

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



名校名家基础学科系列

Textbooks of Base Disciplines from Top Universities and Experts

飞行特色 大学物理

下册

白晓明 等编著

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
名校名家基础学科系列

飞行特色大学物理

下 册

第3版

白晓明 林万峰 编著

贵州师范学院内部使用

机械工业出版社

本书是空军航空大学飞行特色基础课程教材,根据教育部最新颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),并结合作者大学物理课程教学改革实际情况和多年教学经验编写而成。本书内容包括真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、恒定电流、真空中的恒定磁场、磁介质、变化的电场和磁场、横波的偏振、波的干涉、波的衍射、物质波与量子物理等,另外还配置了静电危害、超级电容器、超导应用、电磁炮、潜艇的磁隐身、飞机隐身与反隐身技术、电磁兼容性与液晶显示原理、反声探测技术、口径面天线、红外技术等军事及工程方面应用的小篇幅阅读材料,供学员选读。本书的主要特色是:各章有历史背景与物理思想发展脉络简述,展示科学家的创新思维和实践过程;各节设相关内容的物理知识应用,突出理论联系实际和学以致用;在应用能力训练和章后习题中融入大量与生活、飞行和其他军事相关的习题,激发学员的兴趣,提高教学的针对性和有效性。

本书为高等军事或航空航天院校本科专业学生的大学物理教材,也可作为其他各层次学生的教材或自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞行特色大学物理.下册/白晓明等编著.—3版.—北京:机械工业出版社,2019.7

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 名校名家基础学科系列
ISBN 978-7-111-63206-1

I. ①飞… II. ①白… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第143023号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联

责任校对:陈越 封面设计:马精明

责任印制:郜敏

涿州市京南印刷厂印刷

2019年8月第3版第1次印刷

184mm×260mm·25印张·669千字

标准书号:ISBN 978-7-111-63206-1

定价:59.00元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294

金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网:www.cmpedu.com

第3版前言

课程设置、课程内容是大学教育体系中极为重要的核心部分,面对知识、信息大爆炸,学时压缩等现实问题,“大学物理”作为高等学校理工科各专业学生必修的重要通识性基础课程,其教学内容的改革已成为现实和紧迫的问题。面向未来的具有前瞻性的高效的课程内容传递给学员的一定是令其受用终身的学科思想和方法,学员获得的一定是其终身实践中独立发现、分析和解决问题的能力。为此,本书从物理学史、物理思想方法、解决实际问题 and 学科融合等多角度,强调了工科物理教学的指向性和目的性,从物理知识应用、能力培养、飞行学员现实需求和未来需求等多角度诠释了教材的飞行特色内涵,紧贴部队,聚焦实战,从物理知识拓展、应用性习题与例题和自主学习材料等多角度突出了飞行特色工科物理教学的创新性和前瞻性。本书在高校使用五年来,深得广大师生厚爱,多次被评为最受欢迎的教材,教材的针对性和有效性得到了学员的广泛认可,同时也激发了广大学员的学习热情。下面这些基于飞行特色的学科融合的改革经验为高效教学内容的构建提供了可能路径。

1. 通过学科融合建立物理与飞行的联系。这种联系的建立,发散和拓展了思维,强调了物理教育的应用性、职业性,展示了科学理论的特殊性与普遍性。例如,我们把飞机的斤斗运动理想化为铅垂面的圆周运动,取代了传统教材中理想化的绳拉球的运动;用能量守恒定律求解飞机改出俯冲的高度损失,激发学员的学习兴趣,解决了中国高等教育从苏联体制向西方体制转型中的理论和实际脱节、创新性不足等问题。

2. 通过增加历史和应用模块深化内容。每一章增加了历史背景及物理思想发展脉络模块,介绍物理学史,从中提炼创新过程,培养创新意识。物理学史也是一门课程,我们在学时数不变的前提下做了融合,这就是高效教学!在每一节的物理知识应用模块中,重视用物理学原理解决飞行军事应用问题,如飞机定常运动、盘旋运动分析等,突出飞行特色。

3. 以能力培养牵引课程改革。将传统的知识传授变为能力培养,突出学科思想方法,重视思想方法上的学科交叉融合。如物理学的简谐振动与电工电子的交流电,它们分析解决问题的思想方法相同,运用类比方法进行讲解,就会大大节省时间,同时建立不同领域知识、思想和方法上的联系,充分体现科学魅力。

4. 以学员现实需求牵引课程改革。针对飞行学员部分专业基础课缺失的情况,如没有“工程热力学”课程的理论支撑,就要学习“航空动力装置”等课程,我们以学员现实需求来整合课程内容,如工程热力学中的压气机、喷气发动机、开口系热力学第一定律等作为拓展内容引入到通识基础课里。通过学科交叉,物理老师把物理原理运用到工程实际,增强了教员们的理论自信,如压气机的物理原理就是定向运动气体的动能转化为分子热运动的能量,压气机原理蕴含的能量转化与飞机高度表原理蕴含的重力势能与动能转化,体现了科学思想的一脉相承,凸显了科学原理的统一性和简单性,充分彰显了本科基础课程的教学目的:用简单朴实的原理指导学员一生的科学实践。

5. 以飞行员未来需求牵引课程改革。未来战争是电子战、信息战和智能战,其基础是电磁场理论、微波、天线原理等。针对飞行员可能的未来需求,在教材中我们加入了电磁波辐射、天线阵原理等内容,并且重整教学内容,如机械波、电磁波、光波同时讲授,在相控阵、

孔径雷达、声呐、射电望远镜等看似不相关的技术领域建立了物理思想和问题解决方法上的联系，大大提高了教学综合效率。同时，教员在教学实践中主动拓展学科领域，打通学科间的界限，寻求学科间的联系，进而促进学科综合价值的实现，体现教学学术的价值追求。

另外，本书为适应军事高等教育新大纲的改革要求，增加了量子物理的氢原子描述等内容。为回应广大教员和学员在教与学实践中的中肯意见和建议，改正了上一版中出现的疏漏及个别表达上有欠缺的内容和词句。

本书为解决高等教育扩招带来的学员初等物理知识水平参差不齐等问题而开展分层次教学提供了方便有效的选择路径。对于高层次学员，可以把物理知识拓展内容作为必讲或重点讲授内容；对于普通层次学员，可以把物理知识拓展内容作为选讲、研讨或感兴趣的自学内容；对于文科或物理基础弱的学员，可以把物理知识应用模块内容作为选讲、研讨或感兴趣的自学内容，不讲物理知识拓展内容。

本书由白晓明、林万峰编著。本书的修订出版是在学校和学院的大力支持下完成的。在出版过程中始终得到了学校机关和物理教研室全体教员的支持和帮助，特此一并致谢。

由于时间仓促，加之编者的学识水平和教学经验有限，书中不当之处难免，敬请读者批评指正。

编 者

第2版前言

本书自2013年问世以来,受到空军航空大学各级首长的肯定、支持和鼓励,为大学的教学改革起到了引领和示范作用,曾两次获得大学优秀教学成果一等奖,并已上报全军优秀教学成果三等奖。教材使用三年来,深受广大师生厚爱,教材特色的针对性和有效性得到了学员的广泛认可,同时也激发了广大学员的学习热情。

为了适应军事高等教育紧贴部队、聚焦实战的改革要求,回应教员和学员在教材使用中的意见和建议,解决上一版教材中部分内容飞行特色不够突出的问题,我们对本书做了必要的修订,重点有以下几方面的工作。

(1) 强化物理学思想对学生创新能力培养的重要作用。每章开篇设有“历史背景与物理思想发展脉络”。科学并不仅仅等于技术,它还应该是一种思想文化。读史使人明智,了解科学思想历史脉络,力求以发展、变化、联系的思想来裁决和审视一切科学假说与科学理论,这是科学能不断向前发展的动力,不仅对学员牢固掌握物理理论有益,还可以增强他们的质疑和批判精神,提高学员的创新意识和创新能力。物理学概念、原理逐步形成的历史就是无数智者创新的历史,因此,他们经历的科学创新过程对学员形成科学创新意识有着重要的启迪作用。

(2) 在保留原有风格和特色的基础上,更加突出飞行特色,在“物理知识应用”“物理知识拓展”“应用能力训练”模块中增加了与飞行相关的物理知识,例如,飞机的机动飞行、斤斗、盘旋、飞机撞鸟、飞机静电、飞机油量传感器等内容。

(3) 对教材原有框架和体系做了适当变更,如将机械波的干涉和驻波的内容从上册移到本书,以便与电磁波和波动光学结合讲解,提高教学效率。本书在内容上也做了适当调整,删去了与时代不相适应的内容,增加了与信息化战争需求相适应的电磁波的极化和飞机天线等内容,更新了部分特色习题。

(4) 改正了上一版中出现的疏漏及个别表达上略有欠缺的内容和词句。

本书的修订出版是在空军航空大学和学校训练基地的资助下完成的。在出版过程中始终得到了学校机关和物理教研室全体教员及机械工业出版社各方面的关注、支持和帮助,特此一并致谢。

本书由白晓明、林万峰编著。

由于时间仓促,加之编者的学识水平和教学经验有限,书中不当之处难免,敬请读者批评指正。

编者

第1版前言

进入21世纪后,随着我国综合国力的增强和国防建设的转型,对空军未来发展提出了越来越高的要求。同时,新世纪爆炸式的知识信息增长使知识更新的周期不断缩短。高校扩招变原来的“精英教育”为“素质教育”,引起了生源综合能力素质的改变。在这种大背景下,继续沿用近几十年来的物理教学模式,特别是物理教材模式,就很难适应这种时代的变化。因此,大学新课程体系人才培养方案对飞行人才在科学文化知识、能力和素质上都提出了明确要求:“掌握终身发展必备的自然科学基础理论和基本知识,了解其在军事飞行领域中的应用,了解科学发现的过程,领悟科学探究方法,形成科学创新意识;具有一定的科学思维和创新思维能力;具备运用科学思想和科学方法解决问题的能力,具有求真的科学精神、务实的科学态度和严谨的科学方法。”

大学物理作为本科生必修的一门重要基础课,其主要作用是帮助学生为后续课程及以后的再学习打下必要的物理基础,使他们在获得必要的自然科学知识的同时,还能得到良好的物理学思想和物理学方法的培养和训练。因此,它在落实大学人才培养目标方面具有举足轻重、难以推卸的责任。为此,我们融合我校基础部多年来飞行特色基础教育的经验和成果,编写了这套《飞行特色大学物理》教材。本书的主要特色是:

(1) 每章开篇设“引言”,重点介绍与本章内容相关的物理学史。科学并不完全等于技术,它还应该是一种文化。既面对自然,以理性的态度看待自然,也深入人性,弘扬诚实、合作、为追求真理而不屈不挠的献身精神。读史使人明智,了解科学思想的逻辑发展和历史行程,不仅对学生牢固掌握物理理论有益,还可以增强他们的质疑和批判精神。力求以发展、变化、联系的思想来裁决和审视一切科学假说与科学理论,不迷信权威,这是科学能不断向前发展的动力。创新是我们时代的主题,由物理学概念、原理逐步形成的历史,就是无数智者质疑、批判和创新的历史,他们经历的科学创新过程对学员形成科学创新意识有重要的启迪作用。

(2) 每章后设“飞行军事应用及工程应用阅读材料”,介绍与本章物理基础知识相关的航空理论、航空设备、电子技术和未来军事装备发展的前沿知识,体现飞行特色、军事特色,充满知识性、趣味性、可读性、前瞻性、应用性、启发性和教育性,这里搭建的是一个理论联系实际、激发创新思想和引领学术前沿的平台,也是吸引军校大学生课外学习探究的园地。

(3) 每章后设“本章归纳总结”,引导学生对繁杂的知识进行归纳、总结和升华。

(4) 每章课后习题的配置充分反映物理知识在生活、工程和军事中的应用,特别是在航空等方面的实际应用,在把枯燥、单调的物理学学习转变为有趣、充满活力和生动的课程的同时,强化理论联系实际意识和观念,开发科学思维和创新思维的能力。

(5) 每节内容分为四个部分:

1) 物理学基本内容:根据教育部颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),精选教学内容,强调科学素质的培养,从大学生的认知特点、教学规律以及物理知识体系出发,强调物理知识的系统性、整体性,强调各部分知识间的相互联系。把每节物理知识内容按照物理概念、物理规律和知识运用划分为三个层次,知识运用层次放到“航理及军事应用”或“应用能力训练”栏目,部分较深、较难或教学基本要求次级要求的问题放到“物理知识拓

展”栏目，供学有余力的学生进行探究式学习。

2) 航理及军事应用：主要介绍与本节物理内容密切相关的航理及军事应用知识，用物理学定理（定律）分析和解决航理及军事、工程应用问题，从而调动学生的学习热情，加深学生对物理知识的理解，在提高教学效能的同时，实现军事航空装备科技信息的全程灌输，建立物理基础知识在应用领域中的互通性、统一性，适应科技时代多元化和科技发展综合化的要求。

3) 物理知识拓展：把部分较深、较难的问题放到这里，供学有余力的学生学习和探究。

4) 应用能力训练：这里有例题、应用性习题、物理知识应用等，培养学生应用知识解决实际问题的能力。

本书上册第5~10章由白晓明编著；第2~4章由邵伟编著；绪论和第1章由余辉编著；矢量和题解由于华民编著。下册第17~19章由李春萍编著；第11~16章及第20章主要由白晓明编著，其中第11章、第12章习题和阅读材料由张健编著，第14章、第16章习题由郭秀娟编著。本书在编著过程中参考了国内外许多优秀教材，谨此致谢。

诚然，由于编者知识和能力有限，再加上时间紧迫，虽然有很多好的愿望，但是在实践中不可避免地会出现许多不足，因此，希望本书的每一位读者都是能给予我们最直接帮助的朋友。您在阅读或使用本书时感到的不足，对我们则正是最需要、最宝贵的意见和建议，也正是我们最希望了解和知道的，请不吝赐教。

虽然本书的编写只是教改的一个尝试，但我们还是愿意在学校、教务处及基础部等各级领导的支持下，在大家的帮助下，通过共同努力，把我校大学物理的教学改革推向新的阶段。

编 者

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第11章 真空中的静电场	1
历史背景与物理思想发展脉络	1
11.1 电荷 库仑定律	2
11.2 电场 电场强度	7
11.3 高斯定理	18
11.4 静电场的环路定理 电势	28
11.5 电势叠加原理 电场强度与电势的微分关系	37
本章归纳总结	45
本章习题	46
本章军事应用及工程应用阅读材料——静电危害	49
第12章 静电场中的导体和电介质	51
历史背景与物理思想发展脉络	51
12.1 静电场中的导体	52
12.2 电容 电容器	61
12.3 静电场中的电介质	67
12.4 介质中的高斯定理 电位移矢量	73
12.5 静电场的能量	80
本章归纳总结	84
本章习题	85
本章军事应用及工程应用阅读材料——超级电容器	89
第13章 恒定电流	92
历史背景与物理思想发展脉络	92
13.1 稳恒电流	93
13.2 欧姆定律和焦耳-楞次定律的微分形式	98
13.3 电源 电动势	103
本章归纳总结	111
本章习题	112
本章军事应用及工程应用阅读材料——超导应用	114
第14章 真空中的恒定磁场	117

历史背景与物理思想发展脉络	117
14.1 磁场 磁感应强度	118
14.2 毕奥-萨伐尔定律及其讨论	122
14.3 磁场的高斯定理 安培环路定理	128
14.4 安培定律 磁力矩	137
14.5 洛伦兹力 带电粒子在均匀磁场和非均匀磁场中的运动	146
本章归纳总结	154
本章习题	155
本章军事应用及工程应用阅读材料——电磁炮	162
第15章 磁介质	164
历史背景与物理思想发展脉络	164
15.1 磁介质概述	165
15.2 磁介质中的安培环路定理 关于 H 和 B 的讨论	170
15.3 铁磁质与磁滞现象	176
本章归纳总结	181
本章习题	182
本章军事应用及工程应用阅读材料——潜艇的磁隐身	183
第16章 变化的电场和磁场	185
历史背景与物理思想发展脉络	185
16.1 电磁感应定律	186
16.2 感应电动势	195
16.3 自感与互感	204
16.4 磁场的能量	213
16.5 麦克斯韦电磁场理论及其基本思想	218
16.6 电磁波的辐射	227
本章归纳总结	238
本章习题	239
本章军事应用及工程应用阅读材料——飞机隐身与反隐身技术	245
第17章 横波的偏振	247
历史背景与物理思想发展脉络	247
17.1 电磁波的偏振	248
17.2 光的偏振	255
本章归纳总结	261
本章习题	261
本章军事应用及工程应用阅读材料——电磁兼容性与液晶显示原理	262
第18章 波的干涉	265
历史背景与物理思想发展脉络	265

18.1 惠更斯原理 波的叠加和干涉	266
18.2 驻波	282
18.3 薄膜干涉	292
本章归纳总结	305
本章习题	306
本章军事应用及工程应用阅读材料——反声探测技术	310
第19章 波的衍射	312
历史背景与物理思想发展脉络	312
19.1 光的单缝夫琅禾费衍射	313
19.2 光栅衍射	321
19.3 圆孔夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领	331
本章归纳总结	336
本章习题	337
本章军事应用及工程应用阅读材料——口径面天线介绍	338
第20章 物质波与量子物理	342
历史背景与物理思想发展脉络	342
20.1 光的波粒二象性	343
20.2 物质波	351
20.3 微观粒子运动的描述	358
20.4 氢原子的量子力学处理	367
20.5 激光的原理和应用	373
本章归纳总结	378
本章习题	379
本章军事应用及工程应用阅读材料——红外技术在军事方面的应用	379
习题参考答案	382
附录 常用物理常数	389
参考文献	390

第 11 章 真空中的静电场

历史背景与物理思想发展脉络

人类对电磁现象的认识是从研究静电现象开始的。早在几千年以前，古希腊人就发现了琥珀经摩擦后会吸附轻小物体。英语中的“电 (electricity)”一词是在 1646 年左右出现的，就是来自古希腊语的“琥珀”一词，当时它的含义就是“吸引轻小物体的力”。我国西晋时期的《博物志》中也有摩擦起电的记载。比起磁学来，电学发展还是较晚的，这主要是因为磁学有指南针等方面的应用，而电学则不过是宫廷中的娱乐对象。直到 1660 年盖里克发明摩擦起电机，人们才开始对电现象进行详细的观察和细致的研究。这种摩擦起电机实际上是一个可以绕中心轴旋转的大硫磺球，用人手或布帛摸抚转动的球体表面，球面上就可以产生大量的电荷。直到 18 世纪末，摩擦起电机都一直是研究电现象的基本工具。

人类对电磁现象进行系统的研究始于 16 世纪末，英国医生吉尔伯特做了有关磁体性质的实验，其中最有名的是所谓“小地球”实验，用天然大磁石磨制成磁石球。他把对电现象的研究进行了归纳：一是把电和磁加以比较，发现它们有许多截然不同的性质；二是提出了解释电现象的理论，认为带电体通过周围的介质起传递作用；三是他制成了第一只实验用验电器，可以探测物体是否带电。荷兰莱顿大学的物理教授马森布洛克为了寻找一种保存电的方法，于 1745 年做了莱顿瓶实验，并发明了能蓄电的莱顿瓶，这一发明，为科学界提供了一种能储存电的有效方法，也为进一步研究电现象提供了一种新的强有力的手段，对电知识的传播和发展起了重要的推动作用。

美国的本杰明·富兰克林利用莱顿瓶发现了正电与负电及电荷的守恒定律，他的另一项重大贡献是统一了天电和地电，彻底破除了人们对雷电的迷信。有一次，富兰克林去看来自苏格兰的史宾斯博士表演“奇怪的戏法”——一种电的实验，当富兰克林看到莱顿瓶发出一股长长的火花时，他联想到空中打雷时的闪光，他向自己发问：“天空中的闪电会不会就是极大的放电呢？”为了解开这个疑团，他于 1752 年做了著名的风筝实验，将雷雨云中的电荷收集到莱顿瓶中，并证明这些电荷与实验室中的电荷是一样的。为了引下天电，他本人曾被电击晕过去，他的实验惊动了费城教会，他们斥责富兰克林冒犯神权，是对上帝和雷公的大逆不道，但他仍坚持研究，制造了世界上第一个避雷针。据说一百多年之后，费城盖了一座新的教堂，教会怕遭雷击，派人去找爱迪生，请教他，爱迪生风趣地说：“雷公也有疏忽大意的时候，你说要不要装呢？”

莱顿瓶的发明，从实验手段上为研究电荷之间的相互作用提供了重要的基础，而且不少的人开始从理论上定性地探索电荷之间发生相互作用的情况和原因。1769 年，英国的罗比逊用实验推测平方反比定律，由此确定了同种电荷的排斥力反比于电荷间距离的 2.06 次幂；异种电荷之间的吸引力与它们之间距离的反比关系小于 2 次幂，由此推测，正确的关系应是反比于 2 次幂。

法国物理学家库仑对扭力做过较多的研究，根据自己在扭力方面的知识设计制作了一台精确的扭秤，他认为，磁针支架在轴上必然会带来摩擦，提出用细头发丝或丝线悬挂磁针。研究

中他发现,线扭转时的扭力和磁针转过的角度成比例关系,从而可利用这种装置测出静电力和磁力的大小,这启发他发明了扭秤,建立了著名的库仑定律。库仑定律是整个电磁理论的基础。

库仑在另一篇论文中还提到磁力的平方反比关系,他写道:“看来,磁流体即使不在本质上,至少也在性质上与电流体相似。基于这种相似性,可以假定这两种流体遵从若干相同的定律。”

从库仑定律的建立过程我们可以体会到类比方法的重要性:库仑并没有改变电荷量进行测量,而是说“假说的前一部分无须证明”,显然他是在模仿万有引力定律,认为电力分别与相互作用的两个电荷的电荷量成正比,就如同万有引力分别与相互作用的两个物体的质量成正比一样。库仑测得 $\delta=0.04$,与牛顿万有引力定律类比,他断定静电力与距离成平方反比关系,这是他成功运用类比方法的结果。麦克斯韦曾这样评价过类比法:“为了不用物理理论而得到物理思想,我们必须熟悉物理类比的存在。所谓物理类比,我指的是一种科学定律与另一种科学定律之间的部分相似性,它使得这两种科学可以相互说明。”汤川秀树也是类比方法的成功运用者,他通过将核力和电磁力类比,成功地提出了核力的介子理论。他说:“类比是一种创造性思维的形式……假定存在一个你所不能理解的某物,你偶尔注意到这一物和你所熟悉的另一物的相似性。你通过将两者比较就可以理解你在此刻之前尚不能理解的某物。如果你的理解是恰当的,而且还没有人达到这样的理解,那么可以说,你的思维确实是创造性地得到的。”必须指出:有时简单的类比也会导致错误的结果。如惠更斯类比声波,认为光波也是纵波就错了。可见,类比结果是否正确还得由实验检验。

11.1 电荷 库仑定律



物理学基本内容

在本书第2章我们曾简要地提到了四种基本力。从这章开始学习电磁力,包括电场力和磁场力。电荷和质量一样是描述物质属性的基本物理量。电磁相互作用是带电粒子的基本相互作用。走在地毯上,你的鞋子和地毯之间会因摩擦出现火花,然后,当你在拉一个金属门把手时,由于带电粒子在手指和门把手之间释放,你会感到恼人的电击。闪光灯、使电视工作的电流就是在电动势驱动下的带电粒子的流动。原子也是靠电磁力聚集在一起并形成了固态物质。现在,我们先讨论电荷相对于观察者静止的情况,即电荷之间的相互作用力是静电力的情况。

11.1.1 电荷的量子化

物体能产生电磁现象,应都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。电荷与物质密切相关。人们也正是通过对电荷的各种相互作用和效应的研究,才认识到电荷的如下一些基本性质。

1. 电荷的种类

实验指出,两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相排斥;两根用丝绸摩擦过的玻璃棒也互相排斥;可是,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒与用丝绸摩擦过的玻璃棒互相吸引。这表明硬橡胶棒上的电荷和玻璃棒上的电荷是不同的。物理学家富兰克林通过分析这些实验现象提出:自然界中存在两种电荷:正电荷“+”(如用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷)和负电荷“-”(如用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷),同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。根据现代物理学关于

物质结构的理论我们知道,构成物体的最小单元——原子,是由原子核和电子构成。电子是带负电荷的粒子,而原子核中的质子是带正电荷的粒子。宏观物体失去电子会带正电荷,物体获得额外的电子将带负电荷。带电的物体叫带电体,使物体带电叫作起电,用摩擦方法使物体带电叫作摩擦起电。正、负电荷互相完全抵消的状态叫作中和。任何所谓不带电的物体,并不意味着其中根本没有电荷,而是其中具有等量异号的电荷,以致其整体处在中和状态,因此,对外界不呈现电性。

2. 电荷量

物体所带电荷的多少或参与电磁相互作用的电的强弱称为带电体所带的电荷量,电荷量的单位是库仑(C)。1库仑的电荷量规定为1A的电流在1s的时间内流过导线横截面的电荷量,即

$$1\text{C} = 1\text{A} \cdot 1\text{s} \quad (11-1)$$

电荷量是标量。那么,电荷量可以无限地分割吗?

3. 电荷的量子性

实验证明,在自然界中电荷的电荷量总是以一个基本单元的整数倍出现,电荷的这种特性叫作电荷的量子性。电荷的基本单元(元电荷)就是一个电子所带电荷量的绝对值: $1e = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 。任何物体所带电荷量一定是元电荷的正负整数倍。微观粒子所带的元电荷的数目(正整数或负整数)也叫作它们各自的电荷数。现代物理学理论认为,基本粒子中的强子是由若干种夸克或反夸克组成,而夸克或反夸克带有 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 的电荷量。然而,粒子物理学本身要求夸克不能单独存在,高能物理实验也没有发现自由的夸克(称为夸克禁闭)。因此,自由稳定的分数电荷不存在,电荷的量子性仍是一个得到认可的科学结论。

由于电磁学理论主要研究宏观电磁现象,所涉及的电荷数通常是元电荷的许多倍。从微观原子尺度上看,这些元电荷离散地分布在物体内部。但从宏观上看可以认为,电荷连续地分布在带电物体上,从而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏。犹如宏观上看到的水是连续的,而微观上我们知道水是由一个个水分子组成的,水分子之间是有空隙的。宏观上对电荷的这种连续性处理非常有利于我们使用微积分方法来计算各种带电体的电场。下面看电荷满足的物理规律。

11.1.2 电荷守恒定律

在使物体带电的过程中人们发现,正、负电荷总是同时出现,而且这两种电荷的电荷量一定相等。例如,当玻璃棒与丝绸摩擦时,玻璃棒总是出现正电荷,丝绸上则出现等量的负电荷。这表明,摩擦并不能产生电荷,只不过把原来聚集在一起的正、负电荷分开,使电荷从一个物体转移到另一个物体而已。又如在静电感应现象中,一个孤立导体两侧也总是同时感应出等量的正、负电荷。相反,如果让两个带有等量异号电荷的导体接触,则带负电导体上的多余电子将移到带正电的导体上去,从而使两导体对外不显电性。在这一过程中,正、负电荷的电荷量的代数和始终不变,即总和为零。实验表明,起电过程是电荷从一个物体(或物体的一部分)转移到另一物体(或同一物体的另一部分)的过程。从以上事实可以总结出如下的规律:对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,则该系统的正、负电荷的电荷量的代数和将保持不变,这一自然规律叫作电荷守恒定律。现代物理学的很多实验都证明了电荷守恒定律。例如,一个高能光子受到一个外电场影响时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的产生),其转化前后电荷量的代数和都为零;而一个正电子和一个负电子相遇时就会湮灭成光子,前后的电荷量代数和仍然为零。

11.1.3 库仑定律

1. 点电荷

点电荷是一个理想模型，它是一个没有形状和大小而只带有电荷的物体。当一个带电体本身的线度比所研究的问题中涉及的距离小很多时，该带电体的形状对所讨论的问题没有影响或其影响可以忽略，该带电体就可以被看作是一个带电的点，即点电荷。点电荷是一个相对的概念，至于带电体的线度比相关的距离小多少时才能把它当作点电荷，要视问题所要求的精度而定。

2. 库仑定律的文字表述

1785年，法国物理学家库仑利用扭秤实验直接测定了两个带电球体之间相互作用的电力（或叫库仑力）。在该实验的基础上，库仑确定了两个点电荷之间相互作用的规律，即库仑定律。它可以表述为：在真空中，两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小与它们所带电荷量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比；作用力的方向沿着两点电荷的连线并且同号电荷相互排斥，异号电荷相互吸引。

如图 11-1 所示，有两个点电荷，其电荷量分别为 q_1 和 q_2 ，下面我们研究 q_2 的力，称 q_1 为施力电荷， q_2 为受力电荷。设矢量 $\mathbf{r}$ 由 q_1 指向 q_2 （由施力电荷指向受力电荷），则 q_2 所受的库仑力为

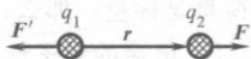


图 11-1

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (11-2)$$

式中， r 是矢量 $\mathbf{r}$ 的大小，即两个点电荷之间的距离； $\mathbf{r}^0$ 是矢量 $\mathbf{r}$ 的单位矢量，即 $\mathbf{r}^0 = \frac{\mathbf{r}}{r}$ 。

ϵ_0 叫作真空电容率（或真空介电常数），它是电磁学的一个基本物理常数。

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,818(71) \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (11-3)$$

讨论：

- 1) 当 q_1 和 q_2 同号时， $q_1 q_2 > 0$ ； $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{r}^0$ 同向，产生斥力。
- 2) 当 q_1 和 q_2 异号时， $q_1 q_2 < 0$ ； $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{r}^0$ 反向，产生引力。
- 3) 电荷之间的相互作用遵守牛顿第三定律： $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ 。

11.1.4 电场力的叠加原理

1. 电场力的独立作用原理

两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变。

2. 电场力的叠加原理

两个以上点电荷对一个点电荷的作用力，等于各个点电荷单独存在时对该点电荷作用力的矢量和，即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \quad (11-4)$$

由库仑定律可得

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i^0 \quad (11-5)$$



物理知识应用

飞机静电产生机理

第二次世界大战后，航空技术进入了喷气机时代。现代的航空技术不断发展，已经可以制造各种类型

的超声速、高超声速飞机,在航空技术最发达的美国,10倍声速飞机已投入试飞。飞行速度的提高,使静电问题也变得更为严重,据有关资料报道,其静电一般有几十千伏到几百千伏,最高甚至超过500kV。飞机静电产生机理主要有以下几种:

(1) 摩擦沉积静电 将两个不同的物体接触摩擦,然后分开,这时在两个物体间即有电荷转移,结果一个带正电,一个带负电。高速运动的飞机与云层中的灰尘、雨、雪和冰摩擦使静电荷在飞机表面积累的结果即为沉积静电充电,这种静电的积累产生了明显的电势。国外曾进行过高速运动物体的沉积静电实验,例如,一个直径为1.5m、飞行速度为 $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的物体,当其遇到冰的质点密度为 $1000\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ 的卷云时,由于每个质点在碰撞后可引起 10^{-11}C 的负电荷,因而,物体在半秒钟内即可充电到100kV。

(2) 飞机发动机的燃烧充电作用 关于这个问题,国外也进行过不少研究与实验,在发动机燃烧室内的高温环境下,燃烧产生的电子具有比正电荷快得多的弥散速度,从而进入燃烧室的金属缸体中,而正电荷也随高温高速的喷气进到大氣中,结果对发动机产生充电作用。

(3) 大气电场引起感应电荷 大气中存在的电场随天气及高度情况而变。晴天时,地面电场为 $100\sim 300\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,在雷雨天可高达 $1000\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$,电场随高度的变化是非线性的,当高度为 $10\sim 12\text{km}$ 时,下降到 $4\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。飞机停靠在地面上时,若不接地,由于它存在电荷分布,对地之间即呈现为电势差。当飞机从高电场飞到低电场区域或者相反时,感应的电荷趋于在飞机的表面上流动,以期达到与电场相应的分布。

(4) 飞机切割地球磁场线 当高空的飞机或其他飞行器运动时,会切割地球磁场,地球磁场虽然弱,但是飞机等飞行器的速度通常很快,穿过导电表面的磁通量变化会引起导体表面上的电流,从而在导体表面两端产生电压。

不管飞机是以何种方式获得静电荷,它与大气间造成的电势差都有可能产生放电。由于飞机各分离零件以及飞机工作所需要的所有系统间有电势差,所以飞机结构的各部分之间将产生潜在的放电危险。这种放电现象一旦发生,就会干扰无线电通信和导航信号,甚至引发火灾。另外,人员在接触飞机的设备和零件时也有触电的危险。



物理知识拓展

引力、电力与核力的比较

一堆带正电荷的物质会以巨大的力互相排斥,并向四面八方散开,一堆带负电荷的物质亦然。但一堆正、负电荷均匀混合的物质就完全不同了,带相反电荷的物质会以巨大的吸引力互相拉挽着,其结果是将那些可怕的电力差不多完全抵消了,这是通过形成坚固而又精致的带正电荷和负电荷的混合体而达到的,而这样两堆分开着的混合体之间实际上就不再存在任何引力或斥力了。世间万物都是由这种巨力互相吸引和排斥着的正质子与负电子所组成的混合物,然而,平衡竟是那么完善,以致当你站在别人旁边时也根本没有任何受力的感觉。这时,即使只有一点点不平衡,你都会觉察到。例如,要是你站在别人旁边相距只有一臂之远,再假定各自有比本身的质子仅多出百分之一的电子,那么其排斥力就会大得不得了!有多大呢?足以举起整座帝国大厦?不!举起珠穆朗玛峰?不!这个斥力应足以举起相当于整个地球的“重量”!下面来看一个具体的例子。

【例11-1】在氢原子中,电子和原子核的最大线度与它们之间的距离相比要小得多,因此都可以看成点电荷。已知电子与原子核之间的距离 $r=5.29\times 10^{-11}\text{m}$,电子电荷量为 $-e$,电子质量 $m=9.11\times 10^{-31}\text{kg}$ 。氢原子核即质子电荷量为 e ,质量 $m_p=1.67\times 10^{-27}\text{kg}$ 。试比较它们之间的静电引力 F_e 和万有引力 F_m 的大小。

【解】根据库仑定律,得

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.29 \times 10^{-11})^2} \text{N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{N}$$

根据万有引力定律,得

$$F_m = G \frac{m_p m}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.29 \times 10^{-11})^2} \text{N} = 3.6 \times 10^{-47} \text{N}$$

二者比较,得

$$\frac{F_e}{F_m} = 2.27 \times 10^{39}$$

电子与原子核之间的静电力远大于其间的万有引力,故在讨论电子与原子核之间的相互作用时,万有引力可以忽略不计。

库仑定律的适用范围很广,宏观物体诸如电缆以至于我们的人体,主要都是靠原子与分子间的库仑力(而不是引力)维系的。多亏有了库仑力的作用,电子和原子核才能够形成原子,原子和原子能够形成分子。那么,原子核的情况又如何呢?我们知道:

$$Z(\text{原子数}) + N(\text{中子数}) = A(\text{质量数})$$

而核的大小约为

$$r \approx A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-15} \text{m}$$

每一对质子间 ($\langle r \rangle_{p-p} = 4.0 \times 10^{-15} \text{m}$) 的库仑力为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\langle r \rangle_{p-p}^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(4.0 \times 10^{-15})^2} \text{N} = 14 \text{N}$$

既然有排斥作用, Z 个质子又是怎么挤进这么小的空间范围内呢? 事实是, 在原子核中, 除了电力之外还有一种称为核力的非电力, 它比电力还要大, 因而尽管有电的排斥力存在, 原子核仍然能够把那些质子维系在一起。然而, 核力是短程力——各核子间的力削弱得比 $1/r^2$ 还要急剧, 这就产生了一个重要结果: 如果原子核中所含质子数过多, 原子核就会太大, 便不能永远维系在一起。铀就是这样一个例子, 它含有 92 个质子, 核力主要作用于每个质子(或中子)及其最近邻质子, 而电力则作用在较大的距离上, 使每个质子与核中所有其他质子之间都具有排斥力。在一个原子核中质子的数目越多, 电的排斥力就越强, 直到如同在铀的情况下, 平衡已经那么脆弱, 由于排斥性电力的缘故使得原子核几乎就要飞散了。这么一个核, 如果稍微“轻轻敲”一下(就像可以通过送进一个慢中子而做到的那样), 就会破裂成各带有正电荷的两片裂片, 而这些裂片由于电排斥力而互相飞开。这样释放出来的能量, 就是原子弹的能量, 这种能量通常称为“核能”, 但实际上却是当电力足以克服吸引力时所释放出来的“电”能。

对于核力, 目前我们并没有完全搞清楚, 我们所知道的是: 它作用于一对核子(中子或质子)之间; 力程甚短, 仅在最近邻核子间起作用; 它随着质量数 A 的增加而趋向饱和。



应用能力训练

【例 11-2】 在边长为 a 的正方形四个顶点上各有相等的同号点电荷 $-q$, 试求: 在正方形的中心 O 处应放置多大电荷量的异号点电荷 q_0 , 才能使每一电荷的受力都为零?

【解】 如图 11-2 所示, 由于对称分布, 放在中心 O 处的 q_0 无论电荷量多少都能取得平衡, 因为四个顶点上的电荷受力情况相同, 因此, 只需考虑任一顶点上的电荷受力情况。例如, 考虑点 D 处的电荷, 中心 O 处的电荷及顶点 B, A, C 对 D 处点电荷的作用力的大小分别为

$$F_1 = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{2}a/2)^2} = \frac{qq_0}{2\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$F_2 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{2}a)^2} = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$F_3 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$F_4 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}$$

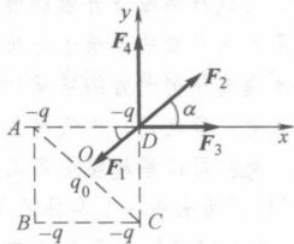


图 11-2