高等学校物理系列教材

物　理

主编　张明芹

東北林業大學出版社

高等学校物理系列教材

物　　理

主编　张明芹

東北林業大學出版社

图书在版编目（CIP）数据

物理/张明芹主编. —哈尔滨：东北林业大学出版社，2008.7
（高等学校物理系列教材）
ISBN 978-7-81131-318-5

Ⅰ. 物…　Ⅱ. 张…　Ⅲ. 物理学—高等学校—教材　Ⅳ. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 115332 号

责任编辑：任　俐
封面设计：彭　宇

NEFUP

高等学校物理系列教材
物　理
Wuli
主编　张明芹
东北林业大学出版社出版发行
（哈尔滨市和兴路 26 号）
黑龙江省教育厅印刷厂印装
开本 889 × 1194　1/16　印张 9　字数 240 千字
2008 年 10 月第 1 版　2008 年 10 月第 1 次印刷
印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-318-5
O·92　定价：40.00 元（二册）

编　　委

主　编　　张明芹（黑龙江畜牧兽医职业学院）

副主编　　冯立峰（哈尔滨师范大学物理电子工程学院）

　　　　　王守芹（牡丹江市卫生学校）

参　编　　梁树星（黑龙江农业工程职业学院）

主　审　　王凤兰（哈尔滨师范大学物理电子工程学院）

前　言

本教材是依据高职高专的培养目标及基础文化课为专业课服务的精神，结合高职的教学特点与师范院校基础教育编写的。选材以应用为目的，以必需、够用为度，增加现代物理内容，适当压缩传统理论内容，使教学内容具有针对性和实用性。

在编写教材时深入研究了高职院校人才培养目标和基础文化课的教学目标，找出了物理课和专业课的衔接点，克服基础文化课和专业课“脱节”的现象。

本书叙述简明扼要，公式、定律不做理论分析和推导，注重基础知识、基础理论和基本技能的学习。重视学生的素质培养，强化实践技能训练。重视实践应用，所列举事例和专业结合紧密，突出了物理课为专业课服务的宗旨，使学生学以致用，形成初步的技能。充分发挥物理课的教育功能，体现出高职办学特色。

本书共十章，主要内容为：力学基本定律、直流电路、流体力学、电磁感应与交流电、晶体管基础知识、机械振动与机械波、光的本性、光能及生物效应、非电量电测技术、X射线。

参加编写的人员分工如下：

黑龙江畜牧兽医职业学院	张明芹（第二、三章、四章）
哈尔滨师范大学物理电子工程学院	冯立峰（第一章、八章）
牡丹江市卫生学校	王守芹（第五章、六章、七章）
黑龙江农业工程职业学院	梁树星（第九章、第十章）

本书由张明芹任主编，冯立峰和王守芹担任副主编，由张明芹统稿，哈尔滨师范大学物理电子工程学院王凤兰教授任本书主审，并提出很多好的建议。

由于我们水平有限，经验不足，时间仓促，书中的缺点和不足之处，恳切希望专家和广大读者批评指正，以便今后修改与提高。

所有意见和建议请发往：zhangming_qin@163.com

编　者

2008年6月

目　录

第一章　力学基本定律

本章首先定义表征质点运动的物理量，又讨论了质点运动的基本规律；引出了功、势能、动能、动量等概念；得出质点动能定理、功能原理、机械能守恒定律、动量定理、动量守恒定律等物理规律。

第一节　质点运动学

一、参照系和坐标系

一个物体的位置及其变更，总是相对其他物体而言的，这就是机械运动的相对性。因此，为了描述一个物体的运动情形，必须选择另一运动物体或几个相互间保持静止的物体群作为参考物。研究物体运动时被选作参考物的物体或物体群，称为参考系。例如，研究人造地球卫星的运动，常选择地球作参考系；研究河水的流动，选地面作参考系等。同一物体的运动，由于选取的参考系不同，观察者对它的运动的描述就不相同。例如，在匀速直线运动的车厢中，有一自由下落的物体，以车厢为参考系，物体做直线运动；以地面为参考系，物体做抛物线运动，这就是运动描述的相对性。究竟应该选择哪一物体作参考系，从运动描述来说，完全是任意的，主要看问题的性质和是否便于研究、计算而定。一般地说，在研究地球的运动时，多以太阳为参考系；在研究地面上的物体的运动时，若不作特殊声明，通常都是以地面相对于地面静止的物体作参考系。

为了精确地、定量地确定运动物体在各个时刻相对于参考系的位置，就要在参考系上建立适当的坐标系，坐标系原点可取在参考系的一个固定点上。这样，运动物体在某时刻的位置就可以用坐标 x，y，z 或 θ，ρ 等表示出来。常用的坐标系是直角坐标系，它由三条标有刻度并相互垂直的坐标轴相交于坐标原点所构成。另外还有平面极坐标系、自然坐标系和球坐标系等。

二、描述质点运动的物理量

1. 质点的位置矢量与运动方程

图 1-1 中的点 P 代表所讨论的质点，点 O 代表参考系上的一个固定点，以后建立坐标系时坐标原点就取在固定点上。点 P 在任意时刻的位置，可用从点 O 到点 P 的有向线段 $\boldsymbol{OP}$ 表示，$\boldsymbol{OP}$ 又可用一个矢量 $\boldsymbol{r}$ 来代表，矢量 $\boldsymbol{r}$ 称为质点 P 位置矢量，简称位矢，即用来确定质点的所在位置的矢量。线段长度代表大小，方向是从 O 点指向 P 点，这正是矢量所具有的基本特征。如果质点在空间运动，确定它的坐标可用空间直角坐标系。

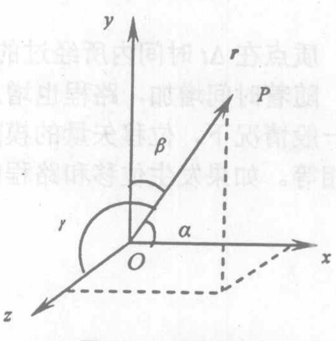

图 1-1　位置矢量

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1-1}$$

式中 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别是 x、y 和 z 方向的单位矢量。位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的大小

$$r^2=|\boldsymbol{r}^2|=(x^2+y^2+z^2) \tag{1-2}$$

位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向由三个方向余弦确定

$$\cos\alpha=\frac{x}{r}，\cos\beta=\frac{y}{r}，\cos\gamma=\frac{z}{r} \tag{1-3}$$

α、β、γ 分别是 $\boldsymbol{r}$ 与 Ox、Oy、Oz 轴正方向的夹角。

表示质点位置的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 必定随时间 t 在改变。也就是说，位置矢量是时间的 t 的函数，

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}\,(t) \tag{1-4a}$$

上式称为质点的运动学方程的矢量式。显然，这时质点的坐标 x、y、z 也是时间 t 的函数

$$\left.\begin{aligned} x&=x\,(t)\\ y&=y\,(t)\\ z&=z\,(t)\end{aligned}\right\} \tag{1-4b}$$

上式称为质点的运动方程的分量式。质点运动时在空间连续经过的各点所连成的曲线称为质点运动的轨道。将上式中的参数 t 消去，可得到质点 P 的运动轨道方程

$$f\,(x,\ y,\ z)=0$$

例 1　已知质点在一平面上运动，它的运动方程为 $x=4\cos\frac{\pi}{3}\,t$，$y=3\sin\frac{\pi}{3}\,t$，式中长度以米计，时间为秒。试求质点的位矢表示式和运动的轨道方程。

解　质点的位矢　$\boldsymbol{r}=4\cos\frac{\pi}{3}\,t\boldsymbol{i}+3\sin\frac{\pi}{3}\,t\boldsymbol{j}$

消去质点运动方程中的参数 t 得

$$\frac{x^2}{4^2}+\frac{y^2}{3^2}=1$$

这就是质点的轨道方程，是一椭圆运动轨道。因此，质点的运动方程也可以看作是以 t 为参数的轨道方程。

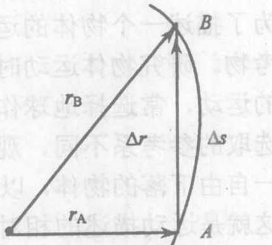

图 1-2　位移

2. 位移和路程

设质点从位置 A 沿一平面曲线移动到位置 B，如图 1-2 所示。质点在 t 时刻处于点 A，其位置矢量为 $\boldsymbol{r}_A$，经过时间 Δt，质点到达点 B，位置矢量为 $\boldsymbol{r}_B$。在此过程中，质点位置的变更可以用从点 A 到点 B 的有向线段 $\boldsymbol{AB}$ 来表示，或写成 $\Delta\boldsymbol{r}$，这称为质点由 A 到点 B 的位移。即

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A \tag{1-5}$$

上式表示，质点从点 A 到点 B 所完成的位移 $\Delta\boldsymbol{r}$，等于点 B 位置矢量 $\boldsymbol{r}_B$ 与点 A 的位置矢量 $\boldsymbol{r}_A$ 之差。

质点在 Δt 时间内所经过的路程，是曲线 AB 的长度，用符号 Δs 或 s 表示，是恒为正值的标量。随着时间增加，路程也增加，即路程是正的增函数。显然，路程 Δs 与位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 是不同的。在一般情况下，位移矢量的模 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 是不等于路程 Δs 的，只有在质点作单方向直线运动时，它们才相等。如果发生位移和路程的时间无限地缩短，$|\Delta\boldsymbol{r}|$ 和 Δs 逐渐接近，在极限情况下，有

$$\lim_{\Delta t\to 0}|\Delta\boldsymbol{r}|=\lim_{\Delta t\to 0}\Delta s$$

即

$$|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|=\mathrm{d}s \tag{1-6}$$

$\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 表示无穷小位移，$\mathrm{d}s$ 表示无穷小路程，上式指出，在无穷小时间内，位移的大小 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$ 等于对应的路程 $\mathrm{d}s$。

3. 速度和速率

设在时间 Δt 内，质点的位移为 $\Delta\boldsymbol{r}$，将比值 $\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 称为质点在时间 Δt 内的平均速度，记作 $\overline{\boldsymbol{v}}$

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-7}$$

若在 Δt 内，质点经历的路程是 Δs，则比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 称为质点在这段时间内的平均速率，记作 $\overline{v}$

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-8}$$

当时间$\Delta t\to 0$时，比值$\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$的极限$\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$和比值$\frac{\Delta s}{\Delta t}$的极限$\frac{ds}{dt}$，分别称为瞬时速度和瞬时速率，简称速度和速率。即

$$\boldsymbol{v}=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \tag{1-9}$$

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-10}$$

速度是描述运动质点在某一瞬时位置变化率的物理量。(1-9)式表明，速度与$d\boldsymbol{r}$同方向，当$\Delta t\to 0$时，$|d\boldsymbol{r}|=ds$，$\left|\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right|=\frac{ds}{dt}$，即在同一时刻，质点速度的大小与速率相等。

综上所述，质点运动时，其速度的大小与速率相等，方向沿轨道切线指向质点前进方向。

当质点在一个平面上运动时，速度矢量在平面直角坐标系中表示为

$$\boldsymbol{v}=\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} \tag{1-11}$$

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y$$

用v_x和v_y分别表示$\frac{dx}{dt}$和$\frac{dy}{dt}$，得速度在直角坐标系中的分量式

$$\left.\begin{aligned} v_x=\frac{dx}{dt}\\ v_y=\frac{dy}{dt}\end{aligned}\right\} \tag{1-12}$$

如果已知v_x和v_y，可求得速度的大小（速率）

$$v=\sqrt{v_x^{\ 2}+v_y^{\ 2}} \tag{1-13}$$

速率的方向（用速度与Ox轴正方向的夹角α表示）

$$\tan\alpha=\frac{v_y}{v_x} \tag{1-14}$$

4．加速度

质点在轨迹上不同的位置，通常有着不同的速度。如图 1-3 所示，一质点做曲线运动。t时刻质点位于A点，速度为$\boldsymbol{v}_A$；在$t+\Delta t$时刻，质点位于B点，速度为$\boldsymbol{v}_B$。则在Δt时间内质点速度的变化量为

$$\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$$

比值$\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$称为质点在这段时间的平均加速度，用符号$\bar{\boldsymbol{a}}$表示：

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \tag{1-15}$$

当$\Delta t\to 0$时，平均加速度的极限$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}$，被称为质点在$t$时刻的瞬时加速度，简称加速度。

即 $$\boldsymbol{a}=\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \tag{1-16}$$

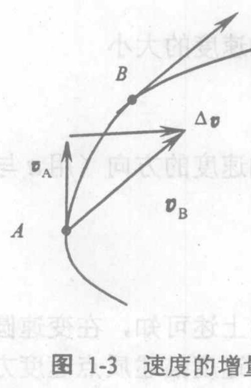

图 1-3 速度的增量

在直角坐标系中加速度的表示式

$$a=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}i+\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}j=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}i+\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}j \tag{1-17}$$

用符号 a_x 和 a_y 分别表示 Ox 轴和 Oy 轴方向的加速度分量，则

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

$$a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}$$

如果已知 a_x 和 a_y，可求得加速度的大小

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2} \tag{1-18}$$

加速度方向（用 a 与 Ox 轴正方向的夹角表示）

$$\tan\alpha=\frac{a_x}{a_y} \tag{1-19}$$

5. 法向加速度和切向加速度

加速度矢量除可以按直角坐标系分解外，还可以按自然坐标系分解，即按质点运动轨道的法线方向和切线方向分解。

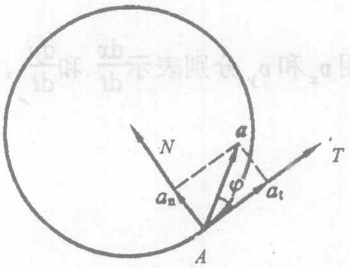

图 1-4　切向、法向加速度

如图 1-4 所示，一质点在圆轨道上运动到 A 点。在 A 点沿圆的切线作一坐标轴 AT，以质点运动的方向取为正方向，称为切向坐标轴；再沿半径方向指向圆心作坐标轴 AN，称为法向坐标轴。圆周上每一点都有自己的切向坐标轴和法向坐标轴。如果质点作变速圆周运动，质点速度的方向和大小均发生变化。此时质点加速度有两个分矢量，一是由于速度方向改变所引起的，指向圆心，即沿法向坐标轴的正方向，其大小等于 $\frac{v^2}{R}$，称为法向加速度，用符号 a_n 表示

$$a_n=\frac{v^2}{R} \tag{1-20a}$$

另一是由于速度大小变化所引起的，其方向沿切线方向，即在切线坐标轴上，其在 AT 轴上的分量等于质点速率 v_t 对时间 t 的导数，称为切向加速度，用符号 a_t 表示：

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v_t}{\mathrm{d}t} \tag{1-20b}$$

加速度的大小

$$|a|=\sqrt{a_n^2+a_t^2} \tag{1-21}$$

加速度的方向（用 a 与速度 v 之间的夹角 α 表示）

$$\tan\alpha=\frac{a_n}{a_t} \tag{1-22}$$

由上述可知，在变速圆周运动中，加速度可分解为互相垂直的法向加速度和切向加速度。法向加速度描述质点速度方向的变化；切向加速度描述质点速度大小的变化。

质点做一般曲线运动时，速度的大小在变化，方向也在变化。质点做直线运动时，速度的方向没有变化，因而没有法向加速度即法向加速度为零。

三、质点运动学的基本问题

质点运动学的主要任务是解决质点运动的描述问题，如果已知质点的运动方程，就可以了解质点运动的全部情况。因此，运动方程是运动学的核心。质点运动的基本问题可分为两类：一类是已知运动方程，求质点的速度和加速度；另一类是已知质点的加速度和初始条件，求质点的速度和运动方程。许多具体问题则是这两类基本问题的综合。下面通过具体例题来进一步说明。

例 2　一质点做直线运动，运动学方程是 $x=2+3t-t^2$ 式中，x 以米为单位，t 以秒为单位。求（1）质点的速度公式；（2）速率公式。

解　（1）对运动方程求导，$v_x=\dfrac{dx}{dt}=\dfrac{d}{dt}$（$2+3t-t^2$）$=3-2t$

（2）上式表明质点做变速运动，当 $t<1.5$ s 时，$v_x>0$，质点沿 x 轴正向运动；

当 $t>1.5$ s 时，$v_x<0$，质点沿 x 轴负方向运动。所以，此质点的速率公式是：

$$|v_x|=\begin{cases}3-2t & (t<1.5\ \mathrm{s})\\ 2t-3 & (t>1.5\ \mathrm{s})\end{cases}$$

例 3　一质点在 Ox 轴上做直线运动，它的运动方程为：$x=4+3t^2-2t^3$，求（1）任一时刻 t 质点的速度和加速度；（2）质点在 3s 末的速度和加速度。

解　（1）速度：$v_x=\dfrac{dx}{dt}=6t-6t^2$

加速度：$a_x=\dfrac{dv_x}{dt}=6-12t$

上式表明，质点作变加速直线运动。

（2）将 $t=3$ s，代入速度和加速度表达式中，分别得到 3 s 末时，质点的速度和加速度，即

$$v_x(3)=(6\times3-6\times3^2)=-36\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

$$a(3)=(6-12\times3)=-30\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

例 4　汽车在半径为 200 m 的圆弧形公路上刹车，刹车开始阶段的运动方程为 $s=20t-0.2t^3$ 求汽车在 $t=1$ s 时切向加速度、法向加速度和加速度。

解　$a_t=\dfrac{dv_t}{dt}=\dfrac{d^2s}{dt^2}$　　$v_t=\dfrac{ds}{dt}=20-0.6t^2$

$a_n=\dfrac{v^2}{R}=\dfrac{(20-0.6t^2)^2}{R}$　　$a_t=\dfrac{dv_t}{dt}=-1.2t$

将 $R=200$ m 及 $t=1$s 代入上列各式，得 $v_t=20-0.6\times1=19.4$ m / s

$$a_n=\frac{v^2}{R}=\frac{(19.4)^2}{200}\approx1.88\ \mathrm{m/s^2}$$

$$a_t=\frac{dv_t}{dt}=-1.2t=-1.2\ \mathrm{m/s^2}$$

$$a=\sqrt{(1.88)^2+(-1.22)^2}\approx2.33\ \mathrm{m/s^2}$$

$$\tan\varphi=\frac{a_n}{a_t}=\frac{1.88}{-1.2}\approx-1.5667$$

$$\varphi\approx122°33'$$

第二节　质点动力学

上节讨论了运动学的一些重要概念，以及如何用运动方程描述物体的机械运动。这仅仅是从几何方面分析了机械运动，没有涉及引起运动变化的原因。本节将研究物体间的相互作用，以及这种相互作用所引起的物体运动状态变化的规律。力学中的这部分内容称为动力学。

一、牛顿运动定律

牛顿运动定律是力学中的重要定律。在人类长时间的生产实践和前辈科学实验成果的基础上，牛顿对机械运动的规律，通过深入的研究归纳总结，于1686年发表了三条运动定律。牛顿的三条定律陈述如下：

1. 牛顿第一定律

任何物体都要保持其静止状态或匀速直线运动状态，直到外力迫使它改变运动状态为止。

数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=0\text{ 时，}\ \boldsymbol{v}=0$$

这个定律表明，任何物体都具有一种保持其原来运动状态的特性，这种特性称为物体的惯性。由于物体具有惯性，要改变物体所处的静止状态或匀速直线运动状态，外界必须对物体施加影响或作用，这种影响或作用就是力。

牛顿第一定律并非适用于一切参考系。我们把牛顿第一定律能成立的参考系称为惯性参考系，简称为惯性系，不能成立的参考系称为非惯性系。所以，可以把牛顿第一定律作为判断一个参考系是惯性系还是非惯性系的理论依据。

2. 牛顿第二定律

为了量度物体惯性的大小，我们引入质量这个物理量。物体质量的大小是这样规定的：各物体的质量，与它们在大小相等的外力作用下所获得的加速度的大小成反比。

物体所获得的加速大小与它所受合力的大小成正比，与质点自身的质量 m 成反比；加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向与合力 $\boldsymbol{F}$ 的方向相同。这就是牛顿第二定律，其原始数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t} \tag{1-23}$$

当物体在低速情况下运动时，即物体的运动速度远小于光速时，物体的质量可当作常量，则上式写成

$$\boldsymbol{F}=\frac{m\mathrm{d}(\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t}=m\boldsymbol{a} \tag{1-24}$$

牛顿第二定律只适用于质点运动，在惯性参考系中成立。其所表达的规律是质点所受合力、自身质量以及它所获得的加速度三者之间的瞬时关系。质点的加速度只在它受力作用时才产生，如果在某一瞬间质点失去了力的作用，则就在这一瞬间质点也失去了加速度，质点将以该瞬间的速度作匀速直线运动。

3. 牛顿第三定律

大量实验事实证明，物体间的作用总是相互的，两个物体之间的作用力和反作用力，沿同一直线，大小相等，方向相反，分别作用在两个物体上，这一规律称为牛顿第三定律，其数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=-\boldsymbol{F}' \tag{1-25}$$

在上式中 $\boldsymbol{F}$ 是作用力，$\boldsymbol{F}'$ 是反作用力。

这个定律可以表达为：当物体 A 以力 $\boldsymbol{F}$ 作用于物体 B 时，物体 B 也必定同时以力 $\boldsymbol{F}'$ 作用

于物体 A，$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{F}'$ 大小相等，方向相反，并处于同一条直线上。

4. 牛顿运动定律的应用

牛顿运动定律是物体作机械运动的基本定律，它在实践中有着广泛的应用。下面将通过例子来说明如何应用牛顿定律分析问题和解决问题。

在求解具体问题时，常将牛顿第二定律的矢量式写成分量式。在平面直角坐标系中的分量式为

$$F_x = m a_x \qquad F_y = m a_y \tag{1-26}$$

在曲线运动时，沿切线方向和法线方向的分量式为

$$F_t = ma_t = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} \qquad F_n = ma_n = m\frac{\boldsymbol{v}^2}{\rho} \tag{1-27}$$

$\boldsymbol{F}_t$ 和 $\boldsymbol{F}_n$ 分别是物体所受合外力在切线方向的分量和法线方向的分量，ρ 是曲率半径。

应用牛顿运动定律解答的主要问题，可以分为两类：

（1）知道物体的受力情况，应用牛顿第二定律求出加速度，如果再知道物体的初始条件，应用运动学公式就可以求出物体的运动情况——任意时刻的位置、速度等。

（2）知道物体的运动情况，求出物体的加速度，应用牛顿第二定律，推断或者求出物体的受力情况。

例 5　一个静止在水平面上的物体，质量是 2.0 kg，在水平方向受到 4.4 N 的拉力，物体跟平面的滑动摩擦力是 2.2 N。求物体在 4.0s 末的速度和 4.0s 内发生的位移。

这道题也是根据已知的受力情况来求物体的运动情况。首先要分析清楚物体的受力情况。

图 1-5 是物体的受力示意图，物体受到四个力的作用：水平方向的拉力 $\boldsymbol{F}$ 和滑动摩擦力 f，竖直方向和重力 $\boldsymbol{G}$ 和平面的支持力 $\boldsymbol{N}$。物体在竖直方向上没有加速度，$\boldsymbol{G}$ 和 $\boldsymbol{N}$ 彼此平衡，求合力时可以不考虑它们，所以合外力 $\boldsymbol{F}_{合}$就是水平方向上的 F 与 f 的合力，即 $\boldsymbol{F}_{合}=\boldsymbol{F}-\boldsymbol{f}$，方向与拉力 f 的方向相同。

然后，根据牛顿第二定律 $\boldsymbol{F}_{合}= m\boldsymbol{a}$，可以求出加速度 $\boldsymbol{a}$。

最后，根据物体的初速度为零，以及在合外力作用下有加速度，可以知道物体是做初速度为零的匀加速运动。利用 $\boldsymbol{v}_t = at$ 和 $s = \frac{1}{2}at^2$，就可以求出 4.0s 末的速度和 4.0s 内的位移。

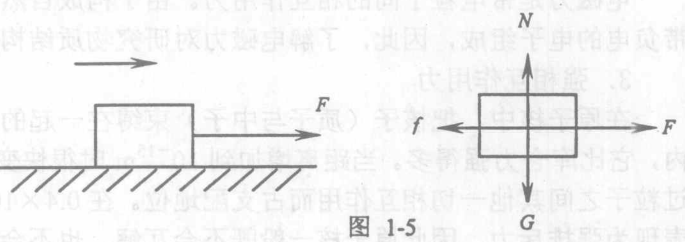

图 1-5

解　$a = \dfrac{F-f}{m} = \dfrac{4.4-2.2}{2.0} = 1.1\ \mathrm{m/s^2}$

所以，物体在 4.0s 内发生的位移为

$$s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}\times1.1\times4.0^2 = 8.8\ \mathrm{m}$$

二、自然界中的各种力

所有的力都来自不同物体之间的相互作用，目前我们所知道的力有：引力，由于物体具有质量，而在物体之间产生；电磁力，在静止或运动的电荷之间产生；核力，在亚原子粒子之间，当距离小于约 10^{-15}m 时才产生的短程相互作用力。以下介绍这些力以及这些力的宏观表现，以及各种机械接触力。

1. 引力

（1）万有引力定律：牛顿于 1666 年给出了引力相互作用的普遍规律，即万有引力定律。

任何可以看作质点的两个粒子，由于其具有质量而产生的相互之间的吸引力，其大小与它们的质量 m_1 和 m_2 之积成正比，而与它们之间的距离 r 的平方成反比；力的方向在两粒子的连线上，彼此施加吸引力，即

$$F_{12}=\mathrm{G}\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中，G 为引力常量，现代实验值为 $\mathrm{G}=(6.672\pm0.004)\times10^{-11}\mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$。

在地球附近某物体的重量，实质就是地球施于该物体的引力即 $W=mg$。

（2）地球的引力：引力定律只适用于质点。我们应用力的叠加原理可求得地球对月球的引力。地球对月球上的任一质点的作用力，应等于组成地球的每一质点单独对月球上该点作用力的矢量和，把地球对组成月球各质点的力叠加起来，即求得地球对月球的作用力。如果我们把地球和月球分别看作质量分布中心对称的球体，根据计算可知地球对月球的作用力为

$$F=\mathrm{G}\,\frac{Mm}{r^2}$$

式中，M 与 m 分别为地球与月球的质量，r 为两球心间距。即等于把质量集中于球心后质点间的万有引力。

地球表面上质量为 m 的物体受到地球对其的引力即重力为

$$F=\mathrm{G}\,\frac{Mm}{R_e^2}$$

式中，R_e 为地球半径，则质点在地面上的重力加速度

$$g=\frac{F}{m}=\mathrm{G}\frac{M}{R_e^2}\approx 9.8\mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

重力加速度的方向指向地球中心，数值随高度增加而减小。

2．电磁力

电磁力是带电粒子间的相互作用力。由于构成自然界的基本粒子—原子是由带正电的核与带负电的电子组成，因此，了解电磁力对研究物质结构有根本意义。

3．强相互作用力

在原子核中，把核子（质子与中子）束缚在一起的力，称为强相互作用力。在足够短距离内，它比库仑力强得多。当距离增加到 10^{-15}m 时很快变小而可忽略不计了；小于此距离，可超过粒子之间其他一切相互作用而占支配地位。在 0.4×10^{-15}m 以外是吸引力，小于 0.4×10^{-15}m 表现为强排斥力，因此原子核一般既不会瓦解，也不会坍缩。

这种力只存在于强子之间。中子、质子、介子和重子等都属于强子类粒子。

4．弱相互作用力

它是与核子相互关联的力，力程比强相互作用还要短，强度仅为强相互作用力的 10^{-15} 倍。它是引起 β 衰变类型的放射性现象的原因。

核力作为短程力，只在微观世界中起作用。在宏观范围内，核力并没有实际应用价值。因此，我们真正关注的只是长程力，即引力和电磁力。

5．接触力

常见的接触力，是指在物体之间以原子和分子之间短程相互作用而传递的力。它包括绳子张力、滑动摩擦、表面张力以及运动物体与液体之间的黏性力。

固体接触力包括性质不同的两个力：一个是两固体之间的压力，此力把两个固体表面结合在一起，它是弹性力。力的方向垂直于接触面，故又叫法向力 N。法向力越大，两接触面结合得越紧密；另一个力发生在沿接触面的方向，称为切向力，又叫摩擦力。

常见摩擦力有两种：静摩擦和滑动摩擦力。一般情况下，滑动摩擦力的数值稍小于最大静

摩擦力。

第三节　功　势能

一、变力的功

中学学习了恒力做功的计算公式 $W=Fs\cos\theta$（或用 A 表示功），下面利用微元法积分讨论变力做功的情况。

在许多情况下，作用于质点的力 $\boldsymbol{F}$ 的大小和方向都在随时间变化，而质点在这个力的作用下沿任意曲线从点 P 运动到点 Q，如图 1-6 所示。设想将总位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 分解成很多微小的位移元 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$，总位矢量 $\Delta\boldsymbol{r}$ 等于所有位移元 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的矢量和。在每个位移元内，可认为 $\boldsymbol{F}$ 是恒定的，$\boldsymbol{F}$ 所作的功称为元功，表示为

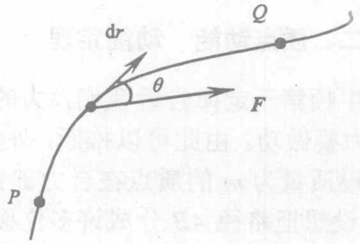

图 1-6　功的定义

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

或

$$W=\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}\text{ 或 }\mathrm{d}W=F\cos\theta\mathrm{d}s$$

$\mathrm{d}W$ 称为变力 $\boldsymbol{F}$ 的元功。$\mathrm{d}s$ 是 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的长度，称为路程元，θ 是 $\boldsymbol{F}$ 和 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的夹角。力 $\boldsymbol{F}$ 所做的总功 W 等于所有无穷小段元功 $\mathrm{d}W$ 之和。即：

$$\int\mathrm{d}W=\int_{\mathrm{P}}^{\mathrm{Q}}\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_{\mathrm{P}}^{\mathrm{Q}}F\cos\theta\mathrm{d}r \tag{1-28}$$

上面讨论了一个力对质点所做的功。若有几个力同时作用在质点上，它们所做的功如下：

$$W=\int\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int(\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\boldsymbol{F}_3+\cdots+\boldsymbol{F}_i+\cdots)\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}$$

由矢量标积的分配律，得

$$W=\int\boldsymbol{F}_1\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}+\int\boldsymbol{F}_2\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}+\int\boldsymbol{F}_3\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}+\cdots\boldsymbol{F}_i\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}+\cdots \tag{1-29}$$

即

$$W=W_1+W_2+W_3+\cdots+W_i+\cdots$$

例 6　某物体在平面上沿 Ox 轴的正方向前进，平面上各处的摩擦系数不等，已知某段路面摩擦力的大小随坐标 x 变化的规律为 $f=1+x$（$x>0$），求从 $x=0$ 到 $x=L$，摩擦力所做的功。

解　因为摩擦力的大小是 $f=1+x$，$\mathrm{d}x>0$，摩擦力为负。则元功为

$$\mathrm{d}W=-(1+x)\,\mathrm{d}x$$

$$W=-\int_0^L(1+x)\mathrm{d}x=-L(1+\frac{1}{2}L)$$

在实际工作中，不仅要考虑功，而且还需要知道完成一定功所花费的时间。对于一个做功的机械而言，完成一定功的快慢，是这个机械做功性能的重要标志，用功率来表示。功率定义为单位时间内所做的功，用 P 表示。

在 Δt 时间间隔内所做的功为 ΔW，则

$$\overline{P}=\frac{\Delta W}{\Delta t}$$

称为在 Δt 时间间隔内的平均功率，当时间间隔 Δt 趋于零时，力的平均功率的极限叫做力的瞬时功率：

$$P=\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \tag{1-30}$$

将 $\mathrm{d}W=\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 代入上式，得

$$P=\boldsymbol{F}\cdot\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=Fv\cos\theta \qquad (1\text{-}31)$$

上式表明，力 $\boldsymbol{F}$ 的瞬时功率等于力在运动方向的分量与速率的乘积，或者等于力的大小与速度在力的方向上的分量的乘积。该式还表明，对于一定功率的机械，当速率小时，力就大；当速率大时，力必定小。例如，当汽车发挥最大功率行驶时，在平坦的路上所需要的牵引力较小，可高速行驶；在上坡时所需要的牵引力较大，必须放慢速度。

二、质点动能　动能定理

牛顿第一定律告诉我们，力的作用是物体运动状态变化的原因，当力的作用引起物体位移时，力要做功。由此可以推断，外力对物体做功与物体运动状态的变更之间必定存在某种联系。

设质量为 m 的质点在合力 $\boldsymbol{F}$ 的作用下沿某一曲线运动，在 A 点和 B 点的速率分别为 v_1 和 v_2。设想把路径 AB 分成许多位移元，并设作用于某一位移元 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 上的合外力 $\boldsymbol{F}$ 与 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 之间的夹角为 θ。

在物体从 A 点移动到 B 点过程中，合外力所做的总功为

$$\mathrm{d}W=\int_A^B \mathrm{d}W=\int_{v_1}^{v_2} m\,v\,\mathrm{d}v$$

积分得到

$$W=\frac{1}{2}mv_2{}^2-\frac{1}{2}mv_1{}^2 \qquad (1\text{-}32)$$

$\frac{1}{2}mv_1{}^2$ 和 $\frac{1}{2}mv_2{}^2$ 分别表示质点在初始和终了位置时的动能，上式可写成

$$W=E_{K2}-E_{K1} \qquad (1\text{-}33)$$

上式表明，作用于质点的合力做的功，等于质点动能的增量。这个结论称为质点动能定理。

从上式可知 $W>0$，表示合力 F 对质点做正功，并有

$$E_{K2}-E_{K1}>0$$

即质点末状态的动能大于初状态的动能，这说明合力 $\boldsymbol{F}$ 对质点做功使质点的动能增大。$W<0$，表示合力 $\boldsymbol{F}$ 对质点做负功，并有

$$E_{K2}-E_{K1}<0$$

即质点末状态的动能小于初状态的动能，这说明质点以自身动能的减小而对外做功。由此可见，对于一个运动质点，合力所做的功（正值或负值），在数值上等于该质点动能的改变（增大或减小）。既然合力所做的功在数值上等于能量的改变，所以说，功是质点能量改变的量度。

三、保守力的功

（一）保守力与非保守力

我们从分析重力、弹性力以及摩擦力的所做的功的角度入手，引入保守力与非保守力的概念。

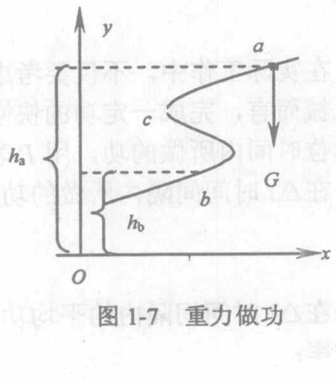

图 1-7　重力做功

例 7　如图 1-7 所示，质量为 m 的质点在重力作用下自 a 点经平面曲线 abc 运动到 b 点。计算重力对质点所做的功。

解　建立直角坐标系 xOy，y 轴铅直向上，取 $y=0$ 作为计算 a 点和 b 点高度的标准，$F_x=0$，$F_y=-mg$，a 点的纵坐标是 h_a，b 点纵坐标是 h_b。从 a 点到 b 点重力的功等于

$$\mathrm{d}W=G\cos\theta\mathrm{d}s=-mg\mathrm{d}y$$

$$W=\int F_y\mathrm{d}y=-mg\int_{h_a}^{h_b}\mathrm{d}y$$