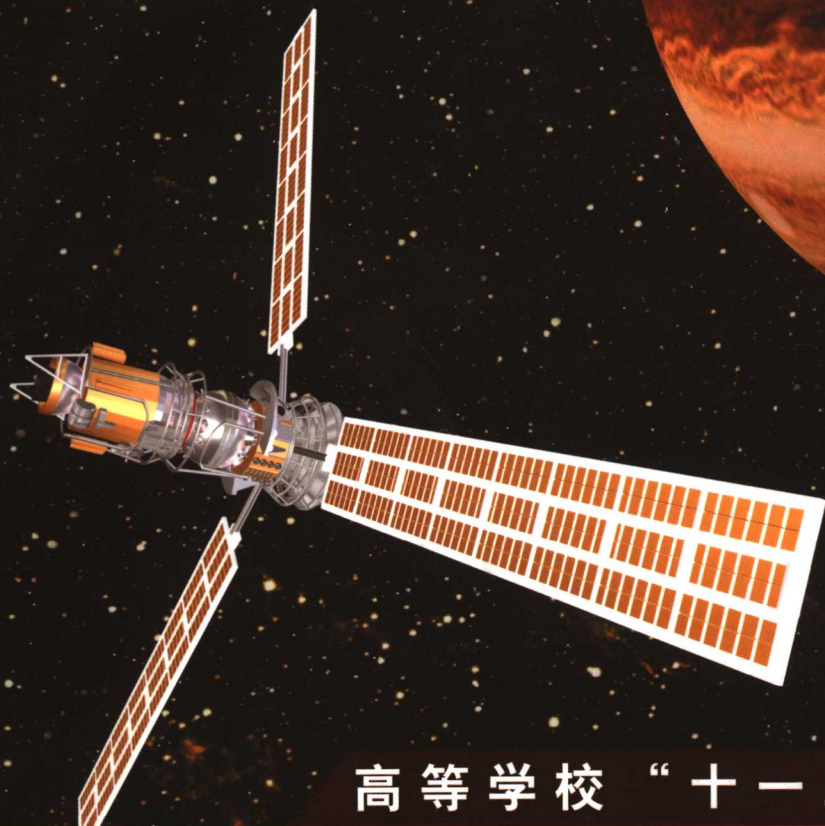




高等学校“十一五”规划教材

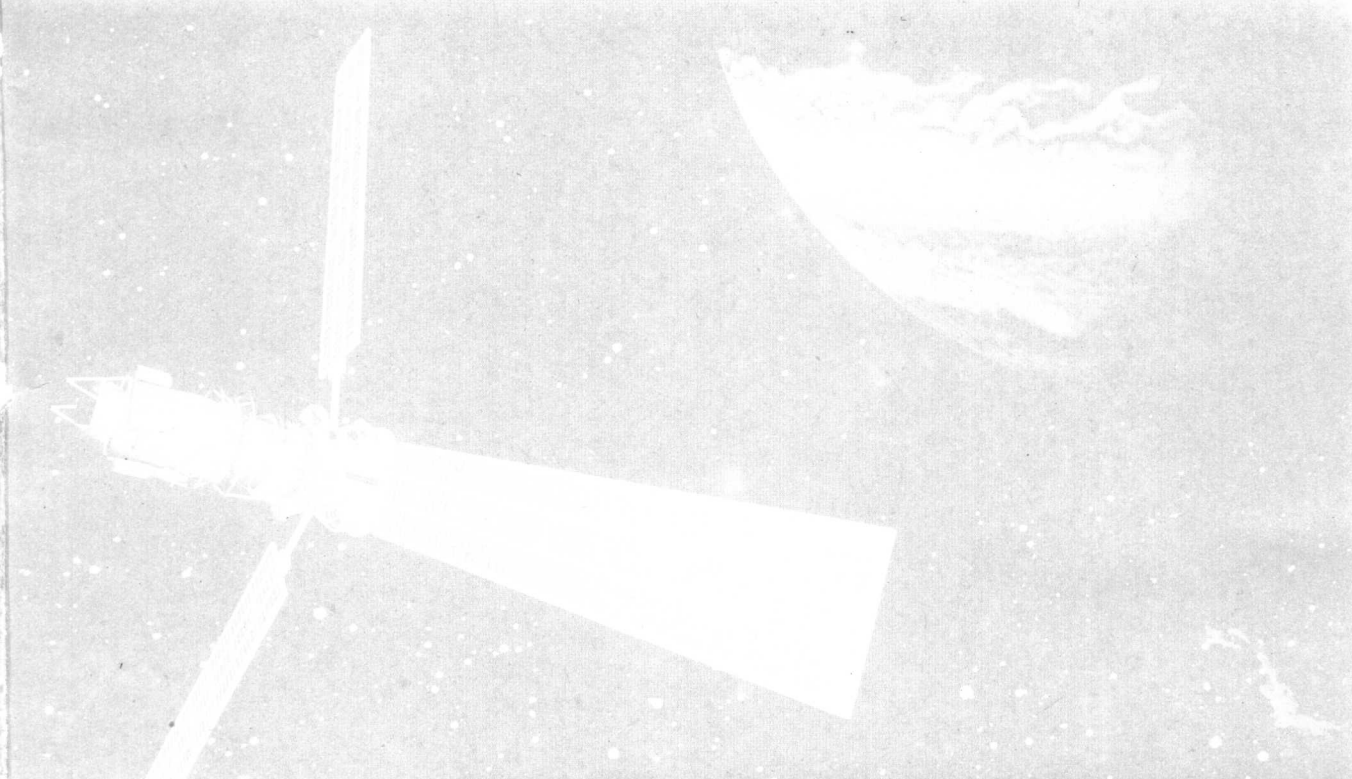
大学物理学

第二版
下册

黄祝明 吴 锋 主编



化学工业出版社



高等学校“十一五”规划教材

大学物理学

第二版
下册

黄祝明 吴 锋 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

编审人员

主 编 黄祝明 吴 锋

编写人员 黄祝明 吴 锋 胡亚联

余仕成 李端勇 夏守之

何菊明

第二版前言

本书的第一版是省级重点教学研究项目《面向 21 世纪工科物理教学内容和方法的改革探讨》课题的成果之一（课题 2005 年获得学校教学成果一等奖，省级教学成果二等奖）。

当时我们按照“九五”国家级重点教材及教育部面向 21 世纪课程教材规划的要求和一般工科本科院校学生的实际情况，在改革旧的工科大学物理教材的体系和内容方面进行大胆的探索。在备课教案和讲义的基础上，我们编写了本教材的第一版。2002 年出版以来至今已有 5 年，本教材多次重印，受到师生的欢迎和好评，同时在精品课程建设中发挥了重要作用。

2007 年 1 月教育部、财政部决定实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”，继续推进国家精品课程建设，遴选 3000 门左右课程，进行重点改革和建设，力争在教学内容、教学方法和手段、教学梯队、教材建设、教学效果等方面有较大改善，全面带动我国高等学校的课程建设水平和教学质量。启动“万种新教材建设项目”，加强新教材和立体化教材建设，鼓励教师编写新教材，积极做好高质量教材推广和新教材选用工作。我校大学物理课程在 1998 年被评为学校级优质课程，2002 年被评为省级优质课程，2004 年大学物理课程又被评为省级精品课程。2006 年经湖北省精品课程评审委员会评审通过，省教育厅审核，大学物理课程获准申报国家精品课程。精品课程建设带动和促进了教材建设，于是我们在教材第一版的基础上，总结精品课程建设的经验和体会，对教材进行了完善和修改，每章后编排了思考题和习题，使之更便于一般工科本科院校的学生自学和教学，具有可教性和可学性的使用价值。

本书仍然保持原有的体系，由黄祝明、吴锋主编，他们负责制定本教材的编写修改提纲，提出要求，并进行全书的统稿工作以及组织在教学中试用。各篇章的具体执笔人如下：第一篇力学：黄祝明；第二篇热学基础：吴锋；第三篇电磁学第十章至第十二章：胡亚联；第十三章至第十五章：余仕成；第四篇波动光学、近代物理第十六章、第二十章、第二十一章、第二十二章：李端勇；第十七章至第十九章夏守之、黄祝明；第二十三章：何菊明。全书思考题和习题：何菊明。本书再版过程中，得到武汉工程大学教务处、理学院和化学工业出版社的关心和支持，我们在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，敬请老师和同学们在使用中提出宝贵的意见。

编 者
2007 年 10 月

第一版前言

物理学是整个自然科学的支柱，是人类文明、现代科技和工业的根基。纵观世界科技发展史，物理学的每一次重大突破，都极大地促进了社会生产力的发展。现代原子能、激光、航天、计算机、信息等新兴产业，都利用了 20 世纪物理学的最新成就。

物理学是一切自然科学的基础。物理学所研究的粒子和原子，构成了蛋白质、基因、器官、生物体、一切人造的和天然的物质、陆地、海洋和大气等等。在这个意义上，物理学构成了化学、生物学、材料科学和地球物理学等学科的基础，物理学的基本概念和技术被应用到了所有的自然科学。在这些学科和物理学之间的边缘领域中，形成了一系列新的分支学科和交叉学科，从而促使自然科学更加迅速地发展。

物理学一直是自然科学的带头学科。它与现代应用技术的广泛结合，为人类认识自然、改造自然、发展生产提供了强有力的武器。一方面，物理学为所有的科学领域提供了理论基础、实验手段和研究方法。现代物理学已发展到能够说明小到分子、原子、原子核、基本粒子、超弦，大到恒星、星系、宇宙的种种现象和规律。它能够说明种种线性的和非线性的复杂问题。物理学理论为自然科学和工程科学的大厦奠定了坚不可摧的基石；另一方面，物理学的重要作用还在于它利用其重要的理论框架，建立了许多相关学科或交叉学科，如生物物理、天体物理、化学物理、原子物理、量子化学、量子生物学、生物磁学等。

物理学决定着人们对物质世界的根本性看法。物理学发现的关于物质运动遵循的“决定论法则”、“随机性法则”以及“混沌性法则”，是迄今为止人类对自然认识的最高境界。物理学研究方法和思维也是无与伦比的。“理想模型法”、“实验方法”、“类比方法”、“科学假说”、“思想实验”、“对称性思维”等，无一不闪耀着科学和智慧的光辉，对所有学科都有借鉴作用。

既然物理学对于自然科学的发展、社会生产力的进步起着如此巨大的带头和推动作用，大学物理学在高等教育中的地位就不言而喻了。在人类所有的才能之中，最重要最神奇的就是思维能力和创新能力。大学物理在人才的创新能力、思维能力的培养方面有着重要的不可替代的作用。大学物理通过物理学的基本思维方法、基本观念、基本实验的设计思想、方法、技能等的教学来实现对人才科学素质的培养。

21 世纪高等教育的观念正在发生转变，社会和市场需要高素质、有创新能力的“复合型”人才。因此，大学物理的教学目的，应当是培养和提高学生的科学素质、科学思维方法和科学研究的能力。人才培养是一个系统工程，大学物理教学必须为高等教育人才培养的总目标服务。大学物理教学的任务除了使学生掌握基本的物理知识及实际应用，并得到有关技术技能、技巧的训练外，更重要的是发展学生智力，提高学生能力，培养学生的科学世界观和科学素质。大学物理教学必须着重培养学生的观察和实验能力，科学思维能力，分析和解决实际问题的能力，自学能力等等；另外，大学物理还应把发展学生的非智力因素纳入自己的教学任务。主要是通过揭示物质运动规律培养学生辩证唯物主义的科学世界观，通过严格的实验训练培养学生实事求是的科学态度，通过物理学史的教学来激发学生的学习兴趣，通过物理学理论体系的整体介绍，使学生能够鉴赏什么是和谐、对称、统一的科学美，培养学生的科学情趣。

工科专业的学生为什么要学物理？在我国以前的看法是为专业课服务。于是专业课需要的内容就讲，不需要的内容就不讲或少讲。这种陈旧的观点显然不能适应 21 世纪人才培养的需要。著名理论物理学家，诺贝尔奖得主理查德·费曼说：“科学是一种方法，它教导人们：一些事物是怎样被了解的，什么事情是已知的，现在了解到什么程度（因为没有事情是绝对已知的），如何对待疑问和不确定性，证据服从什么法则，如何去思考事物，做出判断，如何区别真伪和表面现象。”所以，大学物理课不仅仅是物理知识的教育，不仅仅是为专业课服务。大学物理学是学

习一切工程技术知识,培养学生科学素质的最有效的基础课,是21世纪迎接新技术挑战的必修课程,是科技和工程技术人员终身学习过程中必须在大学阶段学习的重要理论课。大学物理课应当把对学生的科学素质教育作为自己的首要任务,应当使学生对物理学的内容和方法,工作语言,概念和物理图像,其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解。

国家教育部非常重视21世纪工科物理教材编写工作。目前国内新编大学物理教材数十余种,其侧重点各有千秋。有的突出了理论物理学的内容,有的将计算机物理引入教材,有的增加了物理技术应用方面的篇幅。这些教材由于把一些理论物理的内容引入了普通物理,使得教材难度增大,不适合一般工科本科院校使用,特别是不适宜学生自学。

教学内容的核心就是教材。21世纪大学物理教材一方面要在新内容、高起点、技术应用等方面有较大突破。另一方面也应具有易教易学的特点。一般工科本科院校的大学物理教学如何面向21世纪,教材又如何适应新世纪教学改革的需要?这些问题一直是我们教学研究和探讨的主题。1998年我们申报立项了省级《面向21世纪工科物理教学内容和方法的改革探讨》课题,三年来,我们按照“九五”国家级重点教材及教育部面向21世纪课程教材规划的要求和一般工科本科院校学生的实际情况,集多年教学之经验,在备课教案和讲义的基础上,编写了这本教材。本书仍基本保持传统模式,适当更新了教学体系和内容,深度和广度较适当,同时吸取了近年来国内出版的面向21世纪课程教材的一些先进的思想和出色的方法,力求做到“经典物理现代化,物理前沿普物化”,便于学生自学和教师教学。为适应不同的教学对象和不同专业类别的教学需要,还编入了一些打“*”号,并用小字排印的选学内容(其中第九章全章为选学内容,为便于阅读未用小字排印)。本书每章后编有物理前沿和物理学史,可拓展学生的知识面,有利于提高学生的科学素质。

本书曾在武汉化工学院2000级部分专业中试用,受到学生的欢迎和好评。

本书由黄祝明、吴锋主编,他们负责制定本教材的编写提纲,提出要求,并进行全书的修改和统稿工作以及组织在教学中试用。各篇章的具体执笔人如下:第一篇力学:黄祝明;第二篇热学基础:吴锋;第三篇电磁学第十章至第十二章:胡亚联;第十三章至第十五章:余仕成;第四篇波动光学、近代物理第十六章、第二十章、第二十一章、第二十二章:李端勇;第十七章至第十九章夏守之、黄祝明。本书出版过程中,得到武汉化工学院教务处、物理与热能工程系和化学工业出版社的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有缺点和错误,敬请老师和同学们在使用中提出宝贵的意见。

编 者

2002年4月于武汉化工学院

目 录

第十三章 介质中的电场和磁场	1
第一节 静电场中的导体	1
一、静电平衡	1
二、电容及电容器	7
三、电源的电动势、基尔霍夫定律、焦耳-楞次定律	10
第二节 静电场中的电介质	14
一、电介质及其极化机制	14
二、电介质的极化规律	15
三、有介质时的高斯定理 电位移	17
四、电介质在电容器中的作用	20
第三节 静电场的能量	21
一、带电体系的静电能	21
二、电场的能量和能量密度	23
第四节 磁场中的磁介质	25
一、磁介质及其磁化机制	25
二、磁介质的磁化规律	27
三、有磁介质时的安培环路定理 磁场强度	29
第五节 铁磁质	31
一、磁化曲线	32
二、软磁材料和硬磁材料	33
三、磁畴理论	33
* 第六节 超导电性	34
一、维持超导态的条件	34
二、超导体中的电场和磁场	35
三、第二类超导体	36
四、BCS 理论	36
五、约瑟夫森效应	37
六、超导在技术中的应用	37
七、高温超导	38
本章提要	38
思考题	40
习题	40
物理学史	41
第十四章 电磁感应和暂态过程	42
第一节 电磁感应定律	42
一、电磁感应现象	42
二、电磁感应规律	43
第二节 动生电动势	44
第三节 感生电动势 感生电场	47
一、感生电动势与感生电场	47
二、自感与互感	51
第四节 磁场的能量	53
一、自感磁能	53

二、互感磁能	54
三、磁场的能量	55
* 第五节 暂态过程	56
一、RL 电路的暂态过程	56
二、RC 电路的暂态过程	58
三、RLC 电路的暂态过程	59
本章提要	61
思考题	62
习题	62

第十五章 电磁场和麦克斯韦方程组	65
第一节 位移电流	65
一、稳恒电磁场的基本规律	65
二、位移电流	65
三、安培环路定理的普遍形式	67
第二节 麦克斯韦方程组和边界条件	68
一、麦克斯韦方程组	68
二、电磁场的边界条件	70
第三节 电磁波	72
一、电磁波的产生	72
二、电磁波的基本性质	73
三、电磁场的物质性	74
本章提要	75
思考题	76
习题	77
物理学史	77

第四篇 波动光学 近代物理

第十六章 振动和波动	80
第一节 线性振动	80
一、简谐振动	80
二、阻尼振动	87
三、受迫振动和共振	89
第二节 振动的合成与分解	90
一、振动的合成	90
二、振动的分解	93
* 第三节 非线性振动	95
一、单自由度非线性振动	96
二、单摆的非线性振动	98
三、混沌	101
第四节 机械波的产生和传播	103
一、波的基本概念	103
二、平面简谐波	107
三、波的能量	109
四、声波	111
第五节 波的叠加	112
一、波的干涉	112
二、驻波的形成和特点	114
* 第六节 多普勒效应	117
一、波源静止而观察者运动	117
二、观察者静止而波源运动的情况	118

三、观察者和波源在同一条直线上运动	118
四、冲击波	119
* 第七节 波包与非线性波	119
本章提要	120
思考题	122
习题	122
第十七章 光的干涉	124
第一节 相干光	124
第二节 杨氏双缝干涉实验、双面镜、劳埃镜	125
一、杨氏双缝干涉实验	125
二、菲涅耳双面镜和劳埃镜实验	127
第三节 薄膜干涉	128
一、光程和光程差	128
二、薄膜干涉公式	129
三、半波损失	130
第四节 劈尖膜和牛顿环	131
一、劈尖膜干涉	131
二、牛顿环	133
三、增透膜与增反膜	134
第五节 迈克尔逊干涉仪	135
* 第六节 多光束的干涉	137
本章提要	137
思考题	138
习题	139
物理学史	140
第十八章 光的衍射	141
第一节 惠更斯-菲涅耳原理	141
一、光的衍射现象	141
二、惠更斯-菲涅耳原理	141
三、两类衍射	142
第二节 单缝夫琅和费衍射	142
第三节 衍射光栅	145
一、光栅的构成	146
二、光栅衍射条纹的形成	146
三、光栅方程	147
四、光栅衍射图样的几点讨论	147
第四节 圆孔衍射 光学仪器分辨本领	149
第五节 X射线衍射	151
本章提要	152
思考题	153
习题	153
今日物理	153
第十九章 光的偏振	156
第一节 自然光和偏振光	156
第二节 反射和折射时光的偏振	157
第三节 晶体的双折射和偏振棱镜	158
第四节 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	161
第五节 偏振光的干涉	163
本章提要	165

思考题	165
习题	165
物理与现代技术	166
第二十章 量子力学基础	167
第一节 量子论的提出	167
一、黑体辐射 普朗克的量子假说	167
二、光电效应 爱因斯坦的光量子假说	169
三、康普顿效应	172
四、光的波粒二象性	174
第二节 量子力学的建立	175
一、氢原子的玻尔理论	175
二、德布罗意波	176
三、概率波	178
四、运动方程	180
* 五、算符与力学量	181
* 六、力学量的对易关系 不确定关系	182
本章提要	184
思考题	185
习题	185
物理学史	186
第二十一章 定态薛定谔方程	189
第一节 一维定态问题	189
一、一维无限深势阱	189
二、一维方势垒、隧道效应	191
三、线性谐振子	192
* 四、周期场中的粒子运动	192
第二节 氢原子	194
一、氢原子波函数及概率的分布	194
二、电子的自旋	197
三、多电子原子的壳层结构	198
本章提要	200
习题	200
第二十二章 固体的能带与激光	202
第一节 固体的能带结构	202
一、固体中的电子	202
二、固体的能带	203
三、导体、半导体和绝缘体	204
四、半导体	205
第二节 激光的基本原理	207
一、粒子数按能级的统计分布	207
二、自发辐射, 受激辐射和受激吸收	207
三、粒子数反转与光放大	208
四、激光的产生	209
五、常用激光器及应用	211
本章提要	211
今日物理	212
第二十三章 计算物理学基础	213
第一节 物理建模与算法设计	213

一、解微分方程的近似方法	213
二、RLC 电路	214
第二节 C 语言图形界面编程	215
一、程序的编辑、调试与运行	215
二、两种输出类型的比较	216
三、常用头文件	216
四、图形函数	217
五、屏幕颜色函数	217
六、程序示例	217
第三节 用计算机研究弹簧振子的运动规律	218
一、运动方程	218
二、计算方法与程序设计	219
三、运动规律	219
四、弹簧振子源程序	221
第四节 实验数据的线性拟合及计算机处理	222
一、一元线性拟合	222
二、其他情况的处理方法	222
三、一元线性拟合曲线的 C 语言程序	223
附录 课程内容的学时分配建议	225

第十三章 介质中的电场和磁场

前面讨论了真空中的静电场和静磁场,在本章将讨论介质中的静电场和静磁场,也就是要讨论物质与电场和磁场的相互影响及其相互作用规律。物质按其电性质可分为导体、绝缘体(也称做电介质)、半导体、超导体,在本章第一节和第二节中主要介绍了导体和绝缘体与电场的相互作用规律。物质按其磁性质可分为抗磁质、顺磁质和铁磁质,在本章第四节中介绍了它们与磁场的相互作用规律。第三节讨论了静电场的能量问题。

第一节 静电场中的导体

导体 (conductor) 的电结构特征是在其内部有大量的可以自由移动的电荷。将导体放到电场中,导体要受电场的影响,影响来源于导体内部的自由电荷由于受电场力作用而在导体内部重新分布;反过来,自由电荷重新分布后的导体对电场也有影响。本节讨论这种相互影响的规律。作为基础知识,只讨论各向同性的均匀的金属导体与电场的相互影响。在讨论之前,有必要对几个有关金属导体的术语给出明确的意义。

(1) 带电导体

总电量不为零的导体叫做**带电导体**,也就是带电导体的净电荷不为零。若净电荷为正,则说导体带正电;若净电荷为负,则说导体带负电。

(2) 中性导体

总电量为零的导体叫做**中性导体**,也称为不带电导体。

(3) 孤立导体

与其他物体距离足够远的导体叫做**孤立导体**。这里的“足够远”是指其他物体上的电荷在该导体上激发的场强小到可以忽略。因此,物理上就可以说孤立导体之外没有其他物体。

一、静电平衡

1. 静电平衡条件

当导体中的电荷没有宏观定向移动,该导体处于**静电平衡** (electrostatic equilibrium) 状态。

静电平衡的条件是导体内部场强处处为零。

这个平衡条件的必要性(充分性的证明要用到静电场边值问题的唯一性定理,超出本课程的范围,故从略)可论证如下:如果导体内部的电场 E 不处处为零,则在 $E \neq 0$ 的地方自由电荷将会移动,亦即导体没有达到静电平衡。换句话说,当导体达到静电平衡时,其内部场强必定处处为零。

上述平衡条件只有在导体内部的电荷除静电场力外不受其他力的情况下才成立,如果电荷还受其他力(例如由化学原因引起的所谓“化学力”等,统称为非静电力),平衡条件应改为导体内部的电荷所受的合力为零。所以在有非静电力的情况下,为了静电平衡,导体内部某些点的场强恰恰不能为零,以便与非静电力抵消。本节的讨论只限于导体内部不存在非静电力时的静电平衡问题。

前面的讨论未涉及导体从非平衡态趋于平衡态的过程,这样的过程通常很复杂,下面只定性说明一下:当把一个中性金属导体放入静电场 E_0 中,在最初极短暂的时间内(约 $10^{-6}s$ 的数量级),导体内会有电场存在,这个电场将驱使导体内的自由电子相对于金属晶格点阵做宏观的定向运动,从而引起导体中正负电荷重新分布,结果使导体的一端带正电荷,另一端带负电荷,这就是静电感应现象。导体两端的正、负电荷将产生一个附加电场 E' , E' 与 E_0 叠加的结果,使导

体内、外的电场都发生重新分布。在导体内部 E' 的方向与外加电场 E_0 相反, 导体两端的正、负电荷积累到一定程度时, E' 的数值就会大到足以把 E_0 完全抵消。当导体内部的总电场 $E = E_0 + E'$ 处处为零时, 自由电荷便不再移动, 导体两端正、负电荷不再增加, 于是达到了静电平衡。

导体的静电平衡状态可以由于外部条件的变化而受到破坏, 但在新的条件下又将达到新的平衡。

从静电平衡条件出发, 可以直接导出导体在静电平衡时有以下两点性质。

(1) 导体是个等势体, 导体表面是个等势面

因导体内任意两点 P 、 Q 之间的电势差为 $U_{PQ} = \int_{(P)}^{(Q)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$, 而 $\mathbf{E} = 0$, 所以 $U_{PQ} = U_P - U_Q = 0$, 即 $U_P = U_Q$, 导体内部任意两点的电势相等, 则导体是个等势体, 从而导体表面是个等势面。

(2) 导体外紧邻导体表面的各点的场强与导体表面垂直

因为电力线处处与等势面正交, 而导体表面是等势面, 所以导体外紧邻导体表面的各点的场强必与导体表面垂直。

2. 电荷分布

处于静电平衡的导体上的电荷有以下分布规律。

(1) 导体内无净电荷, 净电荷只可能分布在导体表面

这一规律可以用高斯定理证明, 在导体内部围绕任意 P 点作一个小封闭曲面 S , 如图 13-1 所示。由于静电平衡时导体内部场强处处为零, 因此通过此封闭曲面的电通量必然为零。由高斯定理可知, 此封闭曲面所包围的电量的代数和为零。由于这个封闭曲面很小, 而且 P 点是导体内任意一点, 所以在整个导体内部无净电荷, 净电荷只可能分布在导体表面上。

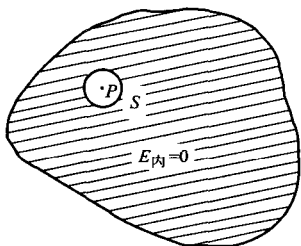


图 13-1 导体内无净电荷

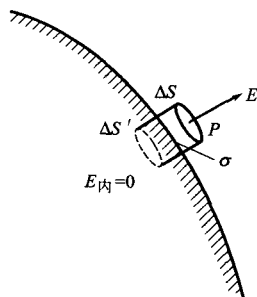


图 13-2 导体表面电荷面密度与场强的关系

(2) 表面上各处的面电荷密度与当地表面紧邻处的场强大小成正比

这个规律也可以用高斯定理证明, 为此, 在导体表面紧邻处取一点 P , 以 E 表示该处的场强, 如图 13-2 所示。过 P 点作一个平行于导体表面的小面元 ΔS , 以 ΔS 为底, 以过 P 点的导体表面的法线为轴作一个圆筒, 圆筒的另一底面 $\Delta S'$ 在导体的内部。由于导体内部的场强为零, 而导体外表面紧邻处的场强又与表面垂直, 所以通过圆筒的电通量就是通过 ΔS 面的电通量, 即等于 $E\Delta S$, 以 σ 表示导体表面上 P 点附近的面电荷密度, 则圆筒包围的电荷就是 $\sigma\Delta S$ 。根据高斯定理可得

$$E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\epsilon_0}$$

$$\sigma = \epsilon_0 E \quad (13-1)$$

由此得

此式说明处于静电平衡的导体表面上各处的面电荷密度与当地表面紧邻处的场强大小成正比。

利用式(13-1)可以由导体表面某处的面电荷密度 σ 求出当地表面紧邻处的场强 E 来。但在理解式(13-1)时应注意, 导体表面紧邻处的场强不仅仅是由当地导体表面上的电荷产生的, 而是由所有电荷(包括该导体上的全部电荷和导体之外存在的其他电荷)产生的。

(3) 孤立导体表面各处的面电荷密度与各处表面的曲率有关, 曲率越大的地方, 面电荷密度越大

式(13-1)只给出导体表面上每一点的电荷面密度与紧邻处场强的对应关系,它并不能告诉我们在导体表面上电荷究竟怎样分布。定量研究这个问题是比较复杂的,这不仅与这个导体的形状有关,还和它附近有什么样的其他带电体有关。但是对于孤立导体来说,电荷的分布有如下定性的规律:在孤立导体上面电荷密度的大小与表面的曲率有关。导体表面凸出而尖锐的地方(曲率较大),电荷就比较密集,面电荷密度 σ 较大;表面较平坦的地方(曲率较小), σ 较小;表面凹进去的地方(曲率为负), σ 更小。

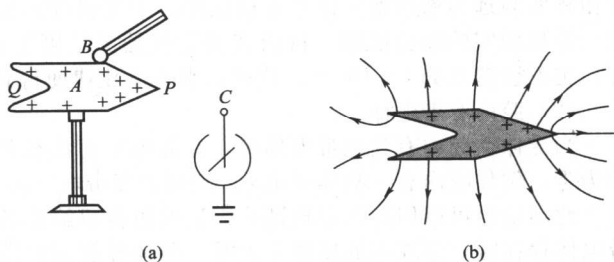


图 13-3 导体表面曲率对电荷分布的影响

以上规律可利用图 13-3 所示的实验演示出来。带电导体 A 表面上 P 点特别尖锐,而 Q 点凹进去。以带有绝缘柄的金属球 B 接触尖端 P 后,再与验电器 C 接触,则金属箔张开较显著。用手接触小球 B 和验电器 C 以除去其上的电荷后,使 B 与导体凹进处 Q 附近接触,再接触验电器 C,这时,发现验电器 C 几乎不张开。这表明 Q 处电荷比 P 处少得多。

根据式(13-1)可知,孤立导体表面附近的场强分布也有同样的规律,即尖端的附近场强大,平坦的地方次之,凹进去的地方最弱[参见图 13-3(b)中电力线的疏密程度]。

3. 空腔导体内外的静电场

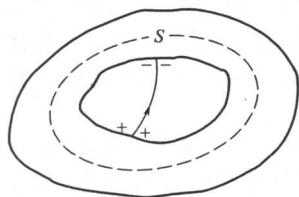


图 13-4 证明导体空腔的性质

上面我们讨论了处在静电平衡状态时导体的电荷分布和场强分布的规律,现在我们来定性讨论静电平衡时空腔导体的电荷和场强分布。

(1) 腔内无带电体

当空腔内没有其他带电体时,导体内表面上处处没有电荷,电荷只能分布在导体外表面;空腔内场强处处为零,或者说,空腔内的电势处处相等。

为了证明上述结论,在导体内、外表面之间取一闭合曲面 S,将空腔包围起来(如图 13-4)。由于闭合面 S 完全处于导体内部,根据平衡条件,其上场强处处为零,因此没有电通量通过它。再根据高斯定理,在 S 内部(即导体内表面上)电荷的代数和为零。

进一步还需证明,在导体内表面上各处的面电荷密度为零。利用反证法,假定内表面上 σ 并不处处为零,由于电荷的代数和为零,则必然有些地方 $\sigma > 0$,有些地方 $\sigma < 0$ 。根据电力线的性质,从内表面 $\sigma > 0$ 的地方发出的电力线,不会在空腔内中断,只能终止于内表面上某个 $\sigma < 0$ 的地方。如果存在这样一条电力线,电场强度沿此电力线的积分必不为零。也就是说,这电力线的两个端点之间有电势差。但是这根电力线的两端都在同一导体上,静电平衡条件要求这两点的电势相等。因此上述结论与平衡条件相违背。由此可见,达到静电平衡时,空腔导体内表面上 σ 必须处处为零。

根据式(13-1),内表面附近 $E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = 0$,且电力线既不可能起、止于内表面,又不可能在空腔内有端点或形成闭合线。所以空腔内不可能有电力线和电场,即空腔内场强处处为零。没有电场就没有电势差,故空腔内各点的电势处处相等。

电荷只分布在导体外表面的结论,是建立在高斯定理的基础上的,而高斯定理又是由库仑平方反比律推导出来的。相反,如果点电荷之间的相互作用力偏离了平方反比律,即

$$f \propto \frac{1}{r^{2 \pm \delta}}$$

其中 δ 称做平方反比律的指数的偏差,简称指数偏差,且 $\delta \neq 0$,则高斯定理将不成立,从而导体上的电荷也不完全分布在外表面上。用实验方法来研究导体内部是否确实没有电荷,可以比库

仑扭秤实验远为精确地验证平方反比律。卡文迪许和麦克斯韦以及 1971 年威廉斯等人都是利用这一原理做实验来验证的。目前在实验仪器灵敏度所允许的范围内可以肯定, 指数偏差 δ 即使有, 也不会超过 2.7×10^{-16} 。这样, 平方反比律便得到了十分精确的实验验证。

(2) 腔内有带电体

当导体空腔内有其他带电体时, 在静电平衡状态下, 导体内表面所带电荷与腔内电荷的代数和为零。例如腔内有一物体带电 q , 则内表面带电 $-q$ 。

此结论也可以用高斯定理证明, 证明过程留给读者完成。根据上述结论, 当一导体空腔内有带电体存在时, 空腔内的场强不为零。导体外表面的带电情况和导体外部空间的场强分布与导体外壳是否接地及导体外是否有其他带电体有关。在通常情况下, 当导体外壳不接地时, 导体外表面带有电荷, 导体外部空间的场强不为零; 当导体外壳接地而导体外无其他带电体时, 导体外表面不带电, 导体外部空间的场强为零; 当导体外壳接地而导体外有其他带电体时, 导体外表面可能带有电荷, 导体外部空间的场强也不一定为零。

为使读者在讨论较复杂的问题时有所依据, 这里再给出一个结论而不作证明。设空腔内带电体的电荷为 q_1 , 导体内表面所带电荷为 $q_2 (= -q_1)$, 导体外表面所带电荷为 q_3 , 导体外有带电体存在, 所带电荷为 q_4 。则不论导体外壳是否接地, q_1 、 q_2 在导体内壁之外任一点的合场强为零, q_3 、 q_4 在导体外壁之内任一点的合场强为零。

4. 导体存在时静电场的分析与计算

导体放入静电场中时, 电场会影响导体上电荷的分布, 同时, 导体上的电荷分布也会影响电场的分布。这种相互影响将一直进行到达到静电平衡时为止, 这时导体上的电荷分布以及周围的电场就不再改变了。这时的电荷和电场的分布可以根据静电场的基本规律、电荷守恒以及导体静电平衡条件加以分析和计算。下面举两个例子来具体说明这种分析方法。

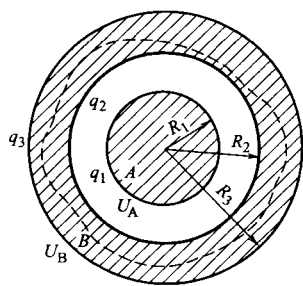


图 13-5 例 13-1 用图

【例 13-1】 一个半径为 R_1 的金属球 A, 带有总电荷 q_1 , 在它外面有一个同心的金属球壳 B, 其内外半径分别为 R_2 和 R_3 , 带有总电荷 q 。试求此系统的电荷及电场分布以及球与壳之间的电势差。如果用导线将球和壳连接一下, 结果又将如何?

解: 导体球和壳内的电场应为零, 而电荷均匀分布在它们的表面上。以 q_2 和 q_3 分别表示在球壳内外表面上的总电荷 (图 13-5), 则在壳内作一个高斯面 (如图中虚线所示), 根据高斯定理就可以求得

$$q_1 + q_2 = 0$$

因此

$$q_2 = -q_1$$

由于导体球壳上的总电荷守恒, 有 $q_2 + q_3 = q$, 因而可得

$$q_3 = q - q_2 = q + q_1$$

知道了三个球面上的电荷分布, 就可以用作同心球面作为高斯面的方法求出空间的场强分布如下

$$E = \begin{cases} 0 & (r < R_1) \\ \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} & (R_1 < r < R_2) \\ 0 & (R_2 < r < R_3) \\ \frac{q + q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} & (r > R_3) \end{cases}$$

球与壳之间的电势差为

$$U_{AB} = \int_{(A)}^{(B)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

如果用导线将球和球壳连接一下, 则壳的内表面和球表面的电荷会完全中和而使两个表面都不带电, 二者之间的电场变为零, 二者之间的电势差也变为零。在球壳的外表面上电荷仍保持为

$q+q_1$, 而且均匀分布, 它外面的电场分布也不会改变, 而仍为 $\frac{q+q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ 。

【例 13-2】 有一块大金属平板, 面积为 S , 带有总电量 Q , 今在其近旁平行地放置第二块大金属平板, 此板原来不带电。求: ① 静电平衡时, 金属板上的电荷分布及周围空间的电场分布。② 如果把第二块金属板接地, 情况又如何? (忽略金属板的边缘效应)

解: ① 由于静电平衡时导体内部无净电荷, 所以电荷只能分布在两金属板的表面上。不考虑边缘效应, 这些电荷都可当做是均匀分布的。设四个表面上的面电荷密度分别是 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和 σ_4 , 如图 13-6 所示。由电荷守恒可知

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{Q}{S}$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 = 0$$

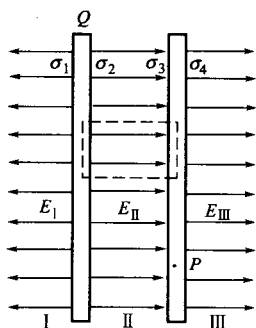


图 13-6 例 13-2 用图①

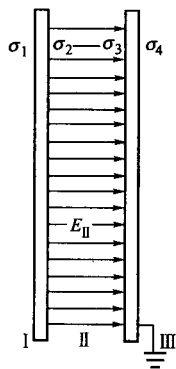


图 13-7 例 13-2 用图②

由于板间电场与板面垂直, 且板内的电场为零, 所以选一个两底分别在两个金属板内而侧面垂直于板面的封闭面作为高斯面, 则通过此高斯面的电通量为零。根据高斯定理就可以得出

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

在金属板内任一点 P 的场强应该是四个带电面产生的电场叠加, 因而有

$$E_P = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_3}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\epsilon_0}$$

由于静电平衡时, 导体内各处的场强为零, 所以 $E_P = 0$, 因而有

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_4 = 0$$

将以上四个关于 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和 σ_4 的方程联立求解, 可得

$$\sigma_1 = \frac{Q}{2S}, \sigma_2 = \frac{Q}{2S}, \sigma_3 = -\frac{Q}{2S}, \sigma_4 = \frac{Q}{2S}$$

根据无限大带电平面的场强公式 $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ 和场强的叠加原理可求得电场分布如下

在 I 区
$$E_1 = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}, \text{ 方向向左}$$

在 II 区
$$E_2 = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}, \text{ 方向向右}$$

在 III 区
$$E_3 = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}, \text{ 方向向右}$$

② 如果把第二块金属板接地 (图 13-7), 它就和大地连成一体。金属板右表面上的电荷就会消失。因而 $\sigma_4 = 0$ 。则根据电荷守恒及导体平衡条件可得

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{Q}{S}$$

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

可解出电荷分布

$$\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \frac{Q}{S}, \sigma_3 = -\frac{Q}{S}, \sigma_4 = 0$$

则电场分布为

$$E_{\perp} = E_{\parallel} = 0, E_{\parallel} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}, \text{方向向右。}$$

和未接地之前相比, 接地之后电荷分布、电场分布都发生了改变。

5. 应用

导体静电平衡时的电荷分布规律和电场分布规律在技术上有很多重要应用, 这里仅就以下几个方面加以说明。

(1) 静电透镜

当带电体系中各个导体的形状、大小、相对位置和带电量确定了之后, 各导体的电荷分布以及空间各点的电场分布都会惟一地确定下来。因此可以说, 导体对电场的分布能够起到调整和控制的作用。而静电透镜就是通过这种控制作用来实现电子聚焦的。

如图 13-8, 平面电极 K 的电势为 120V, 在它的前面放置一块中央带有圆孔的平行金属板 G , 并将它的电势控制在 30V。这样一来, 空间各处的等势面的形状被这控制电极调整后如图所示, 在圆孔上等势面向右侧凸起 (图中等势面可用实验方法测得)。

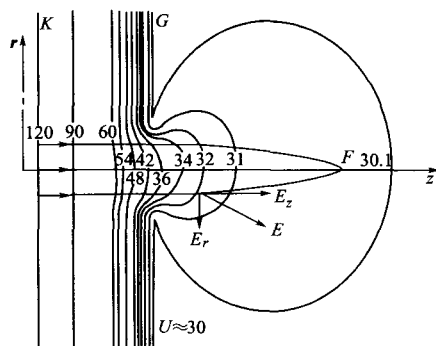


图 13-8 静电透镜

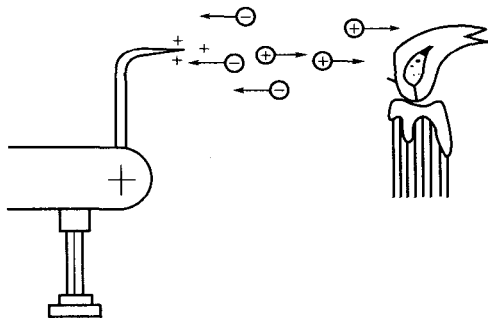


图 13-9 尖端放电

根据电力线处处与等势面正交的规律, 可知在圆孔附近电力线向外发散, 或者说场强具有垂直于中心线 (z 轴) 的分量 E_r 。

设想从金属电极 K 的中心发射出一束电子。因为电子带负电, 当它经过圆孔后, 电场的 E_r 分量就使电子受到向 z 轴集中的电场力, 结果使电子束在某点 F 会聚起来。这个带孔金属板对电子束的作用, 就好像一个凸透镜对光束的作用一样, 可以达到聚焦的目的。这种方法叫做静电聚焦, 带孔金属板 G 叫做静电透镜。在示波器、电视显像管中都需要使电子束聚焦, 以便在荧光屏上形成清晰的光点, 这时常常采用静电透镜来达到这目的。当然实际中用的静电透镜并不限于单个带孔的金属板, 它们可以有各种各样而比较复杂的结构。

(2) 尖端放电

导体尖端附近的电场特别强, 它会导致一个重要的结果, 就是尖端放电。如图 13-9, 在一个导体尖端附近放一根点燃的蜡烛。当不断地给导体充电时, 火焰就像被风吹动一样朝背离尖端的方向偏斜。这就是尖端放电引起的后果。在尖端附近强电场作用下, 空气中残留的离子会发生激烈的运动。在激烈运动的过程中它们和空气分子相碰时, 会使空气分子电离, 从而产生了大量新的离子, 这就使空气变得易于导电。与尖端上电荷异号的离子受到吸引而趋向尖端, 最后与尖端上的电荷中和。与尖端上电荷同号的离子受到排斥而飞向远方, 蜡烛火焰的偏斜就是受到这种离子流形成的“电风”吹动的结果。上述实验中, 需要不断地给导体充电, 是为了防止尖端上的电荷因不断与异号的离子中和而逐渐消失, 使得“电风”持续一段时间, 以便于观察。尖端放电时, 在它周围往往隐隐地笼罩着一层光晕, 叫做“电晕”, 在黑暗中看得特别明显。在夜间高压