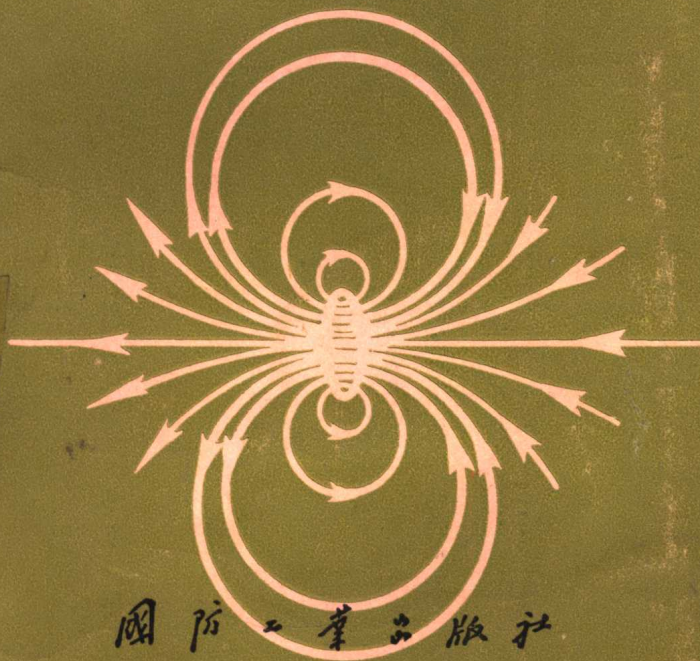


# 电磁屏蔽的理论基础

〔苏〕 Д.Н. 莎皮罗 著  
甘得午 张 瞰 译  
钱效伯 校



国防工业出版社

# 电磁屏蔽的理论基础

〔苏〕 Д.Н. 莎皮罗 著

甘得午 张 瞰 译

钱效伯 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书叙述了电磁屏蔽中发生的主要物理过程，讨论了屏蔽效能与屏蔽室的尺寸、材料、壁厚、孔洞及频率的关系，介绍了与屏蔽效能有关的计算公式和一般的测试方法。书中插图较多，比较具体形象，易于理解。

本书可供通信、测量等无线电专业的工程技术人员、工人及有关院校师生参考。

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Д.Н.Шацкиро

Л., «Энергия», 1975г.

\*

### 电磁屏蔽的理论基础

[苏]Д.Н.莎皮罗 著

甘得午 张 瞰 译

钱效伯 校

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

山西省七二五印刷厂承排 国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/32 印张3<sup>9</sup>/16 72千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷 印数：0.001—5,700册

统一书号：15034·1995 定价：0.39元

## 前 言

随着我国社会主义建设事业的飞速发展，电气设备和电子设备得到了广泛的应用。于是电磁波的干扰也日趋严重，因此，合理地设计和制造抑制干扰的屏蔽室，是当前必须予以解决的重要课题之一。

苏联Д.Н.莎皮罗所著《电磁屏蔽的理论基础》一书中，对有关电磁屏蔽方面的问题作了比较系统的论述，对从事设计和制造屏蔽室的工作人员有一定的参考价值。

在本书的译校工作中，得到了任雨吉副总工程师的全力支持和设计屏蔽室的蔡济权、滕景新等同志的大力帮助，在此表示深切的谢意。

译 者

# 目 录

序 言	1
第一章 电磁屏蔽概论	2
1、电磁屏蔽的定义	2
2、电磁屏蔽的作用原理	2
3、屏蔽效能的定量评价	3
4、屏蔽效能与场源特性之间的关系及屏蔽种类	4
5、屏蔽时的谐振现象	6
6、屏蔽的可逆性	6
7、屏蔽对电磁场源和防护对象的反作用	7
第二章 用无限的平面屏蔽体对平面电磁波进行 半空间屏蔽	9
8、导电平面上平面电磁波的反射	9
9、平面电磁波透入导体内部的透入深度	13
10、无限的均匀的平面屏蔽的效能及其计算公式	15
11、屏蔽表面上电磁波的反射和电磁波穿过屏蔽体 时的衰减	18
12、作屏蔽用的各种金属材料的比较及其选择	21
13、双层屏蔽的效能及其使用范围	23
14、双金属屏蔽的效能	26
第三章 电偶极子的封闭屏蔽	27
15、导体移入静电场时产生的现象	27
16、频率为零时电偶极子的屏蔽	28

17、屏蔽和接地·····	30
18、电偶极子的屏蔽效能与频率的关系·····	32
19、球形屏蔽对基本电偶极子的屏蔽效能以及实际 屏蔽对开路辐射器屏蔽效能的计算·····	33
<b>第四章 载流线圈的封闭屏蔽·····</b>	<b>37</b>
20、频率为零时载流线圈的屏蔽·····	37
21、屏蔽载流线圈的效能与频率的关系·····	39
22、球形屏蔽对基本磁偶极子的屏蔽效能以及实际 屏蔽对闭路辐射器屏蔽效能的计算·····	42
23、对基本电偶极子和基本磁偶极子屏蔽效能的比较·····	44
24、用封闭屏蔽对电磁场源屏蔽效能的一般结论以 及实际封闭屏蔽的计算·····	46
<b>第五章 孔洞和缝隙对屏蔽工作的影响·····</b>	<b>47</b>
25、关于孔洞和缝隙对电磁屏蔽工作影响的一般 考虑及其评价·····	47
26、透过无限薄、理想电导屏蔽上小孔洞的电磁场·····	48
27、透过无限薄、理想电导屏蔽上小孔洞的准静电场·····	50
28、透过无限薄、理想电导屏蔽上小孔洞的准静磁场·····	54
29、屏蔽壁厚对电磁场透过孔洞的影响·····	61
30、带有孔洞和缝隙的屏蔽效能的计算及其 在结构上的考虑·····	65
31、金属网屏蔽的效能及使用时的考虑·····	70
<b>第六章 对称长线的屏蔽·····</b>	<b>76</b>
32、关于长线屏蔽的一般考虑·····	76
33、密实圆柱形屏蔽对对称长线的屏蔽效能·····	77
34、金属编织层对对称长线的屏蔽效能·····	80
35、屏蔽上的圆缝对对称长线屏蔽效能的影响·····	85
36、对称长线屏蔽的实际做法·····	87

第七章 非对称长线的屏蔽	88
37、密实金属包皮的耦合阻抗	88
38、金属编织层的耦合阻抗	90
39、非对称长线的屏蔽效能	91
40、圆缝对非对称长线屏蔽效能的影响	95
41、非对称长线屏蔽的实际做法	96
第八章 屏蔽对被屏蔽场源的影响	98
42、屏蔽对场源影响的一般考虑	98
43、屏蔽内的损耗	100
第九章 屏蔽效能的测定	104
44、场源屏蔽效能的测定	104
45、实验室和生产房间屏蔽效能的测定	105
参考文献	107

## 序 言

电磁屏蔽技术广泛地应用于现代电工领域，首先应用于电信技术中。电磁屏蔽的作用，是减弱给定仪器或仪表中一些元件对其它一些元件的有害影响；是保护各种仪器和仪表整个地免受外部装置所产生的电磁场的干扰；是抑制工业无线电干扰源对周围的干扰，即限制由不同类别的电气装置（不是专为辐射电磁能量用的）产生的高频电磁场；是保护运行人员不受强功率高频发生器产生的电磁场的危害。利用电磁屏蔽技术来建造不受外部电磁场影响的生产厂房和实验室，以便在其中可以制造、调整和试验不同用途的高灵敏度接收装置。

由上述可以看出，所有从事设计和制造电信设备的专业人员，都应熟悉电磁屏蔽作用的原理、屏蔽结构的基本原则、屏蔽可以保证的效能方次以及对场源和防护对象的可能反作用。目前，在高等院校中，这些问题几乎没有引起重视，参考书也很少。就是为数很少的文献中，对于这个专题的论述，不是太复杂就是太简单。

编写本书的目的就在于填补上述空白，并帮助工程技术人员掌握电磁屏蔽的理论基础。

为了减少本书的篇幅，使读者的注意力集中于主要物理过程的实质，不致转移到繁琐的数学变换上去，对大部分计算公式不作推导。



# 第一章 电磁屏蔽概论

## 1、电磁屏蔽的定义

用于减弱由某些源所产生的空间某个区（不包含这些源）内的电磁场的结构，称为电磁屏蔽。在绝大多数情况下，电磁屏蔽由金属（铜、铝、钢）制成。但是为了防护直流和极低频磁场的作用，也有采用铁氧体材料的。本书只研究金属材料制成的屏蔽。如果金属结构不是专门用于屏蔽，而是在完成自己的基本功能时顺便解决了这个任务的，则称之为起到了屏蔽的作用或充作屏蔽用，等等。

在实践和文献中，常将“静电屏蔽”、“静磁屏蔽”和“电磁屏蔽”的概念相互进行对比，这种比较是不适当的。正如静电场和静磁场是电磁场的特殊情况一样，静电屏蔽和静磁屏蔽是电磁屏蔽的一种特殊类型。在本章第4节和第三、第四章中，将较详细地探讨这个问题。

## 2、电磁屏蔽的作用原理

电磁屏蔽的作用原理可以有两种解释。这两种解释互不相同，但实质上是一样的。

第一种解释：在一次场（源引起的场）的作用下，屏蔽表面因受感应而产生电荷，其壁内产生电流和磁极化。这些电荷、电流和极化产生二次场（正确地说，是二次场与它们联系着）。二次场与一次场叠加形成合成场。在空间防护区的合成场必弱于一次场。

第二种解释：电磁屏蔽的作用原理，是用屏蔽反射并引导场源所产生的电磁能流使它不进入空间防护区。

第一种解释比较简单，因为每一个电气专业人员熟悉关于感应电荷、电流以及与它们有关的二次场的概念。此外，这种解释能够探讨在任何频率下的屏蔽工作，包括频率等于零的情况。它的不足之处是叙述某些物理过程方面有缺陷。

确实，在场强不为零的空间区存在着某些能量。可以用场的叠加和相互补偿表示，但不能用能量的叠加和相互补偿来表示。如果电磁能不能进入某个区域，在该区域中可能不产生场；如果能量部分地或全部从该区域取消，场可能变弱或全部消失。

第二种解释的观点比较正确。但是大多数专业人员不习惯反射和引导电磁能流的概念。此外，这种概念不适用于静态场合。要研究静态情况，还必须再探讨静态的建立过程。

很明显，上述两种解释的本质是相同的，因为金属结构对于电磁能流的反射和引导作用的机理本身，与这些结构表面上和壁内电荷、电流和磁极化的产生有着不可分割的联系。

根据问题的具体条件和分析目的，可选取上述两个概念中比较合适的一个。

### 3、屏蔽效能的定量评价

电磁屏蔽的效能，可以用不存在屏蔽时空间防护区的场强（ $E_0$ 或 $H_0$ ）与存在屏蔽时该区的场强（ $E$ 或 $H$ ）的比值 $\Theta$ 来表征：

$$\Theta = \frac{E_0}{E} \quad \text{或} \quad \Theta = \frac{H_0}{H} \quad (1)$$

∓值可用简单的比值或分贝表示。

在一般情况下，屏蔽不仅使场强减弱，而且在不同程度上会使空间防护区中的有源场畸变。因此用上面的方法确定场的电分量和磁分量屏蔽效能的结果是不一样的，并且与测点的坐标有关。这种状况将极大地妨碍对屏蔽效能的定量评价。

在最简单的情况下，屏蔽效能仅有一个数值。属于这种情况的有：用无限平面的均匀屏蔽对平面电磁波的半空间屏蔽；用均匀球形屏蔽对位于其中心的点源屏蔽；用均匀无限长圆柱形屏蔽对位于其轴线上的线源屏蔽。在电磁屏蔽理论中，首先研究的正是这些情况，即将实际情况变为理想化的情况。但是，这种理想化在相当程度上会影响评价的精确性。

在特别复杂的情况下评价屏蔽效能时，需要采用一些假定，如：防护空间区远离屏蔽；该区内的点以及场源的位置都按最不利的情况布置。这样，评价的精确性将更加降低。在做计算的时候，只能确定屏蔽效能可能最低的数量级。

#### 4、屏蔽效能与场源特性之间的关系及屏蔽种类

屏蔽效能极大地依赖于场源的特性。源可能是多种多样的，但是任何实际的源都可用电偶极子和载流（磁偶极子）线圈（小框）的复杂组合形式来表示。对实际上不同场结构的源，屏蔽性能会因屏蔽电或磁偶极子而有差异。

在自由空间，当

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2)$$

(式中 $r$ 是距源的距离,  $\lambda$ 是波长。)时, 两种源的场结构没有差异, 在空间的任一点 $E$ 和 $H$ 实际上是同相的。它们的比值几乎和在平面波的情况下一样, 即

$$\frac{E}{H} = 120\pi \quad (\text{欧}) \quad (3)$$

$$\text{当} \quad r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4)$$

时,  $E$ 和 $H$ 几乎是正交的, 而它们的比值与测点的位置有关。在赤道平面(经过偶极子中心并垂直于它的轴线的平面)上, 该比值近似地由式(5)和式(6)确定

$$\frac{E}{H} = 120\pi \frac{\lambda}{2\pi r} \quad (\text{对于电偶极子}) \quad (5)$$

$$\frac{E}{H} = 120\pi \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (\text{对于磁偶极子}) \quad (6)$$

这样, 随着 $r$ 减小或是 $\lambda$ 增大(随着频率 $f$ 减小), 在电偶极子情况下,  $E$ 对 $H$ 的比值增大, 磁分量的作用减少, 可以将场看作是准静电的。即当 $f = 0$ 时, 场是静电的。在磁偶极子情况下,  $E$ 对 $H$ 的比值减小, 电分量的作用减少, 可以将场看作是准静磁的。即当 $f = 0$ 时, 场是静磁的。

如果屏蔽能保证所要求的静电场(或准静电场)减弱, 而实际不减弱静磁场(或准静磁场), 则称作静电屏蔽。这种屏蔽适用于, 如需要消除两个线圈之间的电容耦合, 而保持它们之间的电感耦合时。

如果屏蔽是要减弱静磁场(或准静磁场)的作用, 则称作静磁屏蔽。对于该屏蔽是否也能减弱静电场, 则不必过多考虑。在很多场合下, 这种屏蔽对静电场的屏蔽效能, 大大

地高于对静磁场的屏蔽效能。

当将场作为准静态场进行探讨，在评价屏蔽效能可能导致很大错误的情况下，称屏蔽为电磁的。好的电磁屏蔽在大部份情况下是不好的静磁屏蔽，而是很好的静电屏蔽。换言之，当频率趋近零时，电磁屏蔽效能对于磁偶极子场可能趋近于一，而对于电偶极子场将无限增长。

### 5、屏蔽时的谐振现象

任何电磁屏蔽，不管是简单的金属板，电缆的金属包皮，封闭场源或空间防护区的金属箱体或是任何其它金属结构，均可以看作是一个具有一系列固有频率的分布恒量系统。当需要减弱的电磁场的频率接近并等于屏蔽体的某一固有频率时，屏蔽效能急剧降低。由于结构不当造成谐振现象的屏蔽，不仅不能使空间防护区的场减弱，反而会加强。

电缆的屏蔽包皮，可能是已调谐的长线段。屏蔽箱体可能是已调谐的空腔谐振器。屏蔽上的孔洞和缝隙可能是有效的裂缝天线。所以设计时必须注意，如果可能发生不希望有的谐振现象，必须采取有效措施加以防止：注意使孔洞和缝隙的尺寸远远小于工作波段的最小波长；如果需要的话，增大屏蔽壁厚；将电缆的屏蔽包皮多点接地等等。

### 6、屏蔽的可逆性

电磁屏蔽是线性系统，因此，位移互易原理对于它是正确的。这意味着不管屏蔽箱体里面是场源还是空间防护区，屏蔽箱体的效能将保持一样。这一结果具有重大的现实意义，今后研究屏蔽效能时，则可只研究场源位于屏蔽里面的情况。

但是，必须避免对这一情况作不正确的解释。为了弄清楚可能的错误，用图 1 来说明。

在图 1 (a) 中，由给定的内阻抗为零的交变电压源  $U$  激励位于球形屏蔽里面的电偶极子。把线圈环接上微安计做

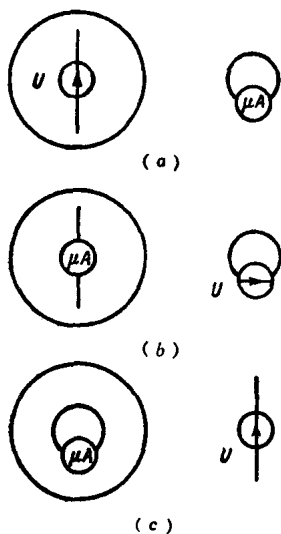


图1 屏蔽可逆性原理的图解

场指示器。按照位移互易原理，如果象图1(b)所示的那样，交换微安计和源  $U$  的位置，微安计的读数不变。在不存在屏蔽时的情况也如此。所以，在图 1 (a) 所示的情况下（场源在屏蔽里面）和在图 1 (b) 所示的情况下（场源在屏蔽外面）屏蔽效能一样。但是，如果象图 1 (c) 所示的那样，从屏蔽里面不光拿出源  $U$ ，而且拿出偶极子，并且不仅把微安计，而且把线圈环也拿进屏蔽里面，则微安计的读数将变动。因而在图 1 (a) 和图 1 (c) 所示的情况下，屏蔽效能

不一样。不一样的原因，不在于在第一种情况下场源位于屏蔽里面，第二种情况下场源位于屏蔽外面；而在于在第一种情况下屏蔽里面放置着电偶极子，第二种情况下屏蔽里放置着线圈环（势磁偶极子）。

## 7、屏蔽对电磁场源和防护对象的反作用

电磁屏蔽在完成自己的基本职能的同时，可能给场源和防护对象（即位于空间防护区的对象）带来程度不同的不利

作用。例如，把振荡电路线圈封闭在屏蔽箱体里面，该屏蔽箱体将稍稍改变线圈的电感，并降低其品质因数。

屏蔽效能和由于屏蔽带来的不利作用的程序之间没有直接的关系。例如，如果用球形屏蔽体屏蔽带高频电流的线圈，则随着屏蔽半径的增大，屏蔽效能也增大，屏蔽损失减少，即减少了屏蔽对线圈品质因数的影响。但是，如果用厚度相同的钢屏蔽代替黄铜屏蔽或铝屏蔽，则屏蔽效能也可增大，但损失也剧增，线圈的品质因数将减少。

正确选择屏蔽的材料、尺寸和结构，将能减弱屏蔽的不利作用至允许值。

## 第二章 用无限的平面屏蔽体对平面电磁波进行半空间屏蔽

### 8、导电平面上平面电磁波的反射

电磁屏蔽的研究从以下假定情况开始是比较方便的，即用无限的平面的均匀屏蔽体，对平面电磁波进行半空间屏蔽。这样，易于揭开各种主要现象的物理实质，容易引出一些重要公式。而这种屏蔽的效能将作为一个因子，被引进球形和圆柱形屏蔽效能的公式中。

在研究无限的平面屏蔽的效能以前，先探讨一下当平面电磁波垂直射到两种介质（自由空间和金属）的分界平面上时所发生的现象。

在绝对导磁系数 $\mu_a$ 和介电常数为 $\epsilon_a$ 以及电导率为 $\sigma$ 的均匀无滞后介质中，频率为 $\omega$ 沿轴线 $x$ 正方向传播的平面简谐电磁波的方程式为：

$$\frac{d\dot{E}}{dx} = -j\omega\mu_a\dot{H}; \quad \frac{d\dot{H}}{dx} = -j\omega\epsilon'\dot{E} \quad (7)$$

式中

$$\epsilon' = \epsilon_a + \frac{\sigma}{j\omega} \quad (8)$$

上述方程式完全和频率为 $\omega$ 沿均匀长线传播的波动方程式相类似：



$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -Z\dot{I}; \quad \frac{d\dot{I}}{dx} = -Y\dot{U} \quad (9)$$

式中 $Z$ 和 $Y$ 为1米线路的复数阻抗和电导。

因此，在均匀空间中对平面波的研究，可以象在长线中一样，引进一个传播系数 $\gamma$ 和特性阻抗 $Z_0$ ，即

$$\gamma = \sqrt{ZY} = j\omega\sqrt{\mu_a\epsilon'} \quad (10)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon'}} \quad (11)$$

对自由空间来说， $Z_0 = 120\pi$  (欧) [见公式(3)]。

因此，平面电磁波垂直射到无限的平面（其两侧为均匀的无限延伸的不同介质）上时产生的各种现象，如同波射到两条（自接合处）无限延伸的长线（其特性阻抗为 $Z_{01}$ 和 $Z_{02}$ ）的接合处所产生的现象（图2）。

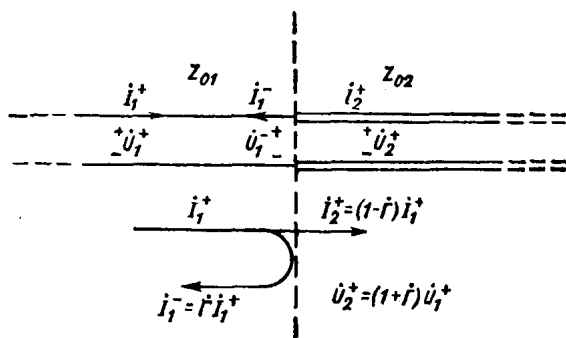


图2 两条长线接合处电磁波的反射

众所周知，波从接合处部分地反射回来，部分地透入第二线路。我们先研究反射部份。