

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit
meinte ich die theoretischen Grundlagen

Das Problem, von welches sich die
Landes gestellt nicht, ist aber sehr ernst
nekturären Bestreben dieses Landes gelungene
Vorspiegelung einer kausalen Gefahr des Fortschritts
des Intellektuellen Bestrebens, nicht nur
machen, sondern auch die Gefahr des Fortschritts
das Land, das die Gefahr des Fortschritts
das Land, das die Gefahr des Fortschritts
das Land, das die Gefahr des Fortschritts

大学物理学

Was soll die Minderheit der Intellektuellen
gegen das Volk? (上册) offen westlichen
revolutionären Weg, der Non-cooperation ist
Jeder Intellektuelle, der aus der Dunkelheit
mündet, müsste jede Aussage vorweggenommen
sich einprägen und wertschöpfend revidieren
kung, seine persönlichen Interessen den kulturellen
des Landes vorzuziehen

gering dürfte aber immer gegenseitig werden
unter Trübsal der möglichen Selbstschonung
auf, das es eines unbescholtenen Betrügers
sich solcher Fälschung zu unterziehen
ist die Inquisition gegen den Geist
notwendig.

Es sind aber genug Personen, für die die
bereits sind, nicht ihren Erfolg berechnen
Wenn nicht, dann werden sie überfordert
als die Vela sind, die ihnen zugeordnet ist.

兵器工业出版社

ist
P. J. Der Brief faucht nicht als, sondern

序

《大学物理学》或名称类似的书籍已经有很多种了,而且其中有几种堪称名家名作。但是,这类书中的大多数是为物理学工作者或为专攻物理学的学生而写的,而作为工科公共课的《大学物理学》教材,其选择余地就非常有限了。本书正是适应这一要求而编写的。

工科院校学习《大学物理学》的目的不在于钻研物理科学本身,而在于物理学规律在本专业中的应用。确实,许多工科专业的专业理论课都是以物理学为其基础的,或者说,这些专业理论课实质上是物理学规律在特定工业应用领域中的延伸。最近一段时期以来,由于新技术,如材料科学、近代光学技术、微电子技术等等不断涌现和发展,也由于科学研究成果向应用技术转化的周期不断缩短,客观上对《大学物理学》不断提出新的要求。这样一来,教材内容的裁剪就成了一门艺术:一方面,篇幅不能过大,不能超出课程学时的限制;另一方面,又要在不伤害物理学规律的完整性,不削弱基础的条件下反映新的内容,这委实是一件不容易办的事。本教材在内容的斟酌选取上,下了很大的功夫。这主要反映在适当调整经典物理和近代物理的比例,加强近代部分,删汰与中学物理重叠的内容,提高课程起点,重视和加强高等数学方法在课程中的应用;在某些关键问题(例如熵)上,提高了论述观点,等等。教材内容的这些改革,无疑会对教学质量的提高起到重要的、积极的作用。

同其它学科领域相比,工科各专业似乎更强调“学以致用”。工科各专业学科领域分布极广,物理学规律同各专业的专业内容结合起来,就是物理学的“学以致用”。当然,这主要是后续的专业课的任务,但是也不排除在《大学物理学》课程阶段就可以有初步的结合与应用。本教材的编写者显然意识到了这一点,教材中一些例题的选择就是要贯彻这一意图,这些例题本身就是一些简化了的实际问题。这样做有利于提高学生学习的兴趣,也有助于培养学生解决实际问题的能力。

本书除了注意学科内容本身之外,还从启迪学生思维,培养学生

自学能力、适应不同层次学生不同的需求等多方面做了努力。例如,适度地引入物理学史,用科学发展中的辩证思维过程来培养学生的创造性思维和创新思想;增加现代物理前沿与技术专题,让学生开阔眼界,了解前沿信息;以及保留一些内容供同学自学等等,为学生的进一步学习和提高留下了余地。

本书的编写者都是工科高等院校的资深教师,有较高的学历和很好的科学研究成绩。特别是他们有多年的教学经历,对物理学教学、教学改革有较深的理解。这本书溶入了他们多年的教学与科研的体会与成果。可以预期,这本教材在改进与提高工科《大学物理学》课程的教学效果上将发挥较大作用,为培养跨世纪的人材打下一个良好的基础。

彭堃堉

前 言

大学物理课是高等工业学校各专业重要的必修基础课。通过大学物理教学将为大学生打下必要的物理基础,同时有利于培养学生养成科学的思维方式和研究问题的科学方法。具有扎实的物理基础将有助于学生创新能力的培养和知识的自我更新,有助于高级技术人材的培养。

编写一套好的《大学物理学》教材,是物理教学的需要,也是广大物理教师的期盼。一套好的教材应满足国家教育部现行的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》,适应跨世纪人材培养的需要。还应好教、好学、好用。为此,我们以最新修订的“基本要求”为依据,在多年教学积累基础上分析比较了一些目前国内外比较优秀的同类大学物理教材,吸取了其中一些比较成功的经验,编写了本教材,在编写中,我们特别注意以下五点:

1. 压缩经典部分,加强近代部分,按总时数 130~140 学时中大于 1/3 的学时数安排近代物理内容,让学生更多感受近百年来物理学的新成就。

2. 根据中学物理教学现状,适当地调整了大学物理各部分的起点,避免了与中学物理教材的重复。特别在力学部分强调了坐标系的建立,矢量运算和微积分的应用。这些变化融合在教学内容和例题、习题等诸方面。

3. 适时地、适度地引入物理学史。

4. 注重内容的更新。全书在编写中力争反映出物理学的新进展及物理学在高新技术中的应用,同时我们在习题和例题的安排上也尽量体现一些新成果和新发现。

5. 把对学生的能力培养贯穿于教学中,体现在教材上,就要给学有余力的学生留有发展的空间,同时培养学生独立获取知识的能力。在本书第六篇精选了部分现代物理前沿的内容供学生阅读。另外书中还有一些带“*”的部分供学生自学提高。

按照以上思路我们组织了长期从事大学物理教学并积极进行教学研究和教学改革的部分高校教师编写了本书。

本教材按“基本要求”,适合授课时数为 130~140 学时。

本书与现行各同类教材相比在内容安排上有以下变动:①把相对论放在第一篇。其好处,一方面因它与牛顿力学有紧密联系;另一方面把近代物理的两大理论支柱分别放在两个学期,均衡了两学期的教学压力,也有利于激发学生学习物理的兴趣。这样的安排还有利于学生接受爱因斯坦的时空观。②把电磁学放在上册。使学生在学大学物理的第一学期就能感受到大学物理与中学物理的明显差别。可引起学生对本课程重视。③热学放在量子物理基础之后。这样可

对气体热容量做进一步讨论,同时在介绍麦克斯韦分布之后,也能对量子统计作一简要叙述。这一部分还加强了热力学第二定律和熵的介绍。这一安排与加强近代部分的指导思想一致。④第六篇内容作为尝试。希望带给学生最新的物理学进展信息并介绍高新技术的物理基础。以便扩大学生视野,使学生对物理学留下深刻的、动态的印象。⑤为培养学生的思维能力,特增加了学习指导部分做为第七篇的内容,除强调了每一部分内容的基本要求以及重要概念和规律的理解外,对部分习题给出了解题思路。

本书是在太原理工大学、北京理工大学、太原重机学院、西安矿院、焦作工学院等五所院校的努力合作下完成的,作者分工如下:

王纪龙:第一、二、三、十八章;周伟:第四、十三、十四、十五章;边志华:第五、六、七章;杨跃俊:第八、九、十章及附录;王钢柱:第十一、十二章;周希坚:第十六、十七、十九、二十、二十一章;王云才:第六篇全部内容。杨毅彪与贺晓宏分别承担了第七篇内容的第一章至第十章、第十一至第二十章内容的编写工作,王纪龙等负责各章的“基本要求”和“重要概念与规律”的编写。

北京理工大学郑晓光副教授与西安矿院王亚民教授分别负责上、下册的统稿工作。

在本书的编写过程中,得到了许多同仁的热情帮助。山西省物理学会理事长、博士生导师彭堃堦教授亲自为本书题写了序。杨学军副教授对第四章内容的编写提出了许多宝贵的意见;李秀燕博士及王跃强、杨玲珍两位研究生为本书第六篇内容提供了大量的文献资料;杨慧岩工程师描绘了本书的部分图稿。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们的学识和水平有限,难免存在一些不足,甚至是错误,恳请使用本书的各位同行与读者批评指正。

王纪龙执笔

1999年10月于太原理工大学

本书中物理量和单位

量的名称	符号	单位名称	单位符号	量纲	备 注
长 度	l, s	米	m	L	
面 积	S	平方米	m^2	L^2	
体 积	V	立方米	m^3	L^3	1L(升)= $10^{-3} m^3$
时 间	t, τ	秒	s	T	
位 移	$s, \Delta r$	米	m	L	
速 度	v, u	米每秒	$m \cdot s^{-1}$	LT^{-1}	
加 速 度	a	米每二次方秒	$m \cdot s^{-2}$	LT^{-2}	
角 位 移	θ	弧度	rad	1	
角 速 度	ω	弧度每秒	$rad \cdot s^{-1}$	T^{-1}	
角 加 速 度	β	弧度 每二次方秒	$rad \cdot s^{-2}$	T^{-2}	
质 量	m	千克	kg	M	
力	F	牛顿	N	LMT^{-2}	$1 N = 1 kg \cdot m \cdot s^{-2}$
重 力	G	牛顿	N	LMT^{-2}	
功	A	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
能 量	$E, (W)$	焦耳	J	L^2MT^{-2}	$1 J = 1 N \cdot m$
动 能	E_k	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
势 能	E_p	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
功 率	P	瓦特	W	L^2MT^{-3}	$1 W = 1 J \cdot s^{-1}$
摩 擦 系 数	μ	—	—	—	
动 量	p	千克米每秒	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$	LMT^{-1}	
冲 量	I	牛顿秒	$N \cdot s$	LMT^{-1}	
力 矩	M	牛顿米	$N \cdot m$	L^2MT^{-2}	
转 动 惯 量	J	千克二次方米	$kg \cdot m^2$	L^2M	
角 动 量 (动 量 矩)	L	千克二次 方米每秒	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	L^2MT^{-1}	
电 流	I	安培	A	I	
电 荷 量	Q, q	库仑	C	TI	
电 荷 线 密 度	λ	库仑每米	$C \cdot m^{-1}$	$L^{-1}TI$	
电 荷 面 密 度	σ	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电 荷 体 密 度	ρ	库仑每立方米	$C \cdot m^{-3}$	$L^{-3}TI$	
电 场 强 度	E	伏特每米	$V \cdot m^{-1}$ 或 $N \cdot C^{-1}$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1 V \cdot m^{-1} = 1 N \cdot C^{-1}$
电 场 强 度 通 量	Ψ_E	伏特米	$V \cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	
电 势	V	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电 势 差、电 压	U	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电 容 率	ϵ	法拉每米	$F \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
真 空 电 容 率	ϵ_0	法拉每米	$F \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
相 对 电 容 率	ϵ_r	—	—	—	
电 偶 极 矩	p_e	库仑米	$C \cdot m$	LI	
电 极 化 强 度	P	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	

量的名称	符号	单位名称	单位符号	量纲	备注
电极化率	χ_e	—	—	—	
电位移	D	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电位移通量	Ψ_D	库仑	C	TI	
电容	C	法拉	F	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	$1 F = 1 \frac{C}{V}$
电流密度	j	安培每平方米	$A \cdot m^{-2}$	$L^{-2}I$	
电动势	$\mathcal{E}$	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电阻	R	欧姆	Ω	$L^2T^{-3}I^{-2}$	$1 \Omega = 1 V \cdot A^{-1}$
电阻率	ρ	欧姆米	$\Omega \cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	
电导率	γ	西门子每米	$S \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	$1 S = 1 A \cdot V^{-1}$
磁感应强度	B	特斯拉	T	$MT^{-2}I^{-1}$	$1 T = 1 Wb \cdot m^{-2}$
磁导率	μ	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
真空磁导率	μ_0	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
相对磁导率	μ_r	—	—	—	
磁通量	Φ_m	韦伯	Wb	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$1 Wb = 1 V \cdot s$
磁化强度	M	安培每米	$A \cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁化率	χ_m	—	—	—	
磁场强度	H	安培每米	$A \cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁矩	p_m	安培平方米	$A \cdot m^2$	L^2I	
自感	L	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$1 H = 1 Wb \cdot A^{-1}$
互感	M	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	
电场能量	W_e	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
磁场能量	W_m	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
电磁能密度	w	焦耳每立方米	$J \cdot m^{-3}$	$ML^{-1}T^{-2}$	
振 幅	A	米	m	L	
周 期	T	秒	s	T	
频 率	ν	赫[兹]	Hz	T^{-1}	
角 频 率	ω	每秒	s^{-1}	T^{-1}	
相 位	φ	—	—	—	
波 长	λ	米	m	L	
波 数	σ	每米	m^{-1}	L^{-1}	主要用于 光谱学
波 速	u, c	米每秒	$m \cdot s^{-1}$	LT^{-1}	
角 波 数	k	每米	m^{-1}	L^{-1}	
波的强度	I	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$	MT^{-3}	
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$	MT^{-3}	
声 压	p	帕[斯卡]	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$	
声 强 级	L_I	贝	B	—	常用分贝 (dB)为单位
折 射 率	n	—	—	—	
光 程 差	δ	米	m	L	

目 录

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	(2)
§ 1-1 质点运动的描述	(2)
§ 1-2 曲线运动	(9)
§ 1-3 相对运动	(14)
习题	(16)
第二章 质点动力学	(19)
§ 2-1 牛顿运动定律 力	(19)
§ 2-2 牛顿定律的适用范围	(28)
§ 2-3 冲量 动量定理	(30)
§ 2-4 动量守恒定律	(33)
* § 2-5 火箭的飞行原理	(36)
§ 2-6 功 动能 动能定理	(38)
§ 2-7 势能 机械能守恒定律	(42)
§ 2-8 碰撞	(54)
习题	(59)
第三章 刚体的转动	(65)
§ 3-1 刚体运动学	(65)
§ 3-2 力矩 转动定律	(68)
§ 3-3 角动量与角动量守恒定律	(77)
§ 3-4 转动中的功和能	(82)
* § 3-5 质心运动定律 刚体的平面运动	(87)
* § 3-6 刚体的进动	(90)
习题	(92)
第四章 狭义相对论基础	(95)
§ 4-1 力学相对性原理	(95)
§ 4-2 迈克耳孙-莫雷实验	(98)
§ 4-3 狭义相对论的基本假设	(100)
§ 4-4 几个重要的狭义相对论效应	(104)
§ 4-5 狭义相对论动力学基础	(111)
习题	(118)

第二篇 电磁学

第五章 真空中的静电场	(121)
§ 5-1 电荷 库仑定律	(121)
§ 5-2 电场 电场强度	(124)
§ 5-3 电场线 高斯定理	(132)
§ 5-4 静电场的环路定理 电势	(140)

§ 5-3 等势面 电势梯度	(148)
§ 5-6 带电粒子在静电场中的运动	(151)
习题	(154)
第六章 静电场中的导体和电介质	(158)
§ 6-1 静电场中的导体	(158)
§ 6-2 空腔导体 静电屏蔽	(163)
§ 6-3 电容和电容器	(166)
§ 6-4 电介质的极化	(171)
§ 6-5 电介质中的静电场	(176)
§ 6-6 静电场中的能量	(180)
* § 6-7 电介质 铁电体和压电体及其应用	(183)
习题	(185)
第七章 稳恒电流	(190)
§ 7-1 电流 电流连续性方程	(190)
§ 7-2 欧姆定律 焦耳-楞次定律	(192)
§ 7-3 电源 电动势	(196)
§ 7-4 稳恒电流电路定律	(198)
习题	(201)
第八章 真空中的稳恒磁场	(203)
§ 8-1 磁场 磁感应强度矢量	(203)
§ 8-2 毕奥-沙伐尔定律	(206)
§ 8-3 运动电荷的磁场	(211)
§ 8-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	(212)
§ 8-5 安培定律	(217)
§ 8-6 磁力做功	(222)
§ 8-7 带电粒子在电场和磁场中的运动	(223)
习题	(227)
第九章 介质中的磁场	(231)
§ 9-1 磁介质的磁化	(231)
§ 9-2 磁介质的磁场	(234)
§ 9-3 铁磁质	(236)
习题	(240)
第十章 变化电磁场的基本规律	(241)
§ 10-1 电磁感应定律	(241)
§ 10-2 动生电动势 感生电动势	(243)
§ 10-3 自感 互感 磁场能量	(251)
§ 10-4 麦克斯韦电磁场理论	(257)
* § 10-5 电磁场量描述的相对性 电磁场的统一性和物质性	(263)
习题	(268)

第三篇 振动和波动

第十一章 机械振动和电磁振荡	(273)
§ 11-1 简谐振动	(273)

§ 11-2 阻尼振动	(282)
§ 11-3 受迫振动 共振	(284)
§ 11-4 电磁振荡	(286)
§ 11-5 同方向的简谐振动的合成	(288)
§ 11-6 相互垂直的简谐振动的合成	(291)
习题	(293)
第十二章 机械波和电磁波	(296)
§ 12-1 机械波的产生和传播	(296)
§ 12-2 平面简谐波的波动方程	(300)
* § 12-3 波动方程的动力学推导	(305)
§ 12-4 波的能量 波的强度	(306)
§ 12-5 声波	(309)
§ 12-6 电磁波	(312)
§ 12-7 惠更斯原理 波的衍射 反射和折射	(322)
§ 12-8 波的叠加原理 波的干涉 驻波	(324)
§ 12-9 多普勒效应	(331)
习题	(334)
第十三章 光的干涉	(339)
§ 13-1 人类对光本性的认识	(339)
§ 13-2 光源 光的相干性	(341)
§ 13-3 光程 光程差	(342)
§ 13-4 杨氏双缝实验	(344)
§ 13-5 薄膜干涉	(351)
§ 13-6 劈尖的干涉 牛顿环	(354)
§ 13-7 迈克耳孙干涉仪	(361)
习题	(362)
第十四章 光的衍射	(365)
§ 14-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	(365)
§ 14-2 单缝和圆孔夫琅和费衍射	(367)
§ 14-3 衍射光栅	(374)
§ 14-4 X射线的衍射 布喇格方程	(379)
习题	(381)
第十五章 光的偏振	(383)
§ 15-1 自然光和线偏振光	(383)
§ 15-2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	(384)
§ 15-3 反射和折射时光的偏振	(386)
§ 15-4 光的双折射现象	(388)
* § 15-5 偏振光的干涉 人工双折射 波晶片	(392)
* § 15-6 旋光现象	(395)
习题	(396)
附录 I 矢量	(398)
附录 II 重要的物理常数和数据	(406)
附录 III 国际单位制 (SI)	(407)
附录 IV 常用的能量、功、热量的单位互换表	(408)

第一篇 力 学

力学是一门古老的学问。在我国,公元前5世纪的《墨经》中已有关于杠杆原理的论述;在西方也可追溯到公元前4世纪亚里士多德(Aristotle)关于力产生运动的说教。但是力学作为一门科学的理论的建立则已到了公元17世纪。公元16世纪末至17世纪初伽利略(Galileo Galilei)用实验的方法发现了落体定律,其后牛顿(I. Newton)提出了以他名字命名的三个运动定律和万有引力定律,从而奠定了古典力学的基础。现在把以牛顿定律为基础的古典力学称为牛顿力学,或经典力学。经典力学理论是物理学中发展最早,最成熟的理论,它有严谨的理论体系和完备的研究方法。因而,从建立到20世纪初,牛顿力学兴盛了约300年。虽然在20世纪初发现了经典力学的局限性(局限于宏观物体的低速运动),因而在宏观物体的高速运动领域建立了相对论,在微观物体的低速运动领域建立了量子力学,但是在一般技术领域,更多只涉及宏观低速问题,因此,经典力学是各工程技术(包括机械、建筑、水利、造船、航空、航天等)的理论基础。力学研究的对象是机械运动。机械运动是指物体间或物体内部各部分之间相对位置的变化。机械运动是存在于自然界中最普遍和最基本的运动形式。力学中提出的许多物理概念和物理原理适用于整个物理学。所以经典力学也是物理学和自然科学的基础。物体的运动总是在一定的空间和时间进行的,所以时空观问题也属力学研究的范畴。

本篇共四章、第一章质点运动学,主要研究质点运动的描述;第二章质点动力学,主要研究物体间相互作用以及它们对物体运动的影响。着重介绍动量、能量等概念及相应的守恒定律;第三章介绍刚体定轴转动的运动学和动力学问题;第四章介绍狭义相对论的基本原理和概念。因为狭义相对论的时空观已成为现代物理的基础概念,而且与牛顿力学有紧密的联系,所以把狭义相对论与经典力学放在一起介绍给学生。这样更有利于学生对这一部分内容的学习和理解。

考虑到中学物理已为学生打下了良好的基础,为处理好与中学物理的衔接。这一部分的第一、二章中,对中学已有的概念只作简单复习,而不作更多重复。在处理问题上注重建立坐标系的训练和微积分及矢量运算的应用。这一思想广泛体现在教学内容和例题、习题中。

第一章 质点运动学

质点运动学侧重用几何学的观点研究质点机械运动状态随时间变化的关系。本章主要内容为:位置矢量、位移、速度和加速度等基本概念及质点的曲线运动和相对运动等。

§ 1-1 质点运动的描述

一、参照系 坐标系 质点

自然界中所有的物体都在不停地运动,绝对静止不动的物体是不存在的。运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,运动和物质是不可分割的。这就是运动的绝对性。例如在地面上相对静止的高楼都随地球一起以 $3.0 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度绕太阳运动,而太阳又以 $3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度在银河系中运动。但是,要描述一个物体的机械运动,必须选择另一个运动物体或几个虽在运动而相互间相对静止的物体作为参考,然后再研究这个运动物体是如何相对于参考物体运动。以上在描述物体运动时被选作参考的物体称为参照系。

在运动学中,参照系的选择可以是任意的。在实际问题中,参照系选择既要考虑问题的性质和需要,又要力求使对运动的描述变的简单。例如,确定交通车辆的位置时可选用固定于地面上的房子或路牌作参照系,这样的参照系通常叫地面参照系。在实验室中确定某一物体的位置时,可选实验室的墙壁或固定的实验桌作参照系,这样的参照系就叫实验室参照系。经验表明对同一物体的运动,选择不同的参照系,对物体运动描述的结果是不相同的。例如,加速上升的升降机天花板上一松动螺钉的下落过程,以升降机为参照系,螺钉的初速为零,作加速下落的直线运动;以地面为参照系,螺钉以脱落时升降机速度为初速作竖直上抛运动。在不同参照系中,对同一物体的运动具有不同的描述,叫做运动描述的相对性。运动描述的相对性表明参照系的选择对描述一个物体的运动具有多么重要的意义。当我们研究一个物体的运动时,必须明确地选择恰当的参照系,只有选定了参照系,运动的描述才有意义。以后还会看到,凡是描述物体运动状态的物理量都具有相对性,如位置矢量,速度矢量等。

参照系选定之后,为了定量地描述一个质点相对于此参照系的位置,需在此参照系上建立固定的坐标系。最常用的坐标系是笛卡尔直角坐标系。

任何物体都有一定的大小,形状和内部结构。通常情况下,物体运动时,内部各点的运动情况常常是不相同的。因此要精确描写一般物体的运动并不是一件简单的事。为使问题简化,可以采用抽象的办法:如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用,或所起的作用可以忽略不计,我们就可以近似地把此物体看作一个没有大小和形状的理想物体,称为质点。质点是一个理想化模型,质点仍然是一个物体,它具有质量,同时它已被抽象化为一个几何点。质点是实际物体在一定条件下的抽象。理想化模型的引入在物理学中是一种常见的科学分析方法,在以后的课程中还将引入一系列理想模型,例如刚体,理想气体,点电荷等。把物体抽象为质点的方法具有很大的实际意义和理论价值。如在天文学中把庞大的天体抽象为质点的方法已获得极大的成功。从理论上讲,我们可以把整个物体看成由无数个质点所组成的质点系,从分析研究这些最简单的质点入手,就可能把握整个物体的运动,所

以质点运动是研究物体运动的基础。物体抽象为质点需要注意：①同一个物体在一个问题中可抽象为质点，在另一个问题中则不能简化为质点。例如研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离（约 1.5×10^8 km）比地球的半径（约为 6 370 km）大得多，地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的，可以把地球当作质点，但研究地球自转时，地球上各点的运动情况就大不相同，地球就不能当作质点处理了。②注意区别质点与小物体。物体再小（原子核的线度约为 10^{-15} m）也有大小、形状，而重点为一几何点，它没有大小，在空间占有确切的位置。

二、位置矢量 位移

1. 位置矢量

空间任一点 P 的位置，在直角坐标系中可以用一组坐标 (x, y, z) 来表示，也可以用从坐标原点向 P 点引一有方向的线段 r 来表示。如图 1-1 所示。 r 称为位置矢量。简称位矢，也叫矢径。

矢径的端点就是质点的位置，矢径在坐标轴上的投影分别为 x, y, z 。位置矢量可表示为

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

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为沿 x, y, z 轴的单位矢量。位置矢量的大小为

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

位置矢量的方向余弦为

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

式中 α, β 和 γ 分别是 $\mathbf{r}$ 与 x 轴、 y 轴和 z 轴之间的夹角。

质点运动时，质点的空间位置随时间的变化关系可用矢径或坐标表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1.1)$$

或

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.2)$$

当质点在 Oxy 平面内运动时则(1.2)式简化为

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

知道了运动方程，质点的整个运动情况也就清楚了，所以运动学的主要任务之一就是根据各种问题的具体条件，求解质点的运动方程。

运动质点在空间所经过的径迹称为轨道。轨道为直线的运动，称为直线运动；轨道为曲线的运动，称为曲线运动。从(1.2)式中消去 t 后可得轨道方程，而(1.2)式是轨道的参数方程。例如一运动质点的运动方程为

$$\mathbf{r} = a \cos \omega t \mathbf{i} + a \sin \omega t \mathbf{j}$$

由 $x = a \cos \omega t, y = a \sin \omega t$ 消去 t 便得其轨道方程为

$$x^2 + y^2 = a^2$$

位置矢量具有大小、方向，服从几何加法。位置矢量具有瞬时性，质点在运动过程中，不同时刻的位置矢量不同。位置矢量描述质点的运动状态，前面已经讲过，它具有相对性。运动质点的某一空间位置，用不同的坐标系来描写，结果是不一样的。

(1.1)式表明：质点的实际运动是各分运动的矢量合成，这个由空间的几何性质所决定的各分运动和实际运动的关系叫运动的迭加（或合成）原理。

2. 位移

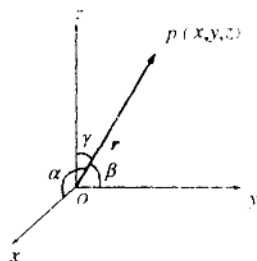


图 1-1 质点的位置表示

设曲线 AB 是质点轨道的一部分,如图 1-2 所示。 t 时刻质点在 A 点处, $t+\Delta t$ 时刻,质点到达 B 点处。 A 、 B 两点的位置分别由 $\mathbf{r}_A$ 和 $\mathbf{r}_B$ 来表示。在 Δt 时间内,质点位置的变化可以用由 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示,称为质点的位移。显然

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r} \quad (1.3)$$

$\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$ 表示矢径 $\mathbf{r}$ 在 Δt 时间内的增量,所以用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示。 $\Delta \mathbf{r}$ 即质点在 t 到 $t+\Delta t$ 这一段时间内的位移。

应该注意:①位移表示质点位置的改变,并非质点所经历的路程。如图 1-2 所示, $\Delta \mathbf{r}$ 为矢量,它的量值 $|\Delta \mathbf{r}|$ 即割线 AB 的长度,而路程 Δs 是标量,即曲线 AB 的长度。只有在时间 Δt 趋近于零时 Δs 和 $|\Delta \mathbf{r}|$ 方可视为相等。即使在直线运动中,位移和路程也是两个截然不同的概念。

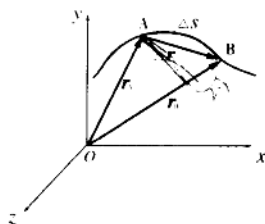


图 1-2 位移矢量

② $|\Delta \mathbf{r}|$ 不等于 Δr 。 $\Delta r = r(t+\Delta t) - r(t)$,它反映 Δt 时间内质点相对于原点的径向长度增加。一般地说 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$,如图 1-2 所示。

③位置矢量和位移在量值上都表示长度,常用单位为米(m),千米(km),和厘米(cm)。

三、速度 加速度

1. 速度

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和发生这段位移所经历的时间 Δt 的比称为质点在这段时间内的平均速度。以 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示平均速度,则

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.4)$$

平均速度是矢量,它的方向就是位移的方向。

当 Δt 趋于零时(1.4)式的极限,即质点位置矢量对时间的变化率,称为质点在时刻 t 的瞬时速度,也叫即时速度,简称速度。用 $\mathbf{v}$ 表示速度。则

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.5)$$

速度为矢量,速度的方向就是 Δt 趋于零时, $\Delta \mathbf{r}$ 的方向,如图 1-3 所示,即质点运动轨道在 A 点的切线方向。因此,质点在 t 时刻的速度的方向就沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线而指向运动的前方。

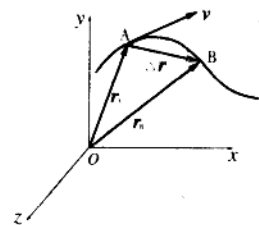


图 1-3 速度矢量

速度的大小叫速率,以 v 表示,则有

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \quad (1.6)$$

若以 Δs 表示在 Δt 时间内质点沿轨道所经过的路程,当 Δt 趋于零时, $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$,由此可得

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.7)$$

上式表明速率的大小又等于质点所走过的路程对时间的变化率。

一般地

$$v = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \neq \frac{dr}{dt}$$

将(1.1)式代入(1.5)式,由于 i, j, k 不随时间改变,所以有

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.8)$$

速度沿三个坐标轴的分量 v_x, v_y, v_z 分别为

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1.9)$$

速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.10)$$

速度是矢量,既有大小,又有方向,服从几何加法。速率是标量,只有大小没有方向。速度是描述质点运动状态的物理量,对于不同的参照系,质点速度大小,方向是不同的,速度具有相对性。

在国际单位制即SI制中速度的单位是米·秒⁻¹($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

一些物体运动速度大小:如光在真空中速度为 $3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,北京正负电子对撞机中电子速度为0.999 999 98倍的光速,空气中声速(0°C)为 $3.3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,人跑步(最大)速度 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2. 加速度

在变速运动中,质点的运动速度是随时间变化的,而质点速度的变化情况要用加速度来表示。

若以 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t+\Delta t)$ 分别表示质点在 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻的速度,如图1-4所示。则在这段时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$ 由下式定义。

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}(t+\Delta t) - \mathbf{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.11)$$

当 Δt 趋于零时,此平均加速度的极限,即速度对时间的变化率,称为质点在时刻 t 的瞬时加速度,简称加速度,以 $\mathbf{a}$ 表示加速度,则有

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

加速度是矢量,是速度对时间的变化率,因此,不论是速度的大小发生变化,或者是速度的方向发生变化,或者是速度的大小和方向同时发生变化,都有加速度。

把(1.5)式代入(1.12)式得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.13)$$

把(1.8)式代入(1.12)式得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \quad (1.14)$$

加速度沿三个坐标轴的分量分别为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \quad (1.15)$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.16)$$

加速度的单位是米·秒⁻²($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

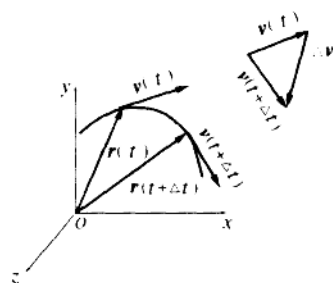


图1-4 加速度矢量

例 1-1 汽车向东行驶 5 km, 又向南行驶 4 km, 再向西行驶 2 km, 求汽车合位移的方向和大小。

解 取向东为 x 轴的正方向, 向北为 y 轴正方向建立坐标系, 如图 1-5 所示, 则对

第一位移矢量 Δr_1 有 $\Delta x_1 = 5 \text{ km}$ $\Delta y_1 = 0$

第二位移矢量 Δr_2 有 $\Delta x_2 = 0$ $\Delta y_2 = -4 \text{ km}$

第三位移矢量 Δr_3 有 $\Delta x_3 = -2 \text{ km}$ $\Delta y_3 = 0$

由位移定义得

$$\Delta r = r_3 - r_1 = (x_3 - x_1)i + (y_3 - y_1)j = \Delta x i + \Delta y j$$

$$|\Delta r| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

此处 $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = (5 + 0 - 2) \text{ km} = 3 \text{ km}$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 = 0 - 4 + 0 = -4 \text{ km}$$

$$|\Delta r| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{3^2 + (-4)^2} \text{ km} = 5 \text{ km}$$

合位移与 x 轴夹角为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \arctan \left(\frac{-4}{3} \right) = -53.1^\circ$$

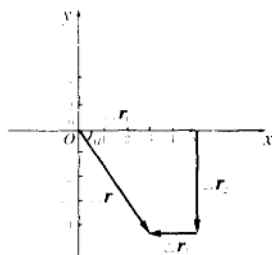


图 1-5 例 1-1 图

例 1-2 一质点在 Oxy 平面内运动, 其运动方程为 $x=4t$, $y=6-2t^2$, 式中 x, y 以 m 计, t 以 s 计。(1)求质点的轨道方程;

(2)求 2 s 末质点的位置矢量, 速度和加速度;

(3)在什么时刻, 质点的位置矢量与速度矢量相互垂直;

(4)在什么时刻, 质点离原点最近? 其距离是多少。

解 (1)由运动方程 $x=4t$ 和 $y=6-2t^2$ 消去 t 得轨道方程为

$$y = 6 - 2t^2 = 6 - 2 \left(\frac{x^2}{16} \right) = 6 - \frac{x^2}{8}$$

(2)位置矢量 $r=4ti+(6-2t^2)j$, 第 2 s 末位置矢量 $r(2)$ 为

$$r(2)=8i-2j$$

速度矢量 $v=\frac{dr}{dt}=4i+(-4t)j=4i-4tj$, 第 2 s 末速度 $v(2)$ 为

$$v(2)=4i-8j$$

加速度矢量 $a=\frac{dv}{dt}=-4j$, 第 2 s 末加速度仍为 $-4j$, 本题加速度大小为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 方向沿 y 轴负方向。

(3)由 $r \perp v$ 得 $r \cdot v = 0$ 即 $r \cdot v = xv_x + yv_y = 0$, 由此得

$$4t \times 4 + (6-2t^2) \times (-4t) = 16t - 24t + 8t^3 = 8t^3 - 8t = 0$$

由上式解得 $t_1=0$ $t_2=1 \text{ s}$ $t_3=-1 \text{ s}$ 舍去; 所以 $t=0$ 和 $t=1 \text{ s}$ 时位置矢量与速度矢量相互垂直。

(4)质点到原点的距离 r 为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{16t^2 + (6-2t^2)^2} = \sqrt{4t^4 - 8t^2 + 36} = 2 \sqrt{t^4 - 2t^2 + 9}$$

由 $\frac{dr}{dt}=0$ 得 $4t^3-4t=0$

由上式解得 $t_1=0, t_2=1 \text{ s}, t_3=-1 \text{ s}$ 舍去。而 $t_1=0$ $r_1=6 \text{ m}; t_2=1 \text{ s}, r_2=5.66 \text{ m}$, 所以 $t=1 \text{ s}$ 时质点离原点最近, 距离为 5.66 m。

例 1-3 某物体的运动规律为 $\frac{dv}{dt} = -kv^2t$, 式中 k 为大于零的常数, 当 $t=0$ 时, 初速为 v_0 , 求速度 v 与时间的关系。

解 由 $\frac{dv}{dt} = -kv^2t$, 得 $-\frac{dv}{v^2} = kt dt$, 由题意知 $t=0$ 时 $v=v_0$

所以

$$\int_{v_0}^v -\frac{dv}{v^2} = \int_0^t kt dt$$

积分并整理得

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} + \frac{1}{2} kt^2$$

四、质点运动学的两类问题

有了运动方程, 不仅可以知道质点任意时刻所处的位置, 而且通过微分还可以确定其速度和加速度。反过来, 若已知质点的速度或加速度, 则根据初始条件、通过积分可以建立起质点的运动方程。这就构成了常说的运动学的两类问题。第一类问题通过前面的例题已作过讨论, 下面仅以一维运动为例说明如何建立运动方程。掌握了基本方法后, 读者不难自行推广到二维和三维运动情况。

一维运动中, 位移、速度和加速度各矢量全都在同一直线上, 因此可以把各量当标量来处理。设质点的直线运动沿 x 轴进行, 显然质点的坐标 x (质点的位置) 是随时刻 t 而改变的。即

$$x = x(t)$$

x 为正值表示质点的位置在原点的右边 (x 轴正向), x 为负值表示质点在原点左边。相应地, 瞬时速度、瞬时加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt} \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

v 和 a 的正负表示它们指向沿 x 轴正方向或沿 x 轴负方向。 a 大于零或小于零并不表示质点是加速运动或减速运动。 a 与 v 同向表示质点加速运动, a 与 v 反向表示质点减速运动。

例 1-4 设质点沿 x 轴匀加速直线运动。已知其加速度 a 为一恒量, 且 $t=0$ 时刻, 质点的初位置为 x_0 , 初速度为 v_0 。确定任一时刻质点的运动状态。

解 由 $a = \frac{dv}{dt}$ 得 $dv = a dt$, 两边积分得

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

即

$$v - v_0 = at \quad \text{或} \quad v = v_0 + at \quad (1)$$

再由 $v = \frac{dx}{dt}$ 得 $dx = v dt = (v_0 + at) dt$, 然后对两边积分得

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

即

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{位移公式}) \quad (2)$$

或

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{运动方程}) \quad (3)$$

若由

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$$

便有

$$v dv = a dx$$