

研究生教学用书  
教育部研究生工作办公室推荐

# 微波与光电子学中的电磁理论

(第二版)

Electromagnetic Theory for  
Microwaves and Optoelectronics

张克潜 李德杰 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

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,翻版必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

微波与光电子学中的电磁理论/张克潜,李德杰著.-2版.-北京:电子工业出版社,  
2001.5

研究生教学用书 教育部研究生工作办公室推荐  
ISBN 7-5053-6677-7

I. 微… II. ①张… ②李… III. 电磁理论-研究-研究生-教材 IV. 0441  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 052124 号

丛 书 名: 研究生教学用书 教育部研究生工作办公室推荐

书 名: 微波与光电子学中的电磁理论(第二版)

著 者: 张克潜 李德杰

责任编辑: 陈晓莉

特约编辑: 李双庆

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 河北省涿州桃园装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×960 1/16 印张:44.25 插页:1 页 字数:1062 千字

版 次: 2001 年 5 月第 2 版 2001 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6677-7  
TN·1449

印 数: 2 050 册 定价: 68.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店  
调换;若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

## 孟昭英先生序

自从远古以来,人们就对静磁与静电有了初步的定性认识,但是一直到 19 世纪初才由几位物理大师把这些知识置于深入的定量的基础之上。尽管如此,磁与电仍是两个并行的互不关联的学科。19 世纪 60 年代麦克斯韦发现当他试图把电与磁的已知定律归并在一起时其中有不合理的互相矛盾部分。是他创造性地引入了位移电流的新概念才铲除了不自洽的地方。这样就形成了有名的麦克斯韦方程,奠定了电磁波理论的基础。从此,人们知道电与磁不再是并行而互不关联的概念,而是事物本身的两个方面。麦克斯韦不但把电与磁融为一体,他还证明光乃是电磁波的一部分。电磁波包括了从所谓的“超长波”到长波、中波、短波、超短波、米波、分米波、厘米波、毫米波、远红外光、红外光、可见光、紫外光以至 X 射线、 $\gamma$  射线等这一大电磁波家族。它们的频率从几十赫延展到  $10^{20}$  赫,是物理量中范围延伸得最广的一个。

赫兹的实验证实了电磁波的存在并测定了它的一些性质,他用的是超短波段的阻尼波。但在 20 世纪初最先得到应用的则是长波。以后的几十年中科学家们一方面在无线电波的范围从较长的波长向更短的波长拓展,另一方面又在光波的范围从可见光分别向长和短的波长延伸。现在可以说电磁波中的无线电波和光波这两大部分已在远红外波段会师,从而把整个电磁波谱连接起来了。

本书将要涉及的是电磁波家族里的微波段和光波段的一部分。所谓微波就是波长从米到毫米量级的一段,也就是无线电波中波长最短的一段。微波在二次世界大战以前就由少数科学家涉猎过,到了二次世界大战期间由于在雷达中的应用而得到飞跃发展,战后转而用于通信、工业及科学研究,技术日臻成熟,近年已发展到毫米波及亚毫米波段,与光学范围的远红外波段相连接。书中所涉及的光波段主要是近十几年来迅速发展的用于信息传输的波段,其波长在微米量级,属于近红外范围。这一段电磁波在 60 年代后期半导体激光器及光学纤维相继问世之后才被人们重视和研究。

为什么微波和光波这样诱人呢?原因是它们能载负甚大的信息量。任何信息都需要一定的频带。信息越复杂,如活动的图像,就需要越宽的频带。载负信息的载波的频率又必须是被载信息频带的许多倍,所以载负更多的信息量就必须采用非常高的频率,即波长更短的电磁波。

微波与光波的另一个优点是它们的传播特性。我们可以把它的波束很容易地约束在一个很窄的方向,从而避免了互相干扰。同时可以用适当的波导实现低损

耗远距离传输。

以上的特性使得微波和光波非常适合于现代信息量爆炸的社会需要,所以它们得以蓬勃发展,形成微波学与光波学或称微波与光电子学这样的前沿学科。

微波与光波同属电磁波,它们的行为和特性有许多相同或相通之处,分析方法亦互相借鉴。然而,以往微波和光学分属两大学科,迄今尚缺少将二者紧密结合,引导初学者进入这个研究领域的专著。国内外电动力学或电磁理论书籍不少,但多只为此方面打下一个初步基础的,读后尚难于直接参阅前沿科研论文及从事进一步研究。克潜和德杰的这本《微波与光电子学中的电磁理论》正好满足了这个需要。我们看到,本书既给出了电磁场与波的基础理论和相关的数学知识,使读者站稳第一步;同时所讨论的微波与光波的各个方面又相当深入、详尽。在给出规矩的数学分析的同时,对每个问题的物理概念作了清楚、生动的描述。学习了这些知识就能相当顺利地阅读与这些问题有关的现代文献,掌握进行这方面科学研究的基本概念和分析方法,进而达到“登堂入室”的境地。作者经过多年的教学及研究实践,提炼出其中的精华,形成了这百万余言的著作,它是一本颇有特色的电动力学方面的专著。我为此书的完稿与出版深感庆幸,也为将进行这方面研究的读者和相邻学科的读者能有这样一本教科书或参考书而庆幸。

孟昭英

1994年于清华园

## 第二版序

本书第一版于1994年11月出版以后,已被多所高等学校及研究院、所采用作为教材、教学参考书或科研参考书。该书曾获国家科技进步三等奖,国家级优秀教学成果二等奖,电子工业部科技进步一等奖,电子信息类优秀教材一等奖。

本书英文版“Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics”于1998年由Springer出版社出版,在全世界发行。

本书于2000年10月被教育部研究生工作办公室推荐为“教育部研究生教学用书”,并组织再版。

趁再版的机会,将本书作了一次认真的修订。本次修订的主要内容是:

1. 改正了原书中的错误及疏漏。
2. 改写了第1.4.3节“色散媒质中的坡印廷定理”。
3. 删去原书1.7节部分内容,只保留对偶定理和互易定理作为1.7和1.8节。
4. 删去原书中涉及静电场的第2章,使全书更集中于电磁波问题。
5. 将原第2章中有关电磁场问题求解中的数学知识移至第4章的相关小节中。
6. 将原第3章“电磁波基础”分为两章,即现在的第2章“电磁波基础”和第3章“电磁波的传输线模拟和网络模拟”。若读者已学习过传输线理论和网络理论,则可跳过第3章,从第2章直接进入第4章。
7. 将“电磁波的阻抗变换和微波或光学涂层”一节移至第2章末尾,放在第3章传输线和网络理论的前面。
8. 删去了7.9节“模式耦合”中关于时间模式耦合的内容,直接介绍空间模式耦合。
9. 对第1.2、3.3、5.5、5.7、6.2、6.6、8.7、8.10等节作了较大的修改。
10. 增加了第9.9节“光学谐振腔”和第10.9节“高斯波束在介质表面的反射和折射”。

本书第一版出版以后,承蒙海内外多位专家、学者赐予推荐和评价,同时指出书中不少错误及不当之处,特别是恩师林为干先生为本书写了书评,在此深表谢忱。在教学过程中,学习本书的研究生与作者经常进行热烈的讨论,提出许多有益的建议和改正意见。一些外校的学生也通过各种方式提出过不少意见和建议。在此一并表示感谢。电子工业出版社精心组织本书第一、二版的出版,吴金生副社长和陈晓莉编辑作了认真细致的编辑工作,为本书的顺利出版奠定了基础。

虽经修订,但错误及疏漏仍然在所难免,望读者不吝赐教、指正。

张克潜 李德杰

2001年2月

## 第一版序

本书是根据作者在清华大学讲授研究生课程“高等电动力学”的手稿写成的。十余年来选修该课的研究生约计 250 人。他们分别来自电子工程系和物理系,研究方向均属物理电子学与光电子学及微波领域,包括微波与毫米波技术,微波电子学,微波声学,激光与光电子学,导波光学与集成光学,电子离子光学,薄膜物理与技术,表面物理与表面分析技术以及加速器物理与工程等。正如书名所示,本书的取材及举例主要集中在微波与光电子学中的电磁问题。本书的性质是物理电子学与光电子学学科的研究生基础课教材,但从事相近领域研究工作的研究生或科技工作者也可将本书作为一本中级电磁理论的参考书。

本书的主要目的是在本科电动力学的基础上将研究生的电磁理论水平提高一步,使读者达到能够较顺利地阅读有关的现代文献及从事应用基础性研究。本书的特点是对电磁场与波的属性及其各种形态作了比较广泛的论述,它们属于应用在多种不同技术领域的场与波问题。其目的是使读者获得较广泛和较全面的知识而不仅局限于其研究课题所涉及的狭窄范围,以收融会贯通和触类旁通之效。作者认为知识的必要的广度同深度一样,对于培养研究工作者的创造性都是十分重要的。

考虑到选修本课的研究生及本书的读者将会来自不同的专业,具有不尽相同的知识背景,因此书中包括了一部分大学本科高年级课程的内容,特别是“微波技术”和“物理光学”中的内容。凡在大学本科阶段学习过上述课程的读者可将这些章节略去或仅作复习参考之用。读者只需学过大学本科水平的“电动力学”或“电磁场理论”及“高等数学”中的矢量分析、复变函数、线性代数、数理方程及特殊函数等内容,则阅读本书的基础就具备了。

第 1 章至第 4 章是全书的基础,包括电磁理论的基本定律——第 1 章,电磁波的基本规律——第 3 章,以及相关的数学知识——第 2 章、第 4 章。在第 2 章中除给出所需的数学工具外,还较系统地介绍了静态场问题的解析求解方法,这部分内容对某些研究方向是重要的,同时在近似分析某些微波或光电子器件中的场时也是有帮助的,即所谓“准静态法”。在第 3 章中除均匀平面波的基础知识外,还介绍了电磁波的传输线模拟和网络模拟,它们都是分析电磁波系统的有力工具,即所谓“等效电路法”,由此所引出的概念对理解波动系统的物理过程也是有帮助的。这些方法与概念主要是在微波研究中发展起来的,但现已越来越多地用于光波、声波

等广泛领域。

第5章至第7章的内容属于在有边界限制情况下电磁波传播的规律和各种形态,即导波系统或传输系统。按边界类型分为导体边界——第5章,介质边界——第6章和周期性边界——第7章。在这三章中按理论体系分门别类地剖析了微波与光电子学中及其他相近领域中涉及的多种导波系统。将散见于各种书籍、文献中的,用不同方法处理的导波问题统一用“博格尼斯位函数法”进行分析求解,力求前后呼应,脉络清楚,望能有助于读者理解和掌握。

模式耦合理论本应独立成章,但因全书篇幅所限,只能作初步介绍,故将它与周期系统合为第7章。

第8章及第9章的内容承接第3章,属于电磁波在无边界限制情况下的传播规律和各种形态。第8章叙述电磁波在色散媒质和各向异性媒质中的传播;第9章介绍高斯波束在空间的传播。这些都是现代微波技术与光波技术中越来越多地涉及的问题。此外,在第8章中还介绍了两种非麦克斯韦波,它们不是基于电场与磁场之间相互作用而形成的,即空间电荷波和静磁波。它们只是众多的非麦克斯韦波的两个例子,希望能帮助读者涉猎更广泛的波动领域。受篇幅的限制,对它们的论述只能是初步的。

第10章的内容是标量衍射理论。除一般的平面波标量衍射外,还探讨了高斯波束的衍射问题和各向异性媒质中的衍射问题,这是光电子学中的重要课题。矢量衍射理论非本书篇幅所能容纳,书中未予涉及。因此,这一章主要适用于光电子学或光波技术中的衍射问题,即波长远小于障碍物线尺寸的情况。

电磁理论中还有许多重要论题,如辐射理论,非线性理论,导波系统不均匀性分析,变截面导波系统,相对论电动力学,电磁场的数值解法等在本书中都未能涉及。这是受本书的性质、对象、篇幅及作者知识范围所限。一个人学得越多就越知道自己已经学习和掌握的知识与尚未学习和尚未掌握的知识相比只是沧海一粟。古语云“学然后知不足”,信哉。

电磁理论及其应用的中外著作浩如烟海。书后列出的参考书目是写作本书时曾经参阅过的书籍、文献和作者认为值得推荐给读者的参考书。

本书第1章至第8章由张克潜执笔,第9、10两章由李德杰执笔,最后由张克潜总成全书。

在本书酝酿和写作的漫长过程中,曾与作者所在的清华大学电子工程系电子物理教研组的许多同事一起研习、切磋,获益匪浅。清华大学电机工程系宫莲教授校对了大部分书稿。电子物理与器件教材编审组组长、东南大学杨祥林教授,责任编委、浙江大学周文教授及编审组全体委员对本书提出了许多有益的建议。北京大学徐承和教授认真审阅了书稿并提出许多中肯的、有价值的意见和建议。电子工业出版社吴金生副社长及有关人员为本书的编辑、出版做了出色的工作。在此

一并表示感谢。

40年前,在清华大学,故业师常迥教授讲授“电波学”,业师孟昭英教授讲授“微波技术”,并开创微波电子学研究工作,引导作者及作者所在的教研组入场与波的领域,并为其后的发展打下了基础。在本书成书之际,作者深切怀念先师常迥教授。作者愿将此书献给孟昭英教授以表敬意。

作者于清华大学  
1994年10月



## 符号一览表

$A$	复数值	} ①任意矢量函数 ②矢量位
$\mathcal{A}$	瞬时值	
$A$	① $A$ 的分量 ②常数	
$\mathcal{A}$	$\mathcal{A}$ 的分量	
$B$	复数值	} ①任意矢量函数
$\mathcal{B}$	瞬时值	
$B$	① $B$ 的分量 ②常数	
$\mathcal{B}$	$\mathcal{B}$ 的分量	
$C$	①电容 ②常数	
$c$	真空中的光速	
$A, B, C, D$	转移矩阵参量	
$a, b, c, d$	①归一化转移矩阵参量 ②尺寸 ③常数	
$D$	复数值	} 电感应强度或电位移矢量
$\mathcal{D}$	瞬时值	
$D$	① $D$ 的分量 ②常数	
$\mathcal{D}$	$\mathcal{D}$ 的分量	
$E$	复数值	} 电场强度矢量
$\mathcal{E}$	瞬时值	
$E$	$E$ 的分量	
$\mathcal{E}$	$\mathcal{E}$ 的分量	
$e$	自然对数的底	
$e$	电子电量	
$F$	复数值	} ①力 ②附加矢量函数
$\mathcal{F}$	瞬时值	
$F$	$F$ 的分量	} 或附加标量函数
$\mathcal{F}$	$\mathcal{F}$ 的分量	
$f$	①任意标量函数 ②频率	
$G$	标量格林函数	
$g$	任意标量函数	

$H$	复数值	} 磁场强度矢量
$\mathcal{H}$	瞬时值	
$H$	$H$ 的分量	
$\mathcal{H}$	$\mathcal{H}$ 的分量	
$h_1, h_2, h_3$	拉梅系数	
$I$	电流	
$J$	电流密度	
$j$	$\sqrt{-1}$	
$k$	波矢	
$k$	波矢的分量, 相位系数, 角波数	
$l$	长度, 曲线	
$dl$	线元	
$d\mathbf{l}$	线元矢量	
$l, m, n, p$	正整数, 模式号, 函数的阶	
$M$	复数值	} 磁化强度矢量
$\mathcal{M}$	瞬时值	
$M$	$M$ 的分量	
$\mathcal{M}$	$\mathcal{M}$ 的分量	
$m$	磁偶极矩	
$n$	法向单位矢量	
$n$	折射率	
$P$	复数值	} 极化强度矢量
$\mathcal{P}$	瞬时值	
$P$	① $P$ 的分量 ② 功率	
$\mathcal{P}$	$\mathcal{P}$ 的分量	
$p$	电偶极矩	
$p$	① 功率密度 ② $p$ 的分量	
$J, N, I, K, H, P, Q$	贝塞尔函数及勒让德函数	
$q$	电荷电量	
$r, R$	距离, 半径	
$S$	坡印廷矢量	
$S$	① 面积, 曲面 ② 散射矩阵参量	
$dS$	面元	
$d\mathbf{S}$	面元矢量	
$t$	时间	

$T$	①周期 ②横向坐标 ③横向本征值
$u_1, u_2, u_3$	④传输矩阵参量
$v$	任意曲坐标
$V$	速度, $v_p$ 相速, $v_g$ 群速, $v_e$ 能速, $v_s$ 信号速度
$dV$	体积
$w$	体元
$W$	①能量密度 ②复函数
$x, y, z$	能量
$\mathbf{x}$	矩坐标
$X, Y, Z$	坐标矢量
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	矩坐标中分离变量函数
$Y$	矩坐标单位矢量
$y$	导纳, 导纳矩阵参量
$Z$	归一化导纳, 归一化导纳矩阵参量
$z$	阻抗, 阻抗矩阵参量
希腊字母	①归一化阻抗, 归一化阻抗矩阵参量 ②复函数
$\alpha$	①角度 ②衰减系数
$\beta$	①角度 ②相位系数
$\gamma$	①角度 ②传播系数 ③旋磁比
$\delta$	① $\delta$ 函数 ②穿透深度
$\epsilon$	介电率
$\zeta, \eta, \xi$	任意坐标
$\eta$	波阻抗
$\theta$	角度
$\theta_B$	布儒斯特角
$\theta_C$	临界角
$\kappa$	耦合系数
$\lambda$	波长
$\lambda_c$	临界波长
$\lambda_g$	导波波长
$\mu$	磁导率

$\nu$	函数的非整数阶数
$\pi$	圆周率
$\pi$	赫兹矢量瞬时值
$\rho$	电荷密度
$\rho, \phi, z$	圆柱坐标
$\hat{\rho}, \hat{\phi}, \hat{z}$	圆柱坐标单位矢量
$r, \theta, \phi$	球坐标
$\hat{r}, \hat{\theta}, \hat{\phi}$	球坐标单位矢量
$\sigma$	电导率
$\tau$	横向本征值
$\varphi$	①任意标量函数 ②电位
$\chi$	极化率或磁化率
$\psi$	任意标量函数
$\omega$	角频率
$\Gamma$	反射系数
$R, \Theta, \Phi,$	球坐标分离变量函数
$R, \Phi, Z,$	圆柱坐标分离变量函数
$\Pi$	赫兹矢量复数值
$\Pi$	$\Pi$ 的分量
$\Omega$	立体角

# 目 录

<b>第 1 章 宏观电磁理论的基本定律</b> .....	( 1 )
1.1 麦克斯韦方程 .....	( 1 )
1.1.1 基本的麦克斯韦方程 .....	( 1 )
1.1.2 媒质的极化与磁化,媒质中的麦克斯韦方程 .....	( 4 )
1.1.3 复数麦克斯韦方程 .....	( 12 )
1.1.4 色散媒质,复数介电率与复数磁导率 .....	( 14 )
1.1.5 等效磁荷与等效磁流,电磁场的对偶性 .....	( 16 )
1.2 边界条件方程 .....	( 17 )
1.3 波动方程 .....	( 21 )
1.3.1 简单媒质中瞬时值形式的波动方程——时域波动方程 .....	( 21 )
1.3.2 无源波动方程的时域解,电磁场的波动性 .....	( 23 )
1.3.3 复数形式的波动方程——频域波动方程 .....	( 27 )
1.4 坡印廷定理 .....	( 28 )
1.4.1 瞬时值的坡印廷定理 .....	( 29 )
1.4.2 复数坡印廷定理 .....	( 31 )
1.4.3 色散媒质中的坡印廷定理 .....	( 34 )
1.5 电磁场的位函数 .....	( 38 )
1.5.1 动态位,达朗伯方程 .....	( 38 )
1.5.2 达朗伯方程的解,滞后位 .....	( 41 )
1.5.3 复数达朗伯方程,简谐滞后位 .....	( 44 )
1.6 赫兹矢量 .....	( 45 )
1.7 对偶定理 .....	( 48 )
1.8 互易定理 .....	( 50 )
习题 1 .....	( 51 )
<b>第 2 章 电磁波基础</b> .....	( 53 )
2.1 简谐均匀平面电磁波 .....	( 53 )
2.1.1 不导电媒质中的均匀平面波 .....	( 53 )
2.1.2 沿任意方向传播的均匀平面波 .....	( 57 )
2.1.3 均匀平面波的能流与能量 .....	( 59 )
2.1.4 有损媒质中的平面波,电磁波的衰减 .....	( 60 )
2.2 电磁波的偏振 .....	( 65 )
2.2.1 两个线偏振波合成任意偏振态的波 .....	( 65 )

2.2.2	琼斯矩阵	(70)
2.2.3	两个圆偏振波合成任意偏振态的波	(70)
2.2.4	斯托克斯参数和邦加球	(71)
2.2.5	单色波和多色波,完全偏振波,部分偏振波和非偏振波	(72)
2.3	电磁波的反射与透射	(73)
2.3.1	斯奈尔定律,电磁波的方向关系	(74)
2.3.2	菲涅尔定律,电磁波复数振幅的关系	(76)
2.3.3	电磁波垂直入射于理想导体表面	(81)
2.3.4	电磁波垂直入射于一般媒质界面	(84)
2.3.5	电磁波斜入射于理想导体表面	(86)
2.3.6	布儒斯特角,全偏振	(90)
2.3.7	临界角,全反射	(91)
2.3.8	渐消场和表面波	(93)
2.3.9	介质界面反射系数的模和角及偏振态变化	(97)
2.3.10	电磁波在导电媒质界面的反射和透射	(99)
2.4	电磁波的阻抗变换和微波或光学涂层	(102)
2.4.1	电磁波反射系数和阻抗的变换	(103)
2.4.2	四分之一波长阻抗变换器及四分之一波长微波或光学涂层	(104)
2.4.3	多层四分之一波长微波或光学涂层	(104)
2.4.4	交替变化折射指数多层微波或光学涂层	(105)
	习题 2	(107)
<b>第 3 章</b>	<b>电磁波的传输线模拟和网络模拟</b>	<b>(110)</b>
3.1	电磁波的传输线模拟	(110)
3.1.1	电报方程及其解	(111)
3.1.2	无损传输线上的反射、驻波及阻抗	(114)
3.1.3	传输线圆图	(122)
3.1.4	电磁波系统的等效传输线	(126)
3.2	电磁波的网络模拟	(128)
3.2.1	线性多口网络的网络矩阵和网络参量	(128)
3.2.2	网络矩阵的性质	(134)
3.2.3	双口网络	(138)
3.2.4	基本电路元件的网络参数	(147)
3.3	阻抗变换器的网络理论	(155)
3.3.1	单介质层的两个界面,单节阻抗变换器	(155)
3.3.2	双介质层,二节阻抗变换器	(158)
3.3.3	多层介质及多节阻抗变换器的设计问题	(160)
3.3.4	小反射理论	(166)
	习题 3	(171)

<b>第 4 章 亥姆霍兹方程的边值问题</b> .....	(173)
4.1 时变场问题的惟一性定理 .....	(173)
4.1.1 混合问题的惟一性定理 .....	(174)
4.1.2 亥姆霍兹方程边值问题的惟一性定理 .....	(175)
4.1.3 分区求解亥姆霍兹方程的边值问题的惟一性定理 .....	(177)
4.2 正交坐标系中矢量亥姆霍兹方程的求解 .....	(179)
4.2.1 正交坐标系 .....	(179)
4.2.2 博格尼斯函数法 .....	(182)
4.2.3 赫兹矢量法 .....	(187)
4.2.4 纵向分量法 .....	(188)
4.3 博格尼斯函数的边界条件 .....	(191)
4.4 分离变量法 .....	(192)
4.5 柱形系统中的电磁波 .....	(194)
4.6 矩坐标系中标量亥姆霍兹方程的解 .....	(197)
4.6.1 以 $z$ 作为 $u_3$ .....	(198)
4.6.2 以 $x$ 或 $y$ 作为 $u_3$ .....	(201)
4.7 圆柱坐标系中标量亥姆霍兹方程的解 .....	(202)
4.8 球坐标系中标量亥姆霍兹方程的解 .....	(206)
4.9 矢量本征函数和正态模式 .....	(213)
4.9.1 本征值问题和正交函数展开 .....	(213)
4.9.2 矢量亥姆霍兹方程边值问题的本征值 .....	(216)
4.9.3 矢量本征函数的正交性及正交展开 .....	(218)
4.10 亥姆霍兹方程复杂边值问题的近似解 .....	(220)
4.10.1 本征值的变分原理 .....	(221)
4.10.2 近似边界条件 .....	(223)
习题 4 .....	(226)
<b>第 5 章 金属波导与谐振腔</b> .....	(228)
5.1 金属波导的一般特性 .....	(228)
5.1.1 金属波导的传播特性 .....	(229)
5.1.2 金属波导的波阻抗 .....	(231)
5.1.3 金属波导中的功率流 .....	(232)
5.1.4 金属波导中电磁波的衰减 .....	(234)
5.1.5 非柱形波导 .....	(236)
5.1.6 金属波导中的导波模和截止模 .....	(236)
5.2 谐振腔的一般特性 .....	(237)
5.2.1 谐振腔的固有频率和能量平衡 .....	(237)
5.2.2 谐振腔的损耗,品质因数 .....	(238)

5.3 矩坐标系的波导与谐振腔 .....	(239)
5.3.1 矩形波导 .....	(239)
5.3.2 双平板传输线 .....	(247)
5.3.3 矩形谐振腔 .....	(250)
5.4 圆柱坐标系的波导与谐振腔 .....	(254)
5.4.1 扇形截面柱谐振腔 .....	(254)
5.4.2 扇形截面波导 .....	(258)
5.4.3 同轴线及同轴谐振腔 .....	(259)
5.4.4 圆波导及圆柱谐振腔 .....	(266)
5.4.5 柱面喇叭波导和渐开双平板传输线 .....	(271)
5.4.6 径向传输线及径向线谐振腔 .....	(274)
5.5 球坐标系的波导与谐振腔 .....	(277)
5.5.1 球形谐振腔 .....	(277)
5.5.2 双锥传输线与双锥谐振腔 .....	(281)
5.6 重入谐振腔,复杂边界条件问题 .....	(284)
5.6.1 重入谐振腔的严格解 .....	(286)
5.6.2 重入谐振腔的近似解 .....	(289)
5.7 微扰原理 .....	(293)
5.7.1 谐振腔的导体微扰 .....	(293)
5.7.2 谐振腔的介质微扰 .....	(296)
5.7.3 波导临界频率的微扰 .....	(299)
5.7.4 波导传播系数的微扰 .....	(300)
习题 5 .....	(301)
<b>第 6 章 介质波导与介质谐振器 .....</b>	<b>(304)</b>
6.1 充填不同媒质的金属波导 .....	(305)
6.1.1 充填不同媒质的金属波导中可能存在的模式 .....	(306)
6.1.2 充填不同媒质的金属波导中的 $TE^{(z)}$ 模及 $TM^{(z)}$ 模 .....	(309)
6.2 对称平面介质波导 .....	(314)
6.2.1 TM 模 .....	(314)
6.2.2 TE 模 .....	(317)
6.2.3 对称平面介质波导的传播特性 .....	(318)
6.2.4 对称平面介质波导中的场分布 .....	(322)
6.2.5 对称平面介质波导中的主模 .....	(322)
6.2.6 弱导介质波导的概念 .....	(325)
6.3 敷介质导体板和介质镜像波导 .....	(326)
6.4 非对称平面介质波导 .....	(327)
6.4.1 非对称平面介质波导的 TM 模 .....	(328)



6.4.2	非对称平面介质波导的 TE 模	(329)
6.4.3	非对称平面介质波导的传播特性	(331)
6.4.4	非对称平面介质波导的电磁场	(333)
6.5	条形介质波导	(334)
6.6	圆截面介质波导和阶跃折射指数光纤	(338)
6.6.1	圆介质波导的场解及本征方程	(339)
6.6.2	圆介质波导的 TE 模和 TM 模	(345)
6.6.3	非磁性电介质圆波导	(351)
6.6.4	弱导光纤	(358)
6.6.5	弱导光纤中的线偏振模	(361)
6.6.6	圆介质波导的主模	(364)
6.6.7	低损耗光纤	(365)
6.7	敷介质圆导体棒	(366)
6.8	介质谐振器	(369)
6.8.1	圆柱介质谐振器的开路壁(磁壁)近似求解	(369)
6.8.2	截止波导法近似求解	(373)
6.8.3	截止波导 - 截止径向线法	(375)
6.8.4	实际介质谐振器	(377)
	习题 6	(379)
<b>第 7 章</b>	<b>慢波与周期系统, 模式耦合</b>	<b>(382)</b>
7.1	慢波系统的主要特性	(382)
7.2	平板折皱表面结构作为均匀系统	(384)
7.2.1	开敞结构	(384)
7.2.2	封闭结构, 带盖板的折皱结构	(386)
7.3	盘荷波导作为均匀系统	(387)
7.3.1	带中心孔的盘荷波导	(387)
7.3.2	边缘孔盘荷波导	(390)
7.4	周期系统	(392)
7.4.1	周期系统中的空间谐波, 弗洛奎定理	(392)
7.4.2	周期系统的色散特性, 布里渊图	(396)
7.4.3	耦合谐振腔链	(398)
7.4.4	周期系统中场分布的特点	(400)
7.4.5	关于无损周期系统的两个定理	(402)
7.4.6	周期系统的耦合阻抗	(402)
7.5	平板折皱表面结构作为周期系统	(403)
7.6	盘荷波导作为周期系统	(406)
7.7	螺旋线	(410)