

第三章 微波元件

- ◆ § 3.1 阻抗匹配器与变换元件
- ◆ § 3.2 定向耦合元件
- ◆ § 3.3 微波谐振器
- ◆ § 3.4 微波滤波器与微波铁氧体元件简介

3.1 阻抗匹配与变换元件

任何一个微波系统都是由各种各样的微波元件有源电路和传输线组成。因此,了解微波元件的工作原理和特性以及设计方法是很重要的。

微波元件种类很多。

按传输线型式可分为:波导型同轴型和微带型等;

按功能可分为:连接元件、终端元件、匹配元件、衰减元件、相移元件、分路元件、波型变换元件、滤波元件等;

按变换的性质可分为:互易元件、非互易元件和非线性元件等。

不可能介绍所有元件的工作原理和工作特性,只能选一些具有代表性的典型元件作介绍。

绝大多数的微波元件的分析与设计问题,都是采用网络的方法讨论的,因此**等效电路法**是研究微波元件的基本方法。

2.3 阻抗调配器和阻抗变换器

阻抗调配器和阻抗变换器是微波系统中的基本元件，在微波系统中经常会遇到反射问题，例如，负载阻抗与传输线的特性阻抗不相等；相同类型而不同特性阻抗的传输线相连接；不同类型的传输线相连接；传输线中接入一些必要的器件等均会引起电磁波的反射。这些反射波的存在会影响微波系统正常工作；使负载得不到最大功率；功率容量和效率都会降低；在大功率时还会出现打火现象；在微波测量系统中又会影响测量精度。因此必须消除这些反射波。

消除反射波的方法很多，但不外乎在传输线中插入可调的电抗元件或阻抗变换元件，产生新的反射波来抵消原来的反射波，从而达到匹配。

为了匹配而插入的网络称为**阻抗匹配网络**。

阻抗匹配网络有两种：

一种是阻抗调配器，即匹配网络中的元件参数是可以调节的，设计方法采用图解法,即用Smith圆图来确定阻抗调配网络中各个电抗元件的参数；

另一种是阻抗变换器，利用网络综合法，设计出满足一定技术指标的阻抗匹配网络，一旦根据需要设计好以后，不能任意改变。

一、阻抗调配器

阻抗调配器常用来匹配传输线特性阻抗和负载(或信号源)阻抗不等的情况。阻抗调配器可分分支调配器和螺钉调配器，前者可调的电抗元件是用改变分支线的长度来实现的，常用于平行双线和同轴线传输系统中；后者可调电抗元件是可调螺钉，常用于波导中。

(一) 分支阻抗调配器

分支阻抗调配器按分支的多少可分单支节双支节及多支节调配器。单支节调配器的工作原理在第一章已讨论过,这里不再复述。

单支节调配器的最大优点是结构简单。但它是通过调节支节线的插入位置和支节线的长度来实现匹配的,在同轴线中支节的长度,可应用短路活塞很易改变,但分支线插入位置很难改变,因此单支节调配器的应用受到一定的限制。

3.1 阻抗匹配与变换元件

1、阻抗匹配与变换元件及其设计

阻抗匹配的实质是设法在终端负载附件产生一新的反射波，使它恰好和负载引起的反射波等幅反向，彼此抵消，使得传输线上处于行波工作状态。常用的匹配方法有：

电抗补偿法---在传输线中的某些位置加入不耗能电抗性匹配元件，如纯电抗膜片，销钉，螺钉等，从而实现匹配传输。

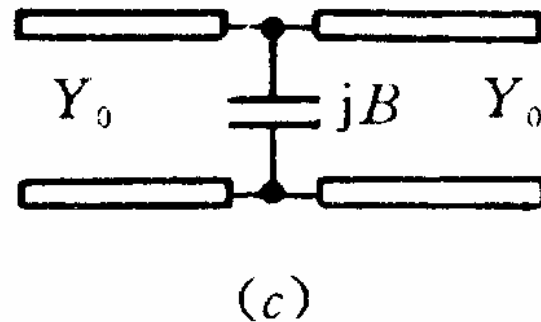
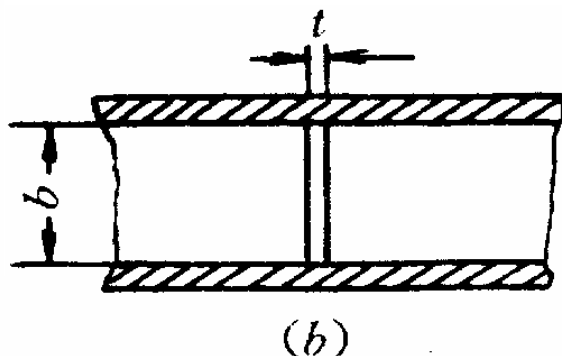
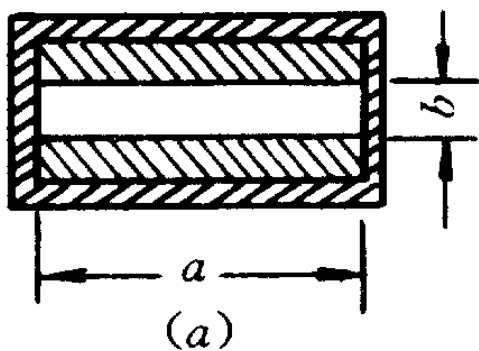
阻抗匹配法--- 采用 $\lambda/4$ 阻抗变换器或渐变线使不匹配的负载或两段特性阻抗不同的传输线实现匹配链接；

反射吸收法---利用铁氧体元件的单向传输特性，将反射波吸收掉。

一、电容膜片

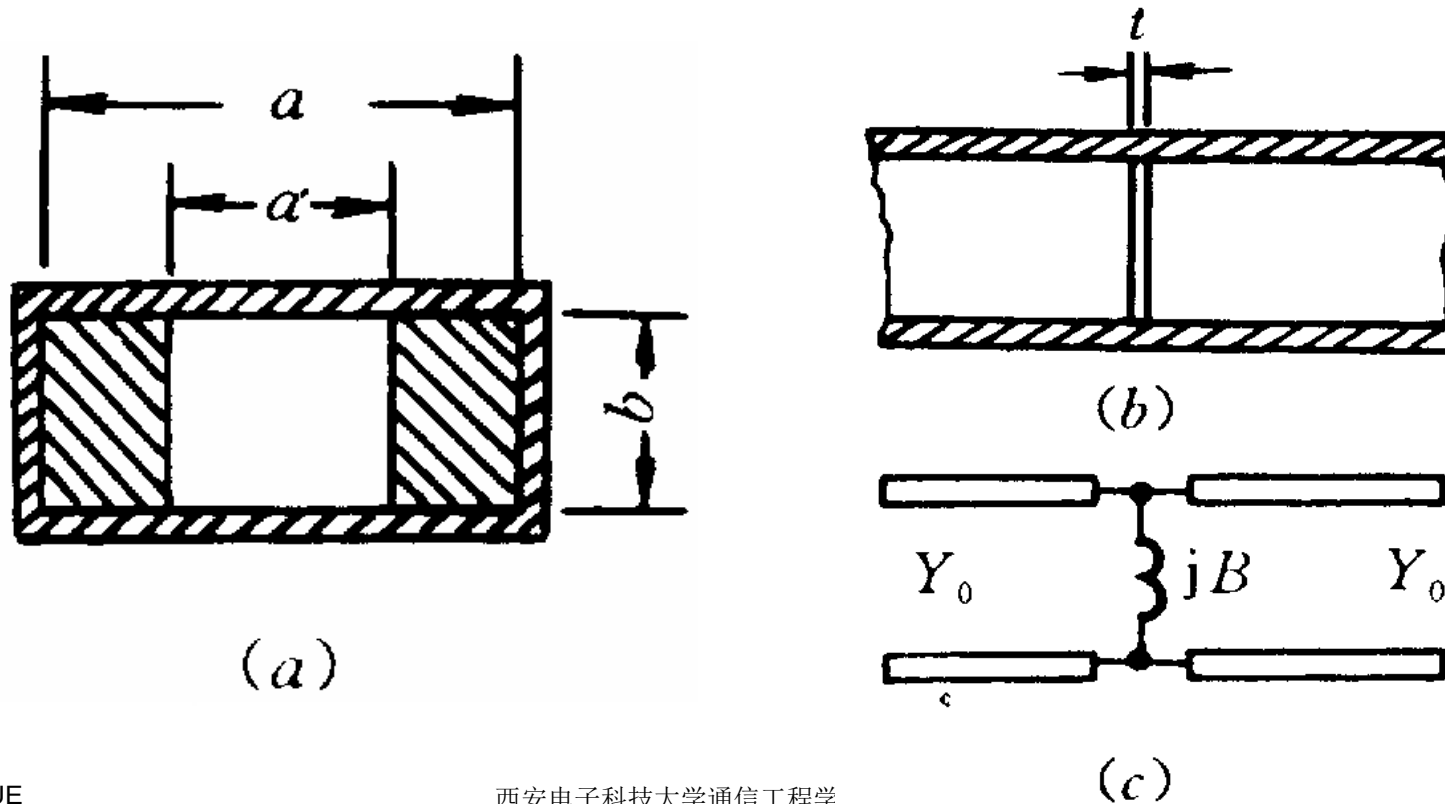
在波导的横向放置一块金属膜片,在其上对称或不对称之处开一个与波导宽壁尺寸相同的窄长窗孔。

当波导宽壁上的轴向电流到达膜片时,要流进膜片。而电流到达膜片窗口时,传导电流被截断,在窗孔的边缘上积聚电荷而进行充放电,因此两膜片间就有电场的变化,而储存电能。这相当于在横截面处并接一个电容器,故这种膜片称为电容膜片,其等效电路如图(c)所示。



二、电感膜片

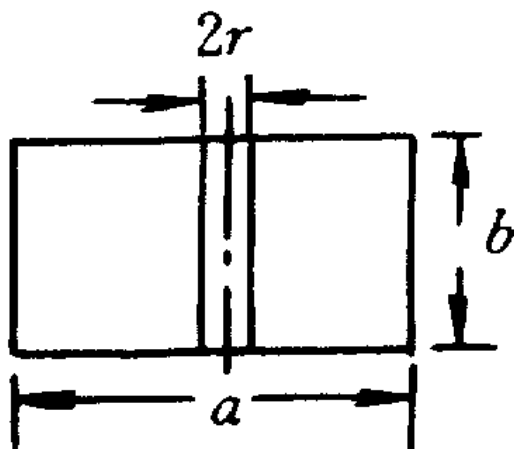
图中给出矩形波导中的电感膜片及其等效电路。当在波导横向插进该膜片以后,使波导宽壁上的轴向电流产生分流,于是在膜片的附近必然会产生磁场,并集中一部分磁能,因此这种膜片为电感膜片。



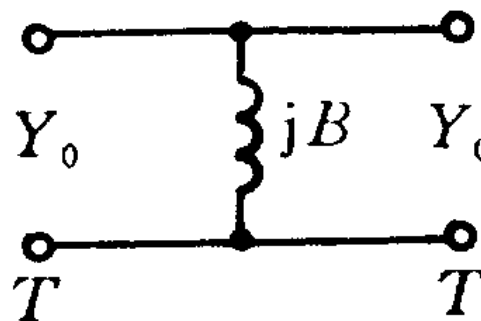
三、销钉

在矩形波导中采用一根或多根垂直对穿波导宽壁的金属圆棒，称为电感销钉，其结构和等效电路如图所示。

电感销钉的电纳与销钉的粗细及根数有关，销钉愈粗，电感电纳愈大；根数愈多，电纳愈大。



(a)

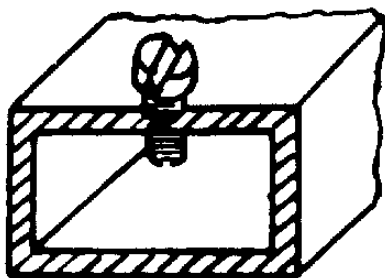


(b)

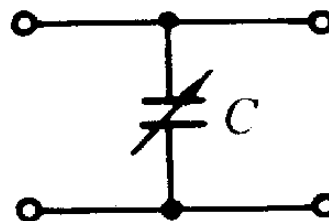
四、螺钉

膜片和销钉在波导内的位置和尺寸不容易调整,故只能作固定电抗元件使用。而螺钉插入波导的深度可以调节,电纳的性质和大小也随之改变,使用方便,是小功率微波设备中常采用的调谐和匹配元件。

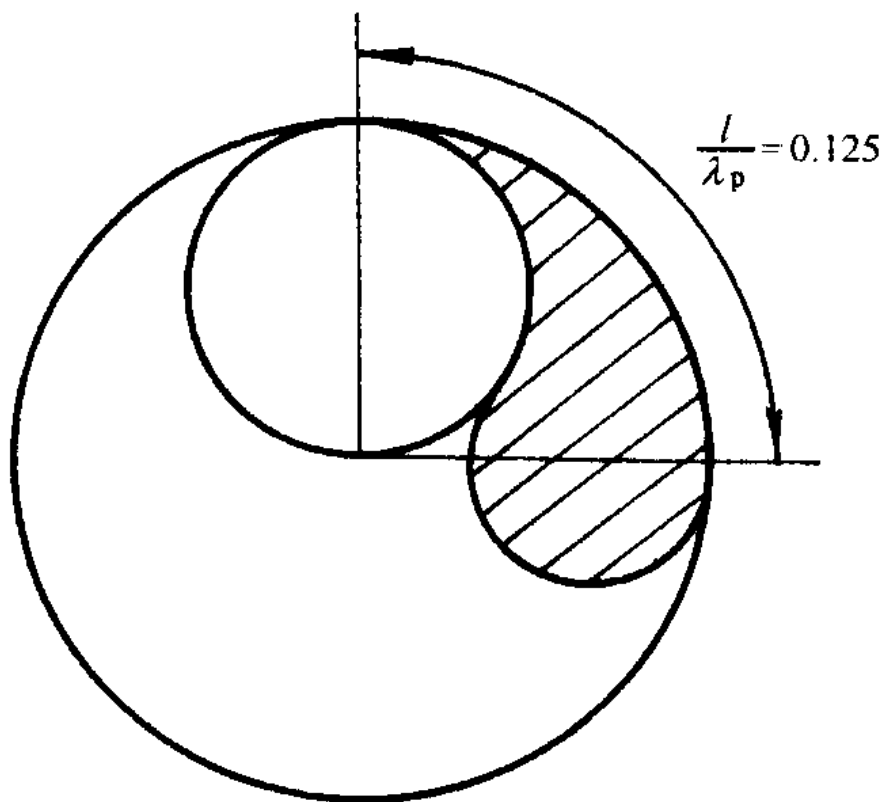
当螺钉插入波导较浅时,总的作用等效为一电容;当深度为 $\lambda/4$ 时,螺钉等效为串联谐振电路,当深度较大时,螺钉等效为电感。通常螺钉调配器的深度都较小,等效为电容。



(a)



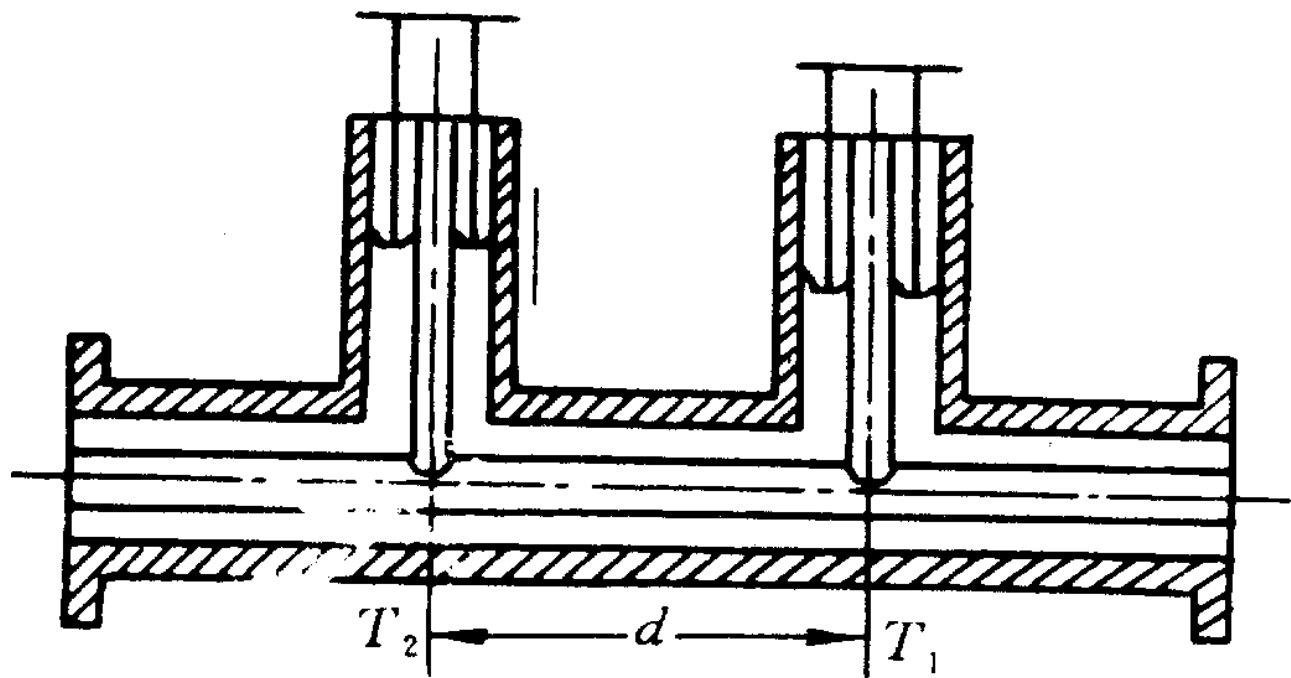
(b)

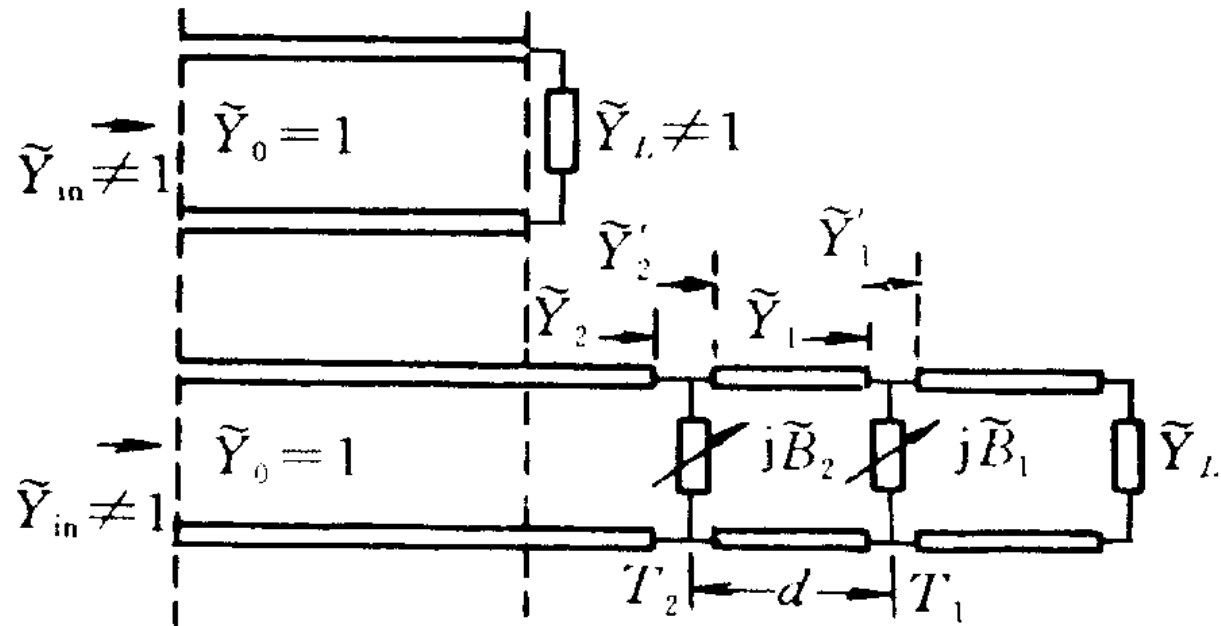


螺钉调配器又可分为单螺钉双螺钉和四螺钉调配器,相邻螺钉之间的距离通常是 $\lambda/8$, $\lambda/4$, $3\lambda/8$, 但不能是 $\lambda/2$.其调配原理和长线中的分支调配器基本相同,唯一的差别是分支调配器中各分支能提供的电纳范围为 $-\infty \sim \infty$ 的任何电纳,而螺钉调配器中螺钉只能提供 $0 \sim \infty$ 范围内的容性电纳。因此螺钉调配器的“死区”范围相应增加,如图所示。

1、双支节调配器

图中给出了同轴线双支节调配器的结构示意图，两支节同轴线并接于主同轴线中，两支节线的间距为 d ，两支节的长度 l_1 和 l_2 用短路活塞来改变，以提供所需要的纯电纳。



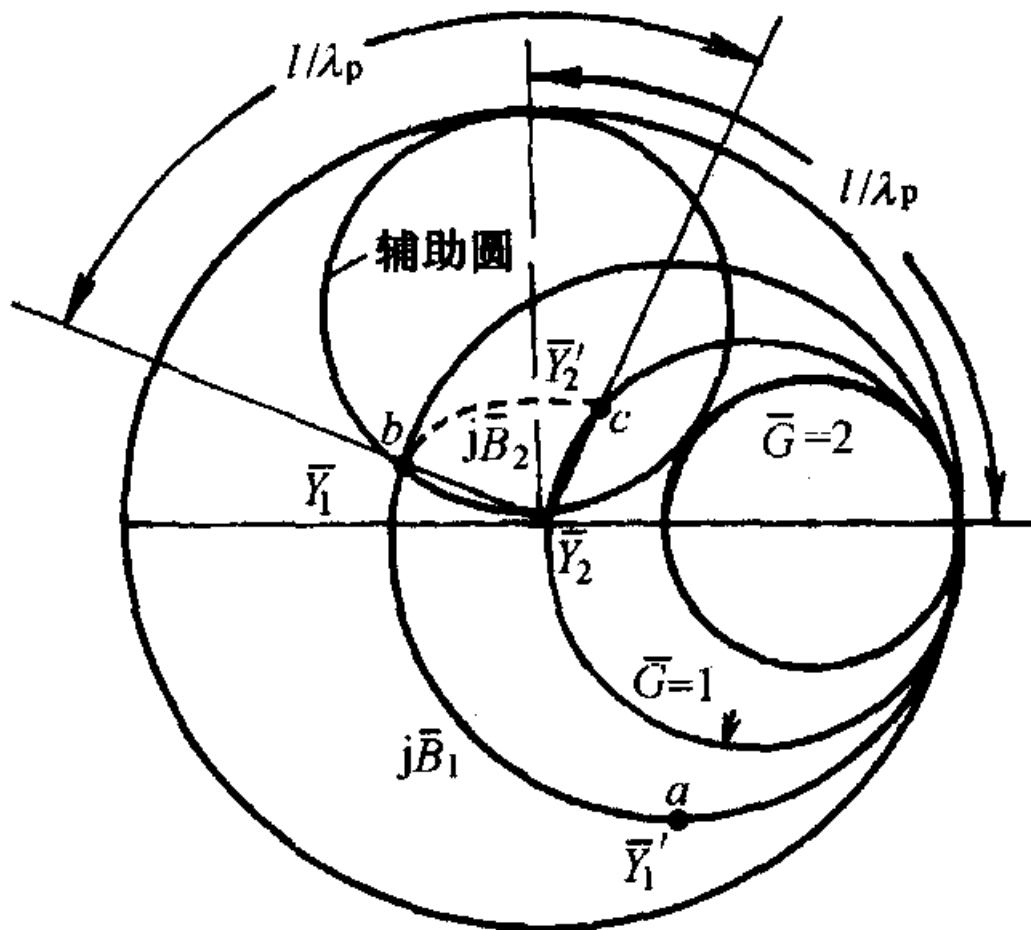


为了要匹配,必须使

$$\tilde{Y}_2 = 1$$

$$\tilde{Y}_2 = \tilde{Y}_2' + j\tilde{B}_2$$

$$\tilde{Y}_2' = 1 - j\tilde{B}_2$$

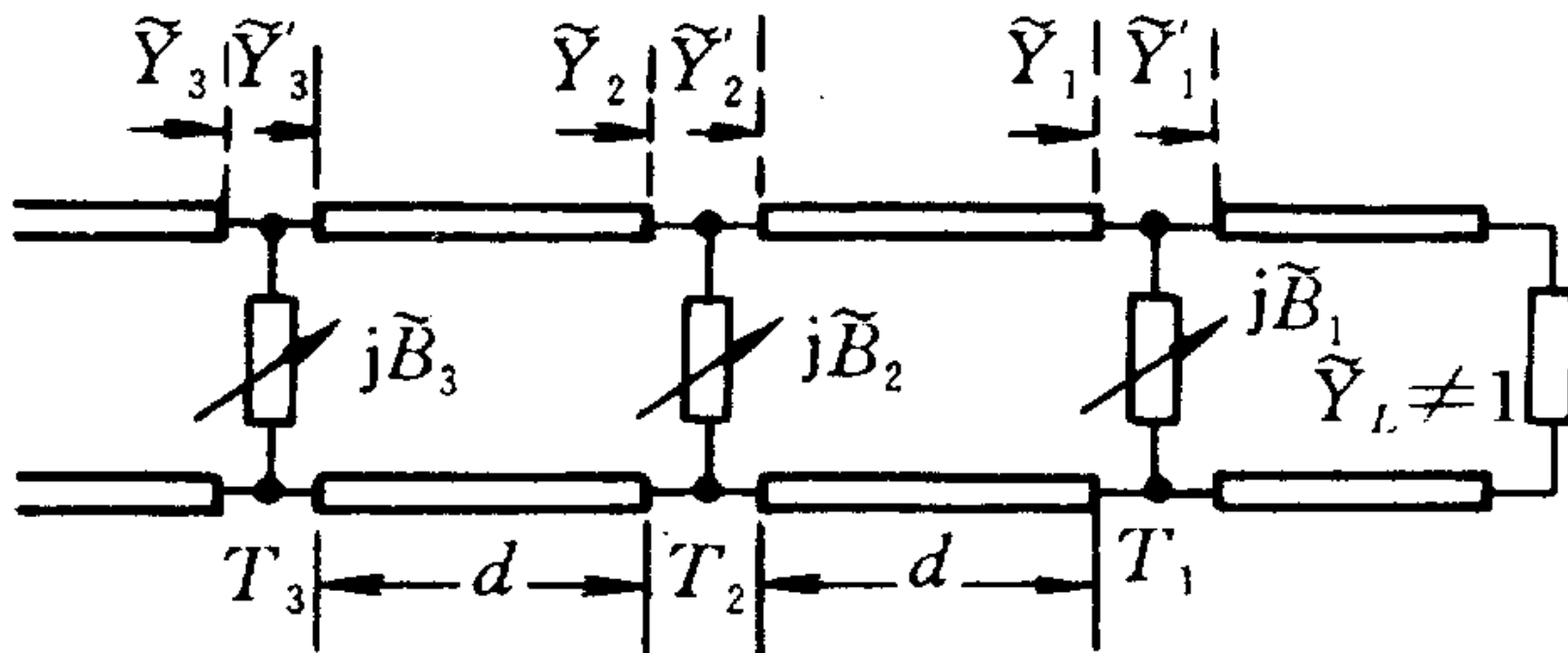


从图可以看出，若 $\bar{Y}_L$ 的输入导纳 $\bar{Y}_1'$ 落在了 $G=2$ 的圆的内部，显然无论是什么样的 jB ，都无法使 $\bar{Y}_1$ 落在辅助圆上，这样也就无法实现匹配了，因此双支节调配器有无法匹配的区域，称其为匹配禁区（死区）。

由 $a(\bar{Y}_1')$ 点 $\rightarrow$ 辅助圆 $b(\bar{Y}_1')$ 点 $\rightarrow \bar{G}=1$ 圆
 $c(\bar{Y}_2')$ 点 $\rightarrow$ 匹配 $(\bar{Y}_2)$ 点

2. 三支节调配器

双支节调配器存在的“**死区**”，可采用三支节调配器来消除。其等效电路如图所示。其调配原理和双支节相同，仅增加一个支节。



二、阻抗变换器

当负载阻抗和传输线特性阻抗不等，或二段特性阻抗不同的传输线相连接时均会产生反射，除用上面的阻抗调配器来实现阻抗匹配外，还可以用阻抗变换器来达到匹配。只要在两段所需要匹配的传输线之间，插入一段或多段传输线段，就能完成不同阻抗之间的变换，以获得良好匹配，故称为**阻抗变换器**。

按结构可分为同轴线阻抗变换器矩形波导阻抗变换器带状线和微带线阻抗变换器；

按阻抗变换的规律可分为阶梯阻抗变换器和渐变式阻抗变换器。阶梯阻抗变换器又可分为最大平坦式及切比雪夫式阻抗变换器。

(一)单节阻抗变换器

若在两段特性阻抗分别为 Z_{01} 和 Z_{02} 的传输线中间，加一段长度等于 $\lambda_p/4$ ，特性阻抗为 $Z_0 = \sqrt{Z_{01}Z_{02}}$ 的传输线段，可使阻抗达到匹配。这种原理和方法适用于所有的传输线。对于矩形波导同样也适用，使两段等效阻抗不等的波导获得匹配。即在等效阻抗分别为 Z_{e1} 和 Z_{e2} 的两段波导中间串接一段长度为 $\lambda_p/4$ ，其等效阻抗为

$$Z_0 = \sqrt{Z_{e1}Z_{e2}}$$

的波导段即可达到阻抗匹配。

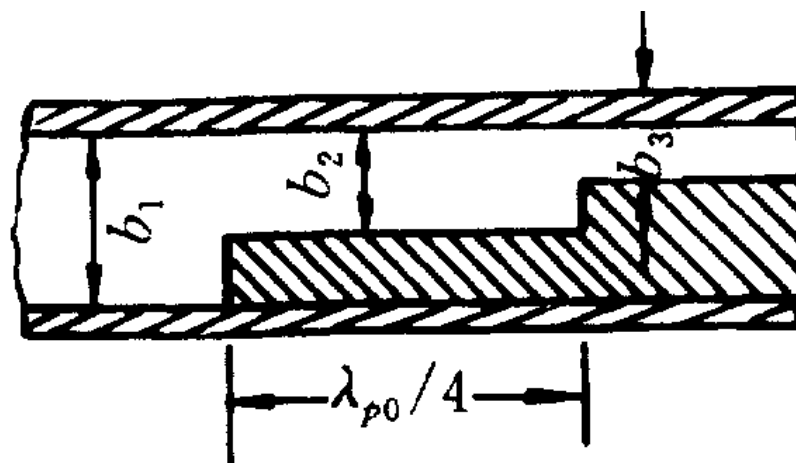
对于传输 TE_{10} 模的矩形波导,其等效阻抗与尺寸的关系为

$$Z_e = \frac{b}{a} \frac{\eta}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda_0}{2a})^2}}$$

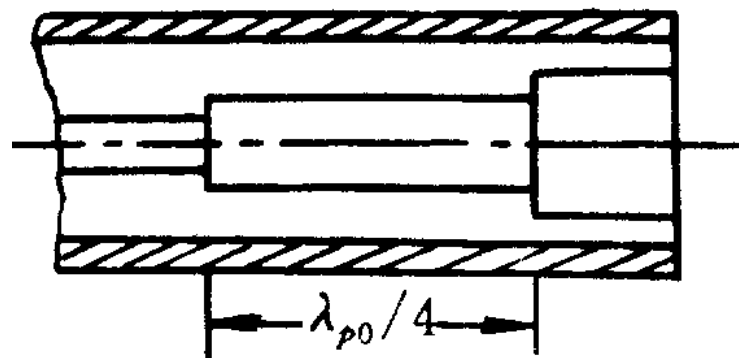
由此可见,对于波导宽壁尺寸 a 相同,窄壁尺寸分别为 b_1 和 b_3 的两段矩形波导中间加一段长度为 $\lambda_p/4$,波导宽壁尺寸为 a ,窄壁尺寸 b_2 必须满足

$$b_2 = \sqrt{b_1 b_3}$$

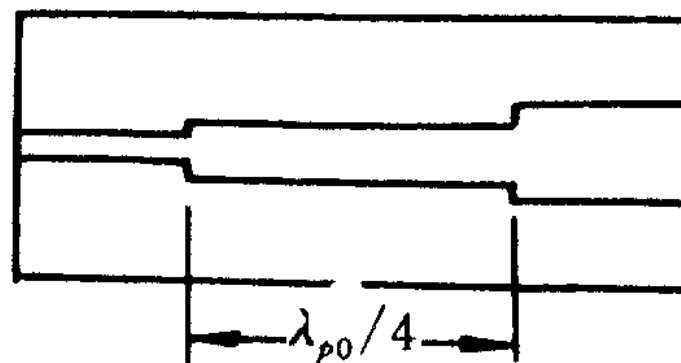
的矩形波导段,就能使两段矩形波导获得匹配。典型结构如图(a)所示。同理图(b)和(c)分别表示同轴线和微带线单节 $\lambda/4$ 阻抗变换器的典型结构示意图。



(a)



(b)

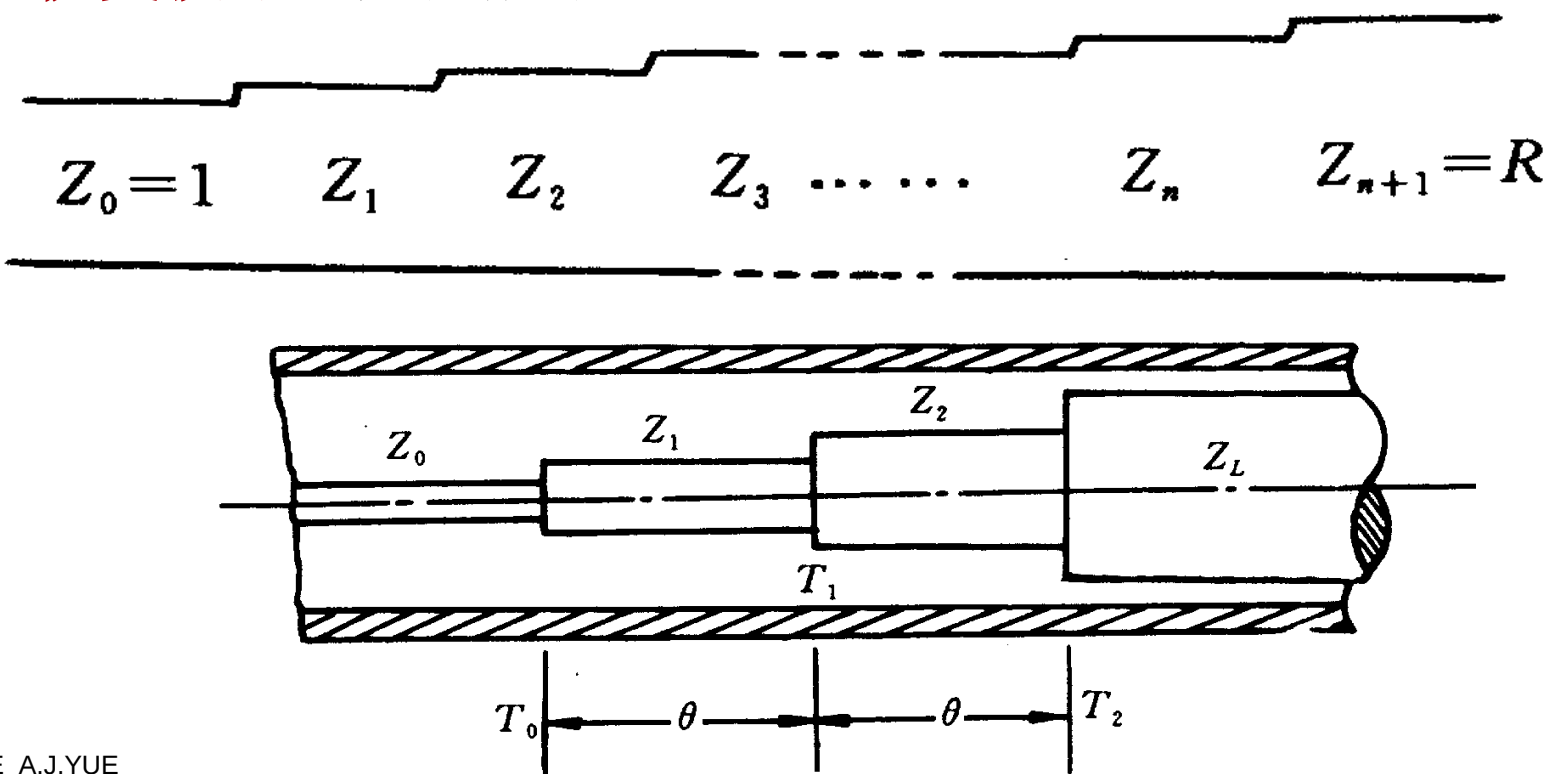


(c)

(二) 多节 $\lambda/4$ 阶梯阻抗变换器

特性阻抗不等的两段传输线相接，由于连接处的阻抗不匹配而引起反射波，而且它只有一个连接面，无法产生另一个反射波与原来反射波抵消。当中间加了一段 $\lambda/4$ 阻抗变换段以后，又增加了一个连接面，这样两个连接面均会产生反射，而且由于两个连接面之间有 $\lambda/4$ 的距离，使两个反射波到达输入端时相位恰好相反，如果控制 $\lambda/4$ 阻抗变换器的横向尺寸，使两个连接面所产生的反射波在输入端等幅反相而抵消，从而达到匹配。

但因只有两个连接面,因此只能对一个频率达到匹配。而且由于只有一段 $\lambda/4$ 阻抗变换器,当要匹配两段特性阻抗相差比较大的传输线时,显然两个连接面处不连续电容比较大,从而影响阻抗匹配性能。这就启发我们采用多节 $\lambda/4$ 阻抗变换器,形状像阶梯故称为**阶梯阻抗变换器**,如图所示。



3.4 微波连接元件和终接元件

一、连接元件

在微波技术中,把相同传输线连接在一起的装置统称为接头。常用的接头有同轴接头和波导接头两种。把不同类型的传输线连接在一起的装置称为转接元件,又称为转换器或模式变换器。最常用的有同轴线和波导同轴线和微带线波导和微带线间的转接元件。

§ 3.4 微波连接元件和终接元件

(一)、接头

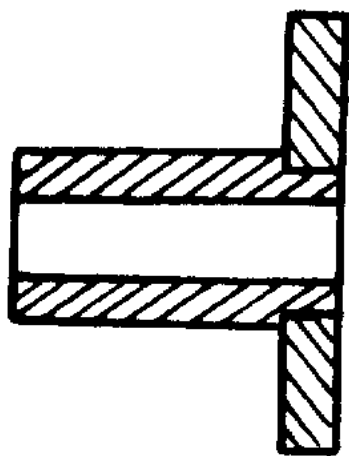
对接头的基本要求是：连接点接触可靠；不引起电磁波的反射，输入驻波比尽可能小，一般在1.2以下；工作频带要宽；电磁能量不会泄漏到接头外面；而且结构要牢靠，装拆方便，容易加工等。下面以矩形波导接头(又称法兰)为例，加以简单说明。

波导接头有平接头和抗流接头两种。分别如图 (a) 和(b)所示。

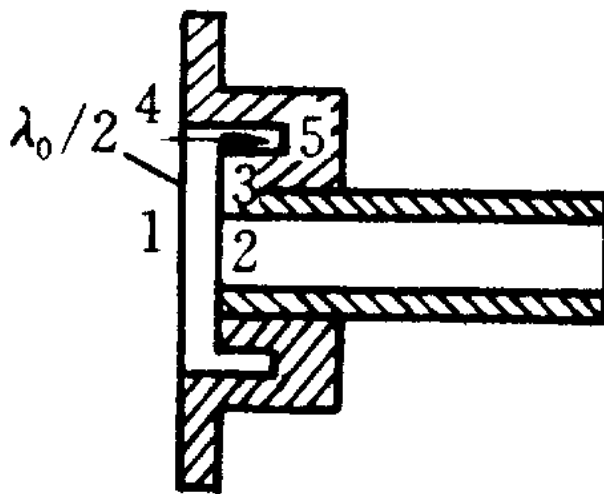
抗流连接：可以在连接处没有机械接触的情况下保证有足够可靠的电接触。

右边波导的法兰盘上开有一圆槽，在中心频率，圆槽底部（5点）为同轴线的短路终端，4点的输入阻抗为无穷大，而从4点到2点又是径向传输线的四分之一波长，因而2点的输入阻抗为零。这就使得实际上并不接触的波导口等效为短路连接。所以即使接触不良，也不至引起较大的功率损耗。

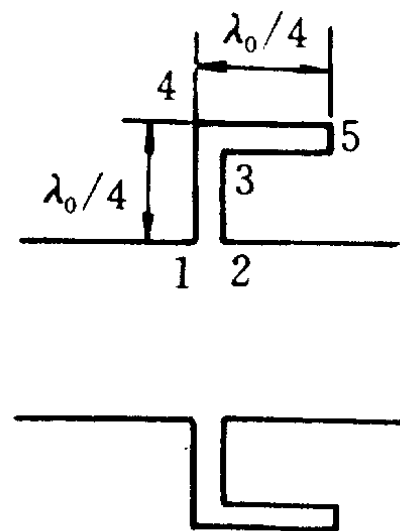
当工作频率偏离中心频率时，2点也不再能等效为理想短路点。为获得一定频带的抗流连接，必须将隙缝宽度选得尽可能的小，圆槽宽度要足够的大。



(a)



(b)



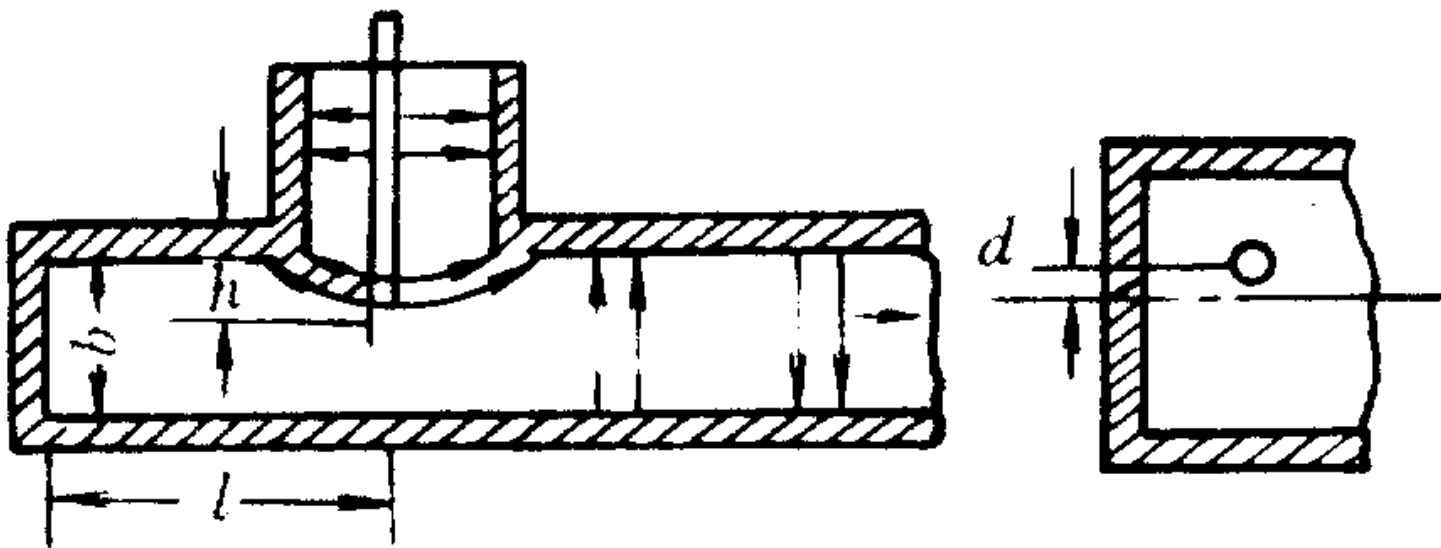
(c)

(二) 转接元件

微波传输线形式很多,相应的转接元件也多。在将不同类型的传输线或元件连接时,不仅要考虑阻抗匹配,而且还应该考虑模式的变换。下面介绍几种转接元件。

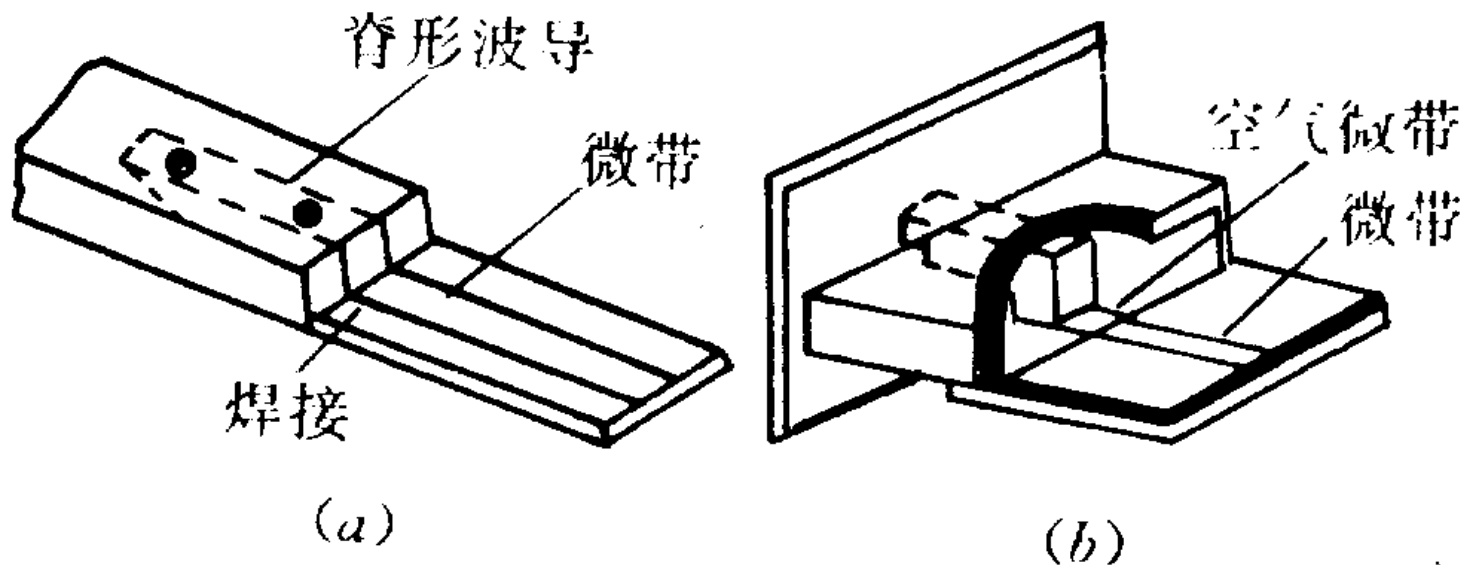
1、同轴线—波导转接器

连接同轴线与波导的元件，称为同轴线-波导转接器，其结构如图所示。它将同轴线的一端加信号，另一端的内导体伸入矩形波导内，则同轴线中TEM模就会激励起矩形波导中 TE_{10} 模，反之亦然。这样实现了模式变换。为了要使同轴线与波导相匹配，要调节同轴线的内导体插入波导的深度 h ，偏心距 d 及短路活塞位置 l 。



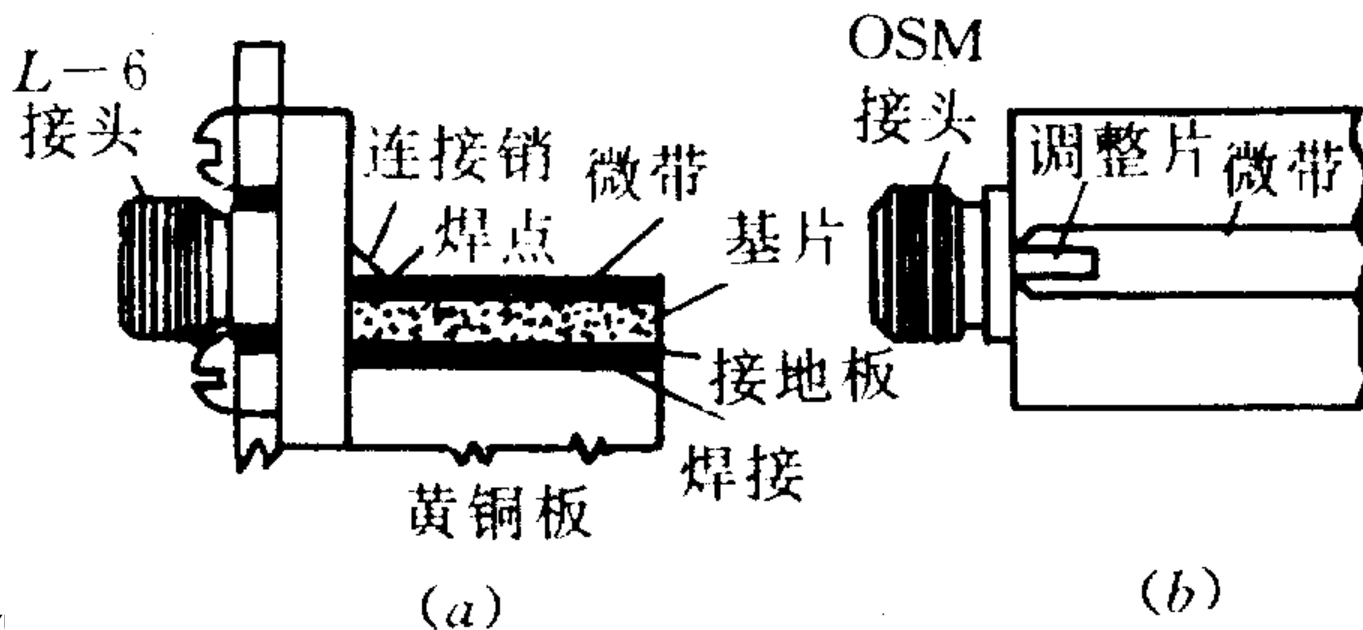
2、波导-微带转换器

由于矩形波导的等效阻抗通常在 $300\Omega\sim 400\Omega$ 之间，而微带线特性阻抗一般为 50Ω ；而且矩形波导的高度 b 又比微带线衬底高度 h 大得多，因此两种传输线不能直接相接，常在波导和微带线之间加一段**脊波导**过渡段来实现阻抗匹配。图 (a)和(b)分别表示脊波导高度是渐变和阶梯变化的过渡段的转换器。



3. 同轴线-微带转接器

图(a)和(b)表示常用的同轴线与微带的转接器的结构示意图。将同轴线的内导体向外延伸一小段(长度约为1~2mm)与微带线中心导带搭接,同轴线的外导体与微带线的接地平面相连的外壳通过法兰相连,这种接头在10GHz以下的频率范围内,可得到小于1.15的驻波比,在一般工程中应用得到满意的结果。



4. 矩形波导-圆波导模式变换器

矩形波导-圆波导模式变换器,大多采用波导横截面的逐渐变化来达到模式的变换。图(a)给出了矩形波导中 TE_{10} 模变换到圆波导中 TE_{11} 模的变换器,即 $H_{10} \rightarrow H_{11}$ 模式变换器,这种变换器主要用于微波铁氧体器件,可变衰减器及可变相移器中。

图(b)给出了一种典型的 $H_{10} \rightarrow H_{01}$ 模式变换器的结构示意图。由于圆波导中 H_{01} 模损耗低,可作远距离传输线,常用这种变换器将矩形波导的元器件与圆波导元器件相连。



图 (a)

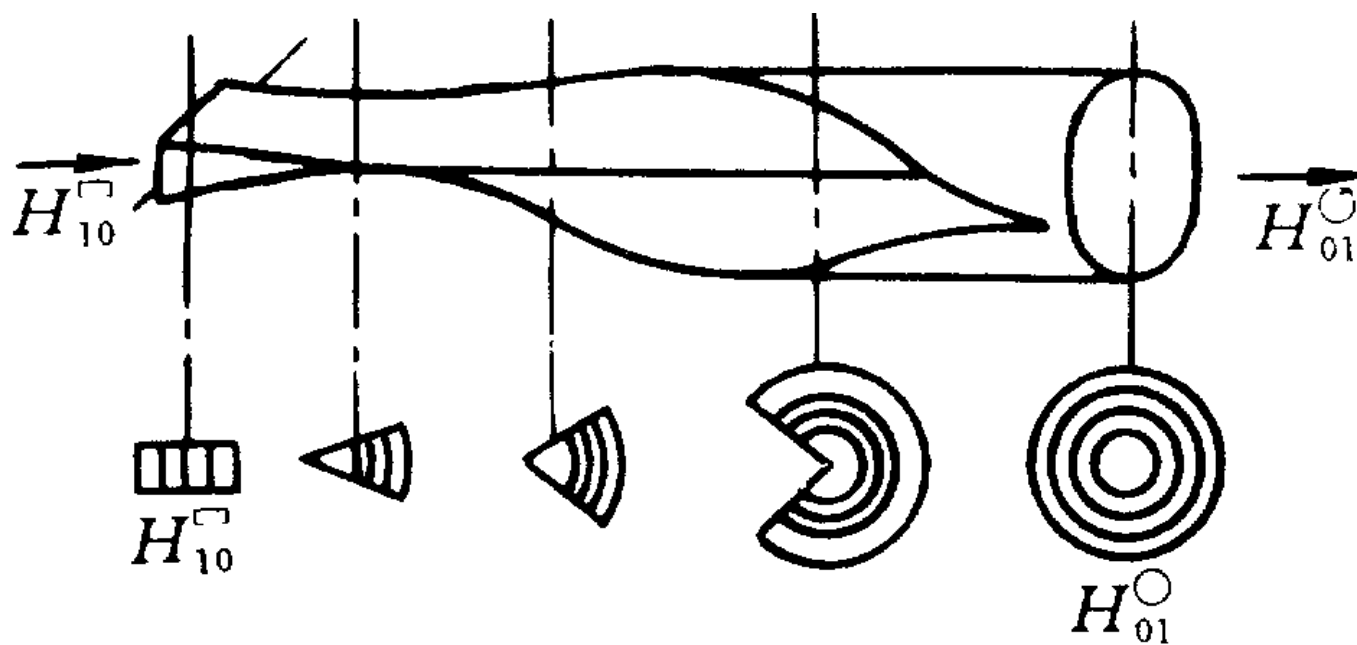


图 (b)

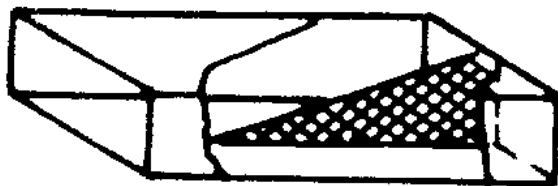
二、 终接元件

常用的终接元件有匹配负载和短路器两种。匹配负载和短路器都属于一端口的网络,但它们的功能绝然不同,匹配负载是将所有的电磁能量全部吸收而无反射($\rho=1, \Gamma=0$);而短路负载是将所有的电磁能量全部反射回去,一点能量也不吸收($\rho=\infty, \Gamma=1$)下面分别讨论之。

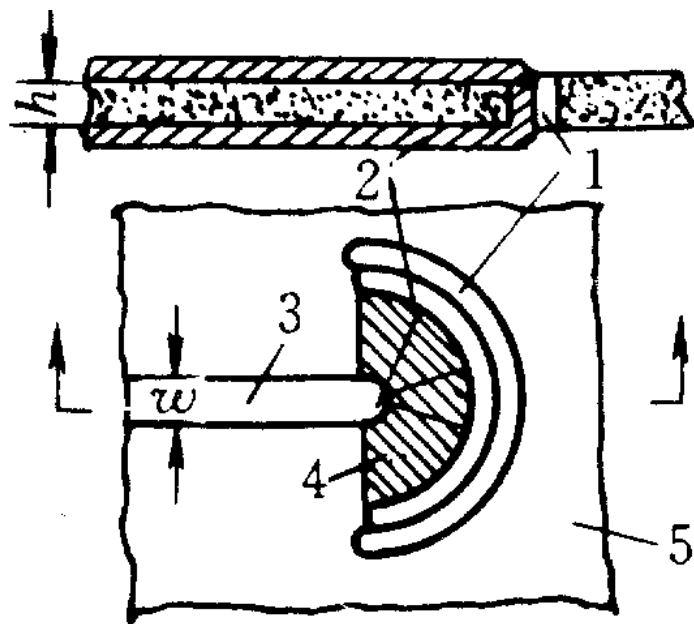
(一) 全匹配负载

全匹配负载是接在传输系统终端的单端口微波元件, 它能几乎无反射地吸收入射波的全部功率。因此当需要在传输系统中建立行波状态时, 都要用到匹配负载。

对匹配负载的基本要求是: 有较宽的工作频带, 输入驻波比小和一定的功率容量。图中给出了两种全匹配负载的结构示意图。



(a)



(b)

图(a)为典型的 H_{10} 波导型小功率匹配负载。它是在一段终端短路的波导内平行于电场方向放入一片尖劈形的吸收片；且置于矩形波导中 H_{10} 模的电场最强处($x=a/2$)。当微波能量通过吸收片时，它将能址全部吸收。为了达到良好匹配，吸收片做成尖劈形，其长度约为几个波导波长。这种匹配负载可在较宽的频带内得到良好的匹配。一般在10-15%的频带内驻波比可小至1.01-1.05，其允许消耗的功率为瓦级。

图(b)为微带型的宽带匹配负载的结构示意图。它的匹配电阻采用半圆形电阻，半圆形电阻的一个极与微带中心导带相接，另一个电极通过其外因的边缘附近的基片上的半圆弧金属化槽直接接地。经过实测表明，在1-9GMz频带内驻波比 $\rho < 2$ ，可见频带宽度可达几个倍频程。

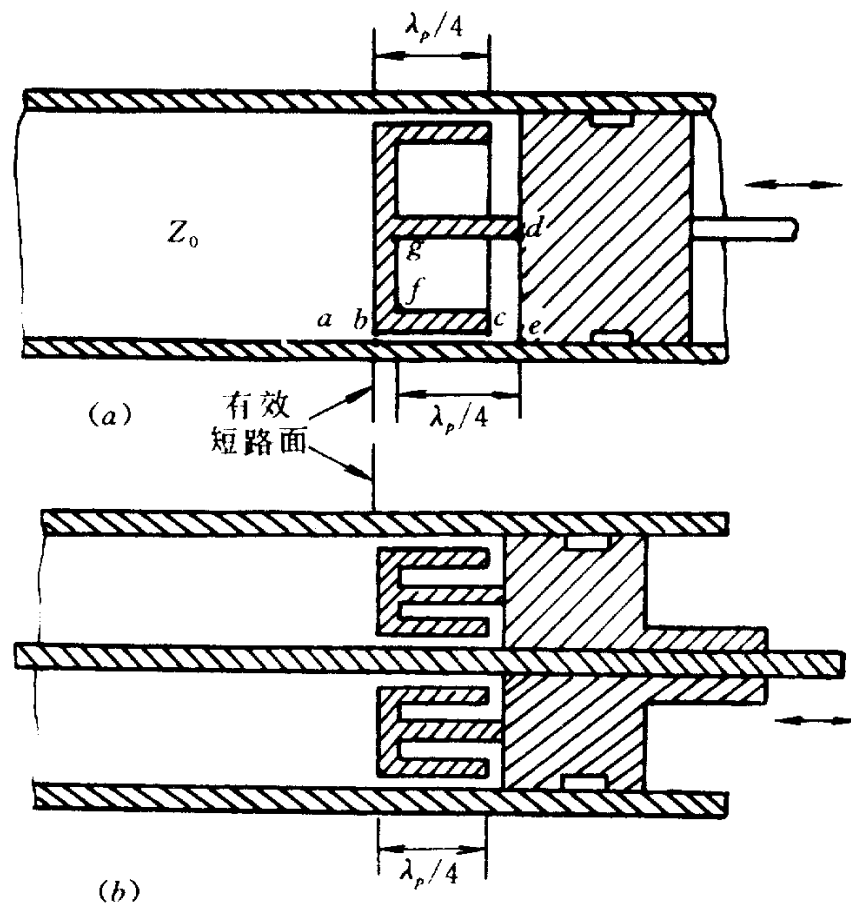
(二) 短路负载

短路负载又称为短路器,它的作用是将电磁能量全部反射回去。将同轴线和波导终端短路,即分别成为同轴线和波导固定短路器。

在某些微波系统和微波测量仪器中,常采用短路面可以移动的短路负载。这种短路负载称为可调短路活塞。

对短路活塞的基本要求是:保证接触处的损耗要小,并有良好的电接触,使其反射系数的模接近于1;传输大功率时保证接触处不发生跳火现象。短路活塞按传输线形式分有同轴线型和波导型两种,按其结构分有接触式和抗流式两种。但由于接触式活塞在活塞移动时,接触不稳定,弹簧片又会逐渐磨损,在大功率时还会发生跳火现象,故接触式活塞很少采用。

图中给出了两个典型的抗流活塞。其中(a)为波导型的短路活塞,图(b)为同轴型的短路活塞。这种结构采用两段不同特性阻抗的 $\lambda_p/4$ 变换器构成。其中一段为 $\lambda_p/4$ 的短路线,另一段为 $\lambda_p/4$ 的开路线,两段线串联起来能使活塞在ab面处形成一个有效的短路面,以保证电接触良好。但抗流活塞的尺寸和工作波长有关,因此频带比较窄,一般只有10~15%的带宽。



3—5 衰减器和移相器

一、衰减器

为了固定传输系统内传输功率的功率电平，传输系统内必须接入衰减器，对微波产生一定量的衰减。衰减量固定不变的称为固定衰减器，衰减量可在一定范围内调节的称为可变衰减器。

对衰减器的要求：输入驻波比小，频带宽。

衰减有吸收衰减器，截止衰减器和极化衰减器三种，下面讨论各种衰减器的工作原理和工作特性。

在波导内置入与电场方向平行的吸收片、当微波能量通过吸收片时，将吸收一部分能量而产生衰减，这种衰减器称为吸收衰减器。吸收片上通过的电场切线分量愈强，它的衰减过愈大。因此上、下或左、右移动吸收片在波导内的位置就能改变衰减的大小，这种衰减器称为可变衰减器。当吸收片从窄边移至宽边的中心位置，则衰减可在0-35dB范围内连续变化，其衰减可以从调节机构的刻度盘上直接读得，也可以从附加的校正曲线上查得。

截止衰减器是在传输线中插入一小段横向尺寸较小的传输线段，使电磁波在这一小段传输线内处在截止状态下传输，即电磁波经过这段传输线后微波能量很快衰减，控制截止传输线的长度，就可以调节衰减员的大小。

极化衰减器是在圆波导中置入可旋转的吸收片，从而改变衰减大小的衰减器。衰减大小与吸收片旋转角度有关，当吸收片在0-90°范围内变化时，衰减量可改变0-∞，这种衰减器可做绝对定标的标准衰减器。

二、移相器

移相器是对电磁波只产生一定的相移而不产生能量衰减的微波元件。对移相器主要要求是移相范围要大,且符合一定的变化规律,精度要高,插入驻波比要小,工作频带和功率容量必须符合要求等。

移相器可以分为固定移相器和可变移相器。

均匀传输线上相距长度为 l 的两点之间的相位差为

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \beta l = \frac{2\pi}{\lambda_p} l$$

上式表明,改变相位的方法有两种:

一种方法是改变传输线的长度 l ,任何一种可以改变传输线长度的机构,都可以做成可变移相器;

另一种方法是改变传输线的相位常数 β (或波导波长)。改变传输线相位常数的方法有很多,如在波导中放入可移动的介质片,就能改变相位常数 β ,从而改变相移。

因此,可变吸收衰减器结构与可变移相器结构形式完全相似,所不同的是:前者是改变吸收片的位置,后者是改变介质片的位置。