

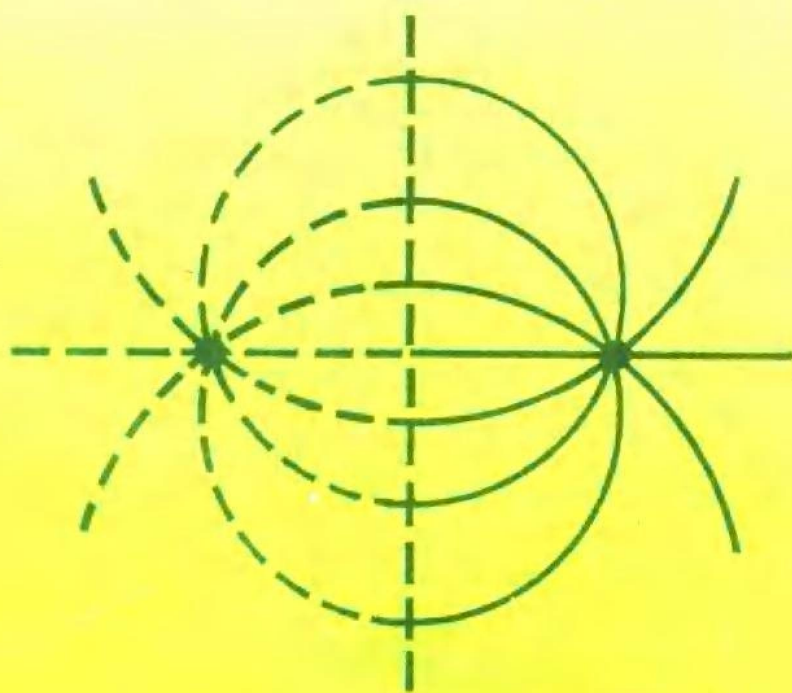


高等学校规划教材
工科电子类

全泽松

电磁场理论

DIANCICHANG
LILUN



电子科技大学出版社

高等学校教材

电磁场理论

全泽松

电子科技大学出版社

[川] 新登字 016 号

内 容 简 介

本书在物理学的基础上系统地阐述了电磁场理论的基本内容,包括:电磁运动的普遍规律,静电场,稳恒电流与稳恒磁场,平面电磁波,导行电磁波,电磁波的辐射、散射和衍射以及相对论电动力学等,并有较多的例题和习题以及相应的习题答案。

本书可供高等学校电磁场与微波技术、光电子技术、物理电子技术、无线电物理、应用物理、应用数学及电类各专业的“电磁场理论”、“电磁场与电磁波”、“电磁场”、“电动力学”等课程作教材或参考书,还可供其他有关专业的教师、科技人员、学生参考。

电 磁 场 理 论

全泽松

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

四川省金堂新华印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 25.25 字数 613 千字

版次 1995 年 12 月第一版 印次 1995 年 12 月第一次印刷

印数 1—3000 册

中国标准书号 ISBN 7-81043-387-3/TM·4

定价: 19.75 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部

电子类专业教材办公室

前 言

本书系按全国高等学校工科电子类专业“八五”教材规划,由机械电子工业部电磁场与微波技术教材编审委员会电磁场理论编审小组招标,并于1993年4月苏州会议评选推荐出版,可作为高校有关专业的教学用书,也可供有关科学和工程技术人员参考。

本书是以作者在电子科技大学微波工程系讲授电磁场理论课程所编写出的《电磁场理论》和《电磁场与电磁波》为基础,根据1992年10月机电部电磁场与微波技术教材编审委员会电磁场理论编审小组扩大会议拟定的编写大纲编写而成的。

本书在物理学和工程数学的基础上,系统地阐述了电磁场理论的基本内容,着重论述了电磁现象的基本规律、物理概念和方法。全书共分七章:第一章电磁运动的普遍规律,第二章静电场,第三章稳恒电流与稳恒磁场,第四章平面电磁波,第五章导行电磁波,第六章电磁波的辐射、散射和衍射,第七章相对论电动力学。

在编写中,作者力图做到结构合理,层次分明,重点突出,条理清晰,把物理概念与数学工具的使用较好地结合起来,使内容与科技水平相适应,使正文与例题、习题相配合。书中列举相当数量的例题,目的在于强调基本内容和说明典型问题的分析方法。每章之后附有习题,目的在于培养学生应用概念、原理和公式去分析、解决问题的能力。书末有习题答案,可供读者在做完习题后核对结果。此外,还有一个附录,供读者方便地查找公式。

本书从真空中的四大实验定律(库仑定律,电荷守恒定律,安培定律和法拉第电磁感应定律)出发,归纳总结为真空中的麦克斯韦方程组,进而推广到介质中,得到描述电磁现象的普遍规律——介质中的麦克斯韦方程组,然后再讨论静电场,静磁场以及正弦电磁场等特殊情况。这种论述体系既吸取了习惯上以实验为基础的传统性论述和以麦克斯韦方程组为起点的公理性论述的优点,又弥补了它们各自的不足。

本书适用于课堂教学为70~100学时,有较广的适用面,只要根据具体情况,适当掌握有关章节(特别是有“*”号)的内容的取舍。

本书在编写过程中,得到中国科学院院士、电子科技大学林为干教授及电子科技大学谢处方教授的亲切指导,还得到电子科技大学微波工程系、电磁场教研室领导及同事们的支持和关心,饶克谨教授审阅了本书稿,提出了许多宝贵意见,并给予热情的指导,北京理工大学楼仁海教授和编审小组的其他专家教授对本书给了大力支持并提出了许多宝贵意见,还有电子科技大学教务处教材科和电子科技大学出版社的领导、编辑以及有关同志对本书的出版给了热情的关心、支持和辛勤的工作,在此一并致谢。最后,我还要感谢我的夫人以及关心、支持我的朋友们。

由于本人水平有限,书中缺点和错误在所难免,希望使用本书的有关院校师生和广大读者批评指正。

全泽松

1995年6月于电子科技大学

序

全泽松同志是我结识多年的学生、同事和朋友。他于1957年毕业于成都工学院（现名四川联合大学）电机系。1957年9月至1991年2月退休一直在成都电讯工程学院（现名电子科技大学）从事教学工作。1978年以前任助教，1978年至1982年任讲师，1982年8月至1988年5月任副教授，1988年6月至1991年1月任教授。30多年来，他都是站在教学第一线上，兢兢业业地为国家培养人才而努力工作。他的勤奋好学精神、严谨的治学作风和丰富的教学经验给我留下了深刻的印象。他自编讲义作教材，经多次教学实践，多次修改，不断完善提高教材质量，终于在1987年由成都电讯工程学院出版社出版了凝聚他心血的一本书——《电磁场理论》。之后，于1990年由电子科技大学出版社出版了他写的《相对论电动力学》（统编教材），1992年由四川科学技术出版社出版了他编著的《电磁场与电磁波》。他的这些书的出版为培养微波和电子学专业人才打下了一个坚实的电磁场理论基础，他的书被四川大学无线电系、四川师范大学物理系、西安空军电讯工程学院及电子科技大学等院校采用作教材，反映良好，深受读者欢迎，并在国内外有一定影响。

全泽松同志编写的这本《电磁场理论》是全国高等学校工科电子类专业“八五”规划统编教材。全泽松同志写的这本《电磁场理论》与他在1987年由成都电讯工程学院出版社出版的《电磁场理论》书名相同，但在论述体系上却迥然不同。“87”本是按以实验为基础的传统性论述体系。本书则既不同于“传统性”论述体系也不同于“公理性”论述体系，而是从真空中的四大实验定律（库仑定律、电荷守恒定律、安培定律和法拉第电磁感应定律）出发，归纳总结为真空中的麦克斯韦方程组，进而推广到介质中，得到描述电磁运动的普遍规律——介质中的麦克斯韦方程组，然后再讨论静电场、静磁场以及正弦电磁场等特殊情况。这种论述体系既吸取了习惯上以实验为基础的传统性论述和以麦克斯韦方程组为起点的公理性论述的优点，又弥补了它们各自的不足。本书是一本具有不同风格的书，其内容非常丰富，既包含了电磁场理论的核心内容，也包括了电磁理论中的一些新内容，如等离子体和铁氧体中的波、非均匀媒质中的电磁波以及相对论电动力学等。本书的结构体

系合理、层次分明，重点突出，条理清晰，逻辑性强，文字精炼，数学推导严密，物理概念清晰，叙述清楚，深、广度适中，取材恰当。并且作者对理论联系实际也有充分的考虑，书中的例题很有启发性和代表性。每章之后附有习题，且书末有相应的答案。因此，本书是一本颇具特色的优秀的教材，可供高等学校电子类有关专业的“电磁场理论”、“电磁场与电磁波”和“电动力学”等课程作教材或参考书，相信读者会从中获益匪浅，但仍请读者就其不足或错误不吝指正，以便再版时改正。

中国科学院院士、电子科技大学教授

林为干

1995年11月24日于成都

目 录

绪论	(1)
第一章 电磁运动的普遍规律	(3)
§ 1.1 库仑定律 静电场的散度和旋度	(3)
1.1.1 库仑定律	(3)
1.1.2 点电荷密度的数学表示——狄拉克 δ 函数	(5)
1.1.3 静电场的散度和旋度	(6)
§ 1.2 安培定律 静磁场的散度和旋度	(8)
1.2.1 电流	(8)
1.2.2 电荷守恒定律	(9)
1.2.3 欧姆定律	(11)
1.2.4 焦耳定律	(12)
1.2.5 安培定律	(12)
1.2.6 毕奥-萨伐尔定律	(13)
1.2.7 静磁场的散度和旋度	(14)
§ 1.3 法拉第电磁感应定律	(17)
§ 1.4 真空中的麦克斯韦方程组 洛伦兹力公式	(20)
1.4.1 位移电流 麦克斯韦方程组	(20)
1.4.2 洛伦兹力公式	(22)
§ 1.5 介质中的麦克斯韦方程组 电磁性质的本构关系	(22)
1.5.1 介质的极化 极化电荷和极化电流	(23)
1.5.2 介质的磁化 磁化电流	(25)
1.5.3 介质中的麦克斯韦方程组	(27)
1.5.4 电磁性质的本构关系	(28)
§ 1.6 电磁场的边界条件	(30)
1.6.1 场矢量 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{B}$ 的法向分量的边界条件	(30)
1.6.2 场矢量 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的切向分量的边界条件	(31)
1.6.3 理想导体的边界条件	(32)
1.6.4 $\mathbf{J}$ 的法向分量的边界条件	(32)
§ 1.7 电磁场的能量守恒定律	(36)
* § 1.8 电磁场的动量守恒定律	(40)
* § 1.9 麦克斯韦方程组的完备性	(43)
§ 1.10 电磁场的波动性 光的电磁理论	(44)
§ 1.11 电磁位 达朗贝尔方程	(45)
1.11.1 用位来描述电磁场	(45)
* 1.11.2 规范变换	(46)
1.11.3 达朗贝尔方程	(46)

习题	(47)
第二章 静电场	(51)
§ 2.1 静电场的标位及其微分方程	(51)
2.1.1 静电场的基本方程	(51)
2.1.2 静电场的标位及其微分方程	(51)
2.1.3 电位差	(52)
2.1.4 电位的边界条件	(53)
2.1.5 静电场的唯一性定理	(54)
§ 2.2 分离变量法——直角坐标系中拉普拉斯方程的解	(64)
§ 2.3 分离变量法——圆柱坐标系中拉普拉斯方程的解	(72)
* § 2.4 分离变量法——球坐标系中拉普拉斯方程的解	(81)
§ 2.5 电像法	(93)
2.5.1 平面镜像	(93)
2.5.2 球面镜像	(100)
2.5.3 圆柱面镜像	(104)
* § 2.6 格林函数法	(108)
2.6.1 格林函数	(108)
2.6.2 用格林函数表示边值问题的解	(109)
2.6.3 用格林函数求边值问题	(110)
§ 2.7 复变函数法	(111)
2.7.1 复电位函数法	(112)
2.7.2 常用的解析函数	(114)
2.7.3 保角变换法	(118)
2.7.4 常用的变换	(119)
§ 2.8 有限差分法	(124)
§ 2.9 电容和部分电容	(127)
2.9.1 电容	(127)
* 2.9.2 电位系数和电容系数	(127)
* 2.9.3 部分电容	(128)
§ 2.10 静电场能量	(130)
2.10.1 静电场的能量	(130)
2.10.2 点电荷系统的相互作用能量	(130)
2.10.3 带电导体系统的能量	(130)
* 2.10.4 电荷分布在外电场中的能量	(131)
* § 2.11 静电力	(133)
习题	(136)
第三章 稳恒电流与稳恒磁场	(142)
§ 3.1 稳恒电流场与稳恒电场	(142)
§ 3.2 静磁场的矢位及其微分方程	(145)

3.2.1	静磁场的矢位	(145)
3.2.2	静磁场矢位的微分方程	(145)
3.2.3	矢位 A 的边界条件	(146)
*3.2.4	静磁场的唯一性定理	(147)
* § 3.3	静磁场的标位及其微分方程	(156)
§ 3.4	磁像法	(163)
§ 3.5	电感	(167)
§ 3.6	磁场能量和力	(171)
3.6.1	磁场的能量	(171)
3.6.2	电流回路系统的能量	(171)
*3.6.3	电流分布在外磁场中的能量	(172)
*3.6.4	磁场力	(174)
* § 3.7	似稳场	(177)
3.7.1	似稳条件	(177)
3.7.2	似稳场方程	(178)
3.7.3	线型导线中的电路方程	(179)
习题		(180)
第四章	平面电磁波	(184)
§ 4.1	正弦电磁场	(184)
4.1.1	正弦电磁场的复数表示法	(184)
4.1.2	复数形式的坡印廷定理	(186)
4.1.3	复数形式的波动方程	(188)
§ 4.2	电磁波在非导电媒质中的传播	(189)
§ 4.3	电磁波的极化	(194)
§ 4.4	电磁波在导电媒质中的传播	(196)
§ 4.5	电磁波在介质分界面上的反射和折射	(201)
4.5.1	反射、折射的基本规律	(202)
4.5.2	菲涅耳公式	(203)
*4.5.3	功率反射系数和功率透射系数	(206)
*4.5.4	半波损失	(207)
4.5.5	布儒斯特角	(208)
4.5.6	全反射 临界角	(208)
4.5.7	垂直入射的情形	(210)
§ 4.6	电磁波在导体面上的反射和折射	(214)
*4.6.1	斜入射情形	(214)
4.6.2	垂直入射情形	(215)
* § 4.7	介质的频率色散	(220)
* § 4.8	群速度	(222)
* § 4.9	电磁波在等离子体中的传播	(224)

* § 4.10 电磁波在铁氧体中的传播	(230)
* § 4.11 电磁波在非均匀介质中的传播	(236)
4.11.1 非均匀介质中的电磁波方程	(236)
4.11.2 平面分层介质中的波方程	(237)
习题	(239)
第五章 导行电磁波	(243)
§ 5.1 导波的基本方程	(244)
§ 5.2 导波的分类	(248)
5.2.1 TEM 波	(248)
5.2.2 TE 波和 TM 波	(251)
§ 5.3 矩形波导	(253)
5.3.1 场分量	(253)
5.3.2 截止波长	(256)
5.3.3 矩形波导中的主模	(257)
§ 5.4 同轴线	(262)
5.4.1 TEM 波场分量	(262)
5.4.2 同轴线导体表面上的电流分布	(263)
5.4.3 电压波和电流波	(264)
5.4.4 同轴线的传输功率与能量	(265)
5.4.5 衰减	(266)
§ 5.5 传输线理论	(267)
5.5.1 分布参数电路的概念	(268)
5.5.2 传输线方程及其解	(268)
5.5.3 传输线的特性参数	(270)
5.5.4 传输线的工作参数	(272)
5.5.5 无损传输线上的工作状态	(274)
5.5.6 传输线的传输功率及传输效率	(279)
§ 5.6 谐振腔	(281)
5.6.1 分布参数谐振电路	(281)
5.6.2 同轴谐振腔	(282)
5.6.3 矩形谐振腔	(284)
习题	(288)
第六章 电磁波的辐射、散射和衍射	(291)
§ 6.1 达朗贝尔方程的解 推迟位	(291)
§ 6.2 推迟位的多极展开	(293)
§ 6.3 电偶极场和电偶极辐射	(296)
6.3.1 近区电磁场	(297)
6.3.2 远区电磁场	(298)
§ 6.4 磁偶极辐射和电四极辐射	(300)

6.4.1 磁偶极辐射	(300)
* 6.4.2 电四极辐射	(302)
§ 6.5 线型天线辐射	(303)
6.5.1 天线上的电流分布	(303)
6.5.2 半波天线的辐射	(304)
§ 6.6 天线阵	(306)
6.6.1 二元天线阵	(307)
6.6.2 均匀直线式天线阵	(309)
* § 6.7 电磁波的散射	(311)
§ 6.8 电磁波的衍射	(312)
6.8.1 衍射问题	(312)
6.8.2 基尔霍夫公式	(313)
6.8.3 小孔衍射	(314)
习题	(318)
第七章 相对论电动力学	(321)
§ 7.1 爱因斯坦的基本假设	(321)
* 7.1.1 伽利略变换	(321)
* 7.1.2 伽利略相对性原理的困难	(322)
7.1.3 爱因斯坦的选择	(323)
§ 7.2 洛伦兹变换	(323)
7.2.1 间隔和间隔不变式	(323)
7.2.2 洛伦兹变换	(324)
§ 7.3 相对论的时空性质	(325)
7.3.1 时空结构	(326)
7.3.2 因果关系对信号传递速度的限制	(326)
* 7.3.3 同时的相对性	(327)
* 7.3.4 运动时钟的延缓	(327)
* 7.3.5 运动尺的缩短	(328)
* 7.3.6 相对论的速度变换公式	(329)
§ 7.4 物理规律协变性的数学形式	(330)
7.4.1 洛伦兹变换的四维形式	(330)
7.4.2 四维张量	(331)
7.4.3 四维张量的代数运算	(332)
7.4.4 四维张量的微商	(333)
7.4.5 四维张量方程的协变性	(333)
§ 7.5 电磁规律的四维形式	(334)
7.5.1 四维电流密度及四维形式的连续性方程	(334)
7.5.2 四维位矢量及四维形式的位方程	(335)
7.5.3 电磁场张量及四维形式的麦克斯韦方程组	(336)

* 7.5.4 四维洛伦兹力密度矢量	(339)
§ 7.6 电磁场的变换式	(340)
§ 7.7 平面电磁波的相位不变性 四维波矢量	(343)
* § 7.8 相对论力学	(346)
7.8.1 四维动量矢量	(346)
7.8.2 相对论动力学方程	(347)
7.8.3 质速关系式和动能公式	(349)
7.8.4 质能关系式	(350)
7.8.5 带电粒子在电磁场中的运动方程	(350)
§ 7.9 运动带电粒子的位和电磁场	(350)
7.9.1 李纳-维谢尔位	(350)
7.9.2 运动带电粒子的电磁场	(352)
7.9.3 非相对论运动带电粒子的辐射	(354)
* 7.9.4 相对论运动带电粒子的辐射	(356)
§ 7.10 运动带电粒子的电磁场对粒子自身的反作用	(358)
7.10.1 电磁质量	(359)
7.10.2 辐射阻尼	(360)
§ 7.11 经典电磁理论的适用界限	(361)
习题	(362)
附录一 矢量公式	(364)
附录二 张量	(367)
习题答案	(379)
主要参考书目	(391)

绪 论

“电磁场理论”是在物理学的基础上系统地阐述电磁场的基本属性、运动规律以及它与带电物质的相互作用。

在生产实践和科学研究中，存在着大量与电磁现象有关的问题。例如，电机、电力工程、雷达、无线电广播、通信、光通信、电磁探矿、粒子加速器，微波能应用等，都涉及到电磁场与波的问题。因此，掌握好电磁场与波的基本理论，有助于更好地解释世界和改造世界。

电磁理论是人类对电磁现象进行长期观察、实验和在生产实践的基础上产生、发展起来的，18世纪中叶以后，在工业生产发展的推动下，对自然科学的实际探索使电磁学得到了较快的发展，人们研究了静电、静磁和电流等现象，积累了大量的实验资料，总结出了适用于各个特殊范围的、相互独立的实验定律，如库仑定律、毕奥-萨伐尔定律等。但是，电磁学的重大进展却是在人们认识到电现象和磁现象之间存在着密切的联系之后，1820年，奥斯特发现了电流的磁效应；1831年，法拉第发现了著名的电磁感应现象，至此，电和磁之间的内在联系才开始被人们所认识，这些研究成果后来被广泛应用于生产实践，推动了电磁理论的进一步发展。1864年麦克斯韦系统地归纳，推广了上述各个实验定律，用统一的理论概括了电磁场的运动规律，总结出了麦克斯韦方程组，从而奠定了电磁理论的基础。同时，麦克斯韦还从他的理论出发，提出了“光的电磁理论”，并预言了电磁波的存在，这是物理学上的一个伟大的成就，也是人类认识自然的一个巨大进展。1888年，赫兹用实验证实了电磁波的存在，因而也证实了麦克斯韦理论的正确性，在麦克斯韦理论的指导下，电磁波的研究和应用逐渐发展起来，到今天，电磁波的应用已广泛而深入地渗透到科学的各个领域，形成了许多专门的学科。在物理学发展史上，这是从实践上升为理论，再以理论指导实践的一个典型范例。

在麦克斯韦方程组被总结出来之后，许多人认为物理现象的基本规律已完全掌握，剩下的只是把这些基本规律应用到各种具体问题上，解方程，计算的工作了，但这种看法后来被新的实验事实所否定。1905年，爱因斯坦提出了崭新的时空观念，发表了“论运动物体的电动力学”一文，创立了狭义相对论，使电磁理论在新的时空理论基础上，发展成更加完整的，适用于一切惯性参考系的理论，狭义相对论是研究高速运动现象的有力工具，是现代物理学发展的重要基础理论之一。

本世纪20年代，量子理论建立以后，电磁理论与量子理论结合起来，形成一门新的学科——量子电动力学。它是研究微观世界中电磁运动的有力工具。可见，客观世界的变化运动永无止境，人们在实践中对于真理的认识不会完结。业已发现的定律，方程等，不过是在一定范围和一定条件下起作用的相对真理，它们仅仅标志着整个认识过程中的一定发展阶段。

随着科学技术的不断发展，电磁学理论的应用前景必将十分广阔，电磁理论本身也将得到丰富和发展。

本书从真空中的四大实验定律——库仑定律、电荷守恒定律、安培定律以及法拉第电磁感应定律出发，归纳总结为真空中的麦克斯韦方程组，进而推广到介质中，得到电磁场运动的一般规律；然后讨论特殊情形。内容包括：电磁运动的普遍规律，静电场，稳恒电流与稳恒磁场，平面电磁波，导行电磁波，电磁波的辐射、散射和衍射以及相对论电动力学等。

但愿通过本书的学习，能够使读者：(1) 掌握电磁场的基本属性和运动规律；(2) 掌握分析和处理电磁场基本问题的能力，为今后的深造，生产实践和科学研究打下良好的基础；(3) 通过相对论电动力学的学习，加深对电磁场本质的理解和认识。

第一章 电磁运动的普遍规律

本章主要研究描述电磁运动的普遍规律。对于这个问题,首先我们从真空中的基本实验定律出发,建立起真空中的麦克斯韦方程组,继而将其推广到介质中,得到介质中的麦克斯韦方程组,并导出电磁场的边界条件,然后研究电磁场的能量、动量,最后讨论麦克斯韦方程组的完备性,电磁场的波动性以及电磁场的位。

§ 1.1 库仑定律 静电场的散度和旋度

1.1.1 库仑定律

库仑定律是从实验中总结出的描写真空中两个静止点电荷 q_1 和 q_2 之间相互作用力的定律,其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{R}_{12}}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^3} \quad (1.1.1)$$

式中 $\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2}$ 表示点电荷 q_1 作用在点电荷 q_2 上的力, $\mathbf{R}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 表示由 q_1 指向 q_2 的距离矢量,如图 1.1 所示, $R_{12} = |\mathbf{R}_{12}| = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$, $\epsilon_0 = 1/(36\pi \times 10^9) \approx 8.85418 \times 10^{-12} \text{F/m}$, 称为真空电容率或真空介电常数。

应当指出,库仑定律所给出的力的大小与距离的关系,服从平方反比律,这一点很重要。

库仑定律只是给出了真空中两个静止点电荷之间的相互作用力的大小和方向,但并没有说明这种作用力是通过什么途径发生的。对于这个问题的解释,历史上有过长期争论,一种观点认为,一个电荷对另一个电荷的作用超越时空,直接地、

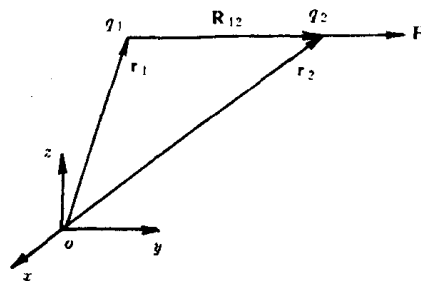


图 1.1

瞬时地发生的,这就是所谓的“超距”作用观点;另一种观点则认为,一个电荷对另一个电荷的作用是通过一种中间物为媒介,以一定的、有限的速度传递过去,这就是所谓的近距作用观点。实践证明,近距作用的观点是正确的。电力(磁力也一样)在真空中虽然以极快的速度(即光速)传递,但该速度仍然有限,电力是通过电场来传递的。这就是说,电荷在自己的周围空间要激发电场,而电场对处于场中的其他电荷都有力的作用。

为了表征电场的特性,我们引入电场强度矢量这样一个物理量。电场中某点的电场强度定义为,在该处放置一个单位正的试验点电荷 q_0 ,其上所受的电场力,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1.1.2)$$

它的单位为 V/m。上述关于电场强度的定义不仅对静电场适用,对时变场也适用。应当注意,电场对电荷的作用力与电场强度是两个不同的概念,前者反映了场与电荷的相互作用,它既与场有关,也与试验电荷有关,后者则反映场的特征,仅与场源电荷有关。

根据库仑定律可以得出一个点电荷 q 在离它 R 处所产生的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{q_0} \frac{qq_0\mathbf{R}}{4\pi\epsilon_0 R^3} = \frac{q\mathbf{R}}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad (1.1.3)$$

式中 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}$, 而 $\mathbf{r}'$ 是源点的位置矢量, $\mathbf{r}$ 是场点的位置矢量。由式(1.1.3)可知,电场强度与点电荷 q 成线性比例关系。于是可得出,如果已知场中某点的电场强度,又在该点置于一电荷 q , 根据式(1.1.3)可算出电荷 q 上所受到的作用力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1.1.4)$$

对于 N 个点电荷所组成的系统,在空间任一点激发的电场,可以利用力的叠加原理得到

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 R_i^3} \mathbf{R}_i \quad (1.1.5)$$

式中 $\mathbf{R}_i$ 是 q_i 到场点 $\mathbf{r}$ 处的距离矢量。可见, N 个点电荷产生的场等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场强度矢量和。这就是电场强度的叠加原理。叠加原理是假设性的,它并不能从理论本身中产生,其可靠性由实验来检验。迄今为止,在经典范围内,与我们可以达到场强下没有找到一个反例来显示出叠加原理失效。

实验表明,带电体的电荷 q 总是以电子电荷量 e 的整数倍。换句话说,电荷量不能连续地变化,只能取基本电荷量的整数倍。但在研究物体的宏观性质时,能观察到的总是大量微观粒子的平均效应,因此常用电荷连续分布的概念来代替电荷的分离性。在许多情况下,电荷是连续分布在一个体积 V 内。我们在此体积 V 内任取一个小体积元 ΔV ^①,其中所含的电荷量为 Δq 。现在取 ΔV 内的电荷 Δq 与 ΔV 之比值的极限,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad \text{或} \quad dq = \rho dV$$

称为电荷体密度。于是,根据场的叠加原理,此带电体在空间任一点产生的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}')\mathbf{R}}{R^3} dV' \quad (1.1.6)$$

式中 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}$ 是体电荷元 $\Delta q = \rho\Delta V$ 到场点 $\mathbf{r}$ 处的距离, $\mathbf{r}'$ 是它的距离矢量,方向由体电荷 Δq 指向场点。应当指出,我们在写出上式时,已应用了线性叠加原理。

虽然,电荷的真实分布是体电荷分布的,但在实际情形中会碰到电荷集中分布在靠近物体表面的一个薄层内。因此我们引入面电荷密度来描述这种电荷分布。如图 1.2 所示,设电荷分布在表面薄层 h 内,用 ΔS 表示表面上任一小面积元,电荷体密度为 ρ ,则体积元 $h\Delta S$ 内

① 所谓小体积元 ΔV 的意思是:在宏观上(实验室尺度)是小的,在微观上(原子尺度)是大的,所以它包含有很多原子或分子。