普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理简明教程

陈执平 主编

DAXUE WULI JIANMING JIAOCHENG

化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理简明教程

陈执平　主编

化学工业出版社

·北京·

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

本书为福建省高等学校第二批网络课程省级研制项目立项资助。

本书参照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会于2010年制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》，汲取同类教材的优点，并结合编者的教学经验编写而成。

全书共分为十五章。内容主要包括质点运动学、牛顿定律、动力学和守恒定律、刚体力学、静电场、电场中的导体和电解质、恒定磁场、电磁感应、机械振动与机械波、波动光学、流体力学、气体动理论、热力学基础、狭义相对论、量子物理等。

本书可作为高等院校非物理类各专业本科少学时的大学物理基础课程的教材，也可供其他相关领域的读者参考。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理简明教程/陈执平主编．—北京：化学工业出版社，2012.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-12948-2

Ⅰ．大…　Ⅱ．陈…　Ⅲ．物理学-高等学校-教材　Ⅳ．04

中国版本图书馆CIP数据核字（2011）第249726号

责任编辑：满悦芝　　文字编辑：荣世芳

责任校对：边　涛　　装帧设计：韩　飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号　邮政编码100011）

印　　装：北京白帆印务有限公司

787mm×1092mm　1/16　印张12¼　字数314千字　2012年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899

网　　址：http：//www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：24.00元

前　言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动规律以及基本相互作用的科学。物理学是其他自然科学的基础。20 世纪的历程表明，物理学与生物学、化学、材料科学、医学等学科领域发展与结合，都极大地推动了它们的发展。显然物理学知识是自然科学和工程技术人材必备的基础。物理学从事实中抽象出物理模型，从数据中找出基本规律的物理思维方法，物理学所展现的认识论和方法论，在人类探索未知世界的过程中，具有普遍的意义。物理课程的学习，对学生探索精神和创新意识及科学素养的培养等方面具有其他课程不能替代的作用。

作为少学时的非物理类专业本科教材，本书充分考虑了与中学教材的衔接，删除了大量与中学教学内容重叠的部分，在保证物理学的完整性和系统性的基础上精选内容，夯实基础。对物理学的新进展和前沿，考虑到在很短的学时内只能作一些极其简略的科普性质的介绍，以及避免由于缺少必要的铺垫而出现章节中知识点与前沿问题生硬对接，故将它们放到阅读材料中单独作简要介绍，打开“窗口”，学生可根据兴趣和需要，利用互联网的丰富资源和有关文献资料追踪并作进一步深入的学习和研究。

本书的编写分工如下：

林仁荣编写第四章、第五章及第十一章共 5 万字；王苏潭编写第一章、第二章及第三章共 5 万字。陈执平编写其余章节及全部习题共 21.5 万字，并统稿。

由于编写水平及时间有限，书中疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编者
2012 年 1 月

目　录

第一章　质点运动学

运动是一切物质的固有属性，物质的运动方式各不相同，如机械运动、热运动、电磁运动等。机械运动是最常见、最简单的运动形式，是研究其它运动的基础。本章讨论质点的运动。

第一节　质点运动的描述

一、参考系、质点

我们知道，宇宙中的一切物体都处在不断的运动之中，不存在绝对静止的物体，这就是运动的绝对性。为了描述一个物体的机械运动，必须选另一个物体作参考物，称此参考物体为参考系，参考系的选择可视问题性质而任意选定。但仅有参考系还不能定量地描述物体的位置，所以要在参考系上固定一个带有标尺的框架，即坐标系，以进行定量的数学运算。常用的坐标系有直角坐标系、柱坐标系和球坐标系等。同一物体的运动，若我们选取的参考系不同，对它的运动的描述就不同，这就是运动描述的相对性。

确定参考系后就可以讨论物体的运动了。在某些问题中，常可以忽略物体的形状和大小，将物体看成一个只有质量、没有大小和形状的点，称为质点。显然，质点是一个理想化的模型。那么哪些物体可看成质点？如果在某参考系中，物体各点运动情况相同，其中任意一个点的运动能代表整个物体的运动，这时的物体就可视为质点。例如长方体木块沿固定斜面滑下，木块上所有点的轨迹都是平行于斜面的直线，各点的运动状态也相同，木块上任意一个点的运动能代表整个木块的运动，此时木块就可以看作质点（图 1-1）。此外，即使在实际问题中，物体各点运动不同，但若讨论的范围远大于物体线度，则可忽略各点运动的差异。如研究地球绕太阳公转时，考虑到二者平均距离约为地球半径的 10^4 倍，相比之下，地球上各点运动的差异是可以忽略的，这时地球视为一个质点。

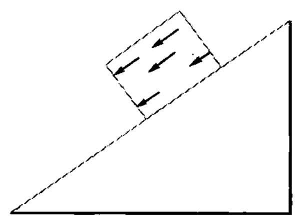

图 1-1　木块可视作质点

讨论质点的运动，其意义不仅仅是因为在很多问题中可以将物体理想化为质点来研究，以突出研究对象的主要性质，实际上，从任何物体都是由许许多多质点构成这个角度看，将这些质点的运动研究清楚了，整个物体的运动也就清楚了。因此对质点运动的研究是机械运动研究的基础。

二、位矢、运动方程

1. 位置矢量

要描述物体的运动，首先要讨论物体的位置。以前我们习惯于用点的坐标来表示物体的位置，但很不直观，且不便于进行位置相关的计算。生活中我们指示某处的位置时，常伸直手臂用手指指点，指尖方向即为该处方位。仿此，在坐标系中我们可用一个始于坐标原点、止于质点 P 的有向线段来表示质点 P 的位置，这个有向线段称为位置矢量，简称位矢（图 1-2）。用位矢表示质点位置，是简明且直观的：如我们在坐标原点观察某质点，则位矢的长

度（模）为观察点至质点的距离，位矢箭头方向是质点的方位。

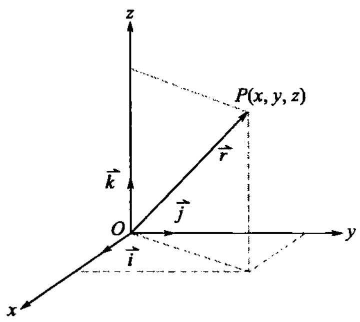

图 1-2　位置矢量

在直角坐标系中，位矢可写为

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

其中，x，y，z 是位矢在三个坐标轴上的投影；$\vec{i}$，$\vec{j}$，$\vec{k}$ 是沿三个坐标轴的单位矢量。

位矢的模为　$|\vec{r}|=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$

位矢的方向余弦为

$$\cos\alpha=\frac{x}{|\vec{r}|}\qquad \cos\beta=\frac{y}{|\vec{r}|}\qquad \cos\gamma=\frac{z}{|\vec{r}|}$$

2. 运动方程

如果我们研究的质点处在运动之中，其位矢就是一个时间的函数

$$\vec{r}(t)=x(t)\vec{i}+y(t)\vec{j}+z(t)\vec{k} \tag{1-2}$$

这里，$\vec{r}(t)$ 描述了质点运动位置随时间的变化，故称为运动方程。显然随时间变化的位矢就是运动方程。若将 $x(t)$、$y(t)$ 及 $z(t)$ 中的参数 t 消去，就可得到质点运动的轨迹方程。

3. 位移

我们讨论质点的运动，除了确定其位置，还必须知道其位置的变动情况。如果质点在时刻 t_1 从空间一点 $P_1(x_1,\ y_1,\ z_1)$ 做曲线运动，于时刻 $t+\Delta t$ 到另一点 $P_2(x_2,\ y_2,\ z_2)$，位置由$\vec{r}_1$ 变为$\vec{r}_2$，改变量 $\Delta\vec{r}=\vec{r}_2-\vec{r}_1=(x_2-x_1)\vec{i}+(y_2-y_1)\vec{j}+(z_2-z_1)\vec{k}$ 称为质点的位移，见图 1-3。位移是矢量，它包含了质点终止点 P_2 与初始点 P_1 的直线距离和相对方位两个信息，与坐标原点的选择无关。需要指出的是，$|\Delta\vec{r}|\neq\Delta s$（弦长不等于弧长），但 $|\mathrm{d}\vec{r}|=\mathrm{d}s$（极限时弦长等于弧长）。

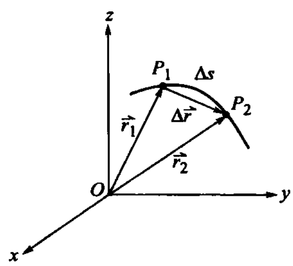

图 1-3　位移矢量

三、速度、加速度

1. 速度

我们要研究质点运动，就要讨论质点位置变化的快慢。为此我们用质点在一段时间内通过的位移与所用的时间之比来表示，即

$$\overline{\vec{v}}=\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

这是平均速度。平均速度矢量 $\overline{\vec{v}}$ 的方向与位移矢量 $\Delta\vec{r}$ 方向一致。平均速度只能反映 Δt 时间内位置变化快慢的平均值。从高等数学我们知道，当 $\Delta t\to 0$，$\dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ 的极限值就反映质点瞬时 t 的位置变化快慢，可以想象，当 $\Delta t\to 0$ 时，$\Delta\vec{r}$ 的方向趋于与 P_1 处的切线方向即 P_1 处质点的速度方向一致，可见图 1-3。

$$\vec{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-3}$$

$\vec{v}$ 为瞬时速度矢量，它是位矢对时间的一阶导数，方向为位移矢量 $\Delta\vec{r}$ 的极限方向，其方向沿轨道上质点所在处的切线。

直角坐标系中，$\vec{v}=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(x\vec{i}+y\vec{j}+z\vec{k})=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\vec{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\vec{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\vec{k}$

2. 加速度

在讨论质点运动时，常常还要了解质点运动速度的变化情况，为此引入加速度矢量（图 1-4）$\overline{\vec{a}}=\frac{\vec{v}_2-\vec{v}_1}{\Delta t}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$，其中，$\vec{v}_1$ 为 t_1 时刻质点的速度；$\vec{v}_2$ 为 $t+\Delta t$ 时刻质点的速度。$\Delta\vec{v}$的方向即为平均加速度方向。$\overline{\vec{a}}$ 包含了 Δt 内速度大小变化与速度方向变化的信息。类似地，瞬时加速度矢量为 $\vec{a}=\lim\limits_{\Delta\to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\vec{r}}{\mathrm{d}t^2}$。$\vec{a}$的方向是 $\Delta t\to 0$ 时 $\Delta\vec{v}$的极限方向。显然，当质点做曲线运动时，其加速度方向与速度方向是不一致的。

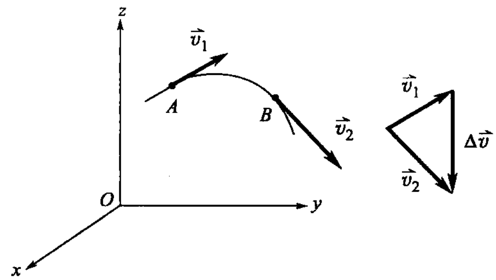

图 1-4　加速度矢量

直角坐标系中，

$$\vec{a}=\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(v_x\vec{i}+v_y\vec{j}+v_z\vec{k})=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\vec{i}+\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\vec{j}+\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\vec{k}\tag{1-4}$$

四、匀加速运动位移、速度和加速度的关系

对$\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\vec{a}$，两边同乘 $\mathrm{d}t$ 得

$$\mathrm{d}\vec{v}=\vec{a}\,\mathrm{d}t$$

两边取定积分

$$\int_{\vec{v}_0}^{\vec{v}}\mathrm{d}\vec{v}=\int_0^t\vec{a}\,\mathrm{d}t$$

$\vec{a}$ 为常矢量。上式积分，整理得

$$\vec{v}=\vec{v}_0+\vec{a}t\tag{1-5}$$

上式又可写为

$$\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=\vec{v}_0+\vec{a}t$$

两边同乘 $\mathrm{d}t$，再取定积分，有

$$\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}}\mathrm{d}\vec{r}=\int_0^t(\vec{v}_0+\vec{a}t)\mathrm{d}t$$

同样，考虑 $\vec{a}$ 为常矢量。对上式积分，整理得

$$\vec{r}=\vec{r}_0+\vec{v}_0t+\frac{1}{2}\vec{a}t^2\tag{1-6}$$

【例 1-1】 一质点在 xOy 平面上运动，运动方程为

$$x=3t+5，y=\frac{1}{2}t^2+3t-4$$

式中，t 以秒计，x、y 以米计。(1) 求出 $t=1\mathrm{s}$ 时刻和 $t=2\mathrm{s}$ 时刻的位置矢量；(2) 计算这 1s 内质点的位移；(3) 计算 $t=4\mathrm{s}$ 时质点的速度；(4) 计算 $t=4\mathrm{s}$ 时质点的加速度。

解：(1) 将 $t=1\mathrm{s}$，$t=2\mathrm{s}$ 代入运动方程　$\vec{r}=(3t+5)\vec{i}+\left(\frac{1}{2}t^2+3t-4\right)\vec{j}\ \mathrm{m}$

有

$$\vec{r}\,|_{t=1}=8\vec{i}-0.5\vec{j}\ \text{m}$$

$$\vec{r}\,|_{t=2}=11\vec{j}+4\vec{j}\ \text{m}$$

(2) 位移为 $\Delta\vec{r}=\vec{r}\,|_{t=2}-\vec{r}\,|_{t=1}=3\vec{j}+4.5\vec{j}\ \text{m}$

(3) $\vec{v}=\dfrac{d\vec{r}}{dt}=3\vec{i}+(t+3)\vec{j}\ \text{m/s}$

$\vec{v}_4=3\vec{i}+7\vec{j}\ \text{m/s}$

(4) $\vec{a}=\dfrac{d\vec{v}}{dt}=1\vec{j}\ \text{m/s}^2$

【例 1-2】 一做直线运动的质点，加速度为 $a=4+3t\text{m/s}^2$，$t=0$ 时，$x=5\text{m}$，$v=0$。求该质点在 $t=10\text{s}$ 时的速度和位置。

解：依题意

$$a=\frac{dv}{dt}=4+3t$$

进行积分

$$\int_0^v dv=\int_0^t(4+3t)dt$$

得

$$v=4t+\frac{3}{2}t^2$$

又

$$v=\frac{dx}{dt}=4t+\frac{3}{2}t^2$$

再积分

$$\int_5^x dx=\int_0^t\left(4t+\frac{3}{2}t^2\right)dt$$

积分得

$$x=2t^2+\frac{1}{2}t^3+5$$

将 $t=10\text{s}$ 代入得

$$v|_{t=10}=4\times10+\frac{3}{2}\times10^2=190\text{m/s}$$

$$x|_{t=10}=2\times10^2+\frac{1}{2}\times10^3+5=705\text{m}$$

【例 1-3】 一汽艇关闭发动机后，受到阻力，加速度为 $a=-kv^2$，k 为常数。试求汽艇行驶距离 x 与行驶速度的函数关系。

解：依题意 $\dfrac{dv}{dt}=-kv^2$

同乘 dx，得 $\dfrac{dv}{dt}dx=-kv^2dx$

考虑到 $\dfrac{dx}{dt}=v$，即有

$$vdv=-kv^2dx$$

分离变量，取积分得

$$\int_{v_0}^{v}\frac{dv}{v}=\int_0^x-kdx$$

$$\ln\frac{v}{v_0}=-kx$$

$$v=v_0e^{-kx}$$

第二节　用自然坐标系、平面极坐标系描述质点运动

一、自然坐标系描述

前面，我们知道用矢量描述质点的运动不仅直观而且便于数学运算，如：$\vec{r}$ 为位置矢量，其一阶导数$\frac{d\vec{r}}{dt}$就是速度，二阶导数$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$就是加速度，还了解了直角坐标系中运动的计算。

实际中，我们还常常使用直角坐标系以外的其它坐标系来描述运动。有时，质点的运动轨道是已知的，则质点的位置就可以用从某个选定点算起的曲线距离来表示。轨道既知，质点速度的方向一定是沿轨道切向。若以 $\vec{\tau}$ 表示沿轨道切向的单位矢量，质点的速度就是 $\vec{v}=\frac{d\vec{r}}{dt}=\frac{|d\vec{r}|}{dt}\vec{\tau}=\frac{ds}{dt}\vec{\tau}$。$\frac{ds}{dt}$为速率，记作 v。由加速度定义，可得质点加速度

$$\vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{d^2s}{dt^2}\vec{\tau}+\frac{d\vec{\tau}}{dt}\frac{ds}{dt}=\frac{dv}{dt}\vec{\tau}+v\frac{d\vec{\tau}}{dt} \tag{1-7}$$

如图 1-5(a) 所示，t 时刻轨道切向单位矢量为 $\vec{\tau}(t)$，$t+\Delta t$ 时刻切向单位矢量为 $\vec{\tau}(t+\Delta t)$，矢量 $\vec{\tau}(t)$ 与 $\vec{\tau}(t+\Delta t)$ 的夹角为 $\Delta\theta$，$\vec{\tau}(t+\Delta t)-\vec{\tau}(t)=\Delta\vec{\tau}$。

当 $\Delta t\to 0$ 时，有：

$|d\vec{\tau}|=|\vec{\tau}|d\theta=d\theta$，且矢量 $d\vec{\tau}$ 与 $\vec{\tau}$ 垂直。若以单位矢量 $\vec{n}$ 为 $d\vec{\tau}$ 的方向，则

$d\vec{\tau}=d\theta\vec{n}$，所以$\frac{d\vec{\tau}}{dt}=\frac{d\theta}{dt}\vec{n}=\frac{d\theta}{ds}\frac{ds}{dt}\vec{n}$

如图 1-5(b) 可知$\frac{d\theta}{ds}=\frac{1}{\rho}$，$\rho$为曲率半径。

最后我们得到

$$\vec{a}=\frac{dv}{dt}\vec{\tau}+\frac{v^2}{\rho}\vec{n} \tag{1-8}$$

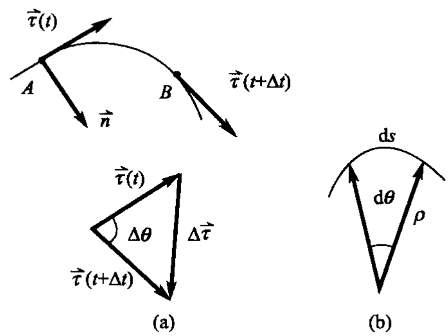

图 1-5　自然坐标系中的加速度

可见，质点的加速度是切向加速度$\frac{dv}{dt}\vec{\tau}$ 和法向加速度$\frac{v^2}{\rho}\vec{n}$ 的矢量和。当运动轨道为圆时，曲率半径ρ就是圆的半径。实际上，若将切向和法向作为坐标轴的两个方向，在轨道上选定一个点作为坐标原点，就构成了自然坐标系，以上对运动的描述，就是在自然坐标系上进行的。

【例 1-4】 一汽车在半径为 200m 的圆弧形公路上行驶，行驶路程与时间的关系为 $s=20t-0.2t^2$，求 $t=1$s 时的速度和加速度。

解：在自然坐标系中，切向速度为

$$\vec{v}=\frac{ds}{dt}\vec{\tau}=(20-0.4t)\vec{\tau}$$

$$\vec{v}|_{t=1}=19.6\vec{\tau}$$

$$\vec{a}=\frac{d^2s}{dt^2}\vec{\tau}+\frac{v^2}{\rho}\vec{n}$$

$$=-0.4\vec{\tau}+\frac{(20-0.4)^2}{R}\vec{n}$$

$$\vec{a}\,|_{t=1}=-0.4\vec{\tau}+1.92\vec{n}$$

可见，当运动轨道已知时，用自然坐标系来描述运动是方便的。

二、平面极坐标系描述

我们可以建立如图 1-6 所示的平面极坐标系来描述质点的运动。$\vec{e}_r$ 和 $\vec{e}_\theta$ 分别称为径向单位矢量和横向单位矢量，二者相互正交，$\vec{e}_r \cdot \vec{e}_\theta=0$。与直角坐标的 $\vec{i}$ 与 $\vec{j}$ 比较，$\vec{e}_r(\theta)$ 和 $\vec{e}_\theta(\theta)$ 的模虽然始终为 $|\vec{e}_r|=|\vec{e}_\theta|=1$，但它们的方向随着 θ 而变，是变矢量。直角坐标系中，矢量能向 x 与 y 方向分解，同理，在平面极坐标系中矢量可向径向与横向分解。平面极坐标系中的质点运动方程可写为 $\vec{r}(t)=r(t)\vec{e}_r$。

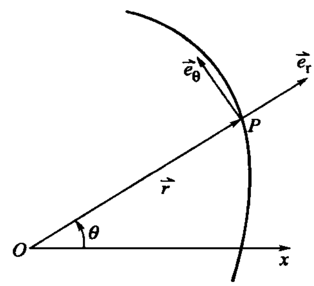

图 1-6 运动的平面极坐标描述

其标量式为

$$r=r(t),\ \theta=\theta(t)$$

消去时间 t，可得轨道方程

$$f(r,\theta)=0$$

求 $\vec{r}(t)$ 对时间的一阶导数，就可求速度 $\vec{v}$

$$\vec{v}=\frac{d\vec{r}}{dt}=\frac{d}{dt}(r\vec{e}_r)=\vec{e}_r\frac{dr}{dt}+r\frac{d\vec{e}_r}{dt} \tag{1-9}$$

现求$\frac{d\vec{e}_r}{dt}$的大小和方向。如图 1-7 所示，$\Delta\vec{e}_r=\vec{e}_r(t+\Delta t)-\vec{e}_r(t)$。在 $\Delta\vec{e}_r$ 及模都为 1 的两等边 $\vec{e}_r(t+\Delta t)$ 和 $\vec{e}_r(t)$ 构成的等腰三角形中，$|\Delta\vec{e}_r|\approx 1\Delta\theta$，令 $\Delta t\to 0$，得 $|d\vec{e}_r|=1d\theta$。由图，我们还可见当 $\Delta t\to 0$，亦即 $\Delta\theta\to 0$ 时，$\Delta\vec{e}_r$ 趋于与 $\vec{e}_r(t)$ 垂直，或与 $\vec{e}_\theta$ 平行，即 $d\vec{e}_r\perp\vec{e}_r$，或 $d\vec{e}_r/\!/\vec{e}_\theta$。因此有 $d\vec{e}_r=d\theta\vec{e}_\theta$。代入式(1-9) 得

$$\vec{v}=\vec{e}_r\frac{dr}{dt}+r\frac{d\vec{e}_r}{dt}=\vec{e}_r\frac{dr}{dt}+r\dot{\theta}\,\vec{e}_\theta \tag{1-10}$$

式中，$\frac{dr}{dt}$为径向速度大小，方向为 $\vec{e}_r$；$r\dot{\theta}$ 为横向速度大小，方向为 $\vec{e}_\theta$。

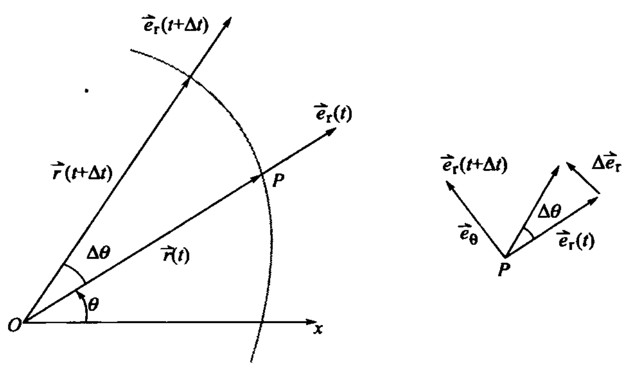

图 1-7 平面极坐标系中的速度

【例 1-5】 河水以 v_0 均匀流动，一船以恒定速度 u 始终朝着岸边一固定点 O 开来，求船的运动轨迹。

解： 我们注意到，本问题中，船始终朝着岸边固定点 O 开行，取极坐标系比较方便。如图 1-8 所示，以 O 为极点建立平面极坐标系，设初始时船的位置为 $(r_0,\ \theta_0)$，列出以下

运动方程

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=-u+u_0\cos\theta\\ r\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=-v_0\sin\theta\end{cases}$$

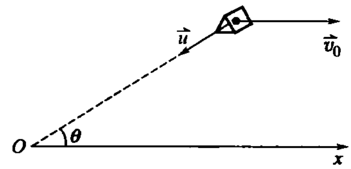

图 1-8 【例 1-5】图

以上二式联立消去时间 t，有

$$r\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}r}=\frac{-v_0\sin\theta}{-u+v_0\cos\theta}$$

分离变量，取积分

$$\int_{r_0}^{r}\frac{\mathrm{d}r}{r}=\int_{\theta_0}^{\theta}\left(\frac{u}{v_0}\csc\theta-\mathrm{ctan}\theta\right)\mathrm{d}\theta$$

积分得

$$r=r_0\left(\frac{\tan\dfrac{\theta}{2}}{\tan\dfrac{\theta_0}{2}}\right)^{\frac{u}{v_0}}\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta}$$

第三节　相对运动

我们知道，在无风的雨天，坐在匀速行驶车辆中的人看到雨点的轨迹是一斜线，而地面上的人看到的雨点轨迹则是一竖直线，这说明对于同一个运动，选择不同的参考系，运动情况是不一样的。人们常常希望知道已经在一个参考系中观察到的某个质点运动在另一个参考系中将是怎样的。例如，宇航员在飞船上记录了一太空碎片的运动，那么他回到地球后如何将此运动记录结果从地球人的角度，即在地面参考系中进行描述？这里有一个变换的问题。

以下在远小于光速的牛顿力学范围内进行讨论。

如图 1-9 所示，有 S 系（$Oxyz$ 坐标系）与 S' 系（$O'x'y'z'$坐标系）。有一个质点在 S 系中位于 P，在 S'系中位于 P'。$t=0$ 时，二系相重合，P 与 P'也是重合的。设在 Δt 内，质点由 P 移动到 Q。在质点移动的同时，S'系沿 x 轴正向以恒定的相对速度 $\vec{u}$ 离开 S 系。对于质点运动的结果，在 S 系看，位移为 $\Delta\vec{r}$；在 S'系看，位移为 $\Delta\vec{r}'$。从 S 系看，质点好像同时参与两个运动，即质点一方面随 S'系以 $\vec{u}$ 运动，另一方面还要从 P'运动到 Q。因此

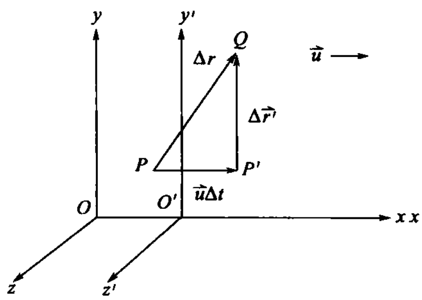

图 1-9　相对运动

$$\Delta\vec{r}=\Delta\vec{r}'+\vec{u}\Delta t$$

上式除以 Δt，并取 $\Delta t\to 0$ 的极限

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}'}{\Delta t}+\vec{u}$$

即

$$\vec{v}=\vec{v}'+\vec{u}\tag{1-11}$$

习惯上常将 S 系视为静止，将相对 S 系运动的 S'系称作运动参考系，$\vec{v}$ 就是质点对静止参

考系 S 的速度，称为绝对速度；$\vec{v}'$就是质点对运动参考系 S'的速度，称为相对速度，而把 S'系相对 S 系的速度 $\vec{u}$ 称为牵连速度。

【例 1-6】 一辆平路行驶的货车，篷高为 $h=2\text{m}$。当它静止时，雨点以 9m/s 从尾部打入车内，$d=1\text{m}$。欲使雨点恰好不能落入车内，则车需以多大速度前行？

解： 本题中，绝对速度为 $\vec{v}_{绝}=9\text{m/s}$，车速为牵连速度，车行进时雨对车的速度为相对速度，雨点恰好不落入车内，此相对速度方向必竖直向下。由 $\vec{v}_{绝对}=\vec{v}_{相对}+\vec{v}_{牵连}$，做出矢量图（图 1-10）。

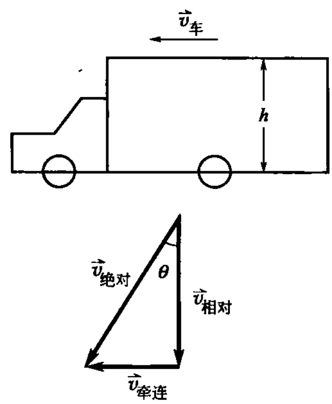

图 1-10 【例 1-6】图

依题意 $\theta=\arctan\dfrac{1}{2}=26.57°$

$$\begin{aligned} v_{牵连} &= v_{绝对}\sin\theta \\ &= 9\sin 26.57° \\ &= 4.02\text{m/s} \end{aligned}$$

第四节 伽利略变换

上节讨论中，我们从 S 系看质点运动，得到 $\Delta\vec{r}=\Delta\vec{r}\,'+\vec{u}\Delta t$，而从 S'系看，S 系以 $-u$ 运动，则 $\Delta\vec{r}\,'=\vec{r}-\vec{u}\Delta t'$。式中使用 $\Delta t'$是因为从 S'系看运动，自然要用 t'计时。不过在人们日常生活和通常的科技研究中，认为一件事的发生时间从 S 系来度量或从 S'系度量是不会有差别的，即 $\Delta t=\Delta t'$，所以可有 $\Delta\vec{r}\,'=\vec{r}-\vec{u}\Delta t$ 成立。若 $t=0$ 时 P、P'重合于坐标系原点，则有

$$\vec{r}=\vec{r}\,'+\vec{u}t$$
$$\vec{r}\,'=\vec{r}-\vec{u}t$$

或

$$\begin{aligned} x&=x'+ut \qquad & x'&=x-ut \\ y&=y' & y'&=y \\ z&=z' & z'&=z \\ t&=t' & t'&=t \end{aligned}$$

这就是伽利略时空变换。

习 题

1-1 一质点在 xy 平面内运动，在 $t=0\text{s}$ 时它的位置矢量 $\vec{r}=(-4\vec{i}+5\vec{j})\text{m}$，经 $\Delta t=5\text{s}$ 后，其位移 $\Delta\vec{r}=(6\vec{i}-8\vec{j})\text{m}$，求：①$t=5\text{s}$ 时的位矢；②在 Δt 时间内质点的平均速度。

1-2 斜向上抛出一质点，$t=0\text{s}$ 时，$x=0\text{m}$，其速度随时间变化的关系为：$\vec{v}=200\vec{i}+(200\sqrt{3}-10t)\vec{j}$ (m/s)，试求质点运动方程的矢量式及加速度矢量式。

1-3 已知质点运动方程为 $\vec{r}=R\cos t\vec{i}+R\sin t\vec{j}+2t\vec{k}$，$R$ 为常量。求 $t=0$、$t=\frac{\pi}{2}$时质点的速度和加速度。

1-4 一质点从静止开始做直线运动。初始加速度大小为 a_0，此后加速度每经 τs 增加 a_0，求 t 秒后质点的速度和位移大小。

1-5 飞机着陆时采用降落伞制动。着陆时初速度大小为 v_0 且坐标为 $x=0$。若其直线运动加速度大小为

$a=-bv^2$，b 为常量，求此飞机的运动学方程。

1-6　在铅直平面内运动的质点，其运动方程为 $\vec{r}=5t\vec{i}+(15t-5t^2)\vec{j}$，求 $t=1\text{s}$ 时的法向加速度、切向加速度。

1-7　一轮船在雨中航行时，它的雨篷能遮住篷的垂直投影后 2m 的甲板，篷高 4m。但当轮船停航时，甲板上干湿两部分的分界线却在篷前 3m，如雨滴的速度大小为 8m/s，求轮船的速率。

1-8　河水以 3m/s 由西向东流动，若渡船要在 10min 内由南向北渡过这条宽 2.4km 的河，问船应该向什么方向航行？船对水的速度应为多少？

第二章　牛 顿 定 律

前面我们讨论了质点不同时刻的位置、速度、加速度，了解了某一时间内质点的运动轨迹。但是这些只是对质点表现出来的运动现象的测量。也就是说，我们对质点运动的研究只停留在看到了什么以后，才能说什么。只有寻找产生加速度的原因，并确定之，我们才能知道它为什么会运动，它以前是如何运动的，以及它将会怎样运动。

第一节　牛顿三定律

一、牛顿第一定律

任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态，直到其它物体所作用的力迫使它改变这种状态为止。这就是牛顿第一定律。可见物体的运动不需要力去维持，只在物体运动状态发生变化，即产生加速度时，才要有力的作用。物体保持原有运动状态不变的特性是物体的固有属性，即为惯性。因此第一定律又称惯性定律。

我们已经知道，必须在参考系中研究物体的运动。当一个物体在参考系中不受其它物体的作用而能保持静止或匀速直线运动，这样的参考系称为惯性参考系。惯性参考系是牛顿第一定律引出的最自然、最适宜用来作为我们观察运动现象的参照系。当然，任何相对于惯性参考系做匀速直线运动的参考系也是惯性参考系。如果以加速行驶的车厢作参考系，则固定在车厢内的一个物体对坐在车厢内的人看是：受到了将其固连在车厢上的力却保持静止。则该加速车厢就是非惯性系了。

二、牛顿第二定律

动量为 $\vec{p}=m\vec{v}$ 的物体，在合外力作用下，其动量的时间变化率与合外力相等，即

$$\vec{F}=\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(m\vec{v})}{\mathrm{d}t}$$

这就是牛顿第二定律。动量 $m\vec{v}$ 比速度 $\vec{v}$ 更能反映物体的运动，动量概念可解释为什么以相同速度落地的等大铁球和木球对地面的撞击效果不同。因此动量是描述物体运动状态的一个状态参量。我们以前说的“力是改变物体运动状态的原因”，运动状态指的就是动量。

若将质量 m 视作不变，上式可写为

$$\vec{F}=m\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=m\vec{a}$$

由上式知，当以相等的力 $\vec{F}$ 施加于两个物体，分别测定它们相对于惯性参考系的加速度 $\vec{a}_1$ 与 $\vec{a}_2$，可得 $a_1:a_2=m_2:m_1=$常数。这个常数与力 F 无关，它当然是物体的某种本性的反映。这个本性就是物体加速的难易程度，即惯性的大小。因此，m 可称为惯性质量，这是物质质量的力学属性。相比之下，将质量定义成物体含有物质的多少，说的就是物体质的存在属性。

在直角坐标系中：　$\vec{F}=m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\vec{i}+m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\vec{j}+m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\vec{k}$

在自然坐标系中：　$\vec{F}=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\vec{\tau}+m\frac{v^2}{\rho}\vec{n}$