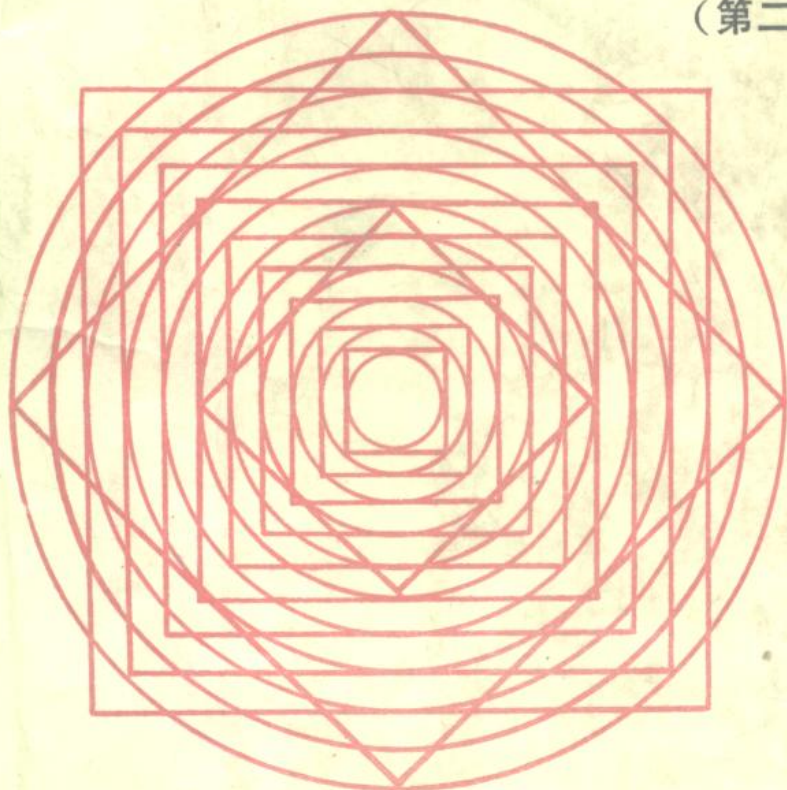


黄志洵 Huang Zhixun

AN INTRODUCTION TO THE
THEORY OF WAVEGUIDE
BELOW CUTOFF

截止波导理论导论

(第二版)



CHINA METROLOGY PRESS

中国计量出版社

截止波导理论导论

(第二版)

黄志洵

中国计量出版社

内 容 提 要

本书比较全面地论述了截止波导理论。书中总结了几十年来国内、外有关截止波导理论的许多研究成果，其中包括了本书作者在这方面的若干研究工作和独立见解，在内容上比初版本有很大充实。

本书分为六篇：1. 导波传播的基本理论；2. 特征方程法；3. 表面理论；4. 等效电路法和特殊波方法；5. 截止波导的工程理论；6. 截止波导理论与实践的新发展。书末还附有详尽的参考文献总目录。

为了使大学生、研究生、技术人员能充分利用本书，除大量理论公式外，书中还有许多联系工程技术实际情况计的算例题。

本书适于从事超高频及微波技术的工程技术人员及广大计量工作者阅读，同时也可作为高等院校高年级学生和研究生的参考书。

截止波导理论导论

(第二版)

黄志洵 著

责任编辑 王朋植

—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—

开本 850×1168/32 印张 19.75 字数 504 千字

1991 年 3 月第 1 版 1991 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1200

ISBN 7-5026-0249-X/TB·204

定价 18.00 元

“自然之书是用数学语言写成的”

——伽利略

(G. Galilei, 1564~1642)

“一个人如喜欢没有理论的实践，他就象水手上船而没有舵和罗盘，永远不知驶向何方。

理论好比统帅，实践则是战士。”

——达·芬奇

(L. da Vinci, 1452~1519)

“理论的最重要品质是提出研究新领域”

——汤姆孙

(J. J. Thomson, 1856~1940)

序

科学理论的发展离不开实践。理论的模型总是通过某种线索，与可观测现象联系起来。理论联系实际的这种特色，在“截止波导理论”中表现得更加明显。这也说明了，为什么“截止波导理论”在计量学中占有特别重要的地位。

对波导而言，当工作波长超过截止波长时，波导中存在着按指数律迅速减弱的场。这种状态称为非传播波，或“消失波”。用微波电路的语言来说，这是一种电抗性的场。有关传输波导理论的书籍，国内外都已有不少专著出版。但在截止波导理论方面，尚未见出版过一本有系统的论著。黄志洵副教授多年来在截止波导方面素有研究，他将自己的研究成果和心得，结合国内外有关的经典论述，写成《截止波导理论导论》一书，颇有独到之处。对微波理论与技术来说，这本书的出版弥补了一个空白，将对大学生、研究生和有关的工程技术人员有所裨益。

上海科学技术大学 黄宏嘉

附：本书初版本出版后，中国科学院学部委员黄宏嘉教授写给作者的诗——

“谢黄志洵君赠其所著《截止波导理论导论》：

一年容易去如斯，	理论形成赖实践，
喜读华章岁末时。	格言摘录引芬奇。
波欲静兮场不息，	学术交流同进步，
词称截止堪深思。	新书一卷谢君贻。

辛酉岁末，黄宏嘉”。！

再 版 前 言

各类导波系统形式，不仅是能量和信息的载体和传递工具，而且是构成各种高频、微波元件和仪器的基础。如果说，19世纪的基本导波方式是平行双导线和同轴线的话，那么在20世纪70年代以前所使用的主要导波系统是：金属壁圆波导、金属壁矩形波导、脊波导、椭圆波导、单线表面波波导（Goubau线）、微带线、介质波导。然而，近二十年来各种新的导波形式还在不断涌现，工作频域从射频到光频，材料常常是金属和电介质二者兼备，横截面尺寸从微米级到米级。例如，矩形同轴线、屏蔽的微带线、横电磁波传输室（TEM Cell）、T形波导、鳍线（fin line）、光导纤维……，这些进展已是上世纪人们（即使是伟大的科学家）很难想象的了。

与此同时，数学方法也在发展。1946年发明电子数字计算机以后，极大地刺激了求解各种结构的势头，这也是百年前的人们无法想象的。例如，Laplace方程是在18世纪时，在研究行星引力、重力问题时出现的，大数学家L. Euler曾说：“不知道该怎么解”这个方程。现在，我们当然掌握了几种解法。例如，把二阶偏微分方程化为三个常微分方程的分离变数法，其主要优点是可得解析解，缺点是只对少数简单形状（棒、柱、板）的导波系统有效。又如，根据位势理论与复变函数理论的联系，Laplace方程可由保角变换转到新的区域中求解，而新区域里问题被简化。保角变换的理论基础是关于解析函数的定义和域间变换函数的存在定理——Cauchy • Riemann条件，实质上是把复杂边界

形状问题转化为简单边界形状问题。

一般说，两个和两个以上导体组成的导波系统，其性质是非本征值问题。由单一导体（单导线、各种形状的金属管子）构成的导波系统，其性质是本征值问题。对于本征值问题，无疑，如果只求导波系统主模的最小非零本征值，那么这种情况使求泛函极值的问题与求解导波系统紧密联系起来。所谓变分法以及有限元法，其应用的条件是：待解微分方程必须有相应的泛函。可以证明，无论波导横截面形状如何，泛函存在性是不成问题的。

有限元法（FEM）是1959年由J. Greensfadt提出基本思想、1960年由R.W. Clough命名的方法，用于力学上很成功，后来被用来解电磁场问题。其运用包括几何剖分、分片插值、单元分析、总体合成这样几个步骤，使微分方程的本征值问题离散化为代数本征值问题。

然而，在此之前，有限差分法（把微分方程变为差分方程）无论对非本征值问题或本征值问题均有许多成功应用的实例。它的局限在于：在Taylor公式不成立时（如导体角处电位是奇异的），有限差分法不能用。多数人推崇有限元法比有限差分法好：边界的处理更细致，区域的剖分更灵活。但这也不是绝对的。人们早就知道，有限差分法能很好地处理形状特异的波导（如T形波导）的本征值问题。

有限元法在运用时一定要先建立泛函，如泛函不存在就麻烦了。因此，近年来又出现了新的**边界元法**（BEM），它在本质上是把边界积分方程离散化；其特点是积分仅在边界上进行，因而降低了求解问题的维数。

很显然，如企图写作一本书，既论述了各种导波系统形式，又介绍了各种数学方法，那么将可能需要百万字以上的宏大篇幅。本书所承担的并不是这样的任务。感谢中国计量出版社给作者出版修订本的机会，但如何选择内容就应该仔细考虑。本书目前把重点放在导波传播的一般理论、特征方程法、表面理论、等效电路法、量子分析法、消失模原理、截止波导工程理论、几项

新发展这八个方面。既展示了导波系统理论的一些壮丽图景；又紧扣主题，并讲述作者自己的贡献，从而使本书具有鲜明的特色。

分析导波系统的主要理论是波动理论，也叫模式理论。此外，还有所谓射线理论。不能认为一根射线就等于一个模式，一组射线的迭加才与模式相对应。大约 100 年前，赫兹用锌板证明了电磁波和光一样，遵守反射定律。这个实验是射线理论的开端。微波的重要特性之一就是能被金属所反射。L.Brillouin 于 1936 年用射线曲折前进的观点解释了微波在矩形金属壁波导中的传输，波在矩形波导窄壁之间来回反射、按曲折路线前进，射线的每一个入射角都对应一定的波长。当入射的射线与壁间夹角为 90° 时，波停止传播，称为截止。当波长大于截止波长，金属壁波导内部的状态是沿长度方向指数衰减的场，叫消失场或凋落场。有趣的是，用截止波导做成衰减器的实验（1929 年），早于用波导传输的实验（1936 年）。前一情况，发明者没有提出任何理论，只是由 H.A.Wheeler 在 1935 年作了解释——它与后来的波导理论完全一致。

对于英文中的 *evanescent field* 一词，中文可有三种译法：消失场、凋落场、迅衰场。本书采用第一种；林为干先生有时用第二种；方俊鑫教授用第三种。此外，1986 年出版的《近代物理学史研究（二）》一书中，在介绍光学中的 Goos-Hänchen 位移时，把 *evanescent wave* 称为“倏逝波”。这些名词有待统一。但有一点必须肯定，就是物理学家、电子学家、微波学家、计量学家都重视这种场或波，对其规律详加研究，成了物理理论、电磁理论的一个分支。当然，对于介质波导和光纤，却认为辐射模的出现是导波截止的标志，情况与金属壁波导有很大的不同。

本书作者是从应用和研究截止衰减器（即活塞式衰减器）而开始对消失场感兴趣的。1963 年，作者在《电子学报》上发表了题为“ H_{11} 模截止衰减器的误差分析”的论文，用 S 矩阵和传输线模型处理了截止式衰减器，指出了 H.E.M. Barlow 和 A.L.

Cullen 在其著作《微波测量》(1960 年在英国出版)中发表的非线性衰减算式的局限性,提出了一种测量非线性的巧妙方法。这是作者的第一篇严肃的论文,就其中问题曾与蔡金涛学部委员讨论,得到了他的指导。1975 年作者发表了第二篇论文,是在 A. E. Karbowiak 启发下,运用表面阻抗微扰法进行分析的。这些是研究工作的开端。

1975~1981 年,作者又发表了几篇文章。例如,1977 年在与古乐天合写的小书中,提出了对精确度要求高的一级截止衰减标准采用真空状态的建议;三年后,联邦德国物理技术研究院 (PTB) 的 H. Bayer 博士提出了相同的见解。1980 年,作者尝试用 P. Penfield、D. C. Youla、K. Kurokawa 在 60 年代建立的功率波理论来解释电抗性很强的截止波导,这一作法在国内受到梁昌洪教授的注意和支持。同年,我们预言了截止衰减器按等离子体原理来设计的可能性,论述了超导截止波导的有关问题,还对消失模谐振腔作了些计算。

正是由于在初版本中包含了上述新颖的内容,林为干学部委员、H. Bayer 博士给作者写了热情的信,赞许作者的努力。中国计量科学院的同事在访美时给美国标准局 (NBS) 的 C. M. Allred 先生带去了本书的初版本。在国内,清华大学冯正和副教授认为本书“写得很精采”。公正而论,初版本取得了一定的成绩,它是有关这方面内容的国内、外第一本系统性著作。书中提出了用 Müller 法解圆波导特征方程的可能性;讨论了各种实用化的衰减常数计算公式;用功率波理论解释了截止波导的机理;讨论了消失模谐振腔;整理了分析截止波导的等效集总电路理论方法;介绍了超导截止波导;预言了等离子体式截止衰减器。初版本也有明显的缺点,主要是数学起点低、没有对矩形结构论述、没有用电子计算机作数值计算的内容,以及其它等等。正因为如此,初版本在 1982 年全国优秀科技著作评比中获奖一事,作者虽知是国家对中年知识分子的鼓励,但仍觉得不安,一直期待着有再版的机会。

第二版考虑了以下几个原则：(1) 必须把波导的传输区和截止区看成一个整体，而不是孤立地处理截止现象和截止区；(2) 必须包含半个世纪（扩大点说是一个世纪）里关于波导理论的主要成果；(3) 必须既具有理论阐述的深刻性，又有工程应用上的实用性；(4) 必须控制篇幅。因此，和初版本相比，第二版扩大了读者范围；除了对计量工作者、工程技术人员有益之外，大学生和研究生均可阅读。作者对攻读硕士学位的研究生们讲课的经验证明了这点。从1982年至1987年，作者就导波系统理论发表了12篇论文，这一事实成为作者进行修订工作的基础。

本书初版本第十一章“圆锥截止波导理论”是陈木华高级工程师应作者之请而撰写的，本次再版前他已作了修改，现为第二十一章。在本次修订时，第五章中包含了潘津工程师与作者共同研究所得到的成果；第七章中包含了朱敏高级工程师与作者共同研究所得成果，特此声明并致谢！联邦德国联邦物理技术研究院(PTB)的稗亚博士(Dr. H. Bayer)寄来了他在Archiv der Elektrischen Übertragung杂志上发表的论文，均此致谢！

本书采用时谐因子 $e^{j\omega t}$ （只有个别章节用 $e^{-j\omega t}$ ，以维持历史文献原貌），传播因子用 $e^{-\gamma z}$ ，这里 z 是沿导波传播方向所取的坐标轴， γ 是传播常数($\gamma = \alpha + j\beta$)。我们又取 k_z 为 z 向传播因数的符号，其定义是 $\gamma = jk_z$ 或 $k_z = -j\gamma$ ，故有 $k_z = \beta - j\alpha$ 。可见，只有完全忽略损耗时（衰减常数 $\alpha = 0$ ），才能认为 k_z 就是相位常数($k_z = \beta$)。符号 k 在本书中代表波矢量的大小，也叫波数。弄清这些符号的意义是十分重要的。在初版本中，英小字母 r 被赋与两种含义，即它可能是圆柱坐标系 (r, ϕ, z) 的一维，又可能是圆波导的内半径。实践证明，这样的规定很不方便，所以在再版时规定圆波导内半径用 a 表示，这也符合国际上的习惯。

在外文字母符号的使用方面，我们尽可能注意防止出现混乱。例如，孤立地看问题，用 τ 代表切向是可以的。但我们已在前几章大量使用符号 E_t 、 H_t 表示横向场矢量，所以，再用 E_t 、 H_t 表示物体表面的切向场就会造成理解上的误会。因此，我们

采用 E_s 、 H_s 表示表面处的切向场 (s 是 surface 的第一个字母), 这样就把英小字母 t 的使用局限在两种场合: (1) 表示时间; (2) 表示横向。

正确地规定下标符号对于理解是很重要的, 这一点从下面的例子也可以看出来。在本书第三章里, 我们规定波导的波阻抗为 Z_0 , 波导的特性阻抗为 Z_c 。这样加以区别是必要的, 而后的下标 c 恰为英文“特性的”(Characteristic) 的第一个字母。然而, 对于 TEM 传输线 (平行双线、圆同轴线、矩形同轴线), 我们是用不着区别这两种阻抗概念的, 因此在第十二章里面就用 Z_0 表示特性阻抗。不过, 对于一个 n 端口网络而言, 各口采用波导 (工作于传输状态) 作输入、输出传输线, 也是可能的。因此, 第十二章的论述采用 Z_0 代表传输线特性阻抗也是可以的 (甚至更好一些)。为了与初版本一致, 采用符号 Z_0 代表特性阻抗亦无大错。

关于外文姓名问题, 本书中只有 11 个名字采用中文译名, 因为对他们已有确定的译法, 即法拉第、安培、麦克斯韦、牛顿、爱因斯坦、赫兹、亥维赛、狄拉克、汤姆孙、瑞利、谢昆诺夫。对其余人一律采用原文, 这样反而可以避免出现误解。例如, 对波导理论曾作出贡献的两个人——美国人 W.L.Barrow、英国人 H.E.M.Barlow, 在译名上是不好区分的, 直接写出原文倒很清楚。

最后说明一点, 即北京广播学院微波工程系的新近获得硕士学位的研究生曾诚, 在研究内壁有介质层的金属壁圆波导理论时获得了一系列新成果, 在此基础上, 他与作者共同完成了三篇论文。但本书付梓在即, 这些工作已无法在本书中得到反映。

黄志洵

1989年春于北京

目 录

第一篇 导波传播的基本理论

第一章 波导理论的早期发展	(1)
§ 1.1 18、19 世纪时数理方程的进展	(1)
§ 1.2 麦克斯韦方程组	(3)
§ 1.3 1893 年时两种截然相反的观点	(10)
§ 1.4 汤姆孙在波导理论方面的先驱性工作	(11)
§ 1.5 波导理论的奠基人瑞利的工作	(19)
§ 1.6 G.C.Southworth 的实验	(22)
§ 1.7 H.A.Wheeler 的初等截止波导理论	(24)
§ 1.8 谢昆诺夫对波导理论的早期贡献	(29)
参考文献	(35)
第二章 导波传播的一般问题	(37)
§ 2.1 非本征值问题与本征值问题	(37)
§ 2.2 导波系统的色散图	(46)
§ 2.3 理想导电壁波导中的模式及正交性	(49)
§ 2.4 波导问题中的变分法概念	(53)
§ 2.5 波导的截止频率与截止波长	(58)
§ 2.6 矩形波导的基本分析	(63)
参考文献	(77)
第三章 波导的阻抗与基准场理论	(79)
§ 3.1 引言	(79)
§ 3.2 矩形波导的波阻抗	(80)

§ 3.3 矩形波导的特性阻抗	(88)
§ 3.4 基准场	(92)
§ 3.5 过模波导中场的描述	(100)
§ 3.6 波导内线电流源的辐射场	(102)
参考文献	(109)
第四章 圆波导的一般分析	(111)
§ 4.1 圆柱状结构的波方程	(111)
§ 4.2 圆波导 Bessel 方程及解	(113)
§ 4.3 理想导电壁圆波导的边界条件	(117)
§ 4.4 圆波导中的场分量	(120)
参考文献	(125)

第二篇 特征方程法

第五章 圆波导中的 CMS 方程	(127)
§ 5.1 引言	(127)
§ 5.2 圆柱波的普遍化特征方程	(132)
§ 5.3 有限电导率金属壁圆波导的情形	(138)
§ 5.4 用微扰法求解 CMS 方程	(142)
§ 5.5 用电子计算机解 CMS 方程的精确数值方法	(147)
§ 5.6 对圆波导进行精确计算的结果及讨论	(155)
参考文献	(159)
第六章 圆柱式介质波导的特征方程	(161)
§ 6.1 引言	(161)
§ 6.2 介质圆管波导的特征方程	(163)
§ 6.3 介质圆棒波导的特征方程	(166)
§ 6.4 弱导波光纤的特征方程	(173)
参考文献	(178)
第七章 内壁有介质层的金属壁圆波导	(179)
§ 7.1 引言	(179)
§ 7.2 圆波导内壁生成氧化膜时的特征方程 (Brown 方程)	(184)

§ 7.3 圆波导内壁处人工加介质层时的特征方程 (BWB 方程)	(192)
§ 7.4 薄介质层情形下的截止波导的讨论	(200)
§ 7.5 厚介质层情形下的理论进展	(203)
参考文献	(207)

第三篇 表面理论

第八章 微波金属表面问题的基本理论	(209)
§ 8.1 理想导体表面的边界条件	(209)
§ 8.2 电磁波透入深度	(212)
§ 8.3 非理想导体表面的边界条件	(216)
§ 8.4 单一金属平面结构的表面阻抗	(220)
§ 8.5 双层金属平面结构的表面阻抗	(225)
§ 8.6 金属表面粗糙度影响的理论	(229)
§ 8.7 金属的直流与射频电导率、表面有效电导率	(236)
§ 8.8 金属的相对磁导率及表面 Q 深度	(243)
参考文献	(245)
第九章 波导问题的表面理论	(246)
§ 9.1 波导的理想化模型与实际的偏差	(246)
§ 9.2 矩形波导的衰减常数计算与实际的偏差	(252)
§ 9.3 微扰法概述	(259)
§ 9.4 微扰法的早期工作	(261)
§ 9.5 圆波导内表面阻抗的并矢性质	(265)
§ 9.6 圆波导内表面阻抗与耦合系数的关系	(269)
§ 9.7 表面阻抗特征方程及微扰分析	(273)
§ 9.8 用表面阻抗微扰法求波导的传播常数	(275)
参考文献	(279)
第十章 用表面阻抗微扰法推导圆截止波导衰减常数的精确公式	(281)
§ 10.1 引言	(281)
§ 10.2 衰减常数公式推导	(283)

§ 10.3 数值计算举例	(290)
---------------------	-------

参考文献	(292)
------------	-------

第四篇 等效电路法和特殊波方法

第十一章 分析波导问题的等效电路法	(295)
-------------------------	-------

§ 11.1 引言	(295)
-----------------	-------

§ 11.2 横电波 (TE 波、 H 波) 情况的等效电路	(295)
--	-------

§ 11.3 从波导内横向场关系推导等效电路	(298)
------------------------------	-------

§ 11.4 关于 K 因子的讨论	(300)
---------------------------	-------

§ 11.5 等效电路法的进一步发展	(302)
--------------------------	-------

参考文献	(307)
------------	-------

第十二章 分析微波网络与波导问题的功率波方法	(309)
------------------------------	-------

§ 12.1 历史情况及评述	(309)
----------------------	-------

§ 12.2 n 端口入射波、出射波的定义	(313)
-------------------------------	-------

§ 12.3 多端口外接阻抗改变时的广义散射矩阵	(316)
--------------------------------	-------

§ 12.4 功率波理论的电路描述	(320)
-------------------------	-------

§ 12.5 截止波导的功率波反射系数	(330)
---------------------------	-------

参考文献	(332)
------------	-------

第十三章 Schrödinger 波方程的应用及导波理论的	
-------------------------------	--

量子化	(334)
-----------	-------

§ 13.1 引言	(334)
-----------------	-------

§ 13.2 Schrödinger 波方程	(336)
------------------------------	-------

§ 13.3 位垒与隧道效应	(338)
----------------------	-------

§ 13.4 量子隧道效应的等效传输线模型	(340)
-----------------------------	-------

§ 13.5 波导截止现象的量子类比	(343)
--------------------------	-------

§ 13.6 非均匀折射率光纤的量子力学分析	(345)
------------------------------	-------

参考文献	(348)
------------	-------

第五篇 截止波导的工程理论

第十四章 截止波导的相位常数和波速度	(349)
--------------------------	-------

§ 14.1 波速度的一般概念	(349)
§ 14.2 截止波导的物理概念	(353)
§ 14.3 相位变化的性质和相位常数公式	(357)
§ 14.4 截止波导的波速度	(362)
参考文献	(363)
第十五章 截止波导的阻抗、反射和驻波	(365)
§ 15.1 截止波导的波阻抗	(365)
§ 15.2 截止波导内场关系的矢量图	(368)
§ 15.3 截止波导的行波反射系数	(372)
§ 15.4 截止波导的电压驻波比	(379)
§ 15.5 截止波导行波反射系数模可否大于 1 的问题	(383)
§ 15.6 关于圆图的讨论	(385)
参考文献	(393)
第十六章 分析截止波导的等效均匀传输线理论方法	(395)
§ 16.1 引言	(395)
§ 16.2 等效方法的考虑	(396)
§ 16.3 全双曲线函数表示法的均匀传输线理论	(399)
§ 16.4 截止波导的输入阻抗	(402)
§ 16.5 截止波导的功率传输	(404)
§ 16.6 应用实例	(408)
§ 16.7 消失模谐振腔	(410)
§ 16.8 消失模谐振腔的质量因数	(415)
§ 16.9 消失模滤波器	(419)
参考文献	(423)
第十七章 分析截止波导的集总电路理论方法	(424)
§ 17.1 引言	(424)
§ 17.2 T 网络方法	(425)
§ 17.3 互感耦合电路方法	(429)
§ 17.4 电容耦合电路方法	(445)
§ 17.5 集总电路理论方法对非线性段起始衰减的数值 估计	(457)
参考文献	(459)

第十八章 矩形截止波导理论	(460)
§ 18.1 引言	(460)
§ 18.2 消失场物理图象	(461)
§ 18.3 矩形截止波导中电场、磁场的强度	(466)
§ 18.4 矩形截止波导的衰减常数	(471)
§ 18.5 矩形截止波导用于截止衰减器	(473)
§ 18.6 矩形截止波导用于微波滤波器	(476)
参考文献	(477)

第十九章 圆截止波导的衰减常数公式、内径计算

及衰减常数误差分析	(479)
§ 19.1 Wheeler 公式和 Barrow 公式	(479)
§ 19.2 Stratton 公式	(482)
§ 19.3 Linder 公式	(484)
§ 19.4 Brown 公式	(485)
§ 19.5 Schaffeld和Bayer的公式	(487)
§ 19.6 Rauskolb 公式	(491)
§ 19.7 本书作者推演的公式	(492)
§ 19.8 Cook 公式	(493)
§ 19.9 H_{11} 模情形的内径计算	(494)
§ 19.10 H_{11} 模情形内径计算的讨论	(499)
§ 19.11 H_{11} 模情形的衰减常数误差分析	(504)
参考文献	(508)

第六篇 截止波导理论与实践的新发展

第二十章 截止波导衰减器理论与技术的进展	(511)
§ 20.1 消失场的基本性质	(511)
§ 20.2 产生消失场的一些方法	(514)
§ 20.3 实验技术	(517)
§ 20.4 70年代以来的重要进展和见解	(520)
§ 20.5 美、英、中三国的一级截止衰减标准介绍	(526)
参考文献	(528)