



- 河南省普通高等教育“十二五”规划教材
- 教育部物理基础课程教学指导分委员会教改项目资助教材

○ ○ ○



大学物理学

(上册)

▶▶ 尹国盛 张伟风 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

河南省普通高等教育“十二五”规划教材
教育部物理基础课程教学指导分委员会教改项目资助教材

大学物理学

(上册)

主 编	尹国盛	张伟风
副主编	黄明举	杨 毅
参 编	李 卓	孙建敏

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是河南大学“十二五”规划教材、河南省普通高等教育“十二五”规划教材和教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会教改项目资助教材。全书分为上、下两册,上册包括力学和电磁学,下册包括热学、波动与光学、量子物理基础和相对论简介。全书共分12章,书中有例题、思考题、习题,书末附有习题参考答案。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业(包括函授与自考等成人教育)的教材,也可供大学物理教师和有关的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学(上册)/尹国盛 张伟风 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2012.9

ISBN 978-7-5609-7997-7

I. 大… II. ①尹… ②张… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 113140 号

大学物理学(上册)

尹国盛 张伟风 主编

策划编辑:周芬娜

责任编辑:周芬娜 李 琴

封面设计:刘 卉

责任校对:代晓莺

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:通山金地印务有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:15

字 数:316 千字

版 次:2012年9月第1版第1次印刷

定 价:28.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书是在尹国盛、夏晓智和郑海务主编的《大学物理简明教程》(上、下册)的基础上,参照国家教育部新制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)(以下简称“要求”),结合河南大学的实际情况修订而成的。该书是河南大学“十二五”规划教材、河南省普通高等教育“十二五”规划教材和教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会教改项目资助教材。它与2010年8月出版的《大学物理》(上、下册)、2011年1月出版的《大学物理基础教程》(全一册)和2011年8月出版的《大学物理思考题和习题选解》以及《大学物理简明教程》同属一套系列教材。

本书的特色主要是“联系实际”,即大学物理的理论,既紧密联系生产、生活和工程技术尤其是现代科学与高新技术的实际,又联系现在中学教材实行新课标后的实际;既联系教育部“要求”的实际,又联系学校和学生的实际。

本书分上、下两册,上册包括力学和电磁学,下册包括热学、波动与光学、量子物理基础和相对论简介。基本内容是按96学时安排的(不含带“*”的),多于或少于此学时的专业,可根据实际情况进行适当增减。

全书共分12章,上册由尹国盛、张伟风担任主编,黄明举、杨毅担任副主编;下册由尹国盛、顾玉宗担任主编,党玉敬、王素莲担任副主编。编写人员的具体分工为:尹国盛,第1章和第2章;杨毅,第3章;孙建敏,第4章;李卓,第5章和第6章;王素莲,第7章;赵遵成,第8章;程秀英,第9章;高海燕(华北水利水电学院),第10章;孙献文,第11章;党玉敬,第12章和附录(数学基础)。全书由尹国盛教授统稿并定稿。

参加《大学物理简明教程》编写的人员有尹国盛、夏晓智、郑海务、杨毅、翟俊梅、周呈方、张华荣、任凤竹、李天锋、彭成晓、张新安、闫玉丽、张大蔚等。

为本书的编写提过宝贵建议的有李若平老师、张华荣博士、张光彪博士、彭成晓博士和做了大量工作的骆慧敏老师等,在此向他们表示由衷的感谢。

本书出版之际,适逢河南大学建校100周年,谨以此书作为献礼!

编 者
2012年7月

上册的量 and 单位

力学的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
时间	t	秒	s
位矢	r	米	m
位移	Δr	米	m
速度	v	米每秒	m/s
加速度	a	米每二次方秒	m/s ²
质量	m	千克	kg
力	F, f	牛[顿]	N
功	A	焦[耳]	J
功率	P	瓦[特]	W
能量	E	焦[耳]	J
动能	E_k	焦[耳]	J
势能	E_p	焦[耳]	J
冲量	I	牛[顿]秒	N · s
动量	p	千克米每秒	kg · m/s
力矩	M	牛[顿]米	N · m
角动量	L	千克二次方米每秒	kg · m ² /s
角度	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度	rad
角速度	ω	弧度每秒	rad/s
角加速度	α	弧度每二次方秒	rad/s ²
转动惯量	I	千克二次方米	kg · m ²
长度	l, L	米	m
面积	S	平方米	m ²
体积	V	立方米	m ³
密度	ρ	千克每立方米	kg/m ³
线密度	ρ_l	千克每米	kg/m
面密度	ρ_s	千克每平方米	kg/m ²
摩擦因数	μ		
恢复系数	e		

电磁学的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
电荷	Q, q	库[仑]	C
电荷体密度	ρ	库[仑]每立方米	C/m^3
电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	C/m^2
电荷线密度	λ	库[仑]每米	C/m
电场强度	E	伏[特]每米	V/m
电场强度通量	Φ_e	伏[特]米	$\text{V} \cdot \text{m}$
电势能	W	焦[耳]	J
电势	V	伏[特]	V
电势差, 电压	U	伏[特]	V
电容率	ϵ	法[拉]每米	F/m
真空电容率	ϵ_0	法[拉]每米	F/m
相对电容率	ϵ_r		
电极化率	χ_e		
电极化强度	P	库[仑]每平方米	C/m^2
电位移	D	库[仑]每平方米	C/m^2
电位移通量	Ψ	库[仑]	C
电偶极矩	p	库[仑]米	$\text{C} \cdot \text{m}$
电容	C	法[拉]	F
电流	I	安[培]	A
电流密度	J	安[培]每平方米	A/m^2
电阻	R	欧[姆]	Ω
电阻率	ρ	欧[姆]米	$\Omega \cdot \text{m}$
电导率	γ	西[门子]每米	S/m
电动势	$\mathcal{E}$	伏[特]	V
磁感应强度	B	特[斯拉]	T
磁导率	μ	亨[利]每米	H/m
真空磁导率	μ_0	亨[利]每米	H/m
相对磁导率	μ_r		
磁通量	Φ_m	韦[伯]	Wb
磁化率	χ_m		
磁化强度	M	安[培]每米	A/m
磁矩	m	安[培]平方米	$\text{A} \cdot \text{m}^2$
磁场强度	H	安[培]每米	A/m
自感	L	亨[利]	H
互感	M	亨[利]	H
电场能量	W_e	焦[耳]	J
磁场能量	W_m	焦[耳]	J
电磁能密度	w	焦[耳]每立方米	J/m^3
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米	W/m^2

目 录

第 1 章 运动和力	(1)
* 1.1 参考系和坐标系	(1)
1.1.1 参考系和坐标系	(1)
1.1.2 质点和刚体	(2)
1.1.3 空间和时间	(2)
1.2 质点运动的描述	(3)
1.2.1 位矢	(3)
1.2.2 位移	(3)
1.2.3 速度	(4)
1.2.4 加速度	(5)
1.3 直线运动和平面曲线运动	(8)
1.3.1 直线运动	(8)
1.3.2 圆周运动	(9)
* 1.3.3 抛体运动	(12)
* 1.3.4 自然坐标系在描述平面曲线运动中的应用	(13)
* 1.4 相对运动与伽利略变换	(17)
1.5 牛顿运动定律	(19)
1.5.1 牛顿第一定律	(19)
1.5.2 牛顿第二定律	(20)
1.5.3 牛顿第三定律	(21)
1.5.4 牛顿运动定律应用举例	(21)
提要	(25)
思考题	(26)
习题	(27)
第 2 章 力学守恒定律	(30)
2.1 功和功率	(30)
2.1.1 恒力沿直线做功	(30)
2.1.2 变力沿曲线做功	(31)
2.1.3 功率	(32)
2.2 动能和势能	(34)
2.2.1 质点的动能和动能定理	(34)
2.2.2 质点系的动能和动能定理	(35)

2.2.3	重力势能	(36)
2.2.4	弹性势能	(37)
2.2.5	引力势能	(37)
* 2.2.6	势能曲线	(38)
2.3	机械能守恒定律	(41)
2.3.1	质点系的机械能定理	(41)
2.3.2	质点系的机械能守恒定律	(41)
2.4	冲量 动量 动量守恒定律	(43)
2.4.1	力的冲量	(43)
2.4.2	质点的动量和动量定理	(44)
2.4.3	质点系的动量和动量定理	(45)
2.4.4	动量守恒定律	(46)
2.5	力矩 角动量 角动量守恒定律	(49)
2.5.1	力矩	(49)
2.5.2	角动量	(50)
2.5.3	角动量定理	(51)
2.5.4	角动量守恒定律	(52)
* 2.6	碰撞	(53)
2.6.1	完全弹性碰撞	(54)
2.6.2	完全非弹性碰撞	(55)
2.6.3	非完全弹性碰撞	(55)
提要	.....	(58)
思考题	.....	(60)
习题	.....	(60)
第3章	刚体和流体力学基础	(64)
3.1	刚体定轴转动的运动学描述	(64)
3.1.1	刚体的运动形式	(64)
3.1.2	刚体定轴转动的运动学	(65)
3.2	刚体定轴转动的动力学描述	(68)
3.2.1	刚体的力矩	(68)
3.2.2	定轴转动的转动定律	(69)
3.2.3	转动惯量	(70)
3.2.4	转动定律的应用举例	(74)
3.3	刚体定轴转动的机械能守恒	(76)
3.3.1	力矩的功	(76)
* 3.3.2	力矩的功率	(77)

3.3.3	转动动能	(78)
3.3.4	定轴转动的动能定理	(78)
3.3.5	刚体的势能	(79)
3.3.6	刚体的机械能守恒定律	(80)
3.4	刚体定轴转动的角动量守恒	(82)
3.4.1	刚体的角动量	(82)
3.4.2	刚体的角动量定理	(83)
3.4.3	刚体的角动量守恒定律	(84)
* 3.5	流体力学简介	(87)
3.5.1	流体静力学	(87)
3.5.2	理想流体的连续性方程	(90)
3.5.3	伯努利方程及其应用	(93)
3.5.4	黏性流体的流动	(98)
提要	.....	(101)
思考题	.....	(102)
习题	.....	(103)
第 4 章	静电场	(107)
4.1	电荷守恒定律 库仑定律	(107)
4.1.1	电荷守恒定律	(107)
4.1.2	库仑定律	(108)
4.2	电场强度 高斯定理	(108)
4.2.1	电场	(108)
4.2.2	电场强度	(109)
4.2.3	电场强度叠加原理	(110)
* 4.2.4	电场线	(114)
4.2.5	电场强度通量	(115)
4.2.6	静电场的高斯定理	(116)
4.2.7	高斯定理应用举例	(117)
4.3	静电场的环路定理 电势	(121)
4.3.1	静电场力做功的特点	(121)
4.3.2	静电场的环路定理	(122)
4.3.3	电势能 电势和电势差	(122)
4.3.4	电势的计算	(124)
* 4.3.5	等势面	(126)
* 4.3.6	电场强度和电势梯度的关系	(127)

4.4	静电场中的导体	(128)
4.4.1	导体的静电平衡条件	(128)
4.4.2	静电平衡时导体的性质	(129)
4.4.3	静电屏蔽	(131)
4.5	静电场中的电介质	(132)
4.5.1	电介质的极化	(133)
4.5.2	电极化强度矢量	(134)
4.5.3	电介质中的电场强度	(135)
4.5.4	有电介质时的高斯定理 电位移	(135)
* 4.6	电容器 静电场的能量	(137)
4.6.1	孤立导体的电容	(137)
4.6.2	电容器及其电容	(137)
4.6.3	电容的串联和并联	(139)
4.6.4	电容器的电能	(140)
4.6.5	静电场的能量	(141)
	提要	(142)
	思考题	(144)
	习题	(145)
第5章	恒定磁场	(148)
5.1	恒定电流	(148)
5.1.1	电流	(148)
5.1.2	电流密度	(149)
5.1.3	欧姆定律及其微分形式	(149)
5.2	磁感应强度 毕奥-萨伐尔定律	(151)
5.2.1	磁场 磁感应强度	(151)
* 5.2.2	磁感应线	(152)
5.2.3	毕奥-萨伐尔定律	(153)
5.2.4	磁感应强度叠加原理	(154)
5.2.5	毕奥-萨伐尔定律的应用	(154)
5.3	恒定磁场的高斯定理和安培环路定理	(158)
5.3.1	磁通量	(158)
5.3.2	恒定磁场的高斯定理	(159)
5.3.3	安培环路定理	(159)
5.3.4	安培环路定理的应用	(160)
5.4	磁场对运动电荷和载流导体的作用	(163)
* 5.4.1	洛伦兹力	(163)
5.4.2	磁场对载流导线的作用力 安培定律	(166)

* 5.4.3	两无限长平行载流直导线间的相互作用力 电流单位	
	“安培”的定义	(167)
5.4.4	磁场对载流线圈的作用 磁力矩	(168)
5.5	磁介质	(169)
5.5.1	磁介质	(170)
5.5.2	磁化电流 有磁介质存在时的安培环路定理	(172)
5.5.3	有磁介质存在时的高斯定理	(175)
* 5.5.4	铁磁质	(175)
提要	.....	(178)
思考题	.....	(179)
习题	.....	(181)
第 6 章	电磁感应	(186)
6.1	电磁感应定律	(186)
* 6.1.1	电磁感应现象	(186)
6.1.2	法拉第电磁感应定律	(187)
6.1.3	楞次定律	(188)
6.1.4	考虑楞次定律后法拉第电磁感应定律的表达式	(190)
6.2	动生电动势和感生电动势	(193)
6.2.1	动生电动势	(194)
6.2.2	感生电动势和感生电场	(197)
* 6.2.3	电子感应加速器	(199)
* 6.2.4	涡流	(201)
6.3	自感和互感 磁场的能量	(203)
6.3.1	自感	(203)
6.3.2	互感	(205)
* 6.3.3	磁场的能量	(206)
6.4	电磁场	(209)
6.4.1	位移电流	(210)
6.4.2	麦克斯韦方程组	(213)
* 6.4.3	电磁场的物质性	(215)
提要	.....	(216)
思考题	.....	(217)
习题	.....	(218)
习题参考答案	.....	(221)

第1章 运动和力

物质处于永不停息的运动之中,对于物质运动的描述和运动状态变化规律的研究是对自然界中物质进行研究的基础,而改变物质运动状态的原因是力,因此,运动和力始终是密不可分的,这里我们将其放在同一章中进行阐述。在本章中,首先,引入参考系、坐标系、质点等基本概念,为运动的描述创立时间和空间的先决条件以及建立研究对象的理想模型;接着,在此基础上介绍位移、速度、加速度及运动方程等,构筑完整的运动学描述体系,并通过这种科学的描述讨论日常生活中经常涉及的直线运动、圆周运动、平面曲线运动等典型的运动过程;然后,重点介绍牛顿运动定律及应用举例,在运动和力之间建立联系的桥梁。

* 1.1 参考系和坐标系

正如爱因斯坦所说,“运动只能理解为物体的相对运动。在力学中,一般讲到的运动,总是意味着相对于坐标系的运动。”物质运动的相对性决定着对于运动的描述总是需要一些前提,而这些前提一定是与空间和时间相关的。

1.1.1 参考系和坐标系

“坐地日行八万里,巡天遥看一千河”是毛泽东在七律《送瘟神》中所写诗句。两个静止在地球上的人观察到的对方都是静止的,但如果一个位于地球之外的静止的人观察另一个位于赤道上的静止的人时,观察到的赤道上的人就会随地球自转而一直处于匀速圆周运动之中,故有“日行八万里”之说。万事万物都处于一刻不停的运动之中,若想研究某一个物体的运动规律,必须首先选定另一个物体作为参照物或参考系,而选取不同的参考系来描述同一个物体的运动,往往会得到不同的结果。例如,一列行驶的列车中有一从车顶坠落的小球,车中站立的观察者看见小球作自由落体运动,而同一时刻车窗外站立的观察者看见小球作平抛运动。如果只从合理性来考虑,参考系的选取是任意的,选择任意参考系都可以完成对某一物体运动状态的描述,但选择更为合适的参考系会使对于物体运动的描述变得更为简洁。在研究地球上物体的运动时,一般选择地球为参考系,本书在没有特别说明的情况下,物体的运动都是指相对于地球的运动。

仅仅选定参考系依然无法准确地描述物体的运动状态,必须在所选的参考系上建立合适的坐标系,一般在参考系上选定一点作为坐标系的原点,并选定若干条通过原点并标有长度和方向的直线作为坐标轴,由此我们可以实现对研究对象运动状态

的定量描述。直角坐标系是应用最为广泛的坐标系,除此之外,常用的坐标系还有极坐标系、球坐标系、自然坐标系、柱坐标系等。与参考系的选取原则类似,坐标系的选取也是任意的,选取不同的坐标系并不会改变物体的运动形式,但是建立合适的坐标系可以简化对物体运动状态描述和计算的过程。

1.1.2 质点和刚体

运动学中所涉及的研究对象千变万化,大到宇宙天体,小到原子、分子甚至更小的微观粒子,它们都有各自的大小、形状和组成结构,在我们确定参考系和坐标系后,为精确描述物体的运动状态,就需要在坐标系中确定物体的位置。以人的运动为例,人在走动的时候四肢都在以不同的方式运动,身体上的每一点都有着各不相同的运动状态,我们不可能将身体上的每一点同时在同一坐标系中进行描述。通常,在研究人的运动的时候都着重考虑其整体的位移,肢体运动的位移相对于整体位移的大小完全可以略去不计,这样就可以将整个人体看成是一个具有质量的点,从而在坐标系中描述出来,而并不会影响我们对人的运动的描述。这种具有质量而没有形状和大小的理想物体称为质点。再如,在研究地球绕太阳公转的时候,由于地球的平均半径(约为 $6.4 \times 10^3 \text{ km}$)远远小于地球与太阳之间的距离(约为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$),地球上各点的运动相对于地球绕太阳公转运动的位移大小可以略去不计,因而此时可以将地球看做一个质点,如图 1.1 所示。但在研究地球自转的时候,由于地球上各点运动的位移大小相当,因此不能再将地球看成质点。此时,为了研究方便,可以将地球看成由很多个质点(或质元)组成的系统(称为质点系),在确立坐标系后,可以对地球上任意点的运动进行定量描述。

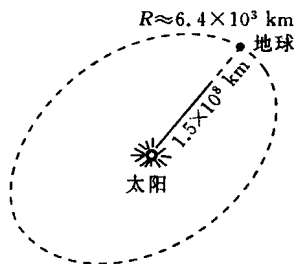


图 1.1 地球绕太阳公转

质点系可分为两类:一类是任意情况下(包括外力作用下)系统内部各质点间无相对位移,此类质点系称为刚体,如作自转运动的地球;另一类是在外力作用下系统内部各质点间有相对位移,此类质点系称为非刚体,如行走中的人体。实际上,任何物体在外力作用下均会产生形变,即物体内部各质元间会产生相对位移,只是相对位移的大小相对于刚体运动的位移大小可以略去不计,因此,刚体亦如质点只是一种理想化模型。

1.1.3 空间和时间

如前所述,物体运动的相对性决定了对运动的描述需要空间上和时间上的前提。空间描述物体的位置和形态,表示物体分布的秩序;时间描述事件的先后顺序。参考系和坐标系的确立为精确描述物体的运动提供了空间前提和量化标准,下面需要讨论时间上的前提。这里依然以“坐地日行八万里”来讨论,这是一个描写坐在地球上的人随着地球自转而运动的诗句,“八万里”描述的是空间的变化,“日行”则给出了

时间的前提。在对质点运动进行描述的过程中涉及的时间大体可分为时间间隔和时刻两种,部分运动学参量是与时间间隔相关的,另有部分运动学参量则是某一时刻下的。

1.2 质点运动的描述

在合理地建立参考系和坐标系后,可以利用位矢、位移、速度和加速度等运动学参量对质点的机械运动过程作定量的描述和计算。

1.2.1 位矢

要讨论质点位置随时间的变化,首先要确切地描述质点的位置。如图 1.2 所示,由直角坐标系原点 O (通常亦为参考系上的参考点) 引向质点所在位置 $P(x, y, z)$ 的矢量,称为质点的位置矢量,简称位矢,或矢径,通常用符号 r 表示,则有

$$r = xi + yj + zk \quad (1.1)$$

式中, i, j, k 分别表示沿 x, y, z 三个坐标轴正方向的单位矢量; x, y, z 为质点的位置坐标, 分别是 r 在三个坐标轴上的投影, 即 r 沿三个坐标轴的分量。位矢的大小为

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

图 1.2 中 α, β, γ 分别为位矢 r 与 x, y, z 三个坐标轴之间的夹角, 位矢的方向余弦可表示为

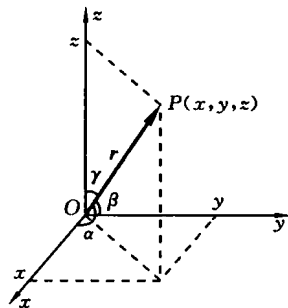


图 1.2

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1.3)$$

质点作机械运动时,其空间位置随时间变化而不断变化,质点运动过程的每一时刻均有一定的位矢与之对应,即位矢 r 为时间 t 的函数,即

$$r = r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1.4)$$

或

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.5)$$

这种表示质点位置随时间变化规律的数学表达式,称为质点的运动学方程,式(1.5)为运动方程的分量式。通过运动方程可以了解运动的质点在任意时刻 t 的位置,如果将方程中的 t 消去即可得到质点的运动轨迹。

1.2.2 位移

如图 1.3 所示, t 时刻沿图中曲线运动的质点到达 P_1 位置时的位矢为 $r(t)$, 再经过时间间隔 Δt 后到达 P_2 位置时的位矢变为 $r(t + \Delta t)$ 。可见,质点在经过时间间隔 Δt 后位置由 P_1 移动至 P_2 , 由 P_1 指向 P_2 的矢量用 Δr 表示, Δr 即为质点在时间

间隔 Δt 内的位移。由矢量运算法则可得

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1.6)$$

位移是描述运动质点在某段时间内相对于坐标系位置变化情况的物理量,是位矢 $\mathbf{r}$ 在 Δt 时间内的增量。类似位矢的分量表示,位移在直角坐标系下亦可表示为分量形式,即

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \quad (1.7)$$

关于位移,需要注意以下几个问题。

(1) 位矢与位移的区别:前者描述的是某时刻质点在空间所处的位置,与时刻相对应;后者则与一定的时间间隔相对应,描述质点位置变动的大小和方向。

(2) 位移与路程的区别:前者是矢量,是在一定时间内位置变化的总效果;后者是标量,是在一定时间内质点在其轨迹上所经过路径的总长度。这里还需注意的是,位移只与质点运动始、末位矢有关,与中间任意时刻的质点位置无关,而路程则与过程中任意时刻质点所处位置都有关。

(3) $|\Delta \mathbf{r}|$ 、 $\Delta |\mathbf{r}|$ 和 Δr 三种符号的含义和区别: $|\mathbf{r}|$ 和 r 都代表位矢 $\mathbf{r}$ 的模或长度,故 $\Delta |\mathbf{r}|$ 和 Δr 完全相同,即

$$\Delta |\mathbf{r}| = \Delta r = |\mathbf{r}(t + \Delta t)| - |\mathbf{r}(t)| \quad (1.8)$$

$$\text{又} \quad |\Delta \mathbf{r}| = |\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)| \quad (1.9)$$

只有 $\Delta \mathbf{r}$ 、 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$ 与 $\mathbf{r}(t)$ 三者同向时才满足

$$|\Delta \mathbf{r}| = \Delta |\mathbf{r}| = \Delta r \quad (1.10)$$

即只有当质点沿同一方向作直线运动时三者才会完全相等。

1.2.3 速度

如图 1.3 所示,质点经过时间间隔 Δt 由 P_1 运动至 P_2 位置,质点位移为 $\Delta \mathbf{r}$,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与发生该位移所经历时间 Δt 之间的比值,称为质点在这段时间内运动的平均速度,以 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.11)$$

可见,平均速度为一矢量,方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 相同。平均速度仅表示一段时间内位置总变化的方向和平均快慢,即它只与质点运动的始、末位置相关,而与运动所经历的中间过程无关,它并不能反映运动过程中每时每刻质点运动的方向和快慢程度。显然,运动过程时间越短,平均速度越能反映运动的细节,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度 $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 趋向于一个极限值,此极限值称为质点在该时刻的瞬时速度,简称速度,用 $\mathbf{v}$ 表示,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.12)$$

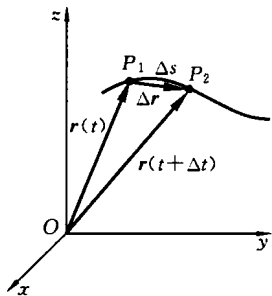


图 1.3

速度是精确描述运动质点在某时刻位置变动快慢和运动方向的物理量,它等于位矢 $\mathbf{r}$ 对时间的变化率或一阶导数。速度是一个矢量,它的方向就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向,由于此时 P_2 点无限趋近于 P_1 点,所以 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向与曲线在该点的切线方向一致,即速度的方向就是沿着质点运动轨迹切线的方向且指向质点前进的一侧(见图 1.4)。速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \quad (1.13)$$

它反映质点在该时刻运动的快慢,称为瞬时速率,简称速率。在描述质点运动时,还经常采用平均速率这一物理量,它是路程 Δs 与时间 Δt 的比值,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.14)$$

可见,质点的平均速率反映质点在单位时间内所通过路程的长短,并不考虑运动的方向,属于一种标量。这里需要注意的是平均速率与平均速度的区别,质点的速率等于其速度的大小,但平均速率与平均速度是完全不同的,前者是与质点运动路程(轨迹长度)的长短相关的,而后者只与质点运动的位移相关,与质点运动所经历的路径无关。例如,一质点经过圆周运动回到起始点,此过程质点的平均速度等于零,但其平均速率却不为零。

在直角坐标系下,速度可表示为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \quad (1.15)$$

可以用 v_x 、 v_y 、 v_z 分别表示速度在三个坐标轴上的分量(即投影),则有

$$\mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.16)$$

由式(1.15)和式(1.16)可得

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1.17)$$

则速度的大小可表示为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1.18)$$

速度的方向可由速度与三个坐标轴正方向的夹角来确定,夹角的余弦可分别表示为

$$\cos\alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos\beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos\gamma = \frac{v_z}{v} \quad (1.19)$$

1.2.4 加速度

质点作变速运动时,除了质点的空间位置随时间不停变化外,其速度也是时间 t 的函数,即速度的大小和方向都会随时间变化而有所改变。为了描述质点速度的变

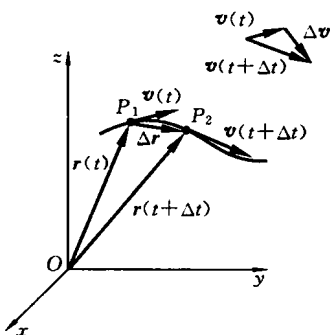


图 1.4

化情况,下面引入加速度的概念。如图 1.4 所示, t 时刻质点位于 P_1 点,其速度为 $\boldsymbol{v}(t)$,经历 Δt 时间后质点运动至 P_2 点,速度变为 $\boldsymbol{v}(t+\Delta t)$,则 Δt 时间内的速度增量为

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(t+\Delta t) - \boldsymbol{v}(t) \quad (1.20)$$

速度为一矢量,因此速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 亦为矢量,它所描述的速度变化包括速度方向的变化和速度大小的变化。

与平均速度的定义类似,平均加速度为速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 与速度变化过程所经历时间 Δt 的比值,用 $\bar{\boldsymbol{a}}$ 表示,即

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\boldsymbol{v}(t+\Delta t) - \boldsymbol{v}(t)}{\Delta t} \quad (1.21)$$

平均加速度只描述在时间 Δt 内速度变化的平均快慢,它是一矢量,其方向与速度增量方向相同。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均加速度趋于一个极限值,这个极限值称为瞬时加速度,简称加速度,用 $\boldsymbol{a}$ 表示,即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1.22)$$

又

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$$

则

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1.23)$$

可见,加速度是速度对时间的一阶导数,是位矢对时间的二阶导数,若已知质点的运动方程,则可依次求出质点运动的速度和加速度。加速度为一矢量,其大小反映速度变化的快慢,其方向就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。这里需要注意的是,加速度的方向通常与该时刻速度的方向不同,加速度方向与速度方向之间的夹角 θ 决定质点的运动形式: $\theta=0^\circ$ 时,质点作加速直线运动,如图 1.5(a) 所示; $\theta=180^\circ$ 时,质点作减速直线运动,如图 1.5(b) 所示; $\theta=90^\circ$ 时,质点作匀速曲线运动,如图 1.5(c) 所示; $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,质点作加速曲线运动,如图 1.5(d) 所示; $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,质点作减速曲线运动,如图 1.5(e) 所示。此外,通过总结可发现,在曲线运动中加速度的方向总是指向曲线凹的一侧。

在直角坐标系中,加速度可表示为

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt}\boldsymbol{k} \quad (1.24)$$

或

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\boldsymbol{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\boldsymbol{k} \quad (1.25)$$

可以用 a_x 、 a_y 、 a_z 分别表示加速度在三个坐标轴上的分量(即投影),则有

$$\boldsymbol{a} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k} \quad (1.26)$$

由式(1.24)至式(1.26)可得