高等学校教材

大学物理简明教程

第二版

沈临江　蔡永明　周宏宇　编

化学工业出版社
教材出版中心

高 等 学 校 教 材

大学物理简明教程

第 二 版

沈临江　蔡永明　周宏宇　编

化学工业出版社
教 材 出 版 中 心
·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

大学物理简明教程/沈临江，蔡永明，周宏宇编.
2 版.—北京：化学工业出版社，2005.7
高等学校教材
ISBN 7-5025-7258-9

Ⅰ.大…　Ⅱ.①沈…②蔡…③周…　Ⅲ.物理学-高等学校-教材　Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 086731 号

高等学校教材

大学物理简明教程

第 二 版

沈临江　蔡永明　周宏宇　编

责任编辑：唐旭华

责任校对：于志岩

封面设计：于　兵

*

化学工业出版社
教材出版中心
出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029）

购书咨询：（010）64982530

（010）64918013

购书传真：（010）64982630

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm　1/16　印张 16¾　字数 413 千字

2006 年 1 月第 2 版　2006 年 1 月北京第 3 次印刷

ISBN 7-5025-7258-9

定　价：26.00 元

前　　言

本书根据原国家教委颁布的《高等工科院校大学物理课程教学基本要求》，兼顾到当前工科院校的发展状况和学生的实际情况而编写的。在编写过程中，编者汲取了多种同类教材的优点，在学时分配和体系安排上作了调整。

本书内容及体系的选择及确立，既体现了物理学的完整性和系统性，又考虑到以下几个方面。

(1) 减学时而不减内容。这要求本书具有较好的“自学性”。教师在教学中以引导为主，主要培养学生的自学能力。贯彻“教为主导，学为主体”的思想。

(2) 根据目前学生的学习能力及不同专业学生的状况，本书前面部分内容比较易学，可逐渐培养学生对大学物理课程的学习兴趣。为了让学生较全面、完整地了解、掌握物理学的基本内容及思想，本书后半部分内容逐步加强了难度。此时学生建立、养成了良好的自学方法，辅助于书本的引导、教师的指点，对所学内容的理解、掌握应不成问题。

(3) 编者认为，学习物理学最主要的是体会、理解物理学的思想和方法。大学物理课程中的部分内容学生在中学时代有所接触，本书注重介绍运动的瞬时性。同学应充分利用微积分知识来理解、分析运动过程。

本书在编写和修改过程中得到南京工业大学物理教研室同事们的大力帮助，在此致谢！

本书适合作为普通高等院校工科类“少学时”大学物理课程的教材，也可供电大、成教类院校作为大学物理教材使用。

由于编者水平有限，错漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编　者

2005 年 7 月

内 容 提 要

本书是编者在总结十多年大学物理的课堂教学经验基础上，参考原国家教委的《高等工科院校大学物理课程教学基本要求》，结合多年来参加全国及地区性工科物理教学会议所取得的经验，针对一般的工业院校的要求和学生特点而编写的教学用书。适用于课堂教学时数在90学时左右。

本书内容为：质点运动学、牛顿定律、守恒定律、刚体、气体分子运动论、热力学基础、静电场、稳恒电流、电流的磁场及电磁感应、简谐振动、平面简谐波、光的干涉、光的衍射、光的偏振、相对论简介、量子论简介。

本书可作为普通高等工科院校、成人类院校的大学物理教学用书。

目　　录

第一章　质点运动学

第一节　矢量的表示和运算

一、标量和矢量

标量是只有大小（一个数和一个单位）的量。质量、长度、时间、密度、能量和温度等都是标量。矢量是既有大小又有方向的量，并有一定的运算规则。位移、速度、加速度、角速度、力矩、电场强度等都是矢量。而有些量，如电流强度 I 既有大小，也有方向，但遵守的是标量的运算规则，所以也是标量。

矢量用黑体字表示，如力印成 $\boldsymbol{F}$、速度印成 $\boldsymbol{v}$，书写时可用手写体在字头上加一个箭头，如 $\vec{F}$、$\vec{v}$。

二、矢量的表示

1. 矢量的几何表示

用一有方向的线段可表示矢量。线段的长短表示矢量的大小，线段的方向表示矢量的方向。如图 1-1 所示。

在矢量的几何表示中，矢量可以平移，而不改变此矢量的性质。如图 1-2 所示中的两个矢量是相等的。

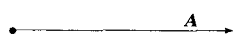

图 1-1　矢量的几何表示

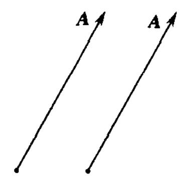

图 1-2　矢量的平移

2. 矢量的解析表示

如图 1-3 所示，在直角坐标系中有一矢量 $\mathbf{A}$，此有向线段的起点在坐标原点 O，终点的坐标为(x,y,z)，则矢量 $\mathbf{A}$ 可表示为

$$\mathbf{A}=(x,y,z)$$

其大小可表示为

$$A=|\mathbf{A}|=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

A 称为矢量的模。

3. 矢量的函数表示

长度为一个单位的矢量称单位矢量。如某矢量 $\mathbf{A}=(x,y,z)$，则在其方向上的单位矢量可表示为

$$\boldsymbol{e}_A=\frac{\mathbf{A}}{|\mathbf{A}|}$$

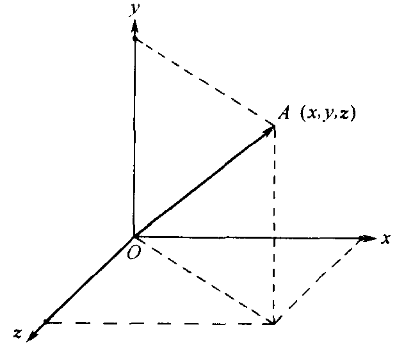

图 1-3　矢量的解析表示

说明 e_A 的矢量其大小为 1，方向与 $\boldsymbol{A}$ 的方向相同。在直角坐标系中，x 轴方向的单位矢量用 $\boldsymbol{i}$ 表示，$\boldsymbol{i}$ 矢量大小为 1，方向在 x 轴正方向。

同理，y 轴方向、z 轴方向的单位矢量可分别表示为 $\boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$。$\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 称为直角坐标系的基本矢量，简称基矢。在直角坐标系中的任一矢量可用与这组基矢相联系的一个矢量函数表示。

$$\boldsymbol{A}=(x,y,z)$$

也可用矢量函数

$$\boldsymbol{A}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}$$

来表示。

同样，在球坐标系、柱坐标系也有一组相应的基矢，在大学物理课程中很少用到，故不列出。

若矢量的端点在直角坐标系中是随时间而变的，即

$$x=x(t)$$
$$y=y(t)$$
$$z=z(t)$$

则矢量可表示为

$$\boldsymbol{A}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}$$

三、矢量的运算规则

1. 矢量的加法

矢量根据平行四边形法则或三角形法则合成，如图 1-4 所示。

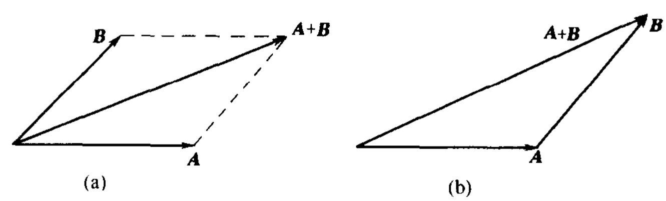

图 1-4　矢量的平行四边形、三角形法则

矢量的加法满足交换律

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

也满足结合律

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

因为 $-\boldsymbol{B}$ 矢量表示大小与 $\boldsymbol{B}$ 矢量的大小一样，方向与 $\boldsymbol{B}$ 矢量的方向相反。所以，矢量的减法可用加法表示，如

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

另外，需要说明的是，利用矢量分析的数学理论可证明，无限小角位移矢量满足矢量的交换律，而有限旋轴的角位移矢量不满足矢量的交换律。

2. 矢量的数乘

一个矢量 $\boldsymbol{A}$ 与一个标量 λ 相乘，表示为

$$\boldsymbol{B}=\lambda\boldsymbol{A}$$

$\boldsymbol{B}$ 矢量表示大小为 $\boldsymbol{A}$ 矢量的 λ 倍，方向与 $\boldsymbol{A}$ 方向相同。若 λ 为负值，则表示方向与 $\boldsymbol{A}$ 反向。

若 $\lambda=0$，则 $\boldsymbol{B}=0$，称为零矢量。零矢量已失去矢量的意义。

矢量的数乘满足

结合律

$$\alpha(\beta\boldsymbol{A})=(\alpha\beta)\boldsymbol{A}$$

分配律

$$(\alpha+\beta)\boldsymbol{A}=\alpha\boldsymbol{A}+\beta\boldsymbol{A}$$

$$\alpha(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})=\alpha\boldsymbol{A}+\alpha\boldsymbol{B}$$

3. 矢量的点积（标积、内积）

两个矢量 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$，其点积表示为

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=AB\cos\theta$$

θ 是两个矢量的夹角。

两矢量的点积为标量。矢量的点积满足

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{A}$$

$$\boldsymbol{A}\cdot(\alpha\boldsymbol{B}+\beta\boldsymbol{C})=\alpha\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}+\beta\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{C}$$

而

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{A}=A^2\cos 0=A^2$$

所以一个矢量的模也可表示为

$$A=\sqrt{\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{A}}$$

如，$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{A}=0$，则表示 $\boldsymbol{A}$ 是零矢量。

但 $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=0$ 则表示：

① $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 中至少有一个是零矢量；或

② $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 矢量垂直，即夹角 $\theta=90°$。

4. 矢量的叉积（矢积、外积）

两矢量的叉积是矢量，两矢量 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 的叉积定义为

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C},\quad \boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}=-\boldsymbol{C}$$

$\boldsymbol{C}$ 是一个矢量，其大小为

$$|\boldsymbol{C}|=AB\sin\theta$$

其方向由右手螺旋法则规定，即从矢量 $\boldsymbol{A}$ 的方向用右手手指经小于 180°的角握向矢量 $\boldsymbol{B}$ 的方向，而此时大拇指的方向为矢量 $\boldsymbol{C}$ 即 $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}$ 的方向。如图 1-5 所示。若用 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{C}$ 三个方向分别表示直角坐标系中的 x,y,z 轴方向，则 x 轴、y 轴、z 轴之间也有这样一个右手法则。事实上，直角坐标系中的三轴也是这样要求的，不能随意画。

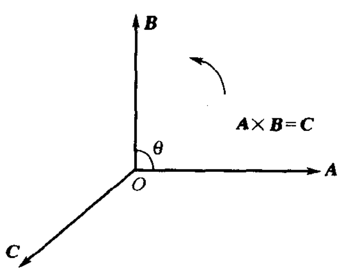

图 1-5 矢量的叉积

例 1-1 力矩 $\boldsymbol{M}$ 是矢量，其定义为

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$$

它的大小为 $r\cdot F\sin\theta$，求 $\boldsymbol{M}$ 的方向。

解：有一力 $\boldsymbol{F}$ 作用在门框边上，方向垂直于门旋转的轴如图 1-6 所示，则此力的力矩方向应在门旋转的轴方向上。

5. 矢量运算的函数表示

① 加法

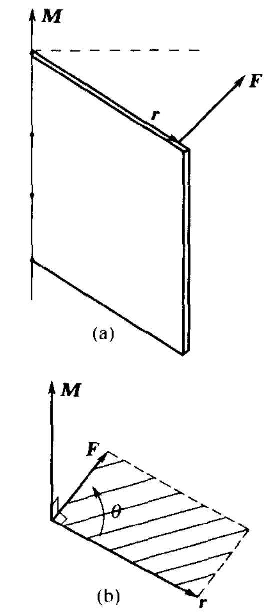

图 1-6　力矩的方向

$$\boldsymbol{A}=x_1\boldsymbol{i}+y_1\boldsymbol{j}+z_1\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{B}=x_2\boldsymbol{i}+y_2\boldsymbol{j}+z_2\boldsymbol{k}$$

则

$$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=(x_1+x_2)\boldsymbol{i}+(y_1+y_2)\boldsymbol{j}+(z_1+z_2)\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}=(x_1-x_2)\boldsymbol{i}+(y_1-y_2)\boldsymbol{j}+(z_1-z_2)\boldsymbol{k}$$

② 数乘

$$\alpha\boldsymbol{A}=\alpha x\boldsymbol{i}+\alpha y\boldsymbol{j}+\alpha z\boldsymbol{k}$$

③ 点积

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}&=(x_1\boldsymbol{i}+y_1\boldsymbol{j}+z_1\boldsymbol{k})\cdot(x_2\boldsymbol{i}+y_2\boldsymbol{j}+z_2\boldsymbol{k})\\&=x_1x_2\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{i}+y_1y_2\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}+z_1z_2\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{k}\\&=x_1x_2+y_1y_2+z_1z_2\end{aligned}$$

其中

$$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{i}=1,\quad \boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}=1,\quad \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{k}=1$$

$$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{j}=\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{k}=\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{k}=0$$

④ 矢量的叉积

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\begin{vmatrix}\boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k}\\ x_1 & y_1 & z_1\\ x_2 & y_2 & z_2\end{vmatrix}$$

其中　$\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}$ 的叉积满足右手螺旋法则，即

$$\boldsymbol{i}\times\boldsymbol{j}=\boldsymbol{k},\ \boldsymbol{j}\times\boldsymbol{k}=\boldsymbol{i},\ \boldsymbol{k}\times\boldsymbol{i}=\boldsymbol{j}$$

第二节　位矢、位移、速度、加速度

一、位矢、位移

物体位置的变化叫做机械运动。若物体运动的范围比物体本身尺寸大得多，研究物体的机械运动时，往往可以不考虑物体的大小，把物体当作一个点。这样的理想模型叫做质点。物体作机械运动时，若其体内任意一条直线在运动中始终保持与自身平行，此物体的机械运动叫做平动，平动物体中任意一点的运动状态都是完全相同的，所以平动物体的运动范围即使不比物体本身尺寸大，平动物体也可视为质点。

一个物体动不动？向前动还是向后动？是向上动还是向下动？都需要一个参照物才能说清楚。例如人坐在行驶的列车上，相对于车厢人是不动的，相对于地面人是向前方运动的，相对于超前的另外一辆快车人是向后运动的，描述质点运动的参考对象叫做参照物或参照系。就这一点说，机械运动是相对的。但是所有的物质都是在运动的，没有物质是不动的，地球在动，太阳在动，银河系也在动，就这一点说，机械运动是绝对的。这就是机械运动的相对性与绝对性。

表示质点位置的量为位置矢量，简称位矢。位矢是从原点引到质点所在点的有向线段。位矢是矢量，记作 $\boldsymbol{r}$。

例如，图 1-7 中 $\boldsymbol{r}_1$ 和 $\boldsymbol{r}_2$ 分别为质点在 P_1 点和 P_2 点时的位矢，在三维直角坐标系中，位矢为

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

质点运动时，x,y,z 是 t 的函数，因而位矢 $\boldsymbol{r}$ 也是 t 的函数。

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

式(1-2)表示运动质点位置和时间关系，即为质点的运动方程式。

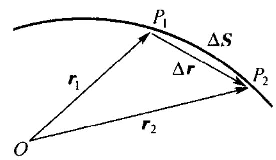

图 1-7　位矢

图 1-7 中质点的起点 P_1 到终点 P_2 的有向线段 P_1P_2 叫做质点的位移。位移是矢量，质点从 P_1 到 P_2 的位移为

$$\Delta \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1 \tag{1-3}$$

图 1-7 中质点从起点 P_1 到终点 P_2 的弧长 $\widehat{P_1P_2}$ 叫做质点的路程，路程是标量，记作 ΔS。

$$\Delta S=\widehat{P_1P_2} \tag{1-4}$$

位移的大小与路程的大小一般也不相等，由图 1-7 可知，位移的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 与路程的大小 ΔS 只有在单向直线运动或极限情况下才相等。当 $\Delta t\to 0$，有 $P_2\to P_1$，此时曲线 P_1P_2 上的弧长与弦长相等。

注意：式(1-3)中，$\boldsymbol{r}_1$ 是一个矢量，$\boldsymbol{r}_2$ 是一个矢量，$\Delta \boldsymbol{r}$ 是另外一个矢量，$\Delta \boldsymbol{r}$ 是两个矢量的差，$\Delta \boldsymbol{r}$ 的大小并不一定是 Δr。

也就是，位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的大小并不是 $|\boldsymbol{r}_2|-|\boldsymbol{r}_1|$。

二、速度

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量，是矢量。对一段有限时间和有限空间可用平均速度来描述运动的快慢，对无限小时间和空间用瞬时速度。

质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和完成这个位移的时间 Δt 之比叫做质点在这段时间 Δt 中的平均速度，记作 $\overline{\boldsymbol{v}}$

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-5}$$

平均速度对质点运动的描述不够细致，因为在这段时间内质点的运动可能有快有慢。也可能改变了方向，用瞬时速度描述质点的运动比较精确细致。质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和时间 Δt 在 $\Delta t\to 0$ 时的比叫做质点的瞬时速度或叫做即时速度，记作 $\boldsymbol{v}$。

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

平均速度与瞬时速度都是矢量，平均速度的方向就是位移的方向(如图 1-7)，瞬时速度的方向在质点运动曲线上各点的切线方向，质点在 P_1 点处时的瞬时速度 $\boldsymbol{v}_1$ 和质点在 P_2 处时的瞬时速度 $\boldsymbol{v}_2$ 分别沿着曲线上 P_1 点和 P_2 的切线方向。

值得注意的是式（1-6）中 $\boldsymbol{v}$ 的方向为 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的方向，而 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 的方向并不一定是 $\boldsymbol{r}$ 的方向。

速度有大小和方向，这两方面只要有一个有了变化，速度就发生了变化。例如竖直落下物体的速度的方向是不变的，大小是改变的，它的速度就是变的；手表秒针针尖绕着轴运动，在任意相等的时间内，针尖经过的弧长的大小都相同，针尖的速度的大小是不变的，但是针尖的运动方向是不停地变的，所以它的速度是变的；手球抛出后，在空中飞行时，球的速度大小和速度的方向都在变，球的飞行速度也是变的，可见三种运动中速度都是变的，学习矢量时很容易忽视矢量方向的变化，请注意这一点。

描述质点运动也常用速率，质点运动的路程 Δs 与时间 Δt 之比叫做质点的平均速率，$\Delta t\to 0$时，这个比叫做质点的瞬时速率。

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

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

速率是标量，速度的大小也不一定与速率相等，只有单向直线运动或 $\Delta t\to 0$ 的极限情况下，

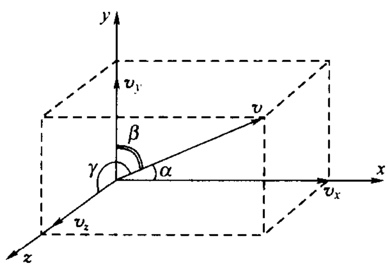

图 1-8 速度的正交分解

速度的大小才等于速率。因此，笼统地说，速度的大小等于速率，或者说速度的大小就是速率都是错误的。

速度和速率的单位在国际实用单位制中用米/秒(m/s)，厘米/秒(cm/s)，千米/小时(km/h) 等。

速度可以沿坐标分解成分速度，图 1-8 表示分速度的大小和方向

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\qquad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\qquad v_z=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$$

$$|\boldsymbol{v}|=v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$$

$\boldsymbol{v}$ 的方向由方向余弦决定

$$\cos\alpha=\frac{v_x}{v},\qquad \cos\beta=\frac{v_y}{v},\qquad \cos\gamma=\frac{v_z}{v}$$

例 1-2 质点运动时，位矢为 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{i}+2t^2\boldsymbol{j}-t\boldsymbol{k}$ (SI)，求

① 质点第 3s 的平均速度；

② 质点在 3s 时的瞬时速度。

解： ①第 3s 是从 2s 到 3s 的一个时间区间

$$t_1=2\mathrm{s},\quad t_2=3\mathrm{s}$$

$$\boldsymbol{r}_1=\boldsymbol{i}+8\boldsymbol{j}-2\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{r}_2=\boldsymbol{i}+18\boldsymbol{j}-3\boldsymbol{k}$$

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{(\boldsymbol{i}+18\boldsymbol{j}-3\boldsymbol{k})-(\boldsymbol{i}+8\boldsymbol{j}-2\boldsymbol{k})}{3-2}=10\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k}$$

$$|\bar{\boldsymbol{v}}|=\bar{v}=\sqrt{10^2+1^2}=\sqrt{101}=10.04\ (\mathrm{m/s})$$

② $\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{i}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{j}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{k}\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=4t\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k}$

$$\boldsymbol{v}(3)=12\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k}$$

$$|\boldsymbol{v}(3)|=\sqrt{12^2+1^2}=\sqrt{145}=12.04\ (\mathrm{m/s})$$

从例 1-2 可见，求平均速度时要先求出两个时刻的位矢函数值 $\boldsymbol{r}_2(t_2)$和 $\boldsymbol{r}_1(t_1)$，再求两者之差 $\Delta\boldsymbol{r}$，然后用 $\boldsymbol{v}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$；求瞬时速度时，先求出$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$，再求$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$在某时刻的值和方向。

三、加速度

加速度是描述变速运动的重要物理量。质点在 Δt 时间内速度由 $\boldsymbol{v}_1$ 变为 $\boldsymbol{v}_2$，速度的增量 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_2-\boldsymbol{v}_1$ 与时间之比叫做质点速度在 Δt 时间内的平均变化率，即平均加速度。平均加速度是矢量，记作 $\bar{\boldsymbol{a}}$。

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}\tag{1-9}$$

在极限情况 $\Delta t\rightarrow 0$ 时，上式变形为

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\rightarrow 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}\tag{1-10}$$

式(1-10)中的 $\boldsymbol{a}$ 是 $\Delta t\rightarrow 0$ 时速度增量 $\Delta\boldsymbol{v}$ 与时间 Δt 比的极限，叫做速度的瞬时变化率，

即瞬时加速度或即时加速度。以上讨论强调加速度是速度对时间的变化率是很重要、很必要的，它强调了加速度是反映速度变化率（大小变化和方向变化）的物理量，加速度并不能表示运动的快慢。一个球静止在地面，踢它一下，在一定时间内，它可能获得很大的速度，它的速度变化很快，它的加速度就大；在此时间内，它也可能获得较小的速度，它的速度变化不快，它的加速度就小；一个沿直线运行的汽车速度很大，如它的速度不变，它的加速度就是零；手表的时针的针尖走得很慢，每 12h 才转一圈，但是它的运动方向沿着圆周的切线不停地改变，它的加速度就不是零。所以应该深刻理解加速度是速度的变化率这层意义。

求平均加速度应先求出两个不同时刻的速度 v_1 与 v_2，再用式(1-9)。求瞬时加速度应先求速度对时间的一阶导数，再求其导数值。利用式(1-6)加速度也可写作

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-11}$$

加速度的单位是米/秒^2，记作 $\mathrm{m/s^2}$，这个单位的意义是速度变化时，速度每秒钟改变多少每秒米，例如加速度 $a=9.8\mathrm{m/s^2}$，9.8 这一个值表示质点的速度大小在每秒钟时间内改变 9.8m/s。

例 1-3　质点运动时，其坐标与时刻的关系为

$$x=1+2t$$
$$y=2+4t+t^2$$

求① 第 2s 的平均加速度；

② 3s 时的瞬时加速度。

解：①质点位矢　$\boldsymbol{r}=(1+2t)\boldsymbol{i}+(2+4t+t^2)\boldsymbol{j}$

质点速度　$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=2\boldsymbol{i}+(4+2t)\boldsymbol{j}$

$$t_1=1\ \mathrm{s},\quad t_2=2\ \mathrm{s}$$

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\boldsymbol{v}(2)-\boldsymbol{v}(1)}{2-1}=\frac{(2\boldsymbol{i}+8\boldsymbol{j})-(2\boldsymbol{i}+6\boldsymbol{j})}{2-1}=2\boldsymbol{j}$$

第 2 秒中质点的平均加速度沿 y 方向，其大小为 $2\mathrm{m/s^2}$。

②　$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=2\boldsymbol{j}$

第 3s 时质点的加速度沿 y 方向，数值为 $2\mathrm{m/s^2}$，即此质点在任何时刻的即时加速度均为 $2\boldsymbol{j}$，这样的运动为匀变速运动。

加速度是矢量，平均加速度的方向为速度增量（$\Delta\boldsymbol{v}$）的方向，瞬时加速度的方向为速度增量（$\Delta\boldsymbol{v}$）的极限方向，这个极限方向将在圆周运动和曲线运动中还要讨论。

例 1-4　质点的位矢为

$$\boldsymbol{r}=R\cos wt\boldsymbol{i}+R\sin wt\boldsymbol{j}$$

求质点的速度和加速度。

解：质点的速度　$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=-Rw\sin wt\boldsymbol{i}+Rw\cos wt\boldsymbol{j}$

质点的加速度　$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$

$$=-Rw^2\cos wt\boldsymbol{i}-Rw^2\sin wt\boldsymbol{j}$$

也可写成　$\boldsymbol{a}=-w^2\ (R\cos wt\boldsymbol{i}+R\sin wt\boldsymbol{j})$

$$=-w^2\boldsymbol{r}$$

说明　$\boldsymbol{a}$ 的方向与 $\boldsymbol{r}$ 的方向始终相反，即 $\boldsymbol{a}$ 是向着圆心的，所以称向心加速度。

第三节　质点运动的一般表示

一、直线运动

直线运动是一维运动，在一维运动中，位矢、位移、速度和加速度这些矢量都可作代数量处理，即选定一个正方向，与这个正方向相同的矢量为正，与之相反的为负。

图 1-9 中 $\boldsymbol{a}_1$，$\boldsymbol{v}_1$，$\Delta\boldsymbol{x}_1$ 与正 x 方向一致 $\boldsymbol{a}_1>0$，$\boldsymbol{v}_1>0$，$\Delta\boldsymbol{x}_1>0$，$\boldsymbol{v}_2$ 与 $\boldsymbol{a}_2$、$\Delta\boldsymbol{x}_2$ 与正 x 方向相反，$\boldsymbol{a}_2<0$，$\boldsymbol{v}_2<0$，$\Delta\boldsymbol{v}_2<0$。一辆汽车经过学校门口时，它的速度 $\boldsymbol{v}$ 可正、可负，若它的行驶方向与你选定的正方向一致，它的速度 $\boldsymbol{v}>0$，若它的行驶方向与你选定的正方向相反，它的速度 $\boldsymbol{v}<0$。因此，在一维运动问题中如果没有确定的坐标或确定的方向，不可妄提正负，物理量上的正负号都是有实际意义的，不能随意添加。

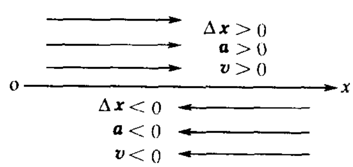

图 1-9　用正负表示矢量方向

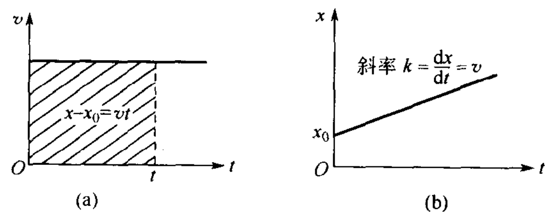

图 1-10　匀速直线运动的速度图线

若质点沿直线运动，在任意相等的时间间隔内经过的位移都相等，这种运动叫做匀速直线运动。匀速直线运动的速度是一个不变的矢量，“不变”指的是速度的大小和方向都不改变。在匀速直线运动的定义中不可省去“任意”和“都”两个词，很多地方会用到“匀”字，如均匀物质、均匀温度、均匀电场、均匀磁场、匀均木棒等定义这些均匀对象时都不可少去“任意”和“都”字，以均匀木棒为例，木棒上任意等长的部分的质量都相等时木棒是均匀的。

匀速直线运动的运动方程为

$$x=vt+x_0 \tag{1-12}$$

图 1-10 是匀速直线运动的速度图线(a)(v-t 图)和运动图线(b)(x-t 图)。

从图 1-10 可看出 x-t 线的斜率就是速度，v-t 图中相应的面积就是质点的位移。

直线运动不一定匀速，见下面例题。

例 1-5　质点沿 x 轴作直线运动，速度 $v=1+t^2+t^4$ (SI)，已知初始条件为 $x(0)=x_0$，求

① 此质点的加速度；

② 运动方程。

解：这类问题不用靠公式，应据基本概念和数学运算练习综合应用能力。

① $a=\dfrac{dv}{dt}=2t+4t^3$

② $v=\dfrac{dx}{dt}$，$dx=vdt$，$x=\int vdt$

$$x=\int(1+t^2+t^4)dt=t+\frac{1}{3}t^3+\frac{1}{5}t^5+c$$