

21 世纪高等学校规划教材

大学物理教程

主 编 常文利

副主编 赵海军



上海交通大学出版社

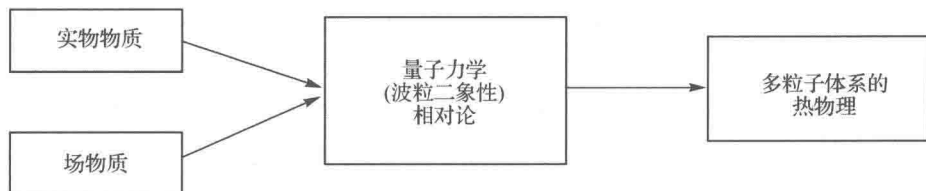
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

前言 Preface

物理学是研究物质、能量和它们的相互作用的自然科学。以物理学基础为内容的大学物理课程,是高等学校理工科各专业学生的一门重要的通识性必修课程。该课程所传授的描述物质世界的基本概念、基本理论、基本方法和基本思维能力是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的基础知识。

近年来,高等工程教育各专业发展的环境发生了巨大变化。2008年1月,我国教育部颁布了《工程教育专业认证标准(试行)》。2013年6月17日,中国加入《华盛顿协议》,工程教育质量得到国际认可。我国高等工程教育经历了从工程技术型、工程科学型到工程实践型的演变和发展。为了适应工程教育形式的变化和满足学分制的需要,许多二本高校和独立学院的工科专业调整人才培养计划,大学物理课程的设置由两个学期减为一个学期,学时也在大幅减少。为了解决学时少、内容多与引入更多的工程应用内容的矛盾,整合《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》(2010年版)中的A类内容,适度引进B类内容,搭建了本教材的内容体系。总体思想是体现大学物理课程的基础性与应用性。其特点如下:

(1)搭建了不同于传统大学物理的内容框架体系,帮助学生获得较完整、统一的物质世界的图像。我们用近代物理中物质的波粒二象性的思想统筹本教材。以物质世界的层次和存在形式为主线,按照由经典物理到近代物理、由少体问题到多体问题、由线性系统到复杂系统的思路,把与热现象相关的多粒子体系的热物理放在了最后部分。教材体系如下:



(2)以知识点为载体,以物理史为引导,注重传授物理学中蕴含的物理精神、物理思想和物理方法。例如,引导学生从实际问题中建立合理的物理模型以及培养物理模型近似估算能力。引导学生不仅关注所学知识点,更要了解知识点的结构体系。培养学生具备由点到面建立起相应内容的框架体系的能力,构建理工科学生实践体系的扎实根基及科学方法论基础。帮助学生理解知识形成有个性特征的体系,以利于实践能力的培养。

(3)以近代物理的思想重新整合了经典物理部分的内容,体现了先进的教学理念。例如,在宏观低速实物物质的运动规律部分,强化了用三大守恒定律描述实物物质的平动和转动内容。还将当今科技发展的一些成果以内容叙述、例题和作业形式渗透到教材中,以激发学生学习物理的兴趣。

(4)注重基本概念、基本规律和基本方法的讲授。从学生实际情况出发,删减了一些过于繁难的问题,注意讲述方式的优化。

本教材由兰州交通大学常文利教授任主编,赵海军任副主编,参与编写的还有李宁、潘多荣和许幸芬。具体分工如下:第1章、第8章至第12章、习题及附录由常文利编写;第2章至第7章由赵海军、李宁、潘多荣和许幸芬共同编写。全书由常文利负责统稿和定稿。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

目 录 Contents

第一篇 宏观低速物质的运动规律

第 1 章 质点运动学	3
1.1 质点运动的描述	3
1.1.1 参考系与坐标系	3
1.1.2 质点	4
1.1.3 质点的位置矢量和运动方程	4
1.1.4 质点的位移和路程	5
1.1.5 质点的速度和速率	6
1.1.6 质点的加速度	7
1.1.7 直角坐标系中运动学的两类问题	8
1.2 圆周运动	11
1.2.1 自然坐标系 切向速度和法向加速度	11
1.2.2 圆周运动的角量描述	13
1.3 相对运动	16
本章提要	18
习题	21
第 2 章 质点动力学	24
2.1 牛顿运动定律	24
2.1.1 牛顿运动三定律	25
2.1.2 常见力和基本力	26
2.1.3 牛顿定律的应用	29
2.1.4 惯性参考系 惯性力	31
2.2 动量定理	34

2.2.1	质点的动量定理	34
2.2.2	质点系的动量定理	37
2.2.3	动量守恒定律	40
2.3	功和能 机械能守恒定律	42
2.3.1	功和功率	42
2.3.2	动能 动能定理	45
2.3.3	保守力 势能 功能原理	47
2.3.4	功能原理 机械能守恒定律	51
	本章提要	55
	习题	58
第3章	刚体力学基础	60
3.1	刚体运动的描述	60
3.1.1	刚体的平动和转动	60
3.1.2	刚体的定轴转动	61
3.1.3	描述刚体定轴转动的物理量	61
3.2	刚体的定轴转动定律	62
3.2.1	力对转轴的力矩	62
3.2.2	刚体定轴转动的转动定律	64
3.2.3	转动惯量	65
3.2.4	转动定律的应用举例	67
3.3	刚体定轴转动的角动量定理 角动量守恒定律	69
3.3.1	角动量定理	70
3.3.2	角动量守恒定律	74
3.4	刚体定轴转动的动能定理	76
3.4.1	刚体的转动动能	76
3.4.2	刚体的重力势能	77
3.4.3	力矩做的功	77
3.4.4	定轴转动的动能定理	78
3.4.5	定轴转动的机械能守恒定律	78
	本章提要	81
	习题	82
第4章	周期振动	85
4.1	简谐振动的运动学描述	85
4.1.1	简谐振动的运动方程	85
4.1.2	简谐振动的特征量	86
4.2	简谐振动的动力学描述	88

4.2.1 简谐振动的动力学方程	88
4.2.2 简谐振动的能量	90
4.3 旋转矢量法	92
4.4 简谐振动的合成	94
4.4.1 两个同方向同频率的简谐振动的合成	94
4.4.2 两个同方向不同频率简谐振动的合成 拍	96
4.5 阻尼振动	98
4.6 受迫振动 共振	99
本章提要	101
习题	103

第二篇 经典波

第 5 章 机械波	107
5.1 机械波的产生和传播	107
5.1.1 机械波的形成和传播	107
5.1.2 波的几何描述	109
5.1.3 描述波动特征的物理量	109
5.2 平面简谐波的波函数	110
5.2.1 平面简谐波函数	111
5.2.2 波函数的物理意义	112
5.3 波的能量	114
5.3.1 波能量的传播	115
5.3.2 能流 能流密度	116
5.3.3 声波简介	117
5.4 惠更斯原理	118
5.5 波的叠加原理 波的干涉	119
5.5.1 波的叠加原理	119
5.5.2 波的干涉	119
5.6 驻波	122
5.6.1 驻波的产生	122
5.6.2 驻波的波函数	122
5.6.3 半波损失	124
本章提要	125
习题	127
第 6 章 波动光学	130
6.1 光的相干性	130

6.1.1	光波	130
6.1.2	光源	131
6.1.3	光的干涉	132
6.1.4	光程 光程差	134
6.2	分波面法干涉	136
6.2.1	杨氏双缝干涉	136
6.2.2	菲涅耳双镜	138
6.2.3	洛埃镜	138
6.3	分振幅法干涉	139
6.3.1	薄膜干涉	139
6.3.2	薄膜的等厚干涉	143
6.3.3	迈克尔逊干涉仪	148
6.4	单缝衍射	149
6.4.1	光的衍射现象	150
6.4.2	惠更斯-菲涅耳原理	150
6.4.3	夫琅禾费单缝衍射	151
6.5	光栅衍射	155
6.5.1	衍射光栅	155
6.5.2	光栅衍射条纹的成因	155
6.6	圆孔衍射	160
6.6.1	圆孔衍射实验	160
6.6.2	光学仪器的分辨率	161
6.7	光的偏振	162
6.7.1	偏振光与自然光	162
6.7.2	马吕斯定律	165
6.7.3	反射和折射时光的偏振	167
	本章提要	169
	习题	172

第三篇 场与电磁相互作用

第7章	静电场	177
7.1	电荷 库仑定律	177
7.1.1	电荷及其性质	177
7.1.2	库仑定律	178
7.1.3	静电力叠加原理	179
7.2	电场 电场强度	179
7.2.1	电场	179

7.2.2	电场强度	180
7.2.3	电场强度的计算	180
7.3	电通量 静电场的高斯定理	185
7.3.1	电场线	185
7.3.2	电通量	186
7.3.3	高斯定理	187
7.3.4	高斯定理的应用	189
7.4	静电场的环路定理 电势	193
7.4.1	静电场的环路定理	193
7.4.2	电势能	194
7.4.3	电势 电势差	195
7.4.4	电势的计算	195
7.5	导体和电介质中的静电场	197
7.5.1	导体的静电平衡	197
7.5.2	空腔导体和静电屏蔽	199
7.5.3	电介质中的静电场	201
7.6	电容 电容器	204
7.6.1	孤立导体的电容	204
7.6.2	电容器的电容	205
7.7	静电场的能量	207
7.7.1	电容器的能量	207
7.7.2	电场能量 电场能量密度	207
	本章提要	208
	习题	210
第 8 章	稳恒电流的磁场	212
8.1	稳恒电流 电动势	212
8.1.1	稳恒电流 稳恒电场	212
8.1.2	电源电动势	214
8.2	磁场 磁感应强度	216
8.2.1	磁现象	216
8.2.2	磁场	217
8.2.3	磁感应强度	217
8.3	毕奥-萨伐尔定律	219
8.3.1	电流元	219
8.3.2	毕奥-萨伐尔定律	219
8.3.3	典型电流的磁场计算——毕-萨定律的应用	220
8.4	磁场的高斯定理和安培环路定理	224

8.4.1	高斯定理	224
8.4.2	安培环路定理	227
8.5	磁场对运动电荷及载流导线的作用	234
8.5.1	带电粒子在磁场中的运动	234
8.5.2	霍尔效应	237
8.5.3	磁场对载流导线的作用 安培定律	239
8.5.4	磁场对载流线圈的作用	243
8.6	磁介质中的磁场	244
8.6.1	磁介质的分类	245
8.6.2	弱磁介质的磁化	246
8.6.3	磁介质中磁场的基本定理	247
8.6.4	铁磁质	249
	本章提要	251
	习题	254
第9章	电磁场与麦克斯韦方程组	257
9.1	电磁感应定律	257
9.1.1	电磁感应实验现象	257
9.1.2	楞次定律	258
9.1.3	法拉第电磁感应定律	259
9.2	产生感应电动势的机理	261
9.2.1	动生电动势	262
9.2.2	感生电动势与感生电场	266
9.2.3	自感电动势	270
9.3	磁场能量	272
9.3.1	自感磁能	272
9.3.2	磁场的能量密度	273
9.4	麦克斯韦方程组	275
9.4.1	位移电流	275
9.4.2	全电流定律	277
9.4.3	麦克斯韦方程组的积分形式	278
	本章提要	281
	习题	283

第四篇 近代物理基础

第10章	狭义相对论基础	289
10.1	伽利略相对性原理 牛顿力学时空观	289

10.1.1	伽利略变换	289
10.1.2	经典力学时空观	290
10.2	爱因斯坦的两个基本假设 洛伦兹变换	291
10.2.1	狭义相对论的理论与实验基础	291
10.2.2	狭义相对论的基本原理	293
10.2.3	洛伦兹变换	294
10.3	爱因斯坦的时空观	297
10.3.1	同时性的相对性	297
10.3.2	时间的延缓	298
10.3.3	动杆的收缩(洛伦兹收缩)	300
10.4	狭义相对论动力学基础	301
10.4.1	动量守恒定律的洛伦兹变换 质量-速度 关系	301
10.4.2	相对论中的质量-能量关系	304
	本章提要	307
	习题	310
第 11 章	量子力学基础	312
11.1	黑体辐射 普朗克量子化	312
11.1.1	黑体辐射	312
11.1.2	普朗克的能量量子化	314
11.2	光的量子性	315
11.2.1	光电效应实验	315
11.2.2	爱因斯坦光子说	316
11.2.3	康普顿散射	317
11.3	玻尔的氢原子理论	319
11.3.1	氢原子光谱	319
11.3.2	原子结构模型	319
11.3.3	玻尔的三点基本假设	320
11.3.4	氢原子的能级和光谱公式	321
11.4	德布罗意波	323
11.5	不确定度关系	326
11.6	波函数 薛定谔方程	327
11.6.1	波函数	327
11.6.2	薛定谔方程	328
11.6.3	定态薛定谔方程	329
	本章提要	332
	习题	333

第五篇 热学

第 12 章 多粒子体系的热物理	337
12.1 理想气体的描述	337
12.1.1 理想气体的宏观描述	337
12.1.2 理想气体的微观模型	341
12.2 描述理想气体的统计规律	342
12.2.1 理想气体的压强公式	343
12.2.2 温度的微观本质	345
12.2.3 能量均分定理 理想气体的内能	347
12.2.4 麦克斯韦速率分布律	351
12.3 热力学第一定律及其应用	357
12.3.1 内能 功 热量与热容	357
12.3.2 热力学第一定律	359
12.3.3 绝热过程	366
12.4 循环过程 卡诺循环	369
12.4.1 循环过程	369
12.4.2 卡诺循环	372
12.5 热力学第二定律	377
12.5.1 热力学第二定律的表述	377
12.5.2 两种表述的等价性	378
12.5.3 可逆过程与不可逆过程	379
12.5.4 卡诺定理	380
12.5.5 热力学第二定律的统计意义	380
本章提要	381
习题	384
附录 1 常用基本物理常量表	387
附录 2 国际单位制(SI)	388
附录 3 希腊字母表	390
参考文献	391

第一篇

宏观低速物质的运动规律

以牛顿力学为基础的经典力学,作为普适力学理论兴盛了约 300 年。20 世纪初,在高速领域和微观领域经典力学被相对论和量子力学所取代。但在一般的工程技术领域,包括机械制造、土木建筑,甚至于航空航天技术中,经典力学仍然保持着充沛的活力而起着基础理论的作用。它的这种实用性是我们进入大学阶段还要学习经典力学的一个重要原因。现代物理理论和实验已经证明,经典力学中的一些重要概念和定律,如动量、角动量、能量及其守恒定律等,也适用于包括高速和微观领域在内的整个物理学。只有在对经典力学有较深刻理解的基础上,才有可能在工程领域中进行应用。力学的基本原理是物理学其他分支的基础,对于其他自然科学也具有重要的意义。本篇主要讨论了在宏观低速范畴内物体的平动、转动和振动这三种运动形式的规律。平动、转动和振动是经典力学中物质粒子性的表现。

引言

物理学作为一门科学是从伽利略首创实验、物理思维和数学演绎相结合的科学方法开始的。正是伽利略提出“首先要研究物体怎样运动,然后才能研究物体为什么运动”,才使物理摆脱了哲学家们关于运动原因的众说纷纭的论争,走上了科学的道路。我们也从运动的描述开始讨论。运动学是从几何的观点来描述物体的运动,即研究物体的空间位置随时间的变化关系,不涉及引发物体运动和改变运动状态的原因。

本章着重讨论了描述质点运动的位置矢量、位移、速度和加速度四个物理量的定义及其矢量性、相对性和瞬时性。讨论了运动方程和直角坐标系中运动学的两类基本问题;在自然坐标系中和平面极坐标系中讨论了圆周运动的线量描述和角量描述,并给出了角量和线量描述的关系。

1.1 质点运动的描述

1.1.1 参考系与坐标系

1. 经典力学中的时间与空间

力学的研究对象是物体的机械运动。所谓机械运动是指物体的空间位置随时间的变化。在经典力学的范围内,空间和时间不依赖于物质的存在和运动的时空背景,称为绝对的时空观,但空间和时间需要借助物质的存在和运动去度量。

空间可以通过物质的存在反映出它所具有的广延性,它是沿四面八方无限均匀延伸的范围,并认为空间中的直线永远是直的,称为欧几里得空间。空间范围的度量中最基本的是长度的计量,其国际单位为米(m)。在 1983 年 10 月召开的第 17 届国际计量大会上,米的定义为:“米是 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内光在真空中行程的长度。”

时间可以通过物质的运动反映出它所具有的持续性和顺序性,它是从古到今,从先到后单方向的均匀连续变化,从不逆向。时间间隔的量度需要借助于周期性运动来计量,其国际单位为秒(s)。1967 年召开的第 13 届国际度量衡大会对秒的定义是:铯-133 原子基态的两个超精细能级间跃迁对应辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。

经典力学的绝对时空观与人们的经验相协调,容易使人接受。但是它毕竟只是时空性质的一种假设。近代物理学表明空间和时间与物质的存在和运动是紧密联系的,绝对时空观只是实际时空性质的一种近似。

2. 参考系

物体的运动是绝对的,但是描述物体的运动却是相对的,即在具有不同运动状态的参考对象看来,同一个物体的运动状态是不同的.从站在路边的人的角度去看和从骑自行车的人的角度去看,一辆在公路上行驶的汽车的运动状态是不同的.但我们认为,在具有相同运动状态(相对静止)的参考对象看来,一个物体的运动状态是相同的.为了描述物体的运动,我们选择与一个确定的参考对象相对静止的所有物体作为一个系统,称为参考系.在一个确定的参考系中,物体的运动状态是可以确定的.

3. 坐标系

在选定参考系后,为定量描述物体的运动,我们取参考系中的任意一点作为坐标原点建立坐标系.常用的坐标系有直角坐标系、极坐标系、柱坐标系、球坐标系等,另外还有描述曲线运动的自然坐标系.

1.1.2 质点

在研究力学问题时,我们常常需要对研究对象进行模型化,最基本的力学模型是质点.所谓质点,是指忽略对象的大小和形状,并将全部的质量集中在一个几何点上的模型.把物体当作质点来处理是有条件的、相对的,而不是无条件的、绝对的.例如,研究地球绕太阳公转时,由于地球到太阳的平均距离约为地球半径的 10^4 倍,则地球上各点对于太阳的运动可以看作相同.所以,在研究地球绕太阳公转时,可以把地球当作质点;但在研究地球上物体的运动时,就不能把地球看作质点来处理了.

研究对象可看作质点的条件如下.

(1)研究对象的尺度在所研究问题中相对很小,可忽略其大小和形状,看作质点.例如,研究地球围绕太阳公转运动时,由于地球的尺度与公转轨道尺度相比很小,可忽略其大小和形状,看作质点.而在研究地球的自转运动中,不能将地球看作质点.

(2)研究对象发生平动,即对象上各点的运动状态完全相同时,可看作质点.

质点的概念是经过科学的抽象而形成的物理量.把物体视为质点的这种抽象的研究方法,在实践和理论上都有重要意义.当所研究的物体不能看作质点时,可以把整个物体看成由许多的质点所组成,弄清楚这些质点的运动,就可以明白整个物体的运动情况了.所以,研究质点的运动是研究物体运动的基础.

1.1.3 质点的位置矢量和运动方程

为了定量描述质点的运动,我们在选定的参考系上建立坐标系,则质点的位置就可以用从坐标原点 O 到质点所在位置 P 的矢量 r 来描述,称为位置矢量,简称位矢.在直角坐标系中,令 x 、 y 、 z 方向的单位矢量分别为 i 、 j 、 k ,则位置矢量的直角坐标系表达式为

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

其中,位矢的大小为

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

方向为

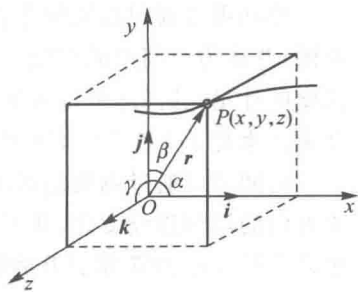


图 1.1 直角坐标系中的位矢

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

当质点运动时,位置不断变化,位矢是时间的函数,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-3)$$

该函数描述了质点位置随时间变化的过程,称为运动方程.在不同的坐标系中,运动方程有不同的形式.在直角坐标系中,运动方程可写为

矢量形式

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

分量形式

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-5)$$

将运动方程分量形式中的 t 消去,可得到质点运动的轨迹方程.

例 1.1 求解下列质点运动方程的轨迹方程.

$$(1) \mathbf{r}(t) = R\cos(\omega t)\mathbf{i} + R\sin(\omega t)\mathbf{j}$$

$$(2) \mathbf{r}(t) = vt\mathbf{i} + (h - \frac{1}{2}gt^2)\mathbf{j}$$

解:(1)质点运动方程的分量形式为 $\begin{cases} x = R\cos(\omega t) \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases}$,两式平方相加可得轨迹方程,即

$$x^2 + y^2 = R^2$$

该质点做圆周运动.

(2)运动方程的分量形式为 $\begin{cases} x = vt \\ y = h - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$,将 $t = \frac{x}{v}$ 代入消去 t 可得轨迹方程,即

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

该质点的运动轨迹为抛物线.

1.1.4 质点的位移和路程

如图 1.2 所示,在质点的运动过程中,质点某一时刻 t 位于 A 点,经过 Δt 时间间隔后位于 B 点,相应的位置矢量由 \mathbf{r}_A 变为 \mathbf{r}_B .我们定义在 Δt 时间间隔内位置矢量的增量为位移矢量(简称位移),即

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

它表示在 Δt 时间内质点位矢的变化.在直角坐标系中可写为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_B\mathbf{i} + y_B\mathbf{j} + z_B\mathbf{k}) - (x_A\mathbf{i} + y_A\mathbf{j} + z_A\mathbf{k}) = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-7)$$

其中,位移大小为

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

位移方向由 A 指向 B .

需要注意,位移大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 的区别. Δr 表示初末时刻位矢大小的变化量.

$$\Delta r = |\mathbf{r}_B| - |\mathbf{r}_A| = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} - \sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2}$$

如图 1.2 所示,一般 $\Delta r \neq |\Delta r|$.

在质点的运动过程中,运动轨迹的长度称为质点在这一运动过程所经过的**路程**,记作 Δs ,路程是标量.

位移与路程是两个不同的物理量.位移为矢量,而路程为标量,并且位移的大小一般不等于路程,即 $|\Delta r| \neq \Delta s$.只有当质点做单向直线运动时,两者才相等;或者在运动时间间隔 $\Delta t \rightarrow 0$ 时位移大小和路程相等,即 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta r| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s$,或者 $|dr| = ds$.

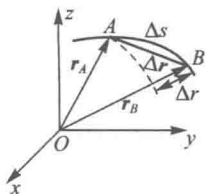


图 1.2 位移与路程

1.1.5 质点的速度和速率

为定量描述质点运动的快慢,我们引入物理量速度和速率.

1. 平均速度和瞬时速度

若质点在时间间隔 Δt 内发生的位移为 Δr ,则定义 Δt 时间内的**平均速度**为

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度是矢量,其方向为位移矢量 Δr 的方向.平均速度只是某一个时间段内的平均效果,不能精细地描述质点每一时刻的运动快慢.因此,我们引入**瞬时速度**.

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度的极限称为质点在 t 时刻的**瞬时速度**(简称**速度**),即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-9)$$

可见,速度是位矢对时间的一阶导数,上式在任意坐标系中均成立.

为什么可以这样定义质点在 t 时刻的瞬时速度?如图 1.3 所示,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,弧长 \widehat{AB} 趋近于弦长 \overline{AB} ,曲线 s 趋近于直线 AB ,其长度为 $|\Delta r|$,平均速度 $\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$ 趋近于瞬时速度 $\frac{dr}{dt}$.也就是说,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, B 点 $\rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow$ 无限接近 A 点, AB 趋近于 A 点的切线.速度方向沿运动轨迹的切线方向.

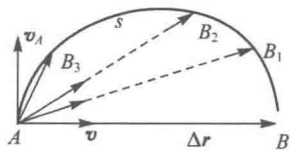


图 1.3 平均速度和瞬时速度

下面我们考虑直角坐标系情况,速度可表示为

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j + \frac{dz}{dt}k = v_x i + v_y j + v_z k \quad (1-10)$$

其大小为

$$v = \left| \frac{dr}{dt} \right| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-11)$$

在国际单位制中,速度的单位是米·秒⁻¹($m \cdot s^{-1}$).

2. 平均速率和瞬时速率

若质点在时间间隔 Δt 内发生的路程为 Δs ,则定义 Δt 时间内的**平均速率**为

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

平均速率是标量.由于一般情况下 $|\Delta r| \neq \Delta s$,因此平均速度的大小一般不等于平均速率,即 $|\bar{v}| \neq \bar{v}$.

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速率的极限称为质点在 t 时刻的**瞬时速率**(简称**速率**)为