

截止波导理论导论

黄 志 洵

计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书是关于截止波导理论的内容概述。书中总结了二十多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。

在内容的安排上，大致可分为五个主要部分：（1）在室温下工作的圆柱截止波导理论；（2）在室温下工作的圆锥截止波导理论；（3）消失模谐振腔原理；（4）在超低温下工作的圆柱截止波导理论；（5）等离子体的截止波导理论模型。

为了读者的方便，除大量理论公式外，书中还有若干从实际出发的计算例题。

本书的主要对象是从事超高频与微波技术的工程技术人员及广大的无线电计量工作者，同时也可作为高等院校高年级学生和研究生参考书。

截 止 波 导 理 论 导 论

黄 志 洵 著

—*

计量出版社出版

（北京和平里11区7号）

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/32 印张 10 5/8

字数 236 千字 印数 1—2 500

1981年9月第一版 1981年9月第一次印刷

统一书号 15210·69

定价 1.45 元

“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。”

——列奥纳多·达·芬奇 (Leonardo da Vinci)

(1452—1519)

“我们所能感觉的最美丽最深奥的情感就是‘神秘’这个感觉。它是一切真科学的播种者。一个人对于这个情感有如陌生，不能对于自然的神妙发生惊奇与狂喜，他就与死人无异了。”

——阿尔伯特·爱因斯坦 (A. Einstein)

(1879—1955)

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，与可观测量联系起来。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。中国计量科学研究院黄志洵同志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，将对有关的工程技术人员有所裨益。

上海科学技术大学 黄宏嘉

1981年2月

绪 言

当前，伟大的党正领导全国亿万人民，为实现四个现代化的宏伟任务而奋斗。四化的基础是科学技术的现代化，而计量学是自然科学的一个生气勃勃的分支。由于计量学家总是在追求精确度的改进，在这个过程中常常出现意想不到的事情。新的理论、新的现象和新的设备，都可以改进计量的能力和水平，而追求更精确的计量的过程，又常常导致有用的科学新发现。这样的事例很多。总之，计量科学的发展，不仅要求建立基准和标准，而且要求发展深刻的计量测试理论和标准器的设计理论。

计量学的基础是物理学，而数学对它的进步有着深刻的影响。今天，各门学科一方面继续高度分化，越分越细；另一方面，开始高度综合。综合之所以能产生创造和飞跃，是因为这个工作能使我们站得更高，看得更远，即获得更有普遍意义的崭新认识。这种思想正是作者写作本书时的出发点。

自有衰减测量以来，截止波导衰减器就是主要的标准。这种情况赋予截止波导理论以特殊的意义。作标准器时，截止波导的工作频率不高，这是由于 G. F. Gainsborough 在 1947 年发明了“并联比较的中频代替法”以进行微波衰减测量。这是众所周知的情况。

现在，最好的截止波导衰减器已在几个大国的最高计量机构中制造出来，其精确度 (Accuracy) 接近十万分之五。我们知道，“衰减”和其他许多无线电参数一样，是由基本单位导出的量。在无线电计量方面，只有标准而没有基准。考虑到这种情况时，上述精确度数字就是十分引人注目的

了！本书作者提出过采用超导截止波导以制作更高级衰减标准的建议，这是绕开直接精测波导射频电导率的困难，设法取消电导修正项的措施。这在目前虽然仅仅是一种设想，但却说明精度还未到极限，还可以提高。

另一方面的情况是：截止波导衰减器可以使用在微波，例如厘米波、毫米波波段。把它介入到微波系统中时，就有匹配、不连续性、反射等问题，而且显得不好考虑。对于这样的应用，它是典型的“无耗衰减器”^①；作者认为可以用功率波理论来处理。这是不作标准器的情况。还有一些不作标准器的实用情况，例如在微波波导滤波器中用截止波导提供有频率选择性的反射；以及用截止波导实现微波封闭；等等。

在普遍的电磁理论方面，截止波导理论也是重要的。对电磁场现象，常用模式、模式耦合、辐射场、传输波、消失波等来描写，如能对消失场作详细的探讨，就能对总的理解作出贡献。在金属壁规则波导中，当波导电导率很高时，本征值是离散的，包含有限个传输模式和无限多个消失场；如不满足电导率很高这一条件，就还有一个本征值的连续谱。近代的光导纤维，当作介质波导来看，除了离散的传输模式，还有辐射模式的连续谱，以及消失场的连续谱。因此，消失场理论具有广泛的、深刻的、多方面的内容。

又如，在金属壁传输波导内不连续性问题中，一方面，障碍物的阻抗性质（电容或电感）可由邻近的消失场能量的性质（电能或磁能）来决定；另一方面，不连续处的高次模式在这根波导中属于截止模，因而判断出高次模的性质后就可选择消除影响的方法。这说明对于消失场应有更多的了解。

本书作者认为，在科学技术工作中，对理论（即普遍性原

^① 这个名词是另一个词“吸收式（损耗式）衰减器”的对立物。

理)的深刻理解,也是包含着生产力的要素的。因为,这种理解有时导致技术上的重大变革,或者导致某些新器件的发明。这在科学史上是不乏先例的现象,对我们的研究对象——截止波导——而言也是可能发生的。当微波通过等离子体时的物理机制,与金属壁截止波导管内发生的过程竟有奇妙的^①相似之处;这个事实就是技术上可以利用的,作者曾预测有一种新仪器(等离子体式截止衰减器)有可能被发明出来。

截止波导理论指出,一个截止波导段可以用作可变电感或可变电容。这带来了众多的可能性。例如,用截止波导作电感,再配以适当的电容,我们可以得到谐振腔(单节)、带通滤波器(多节)等元件。因此,近十几年来国外出现了Eva-mode Resonator(消失模谐振腔)、Eva-mode Filter(消失模滤波器)等研究领域。事实上,用截止波导做出各种微波元件的可能性是一直存在着的。进一步,这种技术渗透到微波集成电路(MIC)的技术领域。这个情况再一次证明了研究普遍性理论的必要性。1956年,И. В. Лебедев(他曾在我国任教)和Э. М. Гутцайт一起,仔细地研究了截止波导的输入阻抗,最先提出用截止波导组成谐振器的可能性。它类似射频时的并联谐振回路。他们还进行过关于消失模谐振腔的最早实验。这个思想在以后10年中并未引起注意。然而,经过改进发展后,出现了新的动力。G. F. Craven以及R. V. Snyder等人在1966—1977年间进行了更多的研究。本书将扼要介绍有关的十分有趣的发展。

总之,概括说来可以认为:对截止模式、消失场、截止波导原理的兴趣,正在扩展和增长。尽管传输波导理论已经十分丰富、十分完整,截止波导理论却处于不够完整的阶段。

^① 参看前面 A. Einstein 的语录。

因而，后者更吸引了作者的注意，并感到截止波导的物理概念和实用价值只有通过数学表达才能阐明。正是数学形式描绘出这一事物的内在和谐、统一、和优美！

严格而论，波并不在某个特定的频率上被“截止”，而是传播波型迅速地转化为高衰减的消失波型。因而，截止频率是由无耗波导定义出来的。当激励频率低于这个频率时，由于衰减很大，波的传播是不可能了。

在我们的叙述中，横电 (TE) 波也叫磁 (H) 波，横磁 (TM) 波也叫电 (E) 波。当波导电导率为有限值， E 和 H 波型之间发生耦合，称为孪生波（它可能是一个 E 波和一个 H 波的线性组合）。只有圆柱波导中的圆对称波型 (E_{0n} 、 H_{0n}) 是例外，即使是有耗波导也可保持为简正波。但有耗波导中的 H_{11} 波就不是简正的，在理论上作再大努力也只能追求尽可能精确的近似解。

J. R. Carson、S. P. Mead、S. A. Schelkunoff 在多年前推导出一个圆柱波导中正规波型的传播常数所满足的方程，我们称之为 CMS 方程。几年前，樊锡生同志曾独立地导出这个方程，加深了理解。鉴于该方程的重要性，以及通过这个内容对于深化认识的良好作用，本书详加介绍，并进而讨论其实用形式、数值形式、编程求解等问题。用超越复函数组合的复杂方程是难于求出解析解的，这正反映了电磁场理论方法的缺点。因而，我们也大量采用其他方法（电压波、功率波、均匀传输线、集总元件等效电路等）来分析截止波导，并进行适当的数值计算。本书还讨论了圆锥截止波导（圆柱波导可看成张角为零的圆锥波导），第十一章是陈木华同志写的，谈到截止模可变为传输模，相信会引起读者的兴趣。

本书在各章的后面附有与该章内容相适应的简略的参考文献表。此外，为了读者的方便，在本书的末尾列有详细的

参考文献。因而，在本书中搜集了多达一百几十篇著作的目录，可供需要进一步研究的人使用。当然，有的文献很难找到。但是，完整的文献表可使我们看清楚已有研究工作的规模、重要的作者、国别分布、年代分布等情况；因此我们把已知的线索全部列出。

有一个问题在此说明，即本书和 1977 年出版的 书（古乐天、黄志洵合著：《截止波导与截止衰减器》）的关系。应当指出，该书是以截止衰减器为主要内容的，而本书是以截止波导的理论为主要内容，即研究消失波（Evanescent Waves）、或电抗波（Reactive Waves）、也叫本地波（Local Waves）的原理。其次，本书的叙述很少与该书重复，反而改正了该书的某些缺点。因此，应当把本书看成是该书的姊妹篇。

另外，在本书中同一个符号可能代表几种不同的意义，应当注意区别。例如，希文小写字母 ϕ 、 φ 的意义可能是：圆柱坐标符号、相位、电压波反射系数的相角；希文小写字母 ρ 的意义可能是：体电荷密度、空气密度、电阻率（均为实数量），以及电压波反射系数（复数量）、球坐标符号。又如，英文小写字母 u 、 v ，大写字母 A 、 C 等，都有类似的情况，请读者注意。

最后，作者向几个方面的支持和帮助表示感谢。中国科学院学部委员黄宏嘉先生为本书写了序言并惠题书名；作者念大学时期的老师、微波管专家吴鸿适先生阅读了初稿并提出修改意见；老科学家的指教是令人难忘的。同时，中年科技工作者（朱敏、白同云、李家楷同志）的见解和讨论，亦使作者受益非浅。李君实同志协助抄稿，一并致谢。借此机

会，作者向三年来从各方面给予关怀和鼓励的领导（计量院的院领导、无线电室领导，以及郭肇民同志）致谢！

黄志洵 1981年3月
(北京，中国计量科学研究院)

目 录

序

绪 言	(i)
第一章 电动力学基础	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 麦克斯韦方程组的基本内容	(2)
§ 1.3 波方程	(6)
§ 1.4 矢量位和赫兹矢量	(10)
§ 1.5 亥姆霍兹方程	(12)
§ 1.6 推迟位	(13)
参考文献	(14)
第二章 波导理论基础	(16)
§ 2.1 早期的历史情形	(16)
§ 2.2 截止波长	(18)
§ 2.3 波阻抗	(21)
§ 2.4 表面阻抗	(24)
§ 2.5 截止波导概念	(28)
§ 2.6 场的时间相位因子	(35)
参考文献	(37)
第三章 圆波导中的 CMS 方程	(39)
§ 3.1 求证 CMS 方程的基本前提	(39)
§ 3.2 符号与基本关系式	(41)
§ 3.3 场分量	(44)
§ 3.4 CMS 方程的推导	(50)
§ 3.5 CMS 方程的实用形式	(60)
§ 3.6 CMS 方程的数值形式举例	(61)
§ 3.7 CMS 方程的近似求解	(65)

参考文献	(68)
第四章 圆截止波导的衰减常数公式	(70)
§ 4.1 Wheeler公式	(70)
§ 4.2 Barrow 公式	(72)
§ 4.3 Stratton公式	(75)
§ 4.4 Linder 公式	(76)
§ 4.5 衰减常数与波导内介质的相对介电常数之关系 ..	(77)
§ 4.6 Brown 公式	(81)
§ 4.7 阿部武雄公式	(83)
§ 4.8 Rauskolb 公式	(85)
§ 4.9 本书作者推演的公式	(90)
§ 4.10 Adair 公式	(92)
参考文献	(92)
第五章 圆截止波导的内径计算及衰减常数误差分析	(94)
§ 5.1 E_{01} 波情形的内径计算	(94)
§ 5.2 H_{11} 波情形的内径计算	(95)
§ 5.3 H_{11} 波情形内径计算的讨论	(101)
§ 5.4 H_{11} 波情形的衰减常数误差分析	(107)
参考文献	(113)
第六章 截止波导的有关物理参数	(114)
§ 6.1 真空中的光速 c	(114)
§ 6.2 空气的相对介电常数 ϵ_r 及折射率 n	(115)
§ 6.3 波导内表面的射频电导率 σ	(128)
参考文献	(135)
第七章 截止波导的相位常数和波速度	(137)
§ 7.1 物理概念	(137)
§ 7.2 时间相位因子的再讨论	(140)
§ 7.3 相位变化的性质和相位常数公式	(142)
§ 7.4 波速度	(147)
参考文献	(151)
第八章 截止波导的波特性阻抗和反射系数	(152)

§ 8.1	行波反射系数的基本概念	(152)
§ 8.2	截止波导的波特性阻抗	(155)
§ 8.3	截止波导内场关系的矢量图	(159)
§ 8.4	截止波导的行波反射系数	(163)
§ 8.5	功率波理论	(168)
§ 8.6	截止波导的功率波反射系数	(179)
§ 8.7	改变反射系数定义在理论上的影响	(181)
§ 8.8	关于圆图的讨论	(185)
	参考文献	(189)
第九章	分析截止波导的等效均匀传输线理论方法	(190)
§ 9.1	等效方法的考虑	(190)
§ 9.2	全双曲线函数表示法的均匀传输线理论	(192)
§ 9.3	截止波导的输入阻抗	(196)
§ 9.4	截止波导的功率传输	(198)
§ 9.5	应用实例	(203)
§ 9.6	消失模谐振腔	(205)
§ 9.7	消失模滤波器	(211)
	参考文献	(215)
第十章	分析截止波导的等效集总电路理论方法	(217)
§ 10.1	截止波导中电场和磁场的强度	(217)
§ 10.2	T 网络方法	(224)
§ 10.3	互感耦合电路方法	(228)
§ 10.4	电容耦合电路方法	(238)
§ 10.5	集总电路理论方法对非线性段起始衰减的数值 估计	(248)
	参考文献	(249)
第十一章	圆锥截止波导理论	(251)
§ 11.1	引言	(251)
§ 11.2	场方程	(252)
§ 11.3	截止波长与截止频率	(255)
§ 11.4	衰减常数与截止衰减量	(256)

§ 11.5	模特性阻抗与输入阻抗·····	(259)
§ 11.6	相移常数与相移量·····	(260)
§ 11.7	圆锥变张角处模的传输与转换·····	(263)
§ 11.8	应用与研究方向·····	(269)
	参考文献·····	(273)
第十二章	超导截止波导原理·····	(275)
§ 12.1	超导截止波导实例·····	(275)
§ 12.2	超导金属的高频表面电阻·····	(277)
§ 12.3	精密超导截止波导衰减标准的建立问题·····	(285)
	参考文献·····	(291)
第十三章	等离子体的截止波导理论模型·····	(292)
§ 13.1	等离子体及其在微波测量技术中的应用·····	(292)
§ 13.2	等离子体的物理特性·····	(295)
§ 13.3	等离子体的截止波导理论模型·····	(299)
	参考文献·····	(304)
附 录	·····	(305)
I.	貝塞耳、汉克尔函数·····	(305)
II.	分貝和奈培的精确换算·····	(305)
III.	二端口失配因子比与广义散射矩阵系数的关系·····	(306)
IV.	消失模谐振腔的质量因数·····	(310)
V.	与研究截止波导理论和应用有关的参考文献目录表 ·····	(314)

第一章 电动力学基础

§ 1.1 引言

宏观物理量可分为三类：数量（或标量）、矢量、张量；这些概念都来源于实践。物理世界有许多既有方向又有大小的量，其中一大部分是矢量，如速度、力、电场强度等。有数值而无方向的量是标量；另外，矢量的大小是标量。张量是矢量的推广（矢量是张量的特例）。在本书中，用黑斜体字母表示矢量，如 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 等。梯度是矢量，表示某数量在空间的变化情况；例如，温度是标量，而温度梯度是矢量。矢量场在某点的散度，是一个数量。旋度是一个矢量。

十九世纪时，数学和物理学平行和交叉地向前发展，使科学越来越走上这样的方向：用复杂的数学式描写物理规律。数学的进步，为物理定律的整理准备了条件。例如 Остроградский 把三维的三重积分用区域表面的二重积分表示的公式，以及 Stokes 公式等；它们为电磁定律的整理，提供了方便。

英国物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell, 1831—1879）一生出版过 90 多种著作，涉及自然科学各方面。然而，他最大的贡献是电磁场理论。他那著名的电磁场方程式（用矢量微分形式表述），他那独创性的位移电流概念，他那关于电磁波的传播和它的电磁本性的研究，成为他科学思想中最精彩的部分。

然而，麦克斯韦也是站在前人的肩上，向上攀登的。他的第一定律的基础是安培定律，但补充了位移电流概念。第二定

律的基础是法拉第定律。1831年（恰恰是麦克斯韦降生的那年），法拉第发现电磁感应现象；后经亥姆霍兹（Helmholtz）的推演，得到了著名的公式： $\mathcal{E} = -d\Phi/dt$ ，这通称为电磁感应定律。这个定律到了麦克斯韦手中，由于运用了 Stokes 定理，得到了新的形式，称为麦克斯韦第二定律。这些都总结在他那光辉著作《论电学和磁学》之中；该书于1873年出版。

麦克斯韦方程组对电磁现象的解释，是从宏观实验事实出发，用矢量代数、重积分、微分方程的数学工具加以总结。在十九世纪中后期创立的麦克斯韦理论，是物理学的一大进步。它是当时数学、流体力学、电磁学互相促进发展的合乎逻辑的结果。这个理论综合了以前发现的许多电磁定律，使之成为一个严整的系统。这个理论的推论之一是：电磁场的变化需要时间，它以有限速度（ V ）传播。这个速度可由物理数据（ ϵ 、 μ ）算出，也可由电学方法测量得出。得到的数值竟与光速测量值相合！这样就得出结论：光是一种电磁波。这一贡献使麦克斯韦永垂不朽！

不仅如此，当我们处理微波问题时，必须从麦克斯韦方程组出发。首先要导出波方程，然后由波方程解出场方程。对于微波问题，从麦克斯韦方程出发求解，可得一组完全的解，故可了解所有模式的特性。至于单一模式的问题，也可以用传输线、网络理论来解决。

§ 1.2 麦克斯韦方程组的基本内容

在18—19世纪大量实验事实的基础上，人们首先在线性的、各向同性的媒质中，总结出三个正比关系式，作为电磁场理论中三个基本关系式。分述如下——

1. 对于各向同性的线性电介质

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.1)$$

式中 $\mathbf{D}$: 电感应强度, $\mathbf{E}$: 电场强度, ϵ : 介电常数.

2. 对于各向同性的导电媒质:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.2)$$

式中 $\mathbf{J}$: 传导电流密度, $\mathbf{E}$: 电场强度, σ : 电导率.

3. 对于各向同性的非铁磁媒质:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.3)$$

式中 $\mathbf{B}$: 磁感应强度, $\mathbf{H}$: 磁场强度, μ : 磁导率.

麦克斯韦方程组的具体形式, 与电磁单位制有关. 本书采用 MKSA 制, 方程组共用4个公式组成——

1. 电感应强度矢量的散度等于电荷密度.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.4)$$

式中 ρ 是体电荷密度.

这个公式是以下述事实为根据的: 孤立的电荷(正或负)可以在自然界单独存在, 它们之间的力服从库仑定律; 电位移线起于正电荷, 终于负电荷. 泊松 (S.D. Poisson, 1781—1840) 最先提出此式. 把 (1.1) 式代入, 得

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon \quad (1.4a)$$

2. 磁感应强度矢量的散度处处等于零.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.5)$$

这个公式是以下述事实为根据的: 从来没发现过磁荷的单独存在. 磁的 N、S 极总是成对出现, 磁力线总是闭合的. 法拉第早注意到电流引起的磁力线都封闭, 而上式是泊松最先提出的.

3. 磁场强度的旋度等于全电流 (传导电流加位移电流) 密度.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.6)$$