

育、学术、思想、精神 北大出版人
版人 这个浮躁的
一些 不同的事
雅、 在
劳作 一点 还
着人 品性
许多 后
但是 们的有 还将
们的 念和思想。北
博雅。一群北大人，在做有关文
化的事情， 关涉教育、学术
思想， 北大
浮躁 加， 总
同 再
深邃 们的精神
点改 界，
塑 是 人格
书将 遗忘，
些书还 响着人 的观



21世纪物理规划教材
基础课系列

电磁学通论

A General Course in Electromagnetism

钟锡华 编著



21世纪物理规划教材

基础课系列



电磁学通论

A General
Course in
Electromagnetism

钟锡华 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电磁学通论/钟锡华编著. —北京:北京大学出版社,2014.10

(21世纪物理规划教材.基础课系列)

ISBN 978-7-301-24636-8

I. ①电… II. ①钟… III. ①电磁学—高等学校—教材 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 185283 号

书 名: 电磁学通论

著作责任者: 钟锡华 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-24636-8/O·0994

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021 出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787mm×960mm 16开本 27.75印张 623千字

2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷

印 数: 0001—4000册

定 价: 56.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

序

四度积淀

始于 2010 年秋,作者应邀为西安交通大学物理试验班讲授电磁学和光学,至今已届三载.当初之所以爽快地应承去讲授电磁学,缘于此前本人曾先后三个时期,在北大物理系讲授该课程:上世纪 60 年代中期,为电子学系和地球物理系 63 级、64 级讲授电磁学,那是在本人留校任教跟随赵凯华先生辅导三遍电磁学之后;改革开放新时期,为物理系 76 级、80 级和 84 级讲授电磁学;新世纪初期 2003 年、2004 年和 2005 年,讲授 3 学分电磁学,其对象为电子信息科学系、元培班和物理系的自由选课者.

这八遍讲授电磁学所积淀的学识和经验,在 2004 年已集成于一个比较成熟的课堂展示稿,共 360 页,有手稿复印本和电子版两种形式与学生见面.就凭借这课堂展示稿,我满怀信心轻装上阵,为西安交大 09 级物理试验班,开讲了电磁学.在物理试验班又四度讲课,其间有充裕时间作进一步的思考和研究,使该课程内容得以相当的充实、扩展和提高.正是以先前的电磁学课堂展示稿为蓝本,吸纳近三年所积淀的学识和材料,写就了眼前这本《电磁学通论》.

之前,我曾与杭州大学潘仲麟教授合著了一本《电磁学教学随笔》,审校了他们的一本译作《电磁学原理及应用》,其原作者为 P. 洛兰和 D. 科逊.随笔一书约 31 万字,交由成都科技大学出版社于 1990 年面世,书中收录了我为北京电大星期讲座所讲授的 10 篇文稿和两篇论文.此书前言中写了这样一段话:尽管有着长期讲授电磁学的经历,笔者只敢以随笔的格调,将淀积下来的一些学识经验和材料付印出版,谨在电磁学教学及其研究这方五彩缤纷的百花苑中,献上一簇小花,在这部雄伟的交响组曲中,伴上几首小曲;平实升华,无奇有新意,这一直是我在大学物理教学过程中所追求的目标之一.如今时隔二十三年,斗转星移物非人是,小花壮大枝干坚挺,小曲变乐章,随笔成通论,而平实升华无奇有新意的境界依然执著追求.

概貌新颜

通论一书内容八章,有 57 小节共 333 段落.

单看章目,似众人一面,并无特色.这从一个方面说明,经典电磁学作为相对成熟的一门基础课程,其篇章结构是相当稳定的,这稳定源于其合理,既合乎电磁学发展的历史轨迹,又合乎人们对科学的认知规律,那就是从电到磁、从静态到动态,直到变化电磁场的相互作用而激发电磁波.

紧随第 1 章静电场之后,即论述静电场中的导体和电介质,这样的安排使产生电场的源

电荷其来源和机制显得更为鲜活和多样. 须知在实际静电问题中, 极少有电荷分布事先被给定的, 除非纯粹的习题演练; 空腔导体的静电屏蔽效应、真空或介质电容器的性能, 乃是静电学的一重要应用, 及早予以介绍是合宜的. 紧随第 4 章恒定磁场, 即来论述磁介质是自然合理的一种安排, 使电流及其磁效应的机制显得更多样更实在; 这也为随后电磁感应一章奠定了物质基础, 凡基于电磁感应原理而制成的器件, 其内部几乎均含铁芯这种高磁导率的软磁材料. 值得一提的是第 3 章稳恒电流场和直流电路, 本书显著地加强了对于电流场的论述, 而直流电路之篇幅仅占全章五分之一, 这固然因为在理工类高校中普遍设有电子技术课程, 更是考虑到, 认识并掌握电流场的多样性及其描述方式和基本规律, 包括电荷守恒律的积分方程和微分方程, 对学好整个电磁学具有全局意义.

浏览小节名目, 始显些许新意. 比如, 电偶极子在外场中, 静电场的散度与旋度, 静电场的边值关系与余弦型球面电荷的电场, 导体问题若干实例及其典型意义, 电流场运动学关系, 导电介质中电流动力学方程, 旋转带电体的磁场与正弦型球面电流的磁场, 磁矢势与 AB 效应, 永磁体的磁场, 磁荷观点的静磁学理论, 有源小环流或无源小环流与外磁场的相互作用能, 超导电性, 线性稳定电路的本征讯号, 谐振电路及其 Q 值. 稍细翻阅本书 333 段落, 则将看到更多的新名目, 比如, 第 1 章中对库仑定律的进一步阐释, 从电偶极子到电四极矩与电八极矩, 对求解三类高度对称性静电场的评述; 又比如在第 8 章, 位移电流的内涵与极化电流密度, 自由磁荷存在时的麦克斯来方程组, 自由磁流与其电场关系的左手定则, 偶极振子的辐射场, 电磁场动量密度与光压和光镊; 等等不一而足, 星罗棋布, 恕不赘列, 读者自会鉴赏.

诚然, 这些新篇目表观上, 为本书增光添彩彰显新颜, 但是, 电磁学通论作为一本基础课程的教材, 其大部分内容是常规的, 如何将这类常规内容写出新水平需探索. 这种新水平应当主要体现于其论述阐释更为深刻富有思想性, 或其分析推演更为简捷有独到之处, 或其物理图象更为丰富清晰. 这也正是撰写本书过程中作者用心倾力之所在.

心力所至

完成初稿回头看, 本书内容有几个方面乃作者用心着力之处, 在此特作简要介绍.

• **散度旋度贯穿全书.** 电磁场作为一种矢量场, 其空间分布规律集中地体现于其通量定理和环路定理, 这两个定理的积分方程是普遍的, 适用于任意形貌的闭合曲面和闭合环路; 将其积分区域收缩为一个点, 即一个体积元或一个面元, 便分别得到通量定理的微分表示即散度方程, 和环路定理的微分表示即旋度方程, 比如, 对于静电场 $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$, $\nabla \times \mathbf{E} = 0$; 这一处理方式等价于导出数学场论课中论证的高斯公式和斯托克斯公式, 本书完成此举用时不到 50 分钟.

不要等待, 不必埋怨. 磨刀不误砍柴工, 此后便驾轻就熟, 一路前行, 先后得到 $(\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{P}, \mathbf{J}, \mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{M})$ 的散度方程或旋度方程, 且不时地予以应用. 比如, 用以证明电场或磁场方向一致的无源区间, 必为均匀场区; 用以导出线性均匀介质体内, 极化体电荷 ρ' 与自由体电荷 ρ_0 之间一个简单的比例关系, 磁化体电流 \mathbf{j}' 与导体电流 \mathbf{j}_0 之间一个简单的比例关系, 据此进而得到 $\rho' = 0, \mathbf{j}' = 0$, 当 $\rho_0 = 0$, 或 $\mathbf{j}_0 = 0$; 用以导出普遍情形下电荷守恒律的微分方程, 这

一条对最终引入位移电流的假设至关重要;用以证明交变情形下极化体电流密度 $j_p = \partial P / \partial t$;还有,麦克斯韦提出电磁场方程组的最初理论形式,就是散度方程和旋度方程即矢量微分方程,等等.

• **边值关系大有作为.** 本书情有独钟于场之边值关系,即面电荷两侧或面电流两侧其电磁场的连续性,包括法向分量之边值关系和切向分量之边值关系.场边值关系的理论地位勿容置疑,它与体内散度方程和旋度方程之地位平等,两者皆由普遍的场通量定理和环路定理导出.体内场微分方程之最终定解,必须满足场边值关系,凡不符合边值关系的解必定有误,凭借场边值关系可以对定解的正误作出可靠的判断;某些场合单凭场边值关系,就能求解场,或由一侧之场导出另一侧之场,乃至一个区间的场分布.

总之,在经典电磁学课程中,场边值关系的应用大有作为,这类应用大大扩展了人们分析场和求解场空间分布的能力;培养勤于且善于应用场边值关系,分析求解电磁场问题的习惯和能力,应是电磁学课程的一个基本教学目标,通论一书如是为之.全书先后论及场边值关系及其图象和应用的段落,总计 31 处.

• **两个新典型——余弦型球面电荷与正弦型球面电流.** 本书格外欣赏这种具有轴对称性的面电荷分布或面电流分布,即其面电荷密度函数为 $\sigma(\theta) = \sigma_0 \cos\theta$,其面电流密度函数为 $i(\theta) = i_0 \sin\theta$. 这两者的典型意义体现在以下两个方面.

第一,求解其全空间电磁场分布的过程中之每一环节,均用到相当基本的定理和方法,先由场叠加原理积分运算求得其轴上为一均匀场,再据场通量定理判定其轴外球壳内为一均匀场,最后由场边值关系推定其球壳外部为一偶极场,且确定了其等效偶极矩.可见培植这两个新典型,具有明显的教学价值.

第二,存在多种实际场合,出现如此面电荷分布或面电流分布.比如,驻极介质球、均匀外电场中的导体球或介质球,驻极球置于均匀介质中,等等皆出现余弦型球面电荷.又比如,永磁球,旋转均匀带电球壳,均匀外磁场中的介质球,均匀外磁场中的超导球,等等皆出现正弦型球面电流.可见,熟悉这两种典型及其场分布特点——球内为均匀场、球外为偶极场,具有较为广泛的实用价值.基于这两种典型,还可以开发出一批有价值的新题目.

• **特设讨论题.** 全书设有讨论题 32 道,非均匀地分布在八章.比如在第一章中,讨论一种非球对称的 r^2 反比律径向场的通量性质,讨论无源空间电势分布无极值,等等;又比如在第 8 章中,讨论电容器区域的位移电流和电磁场,进而考量若计及内部介质的磁导率 μ_t 和电导率 σ ,其结果有何变化;讨论恒定载流导体周边的电磁能流及相应的能量传输速度,并与体内焦耳热功率数值作一比较,等等.

这批讨论题品种各异,系课程内容的一种深化和延伸,颇有分量,其题意是开放型的,一般给出某种提示或中间结果,不提供详细题解.这类讨论题特别适用于小班讨论课,对引导学生活跃思想深入思考,互相切磋,甚有裨益.书中设计这样一批讨论题,是作者的一个尝试,在西安交大物理试验班的教学实践,取得了相当良好的效果.围绕讨论题,学生们课前准

备,查阅文献资料,课上活跃,积极上台,其间不时有质疑和争辩,有时还引申出其他有价值的问题,课堂气氛之热度出乎预料.

• **每题有题首、五成系新编.** 全书八章拟有习题 218 道,其中五成系新编.确切说它们是自编的,并非作者从手头其他书籍中拿来的;这一百多道习题萌生于写书过程中,再经反复斟酌方才敲定,尤其针对正文中的新意和重点,在新编题目中作出了强烈呼应.每道习题冠以题首,以点明该题的主旨,便于读者一目了然,快速浏览而作出选择.正文写毕便着手习题编创,历时一百天终于搁笔,可谓用心良苦,此乃创作个性使然,希冀在电磁学习题这片万花苑中,增添些许花色品种,如是则欣然喜之.

一本教科书,宛如一个人.初次见面,观其外表和举止;接触多了,知其作风和性格;深入交往,方能度其气质和品格,作者衷心期望广大读者对通论一书给予评论、批判和指正.

鸣 谢

本书动笔始于 2011 年 6 月 28 日,两年来一直得到西安交通大学理学院领导的支持和关怀,李福利教授、张胜利教授、张淳民教授、邱复生教授、高宏教授和肖国宏副教授,给予了特别关照,提供了十分良好的工作条件和生活条件,使作者得以身体健康精神饱满头脑清爽地专注于写作,这对写好六十万字的一本书至关重要.在此作者向他们表示深深的谢意和敬意.同时感谢青年教师左兆宇博士和王文慧博士,先后作为我的助手辅导电磁学课程,他们工作勤奋虚心好学,很好地完成了教学环节中的各项工作,为全面提高本课程教学质量作出了可贵贡献.还要感谢北京大学教材建设委员会给予本教材建设立项的支持,感谢北京大学出版社编辑辛勤而细致的工作,使本书得以适时面世.

本书写作于西安交大专家公寓,这是一座质朴精巧的四层小楼,既清静又明净,恰似作者的心境和笔境.谨以此书,献给西安交通大学物理试验班.今年适逢母校物理系建立 100 周年纪念,谨以此书敬贺北京大学物理系百年华诞.

钟锡华

2013 年 8 月处暑

目 录

电磁学课程导言	(1)
1 电磁学历史纪要与本书篇章结构	(1)
2 面对一种新的研究对象——空间分布的矢量场	(2)
3 经典电磁学系宏观电磁学	(3)
1 静电场	(4)
1.1 物质的电性	(4)
1.2 库仑定律	(7)
1.3 电场强度矢量 场强叠加原理	(13)
1.4 静电场的通量定理	(20)
1.5 三类高度对称性的静电场	(26)
1.6 静电场的环路定理 电势场	(32)
1.7 电偶极子在外场中	(42)
1.8 静电场的散度与旋度	(46)
1.9 静电场的边值关系 余弦型球面电荷的电场	(52)
习题	(57)
2 静电场中的导体 电介质	(67)
2.1 导体静电平衡条件	(67)
2.2 若干实例及其典型意义	(71)
2.3 空腔导体 静电屏蔽	(77)
2.4 电容器 电容	(86)
2.5 电介质的极化 极化强度矢量	(91)
2.6 介质的极化规律	(99)
2.7 电位移矢量	(107)
2.8 静电场的边值关系	(111)
2.9 静电场的能量	(117)
习题	(125)
3 恒定电流场 直流电路	(138)
3.1 电流场的运动学关系	(138)

3.2	导电介质中电流场动力学方程	(146)
3.3	金属导电的微观模型	(156)
3.4	电源与电动势 热电效应	(161)
3.5	直流电路	(170)
	习题	(178)
4	恒定磁场	(183)
4.1	安培定律 磁感应强度矢量 \mathbf{B}	(183)
4.2	毕奥-萨伐尔定律 几种典型磁场分布	(187)
4.3	旋转带电体的磁场 正弦型球面电流的磁场	(198)
4.4	恒定磁场的通量定理与环路定理	(202)
4.5	磁矢势 A-B 效应	(213)
4.6	载流体所受磁场力与力矩	(218)
4.7	洛伦兹力	(225)
	习题	(235)
5	磁介质	(244)
5.1	磁化强度矢量 \mathbf{M} 磁化电流	(245)
5.2	永磁体的磁场	(250)
5.3	介质场合恒定磁场规律 磁场强度矢量 \mathbf{H}	(255)
5.4	介质磁化规律	(260)
5.5	铁磁质	(266)
5.6	磁路	(271)
5.7	磁荷观点的静磁学理论	(278)
	习题	(285)
6	电磁感应	(292)
6.1	法拉第电磁感应定律	(292)
6.2	动生电动势 感生电动势与涡旋电场	(297)
6.3	自感与互感 磁能	(306)
6.4	小环流与外磁场的相互作用能	(314)
6.5	电路暂态过程	(318)
6.6	超导电性	(328)
	习题	(338)
7	交流电路	(346)
7.1	线性稳定电路的本征信号	(346)

7.2	元件的阻抗与相位差	(351)
7.3	交流电路矢量图解法	(354)
7.4	交流电路复数解法 基尔霍夫方程组	(362)
7.5	谐振电路及其 Q 值	(370)
7.6	交流电功率	(379)
7.7	变压器 三相电	(383)
	习题	(392)
8	麦克斯韦电磁场理论	(400)
8.1	位移电流	(400)
8.2	电磁场的麦克斯韦方程组	(407)
8.3	自由空间电磁场运动方程 电磁波性质	(412)
8.4	电磁波的产生	(422)
	习题	(429)

电磁学课程导言

- 1 电磁学历史纪要与本书篇章结构
- 2 面对一种新的研究对象——空间分布的矢量场
- 3 经典电磁学系宏观电磁学

1 电磁学历史纪要与本书篇章结构

经典电磁学理论形成的历史进程,起始于 1785 年库仑确定了电荷间及磁极间的相互作用定律,完成于 1864 年麦克斯韦建立了电磁场动力学方程组,历时八十年. 其间具有里程碑意义的两个重大事件是:1820 年奥斯特实验揭示了电流的磁效应,进而形成了磁的电学说,即一切磁性源于电荷的运动,从而实现了电与磁的统一;1831 年法拉第发现感应电流,进而形成了电磁感应定律,从而揭示了在变化情形下电与磁相互激励的场景. 1831 年这一年也正是麦克斯韦(James Clerk Maxwell),这位 19 世纪伟大的英国物理学家出生之年,而法拉第(Michael Faraday)时年 40 岁.

本课程的篇章结构如下:

- | | |
|-------------------|----------------|
| 第 1 章 静电场 | 第 5 章 磁介质 |
| 第 2 章 静电场中的导体和电介质 | 第 6 章 电磁感应 |
| 第 3 章 恒定电流场 直流电路 | 第 7 章 交流电路 |
| 第 4 章 恒定磁场 | 第 8 章 麦克斯韦电磁理论 |

可见,其主要内容为“场”,还有“路”. 其理论体系基本上遵循电磁学发展的历史轨迹,从电场到磁场,从恒定场到交变场,直到电磁波,最后总结为电磁场方程组. 这是一个典型的归纳型理论体系,明显地区别于经典牛顿力学体系之为一个典型的演绎型理论体系. 关于“路”,从直流电路到交流电路,还有磁路,我们不仅要学习到这些电路中有关电压分配、电流分配和能量转化的各种定理,更要注重从“场”的观点来理解“路”,练就一种在场的背景下看待路的眼光. 比如,电路中的电流,它是电路中的电场推动电路中的自由电荷作定向运动所致. 那么,可引出的思考有:电路中导线表面是否会有电荷积累;导线外侧是否存在电场;还有,电路中的导线其走向一变,则电流走向即刻随之变化,即导线总是引导电流使自己成为电流管,这是依靠什么机制来实现的;等等. 这类实际问题均涉及场与路的相互作用,通过本课程的学习,这些问题均能得以清晰的说明.

2 面对一种新的研究对象——空间分布的矢量场

作为电磁学理论研究主要对象的电场与磁场,是一种空间分布的矢量场,表示为 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 与 $\mathbf{B}(x, y, z)$. 与先前学习过的力学研究对象是离散的质点、质点组或刚体相比较,它们是一种崭新的客体. 本来三维空间分布的标量场函数已经显得较为复杂,比如,气象学中经常打交道的是温度场 $t(x, y, z)$, 气压场 $\rho(x, y, z)$, 它们是标量场; 而矢量场要比标量场显得更为复杂, 比如, 大气风场和大气环流场 $\mathbf{v}(x, y, z)$, 就是一种矢量场.

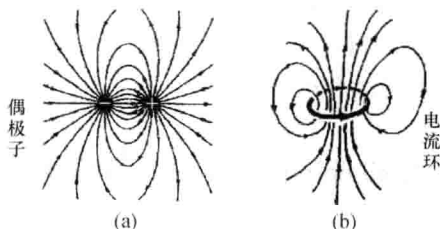


图 1 两个典型的电场和磁场的空间图象. (a) 电场图象 $\mathbf{E}(x, y, z)$; (b) 磁场图象 $\mathbf{B}(x, y, z)$

一矢量场其空间分布的规律, 体现在其随空间逐点变化的关系上, 亦即沿三个正交方向的空间变化率及其关系上; 而一个矢量本身就有三个分量, 各自沿三个正交方向上均有空间变化率. 这样一来, 对于一矢量场就有 9 个空间变化率及其相互关系有待研究. 对此, 以电场 \mathbf{E} 为例给予图解如下,

$$\mathbf{E}(x, y, z) \rightarrow \begin{cases} E_x(x, y, z), \\ E_y(x, y, z), \\ E_z(x, y, z) \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{\partial E_x}{\partial x} & \frac{\partial E_x}{\partial y} & \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} & \frac{\partial E_y}{\partial y} & \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} & \frac{\partial E_z}{\partial y} & \frac{\partial E_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

研究矢量场的理论目标, 就是揭示该矢量场这 9 个变元的内在关系, 从而由空间一处的场导出另一处的场. 这反映在数学上, 就是研究一矢量场的通量定理和环路定理, 即

$$\text{通量定理 } \oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = ? \quad \text{环路定理 } \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = ?$$

对应的微分方程为

$$\text{散度方程 } \nabla \cdot \mathbf{E} = ? \quad \text{旋度方程 } \nabla \times \mathbf{E} = ?$$

这两个定理结合在一起才能全面地反映一个矢量场的性质. 因此, 对于磁场 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$, 我们依然去探求:

$$\begin{aligned} \oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = ? & \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = ? \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = ? & \quad \nabla \times \mathbf{B} = ? \end{aligned}$$

以上这些数学符号的明确意义在此课程导言中均无需明了, 它们将在随后的篇章中详

加论述。目前急于将它们开列出来,旨在引导人们意识到面对空间矢量场这样一种新的研究对象,必须要有一种新的眼光、一种新的数学语言及其新的理论形式,给予分析和表述。

3 经典电磁学系宏观电磁学

本课程学习的经典电磁学属于宏观电磁学,这是相对于量子电动力学(QED)而言的。我们知道,物体的电性即存在所谓带电体,其上电荷均来自组成物质的分子和原子内部的电性。原子和分子的尺度为纳米(nm)量级,故以 nm 尺度来审视,物质的荷电量是离散的不连续的。然而,在经典电磁学中,在论述导体或电介质身上的带电状态时,一直采用电荷连续分布的概念,这是怎么回事?这里关系到实验上的观测尺度和理论上的分析精度。从实验上看,即便探测电性的传感器其探针尺度及位移精度达到甚小的微米(μm)量级, $1\ \mu\text{m}=10^3\ \text{nm}$,那么这探针尖端也覆盖了 10^6 个原子、分子或离子,故其观测到的是平均场或平均电荷量,不会显示电荷分布在微观上的不连续性。这是宏观电磁学的一层含义,即在宏观尺度上考量物质的荷电状态,相应地采用体电荷分布、面电荷分布等术语给予描述。

宏观电磁学的另一层含义与带电粒子的波粒二象性相关。我们知道,电磁学要研究的基本问题有两方面,一方面研究电荷电流产生电磁场的规律,另一方面研究电荷电流所受电磁力的规律及其运动的规律。经典电磁学在处理另一方面问题,诸如电子回旋加速器、电子感应加速器、阴极射线管、显像管、电子显微镜,等等场合的电子运动行为时,均忽略了电子或带电粒子的波动性,而采用经典粒子的概念,并用经典牛顿力学方程,来描述电子或带电粒子在电磁力作用下的运动行为。这样处理的结果却与实验观测相符,这又是怎么回事?原来对于电子这类轻粒子,当其运动范围在宏观尺度,比如米(m)量级,则其波动性是次要的,而粒子性是显要的,其行为可以用经典粒子的语言描述之;正如电磁场和电磁波,当其存在于宏观尺度的空间范围,则其粒子性即其光子性是次要的,而波动性是显要的,其行为可以用经典波动的语言描述之。这些结论,可以由正宗的量子电动力学的理论导出,也可以用单粒子波包及其寿命的经典图象给以诠释。^①

总之,宏观电磁学采用经典粒子概念,来考量带电粒子在电磁场中的运动;采用经典波场概念,去看待电磁场和电磁波。这在宏观尺度上是正确的。本课程始终如是为之。

^① 可参阅钟锡华,《现代光学基础》,北京大学出版社,2012年第二版,9.5节,波包的展宽,441页。

1

静 电 场

- 1.1 物质的电性
- 1.2 库仑定律
- 1.3 电场强度矢量 场强叠加原理
- 1.4 静电场的通量定理
- 1.5 三类高度对称性的静电场
- 1.6 静电场的环路定理 电势场
- 1.7 电偶极子在外场中
- 1.8 静电场的散度与旋度
- 1.9 静电场的边值关系 余弦型球面电荷的电场

本 章 概 述

由库仑定律得到点电荷的静电场,并将它选定为一般静电场的基元场;基于这基元场和场强叠加原理,确立了静电场的通量定理和环路定理,以及相应的静电场散度方程和旋度方程;求解了一系列典型电荷分布时的空间场强分布和电势分布,特别关注这些典型结果所显示的静电场的种种个性.本章最后,饶有兴趣地讨论了余弦型球面电荷的电场,由其内部的均匀场,应用静电场边值关系导出其外部为偶极场;继点电荷、电偶极子之后,余弦型球面电荷分布乃又一个重要典型,它在静电导体、电介质和磁介质场合一再出现,应当给予重视.本章是《电磁学通论》的首章,读者从中不仅学习到静电场的基本规律和众多典型结果,而且感悟到与场打交道时,应当具备的认识眼光、分析能力和相应的数理方法.

1.1 物质的电性

- 物质的电性与电中性概念
 - 几种起电方式
- 物质的电性与电中性概念

宏观物质的电性源于微观上原子的电性,图 1.1 描绘出原子电性的粗略图象.其中,原

子核带正电,其电量 $q_+ = +Ze$;环绕于核外的电子带负电,其电量为 $q_- = -Ze$. 这里, Z 为原子序数,它只能取整数值, e 为基元电量,即一个电子的荷电量. 整个原子是电中性的,即 $Ze + (-Ze) = 0$.

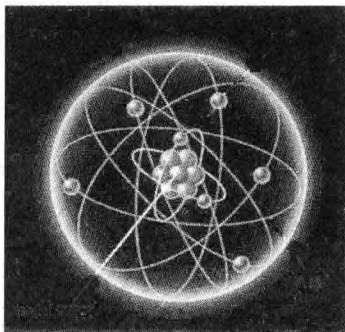


图 1.1 原子的电性

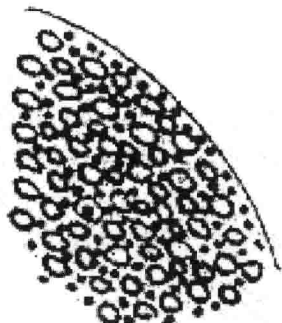


图 1.2 考察介质中的电性

物质,亦即电磁学中常说的介质,它是由大量的原子按一定秩序或规则凝聚而成的,如图 1.2 所示. 以宏观的眼光看,在体积元 ΔV 中,含有正电量 Δq_+ ,且含负电量 Δq_- . 不妨在此引入体电荷密度 ρ_+, ρ_- ,来描述 ΔV 处介质的电性,

$$\rho_+ = \frac{\Delta q_+}{\Delta V} \quad (\Delta V \rightarrow 0), \quad \rho_- = \frac{\Delta q_-}{\Delta V} \quad (\Delta V \rightarrow 0).$$

若 $\rho_+ + \rho_- = 0$,表明此处介质呈现电中性;若 $\rho_+ + \rho_- \neq 0$,表明此处介质的电中性遭到破坏,呈现带电状态或荷电性. 这里的体积元 ΔV ,可以取在介质体内,也可以推移至介质表面层,宏观电磁学忽略这 nm 尺度的表面层厚度,随之以面电荷密度 $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$ 替代体电荷密度 ρ ,来描述介质表面的带电状态.

以上关于介质电中性或荷电性的描述,其中有一点值得注意,即,若介质体内呈现电中性,只是表明其内部含有两种等量异号的电荷,在电量的代数和中恰巧彼此抵消为零;这并不意味着,在任何场合这两者 $\Delta q_+, \Delta q_-$ 的电磁效应总是彼此抵消的. 比如,在外电场作用下两者位移方向是相反的;在外磁场作用下,运动的自由电荷 Δq_- 将受到一个洛伦兹力,而不动的 Δq_+ 并未直接受到此种力. 当然这些事情将在以后相关章节中详加论述. 类似以上复杂情况的出现,说到底其根源在于物质世界存在着两种符号相反的电荷,即正电荷与负电荷. 而在力学中,如质量,惯性质量,引力质量或物质的量,总是正号的,从未说起负质量. 难以想象若同时存在有正质量与负质量,像正电荷与负电荷那样,这物理世界将是怎样的一幅图景.

• 几种起电方式

凡使物体或介质不再维持电中性而带电的手段,统称为起电. 常见的起电方式有以下几种.

(1) 摩擦起电——摩擦双方电子交换的不对等

这是人类最早发现的电现象. 约在公元前 600 年就有人记述了摩擦后的琥珀能吸引轻小物体的现象. 如今通行的带电、电符等观念和术语, 就源于先哲们对摩擦起电现象的观察和感悟. 进而, 人们发现经摩擦而带电的物体之间, 有或吸引或排斥两种相反的作用力, 意识到应有两种相反的带电状态, 于是用正、负两种符号对符电性加以区别, 即所谓正电荷与负电荷. 当用丝绸布摩擦玻璃棒时, 规定丝绸布带上了负电荷, 玻璃棒带上了正电荷; 当用毛皮摩擦硬橡胶时, 毛皮带上了正电荷, 而硬橡胶带上了负电荷, 如图 1.3(a) 所示. 从近代物理眼光看, 摩擦起电的微观动力学机制还是比较复杂的, 理应归于现代表面物理的研究课题. 粗略地看, 摩擦双方在不停地交换电子, 但其迁移交换电子的量是不对等的, 以致宏观后果是一方缺失电子而带正电, 另一方多余电子而带负电.

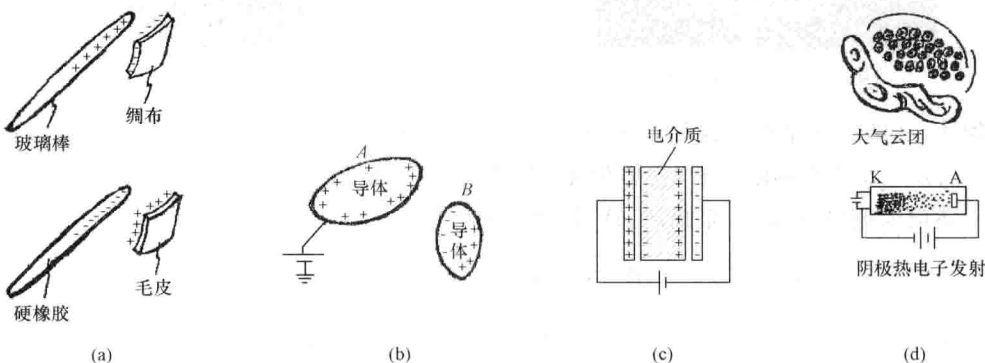


图 1.3 几种起电方式

(2) 导体感应起电——自由电荷的重新分布

如图 1.3(b) 所示, 当原本不带电的导体 B 接近已带电的导体 A 时, 在后者电力的作用下导体 B 体内的自由电荷发生迁移, 最终集聚于表面层, 以致其一部分表面带上正的面电荷, 另一部分表面带上负的面电荷. 这是一种所谓感应起电的方式, 虽然此时导体 B 上的总电量依然为零.

(3) 介质极化起电——束缚电荷的有序取向

如图 1.3(c) 所示, 当一个由绝缘材料制成的介质板进入业已被充电的电容器时, 在后者电力作用下, 介质分子原本处于束缚态的正电荷与负电荷发生了相反方向的位移, 即所谓极化, 最终导致介质表面分别带上符号相反的面电荷.

关于导体的感应和介质的极化这类物事, 将在本课程第 2 章详加论述.

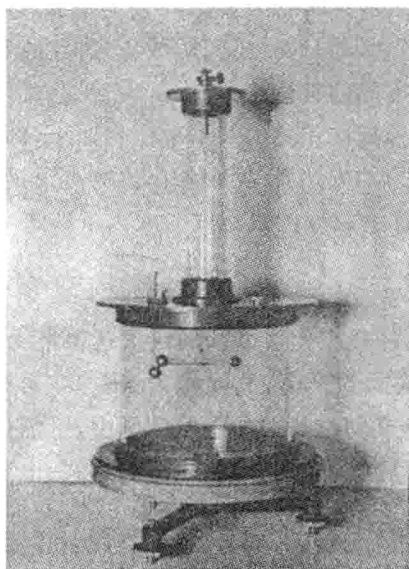
(4) 空间电荷——不依附于导体或介质

如图 1.3(d) 所示, 在大气团中经常出现带电的离子团, 大气雷电现象就是这种正、负离子团之间高电压放电所致. 而宇宙射线也给大气送来各种带电粒子. 还有, 在电真空器件, 诸如阴极射线管、电子显像管、X 射线管中, 存在着大量的电子, 有时被人们称为电子云. 这类离子团和电子云的存在, 不像自由电荷那样依附于导体, 也不像极化电荷那样依附于介

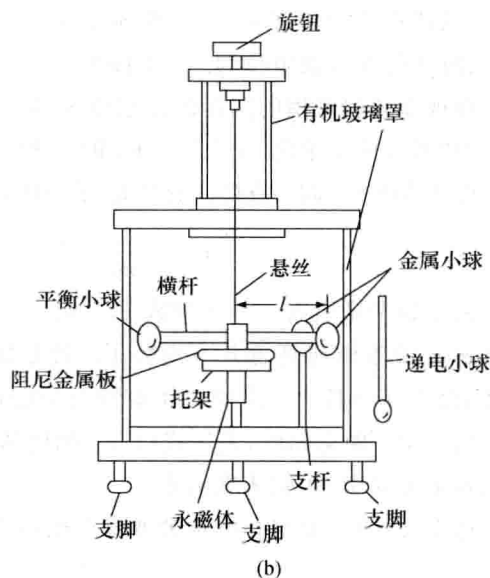
质,它们独立地存在于空间,故被称为空间电荷,作为一种带电状态,它也是电磁学研究的一个重要对象.

1.2 库仑定律

- 库仑定律
 - 库仑定律成立条件和适用范围
 - 对库仑定律的进一步阐释
 - 四个重要物理常数
- 库仑定律



(a)



(b)

图 1.4 库仑扭秤实验装置(a)与结构(b)

在扭秤实验研究(图 1.4)的基础上,法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb)于 1785 年建立了相对静止的两个点电荷之间相互作用力的规律. 参见图 1.5,两个点电荷其电量分别为 q_1 与 q_2 ,彼此相距为 r ,设 q_2 相对 q_1 的位矢为 r_{12} ,则点电荷 q_1 施于 q_2 的电力 F_{12} 遵从以下关系:

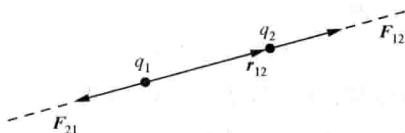


图 1.5 说明库仑定律

$$F_{12} \propto q_1, q_2, \quad \text{与电量成正比;}$$