

21 世纪普通高等学校公共课规划教材

大学物理

上册

D A X U E W U L I

主 编：张铁强

副主编：祁 烁 温亚芹 杨秀娟

编 委：党明岩 宋颖韬 贾秀红

辽宁大学出版社

前 言

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式的基础自然科学,是其他自然科学和工程技术的基础,是人才培养和科学素质教育的基石。因此,我国普通高等学校将大学物理作为理工科学生必修的基础课程。大学物理对提高学生的科学素养,对提高学生的专业学习能力有着基础性的作用。

为推进大学物理课程改革,提高教学质量,我们组织教学一线的骨干教师,编写了这套《大学物理》(上、下册)教材。教材以教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》为依据,结合教学实际编写而成。

本册包括质点运动学、质点动力学、刚体定轴转动、机械振动与机械波、气体动理论、热力学基础等内容,可以满足力学、振动和波、热学三个版块教学的需要。

《大学物理》课程改革是一个系统工程,本教材在内容上系统完整,介绍了教育部《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》规定的基本内容,并附大学生应知应会的基础知识;在教与学的方法上进行了创新,不仅编写了具有新意的教材,而且编制了教学软件和学习软件,并配置了《大学物理》学习指导,构建起《大学物理》课程教与学的平台。

本套教材既是每个编者勤奋工作的成果,也是集体汗水的结晶。本书由教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会委员、吉林大学教授张铁强担任主编,本册由祁烁、温亚芹、杨秀娟担任副主编。

各章具体分工如下:沈阳化工学院祁烁撰写第二章;哈尔滨工业大学华德应用技术学院温亚芹撰写第一章、杨秀娟撰写第五章;沈阳理工大学党明岩撰写第四章、宋颖韬撰写第三章、贾秀红撰写第六章。全书由主编张铁强统稿。

由于编写时间仓促,加之水平有限,疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2009年12月

CONTENTS 目 录

第一章 质点运动学	3
1.1 参考系与坐标系	3
1.1.1 质点	3
1.1.2 参考系	4
1.1.3 坐标系	4
1.2 描述质点运动的物理量	6
1.2.1 时间 时刻	6
1.2.2 位置矢量 运动学方程	6
1.2.3 位移 路程	7
1.2.4 速率 速度	8
1.2.5 加速度	10
1.3 圆周运动	15
1.3.1 圆周运动的角量描述	15
1.3.2 角量与线量的关系	16
1.4 相对运动	18
1.4.1 相对运动中的速度关系	18
1.4.2 相对运动中的加速度关系	19
综合复习题 1	21
第二章 质点动力学	25
2.1 牛顿运动定律	25
2.1.1 牛顿第一定律	25
2.1.2 牛顿第二定律	26
2.1.3 牛顿第三定律	28

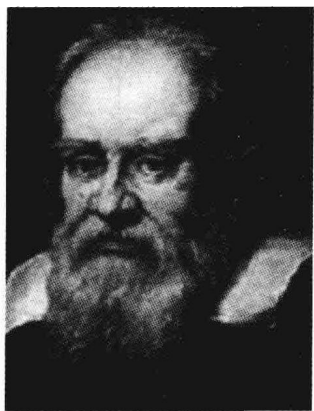
2.2 力学中常见的力	■ 28
2.2.1 万有引力 重力	■ 28
2.2.2 弹性力	■ 29
2.2.3 摩擦力	■ 30
2.3 牛顿运动定律应用实例	■ 32
2.4 伽利略相对性原理	■ 37
2.4.1 伽利略相对性	■ 37
2.4.2 伽利略变换	■ 37
2.4.3 惯性力	■ 38
2.4.4 牛顿运动定律的适用条件	■ 40
2.5 质心与质心运动定理	■ 41
2.5.1 质点系的内力和外力	■ 41
2.5.2 质心	■ 41
2.5.3 质心运动定理	■ 42
2.6 动量定理与动量守恒定律	■ 43
2.6.1 动量	■ 43
2.6.2 动量定理	■ 44
2.6.3 质点系动量定理	■ 46
2.6.4 动量守恒定律	■ 47
2.7 角动量定理与角动量守恒定律	■ 51
2.7.1 力矩	■ 51
2.7.2 角动量	■ 53
2.7.3 质点的角动量定理与角动量守恒定律	■ 55
2.7.4 质点系的角动量定理与角动量守恒定律 ..	■ 58
2.8 功与动能定理	■ 60
2.8.1 功	■ 60
2.8.2 动能定理	■ 64
2.9 势能	■ 68
2.9.1 万有引力势能	■ 68
2.9.2 重力势能	■ 69
2.9.3 弹性势能	■ 70
2.9.4 保守力与非保守力	■ 70
2.9.5 势能及其意义	■ 71
2.10 质点系的功能原理与机械能守恒定律	■ 72
2.10.1 质点系的功能原理	■ 72

2.10.2 机械能守恒定律	73
2.10.3 能量守恒定律	75
2.11 碰 撞	76
2.11.1 碰撞现象	76
2.11.2 完全弹性碰撞	77
2.11.3 完全非弹性碰撞	78
综合复习题 2	78
 第三章 刚体定轴转动	 85
3.1 刚体的转动	85
3.1.1 刚体模型	85
3.1.2 平动 转动	86
3.1.3 描述刚体定轴转动的物理量	87
3.2 转动惯量与定轴转动定律	89
3.2.1 刚体的转动惯量	89
3.2.2 刚体的转动定律	93
3.3 定轴转动中的功能关系	98
3.3.1 力矩的功	98
3.3.2 定轴转动刚体的动能	100
3.3.3 定轴转动的动能定理	100
3.3.4 刚体的重力势能	100
3.3.5 刚体的功能原理与机械能守恒定律	101
3.4 刚体转动的角动量守恒定律	103
3.4.1 刚体定轴转动的角动量守恒	103
3.4.2 角动量守恒的应用	104
综合复习题 3	108
 第四章 机械振动与机械波	 113
4.1 简谐振动	113
4.1.1 简谐振动的基本特征	113
4.1.2 描述简谐振动的特征量	115
4.1.3 简谐振动的速度和加速度	117
4.1.4 简谐振动的旋转矢量图示法	119
4.1.5 简谐振动的能量	122
4.2 简谐振动的合成	125

4.2.1 同方向同频率简谐振动的合成	125
4.2.2 同方向不同频率简谐振动的合成与拍现象	127
4.3 阻尼振动与受迫振动	129
4.3.1 阻尼振动	129
4.3.2 受迫振动	129
4.3.3 共振	130
4.4 平面简谐波	131
4.4.1 波的产生与传播	131
4.4.2 波速、波长以及波的周期和频率	132
4.4.3 简谐波	133
4.5 波的能量与能流密度	139
4.5.1 波的能量	139
4.5.2 能流密度	140
4.6 惠更斯原理	144
4.6.1 惠更斯原理	144
4.6.2 波的衍射	145
4.7 波的叠加原理	145
4.7.1 波的叠加原理	145
4.7.2 波的干涉	146
4.7.3 驻波	148
4.7.4 半波损失	151
4.8 多普勒效应	154
综合复习题 4	157
 第五章 气体动理论	 163
5.1 热运动描述	163
5.1.1 平衡态 准静态过程	163
5.1.2 理想气体物态方程	165
5.2 气体分子热运动	167
5.2.1 分子热运动的基本概念	167
5.2.2 气体分子热运动	167
5.2.3 统计规律的特征	169
5.3 麦克斯韦速率分布律	172
5.3.1 麦克斯韦速率分布律	172

5.3.2 分子速率的统计平均值	■ 173
5.4 理想气体的压强公式	■ 174
5.4.1 理想气体微观模型与统计假设	■ 174
5.4.2 理想气体压强公式	■ 176
5.5 温度的微观本质	■ 178
5.5.1 温度的本质和统计意义	■ 178
5.5.2 气体分子的方均根速率	■ 179
5.6 能量均分定理与理想气体的内能	■ 180
5.6.1 分子运动自由度	■ 180
5.6.2 能量均分定理	■ 181
5.6.3 理想气体的内能	■ 183
5.7 分子碰撞与平均自由程	■ 184
5.7.1 分子碰撞	■ 184
5.7.2 平均自由程	■ 184
综合复习题 5	■ 186
 第六章 热力学基础	 ■ 189
6.1 热力学第零定律与热力学第一定律	■ 189
6.1.1 热力学第零定律	■ 189
6.1.2 功 内能 热量	■ 190
6.1.3 热力学第一定律	■ 192
6.2 理想气体的热力学过程	■ 193
6.2.1 等体过程	■ 193
6.2.2 等压过程	■ 195
6.2.3 等温过程	■ 196
6.2.4 绝热过程	■ 197
6.3 卡诺循环	■ 200
6.3.1 循环过程	■ 200
6.3.2 卡诺循环	■ 201
6.4 热力学第二定律	■ 205
6.4.1 热力学第二定律的两种表述	■ 205
6.4.2 热力学第二定律的实质	■ 205
6.5 可逆过程与不可逆过程	■ 206
6.5.1 可逆过程与不可逆过程	■ 206

6.5.2 卡诺定理	■ 207
6.6 熵	■ 209
6.6.1 熵	■ 209
6.6.2 自由膨胀的不可逆性	■ 211
6.6.3 玻耳兹曼关系	■ 211
6.7 熵增加原理	■ 212
6.7.1 熵增加原理	■ 212
6.7.2 热力学第二定律的统计意义	■ 213
综合复习题 6	■ 214
综合复习题参考答案	■ 217



伽利略

伽利略·伽利雷 (Galileo Galilei, 1564—1642). 意大利著名数学家、物理学家、天文学家和哲学家, 近代实验科学的先驱者。

● 走近科学人物

1590年, 伽利略在比萨斜塔上做了著名的“两个球同时落地”实验, 从此推翻了亚里士多德“物体下落速度和重量成比例”的学说, 纠正了这个持续 1900 年之久的错误结论。

1609年, 伽利略创制了天文望远镜(后被称为伽利略望远镜), 并用来观测天体, 因此发现了月球表面的凹凸不平, 并亲手绘制了第一幅月面图。1610年1月7日, 伽利略发现了木星的四颗卫星, 为哥白尼学说找到了确凿的证据, 标志着哥白尼学说开始走向胜利。借助于望远镜, 伽利略还先后发现了土星光环、太阳黑子、太阳的自转、金星和水星的盈亏现象以及银河是由无数恒星组成等。这些发现开辟了天文学的新时代。

伽利略著有《星际使者》、《关于太阳黑子的书信》、《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》和《关于两门新科学的谈话和数学证明》等著作。

第一章

质点运动学

运动是一种永恒的现象,自然界的一切物质都在不停地运动和变化着.物质的运动形式多种多样,其中机械运动是最简单、最基本的运动.学习质点的机械运动将为研究更为复杂的运动打好基础.

1.1 参考系与坐标系

1.1.1 质点

物理学中的质点是没有体积和形状,只具有一定质量的理想物体.质点是力学中一个十分重要的概念.任何实际物体,大至宇宙中的天体,小至原子、原子核、电子以及其他微观粒子,都具有一定的体积和形状.如果在所研究的问题中,物体的体积和形状是无关紧要的,就可以把它看作质点.例如,地球相对于太阳的运动,由于地球既公转又自转,地球上各点相对于太阳的运动是各不相同的.但是,地球到太阳的距离约为地球直径的一万多倍,在研究地球公转时可以忽略地球的大小和形状对这种运动的影响,认为地球上各点的运动情形基本相同.这时可以把地球看作一个质点.

另外,对于同一个物体,由于研究的问题不同,有时可以把它看作为一个质点,有时则

不能,要根据研究的问题来定.比如,同样对于地球,当我们要研究地球表面的潮汐运动规律时,就必须考虑太阳和月球对地球表面不同地方海水的引力作用规律,这时,就不能把地球看成质点.不过,在不能将物体看作质点的时候,却总可以把这个物体看作为是由许多质点组成的,对其中的每一个质点都可以运用质点运动的结论,叠加起来就可以得到整个物体的运动规律.

1.1.2 参考系

在力学范围内所说的运动是指物体位置的变更.宇宙中的一切物体都处于永恒的运动之中,绝对静止的物体是不存在的.显然,一个物体的位置及其变更总是相对于其他物体而言的,否则就没有意义,这便是机械运动的相对性.因此,为了描述一个物体的运动情形,必须选择另一个运动物体或几个相互间保持静止的物体群作为参考物.只有先确定了参考物,才能明确地表示被研究物体的运动情形.研究物体运动时被选作参考物的物体或物体群,称为**参考系**.例如,研究地球相对于太阳的运动,常选择太阳作参考系;研究人造地球卫星的运动,常选择地球作参考系;研究河水的流动,常选择地面作参考系等.

那么,在描述质点如何运动的问题中,参考系如何选择呢?在研究质点运动的时候,参考系原则上是可以任意选择的.对于物体的同一个运动,选择不同的参考系,对运动的描述是不同的.例如,人造地球卫星的运动,若以地球为参考系,运动轨道是圆或椭圆;若以太阳为参考系,运动轨道是以地球公转轨道为轴线的螺旋线.所以,选择参考系要根据问题的性质、计算和处理上的方便来确定.在上述人造地球卫星的例子中,显然选择地球中心作参考系比选择太阳作参考系要方便得多,结论也要简洁得多.

1.1.3 坐标系

为了把运动物体在每一时刻相对于参考系的位置定量地表示出来,就要在参考系上建立适当的坐标系.坐标系实际上是参考系的数学抽象(两者相对静止),即由团结在参考系上的一组有刻度的射线、曲线或角度来表示.坐标系可以任意选择,但应以描述起来方便和数学规律简单为原则.在同一参考系中,用不同的坐标系描述同一物体运动时,其数学表述是不同的,这与坐标系的选择有关.亦即当选择不同坐标系时,同一物体运动规律描述的数学形式的复杂程度是不同的.应该选择合适的坐标系,以便能得到相对简单的物体运动规律.坐标系的原点可取在参考系的一个固定点上.常用的坐标系有直角坐标系、平面极坐标系、自然坐标系球坐标系、柱坐标系等.

1. 直角坐标系

在参考系上取一固定点作为坐标原点 O , 过点 O 画三条相互垂直的带有刻度的坐标轴, 即 x 轴、 y 轴和 z 轴, 就构成了**直角坐标系** $O-xyz$. 通常采用的直角坐标系属右旋系, 即当右手四指由 x 轴正方向转向 y 轴正方向时, 伸直的拇指则指向 z 轴的正方向. 如图 1-1 所示.

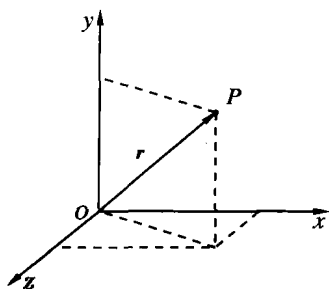


图 1-1 直角坐标系

2. 平面极坐标系

在圆周运动一类的平面运动时, 采用平面极坐标系更为简便. 取参考系上一固定点 O 作极点, 过极点所作的一条固定射线 Oa 称为极轴. 过极轴作平面, 并假定质点就在该平面内运动. 在某时刻质点处于点 P , 连线 OP 称为点 P 的极径, 用 ρ 表示; 自 Oa 到 OP 所转过的角 θ 称为点 P 的极角. 于是点 P 的位置可用两个量 (ρ, θ) 来表示, 这两个量就称为点 P 的极坐标, 如图 1-2 所示.

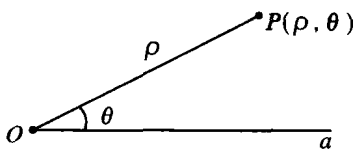


图 1-2 平面极坐标系

3. 自然坐标系

沿着质点的运动轨道所建立的坐标系称为自然坐标系. 取轨道上一固定点为坐标原点, 同时规定两个随质点位置的变化而改变方向的单位矢量, 一个是指向质点运动方向的切向单位矢量, 用 e_t 表示; 另一个是垂直于切向并指向轨道凹侧的法向单位矢量, 用 e_n 表示, 如图 1-3 所示.

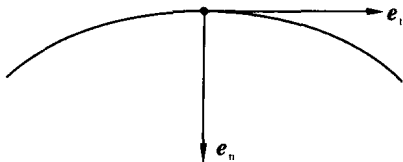


图 1-3 自然坐标系

思考题 1.1

1. 在什么情况下,物体可以当作质点处理?
2. 说明选取参考系、建立坐标系的必要性.
3. 仅就描述质点运动而言,说明参考系应该如何选择.

1.2 描述质点运动的物理量

1.2.1 时间 时刻

“时间”这个词在我们的日常生活中经常提到. 在物理学中,它代表一个重要物理量,是国际单位制中的七个基本物理量之一.

在生活的习语中,时刻和时间间隔(简称时间)这两个概念常被混淆. 例如,有人问:“飞机什么时间起飞?”又问:“飞机从北京到沈阳飞行多长时间?”在这两句话中,“时间”的含义是完全不同的. 前一句话中的“时间”指的是物理学中“时刻”的概念,表示飞机起飞那一瞬间时钟的读数. 而后一句话中的“时间”指的是物理学中“时间间隔”的概念,表示飞机从北京起飞那一瞬间时钟的读数与飞机连续飞行到达沈阳机场着陆那一瞬间时钟读数之间的间隔.

在一定坐标系中考察质点运动时,质点的位置是与时刻相对应的,质点运动所经过的路程是与时间相对应的. 时间是**标量**,单位是**秒**,用字母 s 表示.

1.2.2 位置矢量 运动学方程

如图 1-4,点 P 代表所讨论的质点,点 O 代表参考系上的一个固定点,以后建立坐标系时坐标原点就取在这里. 点 P 在任意时刻的位置,可用从点 O 到点 P 所引的有向线段 $\vec{OP}$ 来表示, $\vec{OP}$ 可用一个矢量 $\mathbf{r}$ 来代表,这个矢量 $\mathbf{r}$ 就称为质点 P 的**位置矢量**,简称**位矢**. 位置矢量包含了质点位置的两方面的信息,一是质点 P 相对参考系固定点 O 的方位;二是质点 P 相对参考系固定点 O 的距离大小. 这正是矢量所具有的两个基本特征. 矢量通常用黑体字母表示.

$$\mathbf{r} = \vec{OP}$$

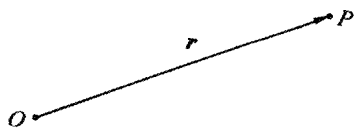


图 1-4 位置矢量

质点在运动, 位置在变化, 表示质点位置的位置矢量 $\mathbf{r}$ 必定随时间改变. 也就是说, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数, 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-1)$$

式(1-1)称为质点的运动学方程, 它不仅给出了质点运动的轨迹, 也给出了质点在任意时刻所处的位置.

在直角坐标系中, 位置矢量 $\mathbf{r}$ (如图 1-5) 可以表示为

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

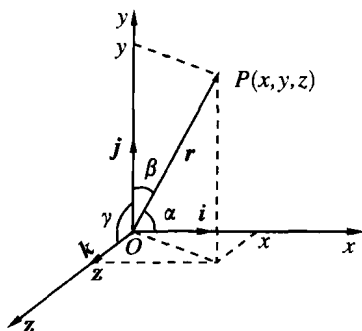


图 1-5 直角坐标系中的位置矢量

其中 $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ 和 $\mathbf{k}$ 分别是 x 、 y 和 z 轴正方向的单位矢量. 位置矢量 $\mathbf{r}$ 的大小可由下式决定

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-3)$$

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的方向可用它的方向余弦来表示

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

这三个方向余弦存在下面的关系

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1-4)$$

质点运动的方程式(1-1)可以写成分量形式

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

1.2.3 位移 路程

设质点沿图 1-6 所示的任意曲线运动, 质点在 t 时刻处于点 A , 其位置矢量为 $\mathbf{r}_A$, 经过时间 Δt , 质点到达点 B , 位置矢量为 $\mathbf{r}_B$. 在此过程中, 质点位置的变更可以用从点 A 到点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示, 或写成 $\Delta\mathbf{r}$, 这称为质点由 A 到 B 的位移. 位移 $\Delta\mathbf{r}$ 是矢量, 它既表示质点位置变更的大小(点 A 与点 B 之间的距离), 又表示这种变更的方向(点 B 相对于点 A 的方位). 由图 1-6 可以看出

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-6)$$

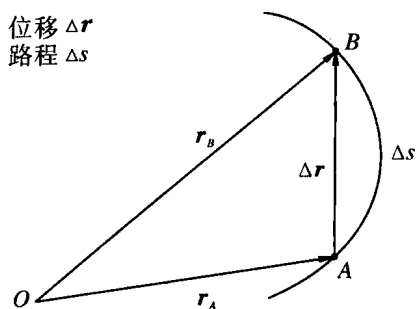


图 1-6 位移和路程

式(1-6)表示,质点从点 A 到点 B 所完成的位移 $\Delta \mathbf{r}$, 等于点 B 的位置矢量 $\mathbf{r}_B$ 与点 A 的位置矢量 $\mathbf{r}_A$ 之差.

质点在 t 时间内所经过的**路程**, 是曲线 AB 的长度, 写作 Δs , 是标量. 显然, 路程 Δs 与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是不同的.

在直角坐标系中, 位移矢量可以表示为

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k}\end{aligned}\quad (1-7)$$

位移矢量的三个分量为

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1, \quad \Delta z = z_2 - z_1 \quad (1-8)$$

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (1-9)$$

位移的方向为

$$\cos \alpha = \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{\Delta y}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{\Delta z}{|\Delta \mathbf{r}|} \quad (1-10)$$

其中 α, β, γ 分别为位矢 $\mathbf{r}$ 与 x, y, z 三轴的夹角.

显然, 路程 Δs 与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是不同的. 位移和路程的区别主要有以下几个方面:

- (1) 位移是矢量, 路程是标量.
- (2) 位移表示质点运动的实际效果, 与质点经历的路径无关, 只与始末位置有关. 路程是质点实际运动轨道的长度, 与质点所经历的路径有关.
- (3) 在一般情况下, 位移的大小不等于路程.

1.2.4 速率 速度

质点位置的变化与一段时间相联系. 将位移矢量与时间的比定义为**速度**, 用 $\mathbf{v}$ 来表示. 速度是一个矢量, 物理意义是单位时间内质点所发生的位移, 是一个表示物体运动快慢的物理量. 速度的大小称为**速率**.

1. 平均速度 平均速率

(1) 平均速度

一般情况下,质点运动的方向和运动的快慢在各个时刻或者在各个位置上是不同的.为了大致地描述质点运动的方向和运动的快慢,首先引入**平均速度**.如果质点在 Δt 时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,则质点的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 定义为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-11)$$

平均速度是矢量,这个矢量的大小决定于位移的模 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与所取时间间隔 Δt 的比值,它的方向与位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同.

由此可见,平均速度的大小和方向在很大程度上依赖于所取时间间隔的大小.所以,当使用平均速度来表征质点运动时,要指明相应的时间间隔.

(2) 平均速率

质点所经过的路程 Δs 与所需时间 Δt 的比值称为质点在 Δt 时间内的**平均速率**.即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-12)$$

平均速率是标量,它等于质点在单位时间内所通过的路程,而不考虑运动方向如何.

2. 瞬时速度 瞬时速率

(1) 瞬时速度

平均速度与所取的时间间隔有关,时间间隔越短,在这段时间内运动的变化就越不明显,平均速度就越接近于真实速度.如果所取时间间隔 Δt 趋近于零,平均速度的极限就表示质点在某一时刻的真实速度,这个极限就是质点运动的**瞬时速度**.瞬时速度也就是质点的真实速度.数学上可以表示为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明,质点运动的瞬时速度等于质点的位置矢量对时间的微商.我们所说的物体运动速度,通常是指它的瞬时速度.

(2) 瞬时速率

Δt 趋于零时平均速率的极限,定义为质点运动的**瞬时速率**,或称速率,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-14)$$

当 Δt 趋于零时,路程的极限等于质点位移矢量的模的极限,所以

$$v = \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}| \quad (1-15)$$

速率等于速度的模,即等于速度的大小,所以速率总是正值.

速度和速率具有相同的单位,在国际单位制中为米每秒,表示为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

在直角坐标系中,平均速度与速度的表示方法,读者可依据位置矢量和位移矢量的表示方法自行推导.

速度与速率的区别是非常明显的,首先它们的定义是不同的,其次速度是矢量,而速率是标量.但在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,由于 $ds = |d\mathbf{r}|$,而 dt 永远是正量,所以 $v = \frac{ds}{dt} = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}|$,即速率等于速度矢量的大小.值得注意的是,这种关系对有限时间段内的平均速度和平均