\text{合}} = ma \quad (1)$$

由匀加速直线运动的规律

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 可得

$$F_{\text{合}} = m \left( \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} \right)$$

整理后得

$$F_{\text{合}} s = \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

令

$$E_{\text{kt}} = \frac{1}{2} m v_t^2, \quad E_{\text{k0}} = \frac{1}{2} m v_0^2$$

则

$$F_{\text{合}} s = E_{\text{kt}} - E_{\text{k0}} \quad (3)$$

式 (3) 左边为合力对物体所做的功， $E_{\text{k0}}$  和  $E_{\text{kt}}$  与功的单位相同。我们把物体的质量与速度的二次方乘积的一半，称为物体的动能，用符号  $E_{\text{k}}$  表示，即

$$E_{\text{k}} = \frac{1}{2} m v^2$$

$E_{\text{k0}}$ 、 $E_{\text{kt}}$  分别为物体在  $A$ 、 $B$  两个位置的动能， $E_{\text{k0}}$  为初位置的动能， $E_{\text{kt}}$  为末位置的动能。

动能是标量，动能的单位是  $\text{千克} \cdot \text{米}^2 / \text{秒}^2$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ )，也就是焦耳 (J)。动能和速度一样，是描述物体运动状态的重要物理量。

## 如何利用物体的动能？

具有动能的物体可以对其他物体做功。如图 7-21 所示，水电站通过大坝将高处的水流集中后引至低处的水力发电机组，水流对发电机组中水轮机的涡轮（图 7-22）产生冲击作用并使之转动，涡轮则带动与其连接的发电机发电。

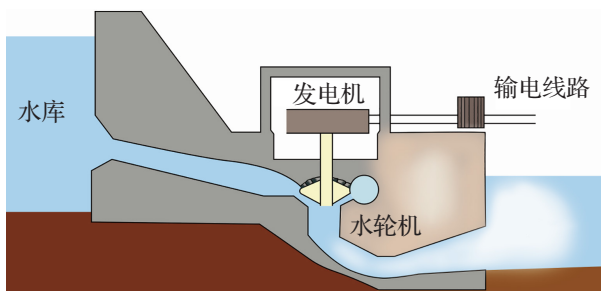


图 7-21 水力发电示意图

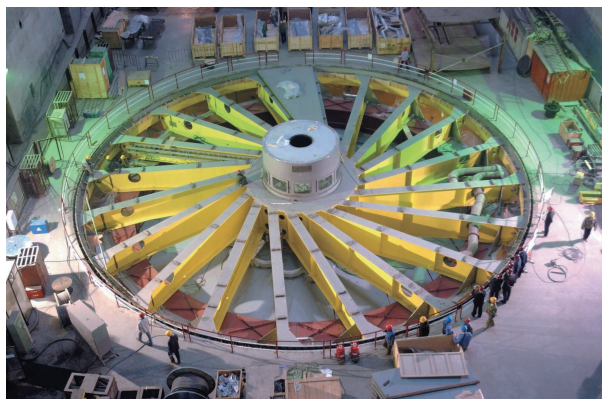


图 7-22 水力发电机的涡轮

人们很早就利用空气的动能通过风车来抽水、磨面……现在，人们感兴趣的是如何利用风发电。风力发电就是利用空气流动的动能带动风力发电机（图 7-23）的叶片旋转，再通过齿轮增速箱提升旋转的速度来驱动发电机发电。根据目前的技术，风速约 3 m/s 时风力发电机便可以开始发电。风力发电具有成本低、清洁、可再生等优点。

除了发电以外，水切割机利用高速射流的动能进行高效率的冷切割加工，具有对切割材质理化性能无影响、无热变形、切缝窄、精度高、切面光洁、无污染等优点。20 世纪 80 年代提出的动能武器——动能拦截弹能通过直接碰撞的方式，拦截并摧毁诸如卫星或导弹弹头等高速飞行的目标。

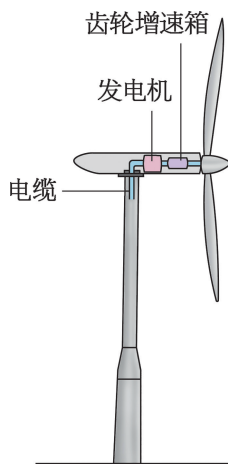


图 7-23 风力发电机示意图

### 拓展视野

通过适当简化和抽象，可以用图 7-24 所示的模型研究影响风力发电机发电功率  $P$  的主要因素。

设风力发电机叶片长度为  $r$ 、空气均匀且密度为  $\rho$ 、风速恒为  $v$ 。时间  $t$  内流经叶片的空气都在图中长为  $d$  的圆柱体内，该柱体的底面积为  $A = \pi r^2$ 。设圆柱体中的空气质量为  $m$ ，这些空气的动能为

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

式中

$$m = \rho A d = \rho \pi r^2 v t$$

联立以上两式可得时间  $t$  内流过风车叶片的空气动能为

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 t$$

则单位时间内流过风车叶片的空气所具有的动能为

$$\frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

流过风车叶片的动能有一部分被用来对叶片做功、发电。可以认为，风力发电机的发电功率  $P \propto \frac{E_k}{t}$ ，即  $P \propto r^2 v^3$ 。

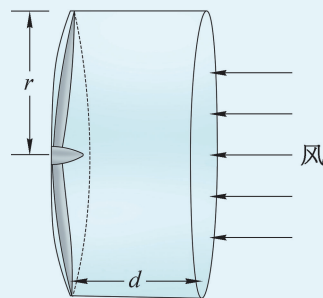


图 7-24 研究风力发电机功率的模型

### 力对物体所做总功的效果是什么？

具有动能的物体可以做功，对物体做功也可以改变物体的动能。

$F_{\text{合}}s = E_{\text{kf}} - E_{\text{k0}}$  反映了合力对物体所做的功与物体动能变化之间的关系, 即物体受到的合力所做的功等于物体动能的变化量。这一规律被称为**动能定理** (theorem of kinetic energy)。动能定理的表达式也可以写成

$$W_{\text{合}} = \Delta E_{\text{k}} = E_{\text{kf}} - E_{\text{k0}}$$

式中,  $W_{\text{合}}$  为合力对物体所做的功或各力对物体做功的代数和,  $\Delta E_{\text{k}}$  表示动能变化量,  $E_{\text{kf}}$  为末动能,  $E_{\text{k0}}$  为初动能。

当  $W_{\text{合}} > 0$  时,  $\Delta E_{\text{k}} > 0$ , 表示合力做正功, 动能增加; 当  $W_{\text{合}} < 0$  时,  $\Delta E_{\text{k}} < 0$ , 表示合力做负功, 动能减小。

我们虽然是从受恒力作用的物体做匀加速直线运动的过程推导得到动能定理, 但是进一步的理论推导可以证明, 动能定理对于变力做功和物体做曲线运动的过程依然成立。

从牛顿第二定律出发, 可以导出动能定理。这表明动能定理是牛顿第二定律的一个推论, 由牛顿第二定律还可以推演出其他重要的力学定理, 这体现了牛顿力学的简约美。

**示例** 如图 7-25 所示, 长为  $l$  的轻质细绳下端悬挂一质量为  $m$  的小球, 用大小为  $F$  的水平拉力将小球由静止开始从最低点  $A$  拉至  $B$  点,  $\angle AOB = \theta$ , 在此过程中细绳始终绷直。若不计空气阻力, 求小球到达  $B$  点时的速度大小  $v$ 。

**分析:** 小球受到重力、水平拉力和绳子拉力的作用。小球运动过程中, 重力做负功, 水平拉力做正功, 这些都是恒力的功, 可以计算。而绳子拉力虽然是变力, 但始终与小球的速度垂直, 所以绳子拉力不做功。用动能定理可求出小球到达  $B$  点时的速度大小。

**解:** 以小球为研究对象, 小球在水平方向上的位移  $s = l \sin \theta$ ; 在竖直方向的位移是

$$h = l - l \cos \theta = l(1 - \cos \theta)$$

小球从  $A$  点到  $B$  点的运动过程中, 水平拉力做正功, 重力做负功。根据动能定理, 水平拉力与重力做功的代数和等于动能变化量, 可得

$$Fs - mgh = \frac{1}{2}mv^2 - 0$$

即

$$Fl \sin \theta - mgl(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mv^2$$

由此可得

$$v = \sqrt{\frac{2l}{m}[F \sin \theta - mg(1 - \cos \theta)]}$$

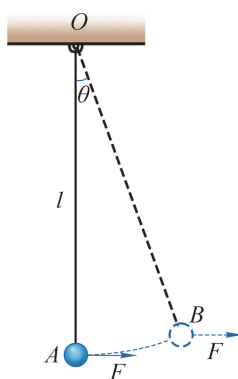


图 7-25  
小球的运动

用动能定理解决问题的一般步骤为：(1) 确定研究对象；(2) 根据运动过程确定各力做功的情况；(3) 确定物体初状态和末状态的动能；(4) 根据已知条件列出表达式求得结果。

与牛顿运动定律一样，动能定理也是解决力与运动变化关系的重要规律。但由于动能定理不涉及加速度、时间等物理量，所以在处理过程较为复杂的运动问题时有明显的优越性。此外，动能定理也被广泛用来处理变力、冲击力等作用过程更为复杂的运动问题。

### 问题与思考

1. 判断下列关于动能的说法是否正确，并简述理由。

- (1) 动能大的物体，速度一定大。
- (2) 做变速运动的物体动能一定变化。

2. 估算下列物体的动能，并写出必要的计算过程。

- (1) 行驶在高速公路上的客车中的乘客。
- (2) 从十楼阳台落至地面的花盆。
- (3) 空中飞行的子弹。
- (4) 被快速抽击的乒乓球。

3. 质量为  $1\,500\text{ kg}$  的汽车的行驶速度从  $10\text{ km/h}$  加速到  $20\text{ km/h}$ ，再由  $20\text{ km/h}$  加速到  $30\text{ km/h}$ 。分析比较上述两段过程中汽车动能的变化量。

4. 质量为  $400\text{ g}$  的足球以  $2\text{ m/s}$  的水平速度撞击墙壁，并以  $1\text{ m/s}$  的速度反向弹回。求碰撞过程中足球速度和动能的变化量。

5. 弓弦对  $85\text{ g}$  的箭的作用距离为  $75\text{ cm}$ ，平均作用力大小为  $105\text{ N}$ 。求箭离开弦时的速度大小。

6. 如图 7-26 所示，长  $l=1\text{ m}$  的轻质细绳下端悬挂质量  $m=1\text{ kg}$  的钢球，对钢球施加水平恒力  $F=10\text{ N}$ ，将小球从最低点  $A$  由静止开始拉动，且拉动过程中细绳始终绷直。若不计空气阻力， $g$  取  $10\text{ m/s}^2$ ，求：

- (1) 细线转过  $\theta=30^\circ$  时，钢球的速度大小  $v_1$ ；
- (2) 细线转过的最大角度。

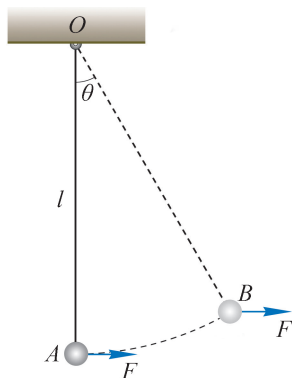


图 7-26





图 7-27 滑雪运动的连续影像

## 第四节 重力势能

举重运动员将杠铃举高的过程中，杠铃所具有的某种能量增加；水从高处流至水坝底部所释放的某种能量可以用来发电。我们在初中已经知道，这种由于物体高度改变而变化的能量叫做**重力势能**（**gravitational potential energy**），用  $E_p$  表示。图 7-27 所示的滑雪运动的连续影像中，运动员升高后再降低的过程就是运动员重力势能变化的过程。

### 自主活动

如图 7-28 所示，在水平桌面上铺一块厚薄均匀的泡沫板，让半径相同、质量不同的实心小球从不同的高度自由下落到泡沫板上，根据撞击产生凹痕的深浅猜想小球的重力势能与哪些因素有关。尝试用控制变量的思想设计实验方案并予以实施。

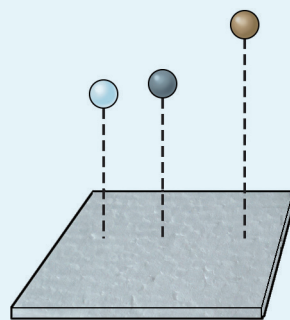


图 7-28 小球对泡沫板的撞击

为了深入探讨重力势能的含义，我们先研究重力做功的特点。

## 重力做功的特点如何?

如图 7-29 所示,  $y$  轴正方向竖直向上, 水平地面处  $y=0$ 。质量为  $m$  的物体沿任意路径 1 由  $A$  运动到  $B$ , 位移为  $s$ 。位移与物体所受重力之间的夹角为  $\theta$ ,  $A$ 、 $B$  离开水平地面的竖直高度分别为  $h_A$ 、 $h_B$  (即  $A$ 、 $B$  的  $y$  坐标)。

由于地表附近重力可视为恒力, 根据恒力做功的计算式, 这一过程中重力对物体所做的功

$$W_G = mgs \cos \theta \quad (1)$$

由图示几何关系可得

$$h = h_A - h_B = s \cos \theta \quad (2)$$

式中,  $h$  为  $A$ 、 $B$  两点的竖直高度差。将式 (2) 代入式 (1) 得

$$W_G = mgh = mgh_A - mgh_B \quad (3)$$

由于图 7-29 中的路径 1 是任意选取的, 这就表明, 从  $A$  到  $B$  的过程中重力所做的功与路径无关, 只取决于始、末位置之间的竖直高度差。

如果物体沿图 7-29 中的路径 2 从  $B$  返回  $A$ , 这一过程的位移与  $s$  等大反向, 与重力的夹角为  $\pi - \theta$ , 则物体返回过程中重力做功

$$W_G' = mgs \cos (\pi - \theta) = -mgs \cos \theta = -mgh \quad (4)$$

这意味着, 如果物体沿路径 1 和 2 组成的闭合路径运动一周, 则

$$W_G + W_G' = 0$$

即重力做功为零。

由上述推导过程可以得到重力做功的特点:

重力做功仅取决于物体的始、末位置, 而与物体经过的路径无关。或者说, 沿任意闭合路径一周, 重力做功为零。

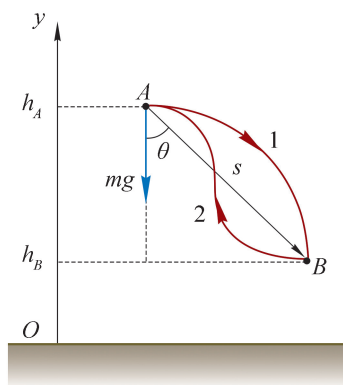


图 7-29 重力做功

## 拓展视野

与重力一样, 弹簧的弹力、万有引力做功也与物体经过的路径无关, 只取决于始、末位置, 这样的力被称为保守力。在讨论了第一节问题与思考的第 2 题后, 我们知道滑动摩擦力做功与物体经过的路径有关, 或者说物体沿闭合路径运动一周摩擦力做功不为零, 这种力被称为耗散力。空气、水等流体的阻力都是耗散力。

## 如何计算重力势能?

重力势能的定义是在重力做功性质的基础上提出的。物体的始、末位置一旦确定, 重

力的功便确定下来。由式 (3) 可以发现, 若令  $E_{p0} = mgh_A$ 、 $E_{pt} = mgh_B$ , 则  $E_{p0}$  和  $E_{pt}$  都是与物体位置有关的物理量。

将物体的重力  $mg$  与所在高度  $h$  的乘积称为重力势能, 即

$$E_p = mgh$$

由于高度  $h$  具有相对性, 所以重力势能也是相对的, 只有在选取了重力势能为零的参考平面以后才能确定重力势能。

物理学中将重力势能为零的参考平面称为零势能面,  $h$  就是物体相对于零势能面的高度。零势能面一般都是根据研究需要设定的。

若物体处于零势能面以上, 则  $h > 0$ ,  $E_p > 0$ ; 处于零势能面以下, 则  $h < 0$ ,  $E_p < 0$ 。

### 大家谈

实际情况下, 物体总有一定的形状和大小。有时, 物体的形态还会发生变化。计算实际物体的重力势能时, 物体相对于重力势能零势能面的高度该如何确定?

从根本上说, 地球上的物体具有重力势能, 是由于地球和物体间存在万有引力的相互作用, 如果物体不受重力作用, 就没有重力势能。所以重力势能是物体和地球这一体系所共有的。只是为简单起见, 我们说物体具有重力势能。

### 拓展视野

在地球附近的小尺度空间, 地球对物体的引力可视作恒力, 而在尺度与地球半径可以比拟的空间, 地球对物体引力应被视作变力。若将地球看成质量均匀分布的球体, 而将物体视作质点, 地球对物体的引力总是指向地心, 其大小仅与物体和地心间距离有关。如图 7-30 所示, 物体沿任意曲线路径从  $A$  移到  $B$ 。在数学上可以证明, 图中小段位移  $s$  上引力对物体做的功与沿地球径向  $Ox$  轴小段位移  $s_r$  上引力所做的功相等。因此, 物体沿  $AB$  移动过程中, 引力所做的功等于沿地球径向  $A'B'$  移动过程中, 引力所做的功。由于从  $A$  到  $B$  的路径是任意的, 所以引力做的功与路径无关, 只取决于物体的始、末位置。万有引力和以后将要学习的库仑力具有类似的性质, 这些力做功都与路径无关, 是保守力。

由于地球和物体间万有引力而具有的势能称为引力势能, 以无穷远处的引力势能为零, 引力势能的表达式可写为  $E_p = -\frac{Gm_{\text{地}}m}{r}$  (式中  $m_{\text{地}}$  为地球质量,  $m$  为物体质量,  $r$  为物体到地心的距离)。重力势能就是地球表面附近的引力势能。

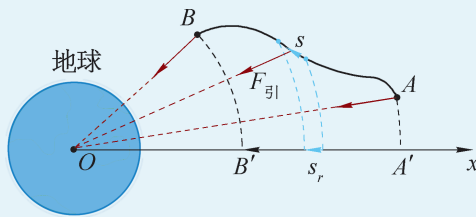


图 7-30 地球对物体的引力

## 重力做功与重力势能变化量之间的关系如何？

由式 (3) 可知，重力做功引起物体重力势能的变化。用符号  $\Delta E_p$  表示某一过程中物体重力势能的变化量，并规定

$$\Delta E_p = E_{pt} - E_{p0}$$

其中  $E_{p0}$  与  $E_{pt}$  分别为物体在始、末位置的重力势能，则式 (3) 可以改写成

$$W_G = -\Delta E_p$$

这就是重力做功与重力势能变化量之间的关系。具体而言就是：

物体下降，重力做正功， $W_G > 0$ ，物体重力势能减少， $\Delta E_p < 0$ ；物体上升，重力做负功或物体克服重力做功， $W_G < 0$ ，物体重力势能增大， $\Delta E_p > 0$ 。

必须注意，尽管重力势能取决于零势能面位置的选取，但重力势能的变化量与零势能面的选取无关。

## STSE

重力势能是一种“潜在”的能量形式，在适当的条件下这种能量可以释放出来。有关高楼坠物的事故报道屡屡见诸报端，一次次事故引发全民关注高空坠物这一“悬在城市上空的痛”。据测算，鸡蛋从4楼落下可把人头顶砸出肿包；从8楼落下会把头皮砸破；从18楼落下就会砸破头骨。如果鸡蛋从25楼落下……2019年，国家规定故意从高空抛弃物品者将被依法追究刑事责任。防止高楼坠物，杜绝高空抛物，遵纪守法，应该从我做起，从身边做起。

**示例** 如图 7-31 所示，树上与 A 等高的 P 处有一个质量  $m = 0.3 \text{ kg}$  的苹果下落。苹果有可能被人用篮子在与 B 等高处接住，也可能落到地面 C，还可能落到地面后滚入坑底 D 处。（ $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ）

(1) 分别以 A、C、E 所在水平面为零势能面，求 P 处苹果的重力势能。

(2) 苹果由 P 分别落至 C 或落至 D 的过程中，求重力所做的功以及重力势能的变化量。

**分析：**计算重力势能的关键是根据不同零势能面正确得出 P 的相对高度。而计算重力做功和重力势能变化量则与零势能面的位置无关。

**解：**(1) 以 A 所在水平面为零势能面，P 的相对高度  $h_A = 0$ ，则 P 处苹果的重力势能

$$E_{pA} = mgh_A = 0$$

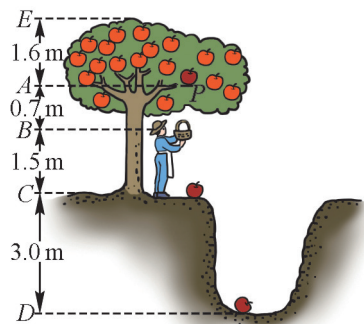


图 7-31 苹果的重力势能



以  $C$  所在水平面为零势能面,  $P$  的相对高度  $h_C = 2.2 \text{ m}$ , 则  $P$  处苹果的重力势能

$$E_{pC} = mgh_C = 0.3 \times 10 \times 2.2 \text{ J} = 6.6 \text{ J}$$

以  $E$  所在水平面为零势能面,  $P$  的相对高度  $h_E = -1.6 \text{ m}$ , 则  $P$  处苹果的重力势能

$$E_{pE} = mgh_E = 0.3 \times 10 \times (-1.6) \text{ J} = -4.8 \text{ J}$$

(2) 苹果由  $P$  落至  $C$  处, 高度降低  $\Delta h_C = 2.2 \text{ m}$ , 则

重力做正功  $W_{GC} = mg\Delta h_C = 0.3 \times 10 \times 2.2 \text{ J} = 6.6 \text{ J}$

重力势能变化量  $\Delta E_{pC} = -W_{GC} = -6.6 \text{ J}$

苹果由  $P$  落至  $D$  处, 高度降低  $\Delta h_D = 5.2 \text{ m}$ , 则

重力做正功  $W_{GD} = mg\Delta h_D = 0.3 \times 10 \times 5.2 \text{ J} = 15.6 \text{ J}$

重力势能变化量  $\Delta E_{pD} = -W_{GD} = -15.6 \text{ J}$

## 除了重力势能外还有其他形式的势能吗?

将图 7-32 所示的玩具青蛙拧紧发条后放在地上, 玩具青蛙便能自行跳跃前进。图 7-33 所示的运动员张弓搭箭, 蓄势待发, 当他放开弓弦后, 离弦之箭便飞驰而去。实际上, 跳跃的玩具青蛙和飞驰而去的箭所获得的动能分别来自发条被拧紧和弓被拉开时发生弹性形变所蓄积的能量。



图 7-32 玩具青蛙



图 7-33 射箭运动

发生弹性形变的物体由于各部分之间相对位置发生变化而具有的能量叫做**弹性势能** (elastic potential energy)。对于具有弹性的物体而言, 弹性形变程度越大, 物体所具有的弹性势能也越大。以弹簧为例, 弹簧不发生形变时的弹性势能为零。弹簧发生形变时, 它所蓄积的弹性势能与弹簧的形变量和弹簧的劲度系数都有关系。在弹性限度内, 若劲度系数一定, 形变量越大, 弹性势能越大; 形变量一定, 劲度系数越大, 弹性势能越大。

物体发生弹性形变时会产生弹力的作用, 弹力所做的功  $W$  与弹性势能变化量  $\Delta E_p$  之间的关系是

$$W = -\Delta E_p$$

这与重力做功和重力势能变化量的关系完全相同。

## 大家谈

在撑竿跳和跳板跳水中，运动员起跳阶段分别借助了撑竿和跳板的弹性作用。请分析撑竿和跳板的弹性势能在运动员完成动作过程中的变化。

## 问题与思考

- 判断下列关于重力做功和重力势能的说法是否正确，并简述理由。
  - 重力做多少正功，物体的重力势能就增加多少；重力做多少负功，物体的重力势能就减小多少。
  - 重力势能及其变化量都与零势能面的选取有关。
- 如图 7-34 所示，运动员从距地面高  $h_1 = 2.5 \text{ m}$  的  $A$  处投出一篮球，正中距地高  $h_3 = 3.05 \text{ m}$  的篮筐，球运动过程中到达的最高点  $B$  距地面高  $h_2 = 4 \text{ m}$ 。球的质量  $m = 0.6 \text{ kg}$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ 。按要求在表 7-2 中填入数据。

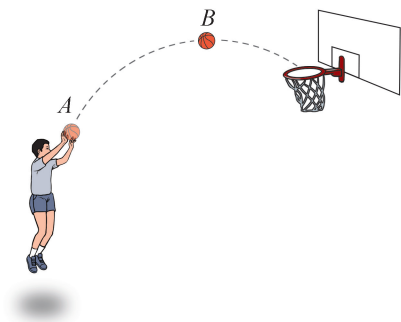


图 7-34

表 7-2

零势能面位置	篮筐	A 点	地面
篮球在 A 点的重力势能			
篮球在 B 点的重力势能			
从 A 到 B 过程中篮球重力做的功			
从 A 到 B 过程中篮球重力势能的变化			

- 图 7-35 所示为蹦床运动示意图。 $A$  为运动员到达的最高点； $B$  为运动员下落过程中刚接触蹦床时的位置； $C$  为运动员到达的最低点。运动员自  $A$  落至  $C$  的过程中，运动员的重力势能和蹦床的弹性势能如何变化？
- 质量相等的均匀木球和铁球放在水平地面上，两球重力势能的大小关系与零势能面的选取是否有关？

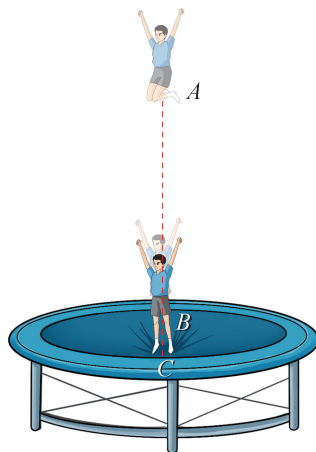


图 7-35

5. 跨越式跳高（图 7-36）在专业的田径比赛中已不常见，专业运动员普遍采用背越式跳高（图 7-37）。试从重力势能的角度分析原因。



图 7-36

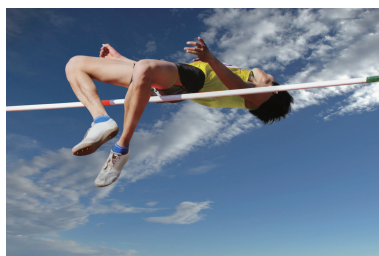


图 7-37

6. 如图 7-38 所示，地上有 3 摞书，每摞 25 本。每本书尺寸均为  $260\text{ mm} \times 185\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，质量均为  $500\text{ g}$ 。这些书刚好能放满一个三层书架，书架最低一层置物板距地面高  $50\text{ cm}$ ，相邻两层板的间距为  $40\text{ cm}$ ， $g$  取  $10\text{ m/s}^2$ 。将书从地面放到书架的过程中，至少需做多少功？

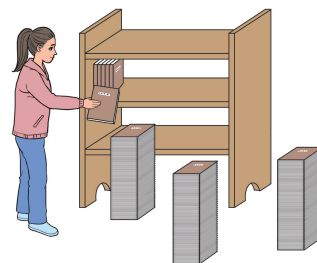


图 7-38



图 7-39 游乐园里的“海盗船”

## 第五节 机械能守恒定律

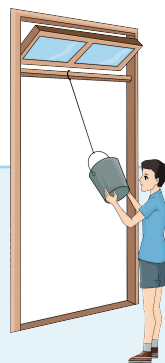
在物理学的发展过程中，各种形式的能量概念先后建立起来。物理学家发现，不同形式的能量可以相互转化，而且遵循能量守恒这一基本定律。图 7-39 所示的“海盗船”由低处往高处摆动时，它的重力势能增大，动能减小；由高处向低处摆动时，它的重力势能减小，动能增大。物理学中，把动能和势能统称为**机械能**（mechanical energy）。

在“海盗船”来回摆动的过程中，如果不计空气阻力和摩擦力，就只有重力做功，动能和势能相互转化，转化过程中它们的总和不变，即机械能守恒。

### 机械能守恒的条件是什么？

#### 自主活动

如图 7-40 所示，在一个提桶内放一些重物，用绳子将它悬挂在门框下。将提桶拉离竖直位置并凑近自己的鼻子后放手，提桶将前后摆动。如果放手后站着不动，提桶在摆动过程中是否会碰到鼻子呢？请尝试一下。

图 7-40  
“碰鼻”实验



在这个活动中,提桶与“海盜船”的摆动过程类似,涉及势能和动能的变化。这种变化源自势能与动能之间的转化,而这种转化又受制于一条重要的物理学定律,如果不知道这一定律,会担心提桶把鼻子撞扁。

势能和动能之间的相互转化有时不仅涉及重力势能,还会涉及弹性势能。如图 7-41 所示的蹦极运动,蹦极者在重力和弹性绳拉力的作用下下坠、反弹的过程中动能、重力势能和弹性势能之间不断相互转化。



图 7-41 蹦极运动

物体的机械能  $E$  等于其动能和势能的代数和,即

$$E = E_p + E_k$$

根据动能定理,合力对物体所做的功等于物体动能的变化量,即

$$W_{\text{合}} = \Delta E_k \quad (1)$$

将重力所做的功  $W_G$ 、弹力所做的功  $W_E$  分离出来,并用  $W'$  表示除重力和弹力以外其他力所做功的代数和,则式 (1) 可改写成

$$W' + W_G + W_E = \Delta E_k \quad (2)$$

根据重力、弹力做功的特点,用  $\Delta E_p$  表示重力势能与弹性势能变化量的代数和,则式 (2) 可以改写成

$$W' - \Delta E_p = \Delta E_k$$

$$\text{即} \quad W' = \Delta E_k + \Delta E_p = \Delta E \quad (3)$$

式中,  $\Delta E$  为机械能变化量。

若  $W' = 0$ , 则  $\Delta E = 0$ 。这表明除重力和弹力以外,其他外力做功为零时,机械能变化量为零,即机械能总量不变。

以上结论表明:在只有重力和弹力做功的系统内,动能与势能相互转化,机械能总量不变。这就是**机械能守恒定律** (law of conservation of mechanical energy)。

机械能守恒的条件是,只有重力和弹力做功,其他力不做功。由于不计空气阻力,自由落体运动和抛体运动过程中,物体的机械能都是守恒的。

## 助一臂

能量是物理学中极为重要的概念。除了机械能以外,能量还有很多种形式。能量这一概念的重大价值在于其在不同形式之间转化时的守恒性。适用于微观粒子范畴的量子力学问世后,许多传统的、重要的物理概念都得到了修正和发展,而能量守恒的观念却经受住了考验并继续发挥重要的作用。1930 年,物理学家泡利 (W. Pauli, 1900—1958) 由于坚信能量守恒的普适性而从理论上推测出一种新的粒子——中微子的存在,这一理论预言在 1956 年被实验所证实。现代物理学认为,中微子是解开许多宇宙之谜的钥匙。追求某种守恒性往往是产生科学思想必不可少的前提。科学家常有寻找守恒量的强烈愿望,与运动相联系的守恒量长久以来一直是物理学家们寻找的目标。

## 拓展视野

图 7-42 (a) 所示是质点在竖直平面内运动的轨道。以水平地面为横轴, 同时将水平地面作为重力势能的零势能面, 以质点的重力势能为纵轴并选取合适的标度, 建立如图 7-42 (b) 所示的直角坐标系。这样, 图 (b) 中与轨道轮廓相同的曲线将反映质点沿轨道运动时重力势能  $E_p$  的变化情况, 这条曲线就称为质点的势能曲线。若忽略运动过程中质点受到的阻力, 质点的机械能守恒。将质点由  $A$  处静止释放, 其机械能恒为  $E_1$ , 当质点沿轨道运动到  $D$  处时, 质点的动能  $E_{kD}$  和重力势能  $E_{pD}$  如图 (b) 所标示。若将质点由  $B$  处静止释放, 质点运动过程中的机械能恒为  $E_2$ , 质点将无法到达图 (b) 中  $C$  处右侧的所有位置。势能曲线的起伏直接反映了质点重力势能的变化情况, 当质点机械能守恒时, 势能曲线还能反映质点动能变化的情况。

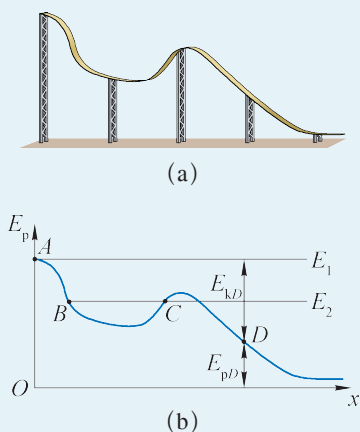


图 7-42 势能曲线

## 如何运用机械能守恒定律解决实际问题?

章首图的频闪照片表明, 小球自高处摆动至低处, 位置不断降低, 重力势能不断减小; 小球相邻影像的间隔越来越大, 表明小球的速度越来越大, 即小球的动能不断增大。反之, 小球由低处摆动至高处, 重力势能增大, 动能减小。

实际上小球摆动时受到空气阻力的作用, 但小球在左右两侧的最大高度大致相等。这表明, 小球从右侧摆动至左侧的过程中, 阻力所做的功对摆球的影响不大。通常我们会忽略空气阻力, 便可以运用机械能守恒定律方便地获得小球摆动过程中任意位置高度和速率的关系。但如果用牛顿运动定律分析小球的运动, 即便忽略空气阻力, 细线对小球不断变化的拉力作用将是不可回避的, 解决问题的过程将变得十分复杂。

机械能守恒定律通常用动能和势能相互转化时总量保持不变的形式来表示。

如图 7-43 所示, 将质量为  $m$  的物体从离水平地面高为  $h_1$  的  $A$  处以速度  $v_1$  抛出, 当物体到达离地高为  $h_2$  的  $B$  处时速度为  $v_2$ 。若忽略空气阻力, 物体从  $A$  到  $B$  的过程中机械能守恒, 以地面为零势能面, 则机械能守恒的表达式可以写作

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

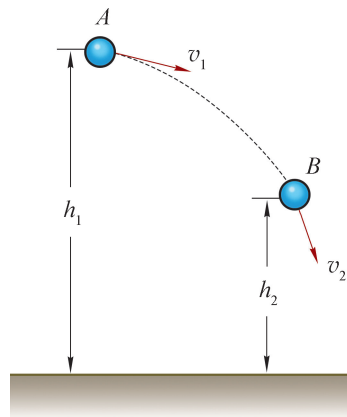


图 7-43 抛体运动

若用  $E_{k0}$ 、 $E_{p0}$  和  $E_0$  分别表示物体位于初位置  $A$  时的动能、势能和机械能；用  $E_{kt}$ 、 $E_{pt}$  和  $E_t$  分别表示物体位于末位置  $B$  时的动能、势能和机械能，则机械能守恒的表达式又可写作

$$E_{k0} + E_{p0} = E_{kt} + E_{pt}$$

或

$$E_0 = E_t$$

**示例** 如图 7-44 所示，滑雪运动员从被冰雪覆盖的斜坡顶端  $A$  以速度  $v_A = 2 \text{ m/s}$  滑下，到达坡底  $B$  时的速度为  $v_B = 16 \text{ m/s}$ 。运动过程中的阻力均忽略不计， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ 。

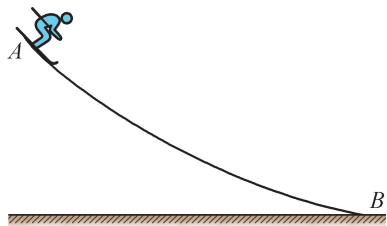


图 7-44 斜坡上的下滑运动

(1)  $A$ 、 $B$  两点间的竖直高度差  $h$  为多少？

(2) 如果运动员由坡底以速度  $v'_B = 7 \text{ m/s}$  冲上坡面，它能到达的最高点高度  $h'$  为多少？

**分析：**由于斜坡的形状不确定，无法用牛顿第二定律求出运动员的加速度和速度。运动员在  $A$ 、 $B$  间运动时，只有重力对运动员做功，运动员的机械能守恒，由此可以根据机械能守恒定律，用  $A$ 、 $B$  两点机械能之间的关系求解。

**解：**(1) 运动员在运动过程中，只有重力做功，因此运动员的机械能守恒。将  $B$  所在的水平面设为零势能面，根据机械能守恒定律，有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh &= \frac{1}{2}mv_B^2 + 0 \\ h &= \frac{v_B^2 - v_A^2}{2g} = \frac{16^2 - 2^2}{2 \times 10} \text{ m} = 12.6 \text{ m} \end{aligned}$$

(2) 运动员从坡底运动到最高点的过程中只有重力做功，机械能仍然守恒，仍以  $B$  所在的水平面为零势能面，则有

$$\begin{aligned} 0 + mgh' &= \frac{1}{2}mv_B'^2 + 0 \\ h' &= \frac{v_B'^2}{2g} = \frac{7^2}{2 \times 10} \text{ m} = 2.45 \text{ m} \end{aligned}$$

用机械能守恒定律解决问题的一般步骤为：(1) 确定研究对象；(2) 判断机械能守恒条件是否成立；(3) 选取零势能面；(4) 确定始末状态的动能和势能；(5) 列出相关表达式并求得结果。

机械能守恒定律是物理学的重要规律，机械能守恒定律关注的是两个运动状态之间的能量关系，并不过多地涉及运动过程的细节。因此，在满足机械能守恒条件时，运用机械能守恒定律解决运动过程较为复杂的机械运动问题往往具有明显的优势。

## 学生实验

## 验证机械能守恒定律

## 实验原理与方案

在物体运动过程中，空气阻力和重力都对物体做功，当空气阻力远小于重力时，物体的机械能近似守恒。为了验证机械能近似守恒，需要测量物体在任意位置处的动能和重力势能。本实验通过测量物体的速度和高度间接测量物体的动能和重力势能。

## 实验装置与方法

图 7-45 所示的实验装置可供选用。本装置中，光电门传感器固定在摆锤上。由于连接杆的质量远小于摆锤质量，摆动过程中，连接杆的动能和重力势能可以忽略，只要测量摆锤（含光电门传感器）的动能和重力势能即可。6 块挡光片可用螺栓固定在不同位置并由板上刻度读出其对应的高度。挡光片宽度  $d$ 、摆锤的质量  $m$  已知。释放摆锤，光电门传感器可以分别测出摆锤经过 6 个挡光片时的速度  $v$  的大小。

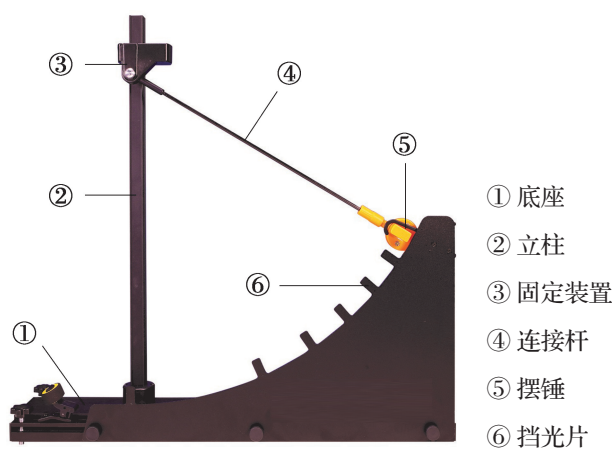


图 7-45 验证机械能守恒定律的实验装置

## 实验操作与数据收集

释放摆锤，记录各个挡光片所在高度和摆锤通过各个挡光片时的瞬时速度大小，填入表 7-3。

表 7-3 实验数据记录表

挡光片宽度  $d =$  \_\_\_\_\_ m，摆锤质量  $m =$  \_\_\_\_\_ kg

挡光片	1	2	3	4	5	6
高度 $h/m$						
速度 $v/(m \cdot s^{-1})$						

## 数据分析

根据实验数据，选择合适的坐标系描点作图，并进行分析。

## 实验结论

\_\_\_\_\_。



## 交流与讨论

各组就实验数据进行交流、比较，分析实验结果的异同及其原因，探讨实验的改进方法。

## 问题与思考

1. 分别判断下列两组情境中，哪个过程更接近机械能守恒，并简述理由。

- (1) A. 足球被踢起并飞入球门的过程；  
B. 铅球被斜向上抛出再落地的过程。
- (2) A. 橡皮擦从书桌滑落到地面的过程；  
B. 雨滴从高空下落至地面的过程。

2. 图 7-46 中一颗铁弹丸从离水面不高处落入水中，溅起来的几颗小水珠却可以跳得很高。简要分析这一现象。

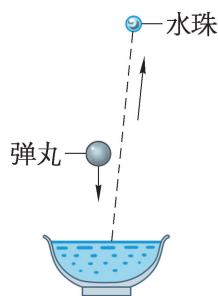


图 7-46

3. 在光滑水平面上做匀速圆周运动的物体机械能是否守恒？

4. 上海轨交 3 号线车站比轨道略高，图 7-47 所示是设计方案示意图。试从有效利用能源的角度，分析这种设计的优点。

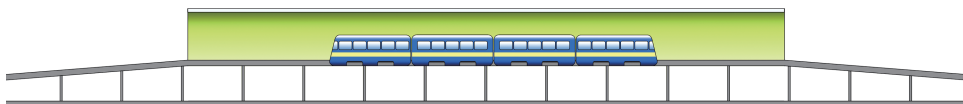


图 7-47

5. 将质点从高处以某一初速度斜向上抛出，不计空气阻力。判断质点落地时的速度大小与质点的质量、初速度大小和方向、抛出时的高度是否有关，并简述理由。

## 学期活动

解释交通法规中汽车刹车距离与车速之间的关系。

为了保证交通安全，汽车在行驶过程中严禁超速，且车辆之间应该保持必要的安全距离。通过查阅相关资料、访问有关部门，收集关于汽车刹车距离与车速关系的数据，撰写调查报告。

活动要求：

- (1) 摘录相关资料中关于我国最高车速和安全车距的规定和数据，标明出处（如“……”摘自《×××》第××页）。
- (2) 将上述信息按照一定的逻辑顺序排列（可以用图表的形式）。
- (3) 运用动能定理对收集到的数据进行分析，阐述我国交通法规中有关条例的制定依据。
- (4) 以小报的形式进行展示与交流。

## 小结

### • 基本概念和基本规律

**功：**当物体在力的方向上发生位移时，称力对物体做了功。恒力对物体所做的功等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角的余弦三者的乘积。

**平均功率：**一段时间内做的总功与做功时间的比。恒力与位移方向相同时，等于恒力大小与平均速度大小的乘积。

**瞬时功率：**当力与瞬时速度的方向相同时，等于力的大小与瞬时速度大小的乘积。

**额定功率：**机械在正常状态下长时间工作不应超过的功率最大值。

**动能：**物体的质量与速度的二次方乘积的一半。

**动能定理：**物体受到的合力所做的功等于物体动能的变化量。

**重力势能：**物体的重力与物体相对于零势能面高度的乘积。

**弹性势能：**发生弹性形变的物体由于各部分之间相对位置发生变化而具有的能量。

**机械能：**物体动能和势能的代数和。

**机械能守恒定律：**在只有重力和弹力做功的系统内，动能与势能相互转化，机械能总量不变。

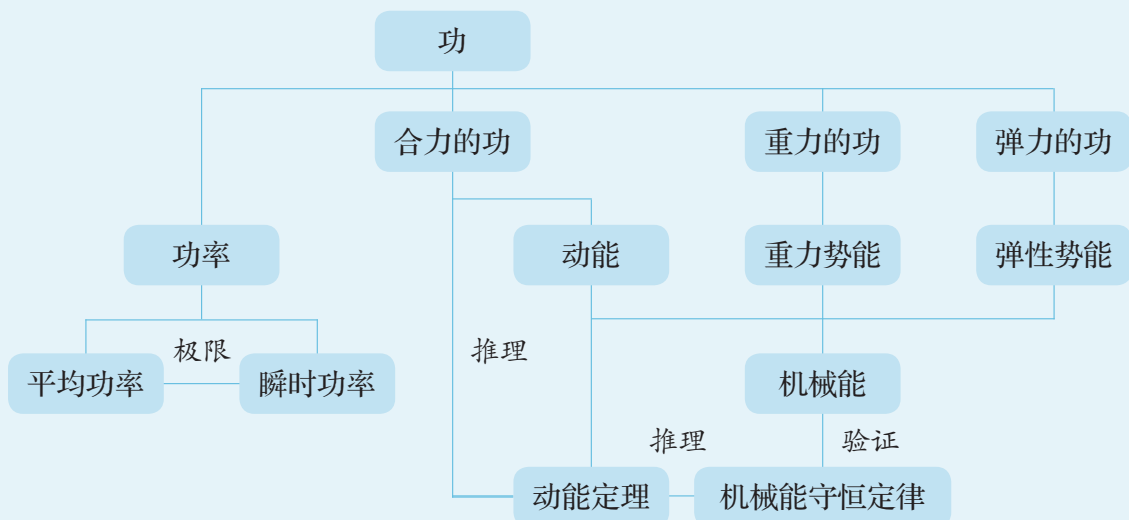
### • 基本方法

通过动能定理、机械能守恒定律的推导过程，体会理论演绎的方法。

通过验证机械能守恒定律的实验，学会分析和处理实验数据的方法。

通过应用机械能守恒定律解决问题的过程，体会守恒思想，领悟从守恒的角度分析问题的方法。

### • 知识结构图



## 复习与巩固

- 判断下列关于功的说法是否正确，并简述理由。
  - 功有正负之分，所以功是矢量。
  - 力越大，力对物体所做的功就越多。
  - 力对物体不做功，物体的位移一定为零。
- 定性作出汽车以恒定速度沿斜坡向上行驶的过程中，汽车的动能、势能和机械能随汽车离地面高度变化的图像，并简述理由。
- 神舟飞船从发射升空至返回大致经历了以下四个阶段，判断各个阶段返回舱的机械能是否守恒，并简述理由。
  - 飞船发射升空。
  - 飞船在椭圆轨道上绕地球运行。
  - 飞船进行最后一圈绕地飞行时进入返回姿态，返回舱与推进舱分离，制动发动机点火，飞船持续下降预备进入大气层。
  - 飞船借助降落伞和反推发动机逐步减速穿越大气层，以  $3\sim 4\text{ m/s}$  的速度下降预备着陆。
- 起重机吊住质量为  $m$  的木箱，沿竖直方向以加速度  $a$  匀加速上升一段距离  $h$ 。重力加速度为  $g$ ，不计空气阻力，求起重机对木箱所做的功。
- 小明身高  $1.8\text{ m}$ ，在运动会上参加跳高比赛时采取背越式跳法，起跳后恰能越过  $1.8\text{ m}$  高的横杆。估算小明为此做了多少功？（ $g$  取  $10\text{ m/s}^2$ ）
- 有研究表明，游泳时人受到水的阻力正比于人在水中速度的二次方。男子自由泳  $100\text{ m}$  和  $800\text{ m}$  的世界纪录分别为  $46.91\text{ s}$  和  $452.12\text{ s}$ 。试比较运动员创造以上两项世界纪录时所做的功和平均功率。
- 如图 7-48 所示，质量为  $m$  的物体在水平拉力  $F$  的作用下，由静止开始沿粗糙水平面向前运动  $s_1$  后，撤去拉力  $F$ ，已知物体与水平面间的摩擦力为  $F_f$ 。求：
  - 刚撤去拉力时，物体的速度  $v$ ；
  - 物体滑行的最大距离  $s_2$ 。

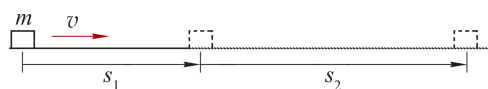


图 7-48

- \*8. 研究机械能守恒定律的装置如图 7-49 所示，用光电门传感器测量摆锤释放后经过各个挡光片时的速度，结合各挡光片相对轨道最低点的高度和摆锤质量，可



以分析摆锤运动过程中机械能的变化。  
某组同学在一次实验中，将挡光片等间隔放置在圆弧轨道上，部分实验数据如表 7-4 所示。

- (1) 在图 7-50 中用横轴表示高度  $h$ ，纵轴表示能量，绘制运动过程中摆锤重力势能  $E_p$ 、动能  $E_k$  及机械能  $E$  随高度  $h$  变化的图线。
- (2) 以下哪组数据最接近表格中  $x$ 、 $y$  的合理取值？简述理由。
- A.  $x = 0.089$ ， $y = 0.116$                       B.  $x = 0.098$ ， $y = 0.125$
- C.  $x = 0.103$ ， $y = 0.130$                       D.  $x = 0.106$ ， $y = 0.113$

表 7-4

序号	1	2	3	4	5
高度 $h$ /cm	15.2	10.0	5.8	2.7	0.7
势能 $E_p$ /J	0.149	0.098	0.057	0.027	0.007
动能 $E_k$ /J	0.019	0.060	0.089	$x$	0.106
机械能 $E$ /J	0.168	0.158	0.146	$y$	0.113



图 7-49

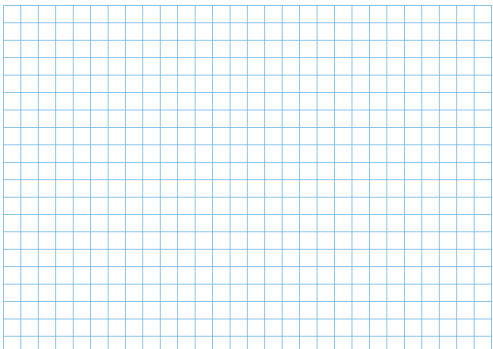


图 7-50

\*9. 某电动汽车动力性能参数如表 7-5 所示。汽车由静止开始匀加速启动，电机以额定功率工作后保持电机功率不变，继续加速 10 s 达到最大速度，假设行驶过程中汽车受到的阻力保持不变。求全过程中汽车的位移大小。

表 7-5

动力电池容量 / (kW·h)	48.3
电机额定功率 /kW	150
最高车速 / (km·h <sup>-1</sup> )	135
整车质量 /kg	1 710
0~50 km/h 加速时间 /s	4.2

\*10. 某汽车质量  $m = 2\,000\text{ kg}$ 、发动机最大输出功率  $P_{\max} = 150\text{ kW}$ ，以  $v_0 = 72\text{ km/h}$  的速率匀速行驶时，发动机和传动与驱动系统内的功率分配关系如图 7-51 所示。已知水泵的功率  $P_1$  恒定，传动与变速等内部机件摩擦而损耗的功率  $P_2$  与汽车的行驶速率成正比，汽车行驶时所受的空气阻力  $F_{\text{阻}1}$  与行驶速率  $v$  的关系为  $F_{\text{阻}1} = kv^2$  ( $k$  为恒量)，所受路面的阻力  $F_{\text{阻}2}$  大小恒定。

- (1) 以  $v_0$  匀速运动时，求汽车驱动力  $F_0$  的大小。
- (2) 汽车以  $v_0$  行驶时能产生的最大加速度大小为多少？
- (3) 汽车能否以  $v = 3v_0$  的速率匀速行驶？简述理由。

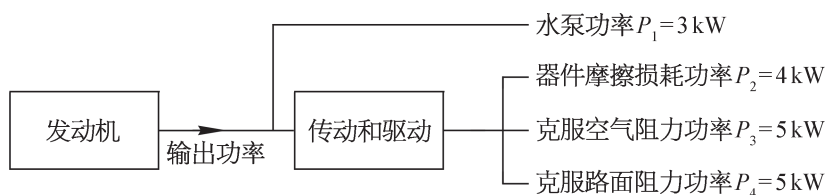


图 7-51

\*11. 已知某公园中喷泉的喷水高度可达  $h$ ，任何时候都有体积为  $V$  的水处于空中，水的密度为  $\rho$ 。求该喷泉底部水泵的最小功率  $P$  和喷水管口的横截面积  $S$ 。



图示为位于天鹅座的双星辇道增七（Albireo）的照片。这个明亮的双星系统距离我们约 380 光年，约 75 000 年彼此绕行一周。实际上其中的黄色星本身也是一对双星，只因相距太近而难以分辨。浩瀚的星空蕴藏着无穷的奥秘，一架小小的望远镜就能让我们领略到星空无尽的魅力。极目远望，我们能看到多少颗恒星？宇宙中的恒星是有限的还是无限的？

## 第八章

# 牛顿力学的局限性与相对论初步

---

- 在本章中我们将：

1. 知道牛顿力学的局限性，认识物理学理论的发展与适用范围，初步了解相对论的基本结论。
2. 通过人类对宇宙天体的探索历程初步了解宇宙的起源以及恒星演化的基本观点。
3. 体会人类对自然界的探索是不断深入、永无止境的。

- 本章的学习将用到匀速直线运动的规律和牛顿力学的基本方法。

- 本章的学习有助于现代时空观与物质观的形成。





图 8-1 激光导星

## 第一节 牛顿力学的局限性

自 17 世纪以来，以牛顿三大定律和万有引力定律为基础的牛顿力学在解释自然界所发生的各种物理现象时都取得了极大的成功，同时，在各类工程技术中也有了广泛的应用。按照牛顿力学的观点，只要给定物体的初始条件和所受合力，就能给出物体之后运动状态的完整描述。但实际上，牛顿力学的应用有一定的局限性，或者说，有一定的适用范围。局限性主要体现在高速、微观及强引力场情况下牛顿力学不再适用。

### ❓ 在恒力作用下，物体运动速度会越来越大甚至超过光速吗？

按照牛顿第二定律，物体在恒力作用下，其加速度是恒定的，即运动速度将随时间的增加而持续增加，只要时间足够长，速度就可以任意大甚至超过光速。实际真是如此吗？我们知道，虽然牛顿力学已经在非常广泛的领域内得到了验证，但都是在低速、宏观及弱引力场情况下的验证。即使是宇宙飞船、人造卫星这样高速运动的物体，其速度也远远低于光速。在有相关实验验证之前，我们并不能推断牛顿力学对高速运动依然成立。



爱因斯坦在 16 岁时就问过这样简单而又深刻的问题，如果以光速追赶一束光，将会看到什么？我们会看到静止的光吗？日常经验告诉我们，如果驾车追赶一列火车的话，汽车速度越接近火车的速度，我们就会觉得火车越慢。如果汽车速度与火车速度相同，就会觉得火车似乎是静止的（不考虑周围环境因素）。爱因斯坦经过深入思考后认为，如果以光速追赶一束光，应当看到一束在空间中停滞不前、静止的光，但这样又违反了麦克斯韦电磁理论，不可能出现这种情况。

**示例** 现代大型高能粒子加速器可以把粒子的速度加速到与光速极为接近的程度。质子质量  $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，如果把一个质子加速到具有能量  $1.60 \times 10^{-10} \text{ J}$ ，并假定这个能量就是质子具有的动能，按照牛顿力学，质子的速度为多大？

$$\begin{aligned} \text{解: } E_k &= \frac{1}{2} m_p v^2 \\ v &= \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.60 \times 10^{-10}}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \approx 4.38 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 1.46 c > c \end{aligned}$$

由此可见，按照牛顿力学，高能质子的速度将超过光速，这个结论是错误的，到目前为止，实验上从未发现过超光速的粒子。事实上，任何粒子的速度都不可能超过光速。可见，牛顿力学在高速运动情况下不再适用。

### 拓展视野

在高能物理中，我们通常使用电子伏 (eV) 来衡量高能粒子的能量，它和国际单位制中能量单位 J 的换算关系为  $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。常用的单位还有兆电子伏 (MeV)、吉电子伏 (GeV) 和太电子伏 (TeV)， $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ， $1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV}$ ， $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV}$ 。目前世界上最大的加速器——大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 可以将单个质子加速到  $0.999\,999\,99 c$ ，使之具有  $7 \text{ TeV}$  的能量。

牛顿力学除了无法应用于高速运动的情况外，在解释其他现象时也遇到了困难。按照牛顿力学，波的传播需要介质，如声波和水波的传播。但我们知道，光可以在真空中传播。为了将光纳入牛顿力学的范畴，物理学家惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 借用了古希腊学者亚里士多德提出的观点，假设了光传播所需的特殊介质——以太的存在。为了测量地球相对以太的运动，1887 年，物理学家迈克耳孙 (A. A. Michelson, 1852—1931) 和莫雷 (E. W. Morley, 1838—1923) 做了一系列精密测量的实验。结果却表明，不存在相对以太的运动，不同方向的光速没有差异，即真空中的光速在任何参考系下都具有相同的数值，与参考系的相对速度无关，以太其实并不存在。或者说，以太的引入是多余的，光可以在真空中传播。

## ❓ 牛顿力学可以描述原子的运动吗？

牛顿力学在解释涉及原子等微观粒子的物理现象时也遇到了极大的困难。1911年，物理学家卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937）提出了原子结构理论，原子是由原子核及核外电子组成的。卢瑟福的理论对原子物理和原子核物理的发展作出了极为重要的贡献，但这个理论无法解释原子的稳定性及其他很多性质。事实上，在微观领域，物理量不再是连续变化的，而是分立的。微观粒子既有粒子性，又有波动性。牛顿力学对此无能为力，只有量子力学才能正确描述原子、质子及电子等微观粒子的性质和状态，牛顿力学不再适用于微观世界。我们所熟悉的激光也是在量子理论的基础上发明出来的，激光的用途广泛，图8-1所示为天文台的激光导星。所谓激光导星，是通过发射激光来矫正地球大气扰动的影响，从而使地面望远镜获得稳定的高质量天体影像。

## ❓ 牛顿力学适用于所有天体吗？

一个质量为  $m$ 、半径为  $R$  的天体所产生的引力场强弱通常用一个数  $\frac{mG}{Rc^2}$  来描写，其中  $G$  为引力常量， $c$  为真空中的光速。对于地球，这个值约为  $10^{-9}$ ，对于太阳约为  $10^{-6}$ ，而对于中子星，这个值约为  $10^{-1}$ ，黑洞则接近于 1。显然，这个值越小，表示引力场越弱；越接近于 1，则表示引力场越强。牛顿力学在描述行星等弱引力场天体运动方面取得了很大的成功，牛顿力学对天体运动规律的解释，不仅预言了海王星的存在和哈雷彗星的回归，并且也将地球上物体的运动规律和天体的运动规律统一起来，达到了当时科学的高峰。但随着科学的发展，我们发现牛顿力学无法正确描述中子星、黑洞等强引力场天体的运动，也不能用于描述宇宙的演化规律，即牛顿力学在强引力场情况下也不再适用。

## ❓ 牛顿力学的局限性有何启示？

牛顿力学存在局限性，或者说牛顿力学的应用有一定的限制范围，但这并不表示牛顿力学就失去了存在的意义。在低速、宏观和弱引力场情况下，牛顿力学仍是非常精确的理论。实际上，任何理论包括牛顿力学的应用，都有一定的条件和适用范围。超出了这个范围，理论就不再适用，需要寻找新的更加一般的理论。一般来说，新的理论并不会完全否定原有理论，而是将原有理论作为新理论的一个特殊情况，或者说，原有理论是新理论的一个近似。

从物理学的发展历史可以看到，人类对自然界的探索是不断深入的，从简单到复杂，从特殊到一般，从零散到整体，从表象到本质，每一次新现象的发现，每一个新理论的建立，都使我们对自然界的认识更全面、更准确、更深入。人类对科学的探索是永无止境的。

## 问题与思考

1. 下列物理现象中，哪些可以在牛顿力学的框架下得到解释？哪些不能在牛顿力学的框架下得到解释？试简述理由。
- (1) 地球绕太阳公转；(2) 量子通信；(3) 引力波；(4) 加速器中高能粒子的运动；(5) 激光。

2. 计算表 8-1 中物体运动速度的速度比  $\frac{v}{c}$  及因子  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 。

表 8-1

运动物体	步行的人	奔跑中的短跑运动员	高铁	卫星	从地球逃逸的卫星	加速器中的高能粒子
速度 $v$	5 km/h	10 m/s	300 km/h	3.08 km/s	11.2 km/s	0.999 9 $c$

3. 北京正负电子对撞机是我国第一台高能加速器，可以将电子能量加速到  $3.52 \times 10^{-10} \text{ J}$  (2.2 GeV)。按照牛顿力学，这个电子的速度是多大？这种情况下，牛顿力学是否适用？为什么？
4. 对于质量为 1.4 倍太阳质量、半径与地球相同的白矮星，计算它的  $\frac{mG}{Rc^2}$ 。你认为牛顿力学可以正确描写白矮星的运动吗？简述理由。(太阳质量  $m_{\text{日}} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，引力常量  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，地球半径  $r_{\text{地}} = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ，光速  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
5. 牛顿力学的局限性体现在哪些方面？

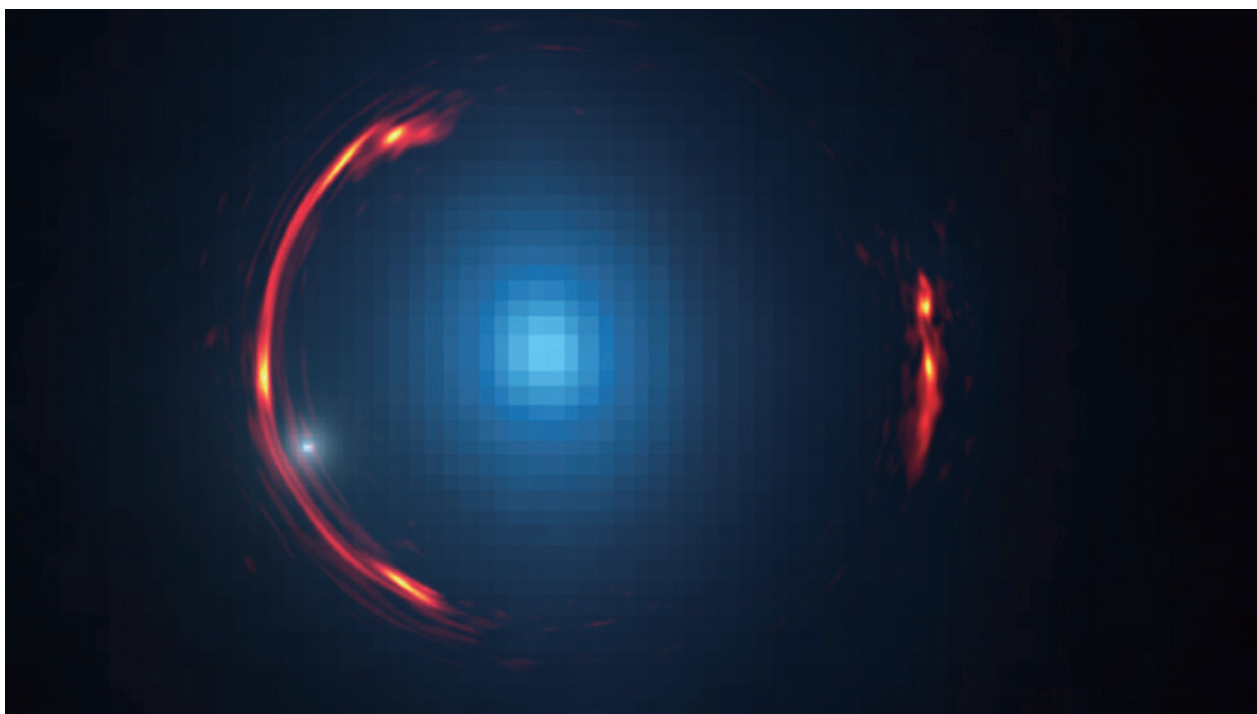


图 8-2 爱因斯坦环

## 第二节 相对论初步

19 世纪末，以牛顿力学、热力学和统计物理以及电磁理论为支柱的经典物理学已经形成完整的科学体系，自然界的各种物理现象几乎都能在这一理论框架下得到解释。1900 年，物理学家开尔文勋爵，即 W. 汤姆孙 (W. Thomson, 1824—1907) 在回顾了物理学所取得的伟大成就之后，充满自信地宣称，物理学的大厦已经基本完成，剩下的只是一些修饰工作。但他在展望 20 世纪物理学前景时也承认，明朗的天空中还有两朵小小的、令人不安的乌云。正是这两朵乌云，引发了现代物理学的伟大革命，导致了相对论和量子力学的诞生。

### ❓ 光速是有限的吗？

我们知道，真空中的光速  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ，但一直到 17 世纪，科学界对光速是否有限还是有争议的，甚至当时的一些著名学者都认为光速是无限的，光的传播不需要时间。伽利略曾提出过测量光速的设想，如图 8-3 所示，两个人分别站在相距数千米的山头，第一个人举起灯笼并开始计时，当第二个人看到第一个人的灯笼后立即举起自己的灯



图 8-3 伽利略设想的光速测量示意图



笼，当第一个人看到第二个人的灯笼后便停止计时，以此来计算出光的速度。

可以想象，以当时的测量精度，这个实验是不可能完成的，因为光传播 3 km 的距离只需要约  $10\text{ }\mu\text{s}$  的时间。1676 年，丹麦天文学家罗默 (O. C. Romer, 1644—1710) 通过对“木卫一”的观测，首次计算出光速为  $2.2 \times 10^8\text{ m/s}$ ，这个数值虽然误差较大，但已经是一个很了不起的结果，第一次证明了光速是有限的。19 世纪，法国物理学家菲索 (A. H. L. Fizeau, 1819—1896) 和傅科 (J. B. L. Foucault, 1819—1868) 分别用旋转齿轮和旋转镜面法对光速进行了测量，得到了相当精确的结果。

## 什么是相对性原理？

我们知道，牛顿运动定律成立的参考系称为惯性系，而相对惯性系做匀速直线运动的参考系也是惯性系。伽利略相对性原理告诉我们，力学规律在任何惯性系中都具有相同的形式。伽利略早在 1632 年就指出，在一艘行驶平稳的大船里，无法通过密闭船舱内的力学实验来判断大船是否在行驶。但相对性原理能推广到所有物理规律吗？

英国物理学家麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 在 1864 年证明光是电磁波，在真空中的传播速度就是光速  $c$ ，且不涉及具体的参考系。那么，光速在哪个参考系正好等于  $c$ ？如果在  $S$  参考系等于  $c$ ，那么在另一个以速度  $v$  相对  $S$  参考系做匀速直线运动的  $S'$  参考系中，是否还等于  $c$  (图 8-4)？

如果认为光在所有惯性系中的速度都是  $c$ ，那就违反了基于伽利略相对性原理得到的速度合成公式，也就违反了伽利略相对性原理；如果认为伽利略相对性原理对光也成立，满足速度合成公式，那么光应该只在一个特殊的惯性系中速度为  $c$ 。但这样又说明光速不是在所有惯性系中都等于  $c$ ，实际上也违反了相对性原理。物理学家们陷入了两难境地。

为了解决这个问题，爱因斯坦 (图 8-5) 抛弃了传统的思维方式，另辟蹊径，在 1905 年提出了两条基本原理，从而建立了一个全新的理论——狭义相对论。这两条原理可以表述如下：

**相对性原理：**物理规律包括电磁规律，在所有惯性系中都具有相同的形式。

**光速不变原理：**真空中的光速在所有惯性系中都是相同的，与光源和观测者的速度无关。

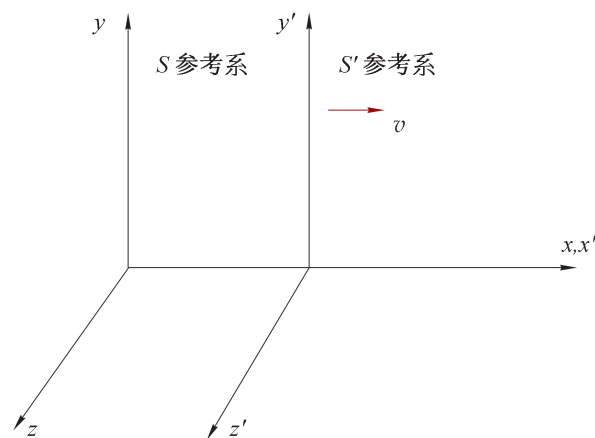


图 8-4 互相做匀速直线运动的参考系

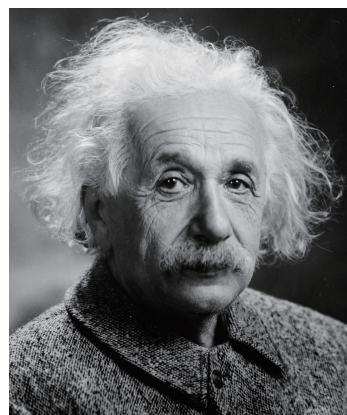


图 8-5 爱因斯坦

## 大家谈

牛顿的时空观认为，空间就是一个可以容纳一切物体而又广阔无边的无限大的箱子，时间则是均匀流逝的长河；没有起点，也没有终点。物体在空间中运动，时间则标记物体运动的延续性。但物体的运动并不会影响时间和空间的性质。你是怎么理解时间和空间的呢？

在狭义相对论中，时间和空间不再是绝对的，而是统一在一个四维时空之中。爱因斯坦相对论的建立，给物理学带来了革命性的变化，彻底抛弃了牛顿的绝对时空观，建立了全新的相对论时空观，对现代科学的发展具有深远的意义。

作为狭义相对论两个基本原理的直接推论，就是**同时的相对性**，即在一个参考系中同时发生的事件，在另一个参考系中不再同时。假设一列高铁沿直线轨道以匀速  $v$  向右运动，车厢中央的光源在时刻  $t=0$  发出一个闪光，如果车厢长度为  $2L$ ，则经过时间  $\frac{L}{c}$  后闪光分别到达车厢的前壁和后壁。对于车厢里的观察者来说，车厢是惯性系，光向前及向后的传播速度相同，传播的距离相同，因此闪光同时到达车厢的前壁及后壁，即这两个事件对车上的观察者来说是同时发生的（图 8-6）。

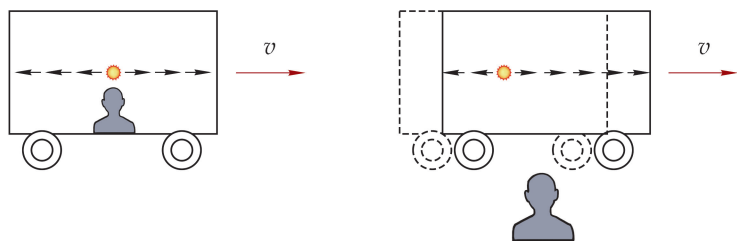


图 8-6 同时的相对性

但地面上的观察者不这么认为，因为当闪光向车厢前壁传播时，车厢也在以速度  $v$  向前运动，因此，闪光到达前壁的距离要比到达后壁的距离长一些，而光速是不变的，所以在地面的观察者看来，闪光先到达车厢后壁，后到达车厢前壁。即对地面上的观察者而言，这两个事件不是同时发生的。

## 大家谈

如果有另一列高铁以匀速  $v$  向左运动，那么这列高铁上的观察者认为第一列高铁上闪光到达车厢前、后壁是同时的，还是不同时的？如果不是同时的，哪个先发生？如果第一列高铁是静止的，情况又如何？

这个结论与我们头脑中的固有观念是冲突的，我们的直觉认为，如果两个事件在一个参考系中是同时的，那在其他参考系中也一定是同时的，这似乎是天经地义的。但如果我们承认爱因斯坦的两条基本原理，则同时的相对性就是自然的结论。但为什么日常生活中我们觉察不到这种相对性？那是因为日常生活中涉及的速度都远远小于光速，这一差异我们是感觉不到的。

牛顿力学认为，两个先后发生的事件，在不同惯性系中观察到的时间间隔都是相同的。但在狭义相对论看来，不同惯性系观察到的时间间隔是不同的（图 8-7）。假设一列高铁沿直线轨道以匀速  $v$  向右运动，车厢地板上有一个光源向上发出一个闪光，被车厢顶部的反射镜反射回车厢地板，并用一个钟记录下光脉冲来回运动经历的时间。假设车厢高度为  $h$ ，因为光速为  $c$ ，所以车厢里的观察者看到的时间间隔为  $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ 。但在地面上的观察者看来，当光脉冲向上传播和返回时，车厢同时在以匀速  $v$  向右运动，因此光脉冲的路径是等腰三角形的两条斜边，如果光脉冲来回的时间间隔是  $\Delta t$ ，则有

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2}$$

消去  $h$  后可得

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t'$$

其中  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ，因为  $v < c$ ，所以因子  $\gamma > 1$ ，故  $\Delta t > \Delta t'$ 。

即在惯性系中，运动的钟（即高铁上的钟）比静止的钟要走得慢。这个结论称为狭义相对论的时间膨胀或**钟慢效应**，这体现了时间的相对性。我们把在自身静止的参考系内测得的时间称为固有时。显然，固有时的时间间隔是最短的。

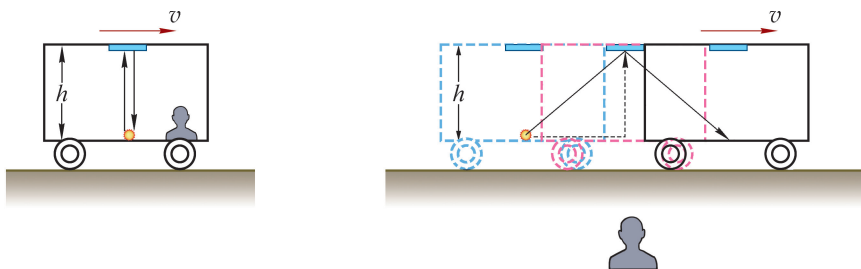


图 8-7 时间的相对性

## 拓展视野

对于速度  $v_1 = 300 \text{ km/h}$  的高铁、速度  $v_2 = 7.9 \text{ km/s}$  的近地卫星和速度  $v_3 = 0.999 c$  的高能粒子，计算各自的时间膨胀效应有多大。由  $\gamma$  的表达式得

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\left(300 \times \frac{10^3}{3600}\right)^2}{299\,792\,458^2}}} \approx 1 + 3.9 \times 10^{-14} \\ \gamma_2 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(7.9 \times 10^3)^2}{299\,792\,458^2}}} \approx 1 + 3.5 \times 10^{-10} \\ \gamma_3 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_3^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.999^2}} \approx 22.37\end{aligned}$$

可见，即使是像卫星这样的高速运动物体，时间膨胀效应也是微乎其微的，只有接近光速的高能粒子才会有显著的时间膨胀效应。

必须指出，时间膨胀或钟慢效应并不是钟出了问题，而是由狭义相对论的时空性质导致的。一个静止的观察者会发现匀速运动参考系中所有的物理过程都变慢了，甚至生命进程也变慢了。而在这个运动参考系中的观察者却认为一切正常，并不觉得自己看到的一切在变慢。由于运动是相对的，两个互相做相对运动的参考系中的观察者会认为对方的钟都在变慢。

物体长度的测量和同时性密切相关，如果要测量一个直杆的长度，在相对直杆静止的参考系内，只需测出直杆两端的位置然后求出位置的差即可。因为直杆是静止的，所以两端位置的测量并不要求是同时的。但如果直杆是运动的，要测出直杆的长度，就必须同时测出两端的位置，否则测出的就不是直杆的长度了。既然同时性是相对的，那么长度的测量也一定是相对的。根据同时的相对性可以得出

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < L_0$$

其中  $L$  为地面观察者测得的直杆长度， $L_0$  为在相对直杆静止的参考系内测得的长度，称为固有长度。因此，狭义相对论告诉我们，物体沿运动方向的长度会缩短，这个结果称为狭义相对论的长度收缩或**尺缩效应**，这就是长度的相对性。



## 拓展视野

可以这样考虑来测量直杆的长度。如图 8-8 所示, 在直杆的一端装上激光发射器和接收器, 另一端装上反射镜。当发射器发出激光被反射镜反射回接收器, 记录下激光往返的时间间隔, 即可得到直杆的长度。在直杆静止的参考系内, 如果激光往返的时间间隔为  $\Delta t'$ , 则直杆的长度为

$$L' = L_0 = \frac{c\Delta t'}{2}$$

其中  $L_0$  为固有长度。假设直杆所在的参考系相对地面观察者以匀速  $v$  向右运动, 如果地面观察者测得的直杆长度为  $L$ , 设激光从直杆左端发出到达反射镜的时间为  $\Delta t_1$ , 因为在这段时间内直杆向前运动了  $v\Delta t_1$  的距离, 因此有

$$c\Delta t_1 = L + v\Delta t_1$$

$$\Delta t_1 = \frac{L}{c - v}$$

同理, 设激光从反射镜返回接收器的时间间隔为  $\Delta t_2$ , 在这段时间内直杆向前运动了  $v\Delta t_2$  的距离, 因此有

$$c\Delta t_2 = L - v\Delta t_2$$

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c + v}$$

因此, 地面观察者测得总的时间间隔为

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v} = \frac{2L}{c \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}$$

注意到  $\Delta t$  是地面观测者测得的激光从发出到接收的时间间隔,  $\Delta t'$  是相对直杆静止的观测者测得的相应的时间间隔。根据前面讨论的时间的相对性, 两者满足关系

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}。$$

将这个关系代入上式并与固有长度的表达式比较, 即可得到

$$L = \frac{c}{2} \Delta t \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{c}{2} \Delta t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

因为  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ , 所以  $L < L_0$ , 即运动的物体沿运动方向的长度会缩短。

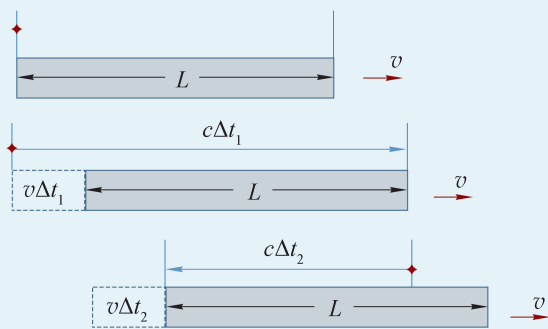


图 8-8 长度的相对性

应当指出,长度收缩也是相对的,一列高铁过桥时,桥上的观察者认为高铁变短了,而高铁上的观察者认为是桥变短了。另外,长度收缩只发生在平行于运动的方向上,垂直于运动方向的长度没有收缩。

### 拓展视野

自然界中的 $\mu$ 子来源于宇宙线,是一种不稳定的粒子,产生后很快就衰变成电子和中微子,平均寿命为 $\Delta t' = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$ ,如果不考虑相对论效应,即使以光速运动,也不可能穿越厚度为 $L_0 = 9\,500 \text{ m}$ 的大气层被地面的探测器探测到,但事实上,地面的实验室确实观察到了穿越大气层到达地面实验室的 $\mu$ 子。下面我们就来分析为何 $\mu$ 子可以到达地面。

设 $\mu$ 子的速度为 $v = 0.998c$ ,一方面,在 $\mu$ 子看来,大气层是以速度 $-v$ 在运动,由于长度收缩,厚度变为

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 9\,500 \times \sqrt{1 - 0.998^2} \text{ m} \approx 600 \text{ m}$$

而在其平均寿命内可以飞行的距离为

$$v\Delta t' = 0.998 \times 299\,792\,458 \times 2 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 600 \text{ m}$$

另一方面,在地面观察者看来,由于时间膨胀, $\mu$ 子的寿命应当是

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - 0.998^2}} \text{ s} \approx 3.16 \times 10^{-5} \text{ s}$$

因此,通过的距离为

$$v\Delta t = 0.998 \times 299\,792\,458 \times 3.16 \times 10^{-5} \text{ m} \approx 9\,500 \text{ m}$$

可见,无论从哪个角度看, $\mu$ 子都可以在衰变之前到达地面。

牛顿力学经过修改后可以改写成相对论性力学,即符合狭义相对论的形式,但质量的定义要修改为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$m$ 称为物体的运动质量,而 $m_0$ 则称为物体的静止质量,即物体在自身静止的参考系中的质量。由上式可见,物体的运动速度越大,相应的运动质量也就越大,并且任何静止质量不为零的物体其运动速度都不可能等于或大于光速,否则运动质量将变成虚数或无限大,这是没有意义的。同时也可以看到,通过外力作用将物体加速到光速也是不可能实现的。

进一步可以推出狭义相对论的另一个重要结论，就是爱因斯坦**质能关系**

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2$$

即一定质量的物质就具有与之相当的一定的能量。由于光速高达  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，由质能关系可知，即使是 1 g 的物质也蕴藏着巨大的能量。爱因斯坦的质能关系是核能开发利用的理论基础，人类从此就进入了核能利用的新时代。

## 🔍 什么是等效原理？

我们在日常生活中都有这样的经验，乘电梯时如果电梯加速下降，我们会有失重的感觉，当电梯加速上升时又会有超重的感觉。可以想象一下，如果电梯是在地球的引力场中做自由落体运动，那电梯里的人会有什么感觉呢？如果电梯是在空无一物的太空做加速运动，那电梯里的人又会有什么感觉呢？

爱因斯坦根据这一事实，提出了广义相对论的第一个基本原理，即**等效原理**：一个均匀引力场与一个做匀加速运动的参考系等价，或者说，无法通过在密闭箱子内的实验来判断系统是静止在引力场中还是在无引力场情况下做加速运动。

爱因斯坦同时认为，不应该存在特殊的参考系，所有参考系都应该是等价的。由此爱因斯坦提出了广义相对论的另一个基本原理，即**广义相对性原理**：物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。

从这两条基本原理出发，爱因斯坦在 1915 年建立了一个全新的理论——广义相对论。

广义相对论是狭义相对论的推广，也是牛顿引力理论的推广，是我们理解天体物理和宇宙学的重要理论基础。在广义相对论中，物体之间的万有引力不再是超距作用，而是时空弯曲的结果。即物质分布导致时空弯曲，物体又在弯曲的时空中运动。我们可以用弹性膜上的重球（图 8-9）来形象地理解物质与时空的关系。美国物理学家惠勒（J. A. Wheeler, 1911—2008）对此曾有一个形象的说法：物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动。

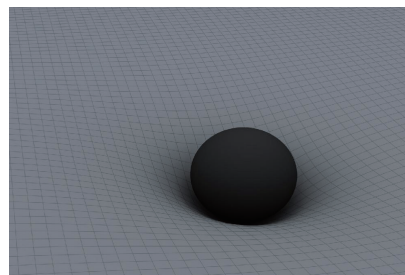


图 8-9 弹性膜上的球

广义相对论自从 1915 年建立以来，已经被大量的实验和观测所证实。水星公转轨道的近日点进动，光经过太阳等大质量天体时的偏折，引力场中的谱线红移和时钟变慢以及引力波的辐射等，都以极高的精度和广义相对论的预言一致。

行星绕太阳的公转轨道是一个椭圆，但观测发现，行星公转一周后近日点较之前的位置会有个偏离，这个现象称为行星公转轨道的近日点进动（图 8-10）。水星的轨道进动值相对较大，其中大部分可以由牛顿力学给予解释，但还剩余一部分，即每世纪  $43''$  的进动

值无法解释。而广义相对论对水星轨道的计算给出的这个进动值恰为  $43.03''$ ，与观测值非常一致，成功地解释了水星近日点的进动，这个进动完全是由空间弯曲造成的。

按照广义相对论，光在引力场中并不是沿着直线传播，而是沿着所谓测地线行进。如果附近没有大质量天体，测地线就是直线；而当光掠过大质量天体时会发生偏折（图 8-11）。根据广义相对论的计算，光掠过太阳时会发生  $1.75''$  的偏折。实际上，如果把光看成光子，牛顿力学也同样可以得出光经过太阳时会有一个偏折，但偏折的角度只有广义相对论预言的一半。1919 年，英国天文学家爱丁顿（A. S. Eddington, 1882—1944）利用日全食对光经过太阳时的偏折进行了观测，基本证实了广义相对论的预言，以后又进行了多次更高精度的测量，完全验证了广义相对论的预言。正是由于这个原因，当遥远天体发出的光经过大质量天体时，光线发生偏折。我们不仅能观察到被大质量天体遮挡的遥远天体，而且还能看到被遮挡的天体形成的多个像，甚至看到如图 8-2 所示的环状，这个环就被称为爱因斯坦环。

正如运动的钟会变慢一样，根据广义相对论，引力场中的钟也会变慢，引力场越强，钟慢效应就越显著。即地面的钟比高空的钟要走得慢。1971 年，物理学家哈菲勒（J. C. Hafele, 1933—2014）和基廷（R. E. Keating, 1941—2006）将铯原子钟由民航飞机携带，在万米高空沿赤道环绕地球飞行。实验结果与广义相对论的预言符合极好。从另一方面来说，引力场发出的光被远处的观测者接收时波长会变长，也就是会发生**引力红移**，引力场越强，红移越大。引力红移效应最早在白矮星的观测中得到验证，之后又进行了更多的精确测量，完全证实了广义相对论的引力红移效应。

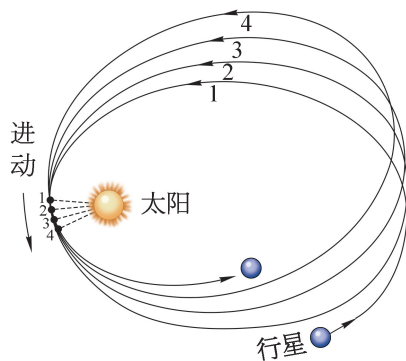


图 8-10 近日点进动

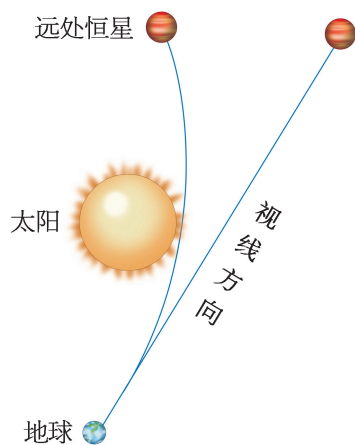


图 8-11 光线偏折

### 拓展视野

光子的能量可以写成  $E = h\nu$ ，其中  $h$  为普朗克常量， $\nu$  为光子的频率。根据相对论质能关系，可以把光子看成质量为  $m = \frac{h\nu}{c^2}$  的粒子。考虑到光子在引力场中的势能  $mgH$ ，如果在地面向上发射一束频率为  $\nu$  的光，然后在离地面高度为  $H$  的地方接收，由能量守恒可得

$$h\nu = h\nu' + mgH = h\nu' + h\nu \frac{gH}{c^2}$$



则光子的红移为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu' - \nu}{\nu} = -\frac{gH}{c^2}$$

将  $H = 22.6 \text{ m}$  代入, 得

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -2.46 \times 10^{-15}$$

1960 年, 哈佛大学的物理学家曾在一座 22.6 m 高的楼顶做了这个实验, 结果与广义相对论的计算结果符合极好。

爱因斯坦在 1916 年建立广义相对论之后不久就预言了引力波的存在。根据广义相对论, 质量的分布导致时空的弯曲。而质量分布尤其是大质量分布的变化将导致时空曲率的变化, 这种变化即所谓时空涟漪会以波的形式以光速向外传播, 这就是**引力波**。黑洞及中子星的碰撞合并会产生最强大的引力波, 从而能被地球上的探测设备探测到。在爱因斯坦提出引力波的预言整整 100 年之后, 经过 50 多年的不懈努力, 2016 年, 美国的激光干涉引力波观测台 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO) 宣布, 探测到了来自 13 亿光年之外两个黑洞碰撞合并所发出的引力波, 这是人类第一次直接探测到的引力波信号。引力波的直接探测, 给广义相对论的实验验证画上了圆满的句号。

爱因斯坦不仅是狭义相对论和广义相对论的创立者, 也是量子力学的创立者之一, 他还是固体量子理论、量子统计、激光理论和现代宇宙学研究的前驱, 在物理学众多领域都做出了开创性的工作, 极大地推动了现代物理学的发展。

## STSE

为了提高定位精度, 卫星定位系统的一个重要问题就是时钟的精确同步。导航卫星在地球高空做高速运动, 所以必须考虑到相对论效应的修正。根据狭义相对论, 卫星高速运动将造成时钟变慢, 而根据广义相对论, 卫星所处位置的引力场较地面为弱, 因而时钟变快。根据计算, 广义相对论的效应是狭义相对论的 6 倍。因此, 如果不考虑广义相对论的修正, 定位精度将大大降低。

### 问题⑤思考

1. 下列情况中地面上和不同车上的观察者看到的光速是多大?

- (1) 两辆车沿直线道路高速相向而行, 其中一辆车上的人向另一辆车发出一束光;
- (2) 两辆车一前一后沿直线道路以不同速度高速前行, 后面车上的人向前一辆车发出一束光。

2. 如果在一艘平稳行驶的游轮上的密闭船舱内做物理实验，和地面实验室的结果会有什么不同？
3. 一列高铁高速行驶经过车站时，列车中点经过车站信号灯的瞬间信号灯正好发出一个闪光，列车上的观察者认为闪光是同时到达车头和车尾还是先后到达的？车站上的观察者认为是同时的还是有先后的？
4. 一个优秀的短跑运动员在比赛时的速度可以达到  $10\text{ m/s}$ ，如果运动员跑完全程时，静止的计时员记录的时间为  $19.7\text{ s}$ ，则运动员携带的计时器记录的时间是否同样为  $19.7\text{ s}$ ？
5. 一列高铁静止长度为  $201.4\text{ m}$ 。当它以  $305\text{ km/h}$  的时速通过站台，站台上的观察者测到的列车长度是否同样为  $201.4\text{ m}$ ？
6. 到目前为止，已经有哪些实验和观测证明了广义相对论的正确性？

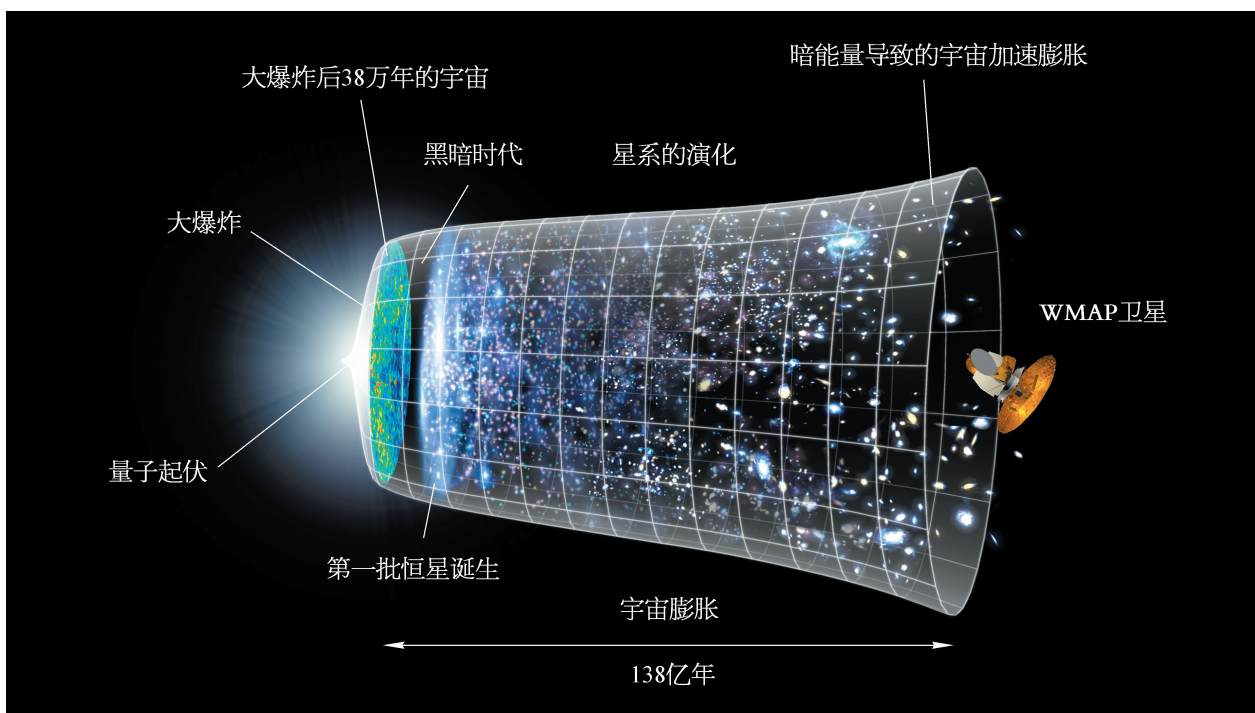


图 8-12 宇宙演化进程

### 第三节 宇宙的起源与演化

人类探索宇宙的奥秘已经有很长的历史了，战国时期的思想家尸佼（前 390—前 330）在 2 300 多年前就给出了宇宙的定义，“四方上下曰宇，往古来今曰宙”。但只有当广义相对论建立之后，宇宙学才真正成为现代科学意义上的一门学科。图 8-12 所示就是人类目前对宇宙演化进程的认识。

#### ❓ 宇宙是有限的还是无限的？

牛顿认为，宇宙是无限的。不仅空间上是无限的，时间上也是无限的，没有起点，也没有终点。因此，无限的宇宙中一定有无限多颗恒星，并且是均匀分布在宇宙中的。否则由于引力的作用，宇宙将是不稳定的。但在 1826 年，德国天文学家奥尔伯斯（H. W. Olbers, 1758—1840）指出，如果宇宙无限，且恒星在空间中的分布均匀，则任意方向上都会有无限多颗恒星，这些恒星的星光叠加起来后将足以达到太阳的光度，即不应该有黑夜。这就是所谓的奥尔伯斯佯谬。那么，宇宙到底是有限的还是无限的？

1929 年，美国天文学家哈勃（E. P. Hubble, 1889—1953）通过对大量星系的观测发现，银河系以外的绝大部分星系都在远离我们，即星系都在退行，并且离我们越远的星系，其退行速度就越大。由此哈勃提出，星系的退行速度与距离成正比。这就是哈勃定律。

### 拓展视野

由于天体之间的距离遥远，用通常的长度单位 m 或 km 来表示天体之间的距离是很不方便的。在天文学中通常用天文单位、光年和秒差距来表示距离（图 8-13）。其中天文单位（AU）定义为日地平均距离，即

$$1 \text{ AU} = 1.495\,978\,7 \times 10^8 \text{ km} \approx 1.5 \text{ 亿 km}$$

光年（l.y.）定义为光在真空中沿直线传播一年所经过的距离，即

$$1 \text{ l.y.} = 9.460\,553\,6 \times 10^{12} \text{ km} \approx 10 \text{ 万亿 km}$$

秒差距（pc）定义为地球公转轨道半径对应的视角为  $1''$  时的距离，即

$$1 \text{ pc} = 3.085\,678 \times 10^{13} \text{ km} \approx 3.261\,5 \text{ l.y.} \approx 30 \text{ 万亿 km}$$

离我们最近的恒星比邻星的距离为 4.3 l.y.，或 1.3 pc。

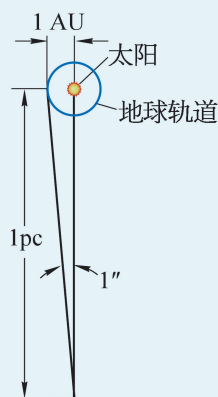


图 8-13 天文单位和秒差距

根据哈勃定律，星系之间的距离在不断增加。因此，在过去，星系之间的距离一定比现在要小，也就是说，宇宙是在不断地膨胀。根据这个观测事实，在前人研究工作的基础上，物理学家伽莫夫（G. Gamow, 1904—1968）等人在 1948 年前后提出了**大爆炸宇宙论**（**big bang cosmology**），即我们的宇宙起源于约 138 亿年前的大爆炸。需要指出，这里所说的大爆炸，只是一个形象的说法，并不是通常意义下物体在某个空间的爆炸，而是时空本身的爆炸。可以说，在大爆炸之前，没有空间，也没有时间。大爆炸之后，时间才有了开端，空间则随之膨胀。

### • 宇宙的演化

图 8-14 所示为宇宙演化的简明时间轴。根据大爆炸宇宙论的理论，在大爆炸之后的瞬间，宇宙处于极高温、极高密的炽热状态，极不稳定。在大爆炸之后约  $10^{-43}$  s 时的温度约为  $10^{32}$  K，然后随着宇宙的膨胀，温度不断下降。大爆炸后约  $10^{-6}$  s，温度下降到  $10^{13}$  K 左右，开始形成质子和中子等粒子。大爆炸后约 10 s，温度下降到  $10^9$  K 时，质子、中子

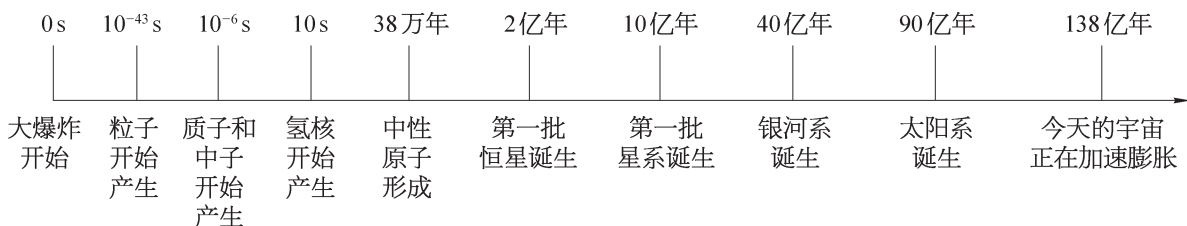


图 8-14 宇宙演化时间轴



开始结合成氢核、氦核，同时有少量氘核、氦 3、锂等轻核生成。核合成完成后，整个宇宙中氦元素的占比约 26%，这与目前的观测相当一致。大爆炸之后约 38 万年，温度下降到约 3 000 K，中性原子形成。此时光子与物质不再有显著的相互作用，成为自由粒子，宇宙变得透明。随着宇宙的膨胀，这些光子由于红移变成今天温度为 2.725 K 的宇宙微波背景辐射。这个背景辐射在 1964 年被美国射电天文学家彭齐亚斯（A. Penzias, 1933— ）和威尔逊（R. W. Wilson, 1936— ）无意中发现。随着宇宙膨胀，温度继续下降，形成大量气体云，大爆炸后约 2 亿年，第一批恒星形成，开始发光发热，大爆炸后约 10 亿年，第一批星系形成。银河系形成于 100 亿年以前，而太阳系形成于 50 亿年前。

### • 恒星的演化

如图 8-15 所示，恒星起源于宇宙中的气体、尘埃等物质。在引力作用下，这些气体和尘埃聚集收缩成密度较大的原始星云，最后进一步收缩形成原恒星。原恒星在引力作用下进一步收缩，形成一个密度极大的核心，温度越来越高。当核心温度达到  $10^7$  K 时，氢开始发生聚变为氦的热核反应并辐射能量，于是新的恒星诞生了。这时候的恒星压力和引力达到平衡，处于稳定阶段，称之为主序星。恒星在这一阶段停留的时间最长，太阳已经在主序星阶段停留了 50 亿年，并且还将继续停留 50 亿年。

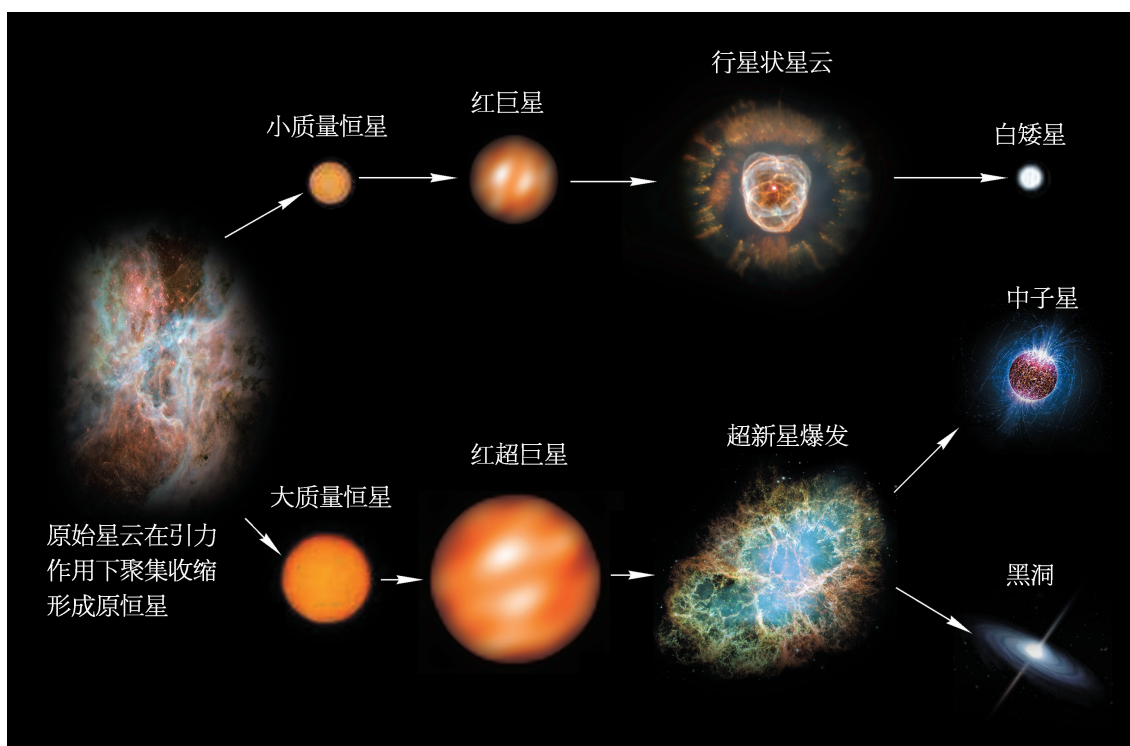


图 8-15 恒星的演化

当恒星核心部分的氢大部分都聚变为氦以后，因为氦的聚变温度远高于氢的聚变温度，所以核心部分的聚变反应会停止，因而压力下降，星核在引力作用下再次收缩，从而

温度上升。当温度达到  $10^8 \text{ K}$  时, 就开始发生氢聚变为碳的聚变反应。如果恒星有足够的质量, 这样的过程会一直进行下去, 依次产生氧、硅、钙、铁等元素, 形成类似洋葱的结构。因为铁是最稳定的元素, 所以聚变反应到铁元素产生后就停止了。没有了热核反应维持的压力, 星核就会在引力作用下不断收缩, 密度越来越大。

对于小质量恒星, 由于没有足够的质量, 核反应到一定阶段就会停止, 然后逐渐形成体积巨大、表面温度较低的红巨星, 之后, 恒星外层物质由于不断膨胀形成行星状星云, 核心部分将形成质量不超过 1.4 个太阳质量、密度达到  $10^6 \text{ g/cm}^3$ 、尺度和地球相似的白矮星。天狼星的伴星就是一颗白矮星。

对于大质量恒星, 晚期会形成红超巨星, 热核反应会一直持续到铁元素的产生。然后由于热核反应停止, 星体在巨大引力作用下再次收缩, 核心密度越来越大, 最后将发生超新星爆发, 外层物质形成向外扩散的气体云, 核心留下密度高达  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  而尺度只有几十千米的致密天体, 即完全由中子构成的中子星。高速旋转的中子星也叫脉冲星。对于质量更大的恒星, 因为引力巨大, 最后将形成更神秘的天体——黑洞。

图 8-16 所示为发生在北宋至和元年 (1054 年) 的一次超新星爆发之后留下的遗迹, 称为蟹状星云。《宋会要》有关于蟹状星云超新星爆发的记载: “至和元年五月己丑 (1054 年 7 月 4 日), 晨出东方, 守天关 (金牛  $\zeta$  附近)。昼见如太白 (即金星), 芒角四出, 色赤白, 凡见二十三日。”

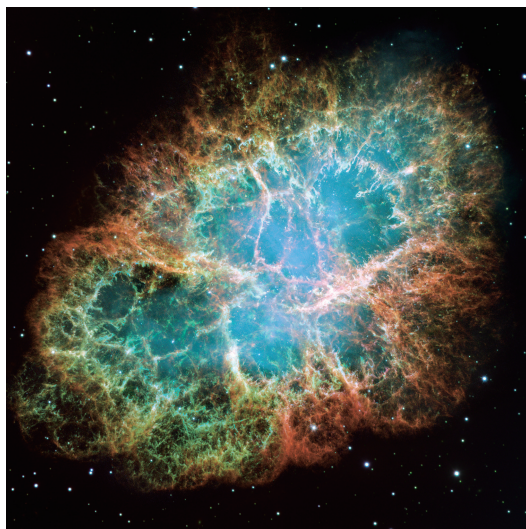


图 8-16 蟹状星云

### 拓展视野

按照广义相对论, 最简单的黑洞是施瓦茨黑洞, 黑洞存在一个视界面, 视界半径即为施瓦茨半径  $R_s = \frac{2Gm}{c^2}$ , 其中  $G$  为引力常量,  $m$  为黑洞质量,  $c$  为光速。视界是一个单向膜, 任何物体或光进入视界后就再也无法离开, 即视界内任何信息都不能传递到视界之外。如果有一艘飞船飞向黑洞, 航天员定时向远处的观察者发送信号, 则远处的观察者会发现, 随着飞船靠近黑洞, 信号的红移会越来越大, 发送信号的时间间隔也越来越长。靠近黑洞的一刹那, 信号将会因为被无限红移而无法被观察者观测到, 也就是说, 远处的观察者不可能看到飞船穿越黑洞的过程。如果黑洞的质量是一个太阳质量, 则相应的施瓦茨半径为  $R_s = 2.95 \text{ km}$ 。

更复杂的黑洞是带电荷或有旋转的黑洞，根据广义相对论，任何黑洞只需要用质量  $m$ 、电荷量  $Q$  及角动量  $J$  这三个参数描写。

经典黑洞是只进不出的，但物理学家霍金 (S. W. Hawking, 1942—2018) 证明，如果考虑量子效应，黑洞将会产生辐射，即所谓的霍金蒸发。但这个效应实验上很难观测到。

图 8-17 所示是包括中国科学家在内的各国科学家们经过数年努力，利用分布在全球的 8 台射电望远镜同步拍摄，并经过 2 年多的数据处理后得到的第一张黑洞照片。这是一个距离地球约  $5.5 \times 10^7 \text{ l.y.}$ 、质量约为 65 亿个太阳质量的巨型黑洞。



图 8-17 第一张黑洞照片

## ❓ 什么是暗物质？

通过对星系及星系团质量分布和宇宙大尺度结构的研究，天体物理学家发现，除了由原子、分子组成的普通物质，如恒星、星际气体、星际尘埃之外，星系及星系团内还存在大量的暗物质，而暗物质的总质量要远远大于宇宙中所有可见物质的质量总和。如果没有暗物质，星系及星系团的形成和稳定将无法解释。这些暗物质没有电磁辐射，和普通物质只发生引力作用，因此用望远镜等传统方法难以探测。到目前为止，还没有暗物质探测的直接证据，也不清楚暗物质到底是由什么样的粒子组成的。

## ❓ 什么是暗能量？

1998 年，天体物理学家对遥远超新星的观测研究发现，宇宙不仅在膨胀，而且是在加速膨胀。为了解释宇宙的加速膨胀，物理学家引入了充满整个宇宙并具有负压性质的暗能量。但我们实际上对暗能量的性质还很不了解，更不知道如何去探测。根据对宇宙微波背景辐射的精确测量可以得知，暗能量约占整个宇宙的 68%，暗物质约占 27%，而普通的可见物质只占 5% 左右。因此，虽然暗物质和暗能量目前无法探测到，但却极大地影响着宇宙的演化和宇宙大尺度结构的产生，也决定了宇宙未来的命运。有人将暗物质和暗能量称为 21 世纪物理学上空的两朵新的乌云，如何驱散这两朵乌云，物理学将如何解决这些难题，是当代人们极为关注的科学前沿。

### 问题⑤思考

1. 恒星演化到晚期，最终会形成哪几种致密天体？
2. 某同学认为，宇宙微波背景辐射产生于第一批恒星诞生的时候，目前温度为 300 K，在宇宙中的分布均匀各向同性。试分析该说法是否正确。
3. 恒星不断地向周围空间辐射巨大的能量，判断下列关于恒星能量如何产生的说法是否正确，并简述理由。
  - (1) 恒星内部优质煤的燃烧。
  - (2) 恒星核心区域的核聚变。
  - (3) 恒星上可燃气体的燃烧。
4. 什么是暗物质？什么是暗能量？为什么要引入暗物质和暗能量？



## 学期活动

了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想。

20 世纪初相对论的建立是现代物理学的一次革命，了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想有助于我们更好地学习和掌握现代物理学知识，提高分析问题和解决问题的能力及创新能力。通过阅读相关书籍和查阅有关资料，进一步了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想，并在此基础上撰写读书报告。

活动要求：

- (1) 整理并总结相对论的发展历史以及对相对论的建立有过贡献的科学家。
- (2) 总结爱因斯坦对建立相对论的主要贡献。
- (3) 通过爱因斯坦的科学生涯总结爱因斯坦的科学思想。
- (4) 以小组的形式进行展示与交流。

## 小结

### • 基本概念和基本规律

狭义相对论基本原理

相对性原理：物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式。

光速不变原理：真空中的光速在所有惯性系中都是相同的，与光源和观测者的速度无关。

广义相对论基本原理

等效原理：一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价。

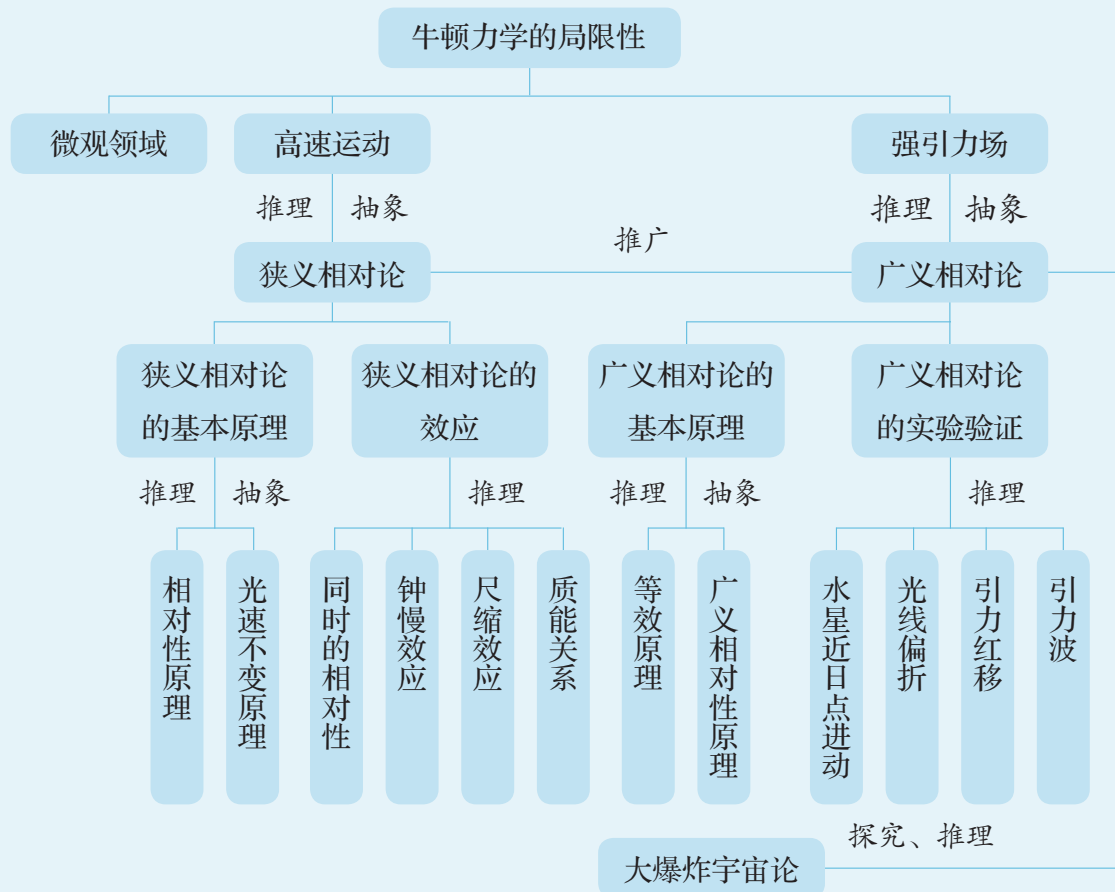
广义相对性原理：物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。

### • 基本方法

通过爱因斯坦建立相对论的过程，感受思想实验的方法。

通过对相对论效应和实验验证的学习，认识理论演绎、科学推理和科学论证的方法。

### • 知识结构图



## 复习与巩固

1. 如果一个人以接近光速的速度在长直的街道上运动，那么在他眼里，街道边建筑物的高度和宽度会有什么变化？
2. 一列高铁高速经过一座静止长度与高铁相同的桥梁，列车上的观察者认为桥梁和列车哪个更长？桥梁上的观察者认为哪个更长？
3. 高楼顶楼的钟和一楼的钟相比，哪个走得慢？

4. 测量光速可以有不同的方法，比如在月球上放置一个反射镜，在地球上向月球发射一束激光，反射回地面后通过激光的往返时间来计算光速。图 8-18 所示为法国物理学家菲索利用旋转齿轮法来测量光速的装置，当齿轮静止时，光束穿过齿缝经平面镜反射后能被观察者看到；

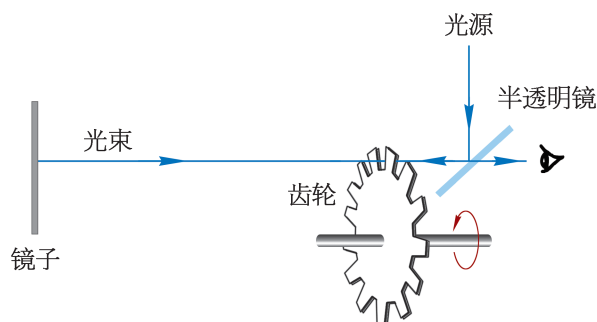


图 8-18

当齿轮旋转时，如果反射光返回时正好碰到齿轮，观察者就看不到光，如果反射光返回时正好转到下一个齿缝，观察者就能看到光。设此时反射镜到齿轮的距离为  $L$ ，齿轮转速为  $n = 1\,000\text{ r/s}$ ，齿轮的齿数为  $m = 720$ ，要想测出光速， $L$  需要多长？如何增加这个长度？

5. 如果光速只有  $\frac{c}{3}$  甚至更小，相对论效应是更显著还是更不易看到？
6. 如果引力常量  $G$  增大，牛顿力学的适用范围是变大还是变小？
7. 地球绕太阳公转轨道的近日点会有进动吗？不考虑其他天体的影响，地球近日点进动值比水星近日点进动大还是小？简述理由。
8. 牛顿引力理论和爱因斯坦广义相对论在描述地球和太阳之间的相互作用时有什么不同？
9. 太阳的寿命约为 100 亿年，太阳形成至今已经演化了约 50 亿年。再过 50 亿年，太阳将进入什么阶段？太阳这类小质量恒星最后会演化成什么样的致密天体？
- \*10. 有人说，宇宙是无限的，宇宙中的恒星也是无限多的，因此在宇宙中的任意一点，无限多恒星的光叠加起来都足以达到太阳的亮度，即不应该有黑夜。如何用现代宇宙学理论来分析解决这个悖论？

## 附录

## 索引

- 尺缩效应 / 100
- 大爆炸宇宙论 / 108
- 等效原理 / 103
- 第二宇宙速度 / 48
- 第三宇宙速度 / 48
- 第一宇宙速度 / 46
- 动能 / 68
- 动能定理 / 71
- 功率 / 63
- 光速不变原理 / 97
- 光线偏折 / 104
- 广义相对性原理 / 103
- 机械功 / 55
- 机械能 / 80
- 机械能守恒定律 / 81
- 角速度 / 15
- 近日点进动 / 103
- 开普勒第二定律 / 38
- 开普勒第三定律 / 38
- 开普勒第一定律 / 38
- 离心现象 / 27
- 零势能面 / 75
- 抛体运动 / 6
- 平均功率 / 63
- 平抛运动 / 6
- 曲线运动 / 2
- 瞬时功率 / 64
- 弹性势能 / 77
- 同时的相对性 / 98
- 万有引力 / 41
- 万有引力定律 / 41
- 线速度 / 15
- 相对性原理 / 97
- 向心加速度 / 22
- 向心力 / 18
- 引力波 / 105



引力常量 / 41

引力红移 / 104

匀速圆周运动 / 14

运动的分解 / 4

运动的合成 / 4

质能关系 / 103

钟慢效应 / 99

重力势能 / 73

周期 / 15

# 后记

本教材根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准（2017年版2020年修订）》编写并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

本教材是在上海市高中物理“二期课改”教材的基础上全面改写而成的，当年参加编写的主要人员有张越、徐在新、刘齐煌、谭玉美、唐一鸣、冯容士、蒋元方、倪闽景、王铁桦等。王铁桦、朱广天、汤清修、陈刚、金松、胡卫平、袁芳、桑嫣、潘苏东等给本教材的编写提出了不少宝贵意见。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本教材编写的各个阶段审阅了书稿。编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市物理教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。在此一并致谢。

本教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便支付相应的稿酬。

欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见。

2020年5月

---

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo、中国全球图片总汇（第六章章首图，图6-16）和翔绘动漫等提供。

# 物理必修第二册



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5219-4



9 787547 852194