

微波技术基础

下册

成都电讯工程学院

薛良金 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系高等学校工科电子类微波专业和天线专业的专业基础课统编教材之一，主要讲述微波技术的基本理论和基本分析方法。

全书分上下两册。上册讲述各种微波传输线和各种微波谐振器的特性及其设计。下册讲述各种微波元件（包括微波铁氧体元件）、微波慢波系统及微波电子管的工作原理及其应用。讲授时数约为120学时，其中上册80学时，下册40学时。

本书作为微波技术专业的教材，亦可供有关方面工作的工程技术人员及科研人员参考。

微波技术基础

(下册)

成都电讯工程学院

薛良金 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 14¹/₈ 329 千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：15034·2262 定价：1.50元

前 言

本书是《微波技术基础》统编教材的下册，适用于电磁场工程的有关专业。

本册包括：无源微波元件；微波铁氧体器件；周期性电磁慢波结构以及微波电子管四章。通过这部分内容的学习，要求学员了解各种无源微波元件的基本原理和应用，了解铁氧体的微波特性及其应用，学会周期性慢波结构的分析方法以及了解微波电子管的基本原理。

为了加强基础理论和基本技能的训练，使学员掌握微波结构的常用分析方法，并考虑到本专业电磁场理论基础较好，而且设有微波电路课程，故下册在选材上择重于基本理论和分析方法。第六章介绍了13种微波元件，其目的是定性地扩大学员有关传输线的使用知识面。对一些没有专门开《微波电路》课的院校希望增加设计公式和图表的要求考虑不多。各院校在处理这部分内容时，可根据实际情况增减。第七章前半部主要是介绍微波铁氧体的旋磁特性，即导磁率的张量特性和铁磁谐振特性。并对平面电磁波在其中传播时的法拉第旋转效应和双折射效应作了理论分析，为后半部定性介绍器件时打下了一定的理论基础。第八章是作为一种微波结构的分析方法来介绍的，没有具体介绍许多实际使用的结构，选用单位可以按其需要补充其他材料。第九章以波动观点介绍了几种常用的微波电子管。

下册内容涉及面广，材料较多。编者是基于西安教材会议上与会院校希望能按 R. E. Collin, "Foundations for microwave engineering" 为蓝本，编写出一本电磁场工程专业适用的教材为依据来处理这些材料的。在编写过程中，西北电讯工程学院廖承恩等同志提出了不少宝贵的意见。我院张有纲、王祖耆副教授最后审阅了第七、八、九章书稿。刘述章、刘仁厚、柳维君等同志对第六章提出了不少建设性意见。林为干教授在本书编写过程中给予编者不少帮助。对于他们的热情指导和帮助，编者在此表示由衷的感谢！

由于时间紧迫，并限于编者学识水平，书中错误和不妥之处，在所难免，希读者批评指正。

编 者

目 录

第六章 无源微波元件	1	§ 7.8 YIG 特性及其应用	128
§ 6.1 概述	1	附录 常数和转换因子	135
§ 6.2 连接元件	2	第八章 周期性电磁慢波结构	136
§ 6.3 过渡元件	5	§ 8.1 概述	136
§ 6.4 弯曲和扭转	12	§ 8.2 容性加载传输线的电路分析	140
§ 6.5 分支和桥式元件	16	§ 8.3 周期性加载结构的波分析	146
§ 6.6 终端元件	23	§ 8.4 端接负载和匹配问题	149
§ 6.7 衰减器和移相器	29	§ 8.5 周期性结构的色散特性	152
§ 6.8 匹配元件和调配器	36	§ 8.6 傅隆盖(Floquet)定理和空间谐波	156
§ 6.9 波长计和晶体检波器	45	§ 8.7 行波管中所用的周期性结构	158
§ 6.10 驻波测量线	50	§ 8.8 护套螺旋线	167
§ 6.11 定向耦合器	57	§ 8.9 螺旋线的一般特性	171
§ 6.12 微波滤波器	64	第九章 微波电子管	173
§ 6.13 波导的激励与耦合元件	72	§ 9.1 概述	173
§ 6.14 天线开关和旋转关节	74	§ 9.2 直流状态下的电子束	174
第七章 微波铁氧体器件	80	§ 9.3 限流电子束上的空间电荷波	177
§ 7.1 概述	80	§ 9.4 未聚焦电子束中的空间电荷波	182
§ 7.2 铁氧体的微波特性 张量导磁率和 铁磁谐振现象	82	§ 9.5 交变功率关系	187
§ 7.3 均匀平面波在旋磁媒质中的 传播特性	94	§ 9.6 速度调制	189
§ 7.4 电磁波在装有铁氧体的波导中的 传播问题	102	§ 9.7 双腔速调管原理	195
§ 7.5 隔离器	110	§ 9.8 反射速调管	202
§ 7.6 铁氧体移相器	115	§ 9.9 微波磁控管原理	207
§ 7.7 环行器	122	§ 9.10 “O”型行波管	211
		§ 9.11 “M”型行波管	218
		§ 9.12 返波管简介	219
		主要参考资料	222

第六章 无源微波元件

§ 6.1 概 述

在前面几章中，我们已经从理论上研究了电磁波在几种常用微波传输线中的传输问题。本章讨论微波系统中所用的一些基本元件。为了便于比较，我们以波导元件为主，并尽可能把常用的几种微波传输线所构成的作用相同的元件归纳在一起加以叙述。

本章所讨论的微波元件都是无源的，而且它们一般都工作在该传输线的主模，即同轴线、带状线和微带元件都工作在 TEM 模或准 TEM 模，矩形波导工作在 TE_{10} 模，圆波导工作在 TE_{11} 模（个别元件除外）。对于应用于高次模式的元件一般未予介绍。

微波元件及其组件品种繁多，涉及面广，要对它们作详细深入的研究应有广泛的数学基础和一定的工艺结构知识。鉴于课程的分工，我们在此只对元件作定性分析，即着重介绍元件的工作原理，基本指标和设计上应考虑的主要问题。对于设计上的具体实现方法一般不予讨论。这是因为对很多具体的微波元件来说，固然可以直接利用特定边界条件下电磁场方程的解来研究，但实用上除极其简单的情况以外，这样作是相当麻烦甚至是无法实现的。而采用电路的分析方法却有简单明了易于实现的优点。于是，有关微波元件的工程设计问题，现在几乎全部采用网络综合方法。按照课程分工，有关这部份内容将在《微波网络及其应用》课中学习。为了加深读者对微波元件工作原理的理解，本章也要讲述一些设计上的考虑，给出一些设计公式和图表曲线。

同轴线的设计虽然有各种最佳考虑，但目前广泛使用的只是特性阻抗为 75 欧姆和 50 欧姆的两种，前者对给定的同轴线外径，衰减较小，而后者则兼有低损耗和高传输功率两个优点。最近十多年来，随着微带传输线和微带元件的迅速发展，特性阻抗为 50 欧姆的同轴线应用越来越广泛。它们的尺寸可根据频率范围来选择。

目前还没有用带状线和微带作成的测试系统，因此，带状线、微带及其元件的测试都要转换到同轴系统去进行。为了减少过渡变换，同轴线和带状线、微带目前大都按 50 欧姆特性阻抗进行设计。

刚性矩形波导的设计已经标准化和系列化。我国矩形波导系列的标准尺寸见上册附录。在附录中我们列出了相应波导的工作频率范围及其电气特性。圆波导虽然也有某些标准尺寸，但在许多场合下，设计者可以根据自己的方便去选择。

波导系统大部份是刚性连接。在某些可动场合，却需要软波导。矩形软波导结构形式如图 6.1-1，它由垂直于轴线的近似于矩形的皱纹管组成，结构工艺应保证其特性阻抗与矩形波导的特性阻抗相同，否则就要引起反射。一般来说，皱纹管软波导的管壁很薄，以便于弯曲。为了保证经久耐用，常在波导管外壁包上一层保护物。

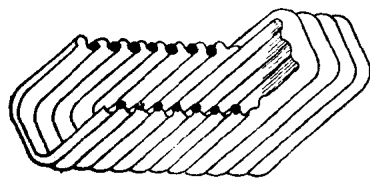


图 6.1-1 矩形软波导

由于微波元件种类很多，同类元件又有许多不同的结构形式，加之新型元件还在不断出现，因此，本章不可能对所有微波元件作全面介绍，而只能按这些元件在微波系统中的作用择其典型作原理上的分析，并尽可能介绍其它形式的同类元件。

§ 6.2 连接元件

在实际工作中，需要把各种微波元件连接起来组成微波系统。这些微波元件连接的好坏，对整个传输系统的功能要产生重大影响。因为，连接不好就要在连接处引起附加反射。这样，当系统作测试用时，就将影响测试精度；而当系统作大功率馈线用时，就可能因其接触不良而打火。另外，连接不良还要增加传输损耗，从而降低系统的传输效率。因此，连接问题是微波系统中一个十分重要的问题。

把两段尺寸、形状、工作模式都相同的传输线连接在一起的装置称为连接元件。传输线的连接元件包括刚性同轴接头，同轴电缆接头，矩形波导接头和圆波导接头。

对连接元件的共同要求是：连接点的电接触良好，无泄漏功率，匹配良好，具有满足要求的工作频带和使用时装拆方便等。

图 6.2-1 为理想同轴线的直接连接和抗流连接的结构示意图。直接连接时，要求同轴线内外导体理想地结合在一个平面上，并且轴线对准。最常用的办法是采用图 6.2-1(a) 所示的介质垫圈结构。只要垫圈的结构形式设计得当（如采用一定的补偿措施），就可以保证同轴线内外导体共轴线连接而不出现明显的反射。

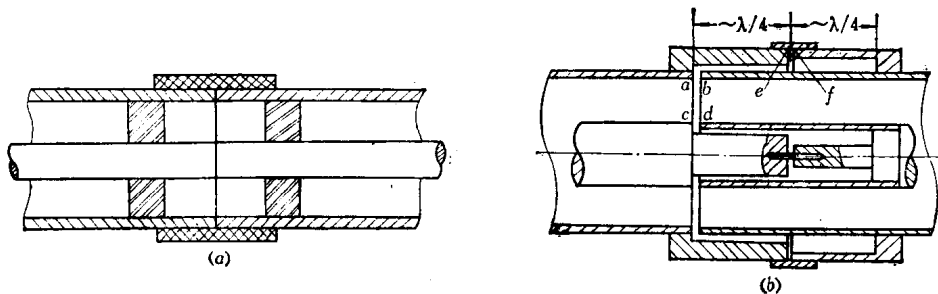


图 6.2-1 同轴线的连接
(a) 直接连接；(b) 抗流连接。

抗流连接不要求内外导体在结构上直接接触，而由一段 $1/2$ 波长短路线来保证其良好的电接触性能。如图 6.2-1(b) 所示，内外导体隙缝都是一段 $1/2$ 波长短路线，所以由 a ， b 和 c ， d 看向各自的短路点，其输入阻抗均为零，故电性能上相当于该隙缝不存在，即内外导体有良好的电接触。而在紧固套处，隙缝处于离短路点 $1/4$ 波长位置，故 e ， f 处于电流的波节位置，因而接触点不会引起损耗。

实用同轴线的接头可以分为：接插头和平接头。

同轴接插头结构示于图 6.2-2(a)，它由互相配合的插头和插座组成。图中内导体一个做成插塞，另一个做成插座，用插塞和插座连接。外导体则通过螺纹或卡口连接。通常，在做成插座的内导体上开槽，并用富有弹性的材料如铍青铜或硅锰青铜做成，以便靠接触处的径向弹力保证插塞和插座的良好接触。这类接头是目前国内广泛使用的接头。

由于插座开槽，外导体的有效直径就相应变大，而内导体的有效直径则相应变小。于是同轴线的特性阻抗就要增高。但因其相对变化值一般不大，故通常可以不予考虑。另外，同轴接插头在相连接时，只能保证外导体端面紧密接触，而不可能使内外导体端面都同时紧密接触，否则就可能在插头和插座连接时把内导体顶弯。为此，制造工艺上常将内导体端面留一间隙，如图 6.2-2(b) 所示。这个间隙也将导致特性阻抗的改变，因此产生驻波。

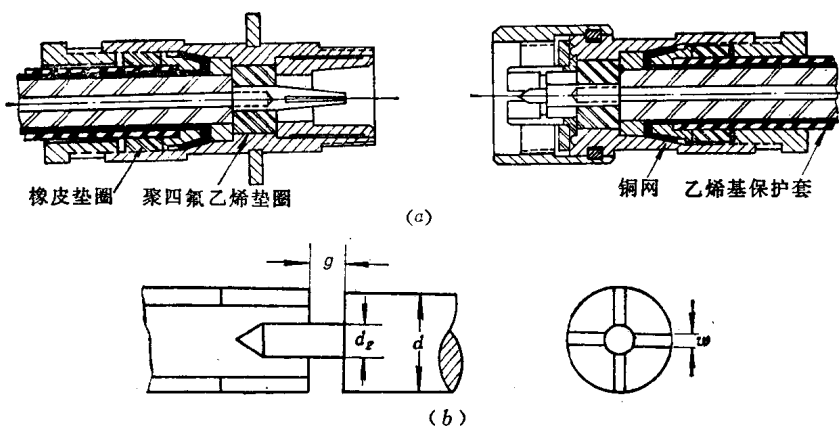


图 6.2-2 同轴接插头及其内导体的连接

连同内导体开槽引入的驻波一并考虑，其驻波比可以按下式计算

$$\rho = 1 + 2.52fg \ln \left(\frac{\pi d - Nw}{\pi d_g - Nw} \right) \quad (6.2-1)$$

式中， f 代表频率，单位为千兆赫， g 为间隙宽度， d_g 为插塞的直径， d 为内导体直径， w 为槽宽，单位均为毫米， N 为插座上开槽数。

和同轴线特性一样，接插头内外导体尺寸公差、椭圆、偏心等各种机械缺陷，介质支撑，电镀涂覆，装配质量等都直接影响它的性能。尤其是接触间隙和偏心，严重不合格时还将造成机械损坏。

接插头的优点是制造比较容易，但有许多缺点：反射大，频带窄，多次接插由于磨损使接触性能变坏，并且插头和插座必须配对，因而给使用带来一些不便。

对特别要求精密的接插头，应尽量减小插座内导体的开槽宽度 w （因槽缝宽度 w 在阻抗误差中是以平方关系出现的）。现已有内导体不开槽的结构。在这种结构中，外导体靠外螺母上紧时实现端面的可靠接触，内导体也采用端面接触。另外，还必须尽量减小接触间隙，提高内、外导体的加工精度，避免椭圆、偏心等机械缺陷和介质支撑，电镀涂覆等所造成的误差。经过这些改进以后，接插头的指标可望有所提高。

我国目前的微波接插头型号规格，四机部标准 SJ498-73 已有规定，可以参照选用。

另一种同轴连接头是由于宽带要求而发展起来的平接头。这种接头可以有很小的驻波比和极宽的频带。其特点是：（1）内外导体都采用端面接触，且内导体端面在未连接时略为伸出外导体端面，其中装有弹簧，连接后依靠弹簧的轴向压力保证端面接触良好，（2）结构上采用宽带设计原则，如尽量保证元件的每一段特性阻抗恒定，对不可避免的阻抗不连续段采用共面补偿措施，减小机械公差，采用多层屏蔽（外导体、定位环、连接螺母等）使射频泄漏显著降低。

PJ7 同轴平接头头部结构示于图 6.2-3。

平接头的精度要求比接插头高得多，其内、外导体的公差都以微米计，各关键尺寸公差和同心度都要求二级甚至一级精度，其绝缘垫圈也相应地要精确设计，以便得到最小的反射。这些都给平接头的制造带来困难。当然，随着工艺水平的提高，这种接头必将普遍使用。

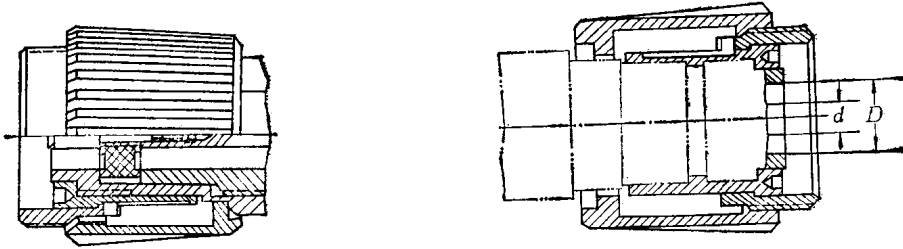


图 6.2-3 PJ7 型平接头头部结构

目前，国产平接头广泛选用的尺寸是外导体内径为 14 毫米 (PJ14 系列) 和 7 毫米 (PJ7 系列) 的两种。从提高使用频率范围和功率容量考虑，今后可以发展外导体内径为 3.5 毫米 (PJ3 系列) 和 21 毫米 (PJ21 系列) 的两种。有关这些平接头的具体指标可参考四机部标准 SJ498-73。

在实际工作中，同轴传输线不但必须具有接头，还常常需要进行接头间的转换。对这些转换接头的要求主要是引入的附加反射越小越好，它的性能除与两端的接头有直接关系外，还与介质支撑，尤其是与过渡段的结构有关。

国产转接头型号规格见四机部标准 SJ498-73 中的规定。

波导的连接装置有平法兰盘和抗流法兰盘两种类型，图 6.2-4 为它们的结构示意图。平面法兰的优点是工作频带宽，多用于小功率精密测量系统中。但对机械加工的要求高，特别是接触表面的加工精度要求更高。这种接头用于大功率时，往往会由于某些不可避免的不连续性而引起打火，使波导系统发生严重失配，且法兰本身的接触表面也被破坏。设计良好的平法兰，在极宽的频带内，其驻波系数可以小于 1.01。

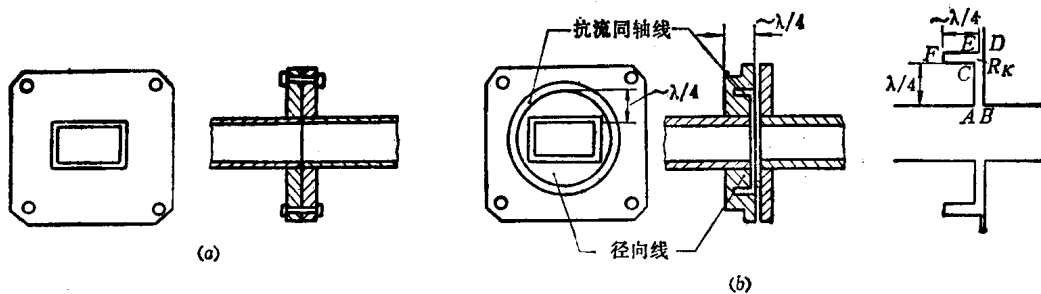


图 6.2-4 波导连接

(a) 平面法兰连接；(b) 抗流法兰及其等效电路。

在大功率雷达馈线中广泛采用抗流法兰连接，其结构如图 6.2-4(b) 所示。抗流法兰连接并不要求机械上的直接接触，而是利用半波长短路线特性来实现电气上的良好接触。图中 EF 部分为四分之一 TE_{11} 模式波长的短路同轴线， BD 部分是四分之一 TE_{11} 模式波

长的径向传输线。由于抗流槽深度为 $1/4$ 同轴线 TE_{11} 模式波长，接触电阻 R_k 就处于高频电流波节位置（ E ， D 两点之间）上，因而不会引起损耗。另外，即使法兰盘完全没有接触，其间的间隙也没有辐射，从 C 点看进去的输入阻抗为无穷大。然后又经过 $1/4$ 波长径向线的变换，在 AB 处看进去的输入阻抗为零，达到了高频短路，从而保证了良好的电接触。

波导法兰盘的设计已经标准化，国产型号规格参见四机部标准 SJ213-66。

设计良好的抗流法兰，连接时的驻波比也可小于 1.01。在大功率馈电设备中，用这种连接可以减轻由于接触不良所引起的损耗和打火击穿的危险。抗流法兰盘的缺点是工作频带不如平面法兰宽，故宽频带工作时宜用平法兰连接。

工作于充气或真空条件下的波导系统还要求在波导连接处有一定的密封机构。常用的有橡皮密封和金属密封，前者在四机部标准 SJ213-66 中已有规定，后者一般在法兰上加工成互配的刀口，并在连接法兰之间嵌以软金属，利用紧固螺钉进行密封。

§ 6.3 过渡元件

一个微波系统往往同时使用多种传输线。过渡元件就是用来连接形式不同，或形式相同但尺寸不同的传输线用的。不同形式传输线的过渡元件包括同轴-波导，同轴-带状线，同轴-微带，波导-微带和矩形波导-圆波导的过渡，以及新出现的共面波导，槽线和同轴线之间，微带和槽线之间的过渡等。这类过渡元件实际担负着模式变换和阻抗匹配的双重任务，因此，为了尽量减少和避免过渡段所出现的高次模式，过渡元件往往做成渐变的形式。

将微波能量有效地从同轴线传输至波导，或相反地从波导传输至同轴线，就要采用同轴-波导过渡。这种过渡在波导激励，波导和同轴系统的转换以及一些微波电子器件的输出装置中应用很广。

实际使用中，除要求同轴-波导过渡有良好的匹配外，有时还要求一定的频带宽度和功率容量。通常，在 20~30% 的频带内，这种过渡的驻波比在 1.05~1.10 之间。由于这种过渡计算复杂，且都只能是一些近似结果，故对它的精确设计必须通过实验调试来修正。图 6.3-1 表示同轴-波导过渡的几种结构。其中 (a) 为窄带小功率过渡，它具有结构简单的优点。为扩展其频带，可以采用图 (b)，(c) 的改进措施，即将探针改成探球的结构或 $\lambda/4$ 短截线支撑的结构。(d) 为宽带中功率过渡，称为横梁式过渡装置。其优点是结构简单，频宽可达 $\pm 10\%$ 左右。(e) 为大功率同轴波导过渡，亦称门钮式过渡装置。这种结构有很大的功率容量，而且与匹配膜片配合使用时工作频带也较宽。其缺点是加工比较困难。

还有一些其它形式的同轴-波导过渡结构，在此就不一一列举了。

图 6.3-2 为同轴-带状线过渡的两种典型方式，通常称为平行过渡 (a) 和垂直过渡 (b)。这两种结构都是把同轴线外导体与带状线接地板直接相接，而将内导体过渡成带状线的中心导体。平行过渡的频带很宽，可用频率高，比垂直过渡更为常用。50 欧姆空气介质带状线与 50 欧姆同轴线之间的过渡可以在 1.7~7.4 千兆赫的频带内使驻波比小于 1.05。垂直过渡适用于同轴线与带状线特性阻抗和尺寸相差较大的场合。为了匹配，必须

采用匹配元件，常用的有开路短线，也可用匹配螺钉。采用螺钉匹配时，螺钉数或靠近连接处的位置由实验决定。另外，为抑制可能出现的高次模，还必须有相应的装置。匹配良好的垂直过渡，在 2~8 千兆赫的频带内，驻波比可以小于 1.2。

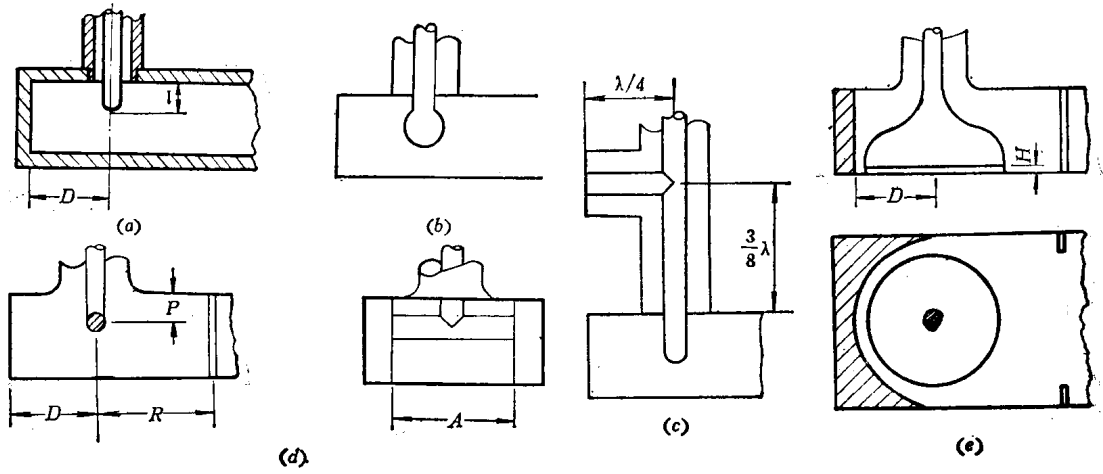


图 6.3-1 同轴-波导过渡

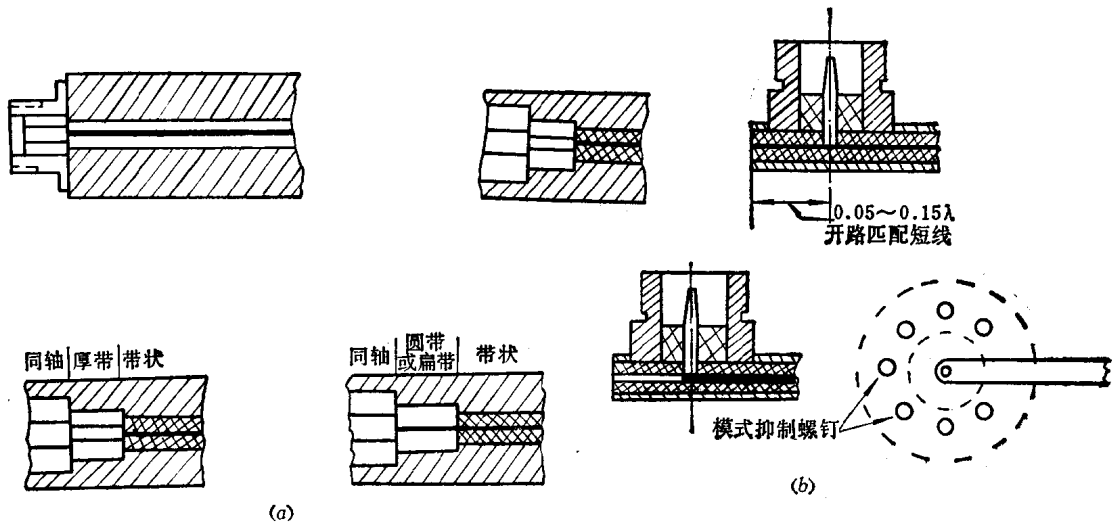


图 6.3-2 同轴-带状线过渡

(a) 平行过渡及解决尺寸突跳的方法；(b) 垂直过渡及补偿方法。

如果同轴线和带状线的特性阻抗或尺寸相差太大，还必须采用中间过渡段来解决由于这种相差而引起的突跳问题，如图 6.3-2(a) 所示。

同轴-微带过渡也有垂直过渡和水平过渡两类。由于微带主要用于集成电路，多采用氧化铝陶瓷作基片，垂直过渡要打孔穿透基片，不如平行过渡来得方便，所以，实用中主要采用平行过渡，如图 6.3-3 所示。

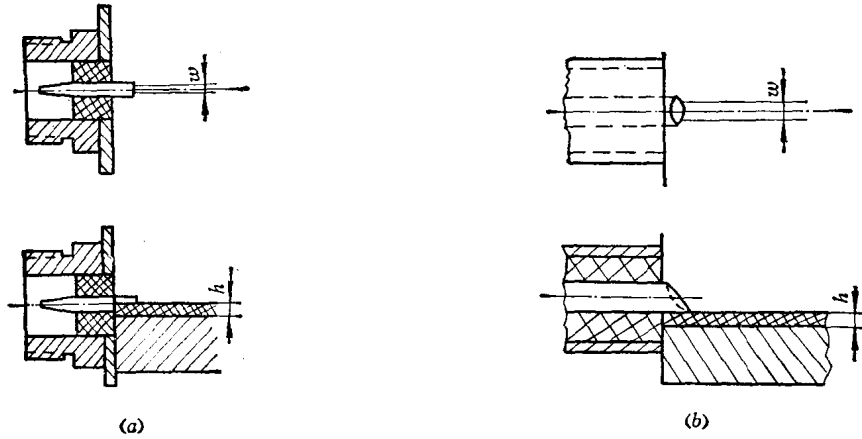


图 6.3-3 同轴-微带过渡
(a) 切割圆柱补偿；(b) 切割锥面补偿。

波导-带状线和波导-微带的过渡结构示例分别如图 6.3-4 和图 6.3-5 所示。由于微带的场结构大体上与同轴线相同，故这些过渡类似于同轴-波导过渡。

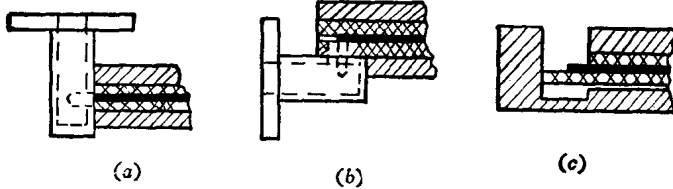


图 6.3-4 波导-带状线过渡
(a) 垂直过渡；(b) 探针耦合水平过渡；(c) 印刷式带状内导体水平过渡。

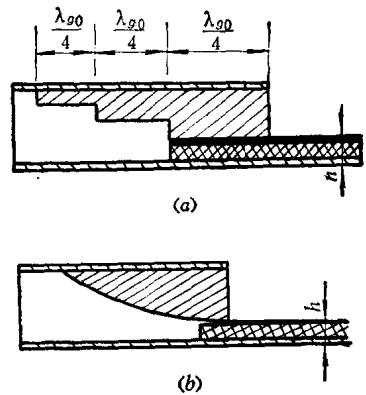


图 6.3-5 波导-微带过渡
(a) 阶梯脊波导式；(b) 渐变脊波导式。

从以上各种过渡器的结构示意图可以看出，两种不同传输线之间的过渡，不是两种传输线的简单“对接”，而必须在过渡区域采取不同形式的补偿措施。这是因为过渡区域存在的不连续性会影响电磁能量的传输。关于具体补偿结构的形状和尺寸，大都经过实验调整决定。

矩形波导和圆波导之间的过渡有好几种形式。从这些过渡的几何特征可分为渐变过渡、阶梯过渡和垂直过渡等。从模式变换来看，又可以分成：矩形波导中的 TE_{10} 模式与圆波导中的 TE_{11} 模式之间的过渡，通常把它们表示为 $TE_{10}^{\square}-TE_{11}^{\circ}$ 过渡，矩形波导 TE_{10} 模式与圆波导 TM_{01} 模式之间的过渡，即 $TE_{10}^{\square}-TM_{01}^{\circ}$ 过渡，以及矩形波导 TE_{10} 模式与圆波导 TE_{01} 模式之间的过渡，也就是 $TE_{10}^{\square}-TE_{01}^{\circ}$ 过渡等三种形式。

下面我们简单介绍一下这些过渡器的几种结构形式。

图 6.3-6 为 $TE_{10}^{\square}-TE_{11}^{\circ}$ 模式过渡器的一种结构形式，因为它的过渡部分近乎直线，故

亦称直线锥形过渡器。由图可见，过渡段的作用是把矩形波导中的 TE_{10} 模式逐渐变换成圆波导中的 TE_{11} 模式。如果渐变部分的长度 l 等于几个波导波长，其驻波比可以做到小于 1.1，且频带宽度可达 (10~15)%。长度较长和难于加工是这种过渡器的缺点。

阶梯突变式 $TE_{10}^{\square}-TE_{11}^{\circ}$ 过渡器，是由矩形波导和圆波导之间加一段或几段“切割”过的圆波导段组成的，也称为切割圆波导阶梯变换器。这类过渡器按其阶梯数可分为单级（节）过渡和多级（节）过渡。单级过渡器如图 6.3-7 所示，其切割圆波导段一般取四分之一切割圆波导的波导波长。由于是切割过的圆波导，故其波导波长既不等于圆波导被切割前的波导波长，也不等于与之相连接的矩形波导的波导波长。另外，这种过渡器的中间段长度与波长密切相关，所以在一定驻波比的要求下，它是一种窄带过渡。



图 6.3-6 $TE_{10}^{\square}-TE_{11}^{\circ}$ 直线过渡器

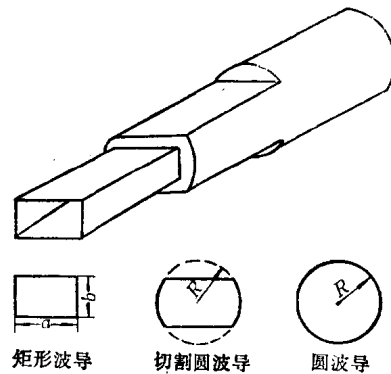


图 6.3-7 单级阶梯式 $TE_{10}^{\square}-TE_{11}^{\circ}$ 过渡

单级 $\lambda_g/4$ 阶梯过渡器的另一种结构形式如图 6.3-8 所示。实验证明，这种结构在性能上比单级切割圆波导过渡器要好些。

鉴于矩形波导与圆波导相接处的不连续电抗目前还无法计算，因此要设计出质量高的单级阶梯过渡器是相当困难的。现有的办法是采用多级过渡以减少不连续电抗的影响。多级过渡有三种过渡方式：①把矩形波导先变成正方波导，然后与圆波导相接；②只沿矩形波导 b 方向扩张，然后过渡到圆波导；③矩形波导 a, b 方向均变化最后与圆波导相接。这三种过渡形式的过渡段可以是跳跃式变化，亦可以是连续式的变化。

采用多级过渡可以扩展阶梯过渡器的工作频带。

在实际工作中，有时需要由矩形波导的 TE_{10} 模式成直角地过渡到圆形波导的 TE_{11} 模式，这就是我们所说的矩形波导到圆波导的垂直过渡。这类过渡一般有串联耦合与并联耦合两种方式。在串联耦合中，矩形波导的宽边与圆波导的轴线正交，如图 6.3-9 所示，这样在圆形波导中 TE_{11} 模式的电场方向平行于矩形波导的轴线。为了使连接部分匹配，在图 6.3-9(a) 中采用了楔形装置，有时还加有其它匹配元件如电感膜片，如图 6.3-9(b)，以使匹配更臻完善。

在并联耦合垂直过渡中，矩形波导的宽边与圆波导的轴线平行，如图 6.3-10 所示。为了获得匹配，可在圆波导的一臂接入可调短路活塞，或在适当地点加置其它匹配元件。

现在我们来讨论由矩形波导中的 TE_{10} 模式过渡为圆波导的 TM_{01} 模式的问题。圆波导 TM_{01} 模式的截止波长比 TE_{11} 模式的截止波长短，即它并不是圆波导的主模，但因它的

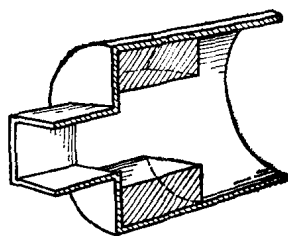


图 6.3-8 $\lambda_g/4$ 阶梯过渡器的另一种结构形式

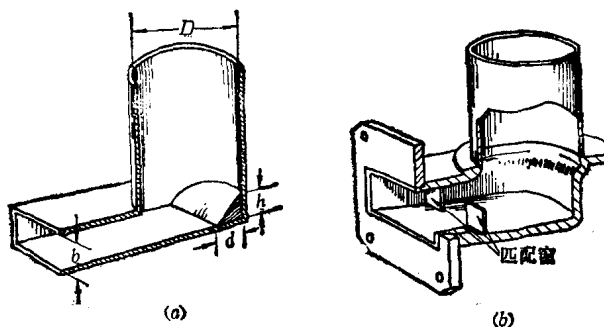


图 6.3-9 矩形波导-圆波导垂直过渡之一（串联耦合）
(a) 楔形匹配方式；(b) 膜片匹配方式。

场结构具有轴对称特性，故在扫描天线装置中作旋转关节颇有价值。这种过渡装置可以采用图 6.3-9 的结构形式，即在矩形波导的宽壁平面接入圆波导的结构，后者的尺寸应设计到能使 TM_{01} 模式通过。自然，在这种情况下， TE_{11} 模式是不可避免的，应该加置其它抑制机构予以消除。此外，为了获得匹配，在矩形波导和圆波导内还应加置匹配元件。图 6.3-11 为 $TE_{10}^{\square}-TM_{01}^{\circ}$ 模式过渡的另一种结构形式。在这种过渡中，圆波导穿过矩形波导在另一端短路，当短路部分的长度为 TE_{11} 模式的四分之一波长（由短路点到矩形波导中心）时，在圆波导中就可获得较纯的 TM_{01} 模式。由于圆波导 TE_{11} 模式的四分之一波长接近于 TM_{01} 模式的四分之一波长，故一般结构上都采用 TE_{11} 模式的四分之三波长作为短路段的长度，此时经由实验选择短路段的直径，并使其长度对 TM_{01} 模式为二分之一波长。由这种结构所产生的驻波比约为 1.5，可借助电感膜片进行匹配。

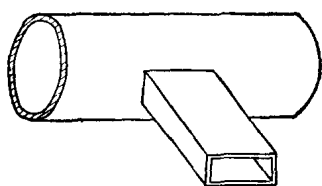


图 6.3-10 矩形波导-圆波导垂直过渡之二
(并联耦合)

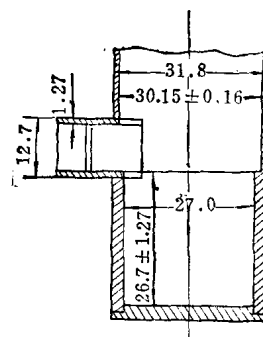


图 6.3-11 帕莱斯登 $TE_{10}^{\square}-TM_{01}^{\circ}$ 过渡装置

为避免圆波导伸出到矩形波导下面，目前广泛采用前已提及的模式滤波器来消除 TE_{11} 模式，图 6.3-12 为采用金属圆环消除 TE_{11} 模式的结构。

相同形式传输线之间的过渡元件，不存在模式变换的问题，只起阻抗匹配的作用。实质上，它是一种“阻抗匹配器”。这类过渡器有两种形式，一种采用渐变过渡，称为渐变过渡器（渐变形式有好几种，如直线式，指数线式等，其中以直线式较为常用）；另一种采用阶梯形过渡，称为阶梯过渡器。在满足一定驻波比指标下，渐变过渡器尺寸较长，但易于加工，阶梯过渡器尺寸较短，加工较困难。

图 6.3-13 为直线式波导过渡器和同轴过渡器的结构示意图。当取渐变段的长度 L 为半

波长的整数倍时，反射较小，且渐变段越长，反射越小。所以，在空间不受限制的地方，这种过渡用得较多。

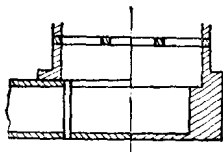


图 6.3-12 圆波导TE₁₁模式滤波结构

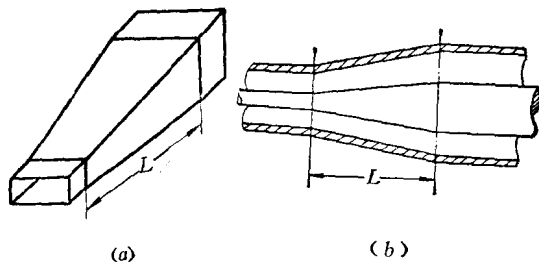


图 6.3-13 直线过渡
(a) 波导直线过渡；(b) 同轴线直线过渡。

图 6.3-14 和图 6.3-15 所示为阶梯过渡器，其过渡段是一段不均匀传输线，它在沿电磁波的传输方向上，特性阻抗采取阶梯式突变。多阶梯过渡器作为两种特性阻抗不同的传输线的宽带匹配之用。因为采用多阶梯变换之后，由于阶梯增加，相邻两个阶梯之间的不连续电容减小，而各个阶梯间的反射可以互相抵消，因而频带加宽。

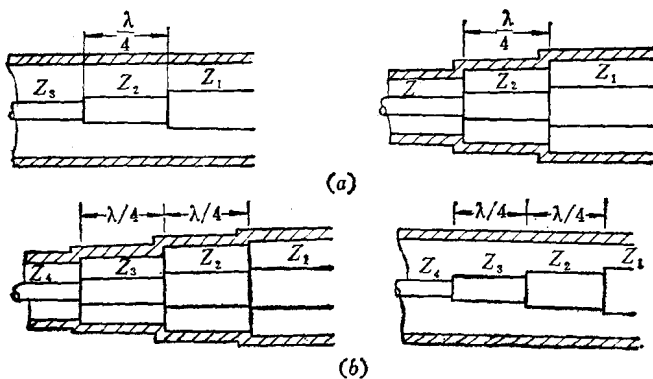


图 6.3-14 同轴阶梯过渡器
(a) 单节 $\lambda/4$ 变换过渡；(b) 双节 $\lambda/4$ 变换过渡。

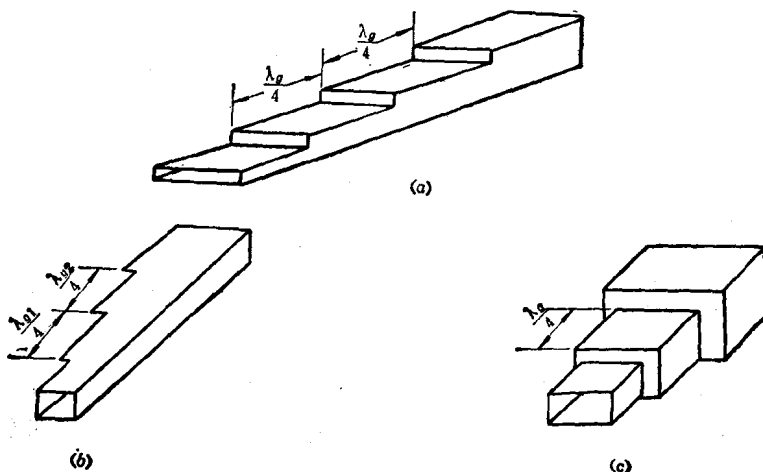


图 6.3-15 波导阶梯过渡器
(a) 宽边不变；(b) 窄边不变；(c) 宽、窄边都变。

我们可以用两种方法来研究阶梯变换器：一种是根据给定的具体结构来分析其特性，并计算其参数，这种方法叫做分析方法。其原则是根据已知尺寸变化的规律，经过分析计算出反射系数 Γ 和长度 L 的关系。另一种方法是根据给定的工作特性参数来设计满足它的具体结构，这种方法称为综合方法。这两种方法合在一起，就是我们通常所说的微波网络的分析和综合问题。有关这一课题的详细内容，在另一门课程中要作全面研究。为了能定性地说明我们在本章中所讨论的一些微波元件，在此对它作些概略地介绍。

上面已经提到，综合法就是根据给定的条件来设计具体结构，那么，如何给出工作特性呢？所谓工作特性，也就是一种变换函数关系。因此，给定工作特性也就是选择一种变换函数。那么，是否随便一种函数关系都可以呢？理论和实践证明，随便选择一种函数关系往往设计不出具体结构，即使设计出来也很复杂，缺点很多。所以，选择函数的原则必须是既能设计出具体结构而又能使其性能良好。经过理论分析和实践证明，比较好的函数有两种，一种是最大平滑函数，另一种是切比雪夫函数（最近也有用椭圆函数的）。用这两种函数设计出来的阶梯过渡器，分别称为最大平滑变换过渡器和切比雪夫函数过渡器。

图 6.3-14 和图 6.3-15 中阶梯变换器的阶梯数目（即级数）、阶梯长度和阶梯高度或同轴阶梯直径是由选定的过渡函数并考虑到一定的边缘影响以后决定的。

切比雪夫过渡与最大平滑过渡比较，前者在通带内频率响应特性有起伏，通带外特性曲线上升较陡。在工作频带内最大许可反射系数和一定的带宽条件下，满足性能的阶梯数较少，因而长度也最短，故工程上有时称之为最佳过渡。后者在通带内频响特性平坦，通带外上升较缓慢。实用中可根据不同要求选择使用。

在带状线和微带中，过渡器只担负阻抗匹配任务，其实际结构示于图 6.3-16。由图可见，它们只是简单地按照某一规律改变中心导带的宽度。对阶梯过渡来说，阶梯长度一般取四分之一带内波长。同波导阶梯过渡一样，单节过渡对频率非常敏感，只适用于窄带。在需要宽带匹配的场所，应采用多节阶梯过渡或各种渐变过渡。多节阶梯过渡也有切比雪夫过渡和最大平滑过渡两种。渐变过渡的形式很多，常用的有指数线过渡，切比雪夫过渡，无不连续近似过渡[●]以及直线过渡等，如图 6.3-17 所示。

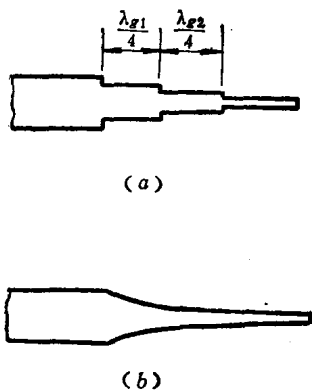


图 6.3-16 带状线或微带过渡器的中心导带
(a) 阶梯过渡；(b) 渐变过渡。

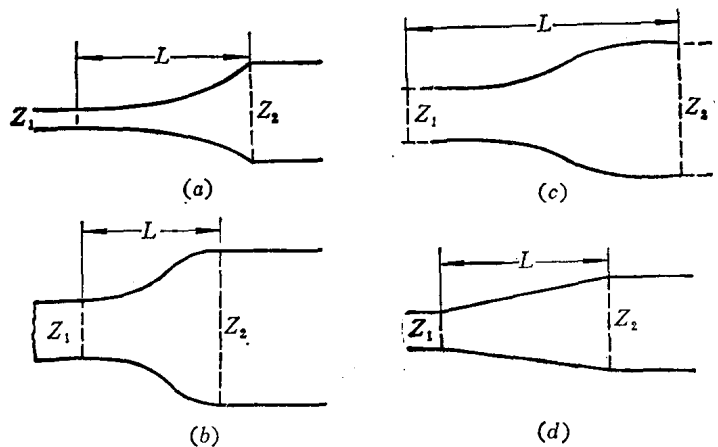


图 6.3-17 渐变过渡的几种常用形式
(a) 指数线过渡；(b) 切比雪夫线过渡；(c) 无不连续近似过渡；(d) 直线过渡。

● 见《微波集成电路设计》p273，人民邮电出版社，1978，顾其净等编。

§ 6.4 弯曲和扭转

为了改变电磁波在微波系统中的传输方向或极化平面，就要应用弯曲和扭转元件。这些元件的主要矛盾是合理设计它们的尺寸和结构，使其内部的多次反射互相抵消。一般来说，当传输线弯曲和扭转时，要保持其横截面尺寸不发生变化。为了减少传输线中由于急剧弯曲或扭转时引起的反射，通常就要求弯曲和扭转在几个波长长的传输线段中实现。不过在实际应用中，弯曲和扭转的长度不可能太长，往往要求在电性能允许的条件下，尽可能缩短弯曲和扭转的长度。

图 6.4-1 示出了同轴线的几种弯曲形式。当同轴线均匀弯曲，且弯曲半径 R 尺寸较大时，电磁波能均匀过渡，但特性阻抗有些改变。如选择弯曲段的平均弯曲长度（弯曲段内导体轴线长度）接近于 $\lambda/2$ 的整数倍，则弯曲段就相当于一半波长阻抗变换器，因而能得到良好的匹配。为了使弯曲段引起的反射能互相抵消，可以改变内导体直径或对内导体切角来进行补偿，如图 6.4-1 (b)(c) 所示。

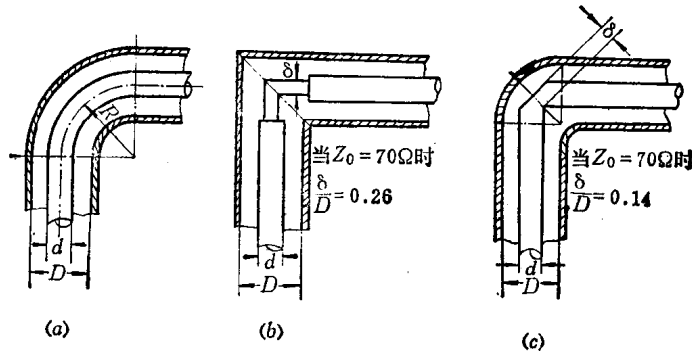


图 6.4-1 同轴线的直角弯曲

(a) 均匀直角弯曲；(b) 拐角式直角弯曲；(c) 切角式直角弯曲。

矩形弯波导分为两类：一类是宽壁弯曲，也就是在电场平面内进行弯曲，故也称 E 面弯波导，如图 6.4-2 (a) 所示；另一类是窄壁弯曲，也就是在磁场平面内弯曲，故也称 H 面弯波导，如图 6.4-2 (b) 所示。弯波导中的传播常数与直波导的传播常数略有不同，所以在这种平缓圆弧弯波导与直波导连续处要产生反射。为了使这种失配减至最小，要求弯曲部分的平均长度 L 等于半波长的整倍数。如果平均弯曲半径 R 大于 $5a$ (a 为波导宽边尺寸)，反射就可以忽略不计。不过，即使弯曲半径小到等于波导窄边 b ，对一定频率也还是可以用。



图 6.4-2 矩形波导的圆弧弯曲

(a) 90° E 面弯波导；(b) 90° H 面弯波导。

在波导系统中，还广泛采用折角弯曲，波导宽壁弯折的称为E面折角，窄壁弯折的称为H面折角。常用的折角有两种形式：一种称为双折角，如图6.4-3(a)所示，另一种称为单折角，如图6.4-3(b)所示。在双折角弯波导中，折线部分的长度应使由此引入的反射最小，其值由实验决定，一般在 $\lambda_g/4$ 左右。当 θ 角改变时，E面折角的 L 值保持在 $\lambda_g/4$ 左右，但H面折角的 L 值变动较大，图6.4-4为 90° 双折角H面弯波导的设计曲线和在中心频率上驻波小于1.06的相对带宽曲线。

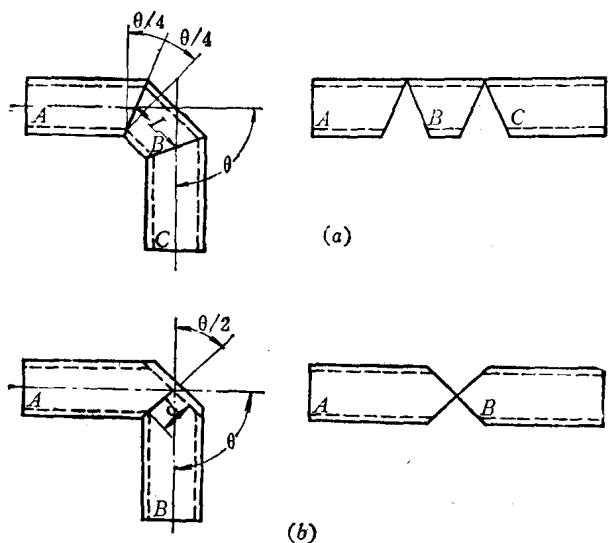


图6.4-3 折角式 90° 弯波导

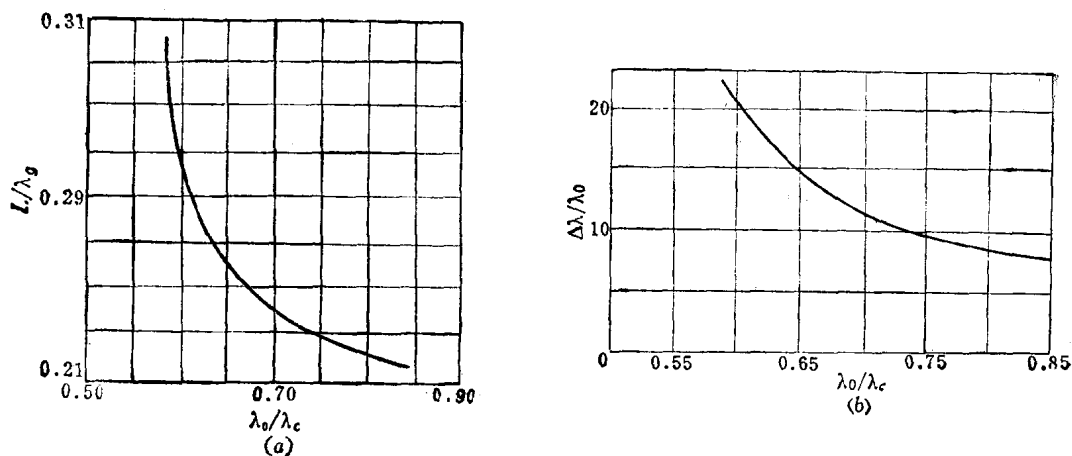


图6.4-4 90° 双折角H面弯波导的设计曲线(a)和带宽(b)

单折角的设计曲线见图6.4-5，它们是在一定驻波比的条件下由实验结果绘制的，每条曲线各相应于一定的阻抗匹配误差(5%，10%)。由于单折角在制造上比较困难，尺寸 d 的变动影响很大，加之容易击穿(尤其是E面单折角)，因而其应用受到限制。

单折角和双折角比较，前者频带较窄，后者频带较宽。若要工作在较宽频带，可采用 45° 双折角弯曲。