21世纪高等学校应用型规划教材

大学物理基础

第二版

曹贺鑫　王敬修　主编

化学工业出版社

21 世纪高等学校应用型规划教材

大学物理基础

第二版

曹贺鑫 王敬修 主编

化学工业出版社

·北京·

为了适应应用型院校的教学要求，根据教育部制订的“理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求”，遵循“以应用为目的”、“以必需、够用为度”的原则，并注意与高中物理课程改革相协调，编写《大学物理基础》一书。

本书内容包含有力学、热学、电磁学、波动学、近代物理基础。对内容阐述详细，说理透彻，富有启发性，并有典型例题分析使学生充分理解物理概念、内容、方法。因而有利于培养大学生分析问题和解决问题的能力。建议教学时数为80学时左右。

本书可作为工科类高校、职业技术学院、职工大学、函授大学的教材或教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理基础/曹贺鑫，王敬修主编. —2版. —北京：化学工业出版社，2012
21世纪高等学校应用型规划教材
ISBN 978-7-122-13246-8

Ⅰ. 大…　Ⅱ. ①曹…②王…　Ⅲ. 物理学-高等学校-教材　Ⅳ. O4

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第005277号

责任编辑：唐旭华　叶晶磊　　装帧设计：尹琳琳
责任校对：吴　静

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：化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm　1/16　印张12¾　字数312千字　　2012年2月北京第2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：26.00元　

《大学物理基础（第二版）》编写人员

主　　编　曹贺鑫　王敬修

副 主 编　张亚民　王春霞

编写人员（以姓氏笔画为序）

马惠宁　王春霞　王敬修　牛铁良　张亚民

杨　健　黄志强　黄英华　曹贺鑫

前　言

物理学是自然科学的基础，其研究对象是物质世界的基本形态，其研究范围涵盖了物质世界的所有层次。因此，由物理学而衍生了诸多的子学科，如激光物理、天体物理、材料物理等，这些学科现已经成为独立的研究方向。在过去的 100 多年里，物理学对人类科技的发展做出了巨大的贡献。为了纪念物理学对人类所做出的伟大贡献，联合国将 2005 年命名为"国际物理年"，这是联合国历史上第一次以单一学科命名的国际年。大学物理是一门为高等学校理工科各专业学生开设的公共基础课，旨在指导学生学习和掌握必要的物理学知识，帮助学生成长为训练有素的科学工作者和工程技术人员。

本书是按照教育部指定的"理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求"，遵循"以应用为目的"的原则，以培养学生的物理思想为重点，介绍物理学中的几大理论体系，为专业课程的学习打好基础。全书共分五篇，分别介绍力学、热学、电磁学、波动学和近代物理学，其内容简练，重点突出，概念清楚，注重应用，注意与高中知识相协调。本书第一版受到了诸多使用者的好评，为了更好地满足广大读者的需要，编者对原书做了修订，保留了原教材的知识结构和叙述风格，调整合并了一些章节的内容，对知识点的介绍更加连贯自然，习题更加精炼，考核知识点更加突出，使教材的知识体系更加紧凑，习题难度更加适宜教材要求，同时在部分章节后增加了科学家简介。

本书在力求内容精炼的同时，保证了内容涵盖普通物理的经典基础理论，增加了知识的实用性。本书适合 60～80 学时的教学要求，可作为高校少学时本科、专科及成人教育的大学物理教材。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编者
2011 年 11 月

目　　录

第三篇 电 磁 学

第四篇　波　动　学

第五篇　近代物理基础

预备知识　矢　　量

一、标量和矢量

在基础物理学中，物理量可以分成标量和矢量两类，一类是标量物理量（简称标量），如面积、体积、质量、时间、温度、能量、电量等，它们遵循通常的代数运算法则；另一类是矢量物理量（简称矢量），如位移、速度、加速度、动量、力、电场强度等，它们既有大小，又有方向，遵循矢量代数运算法则。

矢量通常用黑体字 **A** 或带有箭头的字母 $\overrightarrow{ab}$ 表示。在作图时，常用有向线段表示（如图 0-1 所示）。线段的长短按一定比例表示矢量大小；箭头的指向表示矢量的方向。

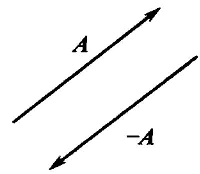

图 0-1　矢量的图像表示

矢量的大小称为矢量的模或绝对值，矢量 **A** 的模可表示为 $A=|\boldsymbol{A}|=|\overrightarrow{ab}|$。

一个矢量亦可以用单位矢量的方法表示矢量。设矢量 **A** 的单位矢量为 $\boldsymbol{A}^0$，它的指向与 **A** 相同，其模为 1，即 $|\boldsymbol{A}^0|=1$。于是 **A** 可写成

$$\boldsymbol{A}=A\boldsymbol{A}^0$$

二、矢量的合成几何法

1. 矢量的合成

把两个或多个矢量相加，称矢量的合成。矢量合成的几何方法有两种：平行四边形法和三角形法。

（1）平行四边形法

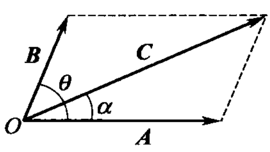

图 0-2　矢量加法

把两个相加的矢量 **A** 和 **B** 平移到空间一点 O，以这两个矢量为邻边做平行四边形，则平行四边形的对角线就是 **A**、**B** 的合矢量 **C**，如图 0-2 所示。

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}$$

合矢量 **C** 的大小，可由余弦定理算出，设 **A**、**B** 的夹角为 θ，则

$$C=|\boldsymbol{C}|=\sqrt{A^2+B^2+2AB\cos\theta}$$

C 的方向可以用它与 **A** 的夹角 α 表示

$$\tan\alpha=\frac{B\sin\theta}{A+B\cos\theta}$$

（2）三角形法

矢量合成的三角形法，如图 0-3 所示。

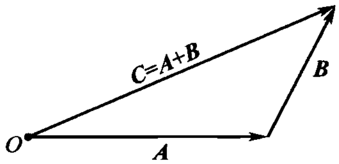

图 0-3 矢量加法三角形法

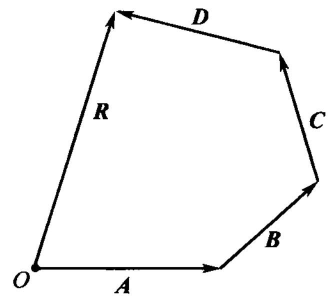

图 0-4 求合矢量多边形封闭边法

把矢量 **B** 平移，使 **B** 的“起点”与 **A** 的“终点”相接，则从 **A** 的“起点”引向 **B** 的“终点”的矢量就是合矢量 **C**。

用三角形法求多个矢量的合矢量比较方便。把相加的矢量逐个平移，使它们起点、终点相接，则从第一个矢量的起点引向最后一个矢量的终点的矢量就是合矢量 **R**(如图 0-4 所示)。即

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}$$

2. 矢量相减

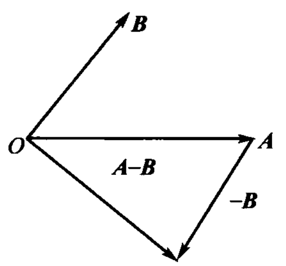

图 0-5 矢量减法

矢量减法可用负矢量变换成矢量相加，矢量 **C** 为矢量 **A** 与 **B** 之差，即

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}+(-\boldsymbol{B})$$

如图 0-5 所示。

三、矢量合成的解析法

1. 矢量在直角坐标轴上的分矢量和分量

如图 0-6 所示，一矢量 **A** 在直角坐标系中，那么它在 x、y、z 轴上的分矢量分别为 $\boldsymbol{A}_x$、$\boldsymbol{A}_y$、$\boldsymbol{A}_z$，于是有

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}_x+\boldsymbol{A}_y+\boldsymbol{A}_z$$

另外，矢量 **A** 在 x、y、z 轴的分量（即投影）分别为 A_x、A_y、A_z，如以 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别表示 x、y 和 z 轴上的单位矢量，则有

$$\boldsymbol{A}=A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k}$$

矢量 **A** 的模为

$$A=\sqrt{A_x^2+A_y^2+A_z^2}$$

A 的方向由矢量 **A** 与 x、y、z 轴的夹角 α、β 和 γ 来确定

$$\cos\alpha=\frac{A_x}{A},\qquad \cos\beta=\frac{A_y}{A},\qquad \cos\gamma=\frac{A_z}{A}$$

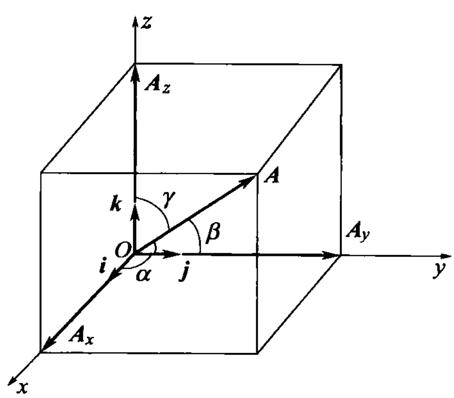

图 0-6 矢量 **A** 在直角坐标轴上分量

2. 矢量合成的解析法

矢量运算的解析法是先把各个矢量进行正交分解，然后用它们的分量进行运算。

【例】 已知 **A**、**B** 二矢量，在直角坐标系中分解：

$$A = A_x i + A_y j + A_z k$$
$$B = B_x i + B_y j + B_z k$$

求合矢量 $C=A+B$。

解　$C=A+B=(A_x+B_x)i+(A_y+B_y)j+(A_z+B_z)k=C_x i+C_y j+C_z k$

由此得

$$C_x=A_x+B_x;\ C_y=A_y+B_y;\ C_z=A_z+B_z$$

合矢量 C 的大小为

$$C=\sqrt{C_x^2+C_y^2+C_z^2}=\sqrt{(A_x+B_x)^2+(A_y+B_y)^2+(A_z+B_z)^2}$$

方向　$\cos\alpha=\frac{C_x}{C}$；$\cos\beta=\frac{C_y}{C}$；$\cos\gamma=\frac{C_z}{C}$。

3. 矢量相减的解析法

两个矢量 A、B 的差为

$$C=A-B=(A_x-B_x)i+(A_y-B_y)j+(A_z-B_z)k$$

四、矢量的乘法

在物理学中，经常遇到矢量的乘积。第一种是数乘矢量，第二种是矢量与矢量的点积（点乘），第三种是矢量与矢量的矢积（叉积叉乘）。

1. 矢量与标量相乘

设矢量 A 与一个标量 m 相乘，得到矢量 L，

$$L=mA$$

例如牛顿定律 $F=ma$、电场力 $F=qE$，都是矢量与标量的乘积。L 的大小，即 $L=|mA|$。方向：当 $m>0$ 时，L 与 A 同向；当 $m<0$ 时，L 与 A 反向。

2. 矢量的标积

设两矢量 A 和 B 之间的夹角 α 小于 π，矢量 A 和 B 的标积用符号 $A\cdot B$ 表示，并定义

$$A\cdot B=AB\cos\alpha$$

如图 0-7 所示，$A\cdot B$ 也相当于 A 的大小与 B 沿 A 方向分量的乘积。

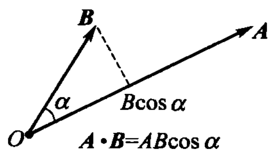

图 0-7　矢量标积

从标积的定义可以得到标积的性质：

① $A\cdot B=AB\cos\alpha=BA\cos\alpha=B\cdot A$　（满足交换律）；

② $(A+B)\cdot C=A\cdot C+B\cdot C$　（满足分配律）。

在平面直角坐标系中，有两个矢量 A 和 B，它们分别为

$$A=A_x i+A_y j+A_z k,\ B=B_x i+B_y j+B_z k$$

利用　$i\cdot i=j\cdot j=k\cdot k=1$；$i\cdot j=j\cdot i=i\cdot k=k\cdot i=k\cdot j=j\cdot k=0$

可得 A、B 的标积为

$$A\cdot B=A_xB_x+A_yB_y+A_zB_z$$

在物理中，力所做的功 $W=F\cdot\Delta r$，它就是力 F 与位移 Δr 的标积。

3. 矢量的矢积

设两矢量 A 与 B 之间小于 180°的夹角为 θ，A 和 B 的矢积用符号 $A\times B$ 表示，并定义它为另一矢量 C，即

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}$$

矢量 $\boldsymbol{C}$ 的大小为

$$C=AB\sin\theta$$

矢量 $\boldsymbol{C}$ 的方向垂直于 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 所在平面，其方向可用右手螺旋法则确定，如图 0-8 所示，当右手四指从 $\boldsymbol{A}$ 经小于 180°的角转向 $\boldsymbol{B}$ 时，右手拇指的指向就是 $\boldsymbol{C}$ 的方向。

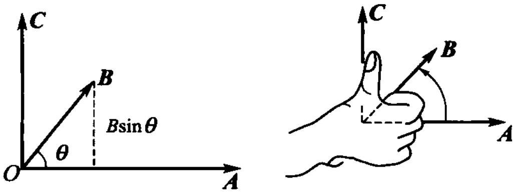

图 0-8 矢量 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的矢积

利用矢积的定义，可以得到矢积具有如下性质：

① $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=-\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}$，不服从交换律；

② $\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}=0$ 或 $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=0$，表示 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 平行；

③ $\boldsymbol{C}\times(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})=\boldsymbol{C}\times\boldsymbol{A}+\boldsymbol{C}\times\boldsymbol{B}$,服从分配律。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}&=(A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k})\times(B_x\boldsymbol{i}+B_y\boldsymbol{j}+B_z\boldsymbol{k})\\&=(A_yB_z-A_zB_y)\boldsymbol{i}+(A_zB_x-A_xB_z)\boldsymbol{j}+(A_xB_y-A_yB_x)\boldsymbol{k}\end{aligned}$$

上式还可写成行列式

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\begin{vmatrix}\boldsymbol{i}&\boldsymbol{j}&\boldsymbol{k}\\A_x&A_y&A_z\\B_x&B_y&B_z\end{vmatrix}$$

在力学中的力矩 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$，角动量 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{P}$，安培力 $\mathrm{d}\boldsymbol{F}=I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B}$ 都是矢量的矢积。

五、矢量的导数

设矢量 $\boldsymbol{A}$ 是时间 t 的函数，则在 Δt 时间间隔内，它的增量为

$$\Delta\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(t+\Delta t)-\boldsymbol{A}(t)$$

当 $\Delta t\to 0$ 时，$\Delta\boldsymbol{A}/\Delta t$ 的极限值为

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{A}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}$$

式中，$\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}$为矢量 $\boldsymbol{A}$ 对时间 t 的导数。

例如速度矢量是位置矢量对时间的导数，$\boldsymbol{v}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$。

矢量对时间的导数可以用解析法表示：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k}]=\frac{\mathrm{d}A_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}A_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}A_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

矢量函数的求导法则：

(1) $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}+\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}$；

(2) $\dfrac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{A})}{\mathrm{d}t}=m\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}$ （m 为常数）；

(3) $\dfrac{\mathrm{d}(\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B})}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}\cdot\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\cdot\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}$；

(4) $\dfrac{\mathrm{d}(\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B})}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}\times\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}+\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}\times\boldsymbol{B}$。

六、矢量的积分

1. 矢量对时间的积分

如果
$$\boldsymbol{A}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}$$
则求 $\boldsymbol{B}$ 时，就需要 $\boldsymbol{A}$ 对时间积分。

例如，已知牛顿第二定律
$$\boldsymbol{F}=\frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t}$$
得
$$\int_{t_1}^{t_2}\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}t=\int_{m\boldsymbol{v}_1}^{m\boldsymbol{v}_2}\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})=m\boldsymbol{v}_2-m\boldsymbol{v}_1$$
表示力对时间的积累等于该质点的动量的增大。

2. 矢量对空间的积分

(1) 矢量的一般线积分为
$$\int\boldsymbol{A}\mathrm{d}l$$

例如，在静电学中，带电体是线分布，求空间某一点的电场强度为
$$\boldsymbol{E}=\int_L\frac{\lambda\boldsymbol{r}\mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^3}=\int\frac{\lambda x}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\mathrm{d}l\boldsymbol{i}+\int\frac{\lambda y}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\mathrm{d}l\boldsymbol{j}+\int\frac{\lambda z}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\mathrm{d}l\boldsymbol{k}$$

(2) 矢量的标积线积分
$$\int\boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int A_x\mathrm{d}x+\int A_y\mathrm{d}y+\int A_z\mathrm{d}z$$

例如，力所做的功是力对位移的标积线积分
$$W=\int\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$
积分路径沿质点的轨道。

(3) 矢量的矢积分
$$\int\boldsymbol{A}\times\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

例如，电磁学中的安培力
$$\boldsymbol{F}=\int I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B}$$

线电流元在空间产生的磁感应强度
$$\boldsymbol{B}=\int\frac{\mu I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}}{4\pi r^3}$$

第一篇　力　　学

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质运动最基本最普遍的形式（包括机械运动、热运动、电磁运动、微观粒子运动等）及其相互转化规律的科学。物体之间或同一物体各部分之间相对位置的变动称为机械运动。物理学中讨论机械运动的规律及其应用的科学称为力学。

第一章　质点运动学

本章主要讨论质点运动学，其主要内容为描述质点运动的基本量有位置矢量、位移、速度和加速度、切向加速度、法向加速度、相对运动等。总之，研究物体的位置随时间而变的规律称运动学。

第一节　参照系　质点

1. 参照系

自然界中所有的物体都处在不停地运动，绝对静止不动的物体是没有的。当我们观察一个物体的位置及位置的变化时，总要选取其他物体作为标准，选取的标准物不同，对物体运动情况的描述也就不同，这就是运动描述的相对性。

运动的相对性，在日常生活中常常可以体会到。例如，骑自行车在马路上行驶时觉得逆风，等到回来时往往觉得还是逆风。这并不是因为风向改变了。这只不过是：以行驶中的自行车为参照系，将自行车当作“静止”的，则所有物体具有向后的速度（路旁房屋、树木都向后闪过），空气同样参与这种相对于自行车的向后运动，这就使骑车人常常感受到逆风。

为描述物体的运动而选的标准物叫做参照系。参照系的选择是任意的，而选择不同的参照系，以同一物体运动情况的描述是不同的。例如竖直落下的雨点，在行驶着的火车车窗上留下的痕迹并不竖直，而向后倾斜，这也是因为雨滴具有相对于火车的向后速度。因此，描述物体运动情况时，必须指明对什么参照系而言的。在讨论地面附近物体的运动时，通常选地面作为参照系。

2. 质点

如果物体的大小远远小于所研究的问题中的有关距离，问题又不涉及物体的转动，就可以忽略实际物体的体积，用一个没有体积大小，因而也谈不上有什么形状的“点”来代替实际物体。但在物体的机械运动中，质量起很重要的作用，因此这个“点”还应该保留有质量。这就是质点。这将使所研究的问题大大简化。所以说，质点是力学中一个极其重要的理想模型。

例如，研究地球绕太阳的运行而不涉及地球的自转时，由于地球的半径远远小于太阳到地球的距离，完全可以将地球这个庞然大物当作质点。又例如研究传动机构时涉及转动，这时哪怕是最小的齿轮也不能当作质点。

应当指出，把物体视为质点这种抽象的研究方法，在实践上和理论上都是有重要意义的。当所研究的运动物体不能视为质点时，可把整个物体看成是由许多质点所组成。所以，研究质点的运动是研究物体运动的基础。

第二节　描述质点运动的基本量

一、位置矢量　运动方程

1. 位置矢量

在参照系选定之后，为了定量地描述质点的位置，有时需在参照系上选择一个坐标系。如图 1-1 所示的平面直角坐标系中，在时刻 t、质点 P 在坐标系里的位置可用位置矢量 $\boldsymbol{r}(t)$ 来表示。位置矢量简称位矢，它是一个有向线段，其始端位于坐标系的原点 O，终端则与质点 P 在时刻 t 的位置相重合。由图 1-1 可知，位矢 $\boldsymbol{r}$ 在 Ox 轴、Oy 轴上的投影分别为 x、y。所以，质点 P 在 Oxy 的直角坐标系中的位置，既可用位矢 $\boldsymbol{r}$ 来表示，也可用坐标 x、y 来表示。如取 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 分别为沿 Ox 轴、Oy 轴的单位矢量，则位移可表示为

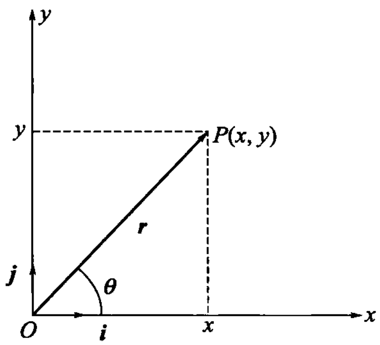

图 1-1　位置矢量

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}\,(\mathrm{m})$$

其值为

$$|\boldsymbol{r}|=\sqrt{x^2+y^2}$$

位移 $\boldsymbol{r}$ 的方向确定，为

$$\tan\theta=\frac{y}{x}$$

2. 运动方程

当质点运动时，它相对坐标原点 O 的位矢量随时间而变化，因此，$\boldsymbol{r}$ 是时间的函数，即

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}\ (\mathrm{m})$$

此式叫做质点的运动方程。若将 $x(t)$、$y(t)$ 在 Ox 轴、Oy 轴的分量，从中消去参数 t，便得到了质点运动的轨道方程。

【例 1】 已知一物体作斜抛运动，其位矢

$$\boldsymbol{r}=v_0\cos\theta_0\cdot t\,\boldsymbol{i}+(v_0\sin\theta_0\cdot t-\frac{1}{2}gt^2)\boldsymbol{j}$$

求轨道方程。

解　$x=v_0\cos\theta_0\cdot t$，$y=v_0\sin\theta_0\cdot t-\frac{1}{2}gt^2$

消去时间 t，有

$$y=x\tan\theta_0-\frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta_0}x^2$$

这就是斜抛物体的轨道方程。