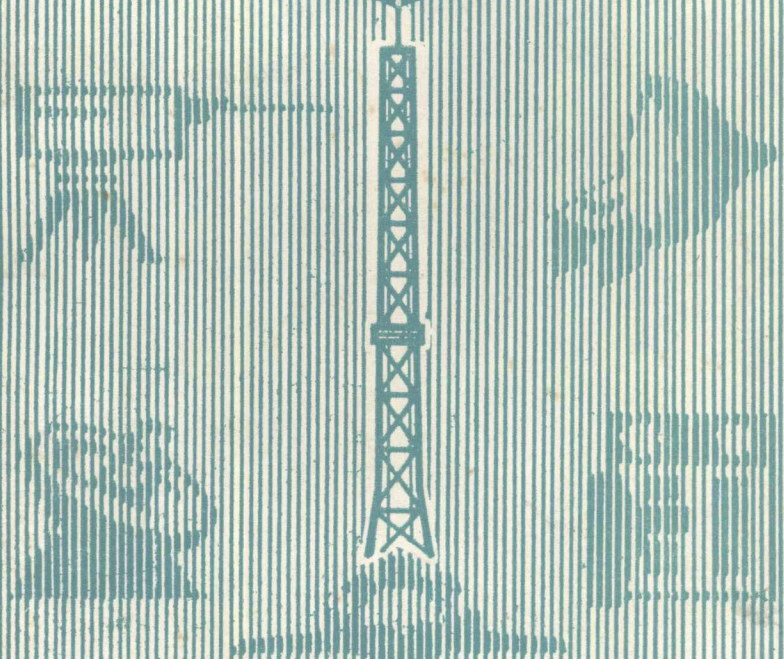


73.459
LWJ

高等学校教材

微波技术基础

柳 维 君



电子科技大学出版社

高等学校教材

微波技术基础

电子科技大学出版社

• 1989 •

内 容 提 要

本书采用以场为主、场路结合的方法系统地讲述了微波技术的基本内容。主要包括导波和常用导波系统中导波的特性、微波电路理论基础(含分布参数电路理论和场、路等效理论)、典型的无源微波元件、微波谐振和谐振器。各章均附有习题。

本书可作为高校电磁场工程、微波技术专业以及相近专业的本科教材或教学参考书。亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材 微波技术基础

柳维君 编

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都市建设北路二段四号)

四川石油管理局印刷厂印刷

四川省新华书店发行

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.9375 字数 371 千字

版次 1989年11月第一版 印次 1989年11月第一次印刷

印数 1—3200册

中国标准书号 ISBN 7—81016—129—6/TN·36

(15452·68) 定价: 5.30元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部
电子类教材办公室

前 言

本书是根据编者所编《微波技术基础》讲义改写而成。1987年经高校工科电子类电磁场与微波技术教材编审委员会评审，推荐出版，可作为高校有关专业的教学用书，亦可供有关工程技术人员参考。

本书在内容安排上参照了编者所在微波技术教学小组集体讨论的结构系统，反映了编者多年从事该门课程教学实践的成果。其主要特点是：以场为主，场路结合；与先行课程电磁场理论、后续课程微波网络衔接紧密，便于授课与自学。全书共五章。第一、二章用场方法论述导波和常用导波系统中导波的特性。第三章论述微波电路理论（含分布参数电路和场、路等效理论）。第四章介绍典型的无源微波元件。第五章讨论微波谐振和谐振器。各章均有习题。附录可作为本书必要的补充。书末是全书的主要参考书目。

本书在编写过程中，得到了电子科技大学电磁场工程系微波教研室的支持和关照，袁克绪副教授仔细审阅了全部书稿，提出许多宝贵意见。该系全泽松教授对本书的出版也给予了热情的鼓励和帮助。在此一并致谢。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处在所难免，欢迎读者指正。

编 者

1988年11月

目 录

绪 论	(1)
第一章 导波的一般特性	(5)
1.1 导波和导波系统	(5)
1.2 导波的场分析	(7)
1.3 导波的分类及各类导波的特性	(15)
1.4 导波的传输功率、能量及衰减	(27)
1.5 模式正交性	(35)
1.6 导波系统中截止状态下的场	(39)
习 题	(41)
第二章 典型导波系统的场分析	(43)
2.1 同轴线	(43)
2.2 矩形波导与圆波导	(53)
2.3 同轴线、矩型波导和圆波导的尺寸选择	(97)
2.4 圆柱形介质波导	(105)
2.5 微波集成电路用的导波系统	(123)
习 题	(152)
第三章 微波电路理论基础	(156)
3.1 引言	(156)
3.2 均匀传输线的分布参数电路理论	(157)
3.3 圆图	(182)
3.4 均匀导波系统等效为均匀传输线	(197)
3.5 不均匀性等效为网络及网络参量	(207)
习 题	(237)
第四章 无源微波元件	(244)
4.1 几种简单不均匀性场的电抗性质	(244)
4.2 阻抗匹配及匹配元件	(251)
4.3 转换元件	(276)

4.4	分支元件	(282)
4.5	定向耦合器	(296)
4.6	微波铁氧体元件	(313)
	习 题	(334)
第五章	微波谐振器	(339)
5.1	谐振电路及特性参量	(340)
5.2	同轴线、带状线和微带线谐振器	(349)
5.3	矩型波导谐振器	(359)
5.4	圆柱波导谐振器	(363)
5.5	介质谐振器	(370)
5.6	环形空腔谐振器	(373)
5.7	空腔谐振器的微扰	(375)
5.8	空腔谐振器的等效电路	(380)
	习 题	(387)
附 录		(390)
I	矢量公式	(390)
II	麦克斯韦方程组 波动方程 边界条件	(393)
III	求解导波场量的纵向场法	(396)
IV	复数坡印廷矢量定理	(398)
V	洛仑兹互易定理	(400)
VI	贝塞尔函数及其常用公式	(401)
VII	对称宽导带状线边缘电容的计算	(406)
VIII	分区填充介质的导波系统 导波存在纵向场的证明	(413)
IX	微带线单位长电容 C_1^0 和 C_1 的计算	(414)
X	非对称平板介质波导的场解	(422)
XI	电流源在波导中的辐射	(426)
XII	几种常用金属材料的特性常数	(431)
XIII	同轴线、矩型波导的规格与参数	(432)
参考书目		(435)

绪 论

一、微波的波长(或频率)范围

微波一般是指波长从 1m 到 1mm 的电磁波,相应的频率范围是 0.3~300GHz。也有文献将微波波长范围从 1m 划到 0.1mm,相应的频率范围是 0.3~3000GHz(本书采用此种分法)。微波在整个电磁波频谱中所处的位置见图 0.1。

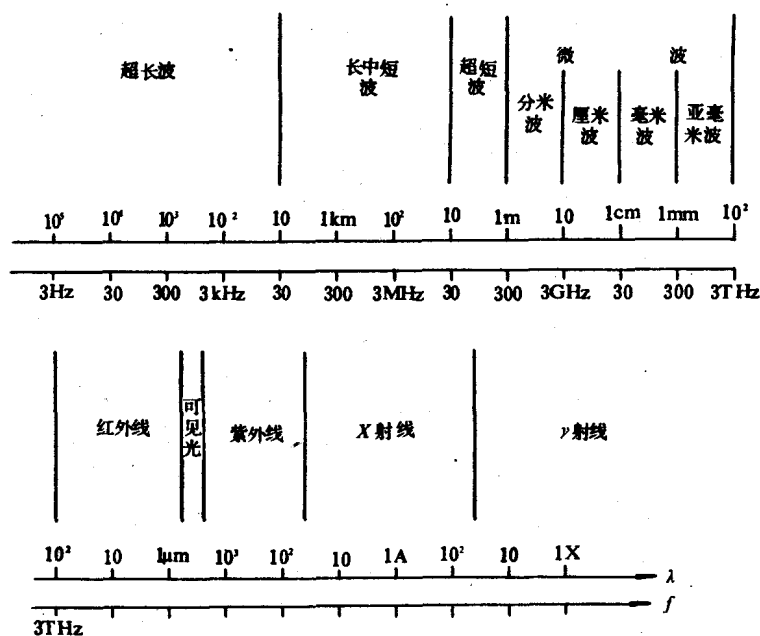


图 0.1

在实际应用中,为了方便,在微波波段内部又进行了细分,见表 0.1。

习惯上还把微波中常用波段分别以拉丁字母作代号,见表 0.2。

表 0.1 微波波段的细分

名 称	波长范围	频率范围
分米波	1m — 10 cm	300MHz — 3GHz
厘米波	10 cm — 1cm	3GHz — 30GHz
毫米波	1cm — 1mm	30GHz — 300GHz
亚毫米波	1mm — 0.1mm	300GHz — 3000GHz

表 0.2 微波常用波段代号

波段名称	波长范围(cm)	频率范围(GHz)
P	130 — 30	0.23 — 1
L	30 — 15	1 — 2
S	15 — 7.5	2 — 4
C	7.5 — 3.75	4 — 8
X	3.75 — 2.4	8 — 12.5
Ku	2.4 — 1.67	12.5 — 18
K	1.67 — 1.13	18 — 26.5
Ka	1.13 — 0.75	26.5 — 40
U	0.75 — 0.5	40 — 60
E	0.5 — 0.33	60 — 90
F	0.33 — 0.215	90 — 140
G	0.215 — 0.136	140 — 220
R	0.136 — 0.09	220 — 325

二、微波的主要特性

微波在电磁波频谱中所处的位置决定了它的特性。从图 0.1 可见,微波与低频(指长、中、短无线电波)相比,频率要高得多,波长短得多。因此,微波具有长、中、短电磁波所观察不到的若干特性。微波又与光波相邻,而具有光波的某些特性。概括起来主要有如下的特性。

1. 渡越时间效应及传播延时效应

渡越时间效应是指电子管内电子在极间渡越的时间引起的效应。此效应在微波频段,由于振荡周期与电子极间渡越时间的可比性而不能忽略,因此,研制微波管必须充分考虑它的影响。

传播延时效应是微波电路中电磁波从一处传输到另一处,因传播速度有限而需要一定的时间所产生的效应。它对任何频段的无线电波都是存在的。不过在低频时,电路的尺寸远远小于工作波长,传播延时远远小于振荡周期,延时可以忽略不计;可将整个电路中电压、电流的相位视为不随空间位置变化而仅随时间变化。但在微波波段,电路的尺寸与工作波长可以比拟,电磁波在其中的传播延时不能忽略,电路各点的场具有不同相位,它们既随时间变化也随空间变化。致使以基尔霍夫定律和电压、电流概念为基础的低频电路分析方法不能直接描述微波电路中发生的现象。微波电路的结构也有别于低频电路。因此,分析微波电路必须采用更一般的方法——场的分析方法(在一定条件下,工程上也将场等效为路来研究)。

2. 似光特性

与几何光学相似的特性,称之为“似光性”。如直线传播、反射、折射、衍射等等。微波波长越短越接近于光的性质。雷达就是基于这一特性,通过测定波的反射与发射的时间差来确定目标距离的。

3. 频带宽

由图 0.1 可以看出,微波所占据的频带比超短波以下的整个频

段要宽约 10000 倍。所以微波的信息容量是低频无线电波所无法比拟的。

4. 能穿透电离层

卫星通信之所以需用微波,正是利用了它的这一特性。

5. 水和含水的物质能吸收微波。

6. 微波能使生物获得选择性加热。

三、微波的应用

微波具有的上述重要特性,决定了它在实际应用中的广泛性。

雷达是微波传统应用的重要方面。现代雷达的性能,如作用距离、测试精度、分辨力等比过去有了很大提高,而且正向多目标多信息测量和自动化方向发展。雷达的应用非常广泛,除发展用于军事目的的各种大型和小型雷达外,还向着民用方向发展,如导航、空中交通管制、气象预报、微波遥感、汽车防撞、公安检测、防盗等。

通信早已进入了微波波段。微波通信的突出特点是频带宽、信息容量大。一个通道可以同时容纳上千路电话和若干路电视。微波有线通信系统,较早的有同轴电缆、毫米波金属圆波导,目前正向光纤通信发展。微波无线通信有微波接力通信和正在大力发展的卫星通信。

近年来,微波作为一种科学研究手段已经广泛地用于天文、气象、生物、物质结构、核物理、全息照像、快速数据处理与传输等方面,并由此而建立和发展了许多新的学科分支和技术。

微波作为一种能量可以用于对某些物质加热,如烘烤烟叶、木材、纸张、粮食以至烹调等,其优点是速度快、均匀,便于自动控制。此外,还可利用微波进行育种、刺激植物生长、除草、灭虫、杀菌、理疗和治癌等。当然,长时间、大剂量的微波辐射也会伤害人体,应注意控制与防护。

第一章 导波的一般特性

1.1 导波和导波系统

时变电场产生时变磁场,时变磁场又产生时变电场,如此进行下去,变化着的电场和磁场就能传播开去而形成电磁波。

电磁波可分为自由空间波和导波。自由空间波是指在无界空间传播的电磁波。导波是在含有不同媒质边界的空间传播的电磁波。而构成这种边界的装置则称为导波系统。它的作用是束缚并引导电磁波传播。

导波系统的具体结构随着不同频段和实际需要而有所不同。

在低频,导波系统的形式很简单,两根导线就可以引导电磁波。这是因为导线之间的距离相对电磁波的波长来说小得可以忽略,两导线上的电流反相,在空间同一点建立的场也反相并相互抵消,即低频电磁波沿导线传输几乎没有辐射损耗。同时频率低,导线上电阻损耗也可忽略。因此,低频对导波系统没有特殊要求。当频率增高致使波长与导线间的距离可以比拟时,情况就大不一样了,两导线的电流在空间建立的场不会反相相消而有辐射。频率高,导线电阻损耗也增大,因此任意的两根导线不能有效引导微波。

在微波波段,为减小双导线的辐射和电阻损耗,采用一种改进型双导线即平行双导体线。它是用线径较大、线间距较小的平行双导体构成(见图 1.1)。这种双导体线可用于微波低端——米波。随着频率的继续增加,平行双导体线辐射损耗严重。为避免辐射并进一步减少电阻损耗,出现了封闭式双导体导波系统即同轴线。它可用于分米波甚至厘米波。但频率增高到厘米波和毫米波波段时,由于同轴线横向尺寸变小(原因后析),内导体的损耗很大,功率容量也下降。为克服同轴线的这些缺点,经理论和实践证明,可以去掉其内导体而作成空

心单导体导波系统即柱面金属波导。它主要用于厘米波和毫米波。当频率增到毫米波、亚毫米波波段时,金属损耗已经很大,而在这些波段介质损耗还不算高,特别是低耗介质的出现,为发展新的导波系统——介质波导创造了条件。介质波导主要用于毫米波、亚毫米波乃至光波。

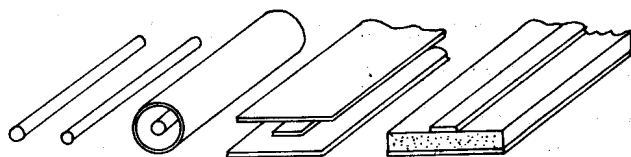
为适应微波集成电路的需要,又出现了各种金属和介质的平面导波系统——带状线、微带线、介质带线等。

目前导波系统的结构形式已多种多样,图 1.1 示出了部分常用的结构形式。不同形式的导波系统引导的电磁波一般具有不同的特点(这些特点在本书的后面将要讨论)。通常,按照被引导波的特点将各种导波系统分为三类。

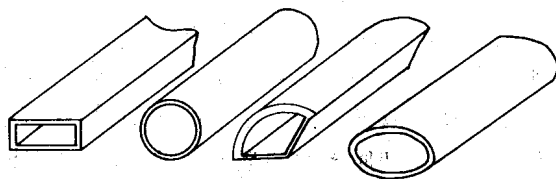
1. 传输线 如图 1.1(a)所示的平行双线、同轴线、带状线、微带线等。

2. 金属柱面波导 如图 1.1(b)所示的矩形、圆形、扇形、椭圆等波导。

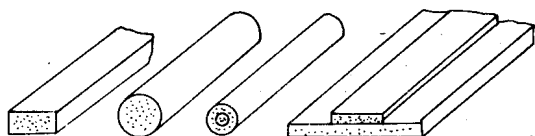
3. 开波导或表面波传输线 如图 1.1(c)所示的矩形、圆形介质波导、光纤、介质带线等。



(a)



(b)



(c)

图 1.1

1.2 导波的场分析

不同形式的导波系统所引导的电磁波虽然具有不同特点,但它们都属于导波,且有其共同的规律。本章就是研究导波的共性,即不考虑导波系统横向的具体边界,只讨论导波的一般特性。为方便起见,我们限定:(1)导波系统是匀直无限长的。也就是说导波系统的横截面形状、尺寸以及媒质参量沿传输方向(导波系统的轴向)不变。(2)导波随时间的变化为正弦变化,用复数表为 $e^{j\omega t}$ 。

前面已提到,分析微波波段的导波一般采用场分析法,在一定条件下,化场为路也采用等效电路方法,但根本的是场的分析方法。

用场方法研究导波,就是在导波系统边界条件限制下,求解电磁场的矢量波动方程,或称矢量亥姆霍兹方程,获得系统中任一点的电磁场,再由电磁场表达式分析导波的特性。矢量亥姆霍兹方程由麦克斯韦方程联立导出(见附录 II),其表示式为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (1.1a)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (1.1b)$$

式中 $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$, k 是无界媒质中电磁波的传播常数,媒质无耗时, $k = 2\pi/\lambda$ 。 λ 为无界媒质中电磁波的波长。

下面,以图 1.2 所示的结构代表各类匀直的导波系统,采用广义坐标 (u, v, z) , 其中 (u, v) 为横坐标, z 为纵坐标, z 与导波系统轴向一致。

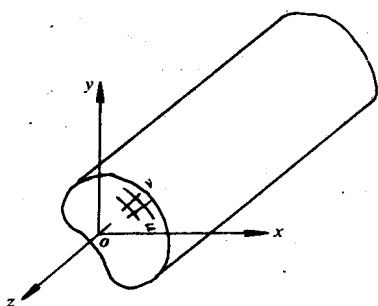


图 1.2

一 导波场的纵向分布和横向分布

导波的电场 $\vec{E}$ 、磁场 $\vec{H}$ 在空间一般是三维坐标的函数。亥姆霍兹方程是变量可分离的方程，常采用分离变量法求解。考虑到目前 z 方向没有边界，是电磁波的传播方向。而横截面形状未定，因此我们可先进行纵横分离。设电场、磁场为

$$\vec{E}(u, v, z) = \vec{e}(u, v)Z(z) = \vec{e}Z \quad (1.2a)$$

$$\vec{H}(u, v, z) = \vec{h}(u, v)Z(z) = \vec{h}Z \quad (1.2b)$$

式中 $\vec{e}(u, v)$ 、 $\vec{h}(u, v)$ 是横向坐标矢量函数，简写为 $\vec{e}$ 、 $\vec{h}$ ， $Z(z)$ 是纵向坐标函数，简写为 Z 。

将式(1.2a)代入式(1.1a)得

$$\nabla^2[\vec{e}Z] + k^2[\vec{e}Z] = 0 \quad (1.3)$$

考虑

$$\nabla^2 = \nabla_t^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

得

$$[\nabla_t^2 + k^2][\vec{e}Z] + \vec{e} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0$$

即

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -\frac{1}{\tilde{e}} (\nabla_{\perp}^2 + k^2) \tilde{e}$$

上式左端是 z 的函数与 u, v 无关, 右端是 u, v 的函数与 z 无关, 显然只有左右两端都等于某一常数时, 该方程才成立。令这个常数为 γ^2 , 于是得到电场的两个方程

$$\nabla_{\perp}^2 \tilde{e} + (k^2 + \gamma^2) \tilde{e} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} - \gamma^2 Z = 0 \quad (1.5)$$

以同样的步骤可得磁场的两个方程

$$\nabla_{\perp}^2 \tilde{h} + (k^2 + \gamma^2) \tilde{h} = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} - \gamma^2 Z = 0 \quad (1.7)$$

由式(1.4)至(1.7)可知, 场对坐标的关系可以分为场的横向坐标函数 $\tilde{e}, \tilde{h}$ 和纵向坐标函数 Z , 它们分别满足不同的方程。 $\tilde{e}, \tilde{h}$ 满足坐标 u, v 的二维矢量波动方程, Z 满足 z 坐标的二阶常微分方程。

式(1.4)和(1.6)又可分别写成如下形式

$$\nabla_{\perp}^2 \tilde{e} + k_c^2 \tilde{e} = 0 \quad (1.8a)$$

$$\nabla_{\perp}^2 \tilde{h} + k_c^2 \tilde{h} = 0 \quad (1.8b)$$

式中

$$k_c^2 = k^2 + \gamma^2 \quad (1.9)$$

k_c 为方程(1.8)的本征值, $\tilde{e}, \tilde{h}$ 为对应于本征值 k_c 的矢量本征函数。不难想象, 由于横向有边界限制, 导波在横截面上的分布是一种驻波状态。驻波的分布情况要由具体边界条件确定〔式(1.8)的解法见附录Ⅲ〕。方程(1.5)和(1.7)是形式完全相同的二阶常微分方程, 其通解为

$$Z = A^+ e^{-\gamma z} + A^- e^{\gamma z} \quad (1.10)$$

简记为

$$Z = A^{\pm} e^{\mp \gamma z} \quad (1.11)$$

将式(1.11)代入式(1.2a)和(1.2b)并乘上时间因子 $e^{j\omega t}$ 便得到导波场的通解形式

$$\vec{E}(u, v, z, t) = \vec{e}^{\pm} e^{j\omega t \mp \gamma z} \quad (1.12a)$$

$$\vec{H}(u, v, z, t) = \vec{h}^{\pm} e^{j\omega t \mp \gamma z} \quad (1.12b)$$

常数 $A^{\pm}$ 已分别包含在 $\vec{e}^{\pm}, \vec{h}^{\pm}$ 中。

由式(1.12)可以分析得到导波场沿导波系统纵向和横向分布的特点。

(一) 导波场沿纵向分布的特点

式(1.12)表明,导波电场、磁场沿 z 为指数变化,变化的特点决定于 γ 。当 γ 为实数时,场振幅沿 z 按指数规律变化,相位沿 z 不变;当 γ 为虚数时,场振幅沿 z 不变化,相位沿 z 变化;当 γ 为复数时,场振幅和相位沿 z 均按指数规律变化。根据波沿相位滞后方向传播的性质可知,上述 γ 为实数时,场沿 z 的变化不是波动,而是一种按指数规律分布的场; γ 为虚数和复数时,场沿 z 才是波动变化的。因此,人们常将前者称为导波截止状态,后者称为导波的传播状态。 γ 称为导波的传播常数。传播常数为复数时,表为

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.13)$$

式中, α 称为导波的衰减常数,它代表导波沿 z 单位长度上的衰减; β 称为导波的相位常数,它代表导波沿 z 单位长度上的相移。

下面进一步分析导波场的传播条件和截止条件。现假定导波系统无耗(既无金属损耗,也无介质损耗),这样由式(1.9)得

$$\gamma = \sqrt{k_c^2 - k^2}$$

式中 $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi/\lambda, k_c$ 从量纲考虑可以写成

$$k_c = \omega_c \sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi f_c \sqrt{\mu\epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda_c} \quad (1.14)$$

式中 f_c 或 λ_c 的意义待后说明。如此,传播常数为

$$\gamma = k \sqrt{\left(\frac{k_c}{k}\right)^2 - 1} = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 - 1} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2 - 1} \quad (1.15)$$

由上式可见,若 k_c^2 为正实数(由后面(1.84)可见,导波系统为金属柱面波导时 k_c^2 为正实数), γ 值可能出现以下三种情况: