



“十二五”江苏省高等学校重点教材

物理学及其工程应用

(下册)

University
Physics



主 编 刘扬正 孙 宏

高等教育出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教

教材编号：2013-1-083

物理学及其工程应用

(下册)

WULIXUE JIQI GONGCHENG YINGYONG

主 编 刘扬正 孙 宏

高等教育出版社·北京

内容简介

本书在教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)指导下,秉承学以致用教育理念,满足应用型工程技术人才培养的总体要求,精选了大学物理课程教学内容,以突出科学性、现代性和实用性,力求做到物理理论密切联系工程实际。全书分上、下两册出版,包括力学、振动、波和光学、热学、电磁学、相对论、量子物理以及物理知识在工程应用中的探究性课题等部分,其中流体力学、磁路可作为相关专业的选学内容。本书既可作为普通高等院校理工科非物理类专业大学物理课程的教学用书,又可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理学及其工程应用.下册 / 刘扬正, 孙宏主编.

-- 北京: 高等教育出版社, 2015.2

ISBN 978-7-04-041850-7

I. ①物… II. ①刘… ②孙… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第014365号

策划编辑	高建	责任编辑	高建	封面设计	李小璐	版式设计	马敬茹
插图绘制	黄建英	责任校对	刁丽丽	责任印制	韩刚		

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	保定市中国画美凯印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787mm×960mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	15.25	版次	2015年2月第1版
字数	270千字	印次	2015年2月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	27.30元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 41850-00

常用物理常量表

物理量	符号	数值	单位	相对标准 不确定度
光速	c	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	精确
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	精确
真空电容率	ϵ_0	$8.854\ 187\ 817\ \dots \times 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	精确
引力常量	G	$6.673\ 84(80) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	1.2×10^{-4}
普朗克常量	h	$6.626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	4.4×10^{-8}
约化普朗克常量	$h/2\pi$	$1.054\ 571\ 726(47) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	4.4×10^{-8}
元电荷	e	$1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19}$	C	2.2×10^{-8}
电子质量	m_e	$9.109\ 382\ 91(40) \times 10^{-31}$	kg	4.4×10^{-8}
质子质量	m_p	$1.672\ 621\ 777(74) \times 10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
中子质量	m_n	$1.674\ 927\ 351(74) \times 10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
精细结构常数	α	$7.297\ 352\ 569\ 8(24) \times 10^{-3}$		3.2×10^{-10}
精细结构常数的倒数	α^{-1}	137.035 999 074(44)		3.2×10^{-10}
里德伯常量	R_∞	10 973 731.568 539(55)	m^{-1}	5.0×10^{-12}
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.022\ 141\ 29(27) \times 10^{23}$	mol^{-1}	4.4×10^{-8}
法拉第常量	F	96 485.336 5(21)	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$	2.2×10^{-8}
摩尔气体常量	R	8.314 462 1(75)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	9.1×10^{-7}
玻耳兹曼常量	k	$1.380\ 648\ 8(13) \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	9.1×10^{-7}
斯特藩-玻耳兹曼常量	σ	$5.670\ 373(21) \times 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	3.6×10^{-6}
磁通量子	Φ_0	$2.067\ 833\ 758(46) \times 10^{-15}$	Wb	2.2×10^{-8}
电导量子	G_0	$7.748\ 091\ 734\ 6(25) \times 10^{-5}$	S	3.2×10^{-10}
原子质量常量	m_u	$1.660\ 538\ 921(73) \times 10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
理想气体的摩尔体积 (标准状态)	V_m	$22.413\ 968(20) \times 10^{-3}$	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	9.1×10^{-7}
洛施密特常量	n_0	$2.686\ 780\ 5(24) \times 10^{25}$	m^{-3}	9.1×10^{-7}
玻尔磁子	μ_B	$927.400\ 968(20) \times 10^{-26}$	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	2.2×10^{-8}
核磁子	μ_N	$5.050\ 783\ 53(11) \times 10^{-27}$	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	2.2×10^{-8}
玻尔半径	a_0	$0.529\ 177\ 210\ 92(17) \times 10^{-10}$	m	3.2×10^{-10}
经典电子半径	r_e	$2.817\ 940\ 326\ 7(27) \times 10^{-15}$	m	9.7×10^{-10}

注:表中的数据为国际科学联合会理事会科学技术数据委员会(CODATA)2010年的国际推荐值。

国际单位制 (SI) 的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

(中华人民共和国 1993 年 12 月 27 日发布, GB3100 - 93)

包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ m/m} = 1$
立体角	球面度	sr	$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2 = 1$
频率	赫[兹]	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
力	牛[顿]	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
功率, 辐[射能]通量	瓦[特]	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s}$
电荷[量]	库[仑]	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
电压, 电动势, 电势	伏[特]	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W}/\text{A}$
电容	法[拉]	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C}/\text{V}$
电阻	欧[姆]	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V}/\text{A}$
电导	西[门子]	S	$1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$
磁通[量]密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$
电感	亨[利]	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb}/\text{A}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$
光通量	流[明]	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
[光]照度	勒[克斯]	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}/\text{m}^2$

(中华人民共和国 1993 年 12 月 27 日发布, GB3100 - 93)

希腊字母发音表

序号	小写	大写	英文注音	国际音标注音	中文注音
1	α	A	alpha	a:lʃ	阿尔法
2	β	B	beta	bet	贝塔
3	γ	Γ	gamma	ga:m	伽马
4	δ	Δ	delta	delt	德尔塔
5	ε	E	epsilon	ep`silon	伊普西龙
6	ζ	Z	zeta	zat	截塔
7	η	H	eta	eit	艾塔
8	θ	Θ	thetə	θit	西塔
9	ι	I	iotə	aiot	约塔
10	κ	K	kappa	kap	卡帕
11	λ	Λ	lambda	lambd	兰布达
12	μ	M	mu	mju	缪
13	ν	N	nu	nju	纽
14	ξ	Ξ	xi	ksi	克西
15	ο	O	omicron	omik`ron	奥密克戎
16	π	Π	pi	pai	派
17	ρ	P	rho	rou	肉
18	σ	Σ	sigma	`sigma	西格马
19	τ	T	tau	tau	套
20	υ	Υ	upsilon	jup`silon	宇普西龙
21	φ(φ)	Φ	phi	fai	佛爱
22	χ	X	chi	phai	西
23	ψ	Ψ	psi	psai	普西
24	ω	Ω	omega	o`miga	欧米伽

目 录

第 4 篇 电 磁 学

第 9 章 静电场	3
9.1 电荷 库仑定律	3
9.1.1 电荷及其性质	3
9.1.2 库仑定律	4
9.2 电场 电场强度	7
9.2.1 电场	7
9.2.2 电场强度	7
9.2.3 电场强度计算	8
9.3 高斯定理	15
9.3.1 电场线	15
9.3.2 电场强度通量	16
9.3.3 高斯定理	18
9.4 静电场的环路定理 电势能	22
9.4.1 静电场力做功的特点	22
9.4.2 静电场的环路定理	23
9.4.3 电势能	24
9.5 电势	24
9.5.1 电势	24
9.5.2 电势差	25
9.5.3 电势的计算	25
9.6 等势面 电势梯度	29
9.6.1 等势面	29
9.6.2 电势梯度	29
9.7 电场中的导体	32
9.7.1 导体的静电平衡状态及条件	33
9.7.2 导体表面的电荷和电场	34
9.7.3 静电屏蔽	36
9.7.4 有导体存在时静电场的分布	38
9.7.5 传导电流	40

9.7.6 电动势 恒定电场	43
9.8 电容 电容器	48
9.8.1 孤立导体的电容	48
9.8.2 电容器及其电容	48
9.9 静电场中的电介质	52
9.9.1 电介质的分类	52
9.9.2 电介质的极化过程	53
9.9.3 有介质时的高斯定理	54
9.9.4 电介质中静电场的计算	55
9.9.5 电介质的击穿	58
9.10 静电场的能量	59
习题	62
第 10 章 恒定磁场	68
10.1 磁场 磁感应强度	68
10.2 毕奥 - 萨伐尔定律	69
10.2.1 毕奥 - 萨伐尔定律	69
10.2.2 运动电荷的磁场	70
10.2.3 用毕奥 - 萨伐尔定律求电流产生的磁场	71
10.3 磁通量 磁场的高斯定理	76
10.3.1 磁感线	76
10.3.2 磁通量	77
10.3.3 磁场的高斯定理	78
10.4 安培环路定理	79
10.4.1 安培环路定理	79
10.4.2 安培环路定理的应用	81
10.5 磁场对运动电荷的作用	84
10.5.1 洛伦兹力	84
10.5.2 带电粒子在磁场中的运动	84
10.6 磁场对载流导体的作用	89
10.6.1 安培力	89
10.6.2 磁场作用于载流线圈的磁力矩	91
10.7 磁场中的磁介质	94
10.7.1 磁介质	94
10.7.2 顺磁质与抗磁质的磁化	94
10.7.3 磁介质中的安培环路定理	95
10.7.4 铁磁质	98
10.8 磁路 磁路定律	101

10.8.1 磁路	101
10.8.2 磁路定律	104
10.9 磁路计算	107
10.9.1 恒定磁通无分支磁路的计算	107
10.9.2 恒定磁通有分支磁路的计算	109
习题	110
第 11 章 电磁感应	118
11.1 电磁感应定律	118
11.1.1 法拉第电磁感应定律	118
11.1.2 感应电动势的方向	119
11.2 动生电动势	122
11.2.1 动生电动势的计算	122
11.2.2 动生电动势的能量转换	124
11.3 感生电动势	126
11.4 自感与互感	129
11.4.1 自感	129
11.4.2 互感	130
11.5 磁场能量	134
11.6 位移电流 电磁场基本方程的积分形式	136
11.6.1 位移电流与全电流安培环路定理	136
11.6.2 电磁场 麦克斯韦电磁场方程的积分形式	139
习题	141
电磁学在工程应用中的探究性课题	147

第 5 篇 近代物理

第 12 章 狭义相对论简介	165
12.1 爱因斯坦基本原理	165
12.1.1 伽利略变换与经典时空观	165
12.1.2 狭义相对论产生的背景和条件	166
12.1.3 狭义相对论的基本原理	168
12.2 爱因斯坦时空观	170
12.2.1 同时性的相对性	170
12.2.2 长度收缩效应	171
12.2.3 时间延缓效应	172
12.3 狭义相对论动力学	173
12.3.1 质量与速度的关系	173
12.3.2 相对论动力学基本方程	174

12.3.3	质能关系	175
12.3.4	质能公式在原子核裂变和聚变中的应用	176
12.3.5	能量和动量关系	177
	习题	181
第 13 章	量子论简介	185
13.1	黑体辐射 普朗克量子假设	185
13.1.1	黑体 黑体辐射	185
13.1.2	斯特藩-玻耳兹曼定律 维恩位移定律	186
13.1.3	黑体辐射的瑞利-金斯公式 经典物理的困难	187
13.1.4	普朗克假设 普朗克黑体辐射公式	188
13.2	光的量子性	190
13.2.1	光电效应现象	190
13.2.2	光子 爱因斯坦方程	191
13.2.3	光的波粒二象性	192
13.2.4	康普顿效应	193
13.3	氢原子的玻尔理论	196
13.3.1	氢原子光谱的规律性	197
13.3.2	卢瑟福的原子有核模型	197
13.3.3	氢原子的玻尔理论	198
13.3.4	玻尔理论的成果和局限性	201
13.4	德布罗意波 实物粒子的波动性	201
13.4.1	德布罗意波	201
13.4.2	德布罗意波的实验证明	202
13.4.3	应用举例	203
13.4.4	德布罗意波的统计解释	203
13.5	海森伯不确定关系	204
13.6	波函数 薛定谔方程	206
13.6.1	波函数 概率密度	206
13.6.2	薛定谔方程	207
13.6.3	一维无限深势阱问题	208
13.6.4	一维方势垒 隧道效应	210
	习题	211
	综合物理知识在工程应用中的探究性课题	215
	部分习题参考答案	221
	参考文献	231

电 磁 学

电磁学是研究电磁现象的产生、运动及规律的学科，即研究电荷、电场与磁场的基本性质和基本规律及其相互联系的科学。它主要包括电现象和电荷相互作用规律的静电场、磁现象和恒定电流相互作用规律的恒定磁场及变化电场与变化磁场间相互作用的电磁感应与电磁波三部分内容。

对于电磁现象的定量研究可追溯到 18 世纪库仑定律的建立，其后由高斯、安培、法拉第等逐步确立了电和磁的各条规律。特别是 1831 年法拉第发现了电磁感应现象及其规律，并提出了场和力线的概念，进一步揭示了电与磁的内在联系。19 世纪中叶，麦克斯韦在总结前人成果的基础上，再加上他极富创见的关于感应电场和位移电流的假说，建立了以一组电磁场方程为核心的完整的宏观的电磁场理论，称为经典电磁学。经典电磁学不仅可以解释当时所有宏观的电磁现象，而且还预言了电磁波的存在，并指出光就是一定频率范围内的电磁波。它使人类对宏观电磁现象的认识达到了一个新的高度。

随着近代科学技术的发展和运用，经典电磁学理论已经不能解释微观和高速情况下的电磁现象。20 世纪初，量子理论和狭义相对论的诞生将宏观电磁理论推向一个新的台阶，建立了量子电动力学和相对论电动力学，使近代电磁理论的发展在观念上产生了巨大的飞跃。现在电磁理论在工农业生产、科学研究、军事武器、医学工程及日常生活等方面都有着极其广泛的应用。电磁理论

已成为人类深入认识物质世界必不可少的基本理论. 作为电磁理论基础, 本篇只介绍经典电磁学的内容: 首先介绍电场的描述及其规律, 再介绍磁场的描述及其规律, 最后讨论电场和磁场相互联系的规律——电磁感应.

第 9 章 静 电 场

任何电荷的周围都存在电场,相对于观察者静止的电荷在其周围所激发的电场称为**静电场**.本章首先研究真空中静电场的基本性质,并从电场对电荷的作用以及电荷在电场中移动时电场力做功这两方面,引入描述电场的两个重要物理量——**电场强度**和**电势**;同时,介绍反映静电场基本性质的**场强叠加原理**、**高斯定理**和**静电场的环路定理**;并讨论**电场强度**和**电势**两者之间的关系.最后,结合**导体**、**电介质的电结构特征**,讨论**静电场对导体和电介质的作用和影响**.

9.1 电 荷 库 仑 定 律

9.1.1 电 荷 及 其 性 质

把两种不同材料的物体,例如丝绢和玻璃棒,相互摩擦后,它们都能吸引羽毛、小纸片等轻微物体.这时,我们称这两个物体处于**带电状态**,它们分别带有**电荷**.处于带电状态的物体称为**带电体**.使物体带电的过程称为**起电**.上述用摩擦使物体带电的方法,称为**摩擦起电**.要使物体带电,除了上述摩擦起电外,也可以利用**接触起电**、**感应起电**等方法.实验证明,不论用何种方法起电,物体所带的电荷只有两种,一种是**正电荷**,另一种是**负电荷**.带同号电荷的物体相互排斥,带异号电荷的物体相互吸引.这种相互作用力称为**电性力**,或称**库仑力**、**静电力**.

根据带电体间的相互作用力的大小,我们能够确定物体所带电荷的多少.表示物体带电多少的物理量称为**电荷量**,一般用符号 q 或者 Q 表示.在国际单位制中,电荷量的单位是**库仑**,符号为 C .正电荷的电荷量以正值表示,负电荷的电荷量以负值表示.

常见的宏观物体都是由分子、原子组成的.原子是由一个带正电的原子核和若干个绕核运动的带负电的电子组成.原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成.一个质子所带正电电荷量和一个电子所带的负电电荷量大小相等,此电荷量的大小通常用 e 表示.原子内的电子数和原子核内的质子数相等,所以整个原子呈**电中性**.在通常情况下,由于物体各原子是电中性的,整个宏观物体也

处于电中性状态,物体表现为不带电.由于外来原因,当原子失去一个或若干个电子时,原子内的正电荷多于负电荷,就显现为带正电.反之,当原子获得额外电子时,原子内的负电荷多于正电荷,就显现为带负电.在这两种情况下,对整个物体来说,都呈现带电现象.例如,用丝绸摩擦玻璃棒时,由于摩擦增强了两物体接触处的原子的热运动,使玻璃棒中束缚较弱的一些电子从原子中挣脱出来而转移到丝绸上.结果,失去电子的玻璃棒就带正电,而获得电子的丝绸就带负电.

1. 电荷的量子化

自然界中究竟哪种带电粒子带的电荷量最少呢?1897年汤姆孙从实验中测出电子的比荷 e/m .1913年密立根从实验中测定所有电子都具有相同的电荷,而且带电体的电荷量是电子电荷量的整数倍.如果以 e 代表电子的电荷量绝对值,则带电体的电荷量为

$$q = \pm ne$$

n 为整数.电荷的这种只能取离散的、不连续的量值的性质称为**电荷的量子化**.电子的电荷绝对值 e 称为元电荷,或称为电荷的量子.经近代测定 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.质子的电荷量为 $+e$,电子电荷量为 $-e$.

2. 电荷守恒定律

在物体带电的过程中,随着电子的迁移,物体所带的电荷可以从一个物体迁移到另一个物体,但其所构成的系统的电荷总量既不会增加,也不会减少.实验证明,在一个孤立带电系统中(即没有静电荷通过系统界面),无论发生怎样的物理过程与化学过程,系统所具有的正负电荷的代数和总是保持不变.这就是**电荷守恒定律**.

电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律,无论在宏观领域里,还是在原子、原子核和粒子范围内,电荷守恒定律都成立.要注意的是,这里说的是正负电荷代数和保持不变,而不是正电荷保持不变,或负电荷保持不变.

9.1.2 库仑定律

18世纪末,一些科学家开始对电现象进行定量研究,其中典型代表是法国科学家库仑,1785年他首先从扭秤实验中总结出两个点电荷间相互作用规律,这就是**库仑定律**.

如果带电体可看作只有电荷的几何点,则称为**点电荷**.点电荷只是一个物理模型,实际上是不存在的.如果实际过程中的带电体的线度,比起它到其他带电体的距离小得多,就可以不考虑该带电体的形状和电荷分布的影响,而把它看成一个点电荷.

实验结果指出,真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力大小与它们电

荷量乘积成正比,与它们之间距离的二次方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥、异号电荷相吸.这个结论称为库仑定律.静止电荷之间的作用力,称为库仑力.

如图 9.1 所示,两点电荷的电荷量分别为 q_1 和 q_2 ,由点电荷 q_1 指向点电荷 q_2 的矢量用 r 表示.则电荷 q_1 对电荷 q_2 的作用力为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r \quad (9-1)$$

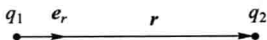


图 9.1 库仑定律

式中 \boldsymbol{e}_r 为从 q_1 指向 q_2 的单位矢量,即 $\boldsymbol{e}_r = \boldsymbol{r}/r$. ϵ_0 称为真空电容率,其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

由上式可知,当 q_1 和 q_2 同号时, $q_1 q_2 > 0$, \boldsymbol{F} 的方向与 \boldsymbol{r} 的方向相同,即 q_2 受到的是斥力作用;当 q_1 和 q_2 异号时, $q_1 q_2 < 0$, \boldsymbol{F} 的方向与 \boldsymbol{r} 的方向相反,即 q_2 受到的是引力作用.

库仑定律是静电学的基本定律,它只适用两个点电荷相互作用时的情况.对于两个以上点电荷相互作用时可借助静电力的叠加原理.实验证明,两个以上的点电荷相互作用时,其中每个点电荷所受的总静电力,等于其他点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和.这就是静电力的叠加原理.也就是说,不管周围有无其他电荷存在,两个点电荷间相互作用力总是符合库仑定律的.当带电体不能看作点电荷时,就不能直接应用库仑定律,这时我们可以把带电体分成无限多个单元,使每个单元都足够小,以至于可以把它们看成点电荷.然后应用库仑定律和静电力的叠加原理就可求出带电体间的相互作用力.

例 1 在氢原子中,电子与质子的距离约为 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$,质子质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$,电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.求它们之间电的相互作用力和万有引力,并比较这两种力的大小.

解 万有引力大小为

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 3.7 \times 10^{-47} \text{ N}$$

库仑力大小为

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = (9.0 \times 10^9) \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

两力的比值为

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.2 \times 10^{39}$$

显然,在微观粒子的相互作用中,万有引力远小于库仑力,完全可以略去不计.

例 2 如图 9.2 所示,在边长为 a 的正方形的四个顶点分别有电荷量均为 Q 的固定的点电荷.在正方形对角线的交点上放置一个质量为 m 、电荷量为 q (q 与 Q 同号) 的自由点电荷.今将 q 沿某一对角线移动一个很小的距离.试问: q 是否将作周期性振动?若是,求出振动周期.

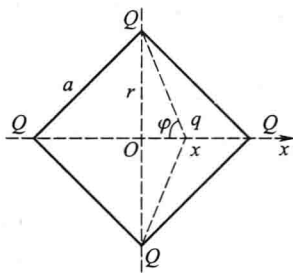


图 9.2 例 2 题图

解 如图所示,取 x 轴,原点 O 在正方形中心,当 q 有小位移 x ($x \ll a$) 时,左右两 Q 给予 q 的作用力沿 $-x$ 方向,上下两 Q 给予 q 的作用力沿 x 方向,左右两 Q 给予 q 的静电力为

$$\begin{aligned} F_x(1) &= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(r+x)^2} - \frac{1}{(r-x)^2} \right] \\ &= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\left(1 + \frac{x}{r}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{x}{r}\right)^{-2} \right] \end{aligned}$$

式中 $r = \frac{\sqrt{2}}{2}a$

为正方形对角线长度之半,因 $x \ll a$,故有 $x \ll r$,则

$$F_x(1) = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\left(1 - \frac{2x}{r}\right) - \left(1 + \frac{2x}{r}\right) \right] = -\frac{Qq}{\pi\epsilon_0 r^3} x$$

上下两 Q 给予 q 的库仑静电力为

$$\begin{aligned} F_x(2) &= 2 \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + x^2)} \cos \varphi \\ &= \frac{2Qq}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + x^2)} \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \\ &= \frac{Qq}{2\pi\epsilon_0 (r^2 + x^2)^{3/2}} x \approx \frac{Qq}{2\pi\epsilon_0 r^3} x \end{aligned}$$

q 所受的合力为

$$F_x = F_x(1) + F_x(2) = -\frac{Qq}{2\pi\epsilon_0 r^3} x$$

这是一个线性回复力.自由点电荷 q 在它的作用下作简谐振动,振动的圆频率 ω 和周期 T 分别为

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{Qq}{2\pi\epsilon_0 m r^3}} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}Qq}{\pi\epsilon_0 m a^3}} \\ T &= \frac{2\pi}{\omega} = \pi \sqrt{\frac{2\sqrt{2}\pi\epsilon_0 m a^3}{Qq}} \end{aligned}$$

9.2 电场 电场强度

9.2.1 电场

库仑定律给出了两个静止的点电荷在真空中相互作用力的定量关系,然而并没有给出这种相互作用是怎样传递的.对于电荷间相互作用力是怎样传递的这个问题,早期有一些不同的观点,但都被近代物理学所否定.按照近代物理中场的观点,电荷间的相互作用是通过一种特殊的介质——电场来传递的.即任何电荷都在周围空间激发起电场;电场是物质的一种特殊形态,与有形的、占据一定空间的带电体不同,它不仅存在于带电体内,也存在于带电体外,以致弥漫在整个空间.

由静止电荷所激发的电场称为静电场,该电荷称为场源电荷.静电场是电磁场的一种特殊形态.电磁场与实物物质一样具有能量、质量和动量等.

电场的重要对外表现是:对引入电场的任何其他电荷都有作用力,称为电场力;当电荷在电场中移动时,电场力将对其做功;使引入电场的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象.本章将根据上述电场的对外表现来研究电场的性质.

9.2.2 电场强度

电场对处于其中的电荷产生作用力,这是电场的一个重要性质.为了研究电场中各点的这一性质,我们用一个电荷 q_0 作试验,这个电荷叫试验电荷.试验电荷的电荷量必须足够小,以至它引入电场后对原有电场几乎没有影响;它的几何线度也必须足够小,当它置于电场中某一点时,其位置才有确定的意义.为了叙述的确定性,我们取试验电荷为正电荷 $+q_0$.

如图 9.3 所示,将试验电荷 q_0 放入静止电荷 $+Q$ 产生的电场中去($+Q$ 称为场源电荷),先后放在电场中 A 、 B 和 C 三个不同位置处.试验发现, $+q_0$ 在不同位置处所受到的电场力 F 的大小与方向均不相同,这说明各点的电场性质不相同;试验进一步发现,就电场中某一点而言,试验电荷在该点所受电场力 F 的大小只与 q_0 的大小有关,而 F 与 q_0 的比值与 q_0 无关,为一不变的矢量.显然,这个不变的矢量只与该点处的电场性质有关,因此,可以定义该矢量为电场强度(简称场强),用符号 E 表示: