

DIANDONGLIXUE

电动力学

山东教育出版社

电动力学

广东人民出版社

华东六省一市师范大学合编教材

电 动 力 学

阚仲元 主编

山东教育出版社

1988年·济南

华东六省一市师范大学合编教材

电 动 力 学

阙仲元 主编

*

山东教育出版社出版

(济南经九路胜利大街)

山东省新华书店发行 山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

787×1092毫米32开本 11印张 228千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数 1—2,470

ISBN 7—5328—0585—9/O·11

定价 2.74元

编写说明

本书为华东地区六省一市七所师范大学物理系合编的《理论物理概论》丛书中的《电动力学》分册。它适合于高等师范院校物理系及理工科大学非理论物理专业学生阅读,也可供师范专科学校及教育学院物理专业学生选用。

根据国家教委的文件精神和高教物理教材编审委员会对教材建设提出的要求,在编写过程中,我们力求做到“浅”(深入浅出)、“广”(知识面广)、“新”(内容更新),并适当地吸取1986年全国第一届电动力学研讨会的经验,大力改革教材内容和编写风格;适当地介绍近代物理学的新发展,引入物理学史料,增加应用例题,以扩大知识面,提高读者兴趣。

本书内容共分六章:第一章电磁现象的普遍规律(8学时),第二章稳恒电磁场(8学时),第三章电磁波的传播(8学时),第四章电磁波的辐射(6学时),第五章狭义相对论原理(7学时),第六章相对论力学与电动力学(5学时)。括号中的数字表示讲授时数,共计42(不计带“*”号的非必讲的内容)学时,连同习题课合计约50学时。每章之后附有小结、思考题及习题,习题附答案。

本书经七校多次商讨,分头执笔写成。参加编写的有浙江师大杜浩(第一章)、山东师大于洛平(第二章)、福建师大郑敏中(第三章)、南京师大吴秀芳(第四章)、安徽师大李复

龄(第五章及附录)、江西师大黄长春(第六章)、上海师大阚仲元(引言),本书由阚仲元主编。

内 容 提 要

本书简明地阐述了电动力学的基本概念和基本规律，内容包括引言，电磁现象的普遍规律、稳恒电磁场、电磁波的传播、电磁波的辐射、狭义相对论原理、相对论力学与电动力学等六章，各章附有小结、习题和习题答案。

本书适合于高等师范院校物理系及理工科大学非理论物理专业学生阅读，也可供师范专科学校及教育学院物理专业学生选用。

编者 杜 浩 于洛平
郑敏中 吴秀芳
李复龄 黄长春
阎仲元

目 录

引 言	1
第一章 电磁现象的普遍规律	5
§ 1.1 电场和磁场	5
1. 电荷与电场 (5) 2. 静电场的微分方程 (8)	
3. 电流 电荷守恒定律 磁场 (10) 4. 稳定电流	
磁场的微分方程 (12)	
§ 1.2 麦克斯韦方程组	14
1. 法拉第电磁感应定律 $\mathbf{E}$ 的旋度方程的普遍形	
式 (14) 2. 麦克斯韦的位移电流假说 $\mathbf{B}$ 的旋度	
方程的普遍形式 (16) 3. 真空中的麦克斯韦方程	
组 (17) 4. 洛伦兹力公式 (19)	
§ 1.3 介质的极化和磁化	20
1. 介质中的电磁场 (20) 2. 介质的极化 极化电	
荷 极化电流 (21) 3. 介质的磁化 磁化电流	
(24)	
§ 1.4 介质中的麦克斯韦方程组	28
1. 介质中的麦克斯韦方程组 (28) 2. 介质的电磁	
性质方程 (30)	
§ 1.5 电磁场的边值关系	31
1. 场量的法向分量的边值关系 (32) 2. 场量的切	
向分量的边值关系 (34)	
§ 1.6 电磁场的能量和能流	39
1. 电磁场与带电体系的能量守恒和转换定律 (39)	

2. 电磁能量的传输 (43)	
本章小结	46
思考题	49
习 题	51
第二章 稳恒电磁场	55
§ 2.1 静电场的标势及其微分方程	55
1. 标势的微分方程 (55) 2. 静电场的能量 (62)	
§ 2.2 稳恒电流磁场的矢势及其微分方程	64
1. 磁场的矢势和规范变换 (64) 2. 矢势的微分方程 (66) 3. 磁场的能量 (67)	
§ 2.3 唯一性定理 电象法	68
1. 唯一性定理 (68) 2. 电象法 (69)	
§ 2.4 分离变量法	74
§ 2.5 势的多极展开	82
1. 电势的多极展开 (82) 2. 小区域电荷体系与外电场的相互作用能 (89) 3. 矢势的多极展开 (92)	
4. 磁偶极子与外磁场的相互作用 (96)	
§ 2.6 似稳电磁场	98
1. 似稳电磁场 (98) 2. 似稳电路方程 (101)	
本章小结	104
思考题	109
习 题	110
第三章 电磁波的传播	119
§ 3.1 均匀介质中的单色平面波	119
1. 电磁波方程 (119) 2. 单色平面波在均匀介质中的传播 (121)	
§ 3.2 单色平面波在介质分界面上的反射和折射	129
1. 反射定律和折射定律 (129) 2. 菲涅耳公式 (131)	

3.全反射 (136)	
§ 3.3 单色平面电磁波在导体中的传播	139
§ 3.4 电磁波在波导管中的传播	146
§ 3.5 信号的传递	154
1.非单色波的传播 相速度和群速度 (154) 2.频率范围和波矢范围 (157)	
* § 3.6 电磁波的衍射	160
本章小结	166
思考题	169
习题	170
第四章 电磁波的辐射	174
§ 4.1 达朗伯方程 推迟势	174
1.电磁场的矢势和标势 (174) 2.规范变换和规范不变性 (176) 3.达朗伯方程的解——推迟势 (179)	
§ 4.2 电偶极辐射	180
1.振荡电偶极子的辐射 (180) 2.小区域内低速运动电荷体系的辐射 (189)	
§ 4.3 电磁场的动量 辐射压力	194
1.电磁场的动量密度和动量流密度 (194) 2.辐射压力 (200)	
* § 4.4 电磁场对带电粒子的反作用	203
1.电磁质量 (203) 2.辐射阻尼 (206)	
* § 4.5 电磁波的散射和吸收	209
1.自由电子对电磁波的散射 (209) 2.束缚电子对电磁波的散射 (213) 3.电磁波的吸收 (214)	
本章小结	215
思考题	218
习题	218
第五章 狭义相对论原理	221

§ 5.1 伽利略变换的困难 爱因斯坦相对性原理	221
1. 伽利略变换及伽利略相对性原理 (221)	
2. 伽利略变换及其相对性原理的困难 (223)	
3. 爱因斯坦相对性原理 (225)	
§ 5.2 间隔 洛伦兹变换	227
1. 间隔 (228)	
2. 洛伦兹变换 (232)	
§ 5.3 相对论的时空理论	237
1. 同时的相对性 (237)	
2. 间隔的分类和事件的因果性 (238)	
3. 相对论的时空结构 (242)	
§ 5.4 长度的收缩和时钟的变慢	245
1. 长度的收缩 (245)	
2. 时钟的变慢 (247)	
§ 5.5 速度的变换 光行差	252
1. 速度的变换 (252)	
2. 速度方向的变换 光行差 (256)	
§ 5.6 相对论理论的四维形式	259
1. 物理量在四维空间的变换 (259)	
2. 四维速度 (263)	
* § 5.7 多普勒效应	265
本章小结	268
思考题	270
习题	273
第六章 相对论力学与电动力学	276
§ 6.1 相对论质点力学	276
1. 粒子 (276)	
2. 四维动量 (277)	
3. 相对论运动方程 (280)	
4. 质能关系 (285)	
5. 能量-动量守恒定律 (288)	
*6. 粒子的衰变与碰撞 (289)	
§ 6.2 相对论电动力学	295
1. 四维电流与连续性方程的协变性 (295)	
2. 四维势矢量及势方程的协变性 (297)	
3. 电磁场张量 (299)	

4. 麦克斯韦方程组的协变形式(301)	5. 电磁场的 变换 (304)	6. 洛伦兹力公式的协变形式 (311)
本章小结	312	
思 考 题	318	
习 题	319	
附 录	322	
一、矢量公式	322	
二、正交变换与张量	327	
三、 δ 函数	332	
四、单位制变换	334	

引 言

自然界有四种相互作用。按作用强弱的程度排列，依次是强作用、电磁作用、弱作用和引力作用。原子核中质子、中子及它们之间的相互作用是强作用。有些放射性衰变是弱作用，它们比强作用要小得多。最弱的是引力作用，它们只在天体之间或地球与地球上的物体之间才表现显著。

日常生活中最为常见的是电磁作用，它们俯拾即是。互相接触的物体之间的摩擦力及弹性力，作用于分子之间的化学力等都是电磁力。正因如此，电磁作用是人们研究得最早、了解得最为透彻的作用，结果形成了如今所见的完整的经典电动力学。经典电动力学主要研究电磁场的基本属性、它的运动规律以及它和带电粒子间的相互作用。

早期，电和磁是作为两种互相独立的现象进行探索的。1785年，库仑做了扭秤实验，确立了定量的平方反比定律——库仑定律。1813年，高斯给出了电通量的高斯定理。

奥斯特深信各种力具有统一性，经过实验研究，于1820年发现了电流的磁效应。从此，电与磁现象的研究经常联系在一起。安培得到奥斯特发现的消息后，同年做了一系列实验，创造性地发展了奥斯特实验的内容，确定了电流元相互作用的安培定律，并于1821年提出了分子电流的假说。他认为，所有的磁现象都起源于分子的圆电流。

奥斯的实验结果发表后，在欧洲科学界迅速引起了强

烈的反响，法拉第本着“磁能转化成电”的思想，从1821年起，经过10年系统的探索，终于在1831年发现了电磁感应现象，后于1851年建立了电磁感应定律。

法拉第更重要的贡献在于他提出了场的概念和力线的模型，从理论上把电磁学推向系统的、完整的电磁场理论的边缘。在他以前超距作用观点盛行，他提出了物质之间的电力和磁力是需要由媒介传递的近距离作用，这种媒介就是电场和磁场。他并用力线和力管形象地描绘了带电体、磁体或电流之间电磁力作用传递的物理模型。他的成就后来被广泛地应用于生产实践，形成了电工学的基础。

后来，麦克斯韦利用场的概念及力线模型，于1855年引入了新的矢量函数来描述电磁场，并将法拉第的物理思想表达成数学形式。1861年，他提出了统一电磁理论的两个假设，涡旋电场和位移电流。他认为，安培环路定律只有加上位移电流，才可推广到不稳定情况。1865年，他在《电磁场的动力理论》一文中，提出了表达电磁场理论的微分方程组。他认为变化的电场和磁场构成了统一的电磁场；他不仅预言了电磁波的存在，而且提出了光的电磁理论。这一理论确是物理学发展史上一个重要的里程碑。它的实验验证是由赫兹经过近10年的努力，于1888年完成的。麦克斯韦理论及赫兹实验构成了今日广泛应用与深入发展的电子科学技术的基础。

19世纪末，当经典力学、热力学统计物理学和电动力学的规律总结出来以后，人们以为物理学的发展已达到顶峰，一切基本原理都已解决，剩下的只是解方程的问题了。但是不久就出现了一系列新的实验事实，如黑体辐射与迈克耳逊-莫雷实验。后者和20世纪初一些运动介质中的电磁现象，跟

经典的时空理论存在着尖锐的矛盾。1905年，爱因斯坦独排众议，在《论动体的电动力学》一文中，创造性地提出了狭义相对论的理论，彻底地变革了旧的时空理论，奠定了近代物理学的基础。

20世纪以来，由于生产力的发展，迫切要求了解物质的微观结构，所以引起了人们研究电磁场的微观性质的兴趣，形成了量子电动力学；技术的进步对新材料，如超导体、非线性介质等的电磁性质提出了各种要求，又推动了电磁理论的进一步发展。现代科学与技术的发展总是遵循这条相互推进的道路前进的，这是历史的必然。

本书在普通物理电磁学的基础上，主要讲述宏观电动力学及狭义相对论。我们将从电磁学的各个实验定律出发，推演成为统一的电磁场理论——麦克斯韦方程组，然后用来解决各个具体问题，如静电、静磁、电磁波的传播和辐射等，再过渡到狭义相对论，以利于系统地、深入地掌握电磁现象的基本规律。

第一章 电磁现象的普遍规律

电磁场是物质存在的一种形态。与其他物质形态相比较，它有特殊的性质和运动规律，并以特定的形式与其他物质相互作用。当然，它们也有共同的一面。场的特点是它弥漫于整个空间，是作为某种空间分布而存在的。一般说来，这种分布又是随时间变化的，因此可以用两个矢量函数，电场强度 $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ 来描述体系的电磁状态。

本章是在电磁学的基础上将电磁现象的各个实验定律总结推演得出真空中电磁场的普遍规律，即 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 所满足的偏微分方程组，即麦克斯韦方程组；然后讲述有介质存在时和不同介质分界面上普遍规律的具体形式，边值关系；最后讲述电磁体系所遵循的能量守恒和转换定律。

§ 1.1 电场和磁场

1. 电荷与电场

宏观物体所带的电荷是基本电荷 e 的整数倍， e 是电子电荷，它等于 1.60×10^{-19} 库仑。

一带电体在某时刻的电荷分布，可用电荷的体密度 $\rho(\mathbf{x}, t)$ 来描述。 ρ 通常被定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}, \quad (1-1-1)$$

其中， ΔV 是包围该点的体积元， ΔQ 是 ΔV 内的总电量。不