

高等学校教材

大学物理

张国忠 张丹海 主编

中国计量出版社

高等学校教材

大学物理

张厚坤 张厚坤 张厚坤

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理/张国忠, 张丹海主编. —北京: 中国计量出版社,
1995. 8

ISBN 7-5026-0788-9

I. 大… I. ①张…②张… III. 物理-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 10179 号

大学物理

张国忠 张丹海 主编

责任编辑 田建平

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

北京市蓝地公司激光照排

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

开本 850×1168/32 印张 17 字数 450 千字

1995 年 8 月第 1 版 1995 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—5000 定价: 19.50 元

序

大学物理是工科大学的一门重要基础理论课程。与现行的教学学时数相比,目前大多数教材显得内容多、份量重,特别是对于一般工科院校不是十分合用。一种内容精炼、重点突出又符合教学基本要求的教材是十分需要的。

我认为张国忠、张丹海主编的《大学物理》一书的主要特点是“内容精炼,层次分明,重点突出”。在约45万字的教材中,既覆盖了教学基本要求的内容,又突出了教学重点,主次分明,详略得当。

“联系工程实际,反映现代科学技术成就”是本书的另一特点。全书在每章叙述中注意联系有关的工程技术内容;在“现代工程技术的物理基础”一章中,又专题讲述了激光、半导体、超导体、等离子体和光纤通信等现代科学技术内容,这非常符合大学物理课程内容改革和现代化的要求。

一本好的教材无疑对于“教”与“学”都是十分有益的,我希望《大学物理》能对提高教学质量、促进教学改革起到它应有的作用。

林铁生

1995年8月于北京

前 言

本书依据国家教委颁发的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》编写，主要作为工科大学本科非物理专业的物理课程教材。

在编写过程中，参考了现行的物理课程教材，并结合编者多年的教学实践，力求做到“精选内容，注意更新，保证基础，重视应用，利于教学”。

考虑到工科大学物理课程特点和适当反映物理学的新成就，对某些现代工程技术作了专题式的知识简介。教材中安排了部分选学或自学内容，以满足不同院校各专业的教学需要。

全书采用国际单位制(SI)，物理名词使用全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》(1988年)。

在本书编写过程中，承蒙各有关部门和人员的协助，尤其是得到了编者所在学校的大力支持，在此表示衷心的感谢。北方交通大学林铁生教授审阅了书稿，在此深表感谢。

限于编者的水平和时间，疏漏错误之处，恳请指正。

编 者

1994年9月

目 录

第一章 质点运动学	(1)
§ 1-1 参考系 质点	(1)
§ 1-2 位置矢量 运动方程 位移	(3)
§ 1-3 速度 加速度	(5)
§ 1-4 圆周运动	(11)
§ 1-5 积分法求运动方程	(17)
§ 1-6 相对运动	(22)
习 题	(24)
第二章 牛顿运动定律	(28)
§ 2-1 牛顿运动三定律	(28)
§ 2-2 力学中常见的力	(31)
§ 2-3 惯性系 力学相对性原理	(33)
§ 2-4 牛顿运动定律的应用	(34)
习 题	(40)
第三章 动量	(44)
§ 3-1 动量 冲量 动量定理	(44)
§ 3-2 质点系的动量定理 动量守恒定律	(47)
§ 3-3 碰撞	(52)
习 题	(56)
第四章 功和能	(59)
§ 4-1 功 功率	(59)
§ 4-2 保守力与非保守力 势能	(63)
§ 4-3 动能定理 功能原理 机械能守恒定律	(69)
习 题	(75)
第五章 刚体定轴转动	(80)
§ 5-1 刚体的运动	(80)

§ 5-2 力矩 转动定律 转动惯量	(82)
§ 5-3 力矩的功 转动的动能定理	(91)
§ 5-4 角动量 角动量守恒定律	(94)
习 题	(100)
第六章 气体动理论	(104)
§ 6-1 气体的状态参量	(104)
§ 6-2 理想气体物态方程	(107)
§ 6-3 理想气体的压强公式	(110)
§ 6-4 气体分子的平均平动动能与温度的关系	(114)
§ 6-5 能量按自由度均分定理 理想气体的内能	(115)
§ 6-6 气体分子的速率分布律	(119)
§ 6-7 玻耳兹曼分布定律	(125)
§ 6-8 真实气体	(128)
§ 6-9 气体分子平均碰撞次数 平均自由程	(133)
习 题	(136)
第七章 热力学基础	(138)
§ 7-1 热力学第一定律	(138)
§ 7-2 热力学第一定律对理想气体等值过程的应用	(142)
§ 7-3 绝热过程	(148)
§ 7-4 循环过程	(151)
§ 7-5 卡诺循环	(157)
§ 7-6 热力学第二定律	(160)
§ 7-7 热力学第二定律的统计意义	(163)
§ 7-8 熵与熵增原理	(165)
习 题	(169)
第八章 静电场	(173)
§ 8-1 电荷 库仑定律	(173)
§ 8-2 电场 电场强度	(175)
§ 8-3 电场线 电通量	(184)
§ 8-4 高斯定理	(187)
§ 8-5 静电场力的功 电势	(194)
§ 8-6 等势面 场强与电势的微分关系	(201)
§ 8-7 静电场中的导体	(205)

§ 8-8 有电介质的静电场	(212)
§ 8-9 电容器 电容	(220)
§ 8-10 电场的能量	(224)
§ 8-11 静电技术的应用	(227)
习 题	(230)
第九章 稳恒磁场	(234)
§ 9-1 磁场 磁感应强度	(234)
§ 9-2 磁通量 磁场的高斯定理	(238)
§ 9-3 毕奥-萨伐尔定律	(241)
§ 9-4 安培环路定理	(248)
§ 9-5 磁场对运动电荷的作用	(255)
§ 9-6 磁场对载流导线的作用	(261)
§ 9-7 均匀磁场对平面载流线圈的作用	(266)
§ 9-8 运动电荷的磁场	(271)
§ 9-9 磁介质中的磁场	(273)
习 题	(278)
第十章 电磁感应 电磁场	(285)
§ 10-1 电磁感应现象	(285)
§ 10-2 电动势 法拉第电磁感应定律	(288)
§ 10-3 动生电动势和感生电动势	(293)
§ 10-4 自感与互感	(298)
§ 10-5 磁场的能量	(302)
§ 10-6 麦克斯韦电磁场理论	(305)
习 题	(310)
第十一章 振动	(314)
§ 11-1 简谐振动	(314)
§ 11-2 简谐振动的特征量	(317)
§ 11-3 旋转矢量法	(326)
§ 11-4 简谐振动的能量	(331)
§ 11-5 简谐振动的合成	(332)
§ 11-6 阻尼振动 受迫振动 共振	(336)
习 题	(339)
第十二章 波动	(343)

§ 12-1 机械波	(343)
§ 12-2 平面简谐波	(348)
§ 12-3 波的能量	(352)
§ 12-4 惠更斯原理 波的衍射	(354)
§ 12-5 波的叠加原理 波的干涉	(355)
§ 12-6 驻波	(359)
§ 12-7 声波	(361)
§ 12-8 多普勒效应	(369)
§ 12-9 电磁波	(372)
习 题	(377)
第十三章 光的干涉	(380)
§ 13-1 相干光与相干条件 光程	(380)
§ 13-2 杨氏双缝实验 劳埃德镜	(383)
§ 13-3 薄膜干涉	(386)
§ 13-4 劈尖 牛顿环	(389)
§ 13-5 迈克耳孙干涉仪	(395)
习 题	(398)
第十四章 光的衍射	(401)
§ 14-1 光的衍射现象	(401)
§ 14-2 单缝衍射	(403)
§ 14-3 光栅衍射	(408)
§ 14-4 光学仪器的分辨率	(412)
§ 14-5 X 射线的衍射	(415)
习 题	(417)
第十五章 光的偏振	(419)
§ 15-1 自然光和偏振光	(419)
§ 15-2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	(420)
§ 15-3 反射和折射时光的偏振	(423)
§ 15-4 光的双折射现象	(425)
§ 15-5 偏振光的干涉	(428)
习 题	(430)
第十六章 狭义相对论	(431)
§ 16-1 伽利略变换式 绝对时空观	(431)

§ 16-2 迈克耳孙-莫雷实验	(433)
§ 16-3 爱因斯坦假设 洛伦兹变换	(436)
§ 16-4 相对论时空观	(440)
§ 16-5 相对论动力学基础	(444)
习 题	(447)
第十七章 量子物理基础	(449)
§ 17-1 黑体辐射 普朗克量子假设	(449)
§ 17-2 光的量子性	(453)
§ 17-3 德布罗意波	(460)
§ 17-4 氢原子的玻尔理论	(462)
§ 17-5 不确定关系	(467)
§ 17-6 波函数	(468)
§ 17-7 薛定谔方程	(470)
§ 17-8 原子中核外电子的状态	(475)
习 题	(478)
第十八章 现代工程技术的物理基础	(481)
§ 18-1 半导体	(481)
§ 18-2 激光	(491)
§ 18-3 光纤通信	(499)
§ 18-4 超导体	(507)
§ 18-5 等离子体	(510)
附录	(516)
附录一 国际单位制(SI)简介	(516)
附录二 常用物理基本常量	(518)
习题答案	(520)

第一章 质点运动学

宇宙中的一切物质，都处于永恒的运动、变化之中。运动的形式是多种多样的。物体之间或同一物体各部分之间位置的相对变化，称为机械运动，简称为运动。它是自然界中最简单、最基本的运动形式。

力学是研究物体机械运动的规律及其应用的一门学科。力学中，研究物体位置随时间变化规律的这部分内容叫运动学。

本章主要学习描述质点运动的基本物理量，即位置矢量、位移、速度、加速度等。

§ 1-1 参考系 质点

一、参考系

自然界中，所有的物体都在不停地运动着，绝对静止不动的物体是不存在的。如放在桌上的书相对桌面是静止的，但它却随地球一起绕太阳运动，这就是运动的绝对性。要描述一个物体的运动，例如其位置或位置的变化，总要选取另一个物体作为参考，才能观察和研究此物体相对参考物体是如何运动的。被选作参考的物体称为参考系。选取不同的参考系，对同一物体运动的描述是不同的。例如在匀速行驶的车厢中，静坐的乘客相对于车厢是静止不动的，而相对于道路旁某一固定物体，乘客的位置却在不断的变化。这就是运动描述的相对性。因此在描述物体运动状态时，必须指明是对哪一个参考系而言。

参考系的选择是任意的，如何选择要根据问题的性质和研究

方便来确定。例如研究物体在地面上的运动，最方便的是选择地球作为参考系。研究行星绕太阳的运动，则应选择太阳作为参考系。

为了定量地描述物体的位置及其变化，还需要在参考系上选择一个坐标系。一般最常用的是直角坐标系。此外，根据需要，也可以选用其他的坐标系，例如球坐标系或柱坐标系等。

二、质 点

任何物体都有大小和形状。一般说来，物体运动时其各部分的位置变化是不同的。因此要精确描写物体各部分的运动状态，并不是一件容易的事情。根据问题的性质，在某种情况下，我们往往可以将物体的大小和形状忽略不计，而把物体当作一个有一定质量的点，这样抽象化后的理想物体模型，称为质点。例如研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离（约 $1.5 \times 10^8 \text{km}$ ）比地球半径（约 6370km ）大得多，因此地球上各点相对太阳的运动可视为相同，就可把地球当作质点。物体作平动时，物体内各点具有相似的轨道、相同的速度和加速度，则任一点的运动都能代表整体的运动，因此可以把平动物体视为质点。

一个物体是否能看作质点，完全取决于问题的性质。如上所述的地球绕太阳公转的问题中，地球可当作一个质点，但在研究地球的自转时，如果仍然把地球看作一个质点，显然就毫无意义了。

质点运动是研究物体运动的基础。在不能把所研究的物体当作质点时，可把整个物体看成是由许多质点所组成，弄清这些质点的运动，就可以了解整个物体的运动。

在本书的力学内容中，除刚体的定轴转动一章外，都把物体当作质点来处理。

§ 1-2 位置矢量 运动方程 位移

一、位置矢量

在图 1-1 所示的直角坐标系中, 在时刻 t 质点 P 的位置可用

自坐标系原点 O 指向 P 点的有向线段 r 来表示, 矢量 r 叫做位置矢量, 简称位矢。从图 1-1 中可以看出, 位置矢量 r 在 X 、 Y 、 Z 轴上的投影 (即 P 点的坐标) 为 x 、 y 、 z , 因此, 位置矢量 r 可表示为

$$r = xi + yj + zk \quad (1-1)$$

式中, i 、 j 、 k 分别为沿 X 、 Y 和 Z 轴正方向的单位矢量。位置矢量的大小为

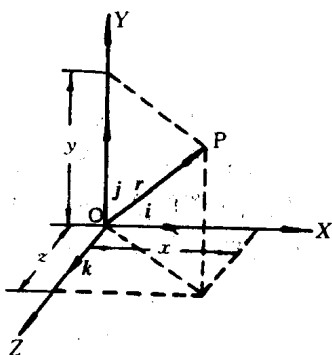


图 1-1 位置矢量

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

位置矢量 r 的方向余弦由下式确定:

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

式中, α 、 β 、 γ 分别是 r 与 X 、 Y 和 Z 轴之间的夹角。

二、运动方程

质点运动时, 位置矢量 r 将随时间 t 而变化, 因此 r 是时间的函数, 即

$$r = r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1-2)$$

位置矢量 r 随时间 t 变化的函数式 (1-2) 称为质点的运动方程。我们从 $x=x(t)$, $y=y(t)$, $z=z(t)$ 中消去 t 后, 就可得到质点运动的轨道方程。例如 P 点从原点 O 开始沿 X 轴作平抛运动, 选

用图 1-1 坐标系, 其运动方程为

$$x = v_0 t, y = -\frac{1}{2} g t^2$$

或

$$\mathbf{r} = v_0 t \mathbf{i} - \frac{1}{2} g t^2 \mathbf{j}$$

由上式 x 、 y 中消去 t , 可求得 P 点的轨道方程为

$$y = -\frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0} \right)^2$$

这是一条抛物线。

三、位 移

一质点沿曲线由时刻 t 的点 A 运动到时刻 $t + \Delta t$ 的点 B (图 1-2), 质点的位置矢量由 $\mathbf{r}_A$ 变化到 $\mathbf{r}_B$ 。很显然, 在时间间隔 Δt 内, 位置矢量的大小和方向都发生了变化。质点位置的变化可用由点 A 到点 B 的有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 来表示, 称为质点的位移。若把 $\Delta \mathbf{r}$ 写成

$\Delta \mathbf{r}$, 由图 1-2 可以看出,

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A + \Delta \mathbf{r}$$

因此, 质点从点 A 到点 B 的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-3a)$$

上式说明, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 等于在时间间隔 Δt 内, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 的增量。

由式 (1-1), 可将 A、B 两点的位置矢量分别写成

$$\mathbf{r}_A = x_A \mathbf{i} + y_A \mathbf{j} + z_A \mathbf{k}$$

$$\mathbf{r}_B = x_B \mathbf{i} + y_B \mathbf{j} + z_B \mathbf{k}$$

于是, $\Delta \mathbf{r}$ 可写成

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

(1-3b)

上式表明, 当质点在空间运动时, 其位移等于在 X 轴、Y 轴和 Z

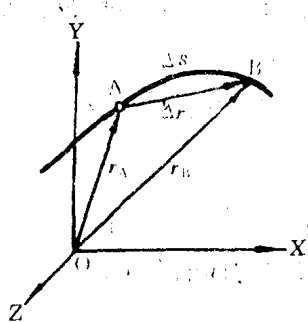


图 1-2 位移

轴上的位移的矢量和。

应当注意，位移是描述质点位置变化的物理量，并非质点所经历的路程。在图 1-2 中，弧长 $\widehat{AB}$ （记作 ΔS ）为质点所经历的路程，而位移则是 $\Delta \mathbf{r}$ 。当质点经一闭合路径回到原来的起始位置时，其位移为零，而路程不为零。所以，位移和路程是两个完全不同的概念。

§ 1-3 速度 加速度

一、速 度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量。在图 1-2 中，在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 的这段时间 Δt 内，质点由点 A 运动到点 B，质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ 。我们把 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值称为质点在时间间隔 Δt 内的平均速度，即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$$

平均速度的方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同，而其大小等于 Δt 内每单位时间的位移。

平均速度只反映了在一段时间内位移的平均变化。如果我们需精确地知道质点在某一时刻 t （或某一位置）的运动情况，应使 Δt 尽量缩短而趋近于零。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，平均速度的极限值称为质点在时刻 t 的瞬时速度（简称速度），用 $\mathbf{v}$ 表示，则有

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-4)$$

因此，速度是位置矢量对时间的一阶导数。

由 (1-4) 式可知，速度的方向就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向。由图 1-3 可见，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，点 B 逐渐趋近于点 A， $\Delta \mathbf{r}$ 则趋于和轨道相切，即与 A 点的切线重合。所以质点在某一点的速度方向就是沿该点轨道的切线方向，并指向质点前进的方向。

在直角坐标系中, 速度可表示为

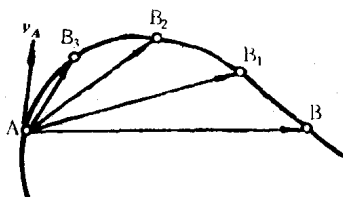


图 1-3 速度的方向

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{d}{dt}(x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}) \\ &= \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} \\ &= v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1-5) \end{aligned}$$

其中 $v_x = \frac{dx}{dt}$ 、 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 、 $v_z = \frac{dz}{dt}$ 分别是 $\boldsymbol{v}$ 在直角坐标系中的三个分量,

因此速度的大小

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

在图 1-2 中, 质点在 Δt 内通过的路程为 Δs , 比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 称为质点在 Δt 内的平均速率, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

平均速率是一个标量, 数值上等于质点在单位时间内所通过的路程, 而不考虑运动的方向。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速率的极限值称为瞬时速率, 简称速率, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

由图 1-2 可知, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 与 Δs 可认为相等: $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \boldsymbol{r}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s$, 即 $d\boldsymbol{r} = ds$, 因此有 $|\boldsymbol{v}| = v$, 也就是说, 在任一时刻, 质点速度的大小与速率相等。

例题 1-1 一质点在 XOY 平面内的运动方程为 $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j}$, 其中 $x = 2t$, $y = \frac{1}{2}t^2 - 2$, 式中各量皆为 SI 单位。(1) 计算在 $t = 2\text{s}$ 到 $t = 4\text{s}$ 这段时间内的平均速度; (2) 求 $t = 4\text{s}$ 时的速度和速率; (3) 求质点的轨道方程并作图。

解 (1) 由定义, 在 $t = 2\text{s}$ 到 $t = 4\text{s}$ 内的平均速度为

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{v}} &= \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j} = \frac{8-4}{4-2}\boldsymbol{i} + \frac{6-0}{4-2}\boldsymbol{j} \\ &= 2\boldsymbol{i} + 3\boldsymbol{j} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

(2) 由速度的分量式可得

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 2, v_y = \frac{dy}{dt} = t$$

当 $t=4\text{s}$ 时, $v_x=2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_y=4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 因此 $t=4\text{s}$ 时质点的速度为

$$\boldsymbol{v} = 2\boldsymbol{i} + 4\boldsymbol{j}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

速率 $|\boldsymbol{v}| = v = \sqrt{2^2 + 4^2} = 4.47\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

(3) 由 $x=2t$ 得 $t=\frac{x}{2}$, 代入 $y=\frac{1}{2}t^2-2$ 可得轨道方程

$$y = \frac{x^2}{8} - 2$$

由运动方程 $x=2t$ 、 $y=\frac{1}{2}t^2-2$ 可作 $y-x$ 图 (图 1-4)。

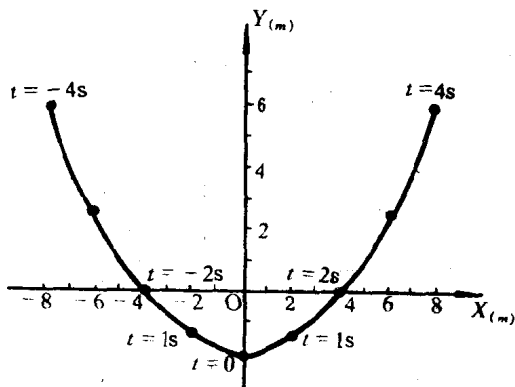


图 1-4

二、加 速 度

速度是个矢量, 不论是其大小变化, 还是方向变化, 或二者同时变化, 速度都发生了变化。加速度就是描述速度随时间变化规律的物理量。

如图 1-5 所示, 质点的运动轨道为一曲线。设在时刻 t , 质点位于点 A, 其速度为 $\boldsymbol{v}_A$, 在时刻 $t+\Delta t$, 质点位于点 B, 其速度为 $\boldsymbol{v}_B$ 。由速度矢量图可以看出, 在时间间隔 Δt 内, 质点速度的增量为