

电磁场理论解题方法

【美】 马库斯·赞恩 著

吕维尧 罗澄侯 译

王尔杰 审

人民邮电出版社

ELECTROMAGNETIC
FIELD THEORY:
a problem solving approach

1979

Markus Zahn

John Wiley & Sons

内 容 提 要

本书是美国佛罗里达大学电气工程课程的导论。它从点电荷的库仑—洛仑兹力定律开始,通过大量的实例,简明地由浅入深地阐述了电磁场和电磁波的基本理论及其计算方法,重点在解题方法上。本书是一本把基本电磁场理论的简要描述与大量的题解结合起来的书。

全书共分九章,包括矢量分析复习、电场、极化与导电、电场的边值问题、磁场、电磁感应、电动力学、导行电磁波以及辐射。每章都有许多例题和习题。

本书可作为高等院校理工科学生的参考书,也可供电视大学、业余大学和函授学院有关专业的教师和学生以及广大科技人员阅读参考。

电 磁 场 理 论 解 题 方 法

[美] 马库斯·赞恩 著

吕继尧 罗澄侯 译

王尔杰 审

责任编辑:梁素梅

•
人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 销

•
开本: 850×1168 1/32

1987年10月第一版

印张: 26 4/32 页数: 418

1987年10月河北第一次印刷

字数: 685 千字 插页: 8

印数: 1—4 200册

统一书号: 15045·总3212—无6375

定价: 6.40元

序 言

在电气工程的全部课程中，电磁场理论常常是一门最不通俗的课程。由于过多地依赖矢量和积分的计算，会掩盖其物理现象，使学生陷入到数学演算的困境中，而忽视其应用。本书通过讲授大量的实例逐步引入求解问题的技巧。为了使本书的主题具有吸引力，对其中的大多数问题以物理的过程、装置和模型为基础。

本书是一本从点电荷库仑—洛伦兹力定律开始讲述的导论，可供两个学期的电气工程课程使用。本书讲述方法是通过先引入较简单习题的解答，不断积累和深化，来扩展电磁场理论，并引导到普遍的场的积分和微分定律。由于常常用不同的方法求解相同的问题，所以每种方法的优点与缺点都一目了然。对于每个新概念，尤其是象极化、导电性和磁化这些物理现象的经典模型，都给出典型例题及其解答。为充实讲述内容的大量习题，放在每章的后面，作为练习和课外作业。

我们认为，学生已学过基础微积分学，他们不难对简单函数作微分和积分运算。对于具有线性常系数微分和差分方程系统的一般描述，本书将作严密而简明的数学推导。

本书基本上可分为三个主要课题：(1)在忽略磁场的情况下，作为电场源的电荷与极化和导电媒质的相互关系；(2)作为磁场源的电流与磁化媒质和产生电场的电磁感应之间相互关系；(3)电动力学，在其中电场和磁场具有同等的重要性而产生辐射波。我们将尽可能在不同范围内检验电动力学的解答，以阐明前面导出的准静态电路近似理论的适用性。

马库斯·赞恩

目 录

第1章 矢量分析复习	(1)
1-1 坐标系	(1)
1-1-1 直角坐标	(1)
1-1-2 圆柱坐标	(4)
1-1-3 球坐标	(7)
1-2 矢量代数	(7)
1-2-1 标量和矢量	(7)
1-2-2 标量与矢量相乘	(8)
1-2-3 矢量的加法与减法	(8)
1-2-4 矢量的标积	(11)
1-2-5 矢量的矢积	(13)
1-3 梯度和 ∇ 算子	(16)
1-3-1 梯度	(16)
1-3-2 曲线坐标	(17)
(a)圆柱坐标	(17)
(b)球坐标	(18)
1-3-3 线积分	(19)
1-4 通量和散度	(22)
1-4-1 通量	(22)
1-4-2 散度	(24)
1-4-3 曲线坐标	(25)
(a)圆柱坐标	(25)
(b)球坐标	(26)
1-4-4 散度定理	(28)

1-5 旋度和斯托克斯定理	(30)
1-5-1 旋度	(30)
1-5-2 曲线坐标的旋度	(33)
(a) 圆柱坐标	(34)
(b) 球坐标	(36)
1-5-3 斯托克斯定理	(39)
1-5-4 一些有用的矢量恒等式	(41)
(a) 梯度的旋度为零 $[\nabla \times (\nabla f) = 0]$	(42)
(b) 矢量的旋度的散度为零 $[\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0]$	(42)
习题	(43)
第2章 电场	(55)
2-1 电荷	(55)
2-1-1 接触起电	(55)
2-1-2 静电感应	(57)
2-1-3 法拉第“冰桶”实验	(58)
2-2 静电电荷间的库仑力定律	(60)
2-2-1 库仑定律	(60)
2-2-2 单位	(61)
2-2-3 电场	(62)
2-2-4 迭加	(62)
2-3 电荷分布	(65)
2-3-1 线、面和体电荷分布	(66)
2-3-2 由分布电荷产生的电场	(69)
2-3-3 无限长线电荷产生的电场	(70)
2-3-4 由具有面电荷的无限大薄层产生的电场	(70)
(a) 单一薄层	(70)
(b) 带有异号电荷的平行薄层	(73)
(c) 均匀带电体	(74)
2-3-5 圆环线电荷的迭加	(75)

(a) 单个圆环	(75)
(b) 带面电荷的圆盘	(75)
(c) 带面电荷的空心圆柱	(77)
(d) 带体电荷的圆柱	(78)
2-4 高斯定律	(79)
2-4-1 两点间矢量距离 r_{QP} 的性质	(79)
(a) r_{QP}	(79)
(b) 距离的倒数的梯度, $\nabla(1/r_{QP})$	(80)
(c) 距离的倒数的拉普拉斯	(80)
2-4-2 积分形式的高斯定律	(81)
(a) 封闭体积内部或外部的点电荷	(81)
(b) 分布电荷	(83)
2-4-3 球对称	(83)
(a) 面电荷	(83)
(b) 体分布电荷	(86)
2-4-4 柱对称	(89)
(a) 带面电荷的空心圆柱	(89)
(b) 带体电荷的圆柱	(89)
2-4-5 高斯定律和散度定理	(90)
2-4-6 薄层面电荷两侧电场的 discontinuity	(90)
2-5 电位	(91)
2-5-1 移动点电荷所需要的功	(92)
2-5-2 电场与斯托克斯定理	(93)
2-5-3 电位和电场	(94)
2-5-4 有限长的线电荷	(95)
2-5-5 带电球	(98)
(a) 面电荷	(98)
(b) 体电荷	(99)
(c) 两个球	(100)

2-5-6	泊松方程和拉普拉斯方程	(102)
2-6	线电荷与圆柱的镜象法	(102)
2-6-1	两平行线电荷	(102)
2-6-2	镜象法	(105)
	(a)一般性质	(105)
	(b)导电平面附近的线电荷	(106)
2-6-3	线电荷与圆柱	(107)
2-6-4	双导线	(107)
	(a)镜象电荷	(107)
	(b)吸引力	(110)
	(c)单位长度的电容	(111)
2-7	点电荷和球的镜象法	(113)
2-7-1	点电荷和接地的球	(113)
2-7-2	接地平面附近的点电荷	(117)
2-7-3	具有恒定电荷的球	(120)
2-7-4	恒定电压球	(121)
习题		(121)
第3章	极化与导电	(151)
3-1	极化	(151)
3-1-1	电偶极子	(152)
3-1-2	极化电荷	(156)
3-1-3	电位移场	(158)
3-1-4	线性介质	(158)
	(a)极化率	(159)
	(b)局部电场	(160)
3-1-5	自发极化	(165)
	(a)铁电体	(165)
	(b)驻极(电介)体	(167)
3-2	导电	(168)

3-2-1	电荷守恒	(168)
3-2-2	带电气体导电模型	(171)
	(a)遵循的方程式	(171)
	(b)漂移-扩散导电	(172)
	(c)欧姆定律	(176)
	(d)超导体	(178)
3-3	场的边界条件	(179)
3-3-1	E 的切向分量	(179)
3-3-2	D 的法线分量	(180)
3-3-3	在介质边界上面的点电荷	(181)
3-3-4	P 和 $\epsilon_0 E$ 的法线分量	(183)
3-3-5	J 的法线分量	(186)
3-4	电阻	(186)
3-4-1	两极板间的电阻	(186)
3-4-2	平行板电阻器	(188)
3-4-3	同轴电阻器	(190)
3-4-4	球形电阻器	(191)
3-5	电容	(191)
3-5-1	平行极板	(191)
3-5-2	任意几何形状物体的电容	(195)
3-5-3	流过电容器的电流	(196)
3-5-4	两个接触球体的电容	(197)
3-6	有耗媒质	(200)
3-6-1	暂态的电荷弛豫	(201)
3-6-2	均匀带电的球体	(202)
3-6-3	有耗的串联电容器	(204)
	(a)充电瞬变过程	(204)
	(b)开路	(207)
	(c)短路	(207)

(d) 正弦稳态.....	(208)
3-6-4 分布系统	(210)
(a) 所遵守的方程式	(210)
(b) 稳态	(212)
(c) 瞬态解	(212)
3-6-5 对流的影响	(215)
3-6-6 作为有漏孔的球形电容器的地球和它的大气 层.....	(216)
3-7 场与空间电荷分布的关系	(219)
3-7-1 空间电荷限制的真空二极管	(219)
3-7-2 介质中限制导电的空间电荷	(223)
3-8 介质中贮存的能量	(226)
3-8-1 集合点电荷分布所需要的功	(226)
(a) 集合电荷	(226)
(b) 晶体的结合能	(227)
3-8-2 形成连续电荷分布所需的功	(229)
3-8-3 电场的能量密度	(231)
3-8-4 带电球中贮存的能量	(233)
(a) 体电荷.....	(233)
(b) 面电荷.....	(233)
(c) 原子的结合能	(234)
3-8-5 电容器中贮存的能量	(235)
3-9 场和它的力	(237)
3-9-1 作用于薄层面电荷每单位面积上的力	(237)
3-9-2 作用于极化媒质上的力	(240)
(a) 力密度.....	(240)
(b) 永久极化的媒质.....	(240)
(c) 线性极化的媒质	(243)
3-9-3 作用于电容器上的力	(243)

(a) 流体介质	(245)
(b) 固体介质	(247)
3-10 静电发电机	(248)
3-10-1 范·德·格拉夫起电机	(248)
3-10-2 自激式静电感应起电机	(249)
3-10-3 自激的三相交流电压	(252)
3-10-4 自激式多频率发电机	(254)
习题	(256)
第4章 电场的边值问题	(289)
4-1 唯一性定理	(289)
4-2 直角几何形状的边值问题	(291)
4-2-1 分离变量	(291)
4-2-2 零分离常数解	(292)
(a) 双曲线电极	(292)
(b) 在开口匣内的电阻器	(293)
4-2-3 非零的分离常数解	(296)
4-2-4 空间的周期性激励	(297)
4-2-5 矩形谐波函数	(299)
4-2-6 三维解	(301)
4-3 圆柱形中变量的分离	(303)
4-3-1 极坐标的解	(304)
4-3-2 均匀电场中的圆柱	(306)
(a) 电场的解	(306)
(b) 电力线的描绘	(310)
4-3-3 三维解	(311)
4-3-4 高压绝缘套管	(316)
4-4 球形几何形状的乘积解	(318)
4-4-1 一维解	(319)
4-4-2 轴对称解	(320)

4-4-3	均匀电场中的导体球	(322)
	(a)电场的解	(322)
	(b)电力线的描绘	(324)
4-4-4	带电粒子降落在球面上	(325)
4-5	数值法—逐次张弛法	(332)
4-5-1	有限差分展开式	(332)
4-5-2	方形盒内的电位	(334)
习题		(337)
第5章	磁场	(349)
5-1	作用于运动电荷上的力	(349)
5-1-1	洛伦兹力定律	(349)
5-1-2	均匀磁场中电荷的运动	(351)
5-1-3	质谱仪	(353)
5-1-4	回旋加速器	(354)
5-1-5	霍尔效应	(356)
5-2	由电流产生的磁场	(358)
5-2-1	毕奥—萨伐尔定律	(358)
5-2-2	线电流	(359)
5-2-3	电流层	(361)
	(a)单层面电流	(361)
	(b)具有体电流的平板	(363)
	(c)两平行的电流层	(364)
5-2-4	线电流圆环	(366)
	(a)单一圆环	(366)
	(b)双圆环〔亥姆霍兹线圈〕	(367)
	(c)具有电流的空心圆柱	(368)
5-3	磁场的散度和旋度	(368)
5-3-1	磁场的高斯定律	(369)
5-3-2	安培环路定律	(370)

5-3-3	具有圆柱对称的电流	(372)
	(a) 面电流	(372)
	(b) 体电流	(373)
5-4	矢位	(374)
5-4-1	唯一性	(374)
5-4-2	分布电流的矢位	(375)
5-4-3	矢位和磁通	(376)
	(a) 有限长的线电流	(376)
	(b) 宽度有限的面电流	(380)
	(c) 穿过方形环的通量	(381)
5-5	磁化	(383)
5-5-1	磁偶极子	(383)
5-5-2	磁化电流	(385)
5-5-3	磁性材料	(389)
	(a) 反磁性	(389)
	(b) 顺磁性	(393)
	(c) 铁磁体	(397)
5-6	边界条件	(400)
5-6-1	H 的切向分量	(401)
5-6-2	M 的切向分量	(401)
5-6-3	B 的法线分量	(402)
5-7	磁场的边值问题	(403)
5-7-1	镜象法	(403)
5-7-2	均匀磁场中的球体	(405)
5-8	磁场与力	(410)
5-8-1	可磁化的媒质	(410)
5-8-2	作用于电流环上的力	(413)
	(a) 仅有洛伦兹力的情况	(413)
	(b) 仅有磁化力的情况	(414)

(c) 有洛伦兹力和磁化力的情况.....	(418)
习题	(420)
第 6 章 电磁感应	(441)
6-1 法拉第感应定律	(441)
6-1-1 电动势(EMF).....	(441)
6-1-2 洛伦兹定律	(443)
(a) 短路环.....	(444)
(b) 开路环.....	(447)
(c) 反作用力	(448)
6-1-3 迭片结构	(449)
6-1-4 电子感应加速器	(451)
6-1-5 法拉第定律和斯托克斯定理	(453)
6-2 磁路	(455)
6-2-1 自感	(455)
6-2-2 磁阻	(459)
(a) 串联的磁阻	(459)
(b) 并联的磁阻	(461)
6-2-3 变压器效应	(461)
(a) 电压不是唯一的	(461)
(b) 理想变压器	(463)
(c) 实际变压器	(466)
6-3 运动媒质的法拉第定律	(468)
6-3-1 电场的变换	(468)
6-3-2 运动导体的欧姆定律	(468)
6-3-3 法拉第圆盘(单极发电机)	(471)
(a) 外加磁场的发电机	(471)
(b) 自激发电机	(474)
(c) 自激式发电机的交流工作	(475)
(d) 电动机速度周期性地变换方向	(477)

6-3-4	基本的电动机和发电机	(479)
(a)	交流发电机	(479)
(b)	直流发电机	(480)
6-3-5	磁流体发电机	(482)
6-3-6	伴谬	(483)
(a)	一种没有换向器的直流发电机	(483)
(b)	由开关通断引起的磁通的变化	(485)
(c)	线圈匝数随时间的变化	(486)
6-4	欧姆导体中的磁扩散	(488)
6-4-1	电阻器-电感器模型	(488)
6-4-2	磁扩散方程式	(490)
6-4-3	不运动 ($U=0$) 的瞬态解	(491)
6-4-4	正弦稳态 (趋肤深度)	(496)
6-4-5	对流效应	(499)
6-4-6	一种线性的感应发电机	(502)
6-4-7	超导体	(506)
6-5	磁场中贮存的能量	(508)
6-5-1	单个电流环	(508)
(a)	电功	(508)
(b)	机械功	(509)
6-5-2	能量与电感	(510)
6-5-3	电流分布	(511)
6-5-4	磁能密度	(512)
6-5-5	同轴电缆	(513)
(a)	外电感	(513)
(b)	内电感	(514)
6-5-6	自感、电容和电阻	(516)
6-6	求力的能量方法	(517)
6-6-1	虚功原理	(517)

6-6-2	电路观点	(519)
6-6-3	磁化力	(522)
习题		(524)
第7章	电动力学—场与波	(549)
7-1	麦克斯韦方程	(549)
7-1-1	位移电流对安培定律的修正	(549)
7-1-2	作为准静态近似的电路理论	(551)
7-2	能量守恒	(551)
7-2-1	坡印廷定理	(551)
7-2-2	有耗电容器	(553)
7-2-3	电路中的功率	(554)
7-2-4	复数坡印廷定理	(556)
7-3	横电磁波	(559)
7-3-1	平面波	(559)
7-3-2	波动方程	(560)
	(a) 解答	(560)
	(b) 特性	(563)
7-3-3	平面波的源	(565)
7-3-4	相对论简介	(568)
7-4	正弦时变场	(570)
7-4-1	频率和波数	(570)
7-4-2	多普勒频移	(572)
7-4-3	欧姆损耗	(574)
	(a) 低损耗极限	(575)
	(b) 高损耗极限	(576)
7-4-4	高频波在媒质中的传播	(576)
7-4-5	色散媒质	(579)
7-4-6	极化	(582)
	(a) 线极化	(583)

(b)圆极化.....	(584)
7-4-7 各向异性媒质中波的传播	(585)
(a)起偏振镜	(585)
(b)双折射(二次光折射)	(586)
7-5 理想导体上的垂直入射	(588)
7-6 介质上的垂直入射	(590)
7-6-1 无耗介质	(590)
7-6-2 功率通量的时间平均值	(592)
7-6-3 有耗介质	(593)
(a)低损耗.....	(594)
(b)高损耗.....	(594)
7-7 均匀平面波和非均匀平面波	(598)
7-7-1 以任意角度传播	(598)
7-7-2 复传播常数	(600)
7-7-3 非均匀平面波	(603)
7-8 理想导体上的斜入射	(604)
7-8-1 平行于交界面的E场	(604)
7-8-2 平行于交界面的H场	(607)
7-9 介质上的斜入射	(609)
7-9-1 E平行于交界面	(609)
7-9-2 无反射情况的布鲁斯特角	(613)
7-9-3 透射的临界角	(613)
7-9-4 平行于边界的H场	(615)
7-10 光学上的应用.....	(617)
7-10-1 镜子的反射.....	(618)
7-10-2 光线的侧向移动.....	(618)
7-10-3 反射引起的偏振.....	(619)
7-10-4 光在水中的传播.....	(620)
(a)浸在水下的光源.....	(620)

(b) 船下的鱼	(621)
7-10-5 全反射棱镜	(622)
7-10-6 纤维光学	(624)
(a) 直光导管	(624)
(b) 弯纤维	(625)
习题	(626)
第 8 章 导行电磁波	(644)
8-1 传输线方程	(644)
8-1-1 平行板传输线	(644)
8-1-2 一般传输线的结构	(647)
8-1-3 分布参数电路表示法	(653)
8-1-4 功率通量	(655)
8-1-5 波动方程	(657)
8-2 传输线的瞬态波	(658)
8-2-1 无限长传输线上的瞬变过程	(658)
8-2-2 由电阻性终端反射	(660)
(a) 反射系数	(660)
(b) 阶跃电压	(662)
8-2-3 趋近于直流稳态	(665)
8-2-4 电感器和电容器作为传输线的准静态近似	(671)
8-2-5 由任意终端反射	(673)
8-3 正弦时间变化	(676)
8-3-1 传输线方程的解	(676)
8-3-2 无耗终端	(677)
(a) 短路线	(677)
(b) 开路线	(681)
8-3-3 电抗性电路元件作为对短路传输线的近似	(683)
8-3-4 传输线损耗的影响	(685)
(a) 分布参数电路的方法	(685)