

微波技术基础

(四)

一九七六年一月

目 录

第四章 微波元件

引言.....	3
§ 1 谐振腔.....	3
一、空腔谐振器的一般原理.....	4
二、同轴线型谐振腔.....	11
三、圆柱形谐振腔.....	22
四、环形谐振腔.....	25
五、矩形谐振腔.....	30
六、谐振腔的耦合与应用举例.....	32
第一节小结.....	37
第一节复习思考题.....	40
§ 2 常用波导电抗元件.....	41
一、波导膜片及谐振窗.....	41
二、销钉和螺钉.....	47
三、短路活塞.....	55
§ 3 阻抗变换元件.....	60
一、波导的匹配.....	60
二、双螺钉匹配器.....	62
三、阶梯式阻抗匹配器.....	63
四、渐变线.....	66
§ 4 波导接头及波型变换元件.....	67
一、传输线的连接元件.....	68
二、波型变换元件.....	72

§ 5	T 型接头及魔T	76
	一、T 型接头	77
	二、双T、魔T 接头	80
§ 6	方向耦合器	82
	一、单孔耦合的波导方向耦合器	84
	二、多孔耦合的方向耦合器	86
	三、十字形方向耦合器	89
	四、缝隙波导电桥	92
§ 7	衰减器	95
	一、匹配负载	96
	二、吸收式衰减器	98
	三、截止式衰减器	100
§ 8	其他波导元件	102
§ 9	微波滤波器	104
	一、什么是滤波器	104
	二、滤波器有什么特点	108
	三、微波滤波器有哪几种结构类型	110
	微波元件小结	117
§ 10	铁氧体微波元件	121
	一、什么是铁氧体, 有什么一般特性	121
	二、常用的铁氧体微波元件是哪些	122
	三、隔离器与环流器的工作原理	129
	四、铁氧体隔离器	139
	五、铁氧体环流器	150
	铁氧体微波元件小结	155
附录一	S 形抗流活塞	158
附录二	滤波器分析与设计的概念	160
附录三	微波滤波器设计举例	172

第四章 微波元件

引言

我们知道，低频电路有各式各样，但不论怎样复杂，总不外乎由一些基本元件所组成，如电阻，电容，电感等，从这儿种基本元件所引伸出来的各种类型的电阻器，电容器，线圈变压器，谐振回路等等都是组成低频电路的元件，但在微波波段时，这些低频元件都不能应用了，因为频率增高了，分布参数起了很大作用，例如低频电容器的引线也会起着电感的作用，谐振回路也都不能工作，那么在微波波段还有没有这些基本元件呢？实际上在微波波段也有各种元件，只不过它的工作原理，结构形状都和低频元件有很大的差别，例如起着谐振回路作用的谐振腔，起着电阻作用的衰减器，起着电感或电容作用的波导内的膜片，销钉，短路活塞等等，都是在微波波段中的元件，一般通称为微波元件。

微波元件也是组成微波设备的必不可少的组件，如在接收天线到接收机的馈电系统，它是由一些微波元件所组成的，如图4—1所示。如微波测试系统也是由一些微波元件所组成如图4—2表示其中一种测试系统的组成元件，此外如接收设备中的高频混频系统，高放中的参量放大器组成系统，都由各种不同的微波元件所组成。

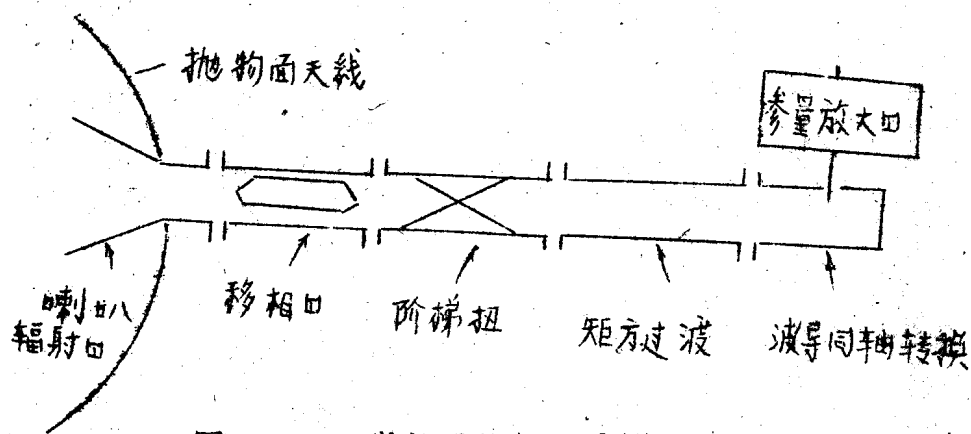


图4—1 微波天线馈电系统

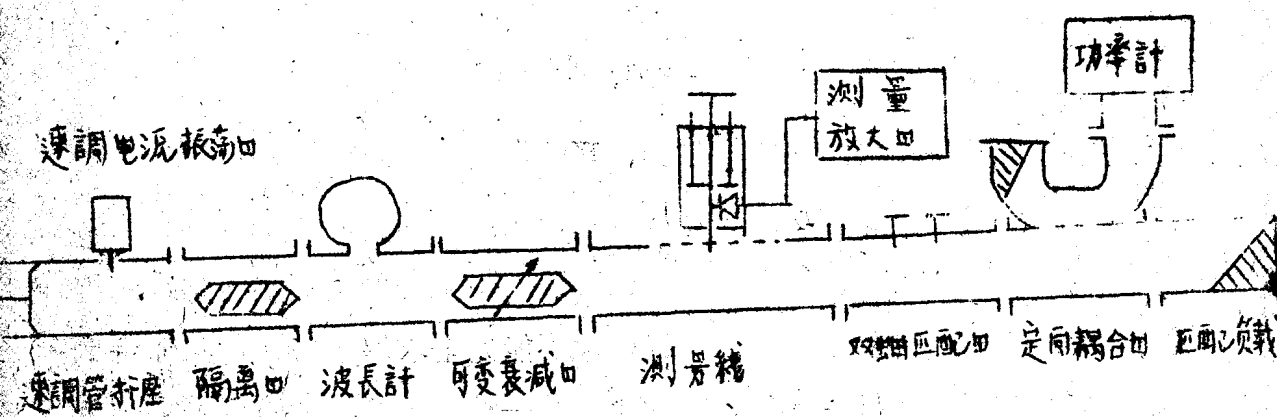


图 4—2 微波测试系统

微波元件的类型很多，本章只对基本的、常用的元件作一些讨论，

其主要的类型有：

- 一、谐振腔：同轴线谐振腔，园柱形谐振腔，环形谐振腔，矩形谐振腔。
- 二、常用波导电抗元件：容性膜片，感性膜片，谐振窗，销钉，螺钉，短路活塞等。
- 三、阻抗变换元件：双螺钉匹配器，阶梯式阻抗匹配器等。
- 四、波导接头及波型变换器：抗流接头，矩形与园形波导转换，波导同轴转换。
- 五、T型接头：E—T接头，H—T接头，双T接头，魔T。
- 六、方向耦合器：双孔型，多孔型，十字型等。

七、衰减器：全匹配负载，可变衰减器，截止衰减器。

八、其他形状波导元件。

九、滤波器。

十、铁氧体微波元件：隔离器，环流器。

分析微波元件的方法主要有两种，一种是运用电磁场分析的方法，根据元件给定的边界条件解马氏方程，但波导元件多是些不均匀的波导，它要比分析规则波导复杂得多，有时也不能完全求解出来，因此要得到不均匀性问题的严格解是较为困难的，另一种方法是把波导中不均匀处看成一个集中参数的等效网络，通过各种矩阵的计算方法去解决，这种方法当然比用电磁场求解的方法好得多，但它也不能回答不均匀处“近区”场的分布问题，而且所列出的网络矩阵方程也不都能解出来，通常采用与实验的方法相结合，从实验中得出一些实验参量，再通过网络矩阵去计算，实际上采用网络矩阵的方法仍然是复杂的，根据我们的情况主要是从物理概念上分析各种微波元件的工作原理、结构、特性和用途，给出一些必要的参数公式，但繁琐的推导过程从略某些部分的设计方法作为参考。

§ 1 谐振腔

在第三章中我们讨论了波导中电磁波传播，并且希望电磁波传播过程中，使其尽量处于行波状态。这是在一般通信中，传输电磁能量时的希望和要求。但在某些场合下，我们却利用波导和同轴线的驻波状态，做成某些测量仪器和器件（如波长计等）。我们这一章所要研究的谐振腔，就是利用波导电磁波的驻波状态来工作的。如果在波导传输方向上用导体把它封闭起来，则因为封闭电磁波将产生反射，入射波和反射波

的迭加而成了电磁驻波。因此，在封闭的波导内的电磁波，无论是纵向或横向都是电磁驻波。电磁驻波是不能传输能量的，只能产生电磁能的相互转换。我们已经知道，电磁能的相互转换的现象就是电磁振荡器的现象。所以封闭导体空腔可以用作电磁振荡的谐振器，我们称它为“空腔谐振器”。简称“谐振腔”。

一、空腔谐振器的一般原理

1. 从 LC 振荡回路到谐振腔

在前面我们所接触的都是集中参数的振荡回路，也就是 LC 谐振回路。但当把频率提高到微波波段时，再用 LC 谐振回路时，它便暴露出很多难以克服的缺点。其主要的有以下三点：

(1) 在微波波段时，回路的尺寸与波长可以相比较，故辐射损耗很大。

(2) 由于频率很高，由趋肤效应引起的热损耗和介质损耗，随频率的升高而急剧增加。

(3) 由于频率很高，电感和电容量要很小，因而元件体积过小，机械加工困难，而且机械强度也不够。

由于辐射损耗，趋肤效应损耗以及电介质损耗的增加，使谐振回路的品质因数降低，谐振阻抗减小，以至于在分米波段集中参数的谐振电路就很难保证足够的频率选择性。另一方面由于元件尺寸大大减小，容易发生电击穿现象。为了避免击穿就要降低工作电压，因而使功率输出降低。

为了克服上述困难，可以用双根长线的短截线做成分布参数的谐振回路，然而这种谐振回路也只能用到分米波段，频率再升高，到微波波段时也不能满足工作的要求。

为了克服集中参数回路在微波波段的这些缺点，我们就要想办法解

决上面的这些矛盾。

因为 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，所以减小 L 和 C 就可以提高回路的谐振频率。因此，首先来看在微波波段如何减小 L 和 C 。要减小 C 值必须增加电容器极板间的距离；而要减小电感 L 值，首先要减少线圈的匝数最少就是一根直线。如图 4-1 所示。但这只能初步满足提高频率的要求，要进一步提高频率必须再设法减小电感 L 的值。如在电容器极板间并联很多直线，并联的总电感将变得很小。如果并联的直线将无数的增加，这些导线就成了一个整体的导体，并把电容器的极板封闭起来，这样将不仅使 L 大大地减小，而且消除了电磁波的辐射损耗。此外，由于导体的截面积比一根导线截面积大得多，所以使电阻损耗也大大的减小。同时制造工艺的困难也将大大减小。这样，基本上克服了集中参数 LC 谐振回路的缺点。图 4-3 示出了由集中参数的谐振回路到圆柱形谐振腔的过渡。其中图(f)是腔内的电磁场分布。

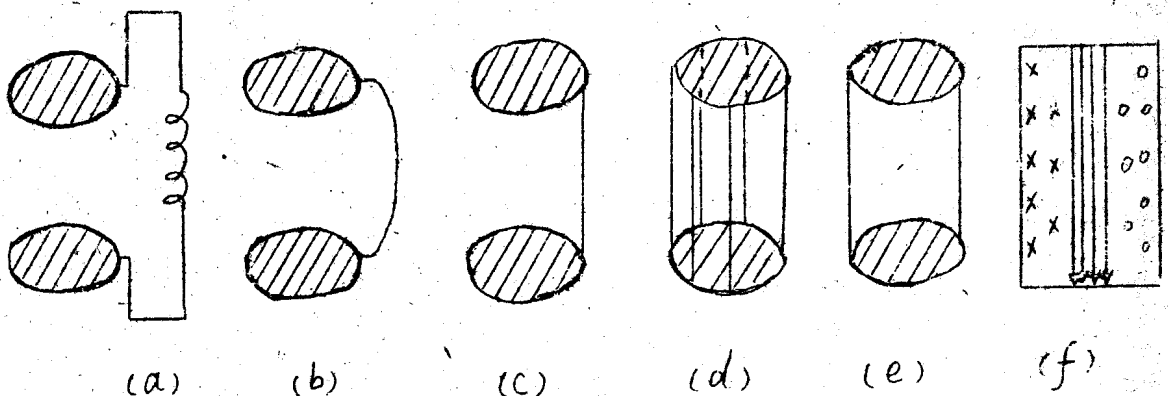


图 4-3 由集中参数的谐振回路向圆柱形谐振腔的过渡

与一般谐振回路相比较，谐振腔的优点是：

- (1) 由于电磁场全部限制在金属空腔内，相当于电磁场加了一个屏蔽罩，故没有辐射。

(2)因为谐振腔内只有空气，没有其他电介质，所以介质损耗较小。

(3)因为作为高频电流通路的腔内壁的面积扩大了，故金属电阻损耗也很小。由于损耗小，谐振腔有很高的品质因数和非常大的谐振阻抗。

(4)结构坚固，机械制作较方便。

由于谐振腔在微波波段，具有上述的优点，所以谐振腔在微波波段得到了广泛的应用。关于应用问题我们后面再举例说明。

2. 谐振腔的振荡物理过程

为了学习谐振腔的振荡物理过程，先复习一下LC谐振回路的基本原理。

设图4—4中的L和C都是无耗的。

先在电容器C上充一电压 u ，然后通过电感L放电，形成了回路电流 i 。电容器C储藏的电能为 $W_C = \frac{1}{2}Cu^2$ ，电感储藏的磁能为 $W_L = \frac{1}{2}Li^2$ 。我们在学电工

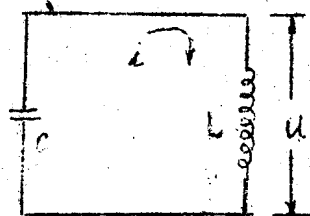


图4—4 集中参数LC谐振回路

课中已经知道，在无耗的L—C电路中， u 和 i 相位差 90° ， u 最大时 i 为零；而 i 为最大时， u 为零。因而，电能最大时，磁能为零；磁能最大时，电能为零，而且电能最大值等于磁能的最大值。这样，电磁能在电容器及电感中互相转换，形成回路的电磁振荡。其每秒转换的次数，就是振荡频率 f_0 ($f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$)。如果回路中有损耗，振荡将按指数衰减。若回路由外界激发，并且激发频率等于振荡频率时，则回路中的振荡得到了周期性的加强，因而可以得到最强的振荡，这就是谐振回路对频率有选择性的原因所在。由上述可见，回路电磁振荡过程的实质是电能和磁能的相互转换。

谐振腔内电磁振荡的实质是和集中参数的振荡相同的。现

在以矩形谐振腔为例，分析腔内电磁振荡的物理过程。如图4—5所示。中间插入探针做为激励装置。若给探针一个激励脉冲，则电磁波将在谐振腔中向各个方向辐射。但由于波导两端用金属导体封闭，电磁波将来回反射因而沿波导形成驻波。由于驻波，腔内电场和磁场在时间上有90°的相位差。这也就是说，在谐振腔内电场能量最大时，磁场能量为零；反之，当磁场能量最大时，电场能量为零。因而在腔内电能与磁能相互转换，形成了持续振荡。其转换次数就是谐振腔的谐振频率。如果谐振腔不是用理想导体制成的，腔内振荡也将按指数律下降，形成了衰减振荡。如果对空腔连续激励，而激励频率与谐振腔振荡频率相等时，振荡将最强。这是因为激励与腔内电磁能量转换同步而不断加强这种振荡的结果。

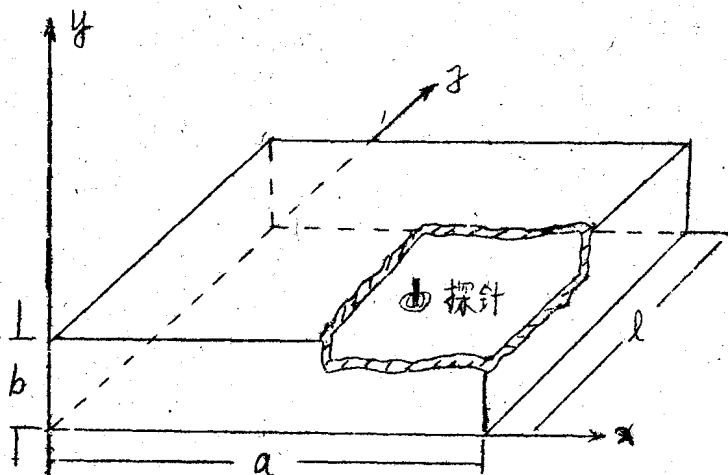


图4—5 矩形谐振腔中探针的激励

谐振腔的振荡过程与谐振回路一样，都是电磁能的互相转换过程。但是，它们之间也存在着不同的特性，其一是谐振回路的电能和磁能分别集中在电容器和电感器中，有明显的“电区域”和“磁区域”。而谐振腔中，电磁能是以分布形式出现，而且处于同一空间，无法分出“电

的”或“磁的”区域。第二，谐振回路只有一个谐振频率，但谐振腔却具有多谐性。当谐振腔尺寸一定时，在理论上讲，应当有无限多个谐振频率。多谐性的原因是这样的：当腔体的尺寸一定时，若频率改变，只要保证驻波分布为半个波长的整数倍，也同样可以产生谐振。这样就有了很多的谐振频率。称为振盪波型，但是在谐振中，这么多的谐振频率是有一定间隔距离的，因而在一定的工作频率范围内，可以看成是只有一个谐振频率。第三，谐振腔的品质因数 Q 比一般谐振回路高得多。

3. 谐振腔的基本参数

在研究谐振回路的振盪特性时，我们采用了电容 C ，电感 L 和电阻 R 三个参数来作振盪回路的基本参数。这是因为这三个参量的测量简单方便，而且只要这三个参数确定之后，谐振频率 ω_0 、品质因数 Q 、谐振阻抗 Z 等参数都可求出。

但在谐振腔里，集中参数的 C 、 L 和 R 已没有实际使用价值，只能等效作出。因而采用了下列参数作为谐振腔的基本参数：

- (1) 谐振波长 λ_0 （或谐振频率 ω_0 ）；
- (2) 电导 G （或电阻 R ）；
- (3) 品质因数 Q

这三个参数，对于不同的振盪波型有不同的数值，振盪波型改变时，这三个参量都要改变。

谐振波长 λ_0 ，由腔的形状、体积大小、波型等决定的。体积形状的任何变化都会引起谐振波长的变化。因而谐振腔的调谐多是利用活塞或用调谐螺钉等改变谐振腔的体积，以便谐振频率相应地增大或减小。

电导 G （或电阻 R ）。它是描述一个谐振腔中有功损耗的量。它是将谐振腔等效于一般 LC 谐振回路而得的参数。

设谐振腔本身的损耗功率为 P_L ，
 则按图 4—6 等效电路得：

$$P_L = \frac{1}{2} u_m^2 G$$

式中 u_m 为等效电路 a, b 之间的交流电压的振幅值。

$$\text{故 } G = \frac{2 P_L}{u_m^2}$$

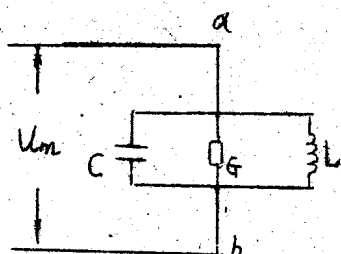


图 4—6 谐振腔以集中参数表示的等效电路

在谐振腔中，腔的损耗 P_L 一般能够计算，只要肯定 u_m ，则 G 亦可确定了。例如以同轴电缆输入谐振腔时，可令 u_m 为同轴线的输入电压，由于在讨论谐振腔时，电导这个参数用的不多，因此对它不作更多的讨论。

品质因数 Q ，是谐振腔的重要参数。它的意义是：在谐振频率时，谐振腔内的储能与在一周期内谐振腔内壁能量损耗之比的 2π 倍。因此，它决定振荡衰减的快慢，如果 Q 值大，则储能与耗能之比较大，振荡衰减较慢。反之则衰减快。

Q 的表示式为：

$$Q = \frac{2\pi \times \text{谐振腔内储能}}{\text{一周期中谐振腔内的能量损耗}} = \frac{2\pi \times W}{W_T}$$

$$\text{因 } W_T = P \cdot T \text{ 及 } \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$\therefore Q = \frac{\omega_0 W}{P}$$

式中 ω_0 为谐振时的角频率， W 为谐振腔内储能， P 为谐振腔内的能量损耗功率。这个损耗一般包括腔壁的电导损耗及腔内介质损耗，若存在缝隙或小孔，则还有辐射损耗。

由于谐振腔要与外界耦合，能量不仅要耗散在回路内，而且也耗散在负载中。这样问题就变复杂了。因此，品质因数 Q 就分成了三种：即有载品质因数 Q_H ，空载品质因数 Q_0 和外界品质因数 Q_e 。

有载品质因数 Q_H 的意义是：当谐振系统与负载相联系时，品质因数为有载品质因数。表示式为：

$$Q_H(\text{有载}) = \frac{\omega_0 W}{P_L + P_B}$$

式中 P_L 为腔本身的损耗功率， P_B 为消耗于负载的输出功率。

空载品质因数 Q_0 的意义是：当谐振系统不与负载相联系时，即无载时谐振系统本身的品质因数。或称谐振腔固有品质因数。表示式为：

$$Q_0(\text{空载}) = \frac{\omega_0 W}{P_L}$$

外界品质因数 Q_e 的意义是：在谐振系统中，单独由负载所决定的品质因数。表示式为：

$$Q_e(\text{外界}) = \frac{\omega_0 W}{P_B}$$

三种品质因数的关系为：

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{P_L}{\omega_0 W} + \frac{P_B}{\omega_0 W} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e}$$

上述三种品质因数，在微波系统中得到了广泛的应用。当谐振系统与负载联系较紧，负载变化时， P_B 也随之改变，从而有载品质因数是变化的，但由于 $P_B + P_L > P_L$ 。

故 $Q_H < Q_0$

即在负载情况下，有载品质因数 Q_H 比空载品质因数 Q_0 降低了。

所以在实际应用中，要分清有载品质因数和空载品质因数。

由于 Q_H 随外界耦合方法，耦合强度的变化很大，计算也较复杂，且并不表征谐振腔本身的特征，故不再研究它。我们仅讨论空载时的 Q_0 ，只要计算出储藏能量和损耗功率，即可求得空载品质因数 Q_0 。

谐振腔的 Q_0 值，一般都较大，一般都在几千以上。而有载品质因数 Q_H 与负载有关，一般较小。在许多实际问题中，如波长计等，都希望有较高的 Q_0 值。品质因数高这是它的优点，但在某些场合下它的这个优点就变成了缺点，如在宽频带工作情况下，即使 Q_0 很小，也不能满足宽频带的要求。

最后，简单介绍一下谐振腔的种类。

在微波技术中，常用的谐振腔有矩形、园柱形、同轴线形和环形等，它们主要是与电子器件配合作为负载，也可做频率标准的波长计。

下面我们将着重讨论应用较多的同轴线形和环形谐振腔。对矩形和园柱形谐振腔只作简单介绍。

二、同轴线型谐振腔：

由于同轴线谐振腔的波型简单，可以存在 TEM 波（横电磁波），工作较可靠，故得到了广泛应用。它可做超高频三极管，速调管（外腔式）的回路，也可用做波长计和混频器等。

同轴线谐振腔有三个形式被广泛应用：

(1) 将同轴线一端短路，另一端开路。这时产生驻波的条件是线的长度为 $\frac{\lambda}{4}$ 的奇数倍，因而称为 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振腔。

(2) 将同轴线两端短接，这时产生驻波的条件是线的长度为 $\frac{\lambda}{2}$ 整数倍。称为半波谐振腔。

(3) 将同轴线一端短路，另一端用一导体闭合，但导体端盖与内导体间有一定距离，因而形成电容器，我们称之为电容负载的谐振腔。

同轴线横截面上电磁场的分布如图4—7所示。

下面分别研究这三种谐振腔：

1. 四分之一波长谐振腔：

如图4—8所示。

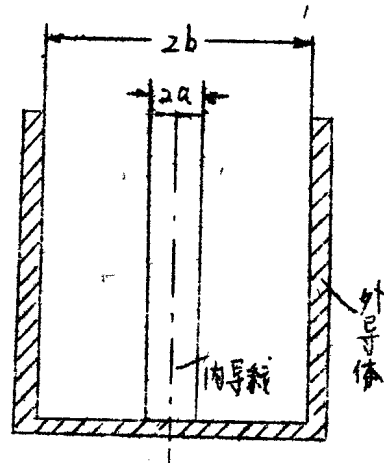
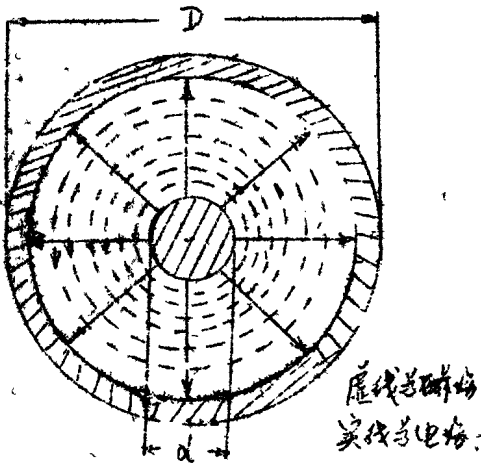


图4—7 同轴线横截面上电磁场的分布

图4—8 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振腔

这种谐振腔的谐振波长可以从第一章的长线理论中导出。

由长线理论知道，终端短路的长线的输入阻抗为：

$$Z_{in} = jZ_0 \operatorname{tg} \alpha l$$

式中 Z_0 为特性阻抗， α 为相位常数 ($\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$)， l 为线长度。

如写成输入导纳则为：

$$Y_{in} = -j \frac{1}{Z_0} \operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda}$$

要产生谐振， Y_{in} 的电纳部分必须为零。

$$\operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda_0} = 0$$

式中 λ_0 为谐振时的波长，当电纳部分等于0时则有

$$\frac{2\pi\ell}{\lambda_0} = (2n-1)\frac{\pi}{2} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

故得:

$$\frac{4\ell}{\lambda_0} = 2n-1$$

或 $\ell = \frac{\lambda_0}{4}(2n-1)$

或 $\lambda_0 = \frac{4\ell}{2n-1}$

根据上式谐振腔的最小长度相当于 $n=1$ 的情况, 此时, $\ell = \frac{\lambda}{4}$ 。除此之外, 当 $n=2, 3, 4, \dots$ 时还可能由其它谐振模式, 其相应地沿谐振腔的长度为 $\frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \frac{7}{4}\lambda$ 等等。图 4-9 画出了当 $n=1$ 和 $n=2$ 时两种谐振模式的场的分布图。

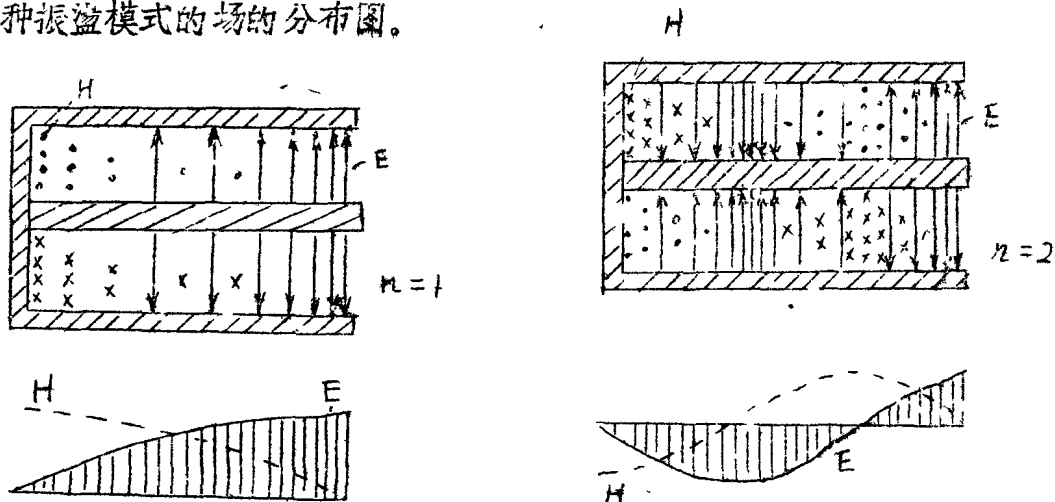


图 4-9 四分之一波长谐振腔中场的分布

谐振腔的谐振波长还可以由另外一种方法求出: 就是讨论这种谐振腔产生驻波的条件。例如一段传输线, 其两端加以各种边界条件 (如开路、短路、加负载等), 其等效电路如图 4-10 所示。当腔中来回反射的波 (电磁波或电压电流波), 满足一定相位条件而迭加成驻波, 腔

就呈现谐振状态。所谓谐振条件

就是来回反射波的相位叠加条件。

如图 4-10，设长线两端的负

载阻抗为 Z_1 和 Z_2 ，其反射的

相角分别为 φ_1 和 φ_2 ，设线长为

l ，相位常数为 α ，TEM波从

AA'端达到BB'端，相位移为 αl ，经过负载 Z_2 反射，相位移又改变了

φ_2 ，TEM波从终端传播到起始端，产生相位移 αl ，再经过负载 Z_1 反射，

相位移改变了 φ_1 。

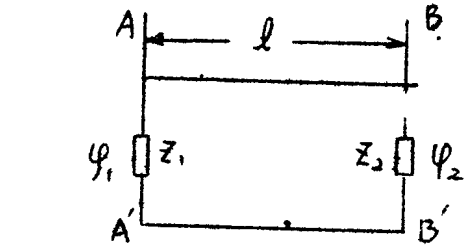


图4-10 由相位滞后谐振腔产生驻波的谐振条件

因此，TEM波由AA'端传到BB'端，再反射到AA'端后，其相位滞后应为：

$$\alpha l + \varphi_1 + \alpha l + \varphi_1 = 2\alpha l + \varphi_1 + \varphi_2$$

形成驻波的条件是上述相位滞后应为 2π 的整数倍（即相同相位的条件），因为只有这样才能满足独立地维持能量相互转换，在长线中才能产生谐振。

故谐振条件是：

$$2\alpha l + \varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi n \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

对于 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振腔来说：

由于一端短路，电压波反射后相位将反相，故 $\varphi_2 = \pi$ ，另一端开路。

$\varphi_1 = 0$ ，则

$$2\alpha l + \pi = 2\pi n$$

而

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

\therefore

$$\frac{4l}{\lambda_0} = 2n - 1$$