

# 电磁干扰及其防护

徐 鸿 达

(中国科学院半导体研究所)

电磁干扰是环境污染中的一种，又称电磁污染或电噪音污染。由于它不能直接看见，不能尝味、嗅闻或感觉到，所以作为一种污染源，人们很少听说它。电磁干扰的频率是在 10Hz—100GHz 的范围，光的频段不包括在内。

电磁干扰的来源可分为两类：(1)自然源。它包括地球范围内的来源（如雷电、暴风雨飓风、天电干扰等）和地球范围外的来源（如宇宙噪声、太阳黑子爆发等）。(2)人为源。它包括电能（如发电机、传输线、转换器等），通讯（如广播中的调幅和调频，非中继通信、导航、雷达，中继通信等），工具和机械（如大功率工具、电力设备、运输装置等），点火系统（如发动机、车辆等），工业和民用设备（如锻压机、焊接机、超声波仪器、控制设备、计算机等）。它们的噪声电平如图 1 所示。

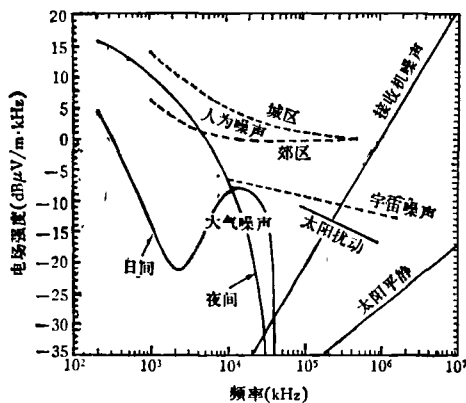


图 1 电磁噪声源及其电平

电磁干扰的防护对我们设计和使用仪器设备都是十分重要的。特别是在产品设计初期，就应该利用电磁兼容性设计来解决电子设备内部及其与电磁环境间的兼容性关系问题，以达到降低成本、提高性能的目的。设计时应首先

弄清楚电子设备中哪些是噪声源，以何种途径耦合，哪些是接收部分等等。通常我们可以通过图 2 所示的途径来抑制电磁干扰<sup>[3]</sup>。

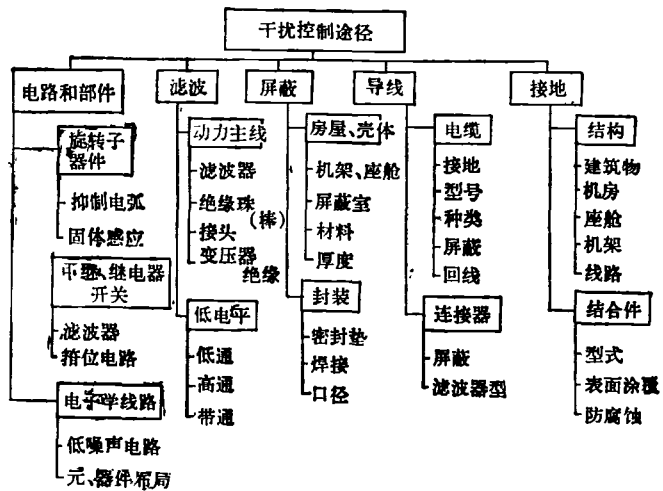


图 2 抑制电磁干扰的途径

下面就与此有关的两个主要方面——接地和屏蔽作一概要的介绍。

## 一、接 地

地球的“地”有两种含义，一种是以地球的电位作为电压的基准参考点，即零电位。另一种是作为传导介质。而电路中的“地”不一定具有和地球的“地”相同的电位。

电子系统的接地分安全接地和工作接地两种。安全接地是指系统中的每部分的金属外壳都要与大地短接。工作接地是对电路提供一个等电位，是抗电磁干扰的重要手段之一。总之，电子系统接地的理想情况是希望接地系统的每一点电位都为零。然而，实际情况是接地点之

间可能存在电位差,由它构成的干扰源将严重破坏电子设备工作,故要仔细考虑,并设计性能良好的接地系统。

### 1. 大地主要成份的电阻率

大地是由土壤、岩石、水等构成的。这些成分具有不同的导电性能,它对设计接地系统有重要影响。设计时,首先应查明接地系统所在地的地质情况,然后采取相应措施。现将大地的几种主要成分的电阻率的典型值列表如下:

表1 大地几种主要成分的电阻率的典型值

类型	材料	电阻率范围 ( $\Omega \cdot m$ )
土壤	好的	$10-10^2$
	一般的	$10^2-10^3$
	差的	$10^3-10^4$
水	新鲜水	$10^3-10^4$
	海水	$0.2-0.25$
沉积物	海沙和页岩	$1-10$
	海砂石	$1-10^2$
	粘土	$10-10^2$
	沙石(湿)	$10^2-10^4$
	沙石(干)	$10^4-10^7$
火岩	花岗岩	$10^3-10^5$
	玄武岩	$10^3-10^5$
变态岩	粘板岩、板石	$10^3-10^5$
	大理石	$10^3-10^4$
	片麻岩	$10^3-10^7$
	蛇纹岩	$10^3-10^7$

### 2. 接地电阻与地阻抗

为了使接地电阻减小到最低限度,一般采用接地棒的接地系统。几个紧挨着的平行的接地棒的接地电阻为<sup>[3]</sup>

$$R = \frac{\rho}{2\pi nL} \left[ \ln_e \left( \frac{4L}{b} \right) - 1 + \frac{2KL}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right], \quad (1)$$

其中  $R$  为接地电阻 ( $\Omega$ ),  $\rho$  为土质电阻率 ( $\Omega \cdot m$ ),  $L$  为棒长 ( $m$ ),  $b$  为棒的半径 ( $m$ ),  $n$  为在  $A$  面内的等间隔的棒数,  $A$  为棒覆盖层的面积

物理

( $m^2$ ),  $K$  为系数,是由  $L \rightarrow \infty$  时的 (1) 式的近似值确定。平行接地棒的接地电阻为<sup>[2]</sup>

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln_e \left( \frac{2L}{A} \right), \quad (2)$$

其中  $A$  为一个等效棒的半径,与棒的接法有关 (见图 3)。

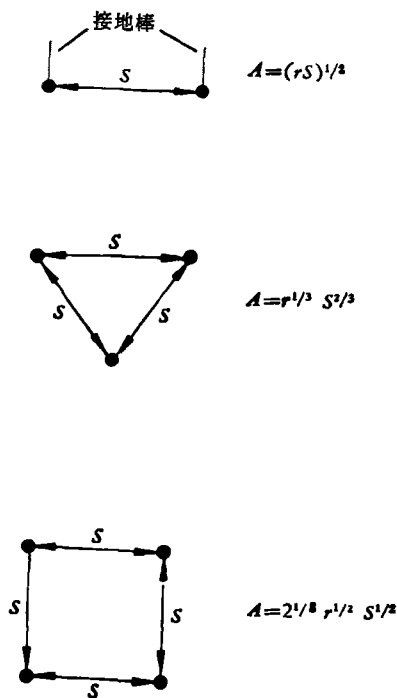


图3 多根接地棒相连后的等效半径 ( $r$  为单根棒的半径)

接地电阻的测量可用地电阻测试仪 (例如国产 2C-8 型接地电阻测量仪)。金属接地棒是用接地干线并联连接埋入地下的,也有以皂土 (粘土性矿物) 为 1, 水为 1-2, 食盐为 0.2 的比例混合后,浇灌于棒周围,以减小接地电阻。此外,接地网也是一种减小地电阻的方便方法,即用单根裸线或裸线网水平埋入地内而成。单根金属裸线水平埋入地内的地电阻为<sup>[2]</sup>

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left[ \ln \left( \frac{2}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 \right], \quad (3)$$

其中  $\rho$  为土质电阻率 ( $\Omega \cdot m$ ),  $l$  为线的长度 ( $m$ ),  $r$  为线的半径 ( $m$ ),  $d$  为埋入的深度 ( $m$ )。 (3) 式是在金属裸线有无限大的电导率且  $l \gg d$  的条件下推导出来的,故实际应用中误

差。

接地干线和支线一般用扁铜或铜线。为了防止与其它接地系统相互干扰，通常采用绝缘铜线或者将铜线与建筑物电绝缘。埋设的方法是在地表层挖一条深0.6—1m、宽0.3m、长几十米的沟，将铜线埋入。

地阻抗的计算方法如下<sup>[3]</sup>：

在金属物的接地面上，各种频率下任意两点间的地阻抗为

$$Z = R_{\text{rf}} \left( 1 + \text{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda} \right), \quad (4)$$

其中  $l$  为地面上两点间的距离 (mm)， $\lambda$  为波长 (mm)， $R_{\text{rf}}$  为接地面表面的射频电阻 ( $\Omega/\square$ )<sup>1)</sup>，对于各种导体，

$$R_{\text{rf}} = 0.26 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{\mu f}{G}}, \quad (5)$$

其中  $G$  为接地面材料相对于铜的导电率， $\mu$  为接地面材料相对于铜的磁导率。对铜，

$$R_{\text{rf}} = 0.26 \times 10^{-6} \sqrt{f}. \quad (6)$$

(6)式表明，当  $l > \lambda/8$  时，地面上两点之间的地阻抗  $Z$  可变得很大，故此时要多点接地，使地平面上有较小的电位差，在低频时，当  $l < \lambda/20$  时，地面上两点间的地阻抗  $Z$  正比于射频阻抗  $R_{\text{rf}}$ 。当地电流流过地面上两点间的  $Z$  时，就出现电位差，这样，公共阻抗将引起干扰。

由于土质不同，接地电阻也不同，近年来，着眼于用化学处理土壤的方法来降低接地电阻。以前通常是用改善接地电极周围土壤的电导率的方法(如填充木炭，盐水等)来降低接地电阻，一时可获得显著效果，但不能持久。最近，利用合成树脂制成的接地电阻减低剂来降低接地电阻，具有高导电性和持久性。该减低剂是由低分子量树脂材料、电解质化合物和硬化剂组成。把它和水混合，在大地进行化学反应，在电极周围生成高导电性硬化树脂。减低剂是含水硬化树脂，其中的电解质被致密的网状树脂所包围，不会流失，从宏观上看，似凝胶，从微观上看，它是液态和固态共存。它在高电阻率地带应用是很经济的。

### 3. 接地系统设计的原则

一个电子系统有许多接地点，需要考虑如何进行合理的设计和布局，避免形成地环路，并减小公共接地阻抗上的干扰电压，以达到建立一个接近零电位的系统的目的。设计的基本原则是把一个电子系统中各部分所具有的电平或电位，按大小进行分类。将微弱电平或小功率的部分归为一类，称为微弱信号接地。因这部分灵敏度高，易受外界干扰，要设置专门的接地线，如放大电路、逻辑电路、扫描电路等。其次，将功率大的、电平高的部分归为一类，设置专门的接地线与前者分开，互不影响，这部分对外干扰不灵敏，但可能成为内干扰源，如马达、大功率高频感应炉等。最后是设置一种能使设备外壳接地的安全地线，其作用是泄漏外壳吸收的干扰信息。以上三类接地线，每类可为若干根，分别并联后再接地，以减小相互耦合的影响，避免公共地阻抗引入的干扰。一般的整机或部件、插件都可分别地使用上述各类接地线，综合构成优良的接地系统。

一个接地系统的抗干扰性能与频率、功率、接地线的形式、大小、材料等因素有关，设计时应根据具体情况统筹考虑。

### 4. 电子系统的接地举例

一般电子系统的接地系统有以下四种，即单点接地系统、多点接地系统、悬浮接地系统和混合接地系统。其中，一般以多点接地系统比较理想，实用效果好。例如，船舶上的电子系统接地就是一个多点接地系统，它以船舶为电位基准，电子系统中各类接地线以低阻抗分别连接在金属船壳上。

如何选择接地系统的基本型式？可根据地阻抗  $Z = R_{\text{rf}} \left( 1 + \left| \text{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} \right| \right)$  的公式，得到低电

1)  $\Omega/\square$  代表一个方形金属物体的电阻值。设一方形金属物体的长为  $l(\text{mm})$ ，宽为  $l(\text{mm})$ ，厚为  $d(\text{mm})$ ，电阻率为  $\rho(\Omega \cdot \text{mm})$ ，则其电阻值  $R = \rho l/dl = (\rho/d)(\Omega)$ ，即为  $\Omega/\square$  (欧姆/方)。计算  $Z$  时，应将金属几何尺寸折算成方形数来运算。

平电子系统的最高工作频率与电子系统的最远安装距离的关系。对于低频 ( $f < 1\text{MHz}$ ) 和小距离的情况,选用单点接地型式;对于高频 ( $f > 10\text{MHz}$ ) 和大距离的情况,选用多点接地型式为宜。

现举一个计算机接地系统的例子。首先把具有可变的电压和电流的电路、逻辑电路用一根专用接地线接地,即弱信息接地;其次,把继电器电路、电源用一根专用接地线接地,即功率接地;屏蔽外壳也另设独立的接地线与前二者分开。计算机的机架、底座以及其它设备,包括外部设备,各自引线与总的公共接地点相连,总的公共接地点可用大尺寸的铜块来做,然后将总的公共接地点与埋入地下的接地棒相连。由于接地系统采用各自独立的接地线,所以不存在公共接地线的阻抗引起的寄生耦合效应,防止了干扰。应注意接地线采用短、直、粗的导线。

## 二、屏蔽

### 1. 屏蔽的分类

在电子装置中,由于外来的或各部件间的电力线和磁力线的作用引起电磁干扰,同时由于它们的电场或磁场所产生的反馈作用,引起装置特性改变,甚至产生振荡。为了消除这些干扰,就设法使电力线或磁力线限制在一定的空间范围内;反之,也可使一定的空间范围不受外来电力线或磁力线的作用。这种使电场或磁场不产生作用的办法称为屏蔽。一般是用一个金属物体来把它们隔开,此物体称为屏蔽体。屏蔽按其作用可分为:(1)静电屏蔽:作用是防止静电感应、耦合而产生的相互干扰。(2)电磁屏蔽:作用是防止磁力线的相互干扰,主要用于高频。(3)磁屏蔽:作用是防止磁感应,主要用于低频。此外,屏蔽还可按干扰源所处的位置分类,包括:(1)有源屏蔽:是指干扰源在屏蔽体内,作用是防止干扰传到屏蔽体外部去。(2)无源屏蔽:是指干扰源在屏蔽体外,作用是防止干扰进入屏蔽体内。前者必须接地,

接地电阻愈小愈好;后者虽然不须接地,但在实用上几乎都是接地的,根据仪器设备操作要求也应接地。

### 2. 屏蔽原理

#### (1) 有源屏蔽原理

(A) 静电屏蔽:其作用是防止静电场干扰。例如空间有一带  $+Q$  电荷的 A 物体,其电力线向外辐射,为了防止 A 物体的干扰,在其外包以导体 B,这时导体 B 的内侧有一  $-Q$  电荷,外侧有  $+Q$  电荷, B 的总电荷虽为零,可是电力线仍未消失,故只用导体包起来并不能起屏蔽作用。但当 B 接地后, B 的电位为零,外部电力线消失,起到屏蔽作用。当  $+Q$  随时间  $t$  变化时,接地线中有电流流过,由于接地电阻不为零, B 上有剩余电荷,将有残存的感应电磁场,故还不是完全屏蔽。

(B) 电磁屏蔽:它是利用屏蔽导体中感应的涡流作用来进行屏蔽的,主要用来防止高频电磁感应。若将屏蔽体接地,则同时具有静电屏蔽作用。屏蔽材料通常选用铜、铝等高电导率金属。除了屏蔽雷达调制器和电容放电式的点火装置等特殊情况外,屏蔽体的厚度只要能满足必要的机械强度即可。

(C) 磁屏蔽:其作用是使磁力线集中在磁阻很小的磁屏蔽体内,防止磁力线外泄,为了有效地进行屏蔽,要选用坡莫合金之类的高磁导率的材料。由于漏磁的存在,不可能得到像电磁屏蔽那样的效果,一般采用多重屏蔽较有效。例如,电视机的电源变压器屏蔽就是低频磁屏蔽的一个实例,用带状铁板在变压器各侧面缠绕几层即可。磁屏蔽主要用在低频。当用于高频时,因磁滞和涡流损耗大,磁导率也下降,会造成  $Q$  值降低。

#### (2) 无源屏蔽原理

(A) 静电屏蔽:其原理是用导体将部分空间包起来,电力线起始和终止于导体,其数目相等,正、负电荷相等,总电荷为零。由于电荷的迁移仅在导体本身,没有必要接地来使外部电荷迁移。

(B) 电磁屏蔽: 在距干扰源远的场合, 它是对辐射电磁场进行屏蔽, 在距干扰源近的场合, 则是对感应电磁场进行屏蔽。

(C) 磁屏蔽: 其原理是在磁场中利用放置高导磁率材料, 使磁通集中于其内部而实现屏蔽。铁作为磁性材料有较大的磁导率和电导率, 它不仅有磁屏蔽作用, 而且有电磁屏蔽作用。因此, 在高频时, 无源屏蔽就具有电磁屏蔽和磁屏蔽两种作用

### 3. 屏蔽材料及选择

用于屏蔽的金属材料的特性如表 2 所示<sup>[4]</sup>。金属材料在各种频率下的屏蔽效能如表 3 所示。

表 2 用于屏蔽的金属材料特性<sup>[4]</sup>

金 属	相对电导率*	相对磁导率**	吸收损耗 (db/mil)		
			100Hz	10kHz	1MHz
银	1.05	1	0.03	0.34	3.40
铜(退火)	1.00	1	0.03	0.33	3.33
铜(控制)	0.97	1	0.03	0.32	3.25
金	0.70	1	0.03	0.28	2.78
铝	0.61	1	0.03	0.26	2.60
镁	0.38	1	0.02	0.20	2.04
锌	0.29	1	0.02	0.17	1.70
黄铜	0.26	1	0.02	0.17	1.70
镉	0.23	1	0.02	0.16	1.60
镍	0.20	1	0.01	0.15	1.49
青铜	0.18	1	0.01	0.14	1.42
铁	0.17	1000	0.44	4.36	13.6
锡	0.15	1	0.01	0.13	1.29
钢	0.10	1000	0.33	3.32	33.2
铍	0.10	1	0.01	0.11	1.06
铅	0.08	1	0.01	0.09	0.93
莫乃尔合金	0.04	1	0.01	0.07	0.67
透磁合金	0.03	80000	1.63	16.3	163
不锈钢	0.02	1000	0.15	1.47	14.7
高导磁率镍钢	0.06	80000	2.28	22.8	228
铁镍锰磁合金	0.03	80000	1.63	16.3	163

\* 相对铜而言。

\*\* 是在 100 kHz 下测得的。

目前国外常用铜箔, 其种类有冲压铜箔、轧制铜箔、电解铜箔等。电解铜箔是电解液中的阴极镀铜后, 将其上的铜剥下而成。粗表面的电解铜箔高频特性较好。根据经济和加工考

表 3 各种频率下的屏蔽效能\*

材 料	频率 (kHz)	吸收损耗 A (db)	反射损耗 R (db)		
			电场	磁场	平面波
磁 性 ( $\mu \geq 1000$ )	低频 (<1)	10-30	>150	<10	100-150
	中频 (1-100)	100-150	100-150	10-30	50-100
	高频 (>100)	>150	50-100	30-50	50-100
非磁性 ( $\mu = 1$ )	低频 (<1)	<10	>150	10-30	100-150
	中频 (1-100)	10-30	>150	30-50	100-150
	高频 (>100)	100-150	100-150	50-100	50-100

\* 表中数据是在材料厚度为 0.79 mm、离干扰源的距离为 3.05m 的条件下算得的。

虑, 铜箔应有适当厚度。日本是以使用 0.036 mm 厚的铜箔为主, 粘结在 3m<sup>2</sup> 面积上的铜箔重量约 1kg。美国是以使用 0.107mm 厚的铜箔为主。若在电解铜箔的一侧添加电波吸收剂 (在沥青中混以石墨而成), 其效果会更好。金属箔有许多使用方法, 其中较新颖的一种是利用金属箔制成墙纸<sup>[5]</sup>。这种金属箔墙纸由于造价低, 使用方便, 故在屏蔽要求不十分高的场合应用较多, 有时用它作成几百平方米大小的屏蔽间。这种金属箔墙纸要用其它材料连接起来, 如压敏金属箔带、导电树脂、填隙化合物等。这种墙纸是用铜箔、铝箔或电导率和磁导率相当高的不锈钢箔做成, 其厚度一般为 2-3mil。200 kHz 时, 其典型的屏蔽效能为 25-40 db; 200 kHz-10MHz 时, 效能为 80-100 db; 400 MHz 以上时, 效能为 60-80db。有用 1mil 厚的金属箔压在 5-10mil 厚的塑料基膜上做成一种充气结构的屏蔽房。

导电塑料用于密封屏蔽壳体<sup>[1,3]</sup>, 它是由塑料中充以导电的金属填料, 并使其在塑料块中保持分子-分子接触, 从而保证良好的导电性。其导电性与压力有密切关系, 需在连接处施加一定压力才能得到良好性能。

用于防电磁干扰的屏蔽体已制成构件和整体<sup>[6]</sup>的主要有以下几种:

### (1) 金属垫

它是用屏蔽金属网窄幅带(有铁、镀银黄铜、镀锡钢、铝、蒙乃尔合金)和氯丁橡胶或硅树脂的窄幅条板连接在一起,做成各种形状,具有屏蔽和气密作用。其特性为:在14kHz时,磁场衰减量 $>30\text{db}$ ;18MHz时,电场衰减量 $>102\text{db}$ ;1GHz时,平面波衰减量 $>93\text{db}$ 。安装衬垫可用导电胶合剂。

### (2) 屏蔽窗

它用于视读设备面板的数示部位。它是在两层玻璃或丙烯酸板之间装入一层针织的金属细网,并将其装在具有防电磁干扰泄漏的垫圈框架上做成,有方形和圆形两种。其特性为:14kHz时,磁场衰减量 $>30\text{db}$ ;18MHz时,电场衰减量 $>90\text{db}$ ;1GHz时,平面波衰减量 $>55\text{db}$ 。还有在光学玻璃上蒸镀金属膜的屏蔽窗,其特性为:1MHz时,磁场衰减量为74—95db;10MHz时,电场衰减量为57—72db;100MHz时,电场衰减量为28—46db;1GHz时,平面波衰减量为4—21db。

### (3) 屏蔽换气板

它是装在以屏蔽垫圈为衬底的框架上的金属蜂窝装置,有铝、铜或黄铜做的。其特性为:14kHz时,磁场衰减量 $>45\text{db}$ ;18MHz时,电场衰减量 $>102\text{db}$ ;1GHz时,平面波衰减量 $>50\text{db}$ 。

### (4) 屏蔽室与电波暗室

屏蔽室分为防外部干扰进入室内的无源屏蔽室和防内部高频大功率干扰泄漏出去的有源屏蔽室两种。电波暗室又称电波静室,它相当于光学的暗室或声学的静室。它是在屏蔽室内墙上安装电波吸收层,使室内无反射电波,在其中进行测量如同在无限空间中进行测量一样。由于电波暗室需设吸收墙,其厚度与波长成比例。当频率在50周以下时,吸收墙要很厚,造价昂贵,且难实现。为了对低电平电子设备进行实验和对仪器进行校正等,电波暗室是很必要的,但实际上往往用无源屏蔽室来代替。由于铁的吸收作用比铜强,内壁用铁做,会使屏蔽室具有一定的暗室效果。为了得到较好的效果,应将

物理

屏蔽与滤波器联用,特别要使用电源滤波器或屏蔽变压器。屏蔽室的屏蔽效果与屏蔽材料间的焊缝处理有很大关系,其寿命也主要取决于焊缝的处理,这是因为金属网表面氧化,网格交点几乎绝缘,电流不易流过,使屏蔽效能降低。弥补措施是用锡将格点焊住,并采用两层屏蔽。由于屏蔽效能(特别是电解铜箔)是以反射损耗为主,故一般不采用将屏蔽材料埋入混凝土墙内的办法来造屏蔽室。另外,还有装配式屏蔽房,它是用屏蔽层板和槽钢装配而成,在层板的两面张贴电解铜箔和镀锌铁皮,装配完善时,效能可达100db以上。目前国产P-22型鼠笼式屏蔽间就是装配式的,用两层铜网作层板,其性能为:150kHz时,门隙处达75db;80kHz时,只有45db。当用钢板和铜板合成层板,80kHz时,效能可达75db。另外,根据实际需要试制成防声、防红外线、防电磁干扰的“三防”屏蔽间,30MHz时,效能达75db。由于屏蔽房像一个金属腔体,如因透射或泄漏使电磁波的频率与其固有频率相同,则产生谐振,使效能降低,甚至报废,这是设计时应该注意的。国内用于屏蔽的构件和整体虽已有试制和少量生产,但品种少,制造工艺落后,性能较差,亟待提高,以满足电子工业的需要。

目前,国外盛行吸波材料制成的电波暗室<sup>[3-5]</sup>。这种吸波材料一般分为干涉型和吸收型两种。干涉型是利用表面产生的反射波同进入材料后返回的波相抵消来达到吸收的目的。材料的底面一般有一个强反射基底。国内已试产的有镁粉酚醛薄层、P<sub>4</sub>甲环氧薄层等。吸收型材料的作用是减小表面反射,做成阻抗渐变类型的结构。其几何形状有多层的、锥形的、竖井形的等。它的有效频带宽受基底影响小,吸收性能好,但厚度大,体积大。用它做成的电波暗室,效能可达140db。国内已开始试制和使用这种暗室,但性能尚待改进,成本尚待降低。

综上所述,屏蔽材料可按以下原则进行选择:

(1) 在低频时,只有铁磁性能材料能屏蔽磁场,此时材料的厚度是一个必须考虑的重要

因素。

(2) 对一定的材料,屏蔽磁场的材料厚度要比屏蔽电场的厚。在高频时,对一定的材料,只需较小的厚度。

(3) 在足够高的频率情况下,非铁磁材料(如铜、铝)对电场和磁场有较好的屏蔽效果。

(4) 对 60—800Hz 频率的电场,用薄的导电材料如铁、铜、铝、黄铜来屏蔽。

(5) 因磁饱和而使屏蔽无效时,则可采用两层或多层屏蔽结构,外层用中等磁导率的材料,最里层用高导磁率材料。

以上所述仅仅是一些基本知识,实际运用时还较复杂,需要根据具体情况统筹考虑,以达

到最佳的屏蔽效果。

### 参 考 文 献

- [1] 荒木庸夫, 电磁妨害と防止对策, 東京電機大学出版局, (1977).
- [2] Ralph E. Taylor, Radio Frequency Interference Handbook, (1971).
- [3] Donald R. J. White, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 3, Don White Consultants, Inc., (1973).
- [4] Donald R. J. White, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 4, Don White Consultants, Inc., (1971).
- [5] Donald R. J. White, A Handbook on Electromagnetic Shielding Materials and Performance, Don White Consultants, Inc., (1975).

## 核 反 应 激 子 模 型 综 述

高 良 俊 王 书 暖

(中国科学院原子能研究所)

### 一、引 言

激子模型是描写核反应预平衡衰变的唯象理论。为说明什么是预平衡衰变,请看图 1<sup>[1]</sup>。

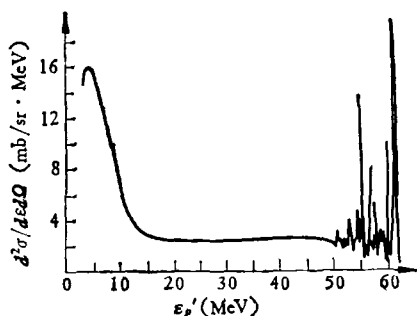


图 1  $^{56}\text{Fe}(p,p)$  反应定向能谱  
(入射能量  $\epsilon_p = 62\text{MeV}$ , 方向角  $\Omega = 35^\circ$ )

根据图 1 谱形的特点,大约可分为三段能区:

(1) 在 50—60 MeV 的能区中,出现许多尖锐、分立的共振峰,它表明在峰值对应的能量发

射核子突出地多,这些峰值对应着剩余核低激发态的能级。该段能谱是由直接反应机制发射的。

(2) 大约在 5—15 MeV 左右,出现一个宽大的峰,通常称这种图形为麦克斯韦分布,它是由蒸发模型提供的,称为蒸发谱。

(3) 在 15—50 MeV 区间,谱形是一段平坦的曲线,它介乎直接反应与复合核蒸发谱之间,这段广阔的能区就是激子模型将要描述的预平衡发射的贡献。

假如从核反应进行时间的快慢来分析,直接反应所用时间最短,复合核衰变用的时间最长;预平衡衰变既不象直接反应那样短,也不象复合核衰变那样长,它是非平衡统计的中间过程。我们讲述的激子模型就是描述这种非平衡中间过程的理论。

### 二、激子模型的图象和公式

根据原子核结构的费米气体理论,把原子