

## 介质谐振器的工作原理

我们目前所接触到的最基本的介质器件是介质谐振器。要了解介质谐振器的工作原理首先要了解金属波导与谐振腔。

### 一、金属波导的一般特性

传输电磁能量或电磁信号的途径可分为两类，一类是电磁波在空间或大气中的传播，另一类是电磁波沿波导系统的传播。人类最初应用的电磁波导系统是双线传输线，双线传输线主要用在频率较低的场合，当使用频率逐步提高时，双线传输线的传输损耗以及辐射损耗急剧的增加，为了克服辐射损耗，采用了同轴线结构。但是同轴线中所采用的模式仍然是 TEM 模，必须有内外两根导体，到了频率更高时内导体的损耗变得很严重。在微波频段即分米波段和厘米波段人们发现，用一根中空的金属管来传输电磁波是可行的和方便的。在空管中不可能传播 TEM 模式，因此采用 TE 模或 TM 模，这就是金属波导或称为波导管。到了短毫米波段及亚微毫米波段金属波导的截面积尺寸太小，加工不易，因此采用介质波导作为传输系统。在光波段使用光学纤维和光波导也是介质波导。光学纤维简称光纤现在已成为传输电磁信号的主要手段。

为了近似地实现短路面的边界条件可以用具有高导电率的导体即金属构成的边界面，这样就形成金属波导或称波导管。金属波导可以由一根波导管构成，也可以由多根波导管构成。略去导体表面损耗时，可将边界看作短路面。

波导波的特点是存在一个截止频率，当工作频率高于截止频率时，纵方向为快行波，横方向为驻波，工作频率低于截止频率时，纵方向成为衰减场或渐消场，横方向仍然为驻波。

金属波导的传播特性为  $\omega_c = T/(\mu \epsilon)^{1/2} = cT/(\mu \epsilon)^{1/2}$  或  $f_c = cT/2\pi(\mu \epsilon)^{1/2}$  临界状态下，电磁波在介质中的波长就是横向波长，即  $\lambda_T = 2\pi/T = 1/f_c(\mu \epsilon)^{1/2}$  相应的临界状态下真空中的波长称为临界波长。

当电磁波的角频率大于波长的临界角频率时，电磁波可在波导中传播，反之，波导是截止的。临界角波数决定于波导的截面形状和尺寸。

### 二、金属波导的波阻抗

金属壁是由良导体构成而非理想导体，因此电磁波在波导中传播时一定会有功率损耗，从而造成电磁波沿传播方向上的衰减。其衰减常数为：

$$a = 1/4 \sigma \delta * H^2 dL/P;$$

式中，L 为波导的横截面的闭合边界线；P 为波导中传输的功率流， $\sigma$  为波导壁的导电

率； $\delta$  为波导壁材料中电磁波的趋肤深度。

完全被短路面或开路面包围的封闭电磁系统就是谐振系统。通常用高导电率的导体即金属近似地实现短路面的边界条件，这就是金属壁的谐振腔。当略去腔壁损耗，即认为腔壁由理想导体构成，同时腔内充满不导电的无损媒质时，就是理想的谐振腔。

我们在描述谐振腔之前先做如下定义：矩形波导和矩形谐振腔的边界与矩坐标系统的做表面重合。谐振腔的高度为 $b$ 、宽度为 $a$ 。当矩形波导中 $a > b$ 时， $TE_{10}$ 模的临界角波数最小，即临界角频率最低，因此 $TE_{10}$ 模为最低模。当 $b < a/2$ 时 $TE_{20}$ 模是次低模，而当 $b > a/2$ 时， $TE_{01}$ 模为次低模。

当矩形波导中 $a=b$ 时，称为正方形截面波导，此时 $TE_{10}$ 模与 $TE_{01}$ 模临界角频率相同，此时的波导单模的传输带宽为零。因此正方形的波导没有实际用途。

### 三、 圆柱坐标系的波导与谐振腔

研究边界与圆柱坐标系统的坐标面重合的波导和谐振腔，他们包括圆波导，同轴线，圆柱腔，同轴腔，扇形截面波导与谐振腔等柱形系统。也包括径向线，喇叭波导等非柱形波导系统。

柱形波导的临界波长 $\lambda$ 为： $\lambda_{cTM} = 2\pi / TTM(\mu \epsilon)^{1/2}$

## 介质波导与介质谐振器

金属波导与金属谐振腔广泛应用于分米波厘米波以及较长的毫米波段。由于波导的横截面及谐振腔的尺寸与波长相近，例如矩形波导工作在 TE<sub>01</sub> 模时，其宽边尺寸大于二分之一波长，因此到了短毫米波段以及亚毫米波段，金属波导及谐振腔的尺寸太小，难于制造。在红外波段或可见光波段，即波长为微米量级时应用金属波导或谐振腔更不可能。为此，介质波导以及介质谐振器迅速的发展起来并获得广泛的应用。

虽然介质波导及介质谐振器的尺寸也处于波长可以相比的量级，但易于用微细加工手段制成微小尺寸。例如，截面尺寸为微米量级的光学纤维及光波导都属于介质波导。

金属波导中的场可以被看成是平面波在导体面之间往复反射造成的，介质波导中的场也可被看成是电磁波在介质界面之间全反射所造成的。因此，被疏媒质包围的密媒质就形成介质波导。

理想的金属波导内电磁场沿横向呈驻波，在波导边界以外近似于理想导体，不存在电磁场。在介质波导内电磁场沿横向呈驻波，但在介质波导外仍然存在电磁场，它沿横向呈渐减状态，称渐消场。

在充填均匀媒质的金属波导中，TE 模和 TM 模可以单独的满足波导壁的短路边界条件，因此永远可以将 TE 模与 TM 模分开，他们都可以在金属波导中传播。当金属波导中填充两种以上的媒质时，或部分充填介质时，电磁场除满足导体壁上的边界条件外，还必须满足媒质界面的连续条件。在均匀填充两种以上媒质的情况下只能有 TE 与 TM 的混合模式 HEM 模式。

在了解了以上内容以后，我们可以接下来进一步了解介质谐振器。早在 1939 年，介质谐振器的概念和理论就已经被提出但因为没有找到适当的介质材料，这个理论沉睡了 20 多年，未获得实际的发展，到了 20 世纪 60 年代金红石瓷等高介电率陶瓷（ $\epsilon \approx 80 \sim 100$ ）的研制成功，使介质谐振器又开始被人们注意。但是因为金红石瓷的温度系数太高，限制了它的实际应用。20 世纪 70 年代研制了钛酸钡系和钛酸锆系陶瓷，它们的介电率高，损耗小，温度系数低，才使得介质谐振器实用化。

介质谐振器具有体积小，重量轻，品质因数高，稳定性好等优点。特别是便于应用在微带电路或微波集成电路中和毫米波段，近年来受到很大重视，发展很快。当介电率很高时介质与空气的界面近似于开路面，电磁波在界面上的发射系数接近于 1。这时可以把介质谐振器的表面看成是开路壁，即磁壁。于是介质谐振器成为具有齐次边界条件的封闭系统，即等效开路壁（磁壁）谐振腔。

## 介质器件的应用

介质器件由于具有体积小，频率高，品质因数高，稳定的温度特性等特点，被广泛的应用与射频电路中。特别是在航空航天领域和微波通讯领域更是具有无可替代的优势。

介质谐振器件主要应用于卫星广播接收设备也就是目前行业上所描述的 XF 波段的广播信号，以及卫星通讯设备的信号接收设备。同时在直放站等身被里面作为标准信号源也得到了广泛的应用。

介质滤波器由于具有良好的选频特点和稳定的温度特性，特别是在射频范围内它具有较小的分布参数所以目前在应用领域正在趋向于GHz频段的情况下，介质滤波器得到了许多射频工程师的偏爱，在越来越多的领域内得到应用。随着介质材料的不断发展，产品可以做到更加小型化，带外衰减可以做到 30dB/10MHz. 插入损失带内波动等也得到了充分的改善，相信随着制造工艺的不断改善介质滤波器会得到越来越多的设计师们的青睐。介质谐振器按照它们的谐振模式可以分为TEM谐振器和TE<sub>01δ</sub>谐振器两种前者的工作频率在几百赫芝到十几吉赫芝之间，品质因数在几百到几千。后者的工作频率比前者要高很多目前我们国家可以生产上限频率高达几十吉赫芝的谐振器，品质因数可以达到几千到几万。远高于其他材料组成的谐振器。

介质天线在目前卫星导航与勘测领域以及卫星电视接收中得到了非常广泛的应用，由于介质天线在小体积的条件下就可以得到较大的增益从而在对体积要求较高的产品中被广泛的使用。我国的 GPS 导航卫星使用的频率是 1575.42MHz，全球定位卫星的数量目前是 24 颗卫星围绕在我们的上空，为了能够达到 3 维定位，我们的定位系统至少要同时可以接收来自 3 颗不同的卫星发射过来的信号才可以进行基本的定位计算。在目前市场上所使用的 GPS 介质天线大多数是 25\*25\*4mm 尺寸的，随着市场上对系统小型化的要求，目前已经有更加小型的介质天线应用于 GPS 导航系统。

介质双工器是应用于数字通信设备以及雷达接收设备等双工通讯系统中的重要器件，通双工器可以把发射信号与接收信号通过双工器把信号沿着不同的信号通道接入或者发射到空中。

伴随着新材料、新工艺的不断发展，具有良好的高频特性的介质器件将会有很大的发展空间，特别是在航空航天以及具有军事战略意义的电子军事对抗战中，截至器件将会发挥越来越大的作用。