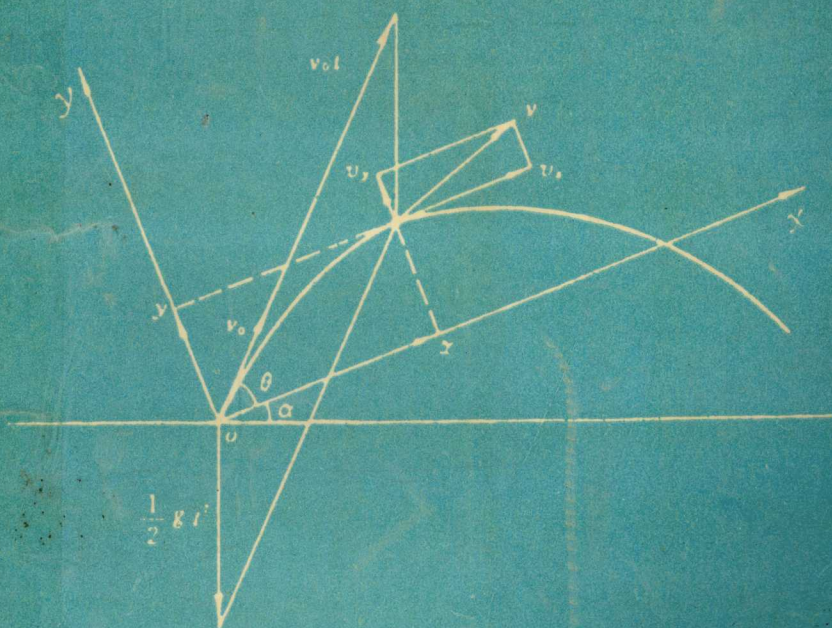


大学基础力学

朱孝华 编著



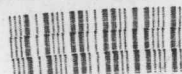
苏州大学出版社



号 310 第 字 登 录 (特)

大学基础力学

朱孝华 编



96026131

苏州大学出版社

1993.10

(苏)新登字第 015 号

大学基础力学

编著：朱孝华 **责任编辑：**陈兴昌

出版发行：苏州大学出版社

苏州市十梓街 1 号 邮编：215006

经 销：江苏省新华书店

排 版 者：苏州印刷总厂吴县东山排版分厂

印 刷 者：丹阳文教印刷厂

开本：850×1168 1/32 印张：11.25

字数：320 千 印数：1—3500

1993 年 10 月第一版 1993 年 10 月第一次印刷

书号：ISBN 7-81037-010-3/O·1 **定价：**8.00 元

前 言

世界是由物质构成的,物质是运动的,运动是一切物质的固有属性,物质的运动又以各种形式进行着。“物质没有运动是不可想象的。”①

物理学是研究物质运动规律的一门自然学科,如物体的机械运动,物质的分子热运动、电磁运动、微观粒子的运动和这些运动的规律性以及不同运动形式之间的转换,都是物理学研究的内容。

物体之间或物体各部份之间相对位置的变化称为机械运动,如齿轮的转动,车、船的运动,人造卫星绕地球旋转,天体的运行等等都属于机械运动的范畴。经典力学主要研究宏观物体机械运动所遵循的规律,它是一切运动中最简单、最基本的物质运动形式。因此经典力学是物理学的基础学科,也是物理学的一个重要分支。

《大学基础力学》以经典力学为主要内容,是高等院校理工科专业的一门基础课程。本书原是一本铅印的讲义,1987年以来在省内外一些兄弟院校中试用,并得到师生们普遍好评,现根据近年来的教学实践和同行专家的意见、建议,从基本知识到例题、思考题和练习题等都作了较全面的修改与充实,使本书在科学性、思想性、实践性和可读性等各方面都力求臻善。本书对于物理教学中一些有过争论的问题,亦予以探讨,并阐述了作者的见解,较好地解决中学到大学物理教学的过渡,应是本书的特色之一,这次修订中又新增了一定数量的大、中学物理竞赛试题,估计读者对此会感兴趣的。书中带有*号的章节为选读内容,可供教师选讲或读者自学之用。

编写、出版教材,道路维艰,幸蒙省内外众多师友关心与支

持,在此谨向曾试用过本教材,并积极支持、推荐出版的杭桂生、姚士淮、顾森茂、吴国良、王保林等同志以及苏州大学曹阳、倪汉彬两教授,表示衷心感谢。对关心并积极支持本书出版的吴县校办工业公司、省内外有关兄弟院校、教研室、苏州大学出版社、苏州大学物理系有关领导和老师都深表谢意。

由于作者水平所限,加之时间仓促,缺点与错误在所难免,恳请读者批评、指正。

朱孝华

1993年7月

① 恩格斯:《自然辩证法》人民出版社,1971年8月第一版 P54.

目 录

第一章 质点运动学

§ 1.1 质点	(1)
§ 1.2 直线运动	(2)
§ 1.3 相对运动	(8)
§ 1.4 曲线运动	(13)
§ 1.5 典型例题与解析	(21)

第二章 牛顿运动定律

§ 2.1 牛顿第一运动定律	(28)
§ 2.2 牛顿第二运动定律	(30)
§ 2.3 牛顿第三运动定律	(33)
§ 2.4 力学中常见的三种性质的力	(33)
§ 2.5 质点动(静)力学问题的一般解法	(37)
§ 2.6 非惯性系和惯性力	(40)
§ 2.7 典型例题与解析	(44)

第三章 动量定理和动量守恒定律

§ 3.1 冲量和动量 动量定理	(54)
§ 3.2 质点组的动量和动量定理 动量守恒定律	(58)
* § 3.3 问题与讨论	(63)

第四章 动能定理和机械能守恒定律

§ 4.1 功和功率	(68)
------------	--------

§ 4.2	作用力与反作用力做功情况的分析	(70)
§ 4.3	动能、动能定理	(73)
§ 4.4	保守力 势能	(75)
§ 4.5	机械能的转化及守恒定律	(79)
§ 4.6	作用、反作用力做功与能量的传递和转化	(80)
§ 4.7	对心碰撞和恢复系数	(82)
* § 4.8	典型例题与解析	(85)
§ 4.9	量纲和量纲公式	(91)

第五章 刚体力学

§ 5.1	刚体运动学	(99)
§ 5.2	质心和质心运动定理	(103)
§ 5.3	刚体绕固定轴转动的动量矩定理	(112)
§ 5.4	质心运动定理和动量矩定理例题	(119)
§ 5.5	力矩做功和绕定轴转动刚体的动能	(121)
§ 5.6	刚体对点的动量矩 动量矩守恒定律	(124)
§ 5.7	力系的平衡	(128)
§ 5.8	力系的平衡举例	(132)
§ 5.9	刚体的平行平面运动	(137)
§ 5.10	刚体定轴转动和平行平面运动例题	(141)
* § 5.11	滚动摩擦	(145)
* § 5.11	回转仪的近似理论	(146)
* § 5.12	第三、第四、第五章综合例题与专题讨论	(150)

第六章 固体的弹性

§ 6.1	应变和应力	(172)
§ 6.2	虎克定律	(176)

* § 6.3	梁弯曲和杆扭转	(180)
§ 6.4	材料的机械性质	(188)

第七章 振 动

§ 7.1	简谐振动	(195)
§ 7.2	准弹性力 准弹性势能	(200)
§ 7.3	单摆、复摆和扭摆	(209)
§ 7.4	简谐振动的合成	(213)
§ 7.5	阻尼振动	(219)
§ 7.6	受迫振动 共振	(223)

第八章 波 动

§ 8.1	机械波的产生和传播	(237)
§ 8.2	平面简谐波	(243)
§ 8.3	平面简谐波的波动方程	(247)
§ 8.4	波的能量、能流密度、声强级和响度	(249)
§ 8.5	波的叠加原理 驻波	(253)
§ 8.6	行波、驻波的例题与解析	(261)
§ 8.7	声源与人耳听声	(264)
* § 8.8	次声波与超声波 亚音速与超音速	(268)
* § 8.9	声音在大气中的传播 建筑声学	(270)
§ 8.10	多普勒效应	(272)

第九章 流体力学

§ 9.1	流体中的压强	(279)
§ 9.2	惯性力与流体静压强	(284)
§ 9.3	理想流体的稳定流动	(286)
§ 9.4	连续性方程	(288)
§ 9.5	伯努利方程	(289)

§ 9.6	伯努利方程的应用	(291)
§ 9.7	理想流体例题与解析	(296)
§ 9.8	粘滞流体	(300)
* § 9.9	流体阻力的类型和机翼的升力	(307)
§ 9.10	动量定理应用于运动流体	(312)

第十章 狭义相对论基础

§ 10.1	伽利略变换和经典时空观	(317)
§ 10.2	相对论的基本原理和洛伦兹变换	(320)
§ 10.3	狭义相对论对经典时空观的变革	(327)
§ 10.4	洛伦兹速度变换式	(332)
§ 10.5	相对论的动力学基础	(334)

习题提示和参考答案

(317)	习题提示和参考答案	3.83
(318)	习题提示和参考答案	3.83
(319)	习题提示和参考答案	3.83
(320)	习题提示和参考答案	3.83
(321)	习题提示和参考答案	3.83
(322)	习题提示和参考答案	3.83
(323)	习题提示和参考答案	3.83
(324)	习题提示和参考答案	3.83
(325)	习题提示和参考答案	3.83
(326)	习题提示和参考答案	3.83
(327)	习题提示和参考答案	3.83
(328)	习题提示和参考答案	3.83
(329)	习题提示和参考答案	3.83
(330)	习题提示和参考答案	3.83
(331)	习题提示和参考答案	3.83
(332)	习题提示和参考答案	3.83
(333)	习题提示和参考答案	3.83
(334)	习题提示和参考答案	3.83
(335)	习题提示和参考答案	3.83
(336)	习题提示和参考答案	3.83
(337)	习题提示和参考答案	3.83
(338)	习题提示和参考答案	3.83
(339)	习题提示和参考答案	3.83
(340)	习题提示和参考答案	3.83
(341)	习题提示和参考答案	3.83
(342)	习题提示和参考答案	3.83
(343)	习题提示和参考答案	3.83
(344)	习题提示和参考答案	3.83
(345)	习题提示和参考答案	3.83
(346)	习题提示和参考答案	3.83
(347)	习题提示和参考答案	3.83
(348)	习题提示和参考答案	3.83
(349)	习题提示和参考答案	3.83
(350)	习题提示和参考答案	3.83
(351)	习题提示和参考答案	3.83
(352)	习题提示和参考答案	3.83
(353)	习题提示和参考答案	3.83
(354)	习题提示和参考答案	3.83
(355)	习题提示和参考答案	3.83
(356)	习题提示和参考答案	3.83
(357)	习题提示和参考答案	3.83
(358)	习题提示和参考答案	3.83
(359)	习题提示和参考答案	3.83
(360)	习题提示和参考答案	3.83
(361)	习题提示和参考答案	3.83
(362)	习题提示和参考答案	3.83
(363)	习题提示和参考答案	3.83
(364)	习题提示和参考答案	3.83
(365)	习题提示和参考答案	3.83
(366)	习题提示和参考答案	3.83
(367)	习题提示和参考答案	3.83
(368)	习题提示和参考答案	3.83
(369)	习题提示和参考答案	3.83
(370)	习题提示和参考答案	3.83
(371)	习题提示和参考答案	3.83
(372)	习题提示和参考答案	3.83
(373)	习题提示和参考答案	3.83
(374)	习题提示和参考答案	3.83
(375)	习题提示和参考答案	3.83
(376)	习题提示和参考答案	3.83
(377)	习题提示和参考答案	3.83
(378)	习题提示和参考答案	3.83
(379)	习题提示和参考答案	3.83
(380)	习题提示和参考答案	3.83
(381)	习题提示和参考答案	3.83
(382)	习题提示和参考答案	3.83
(383)	习题提示和参考答案	3.83
(384)	习题提示和参考答案	3.83
(385)	习题提示和参考答案	3.83
(386)	习题提示和参考答案	3.83
(387)	习题提示和参考答案	3.83
(388)	习题提示和参考答案	3.83
(389)	习题提示和参考答案	3.83
(390)	习题提示和参考答案	3.83
(391)	习题提示和参考答案	3.83
(392)	习题提示和参考答案	3.83
(393)	习题提示和参考答案	3.83
(394)	习题提示和参考答案	3.83
(395)	习题提示和参考答案	3.83
(396)	习题提示和参考答案	3.83
(397)	习题提示和参考答案	3.83
(398)	习题提示和参考答案	3.83
(399)	习题提示和参考答案	3.83
(400)	习题提示和参考答案	3.83

第一章 质点运动学

§ 1.1 质 点

质点是一种理想模型。运动的物体总是有一定的形状和大小，在空间占有相应的体积。物体所发生的运动，也可以很复杂。尽管如此，如果在所研究的问题中，物体位置的确定是主要矛盾，其他都是可以忽略的次要因素，就可以把物体抽象化为用一个质点来代替它，质点在空间具有一确定的位置，并具有它所代表物体的质量。引入质点的概念，可以使力学问题大大简化，促使问题行之有效地解决。

对于作简单运动的物体，如物体作平时时，任何时刻物体上各部分的运动情况都相同，可以以点代体，把物体的运动抽象化为一个质点的运动。

地球是个体积很大的天体，既绕太阳公转，又绕地轴自转，在确定地球绕日运行轨道位置的问题中，地球本身的形状和大小可以忽略不计，地球运动的复杂性也成为次要因素，就可以用质点代表地球。如果把太阳比作网球般大小，地球就相当于离开网球约10米远处一个大头针圆顶帽的大小，完全可以作为质点对待。

当然，在有的问题中，尽管物体不太大，物体的形状和大小不能忽略，就不能把整个物体作为一个质点看待。如研究一个齿轮的转动问题时，不能用质点代表整个齿轮，但可以把齿轮分成许多小的部分，每个小的部分以相应的质点来代表。分得的部分太大，位置不确定，分得的部分太小了也无意义，分得的部分大小适度是以它在所研究的问题中能具有一个确定的位置为条件的，一般说

来,就宏观范围而言,质点是一个无穷小量。但就微观角度来看,质点可以包含许多原子和分子,并不太小。认为质点取得越小越好的想法是不切实际的。

思考题

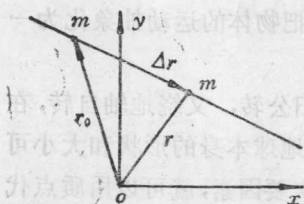
试比较质点、几何点、点电荷和点光源等之间的区别和联系。

§ 1.2 直线运动

1. 矢径、坐标、位移和路程

质点在空间运动的实际路径称为径迹,质点运动的径迹为直线,则称质点作直线运动,选取一适当的坐标系,以坐标原点为起点作一位置矢量指向质点,这一位置矢量表明质点在空间的位置,简称为矢径。

参看图 1-1,质点沿一直线运动,矢径 r 随质点位置的变化而变化,矢径在坐标轴上的投影即质点的坐标 (x, y) 用来描述质点在空间的位置。质点位置的变化称为质点的位移,以 Δr 表示。 Δr 的投影是 Δx 和 Δy 。 Δr 可以表示为



$$\Delta r = \Delta x i + \Delta y j.$$

图 1-1

如果坐标原点在直线上,坐标轴取得与质点运动的直线重合,则 $r = xi$ 。位移 $\Delta r = \Delta xi$ 。 Δx 为代数值。

在 Δt 时间内,质点实际运动的路线长度称为路程。若一质点在平衡位置附近作简谐运动,从平衡位置出发每隔一个周期 τ ,即 $\Delta t = \tau$,质点的位移为零,但通过的路程却是振幅 A 的 4 倍。

2. 时间和时刻

质点的运动总是在时间过程中进行的,图 1-2 表示一时间轴,

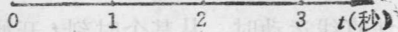


图 1-2

时间轴上的每一点对应着一个确定的时刻 t ，时间轴上任意两个时刻之间的线段表示了质点运动的时间过程 Δt 。时刻的概念也是一理想模型，在实际问题中，时间过程缩短到一定程度在时间轴上就可作为某一时刻，宏观物体运动所计时的某一时刻，对某些微观粒子而言，可以是相当长的时间过程。如 μ 介子的寿命约为 2.2×10^{-6} 秒，而最短寿命的重子，寿命仅 $10^{-21} \sim 10^{-23}$ 秒，宏观运动计时精确到万分之一秒可认为是短暂的瞬间，但对微观运动已是相当长的时间过程。

3. 直线运动的平均速度和瞬时速度

质点作直线运动，在 Δt 时间过程中，若位移为 $\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i}$ 平均速度定义为位移与时间之比，它是一个矢量。

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

在 Δt 时间过程中，质点运动的路程 Δs 与 Δt 之比称为平均速率。它是一个标量、

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

当质点运动方向在 Δt 时间过程中没有发生改变， $|\Delta x| = \Delta s$ ， $|\bar{\mathbf{v}}| = \bar{v}$ ，当质点运动方向发生了 180° 的大转弯， $|\Delta x|$ 不再等于 Δs ， $|\bar{\mathbf{v}}|$ 与 $\bar{v}$ 也不相等。平均速率大致反映了质点运动的快慢程度，但不足以说明质点运动的方向。

当质点运动方向不发生改变，平均速度能同时反映质点运动的大致快慢程度和运动的方向。

若质点运动方向保持不变, 在任意相等的时间内所通过的路程相同. 则称质点作匀速直线运动.

质点作变速直线运动时, 从某个时刻 t 开始. 经历的时间过程 Δt 越长, 以平均速度 $\bar{v}$ 反映 t 时刻以后的运动情况就越不精确, Δt 越短, 方能比较准确反映质点的运动情况.

令 $\Delta t \rightarrow 0$, $\bar{v}$ 的极限值为 v ,

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

$\bar{v}$ 称为 t 时刻质点的即时速度或瞬时速度简称为速度, v 的大小即 v 值简称为速率. 不论质点运动方向是否改变, 在任一时刻都有 $|v| = v$, 或 $\left| \frac{dx}{dt} \right| = \frac{ds}{dt}$. 质点在某一时刻的即时速度精确地反映了该时刻质点的运动状态. 质点即时速度的模始终等于它的即时速率. 速度的单位在 SI 制中以米/秒表示, 也可用厘米/秒表示.

[例 1] 一质点在一直线上的 O 点从静止出发, 沿 ox 轴作匀加速直线运动, $x = 2t^2$ (米), 试求:

(1) 质点在 2 到 2.1 秒间的平均速率; (2) 质点在 2 到 2.001 秒的平均速率; (3) 质点在 2 到 2.00001 秒的平均速率; (4) 质点在 2 秒时的速率.

解 $x(t) = 2t^2, x(t + \Delta t) = 2(t + \Delta t)^2$

因质点速度方向不改变, 路程 $s = x$.

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{2(t + \Delta t)^2 - 2t^2}{\Delta t} = 4t + 2\Delta t \end{aligned}$$

代入具体数值, 把计算结果列于下表

t	$t + \Delta t$	Δt	$\bar{v} = 4t + 2\Delta t$
2	2.1	0.1	8.2(米/秒)
2	2.001	0.001	8.002(米/秒)
2	2.00001	0.00001	8.00002(米/秒)
2	$t + \Delta t \rightarrow 2$	$\Delta t \rightarrow 0$	$v = 8(米/秒)$

再应用高等数学求即时速度, $v = \frac{dx}{dt} = 4t$.

$t = 2$ 秒时, $v = 8(米/秒)$ 。

4. 平均加速度和即时加速度

质点如图 1-3 所示作变速直线运动, t 时刻质点于 A 点, 速度

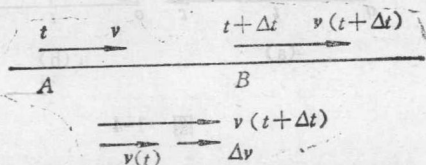


图 1-3

为 $v(t)$, $t + \Delta t$ 时刻质点已运动到 B 点, 速度变为 $v(t + \Delta t)$, 在 Δt 时间过程中, 平均加速度 $\bar{a}$ 定义为

$$\bar{a} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 平均加速度的极限值就是质点在 t 时刻的即时加速度。

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

加速度是速度对时间的变化率，某一时刻质点的加速度是否为零表明该时刻质点运动状态是否发生变化和怎样发生变化。加速度的数值反映了速度随时间变化的速率，它的方向就是速度变化的方向。

作直线运动质点的加速度保持为恒量，称质点作匀变速直线运动，如在重力场中自由落体的运动就是一例。

5. $x-t$ 和 $v-t$ 曲线。

以时间轴作为横坐标轴，质点所处的位置 x 作为纵坐标轴，如图1-4(a)所示，割线 AB 的斜率 $\operatorname{tg}\theta' = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 应相于 Δt 时间内的平

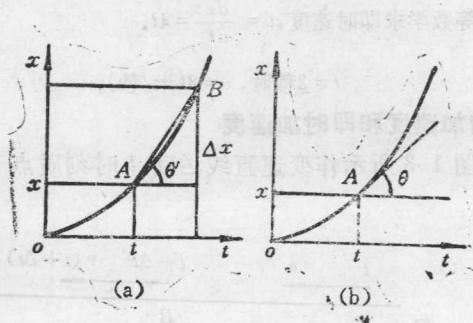


图 1-4

均速度值，参看图1-4(b)当 $\Delta t \rightarrow 0$ ，割线 AB 的极限就是过 A 点的切线， t 时刻的即时速度值可用过 A 点切线的斜率表示，即

$$v = \operatorname{tg}\theta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}.$$

以时间轴为横坐标轴，速率 v 为纵坐标轴，如图1-5(a)所示，割线 CD 的斜率 $\operatorname{tg}\varphi' = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ 相应于 Δt 时间内的平均加速度值，再看图1-5(b)，当 $\Delta t \rightarrow 0$ ，割线 CD 的极限就是过 C 点的切线， t 时刻的即时加速度值可用过 C 点切线的斜率表示，即

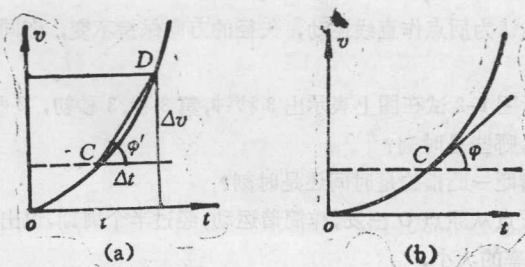


图 1-5

$$a = \operatorname{tg} \varphi = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

参看图 1-6, $v-t$ 曲线上各点的斜率相等, $a = \operatorname{tg} \varphi$ 为常量, 平均加速

度 $\bar{a} = a$, 即 $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \bar{a} = a$, $\Delta v = a \Delta t$, $t_0 = 0$

时, 初速度为 v_0 , 不难求得 t 时刻的速度
 $v = v_0 + at$,

在很短时间间隔 Δt_i 内, 质点运动的路程近似表示为 $\Delta s_i = v_i \Delta t_i$, 从 $t_0 = 0$ 到 t 时刻, 质点运动的路程为 s , 则有

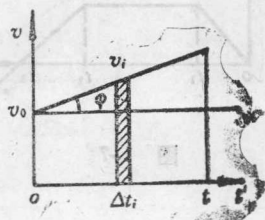


图 1-6

$$s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \cdots + \Delta s_i + \cdots + \Delta s_n$$

$$= \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n v_i \Delta t_i$$

当 $\Delta t_i \rightarrow 0$, 即 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n v_i \Delta t_i = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

$$= v_0 t + \frac{1}{2} at^2.$$

思考题

1. 有人认为质点作直线运动, 矢径的方向保持不变, 你同意这种说法吗, 为什么?
2. 参看图 1-2 试在图上表示出 3 秒钟, 第 3 秒, 3 秒初, 2 秒末, 并说明哪些是时间, 哪些是时刻?
3. 眼睛眨一眨指的是时间还是时刻?
4. 一质点从原点 O 出发, 作简谐运动, 经过半个周期, 说出质点平均速度和平均速率的大小。
5. 有人说“加速度就是增加出来的速度”, 这种说法对吗, 为什么?
6. 有人说, 速度表示物体的运动状态, 运动状态是否改变, 由 Δv 是否为零作出判断, 你同意这种说法吗? 为什么?

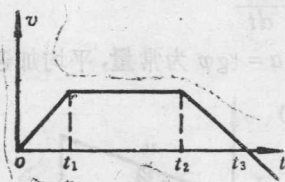


图 1-7

7. 一质点作直线运动, $v-t$ 曲线如图 1-7 所示, 试分析质点在各时刻的运动情况。

8. 试举例说明质点作直线运动时会有下述情况出现。

- (1) $v > 0, a < 0$;
- (2) $v < 0, a > 0$;
- (3) $v = 0, a \neq 0$;
- (4) $v \neq 0, a = 0$ 。

9. 质点作直线运动, 第一秒、第二秒、第三秒内运动的路程相同, 能够说质点在这三秒内作匀速直线运动吗?

§ 1.3 相对运动

1. 标量和矢量

有的物理量, 只需要有一个数值和一个适当的单位就完全确定了, 这样的物理量称之为标量, 如两质点之间的距离, 某质点运动所经历的时间, 电子具有的电荷等物理量就是标量。有的物理量, 不仅具有数值和单位, 还具有确定的方向, 这样的物理量