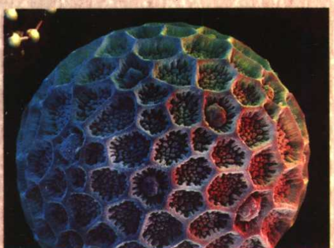
大学物理

朱苍磬 主编



UNIVERSITY PHYSICS
UNIVERSITY PHYSICS
UNIVERSITY PHYSICS

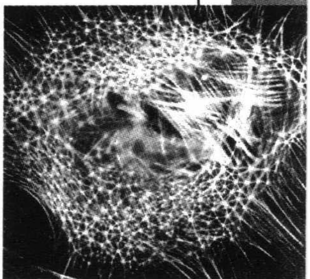
I

湖北科学技术出版社

大学物理 I

UNIVERSITY PHYSICS

主编　朱苍磬
编者　朱苍磬　周卓焮
　　　高国勋　汤钧民
(以所编内容先后为序)



湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/朱苍磬主编 .—武汉:湖北科学技术出版社,1998.1(2000.7 重印)

ISBN 7-5352-2042-8

Ⅰ.大… Ⅱ.朱… Ⅲ.物理学-高等学校-教材 Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 35141 号

大学物理 Ⅰ © 朱苍磬 主编

责任编辑:杨小复 王连弟 封面设计:戴 旻

出版发行:湖北科学技术出版社 电话:86782508
地 址:武汉市武昌黄鹂路 75 号 邮编:430077

印 刷:华中理工大学印刷厂 邮编:430074

787mm × 1092mm 32 开 8.5 印张 191 千字
1998 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 3 次印刷

印数:11 601 - 17 600
ISBN 7 - 5352 - 2042 - 8/N·36 定价:36.00 元(套)

前 言

《大学物理》是为高等学校工科大学物理课程编写的教科书。本书是在华中理工大学物理系 1992 年 3 月编写的《大学物理》讲义的基础上修订出版的。书中包含了国家教委委托工科物理课程教学指导委员会(小组)制订的、并经国家教委批准印发从 1987 年秋季试行的《大学物理课程教学基本要求》的全部内容,并略有扩充。近年来,又按教学指导委员会发出的《重点高等学校大学物理课程教学改革指南》的精神,加强了近代和现代物理方面的内容,增添了相应的专题。

本书注意加强基础、精选内容。广度和深度适中。学生在有限的学时内可以学到物理学的基本知识和方法,为学习专业课程和掌握近代科学技术打下基础。

全书分为 3 册。第 1 册有第 1 篇力学,第 2 篇热学。第 2 册有第 3 篇电磁学,现代物理专题。第 3 册有第 4 篇振动与波动,第 5 篇波动光学,第 6 篇量子物理学基础。

参加本书编写工作的教师有(以所编内容先后为序):朱苍磬(第 1、2 章),周卓嫩(第 3、4 章),高国勋(第 5、6 章),汤钧民(第 7、8 章),邓顺蓉(第 9、10、11 章),孙威娜(第 12、13、14 章),易丽莎(第 15、16、17 章),张文华(第 18、19、20 章),黄伯坚(第 21、22、23 章),王瑞西(第 24、25、26、27 章)。现代物理专题中,广义相对论由高国勋编写,等离子体由孙威娜编写,超导、粒子物理由邓顺蓉编写,混沌与分形、信息光学由易丽莎编写。

书中若有错误或不足之处,热诚欢迎读者批评指正。

编　者

1997 年 4 月

目　　录

第1篇　力学

第 2 篇　热学

第1篇　力学

第1章　质点运动学

第1节　参照系　质点

一、机械运动

自然界中的一切物质都处在永恒不息的运动变化之中，宇宙万物，大至日月星辰，小至分子、原子莫不如此. 物体的位置变动称为机械运动. 例如，地球的公转，河水的流动，机器的运转，禽鸟的飞翔等等都是机械运动. 机械运动是最简单、最基本的运动形式，它包含在所有其他更复杂、更高级的运动形式，如电磁运动、化学变化、生命过程等之中.

研究机械运动的学科称为力学. 力学可以分为运动学和动力学. 运动学只讨论怎样描述机械运动，而不涉及引起运动变化的原因. 动力学研究物体间的相互作用对机械运动的影响.

二、参照系

任何物质都在永不停息地运动着. 物质和运动是不可分的. 世界上没有不运动的物质，也没有无物质的运动. 诚如恩格斯所说："运动是物质的存在形式，是物质的固有属性."从这个意义上讲，运动是绝对的. 虽然如此，但对机械运动的描述却又是相对的. 譬如，在飞驰的火车车厢里有一位安睡的旅客，在车中的列车员看来，旅客相对于车厢是静止的；而在铁路旁的农民看

来，旅客却是相对于地面迅速运动的．又如在行驶的车中自由下落的物体，在车外看来却作平抛运动．可见，以不同的物体做参考，对同一物体的机械运动可以作出不同的描述，这就是机械运动描述的相对性．

由上面的讨论可知，说一个物体静止或运动，以及作怎样的运动，必定是相对于另外一个确定的物体而言的．为了描述一个物体的机械运动而被选来作为参考的其他物体称为参照系．在上面的讨论中，车厢和地面就是参照系．

在力学中参照系的选择是一个非常重要的问题．在描述物体的机械运动之前，必须预先选好参照系．在运动学中，参照系的选择以对问题的研究方便为准．选择恰当可使问题易于解决．在一般工程技术中大多以地面为参照系．

选择好参照系，还只能对物体的机械运动作定性描述．为了定量地描述物体的机械运动，还必须建立与所选参照系相联系的坐标系．常用的坐标系有直角坐标系、球面坐标系、柱面坐标系等．虽然坐标系与参照系有联系，但却不应将二者混同．参照系是实物，而坐标系是参照系的数学抽象．

三、质点

有质量而无大小和形状的点称为质点．质点是从实际物体抽象出来的理想模型，它在客观世界中是不存在的．虽然如此，可是建立质点这个理想模型仍有重大意义．在许多力学问题中，物体的大小和形状所起的作用很小，忽略它们有助于简化问题，突出主要矛盾，查明运动的基本情况．事物是广泛联系的，任何一个物体的运动都要受到其他许多物体的影响．如果我们不分主次地、一无遗漏地考虑影响运动的全部因素，那么，尽管殚思极虑，力求精确，但终必事与愿违，一事无成．建立理想模型是科学研究中经常应用并行之有效的方法．理想模型绝非主观臆造，

它是在对实际问题进行科学分析的基础上建立起来的．以后我们还会陆续介绍一些理想模型，如刚体、理想气体、点电荷、点光源等等．

一个真实物体能否看作质点并不在于物体体积的大小，而是取决于这物体的线度在运动中所起的作用，只是当作用很小时才能视为质点．地球虽大，但在研究其公转时，由于地球直径仅及日地距离的万分之一，地球上各点相对于太阳的运动差别不大，所以可把地球当作质点．然而小如乒乓球，当探讨其各种旋转打法时，却不能视为质点．

同一物体是否可以看成质点不是一成不变的，这决定于问题的性质．当运动员进行百米赛跑时，人们所关注的是他们跑完这段距离所经历的时间，而运动员的高矮胖瘦并不为观众注意，这时人们已不自觉地把运动员当作质点看待了．然而在观赏艺术体操时，运动员的一举手，一投足，无不给人以美的感受．显然，这时任何一名观众都是不会对运动员的形体美和姿态美漠然视之的．

第2节　位置矢量　位移

一、位置矢量

为了表示质点的位置，应该预先选好参照系，并在参照系上建立坐标系．图 1-2-1 表示一个直角坐标系．设在时刻 t 有一质点位于 P 点，其位置可用从坐标原点 o 引到 P 点的有向线段 $\boldsymbol{r}=\overrightarrow{oP}$ 表示，它称为位置矢量（简称位矢）．P 点的位置也可用坐标 x,y,z 表示．因此位置矢量可写为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \tag{1-2-1}$$

式中 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别是沿 X、Y、Z 三个坐标轴的单位矢量．位置矢量的大小和方向余弦分别为

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

$$\cos\alpha = \frac{x}{r},$$

$$\cos\beta = \frac{y}{r}, \tag{1-2-3}$$

$$\cos\gamma = \frac{z}{r}$$

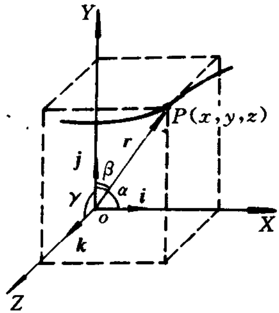


图 1-2-1　位置矢量

二、运动方程和轨迹方程

运动质点的位置是随时间变化的. 这时,质点的位置矢量和坐标是时间的函数,即

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \tag{1-2-4}$$

这称为运动方程,其分量式为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \tag{1-2-5}$$

从(1-2-5)式中消去 t,可得运动质点的轨迹方程. 例如,已知质点的运动方程为

$$x = 4\sin\frac{\pi}{3}t, y = 4\cos\frac{\pi}{3}t, z = 0$$

上式中时间的单位是秒,坐标的单位是米,则轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = 16, z = 0$$

它表示质点在 XY 平面内作以原点为中心、半径为 4m 的圆周运动. (1-2-5)式也称为轨迹的参数方程(参数为 t).

三、位移

设质点作曲线运动(图 1-2-2),在时刻 t 质点位于 A 点,在后一时刻 $t+\Delta t$ 质点位于 B 点,在这段时间 Δt 内质点的位置变化可用矢量

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \tag{1-2-6}$$

表示，称为质点的位移. 位移既能反映质点移动的远近，又能表示质点移动的方向. 位移遵从矢量相加的平行四边形法则.

位移可用直角坐标表示为

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{r} &= (\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A) = (x_B \boldsymbol{i} + y_B \boldsymbol{j} + z_B \boldsymbol{k}) - (x_A \boldsymbol{i} + y_A \boldsymbol{j} + z_A \boldsymbol{k}) \\ &= (x_B - x_A)\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\boldsymbol{j} + (z_B - z_A)\boldsymbol{k} \\ &= \Delta x \boldsymbol{i} + \Delta y \boldsymbol{j} + \Delta z \boldsymbol{k} \qquad (1\text{-}2\text{-}7)\end{aligned}$$

需要指出，位移的大小应该记为 $|\Delta \boldsymbol{r}|$，不能写成 Δr. 由图 1-2-2 可以看出，$|\Delta \boldsymbol{r}| = AB$，而 $\Delta r = r_B - r_A = CB$，二者一般不等. 上述说明适用于任何矢量的增量的模.

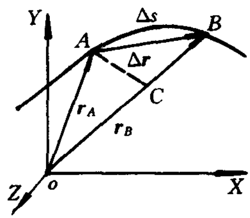


图 1-2-2 位移

位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 表示在一段时间内质点的位置变化，它与质点经历的路程 Δs 不同. 位移是矢量，路程是标量；而且位移的大小与路程一般不等，例如质点沿圆周绕行一圈回到起点，相应的位移等于零，而路程等于圆周长.

第 3 节　速度　加速度

一、速度

研究质点的运动，不仅要知道质点在各个时刻的位置，而且要知道质点运动的快慢和方向. 设在时刻 t 到 $t+\Delta t$ 这段时间内，质点从 A 点运动到 B 点（图 1-2-2）. 质点运动的大致快慢和方向可用质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和相应时间 Δt 的比表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \qquad (1\text{-}3\text{-}1)$$

这称为质点在时间 Δt 内的平均速度.

平均速度只能粗略地描写质点的运动. 然而，时间间隔 Δt

越短，运动的变化越小，平均速度越接近于质点在时刻 t（或位置 A）的运动状态. 如果使 Δt 趋近零，那么平均速度的极限就能精确地描写质点在时刻 t（或位置 A）运动的快慢和方向了. 因此，我们把 Δt 趋近于零时平均速度的极限定义为质点在时刻 t（或位置 A）的瞬时速度（简称速度），即

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-3-2}$$

速度是位置矢量对时间的一阶微商. 这样就给出了最基本的运动学量——速度的严格定义.

由定义可知，瞬时速度 $\boldsymbol{v}$ 是矢量. 由于 Δt 是标量，所以 $\boldsymbol{v}$ 的方向沿着 Δt 趋近零时 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向，即运动轨迹的切线方向（图 1-3-1）.

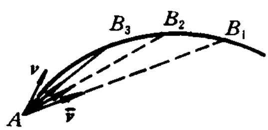


图 1-3-1 瞬时速度

速度的常用单位是米·秒$^{-1}$（$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$），千米·小时$^{-1}$（$\mathrm{km \cdot h^{-1}}$），厘米·秒$^{-1}$（$\mathrm{cm \cdot s^{-1}}$）.

在直角坐标系中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \\ &= v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \end{aligned} \tag{1-3-3}$$

式中 $$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, v_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \tag{1-3-4}$$

是速度在三个坐标轴上的分量. 速度的大小和方向余弦为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{1-3-5}$$

$$\cos\alpha = \frac{v_x}{v}, \cos\beta = \frac{v_y}{v}, \cos\gamma = \frac{v_z}{v} \tag{1-3-6}$$

二、速率

为了描写质点运动的快慢，人们还建立了速率这个物理量.

质点通过的路程 Δs 与所用时间之比称为平均速率，即

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-3-7}$$

Δt 趋近于零时平均速率的极限称为瞬时速率(简称速率)，即

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \tag{1-3-8}$$

瞬时速率是路程对时间的一阶微商.

由于 $\Delta t\to 0$ 时，$|\Delta \boldsymbol{r}|\to\Delta s$(图 1-2-2)，所以速度的大小

$$|\boldsymbol{v}|=\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right|=\left|\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}\right|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$$

即瞬时速度的大小等于瞬时速率. 速率的单位和速度的单位相同.

[**例题 1-1**] 一质点沿 X 轴运动，其运动方程为 $x=5t^2+1$，式中坐标 x 的单位是米(m)，时间 t 的单位是秒(s). 计算质点在下列各时间间隔内平均速度的大小：2s 到 3s；2s 到 2.1s；2s 到 2.001s；2s 到 2.00001s，以及在 2s 时瞬时速度的大小.

[**解**] 按定义 $\bar{v}=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ 求出各时间间隔内平均速度的大小，列表如下，表中 t_0 和 t 分别表示运动的初时刻和末时刻，x_0 和 x 分别表示质点的初位置和末位置.

t_0(s)	t(s)	Δt(s)	x_0(m)	x(m)	Δx(m)	$\bar{v}$(m·s^{-1})
2	3	1	21	46	25	25
	2.1	0.1		23.05	2.05	20.5
	2.001	0.001		21.020 005	0.020 005	20.005
	2.000 01	0.000 01		21.000 200 000 5	0.000 200 000 5	20.000 05

2s 时瞬时速度的大小为

$$v\Big|_{t=2}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\Big|_{t=2}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(5t^2+1)\Big|_{t=2}=10t\Big|_{t=2}=20\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$$

从上面的计算可以看出，随着时间间隔 Δt 的缩短，平均速

度 $\bar{v}$ 逐渐趋近于一个确定的极限，这个极限就是 2 秒时的瞬时速度 v.

三、由速度求位置矢量　匀速运动

如果已知质点的速度随时间变化的函数关系 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t)$，那么用积分法可以求出质点在任一时刻的位置矢量. 由 $\boldsymbol{v}=\mathrm{d}\boldsymbol{r}/\mathrm{d}t$ 得

$$\int_{r_0}^{r}\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{v}\mathrm{d}t$$

即

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{v}\mathrm{d}t \tag{1-3-9}$$

式中 $\boldsymbol{r}_0$ 和 $\boldsymbol{r}$ 分别是质点在时刻 t_0 和 t 的位置矢量.

当质点作匀速运动时，$\boldsymbol{v}$＝常量，则由(1-3-9)式得

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{v}(t-t_0) \tag{1-3-10}$$

上式在直角坐标系中的分量式为

$$\left.\begin{aligned}x&=x_0+v_x(t-t_0)\\y&=y_0+v_y(t-t_0)\\z&=z_0+v_z(t-t_0)\end{aligned}\right\} \tag{1-3-11}$$

式中 x_0、y_0、z_0 和 x、y、z 分别是质点在时刻 t_0 和 t 的坐标. 当质点沿 X 轴作匀速直线运动时，只需应用(1-3-11)式中的第一式.

四、加速度

质点的速度一般是随时间变化的. 为了描述速度的变化，我们建立加速度这个物理量. 如图 1-3-2 所示，一运动质点在时刻 t 位于 A 点，速度为 $\boldsymbol{v}_A$，到时刻 $t+\Delta t$ 移到 B 点，速度为 $\boldsymbol{v}_B$. 质点速度的增量 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$ 与相应的时间 Δt 之比称为平均加速度，即

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} \tag{1-3-12}$$

平均加速度只能粗略地反映速度的变化，为了精确描写速度随

时间的变化,我们把 Δt 趋近于零时平均加速度的极限定义为瞬时加速度(简称加速度),即

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-3-13}$$

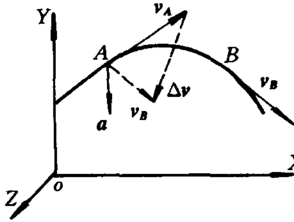


图 1-3-2 加速度

瞬时加速度是速度的一阶微商,是位置矢量的二阶微商. 加速度既反映速度大小的变化,又反映速度方向的变化. 它的常用单位是米·秒$^{-2}$($\mathrm{m\cdot s^{-2}}$)和厘米·秒$^{-2}$($\mathrm{cm\cdot s^{-2}}$).

在直角坐标系中

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}&=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}\\&=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-3-14}$$

其中 $$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t},a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t},a_z=\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} \tag{1-3-15}$$

是加速度在三个坐标轴上的分量.

加速度是矢量,其大小和方向余弦分别为

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2} \tag{1-3-16}$$

$$\cos\alpha=\frac{a_x}{a},\cos\beta=\frac{a_y}{a},\cos\gamma=\frac{a_z}{a} \tag{1-3-17}$$

在曲线运动中加速度的方向总是指向轨变的凹侧,这是因为速度的增量 $\Delta\boldsymbol{v}$ 必定指向轨迹凹侧的缘故(图 1-3-2). 当运动加快时,$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成锐角;当运动减慢时,$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成钝角;当运动快慢不变时,$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成直角. 在图 1-3-3 里画出了抛射

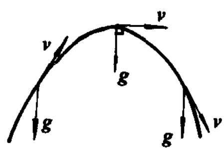


图 1-3-3 g 与 v 的夹角和运动快慢变化的关系

体运动中重力加速度 $\boldsymbol{g}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 的夹角和运动快慢变化的关系. 在直线运动中,当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 方向相同时运动加快,当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 方向相反时运动减慢.

五、由加速度求速度　匀变速运动

如果已知质点的加速度随时间变化的函数关系 $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}(t)$,那么用积分法可以求出质点在任一时刻的速度. 由 $\boldsymbol{a}=\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t$,得

$$\int_{\boldsymbol{v}_0}^{\boldsymbol{v}}\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{a}\mathrm{d}t$$

即

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{a}\mathrm{d}t \tag{1-3-18}$$

式中 $\boldsymbol{v}_0$ 和 $\boldsymbol{v}$ 分别是时刻 t_0 和 t 的速度.

若质点作匀变速运动,即 $\boldsymbol{a}=$常量,则

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{a}(t-t_0) \tag{1-3-19}$$

上式在直角坐标系中的分量式为

$$\left.\begin{aligned} v_x&=v_{ox}+a_x(t-t_0)\\ v_y&=v_{oy}+a_y(t-t_0)\\ v_z&=v_{oz}+a_z(t-t_0)\end{aligned}\right\} \tag{1-3-20}$$

由(1-3-19)式得到一个重要的结论:具有恒定加速度的运动是平面运动. 因为该式表明,质点在任一时刻的速度 $\boldsymbol{v}$ 必在由确定的 $\boldsymbol{v}_0$ 和常量 $\boldsymbol{a}$ 组成的平面内.

将(1-3-19)式代入(1-3-9)式,可得匀变速运动中质点的位置矢量

$$\begin{aligned}\boldsymbol{r}&=\boldsymbol{r}_0+\int_{t_0}^{t}[\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{a}(t-t_0)]\mathrm{d}t\\ &=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{v}_0(t-t_0)+\frac{1}{2}\boldsymbol{a}(t-t_0)^2\end{aligned} \tag{1-3-21}$$

上式在直角坐标系中的分量式为