

大学物理

上册 (第二版)

戴坚舟 钱水兔 阴其俊 汪溶 编著

华东理工大学出版社

大学物理

上册 (第二版)

戴坚舟 钱水兔 阴其俊 汪溶 编著

华东理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理：上册/戴坚舟等编著．—2版．—上海：
华东理工大学出版社，2007.2

ISBN 978-7-5628-2016-1

I. 大... II. 戴... III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146961 号

大学物理上册(第二版)

编 著/戴坚舟 钱水兔 阴其俊 汪 溶

责任编辑/李国平

封面设计/王晓迪

责任校对/李 晔

出版发行/华东理工大学出版社

地址：上海市梅陇路 130 号,200237

电话：(021)64250306(营销部)

传真：(021)64252707

网址：www.hdlgpress.com.cn

印 刷/上海展强印刷有限公司

开 本/787mm×960mm 1/16

印 张/19.75

字 数/393千字

版 次/2002年11月第1版 2007年2月第2版

印 次/2007年2月第1次

印 数/17141—22190册

书 号/ISBN 978-7-5628-2016-1/O·176

定 价/26.00元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换)

第二版前言

“大学物理”自 2002 年出版以来,受到许多从事“大学物理”教学的教师的关心,提出了不少有益的意见.在教师和出版社的共同努力下,本书第二版终于与读者见面了.

本书第二版保留了第一版的特色和风格,力求清晰、简明,富于哲理性,隐含方法论,对某些章节进行补充和改写.第二版中,重新编写了相对论一章,强化物理概念,加深学生对相对论时空观的理解.对玻耳兹曼分布律、电位移矢量等章节作了补充和改写,使学生容易理解和接受,对某些例子进行补充和延伸.

本书第二版中力学、振动和波、量子力学由戴坚舟改编,电磁学由阴其俊改编,气体动理论和热力学由钱水兔改编,相对论由汪溶改写,虽然编者对提高书稿的质量做了许多工作,但由于水平有限,书中仍有许多不足之处,敬请广大读者批评指正.

2006 年 9 月

前 言

本书是根据原国家教委物理课程指导委员会制定的《高等工业学校物理课程基本要求》的精神,结合多年来的教学实践编写而成的。全书包括力学、振动和波、气体动理论和热力学、电磁学、光学、相对论和量子物理。

物理学是工科大学生必修的基础理论课。该课程充满辩证法和方法论内容,具有丰富的思想方法,是一门典型的思维上训练和方法上传授的课程,也是一门基础学科与工程学科相衔接的关键性课程。本书编者的共同愿望是使本书不仅能帮助读者较好地掌握物理学的基本内容、基本规律,同时使读者掌握科学的分析方法,认识基础学科与工程学科在分析方法上的区别和联系,传授工程型思维方法。

在本书编写过程中,我们以辩证唯物主义观点来阐述物理学的基本规律,突出科学方法论,注意基础学科与工程学科之间的联系,特别注重在分析方法上的衔接;贯彻“少而精、学到手”的原则;对物理概念的阐述和分析,力求清晰、简明,便于自学,富有哲理性,隐含方法论。在系统阐述物理的基本规律、基本方法、基本概念的同时,注意培养学生用高等数学来分析和解决问题的能力,以便对学生进行科学思维的训练。

此外,考虑到不同专业对物理教学的要求以及学生层次、教学课时的差异,除了基本内容以外,同时编写了一些属于提高性质的内容,在书中以“*”标出,供教学中选用或参考,不作为本课程的基本内容。

本书中的力学、振动和波、量子物理由戴坚舟执笔;电磁学由阴其俊执笔;气体动理论和热力学、光学由钱水兔执笔;相对论由陈早生执笔。全书由戴坚舟统稿审定。

编者在此要感谢刘宝坤、施善定、包曼玲、许丽敏、黄天祥、李燮里等,他们为本书编写提出了许多中肯意见及提供部分资料,使本书增色不少。同时感谢汪溶、陆慧、房毅,他们为本书的编写也做了大量的工作。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,衷心希望读者批评指正,以便在修订时予以充实、提高和完善。

编 者

2002年9月

目 录

第一篇 力 学

1 质点的运动规律	3
1.1 理想模型——质点、刚体	3
1.2 质点的运动及其描述	4
1.2.1 参照系和坐标系	4
1.2.2 位置矢量和运动方程	5
1.2.3 速度	6
1.2.4 加速度	8
1.3 匀变速运动	11
1.3.1 匀变速直线运动	12
1.3.2 抛体运动	13
1.4 圆周运动	15
1.4.1 切向加速度和法向加速度	16
1.4.2 圆周运动的角量和线量关系	18
1.5 相对运动	22
1.6 牛顿运动定律	24
1.6.1 牛顿三大定律	24
1.6.2 物理量的单位和量纲	27
1.6.3 几种常见力	28
1.6.4 牛顿定律的应用	30
1.7 惯性参照系和非惯性参照系	38
1.7.1 惯性参照系	38
* 1.7.2 加速平动参照系中的惯性力	39
* 1.7.3 匀速转动参照系中的惯性离心力	39
思考题	43
习题	44
2 守恒定律	48
2.1 能量守恒	48
2.1.1 功	48

2.1.2	势能	52
* 2.1.3	势能曲线	55
2.1.4	机械能守恒定律	58
2.2	动量守恒	66
2.2.1	动量守恒定律	66
2.2.2	冲量和动量定理	72
* 2.2.3	质心和质心运动定律	75
2.3	碰撞	77
2.4	角动量守恒	84
2.4.1	质点的角动量	84
2.4.2	质点的角动量定理	86
2.4.3	质点的角动量守恒定律	87
* 2.5	伯努利方程	90
	思考题	93
	习题	94
3	刚体的转动	99
3.1	刚体的运动	99
3.2	刚体的转动定律	102
3.2.1	转动定律	102
3.2.2	转动惯量的计算	104
3.2.3	转动惯量的平行轴定理	107
3.3	刚体转动中的功能关系	109
3.4	刚体的角动量和角动量守恒定律	115
* 3.5	转动定律与质心运动定律在刚体平面运动中的应用	121
* 3.6	进动	124
	思考题	126
	习题	127
4	振动	131
4.1	谐振动	131
4.1.1	谐振动的动力学方程和运动学方程	131
4.1.2	描述谐振动的三个物理量——周期、振幅、初相	135
4.1.3	谐振动的旋转矢量表示法	137
4.1.4	谐振动的能量	141
4.2	谐振动的合成	147

4.2.1	两个同方向、同频率的谐振动的合成	147
4.2.2	两个同方向、不同频率的谐振动的合成 拍	149
4.2.3	两个互相垂直的、同频率谐振动的合成	151
4.2.4	两个互相垂直的、不同频率谐振动的合成	154
* 4.3	阻尼振动	155
* 4.4	受迫振动 共振	157
	思考题	159
	习题	160
5	波动	164
5.1	弹性体的变形规律	164
5.2	波的基本概念	166
5.2.1	波是振动状态的传播	166
5.2.2	横波和纵波	166
5.2.3	平面波与球面波	168
5.2.4	波长、频率、波速之间的基本关系式	169
5.3	平面简谐波	171
5.3.1	平面行波	171
5.3.2	平面简谐波	172
5.4	机械波的能量	178
5.4.1	机械波的能量和能量密度	178
5.4.2	能流和能流密度	180
5.4.3	波的吸收	182
5.5	惠更斯原理	183
5.5.1	波的衍射	184
5.5.2	波的散射	185
5.5.3	波的反射和折射	185
5.6	波的干涉	187
5.7	驻波	191
5.8	多普勒效应	197
	思考题	201
	习题	202

第二篇 热 学

6	气体动理论	207
6.1	分子热运动与统计规律性	207

6.2 平衡态 理想气体状态方程	209
6.2.1 热力学系统	209
6.2.2 平衡态	210
6.2.3 状态参量	210
6.2.4 理想气体状态方程	211
6.3 压强和温度的微观解释	213
6.3.1 理想气体的压强公式	213
6.3.2 温度的微观解释	216
6.4 能量均分定理 理想气体的内能	217
6.4.1 自由度	218
6.4.2 能量均分定理	219
6.4.3 理想气体的内能	220
6.5 麦克斯韦速率分布律	222
6.5.1 麦克斯韦速率分布律	222
6.5.2 三种统计速率	224
6.5.3 麦克斯韦速率分布的实验验证	225
* 6.6 玻耳兹曼分布律	227
6.6.1 重力场中粒子按高度的分布	228
6.6.2 玻耳兹曼分布律	229
6.7 分子的平均碰撞次数和平均自由程	230
* 6.8 真实气体的范德瓦尔斯方程	232
* 6.9 输运过程	234
6.9.1 粘滞现象	235
6.9.2 热传导现象	236
6.9.3 扩散现象	238
思考题	239
习题	240
阅读材料 真空技术	243
7 热力学基础	248
7.1 准静态过程	248
7.2 热力学第一定律	249
7.2.1 热力学第一定律	249
7.2.2 准静态过程中功的计算	250
7.2.3 热量和摩尔热容	251

7.3 热力学第一定律对理想气体等值过程的应用	254
7.3.1 等体过程	255
7.3.2 等压过程	255
7.3.3 等温过程	256
7.4 绝热过程 多方过程	257
7.4.1 准静态绝热过程	258
7.4.2 非静态绝热过程	262
7.4.3 多方过程	263
7.5 循环过程 卡诺循环	265
7.5.1 循环过程	265
7.5.2 热机和热机效率	266
7.5.3 致冷机和致冷系数	267
7.5.4 卡诺循环	269
7.6 热力学第二定律	272
7.6.1 热力学第二定律的两种表述	272
7.6.2 两种表述的等效性	273
7.7 可逆过程和不可逆过程 卡诺定理	274
7.7.1 可逆过程和不可逆过程	274
7.7.2 卡诺定理	275
7.8 熵和熵增加原理	277
7.8.1 熵	277
7.8.2 熵的计算 温熵图	279
7.8.3 熵增加原理	280
7.9 热力学第二定律的统计意义	283
思考题	285
习题	287
阅读材料 熵概念的扩展	291
参考答案	295
常用数值表	303

第一篇 力学

在茫茫的宇宙中,存在着各式各样的物质.在自然界里,没有不运动的物质,也没有脱离物质的运动.大到宇宙中的星系、恒星,小到基本粒子的相互转化,无不处于永恒运动和变化之中.在形形色色的各种运动形式中,最简单和最普遍的运动形式是物体之间的位置变化,或同一物体中各部分间相对位置的变化,这类运动形式称为机械运动,力学是研究机械运动规律的学科.

与其他自然科学一样,力学是人们在生产实践和科学实验的基础上逐步发展起来的.如果从希腊伟大学者亚里士多德算起,已有2300多年的历史.然而,力学发展成为一门具有系统理论的学科,则始于16~17世纪.此时由于欧洲资本主义的生产力的发展,在生产实践中提出了大量的问题,并提供了前所未有的实验手段和测量仪器,从而促进了人们对力学规律的认识.经过许多科学家,特别是伽利略、笛卡儿、惠更斯等人的努力,建立了力学的实验基础.在这基础上,牛顿对前人的工作进行分析、总结、归纳,创立了新的数学工具——微积分,提出了著名的三条运动定律和万有引力定律,统一了地面上物体和宇宙天体间共同遵循的普遍的机械运动规律,为建立力学的完整理论奠定了基础.

以牛顿运动定律为基础的力学称为牛顿力学或经典力学,它是为观察宏观物体的低速运动而建立起来的.所谓宏观物体是由大量分子和原子组成的物体,低速是与光速(3×10^8 m/s)相比而言的.实践证明,经典力学对宏观物体的低速运动是相当精确的.

物理学的近代发展表明,处于不同层次和不同运动状态的物体,其运动规律并不完全相同.在分子、原子内部以及更深层次的微观世界里,物体(微观粒子)的运动规律与宏观物体有显著的差异,它们遵循量子

力学规律. 当物体速率很大, 以至可与光速相比较时, 其运动规律则和低速状态时不同, 这时物体遵循相对论力学的规律, 这说明任何规律都有一定的适用范围. 尽管如此, 在涉及一般宏观物体运动的广阔领域内, 牛顿力学仍然显示出巨大生命力, 它是解决广泛的理论和实际问题的基础. 力学发展中形成的研究方法, 从观测、实验, 到分析、综合; 从模型和假设的提出, 到理论体系的建立, 直至在实践中受到检验并不断发展, 在历史上对许多其他学科的建立, 曾经起过重要的作用, 并且仍然是今天科学研究的基本方法.

目前, 力学科学正面临许多全新的课题. 例如当前星际航行的实现是和对超音速流体力学以及材料科学等的研究有关. 随着对等离子体运动规律及热核反应研究的开展, 电磁流体力学已成长起来. 近来, 像生物力学这样的边缘科学也正在兴起, 它的研究成果必将有助于基础医学和临床医学的发展.

1 质点的运动规律

力学可分为运动学和动力学. 运动学解决如何描述物体运动的问题, 动力学则研究物体运动状态变化的原因. 在本章中, 我们首先从描述运动开始, 引出速度和加速度的概念. 通过速度和加速度等概念的建立, 加深对运动的相对性、瞬时性、矢量性和叠加性的认识. 然后从物体间的相互作用出发, 研究物体运动状态的变化和周围物体对它所施加的作用力之间的关系, 阐述牛顿三大定律. 最后, 通过对例子的分析, 掌握在给定条件下, 建立和求解物体的运动方程, 从而对物体运动过程的全貌有一定的认识.

1.1 理想模型——质点、刚体

实际物体都有一定的大小和形状. 当物体运动时, 一般说来, 物体上各点的运动状态是不相同的. 例如, 火车沿铁轨运动时, 除了火车作整体运动外, 还包括车厢的晃动, 车轮的转动, 以及各种运动部件的运动等复杂的运动. 又如炮弹的飞行, 除了炮弹的整体沿着一定的曲线运动外, 还包括炮弹本身的复杂转动. 物体在运动过程中, 一般物体的大小和形状还会发生变化, 因此要对实际物体的运动作全面描述将是十分困难的事情, 为此只能分清主次, 抓住主要因素. 如果我们感兴趣的只是火车整体沿铁轨的移动或炮弹整体沿运动轨道的运动时, 我们就可以忽略那些与整体运动无关的次要运动(例如车轮的转动, 车厢的晃动或炮弹自身的旋转等), 认为物体上各点的运动完全一样, 整个物体的运动可以用一个点的运动来代表. 这种忽略了物体的形状和大小, 而具有该物体全部质量的点称为质点.

显然, 质点是一种理想化的模型, 是对实际物体的一种科学的抽象. 能否把物体看成质点, 要视所研究问题的性质和具体情况而定. 例如, 当我们研究地球绕太阳公转时, 地球的平均半径虽然大到 $6\,370\text{ km}$, 但是它与地球和太阳之间的平均距离(约为 $1.5 \times 10^8\text{ km}$)相比是微不足道的, 此时地球上各点的运动状态的差别完全可以忽略不计, 因此可以把地球当质点来处理. 但是在研究地球的自转时, 就必须考虑其大小和形状, 不能将其看成质点了. 一颗极大的恒星, 在研究其运动的轨道时, 可以看作是质点, 而一个极小的原子, 在研究其内部的结构时, 就不能把它当作质点来处理. 因此, 能否把实际物体看成是质点, 并不由其实际的大小决定, 而要看问题的性质如何.

质点是力学中最基本、最简单的理想模型。一般来说,在所研究的问题中,若可以不考虑与转动有关的问题,不涉及物体内部各部分的相对运动时,当物体本身大小远小于运动范围时,均可把它当质点来处理。在另一些问题中,例如研究刚体、流体、弹性体的运动时,虽然不能把整个研究对象看作质点,但可以把它当作是由大量质点所组成的,通过研究各质点的运动规律,也就可以了解整个研究对象的运动规律,因此研究质点的运动规律也是研究一般物体运动规律的基础。

刚体是力学中另一个十分有用的理想模型。实验证明,任何物体在受到力的作用时,都将发生不同程度的形变,例如汽车驶过铁桥,桥墩将发生压缩和弯曲变形,对固体而言,通常这种变形非常微小。如果在所研究的问题中,物体受力而发生的微小形变是次要因素,以至可以忽略这种形变而不影响问题的研究时,则可把该物体看成在外力的作用下将保持其大小、形状不变,我们把这种在力的作用下,大小和形状都保持不变的物体称为刚体。

应当指出,同一物体在不同情况下可以抽象成不同的理想模型。例如地球绕太阳公转时可视为质点,而研究地球自转时则将它视为刚体,若要考虑地球上的潮汐,地壳的变迁时,则必须把它当作变形体来处理。

实际上物体总有一定的大小,没有真正的质点;物体受力,总要发生形变,因而也没有真正的刚体。在物理研究中,为了便于抓住本质,解决问题,常在科学分析的基础上,引入像质点、刚体那样的理想模型。以对理想模型的研究来代替对实际物体的研究,这是物理学中常用的研究方法。至于理想模型能否较好地反映客观实际,在什么条件下可以采用这种理想模型,则必须通过实践来检验和确定。

1.2 质点的运动及其描述

1.2.1 参照系和坐标系

宇宙中的任何物体都处于不停的运动之中,大到星系,小到原子、电子,无一不在运动。看来在地面上“静止”的建筑物,它也随着地球自转,而且以 30 km/s 的速率绕太阳公转;而太阳和它的九大行星又在绕着银河系中心快速地旋转;银河系在总星系中旋转,而总星系又在不断地膨胀……这些事实表明:运动是绝对的,而静止只有相对的意义。因此,要描述一个物体的运动,总得选择另一物体或几个彼此之间相对静止的物体作参考,然后研究这个物体相对于所参考的物体是如何运动的。这种在描述物体运动时选作参考的物体称为参照系。

经验告诉我们,相对于不同的参照系,同一物体的运动会表现出不同的形式。例如在匀速前进的火车中,车厢顶上落下的一滴水滴,它相对于车厢,作直线运动;

而相对于地面,却是作抛物线运动;如果这滴水相对于太阳或其他天体,则其运动轨迹将更为复杂;这一事实,称为运动描述的相对性.因此,要明确地描述一个物体的运动,只有在选取某一确定的参照系后才有可能,正是由于这种描述的相对性反映了宇宙间万物运动的绝对性.正是通过不同参照系对同一物体运动的不同描述,才能对物体的运动规律获得更全面、更深刻的认识.

从运动的描述来说,参照系的选择可以是任意的.在一个具体问题中,究竟选取哪一个物体作参照系,要由问题的性质和研究的方便来决定.在讨论地面上物体的运动时,通常选择地球作为参照系.而研究一个星际火箭的运动,在刚发射时,主要研究它相对于地面的运动,就选地球为参照系;但是当火箭进入绕太阳运行的轨道时,为研究方便起见,则常选太阳为参照系.

为了定量地确定一个物体相对于某参照系的位置,需要在参照系上选用一个固定的坐标系,而物体的位置就由它在此坐标系中的坐标决定.最常用的坐标系是直角坐标系,它的三条坐标轴(x 轴、 y 轴和 z 轴)互相垂直.根据需要,也可以选用其他的坐标系,例如:自然坐标系、极坐标系、球坐标系等.

当参照系确定之后,则坐标系的类型、坐标原点的位置、坐标轴方向都可以根据需要自行选择.但参照系一经确定,所描述的某个物体运动的快慢、轨道的形状等也就确定了,不会因坐标系的选择不同而有所不同.

1.2.2 位置矢量和运动方程

要描述质点的运动,就必须确定质点的位置是如何随时间而变化的.由于时间是连续变化的,因而质点的位置、速度也相应地连续变化,研究这些变化就需要运用微积分等数学工具.此外,由于描述物体运动的物理量,如位移、速度、加速度等都是具有大小和方向的物理量,因此在研究力学问题中,矢量运算是一个有力的工具.灵活地运用矢量和微积分工具来描述质点的各种类型的运动,就能更精确、更深刻地理解物理概念和物理规律的含义,可把中学中对恒力、恒加速度运动等常量的研究,扩大为对变力、变加速度运动等变量的研究,这正是大学物理与中学物理的区别和提高之处.

位置矢量 如果在参照系上建立的是直角坐标系 $O-xyz$ (图 1-1),那么,质点 P 的位置就可由该坐标系中的坐标 x 、 y 、 z 来确定,也可以用自原点 O 指向 P 点的有向线段 r 来表示,这个有向线段叫做该质点的位置矢量(或称为矢径).相应地,坐标 x 、 y 、 z 便是 r 沿坐标轴的三个分量.

引入沿着 x 、 y 、 z 轴正方向的单位矢量 i 、 j 、 k

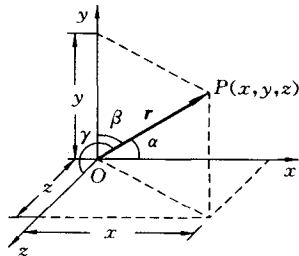


图 1-1 位置矢量

后,我们可把 r 表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$$

位置矢量 r 的大小由关系式

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

决定,位置矢量的方向余弦是:

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

式中, α 、 β 和 γ 分别是 r 与 x 、 y 、 z 轴之间的夹角.

运动方程 质点运动时,它的坐标 x 、 y 、 z 和位置矢量 r 都是时间 t 的函数,表示运动过程的函数式可以写作:

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-1)$$

或

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

式(1-1)和式(1-1a)是等效的,它们均称为运动方程.它们的等效性表明:式(1-1a)所描述的运动可以看作由式(1-1)所描述的三个相互垂直的分运动的叠加.

轨道方程 运动质点在空间所经过的路径称为轨道(或轨迹),从式(1-1)中消去 t , 就得 x 、 y 、 z 所满足的方程,它就是质点在此直角坐标系中的轨道方程.

1.2.3 速度

位移 研究质点的运动,不仅要知道它的位置,还需知道它的位置是如何变化的.设曲线 \widehat{AB} 是轨道的一部分(图 1-2),在时刻 t ,质点位于 A 处,而在时刻 $t + \Delta t$,质点到达 B 处. A 、 B 两点的位置分别用矢径 $r(t)$ 和 $r(t + \Delta t)$ 来表示.在时间 Δt 内,质点位置的变化可用 A 到 B 的有向线段 \overline{AB} 来表示,称为质点的位移.位移 \overline{AB}

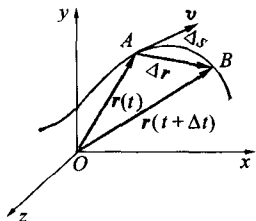


图 1-2 曲线运动中的位移

除了表明 B 点与 A 点之间的距离外,还表明 B 点相对于 A 点的方位.

位移是矢量,需按三角形法则或平行四边形法则来合成.由图 1-2 可以看出,位移

$$\overline{AB} = \Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$$

上式说明,位移 \overline{AB} 等于矢径 $r(t + \Delta t)$ 和 $r(t)$ 的矢量差,即矢径 r 在 Δt 时间内的增量,所以用 Δr 来表示.

应当指出,位移仅表示质点在一段时间内位置变动的总效果,它并不代表质点实际所走的路程.因此质点在一段时间内的位移和所经过的路程是两个不同的概念.

在图 1-2 中,位移是有向线段 \overline{AB} ,是矢量,它的大小 $|\Delta r|$ 即割线的长度;路程是标量,即曲线弧 \widehat{AB} 的长度,可记作为 Δs .在一般情况下, Δs 和 $|\Delta r|$ 并不相等,仅在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,两者才可视为相等.即使在直线运动中,位移和路径也是截然不同的两个概念.例如某质点沿直线从 A 点到 B 点又折回 A 点,显然该质点经过的路程等于 A、B 之间距离的两倍,而位移却为零.

速度 研究质点的运动,不仅要知道质点的位移,还需知道在多长时间产生这一位移,为此引入速度这一物理量.我们可以用单位时间内的位移 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 来近似地描述 t 时刻附近质点运动的快慢程度和方向,通常把 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 称为 Δt 时间内质点的平均速度,用 \overline{v} 表示,即

$$\overline{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

平均速度是矢量,它的方向就是位移的方向.当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 趋近于一个确定的极限矢量,这个极限矢量确切地描述了在 t 时刻质点运动的快慢程度和方向.因此,我们把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速度 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 的极限定义为质点在 t 时刻的瞬时速度(简称速度),以 v 表示,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-2)$$

这就是说,质点在 t 时刻的速度 v 等于位置矢量 r 对时间的变化率或位置矢量 r 对时间的导数.

速度的方向由位移 Δr 的极限方向确定,显然它就是质点所在处轨道的切线方向,并指向质点前进的一侧.

速度的大小称为速率,以 v 表示,由于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta r|$ 和 Δs 趋于相同,因此有

$$v = |\boldsymbol{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-3)$$

式(1-3)表明,速度的大小 v 等于路程 s 对时间的变化率,它反映了质点运动的快慢程度.

在直角坐标系中,由式(1-1a)知,速度 v 的表示式为