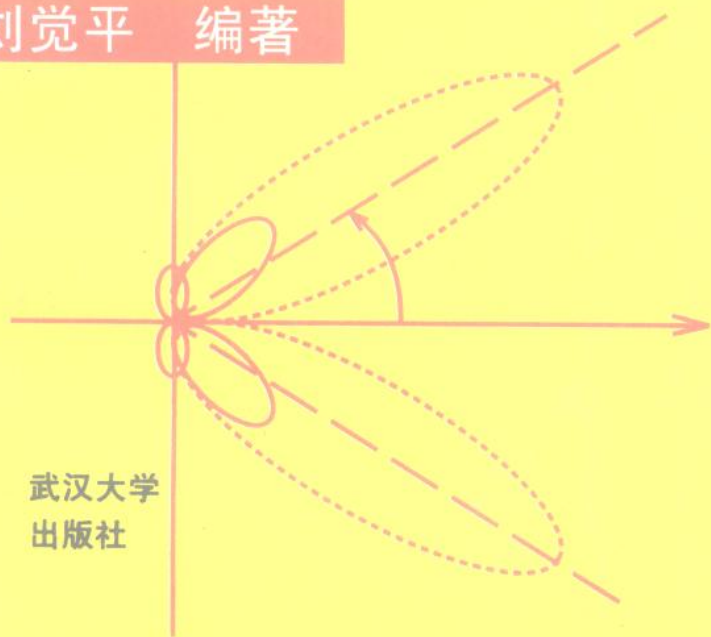


武汉大学本科生系列教材

电动力学

DIANDONGLIXUE

刘觉平 编著



武汉大学
出版社



437457

电 动 力 学

刘觉平 编著



武 汉 大 学 出 版 社

437457



图书在版编目(CIP)数据

电动力学/刘觉平编著. —武汉: 武汉大学出版社, 1997. 5
ISBN 7-307-02401-2

- I. 电…
- II. 刘…
- III. 电动力学
- IV. O442

武汉大学出版社出版

(430072 武昌 珞珈山)

湖北省毕昇印刷总厂印刷

(436700 湖北省英山县温泉镇鸡鸣路 60 号)

新华书店湖北发行所发行

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 15

字数: 383 千字 印数: 1—2000

ISBN 7-307-02401-2/O · 178 · 定价: 14.50 元

本书如有印装质量问题, 请寄印刷厂调换

DULS2/02

内 容 提 要

本书系统地讲述了真空与介质中的经典电动力学的理论体系(包括基本概念、原理与方法)和实际应用。全书内容包括:张量运算,狭义相对论,电磁相互作用的普遍规律,恒场、似稳场与迅变场的运动规律,电磁波的传播、辐射、散射和衍射,以及电磁场对带电粒子的作用。

本书可作为理工科大学和高等师范院校各物理专业、无线电技术专业以及相近的物理类专业的教材或参考书,也可供研究生、教师和科研工作者参考。



前 言

到目前为止,已发现自然界存在电磁、弱、强与引力四大相互作用。其中,理解得最透彻的是电磁相互作用的规律。这种相互作用规律的经典部分称之为电动力学。它不仅是进一步学习量子电动力学的基础,而且与宏观物理现象乃至于国民经济的联系非常紧密,使得其本身至今仍处于蓬勃发展的进程之中。因此,学习与掌握电动力学对于大学物理专业的学生是非常重要的。本书的目的便是为此而提供一本合适的理论物理教材。

学习本书的前提是学生已掌握普通物理学特别是电磁学的基本内容,因而学生已在如何总结实验事实、提炼出物理概念、归纳成物理规律方面受到了较为充分的训练。另一方面,近代物理的发展进程证明:根据以往的实践基础,从物理世界的第一性原理包括各种对称性、自洽性的要求(如洛伦兹协变性、规范不变性等)等(它建立在大量实践的基础上)出发,剔除不合理的部分,挑选出合理部分,形成新的理论,提出新的预言,并由实验来进行检验,也是研究、探索物理规律的一种方法,这便是理论物理学的研究方法。这一方法在物理学的发展进程中起过并正在发挥其重要作用。在学生学完普通物理学之后,进行这后一种研究方法的训练,对于全面提高(理工科)学生分析问题、解决问题能力来说,是十分必要的。而电动力学作为一门理论体系相当成熟的学科,是对学生进行理论物理学研究方法训练的最好场所。

基于上述考虑,我们一反目前一些电动力学教材的流行作法,将狭义相对论、规范不变性与从分析力学中总结出来的最小作用量原理提到首要地位。因为正如朗道所述,一个全面的、在逻辑上连贯而严谨的电磁相互作用理论,自然应

以狭义相对论作为讨论的基础。另一方面,电磁场作用下的带电粒子的运动方程——洛伦兹力公式与在外源作用下的电磁场的运动方程——麦克斯韦方程组将作为上述提到的第一性原理的结果而出现。因而,本书理论的叙述方式与朗道的体系类似(参见朗道:场论,中译本,1959年)。所不同的是:我们不限于真空中的电动力学,并采用了经典场理论的一般描述。同时,为了拓宽本书的适用面,我们采用了尽可能简捷的叙述方式;在严密性和简明性不可兼顾的某些情形下,我们将简明的叙述方式附加其中以供教师选用。

在取材上,本书只选取了那些最基本、最重要的内容;同时,对某些教科书上一笔带过、但实际上又比较重要的论题进一步进行展开分析,以加深学生对基本概念的正确理解以及加强运用基本的理论分析方法解决实际问题的能力。此外,本书还对某些结论进行了推广,并使某些结果的表述更加简明,物理意义更加明显。为了使学生的数学计算能力与理论物理基础的学习齐头并进,本书还介绍了三维欧氏空间与闵可夫斯基空间中的张量运算知识。

本书虽然是在武汉大学物理系试验班四届试讲的讲义的基础上修改补充而写成的,但仍觉时间仓促,加之水平有限,错误及疏漏之处在所难免,恳请读者扶正。

最后,特别要指出的是:刘福庆、虞国寅等参与了教材大纲及内容取舍方面的讨论,提出了许多宝贵意见,武汉大学教务处、物理系及武汉大学出版社对本书的出版给予了多方面的支持,李桂芳女士花了很多时间进行计算机文字输入,在此一并表示衷心感谢。

刘觉平

1997年3月于珞珈山麓

目 录

前 言	1
第一章 三维欧氏空间中的张量	1
§1.1 正交坐标系的转动	1
§1.2 物理量在空间转动变换下的分类	4
§1.3 物理量在空间反演变换下的进一步分类	6
§1.4 张量代数	12
§1.5 张量分析	15
§1.6 亥姆霍兹定理	20
§1.7 正交曲线坐标系	23
§1.8 正交曲线坐标系中的微分运算	25
第二章 狭义相对论	28
§2.1 相对性原理	28
§2.2 寻找绝对参照系的实验	32
Michelson-Morley 实验	32
Fizeau 实验	34
恒星光行差的观测	36
§2.3 光速不变原理	39
§2.4 特殊洛伦兹变换	40
§2.5 闵可夫斯基四维时空	44
1. 事件的时空间隔	44
2. 洛伦兹变换	45

3 闵可夫斯基时空中的张量	49
§2.6 狭义相对论的时空观念	55
1. 时空间隔的分类	55
2. 因果律	57
3. 洛伦兹收缩	59
4. 爱因斯坦延缓	60
§2.7 相对论运动学	62
1. 速度变换	62
2. 相继的特殊洛伦兹变换与 Thomas 进动	65
3. 加速度变换	68
4. 多普勒频移	69
5. 延迟效应	71
(a) 观看运动的钟	71
(b) 观看运动的物体	72
§2.8 相对论粒子动力学	78
1. 四维速度和四维加速度	78
2. 点粒子的自由运动	79
3. 点粒子的多普勒效应与轨道偏差	83
4. 点粒子在外力作用下的运动	84
5. 多粒子系统运动学	86
 第三章 电磁相互作用的基本规律	92
§3.1 带电粒子在电磁场中的运动规律	92
1. 在电磁场中运动的带电粒子的作用量	92
2. 带电粒子在电磁场中的运动方程	94
§3.2 电磁场在外源作用下的运动规律	97
1. 电磁场与源的相互作用量的普遍形式	97
2. 自由电磁场的作用量	98
3. 在外源作用下电磁场的运动方程	100
§3.3 电磁场的能动张量定理	104
1. 场的正则能动张量	104

2. 电磁场的能动张量	105
§3.4 电磁场的角动量张量定理	110
1. 场的正则角动量张量	110
2. 电磁场的角动量张量	112
§3.5 介质中的麦克斯韦方程组	117
1. 介质中电荷的运动规律	117
(1) 介质的极化	117
(2) 介质的磁化	119
(3) 介质中自由电荷的传导	121
2. 静止介质中的麦克斯韦方程组	122
3. 运动介质中的麦克斯韦方程组	127
4. 介质的电磁性质方程	131
§3.6 介质中电磁场能动量与角动量定理	136
1. 介质中电磁场的能量定理	136
2. 介质中电磁场的动量定理	137
3. 介质中电磁场的角动量定理	137
§3.7 麦克斯韦方程组的完备性	139
§3.8 波动方程	140
第四章 恒定电磁场	145
§4.1 恒定场的基本方程	145
1. 恒场条件	145
2. 静电场基本方程	146
3. 稳恒电流体系的基本方程	148
稳恒电流体系的静电场	148
稳恒电流体系的磁场	149
(a) 磁标势法	152
(b) 二维稳恒电流体系	153
(c) 旋转对称的三维电流体系	154
§4.2 恒定场的能量	156
§4.3 恒定场唯一性定理	158
§4.4 导体静电叠加原理与静电屏蔽效应	160

§4.5 导体系电容与电势系数和相互作用能	161
§4.6 导体系静电平衡条件与静电体系稳定性	165
§4.7 格林定理与格林互易定理	166
§4.8 作用在导体面上的电场力	168
§4.9 恒定场的多极展开	171
1 电势的多极展开	171
2 电场强度的多极展开	175
3 电荷体系与外场的相互作用能的多极展开	177
4 二维电荷分布的电势的多极展开	180
5 静磁矢势的多极展开	181
6 电流体系与外场的相互作用能的多极展开	185
7 局域电流分布在外场所受的力与力矩	187

第五章 恒定场边值问题的解法

§5.1 镜像法	192
1 格林等效层定理	192
2 镜像法及实例分析	194
导体平面镜像问题	194
导体球面镜像问题	196
导体柱面镜像问题	199
电介质镜像问题	200
§5.2 分离变量法	203
1 拉普拉斯方程的通解	203
(1) 球坐标系中的通解	204
(2) 柱坐标系中的通解	204
(3) 直角坐标系中的通解	205
2 分离变量法实例分析	206
均匀外场中的电介质球	206
均匀外场中的导体柱	208
均匀外场中的磁介质球壳	209
均匀带电的旋转薄导体球壳	211
§5.3 保角变换法	215

1 平面恒定场的复势	215
2 保角变换法及实例分析	217
长直线电荷的复势	218
不等势的两导体半柱壳	219
§5.4 格林函数法	220
1 泊松方程边值问题的形式解	220
2 格林函数的常用求法	224
(a) 镜像法	224
(b) 本征函数展开法	225
矩形区域内的格林函数	225
(c) 分离变量法	226
两球壳间区域中的格林函数	227
两接地导体平面间的格林函数	229
(d) 保角变换法	231
二维圆内的格林函数	232
第六章 似稳场	236
§6.1 似稳近似	236
§6.2 似稳场方程	237
§6.3 似稳电路(电工学)方程	239
§6.4 趋肤效应	240
半无穷空间导体中的趋肤效应	240
圆柱形导体中的趋肤效应	241
§6.5 导体的高频内阻抗	244
第七章 电磁波的传播	247
§7.1 定态电磁波	247
介质有耗与无耗的判别条件	250
无耗介质的介电常数与磁导率	251
§7.2 绝缘介质中的平面电磁波	252
§7.3 平面电磁波的偏振	254
§7.4 导电介质中的平面电磁波	256

§7.5 绝缘介质界面上的平面电磁波	261
1. 反射折射定律	263
2. 振幅关系	263
3. 反射系数与透射系数	265
4. 反射波与折射波的偏振状态	266
5. 相位关系	267
§7.6 全反射	269
1. 全反射发生的条件	269
2. 折射波	269
3. 反射波	270
4. 第二种介质中能流密度	272
§7.7 电磁波在导体面上的反射与折射	274
1. 导电介质中的折射波	274
2. 导电介质表面上的反射波	278
 第八章 波导与谐振腔	 283
§8.1 波导管中场的运动规律	283
§8.2 矩形波导	287
§8.3 圆柱形波导	290
§8.4 波导中的能量传输与损耗	294
波导中的功率传输	294
波导中的能量损耗	296
§8.5 谐振腔	299
矩形谐振腔	299
圆柱形谐振腔	301
§8.6 谐振腔的品质因素	303
§8.7 同轴传输线	306
导波的一般形式	306
主波	307
主波的功率传输与衰减	309
电报方程	310

§8.8 电介质波导	312
第九章 多极辐射	317
§9.1 推迟势	317
§9.2 单色场的矢势表示	321
§9.3 推迟势的多极展开	323
§9.4 电偶极辐射	328
§9.5 磁偶极辐射与电四极辐射	334
1. 磁偶极与电四极辐射势	334
2. 磁偶极辐射场	336
3. 电四极辐射场	337
§9.6 线型天线辐射	341
§9.7 天线阵	345
第十章 运动带电粒子的场及其辐射	348
§10.1 李纳-维谢尔势	348
§10.2 运动电荷的场的普遍形式	351
§10.3 运动电荷的自有场	354
§10.4 运动电荷的辐射场	357
§10.5 低速运动电荷的辐射	360
§10.6 韧致辐射与直线加速辐射	362
§10.7 同步辐射	364
§10.8 辐射的频谱分析	366
§10.9 低速韧致辐射频谱	369
§10.10 同步辐射频谱	371
§10.11 切伦柯夫辐射	376
第十一章 电磁场对带电粒子的作用	380
§11.1 电磁质量	380
§11.2 辐射阻尼	382
辐射阻尼力的相对论形式	385

§11.3 谐振电荷辐射谱线的自然宽度	386
§11.4 稀薄介质中的色散	389
§11.5 稠密介质中的色散	395
有极分子的转向极化效应	397
§11.6 金属导体中的色散	399
§11.7 等离子体中的色散	401
§11.8 外磁场下等离子中的双折射	405
§11.9 法拉第磁致旋光效应	408
 第十二章 电磁波的散射与吸收	 412
§12.1 汤姆逊散射	412
§12.2 束缚电子对电磁波的散射	415
§12.3 束缚电子对电磁波的吸收	418
§12.4 电荷体系对电磁波的散射	421
§12.5 宏观物体对电磁波的散射	423
电介质球散射	426
§12.6 光学定理	428
 第十三章 电磁波的衍射	 432
§13.1 基尔霍夫衍射理论	432
1. 基尔霍夫积分公式	432
2. 惠更斯-菲涅耳原理	434
3. 可逆定理与巴俾涅原理	436
§13.2 小孔衍射	437
圆孔的夫琅和费衍射	440
§13.3 基尔霍夫积分公式的矢量形式	441
§13.4 薄导体屏上的小孔衍射	444
薄导体屏小圆孔衍射	446
§13.5 巴俾涅原理的矢量形式	448
§13.6 晶体对电磁波的衍射	451

附录A	455
A1. 几种常用的正交曲线坐标系	455
A2. 单位制换算及主要公式转换	458
A3. 有关的物理学常数	461
参考文献	1

第一章 三维欧氏空间中的张量

张量代数与分析是电动力学的数学基础。本章先叙述三维欧氏空间中的张量在空间转动与反演变换下的变换性质与分类, 然后讲述张量代数运算与分析运算的基本规律, 最后介绍关于矢量场的亥姆霍兹定理以及在曲线坐标系中的矢量运算。

§1.1 正交坐标系的转动

在三维空间中由交于一点 O 且不共面的三条射线(坐标轴) x_i ($i = 1, 2, 3$) 构成一个坐标系 S 。若 x_i 轴的方向矢量为 e_i , 则当 $e_i \cdot e_j = \delta_{ij}$ 时, 称 S 为正交坐标系。若 $e_1 \cdot (e_2 \times e_3) > 0$, 称 S 为右旋坐标系; 若 $e_1 \cdot (e_2 \times e_3) < 0$, 则称 S 为左旋坐标系。

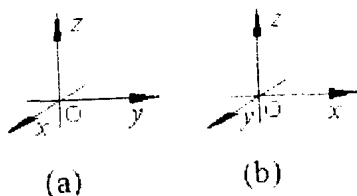


图1.1 坐标系: (a) 右旋; (b) 左旋

三维空间中的点 P 由它在正交坐标系 S (为确定起见, 设它是右旋系) 中的三个坐标 (x_1, x_2, x_3) 确定。现将 S 绕 O 点作一有限转动, 得到另一新的正交右旋系 S' , P 点在 S' 中的坐标为 (x'_1, x'_2, x'_3) 。在欧氏空间中, 这两组坐标满足线性关系

$$x'_i = a_{ij} x_j, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.1)$$

式中一对重复指标 j 表示从1到3求和

$$a_{ij} x_j \equiv \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_j, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.2)$$

方程或关系式中的这种重复指标称为一对哑指标。哑指标必须成对；每对哑指标可以改用其它字母表示；但不同对的哑指标必须使用不同的字母，以免混淆。在方程的某一边或关系式中不成对的指标，如式(1.1)中的 i ，称为显指标。显指标不可随意更换，且方程两边的显指标必须相同。

在欧氏空间中，O、P 两点之间的距离 L

$$L = \sqrt{x^2}, \quad x^2 = x_i x_i \quad (1.3)$$

与坐标系 S 的转动无关，故

$$x'^2 = x^2 \quad (1.4)$$

由此得

$$a_{ij} a_{ik} = \delta_{jk} \quad (1.5)$$

写成矩阵形式即

$$a^T a = I \quad (1.6)$$

式中 I 是 3×3 单位矩阵， a^T 表示矩阵 a 的转置。可见三维转动变换矩阵 a 是正交矩阵，即 $a^T = a^{-1}$ 。因而

$$a a^T = I \quad (1.7)$$

写成分量形式有

$$a_j, a_{ki} = \delta_{jk} \quad (1.8)$$

进而，矢径 OP 的大小与方向都与坐标系 S 的转动无关

$$x'_i e'_i = x_i e_i \quad (1.9)$$

式中 e_i 与 e'_i 分别是坐标系 S 与 S' 的相应坐标轴的方向矢量。由此易知

$$e_j = e'_i a_{ij} \quad (1.10)$$

写成矩阵形式即

$$e^T = e'^T a \quad (1.11)$$

对上式取转置并左乘 a 得

$$e' = a e \quad (1.12)$$