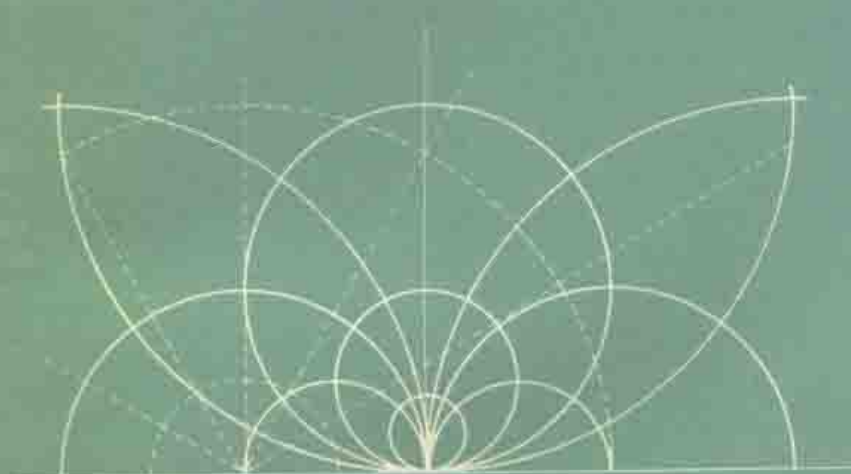




JIEZHI BODAO YU JIEZHI SHUAIJIANQI

人民邮电出版社

截止波导与截止衰减器

截止波导与截止衰减器

古乐天 黄志洵 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书的内容大致可以分成两部分。前一部分讨论截止波导理论。后一部分叙述截止衰减器的原理——衰减量的变化规律及实践检验；截止衰减器的设计方法和检定方法等。书中并附有一些实例。

本书主要供从事微波技术、无线电测量工作方面的工人、技术人员阅读。亦可供有关院校的师生参考。

截 止 波 导 与 截 止 衰 减 器

古乐天 黄志洵 编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

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} 1977年7月 第一版

印张：68/32 页数：100 1977年7月北京第一次印刷

字数：138千字 印数：1—13,500册

统一书号：15045·总2152-无627

定价：0.59元

毛主席语录

阶级斗争是纲，其余都是目。

我们应该谦虚，谨慎，戒骄，戒躁，全心全意地为中国人民服务，……

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目 录

第一章 概论	1
一、简述.....	1
二、截止波导和截止衰减器的实际应用.....	2
第二章 截止波导的基本物理概念和主要参量	6
一、简单的比较.....	6
二、截止波长和截止频率.....	7
三、截止波导中的“波”.....	11
四、波特性阻抗.....	13
五、反射系数和阻抗导纳圆图.....	16
六、反射因子.....	19
七、输入阻抗.....	21
八、 S 矩阵系数和输入反射系数.....	25
九、网络衰减和损失.....	28
十、耦合电路方法的物理基础.....	29
第三章 截止波导的功率传输	31
一、规则波导中的横向场分量.....	31
二、 E_{mn} 波的功率传输.....	34
三、 H_{mn} 波的功率传输.....	37
四、功率传输通用公式.....	38
第四章 截止波导的传播常数	40
一、分析方法的讨论.....	40
二、分析过程.....	42
三、关于衰减系数计算的理论.....	49

四、相位常数和波速度	55
五、传播常数与频率的关系(圆波导)	59
六、矩形波导的情况	61
第五章 截止衰减器的衰减方程和非线性衰减	63
一、简述	63
二、单一波型时的衰减方程式	64
三、单一波型时的非线性衰减	66
四、几点讨论	69
五、有寄生波型时的非线性衰减	71
第六章 截止衰减器非线性段的试验研究	77
一、寄生波型的影响	77
二、测量非线性的方法	79
三、 H_{11} 波截止衰减器的非线性段	82
四、 E_{01} 波截止衰减器的非线性段	89
五、米波信号发生器的截止衰减器的非线性	91
第七章 截止衰减器的设计方法	94
一、截止衰减器的技术指标及其相互关系	94
二、截止波导的设计	112
三、激励电极和接收电极的设计	121
四、波型过滤器(滤波屏)的设计	128
五、其它问题	131
第八章 截止衰减器实例分析	136
一、 H_{11} 波截止衰减器	136
二、 E_{01} 波截止衰减器	142
三、10厘米波段场强计的 H_{11} 波截止衰减器	145
第九章 精密截止衰减器的比对和检定方法	148
一、功率比法	148

二、比率变压器法.....	150
三、电平倍增法.....	151
四、电平倍增法的实例.....	155
五、电平倍增法的误差分析.....	160
第十章 截止衰减器的其它形式.....	166
一、介质式截止衰减器.....	166
二、小起始衰减的截止衰减器.....	168
三、准光学技术截止衰减器.....	170
附录.....	173
本书符号表.....	185

第一章 概 论

一、简 述

随着电信技术的日益发展，其使用的频段不断扩展。由于损耗、辐射和干扰等一系列问题，一般使用的金属传输线已不能满足传输宽频带的要求，迫使人们去探求新的传输线路，例如同轴电缆和波导管等。

十九世纪末，各种电磁现象的实验获得较大进展。同时，总结出了矩形和圆形截面的空金属管内电磁场方程，加深了对电磁波沿具有理想导电壁的无限长金属管传播的认识。

实践、认识、再实践、再认识，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识之每一循环的内容，都比较地进到了高一级的程度。波导技术的实践和理论也是这样发展的。波导的实际试验工作是在二十世纪三十年代，第一次用波导管传输电话信号获得成功。以后的多次实验，加深了对传输波导的认识，逐步完善了这一方面的理论。

三十年代以后，一方面由于通信容量不能满足要求，同时也由于其它有关技术(如真空电子技术和振荡技术等)的发展，使波导的应用有了实际需要和可能。恩格斯说：“**社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。**”波导的发展证实了这一论断。

电磁波在金属管内传输，只有在一定的条件下才能实现。这就是被传输波的频率要大于金属管的固有截止频率。这是在十九世纪中期被实践和理论都证明了的。

波导管中激励起来的电磁波的频率如果低于截止频率，当时已经发现，波导管对于这种电磁波不能传输，并且其能量以一定的规律衰减，这就是截止衰减器的依据。这一发现，获得了实际应用。

在多波段超外差接收机技术的研究发展过程中，需要提供可控制其强弱的高频微弱信号，而截止衰减器正是控制衰减量从而产生微伏级信号的有效手段。这种新型衰减器比过去常用的电阻式衰减器具有无接点噪音、制造简便和容易校准等优点，因此，具有较强的生命力。

人们对截止衰减器和截止波导的认识是逐步深化的。二十世纪三十年代作的第一次尝试，是用一根圆形金属管和两个放在管内的线圈，一个位置固定，另一个可沿纵向移动，移动线圈使它与固定线圈之间的距离加大，在一定的移动距离上，能量按指数规律变化。稍后的试验，对衰减器进行了定度、校准。结果证明，在绝大部分衰减范围内，计算与测量相一致。而曲线的根部，计算与试验结果是矛盾的。后来才认识到，这一现象正是激励电极和接收电极靠近时的必然结果。经过反复实践，人们已能用截止波导做出精度很高的标准衰减器，并建立了以截止衰减器为基础的衰减量计量标准。这些事实说明，生产技术的发展，既证实了原来的理论分析，也对理论分析的完整性和准确性提出更高的要求。

二、截止波导和截止衰减器的实际应用

截止波导有以下一些重要用途：

1. 利用截止波导能够把输入能量衰减到万分之一以至千分之一点的特点，可做成大衰减量的、连续可变的衰减器，用

在短波、米波、微波技术中。

截止波导的用途不限于衰减器,但这却是它的最重要用途。在各种标准信号发生器、场强计、干扰仪、高频电压校准接收机中都经常采用截止波导衰减器。

2. 用截止波导做成的衰减器,具有很高的精度,较高的稳定性和较好的屏蔽性能。因此,在实践中已用这种衰减器做成计量标准器。国际上已达到的水平是:在 120 dB 范围内,误差不大于 0.01 dB;在 10 dB 范围内,误差不大于 0.001 dB。近年来,一些国家对 30 兆赫标准截止衰减器进行过衰减比对,结果表明,这些标准衰减器的一致性在 0.004 dB 以内。

3. 微波系统常要求电磁能量不漏出金属管腔结构之外,但在某些特殊场合,又避免不了开孔。这样的矛盾可用截止波导来解决,即把必须开孔的部位稍加改造,使之形成一段截止波导。获得 60 dB 以上的衰减是容易的,这意味着功率减小到百万分之一,实际是封闭起来了,这在微波电子器件的设计中,是一项很有用的技术。例如磁控管为保持管内真空,需要有抽气管。但是,又必须防止微波功率的漏出。在设计时,就将排气管头部伸入一段截止波导内,抽气之后,将截止波导末端短路封闭。

4. 氨分子振荡器中,也广泛采用着截止波导。例如,在一些氨分子振荡器的具体结构中,采用截止波导(有时是长仅几毫米的金属管)作为分子束的输入通道。它既能抑制微波振荡能量的泄漏,又对振荡腔的完整性和振荡波型的干扰最小。

5. 在终接一般性负载的情况下,截止波导的输入阻抗,具有高电抗性。对于终端短路(或开路)的截止波导而言,其输入阻抗是纯电抗性的。并且,不管负载如何,电抗的大小可由长度来控制。这样一种特性,使得可以把截止波导当作可变电

抗，应用在微波技术中。

6. 可用截止波导做微波波长表。其方法是：当波导输入一被测微波信号(波长 λ 未知)后，设法改变波导截面积，以改变截止波长 λ_c 。当波导输出端功率指示器为零时，则被测波长等于截止波长。

1958年以前，常用改变矩形波导侧壁的方法，连续改变 λ_c 。1960年，有人采用一系列圆波导组，这些波导直径不一，截止波长也各不相同。这仅是两种方法的实例，当然还可以有别样的设计。在这两个实例中，前者用在厘米波，后者可用在毫米波。当然，从在测频精度目前已达 10^{-12} 以上的情况来看，这种只能达到10%精度的方法未免太笨拙了。然而，在开拓新的频段时，这仍然是一种简便而不会产生虚假频率误差的方法。

7. 用截止波导组有可能进行亚毫米波段非单色波的频谱分析研究。方法是使一系列直径不同的圆波导互相串联，当 λ_c 作阶梯变化时，通过的频带与功率也呈阶梯变化。根据指示器读数，可绘出功率的频谱分布图。

8. 截止波导可用于微波滤波器的设计。波导滤波器的设计方法很多，有人利用截止波导法，原理是用它提供具有频率选择性的反射，而不像一般波导滤波器那样利用耦合。结果，可得到X频段的宽带滤波器，通带可达0.6 GHz。另外，以短路截止波导作电抗元件，可得到低通滤波器和带阻滤波器。

9. 近年来微波干燥技术发展很快，其优点是加热效果好、效率高。但加热炉结构设计上有一个排湿问题，排湿孔的样式和尺寸是根据截止波导原理而决定的，以防止微波能量的泄漏。

10. 高频屏蔽室已成为许多电子学试验室和工厂车间中不

可缺少的工具。屏蔽室如用铜网做成，屏蔽效果差、加工麻烦、成本高。如用金属板做屏蔽室，屏蔽效果好、加工简单、成本低，但存在一个通风(透气)问题。这可用截止波导来解决，合理的设计使高频能量不能由截止波导管漏出，而空气却可经过波导管畅通无阻。

从以上的关于截止波导和截止衰减器应用的简单叙述，可看出它的实用价值是很大的。

第二章 截止波导的基本物理概念和主要参量

在截止波导中，既然能激励一定场结构的波型，并且可能传送一定份量的功率，就可以算出它的波特性阻抗、反射系数、波速度，输入阻抗等参量。这一方面，是和传输波导一致的。但是，这些表征截止波导特性的参量，又具有其独有的特征。就拿反射系数来说，传输波导中的反射系数只能在半径为 1 的圆内取值，而截止波导的反射系数可以在半个复数平面内取大于 1 的值。本章的目的，就是逐一讨论这些特点，以获得对截止波导的初步认识，并为三、四两章的分析作准备。在讨论物理概念时，我们将着重物理现象的描述，而把更严格些的数学证明，放在下两章或附录中。

一、简单的比较

在开始讨论之前，我们先简单地比较一下截止点上下的物理情况，见表 1-1。

表 1-1 是简化了的。有一些因素被忽略掉了。例如，波导管内的填充介质，也会引起损耗，但表中只提到“管壁损耗”。这是假定管内为空气（严格说应为真空）时，才这样说的。

以下，我们就较为详细地分析截止波导中的一些特点。

表 1-1

传输、截止特性比较表

	传输波导($\lambda < \lambda_c, f > f_c$)	截止波导($\lambda > \lambda_c, f < f_c$)
衰减常数	管壁无耗时, γ 是虚数, 实部为零。管壁有耗时, γ 有实部, 但很小。	管壁无耗时, γ 是实数, 虚部为零。管壁有耗时, γ 有虚部, 但很小。
波特性阻抗	若管壁无耗, Z_0 是纯电阻 ($Z_0 = \frac{\omega\mu}{\beta}$)。若管壁有耗, Z_0 有电抗成分, 但很小。	若管壁无耗, Z_0 是纯电抗 ($Z_0 = j \frac{\omega\mu}{\alpha}$)。若管壁有耗, Z_0 有电阻成分, 但很小。
无耗波导的波的因子	$e^{j(\omega t - \beta x)}$	$e^{j(\omega t - \alpha x)}$
波的特点	传播的行波	消失波
相位常数	相位是逐点改变的, 不论计及管壁损耗与否, 均如此。	若管壁无耗, 逐点相位不变。若管壁有耗, 相位略有变化。
波幅	若管壁无耗, 逐点幅度不变。	即使管壁无耗, 幅度逐点改变。
电场与磁场间的相移	0°	90° (无终端负载) $< 90^\circ$ (有终端负载)
坡印亭矢量	任何时刻均指向传播方向。	周期性地改变方向。

二、截止波长和截止频率

由以上的叙述已可看出同样一根金属管, 在较短的激励波长下, 可以是“传输”的, 而在较长的激励波长时, 又可以是“截止”的。显然, 传输和截止的转化是以频率(或波长)为条件。表征这一条件的特殊点, 就是截止频率(或截止波长)。

截止波长可根据一定的边界条件求出。在圆截面波导中，假定波导壁是理想导电的(电导率 $\sigma = \infty$)，那么，按照在圆波导内壁某个电场分量必须为零的条件，就可以解出 λ_c 。例如，对于 E_{mn} 波，必须满足 m 阶贝塞尔函数等于零的条件：

$$J_m(h_0 r) = 0$$

对圆波导中的 H_{mn} 波，必须满足：

$$J'_m(h_0 r) = 0$$

用 k_{mn} 统一地表示上述两个方程式的根，则有：

$$h_0 r = k_{mn}$$

把 $h_0 = 2\pi/\lambda_c$ 代入，可得：

$$\lambda_c = \frac{2\pi r}{k_{mn}}$$

上式适用于管内为真空的波导。

对于内充空气的波导，是：

$$\lambda_c = \frac{2\pi r \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{k_{mn}}$$

表 1-2 贝塞尔函数根值(k_{mn})

波 型	H_{11}	E_{01}	H_{21}	H_{01}
k_{mn}	1.841	2.405	3.054	3.832
λ_c	$3.42r\sqrt{\epsilon_r}$	$2.62r\sqrt{\epsilon_r}$	$2.06r\sqrt{\epsilon_r}$	$1.64r\sqrt{\epsilon_r}$
波 型	E_{11}	E_{21}	H_{12}	E_{02}
k_{mn}	3.832	5.136	5.332	5.520
λ_c	$1.64r\sqrt{\epsilon_r}$	$1.22r\sqrt{\epsilon_r}$	$1.18r\sqrt{\epsilon_r}$	$1.14r\sqrt{\epsilon_r}$

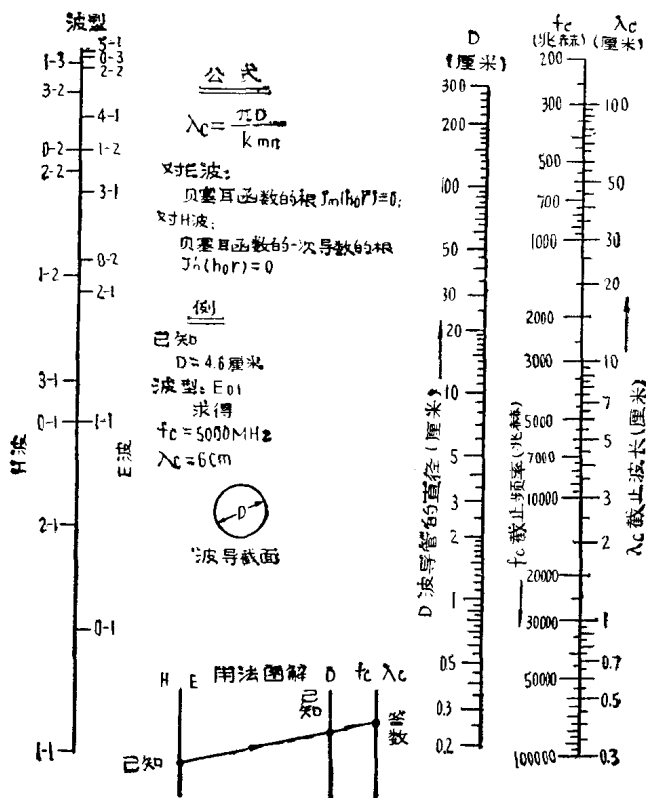


图 2-1 圆波导截止波长计算图

ϵ_r, μ_r 是管内介质的相对介质常数和相对导磁率。对空气来说 $\mu_r = 1^*$, 故得:

$$\lambda_c \approx \frac{2 \pi r \sqrt{\epsilon_r}}{k_{mn}} = \frac{\pi D \sqrt{\epsilon_r}}{k_{mn}}$$

表 1-2 给出圆波导中 8 种波型的 k_{mn} 值和 λ_c 。

* 空气的 ϵ_r 比 1 稍大, 在精密计算中, 它和 1 的区别不能忽略。

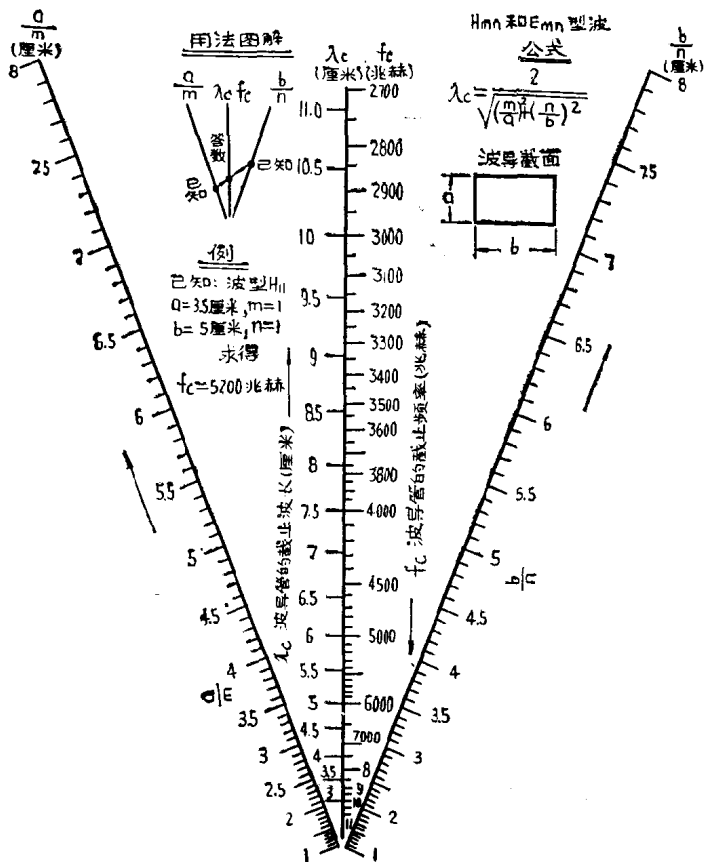


图 2-2 矩形波导截止波长计算图

截止频率与截止波长有如下关系:

$$f_c = \frac{V}{\lambda_c}$$

式中 V 是波速度。对于管内是空气的圆形波导, 电磁波以光速传播。有: