

# 基于高屏蔽效能的机柜研究与设计

黄鑫 刘建斌 金昞霖 王涛 杨崎  
贵州航天电器股份有限公司  
DOI:10.32629/etd.v7i2.18929

[摘要] 随着通讯技术、电子信息技术及电子对抗技术的高速发展,以往通用的计算机设备已不再满足未来的要求,因此迎来了软件与硬件的全面升级,这也促使相应产品的电磁屏蔽要求提高。本文介绍了一种高性能屏蔽机柜的设计思路,并且生产的实物通过了屏蔽性能检测。

[关键词] 电磁屏蔽; 机柜; 检测

中图分类号: O44 文献标识码: A

## Research and Design of Cabinets Based on High Shielding Efficiency

Xin Huang Jianbin Liu Yanglin Jin Tao Wang Qi Yang  
Guizhou Space Appliance Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid development of communication technology, electronic information technology and electronic countermeasure technology, the previously general-purpose computer equipment can no longer meet the requirements of the future. Therefore, a comprehensive upgrade of software and hardware has emerged, which has also led to an increase in the electromagnetic shielding requirements of corresponding products. This article introduces the design concept of a high-performance shielding performance cabinet, and the physical product has passed the shielding performance test.

[Key words] Electromagnetic shielding Cabinet; "Detection

### 前言

屏蔽机柜作为防止信息泄露、保障信息传输安全的常用有效设备,可明显降低信息处理设备因电磁辐射导致的泄密事件发生率,同时可有效抑制外在电磁脉冲对内部计算机设备等信息处理设备的影响,确保屏蔽机柜内设备不被影响,正常运行。

### 1 设计指标

要求屏蔽效能达到GJB5792A-2021《军用涉密信息系统电磁屏蔽体等级划分和测量方法》的D级标准(以下简称GJB5792A-2021)。

### 2 机柜设计

#### 2.1 电磁屏蔽机柜组成

屏蔽机柜主要包括屏蔽柜体与屏蔽组件。屏蔽柜体包括: 机柜壳体、机柜柜门、蜂窝式波导窗。屏蔽组件包括网线波导管、光纤波导管、电源滤波器,如图1所示。

屏蔽机柜设计中需要充分考虑板材物理性质对电磁波的反射与吸收能力,并结合隔离接地、滤波等屏蔽技术,使设计的电磁屏蔽机柜屏蔽效能达到相关标准技术指标要求<sup>[1]</sup>。

#### 2.2 机柜主体屏蔽设计

当干扰波E垂直穿过机柜柜体时, 机柜柜体的屏蔽效能与柜体的结构、材料的磁通率、导电性质、电磁场的频率、距场源

距离和电磁场性质等因素相关,如图2所示:

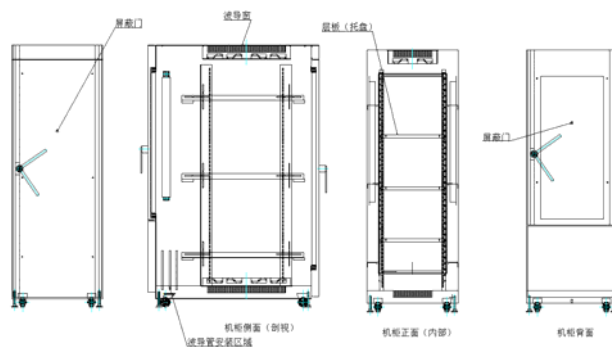


图1 机柜组成框架图

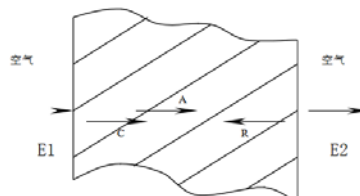


图2 电磁波穿过屏蔽体示意

金属屏蔽体的屏蔽效能SE可表示为:

$$SE=G+T+F(\text{dB}) \tag{1}$$

其中SE表示屏蔽体的屏蔽效能;

G表示干扰波在屏蔽板内的吸收损耗;

T表示干扰波在屏蔽板上的反射损耗;

F表示干扰波在屏蔽板内的多次反射修正项;

其中G与屏蔽层的厚度和传播常数有关, T、F与传输系数、反射系数和波阻抗等有关。

不同材料具有不同的G、T、F数值。为了方便计算, 将G、T、F三项简化, 代入对应的系数后, 可计算出G、T、F的近似值。

(1) 吸收损耗G。吸收损耗G可用相对导电性质和相对磁通率近似表示为:

$$G = K_1 l \sqrt{f \mu_r g_r} \quad (2)$$

式中G吸收损耗 (dB)

$K_1$ 系数, 当 $l$ 以m为单位时,  $K_1=131.4$

$l$ 表示机柜柜体壁厚 (m);

$F$ 表示干扰波频率 (Hz);

$\mu_r$ 表示机柜柜体材料的相对磁通率;

$g_r$ 表示机柜柜体材料的相对导电性质;

(2) 反射损耗。干扰波在两个机柜柜体界面上反射掉的能量称为反射损耗T。T与波阻抗、反射系数和机柜柜体的材料等有关。T可由下式求出:

$$T = -20 \lg |t| \quad (3)$$

式中 $t$ 为机柜柜体的传输系数。传输系数除了与电磁波的频率和波阻抗有关, 还与柜体材料的导电性质、磁通率和介电常数等电气性能有关<sup>[2]</sup>。

(3) 多次反射修正项。当屏蔽体吸收损耗G不大于10dB时, 屏蔽体内第二个表面反射的能量较大。因此, 屏蔽体的屏蔽效果还要将多次反射的能量考虑在内, 即增加一个多次反射修正项F, 当 $G > 10$ dB时, 无需考虑F。

(4) 屏蔽体的总屏蔽效果。屏蔽体的总屏蔽效果取决于吸收损耗G、反射损耗T和多次反射修正项F。上述三项值只是定性分析和试验校核的数据<sup>[3]</sup>。

通过计算、分析, 结合施工工艺、屏蔽体的耐腐年限及结构形式等因素, 屏蔽机柜的主体材料选用具有良好导电性和导磁性的3mm厚冷轧钢板。

### 2.3 屏蔽门设计

屏蔽机柜采用前后2扇手动屏蔽门, 配置机械锁。屏蔽机柜的主要窗口是门, 且要经常开闭, 因此, 屏蔽门是影响屏蔽机柜屏蔽效能的重要部位, 是保持屏蔽系统总性能免于退化的最薄弱的部件, 也是系统中唯一可动部分, 因此保持屏蔽门屏蔽效能的稳定性尤为重要。

(1) 工作原理。门框焊接在屏蔽机柜体上, 门扇相对于门框做旋转运动, 实现门的启闭。簧片槽焊接在门框上, 双排指形簧片固定在簧片槽内, 金属插刀焊接在门扇上, 当金属插刀插入簧片槽中央被双排指形簧片夹紧时, 实现屏蔽门内外的电磁密封。当插刀脱离簧片槽时则解除电磁密封。

(2) 结构特征。门扇使用3mm镀铜钢板, 门框使用2mm镀铜钢板。

门的锁紧型式为: 2刀3簧插入式电磁密封技术, 铜包铁复合刀口, 可拆卸式铍青铜簧片, 能有效减少接触面电位差, 保证屏蔽性能。可拆卸式铍青铜簧片20cm一段, 铝合金压条固定; 同时该型簧片经3万次插拔试验, 仍能满足屏蔽性能要求, 可确保屏蔽门的长期有效使用。

在门扇和门框啮合时, 门扇上插刀的中心线必须与门框上簧片槽的中心线重合, 确保簧片与插刀的贴合正确紧密程度。如果不重合, 一方面造成簧片和刀刃的损坏, 另一方面因偏心造成插刀两侧簧片夹紧力不一致, 在夹紧力小的侧面就会出现缝隙, 造成电磁泄漏, 致使屏蔽效能下降。

簧片槽的宽度应保证两排簧片在安装时有预压缩量1mm, 使簧片在“零状态”下有起始预压力, 从而弥补可能存在的各簧片的弹性差异。

门扇楔入门框(即插刀插入簧片槽)的运动由特制的斜楔圆柱旋转完成并保持锁定状态。

为了提供屏蔽门的屏蔽效能可采取下列措施:

在簧片槽处一侧增加一个槽腔并在这个槽腔中填充射频吸波材料。由于该槽的分压作用, 使本该在高频段屏蔽效果下降的情况得到改善。

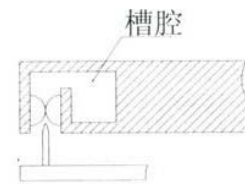


图3 门框槽腔示意图

### 2.4 滤波器设计

采用串联的方式与机柜的电源线连接, 有效阻断电源线传输时产生高频电磁干扰。目前常用的电源滤波器是LC无源低通滤波器, 由电感器与电容器组合而成, 电感器串接在供电线路中, 对高频信号产生高阻抗, 阻止它沿电源线传输; 电容器跨接在电源线与地之间, 为高频信号提供低阻抗就近接地, 把高频信号旁路掉。

### 2.5 波导窗设计

屏蔽机柜有散热要求, 通风孔需做成蜂窝式波导窗, 电磁波在穿越蜂窝式波导窗时, 通过蜂窝结构的吸收、反射、吸收…逐渐损耗、衰减, 使屏蔽机柜在满足通风的同时, 确保电磁波不泄漏。屏蔽机柜通风波导窗采用真空铜钎焊的蜂窝式波导窗, 对边距为3.2mm(截止频率为40GHz)。同样通风截面积, 蜂窝式波导管的重量比方形或圆形的波导管轻, 风阻小。波导窗在3m/s风速下, 压降为0.16mmHg。银铜钎焊是在真空炉中使蜂巢和周边焊成一体, 具有强度高且耐高温的特性。波导窗选用在国内屏蔽工程中广泛使用的产品。其生产制造工艺采用的是真空钎焊技术, 具有良好的屏蔽性能、机械强度、通风性能及防腐性能。特别是耐高温, 与主体焊接不变形、性能不下降。考虑到屏蔽机柜的通风情况, 机柜上下各设置300\*600\*5的波导窗1个。

表1 屏蔽效能测试结果

测试位置	屏蔽门(前门)D1		屏蔽门(后门)D2		通风波导 H1		通风波导 H2		波导管安装区 T1		波导管安装区 T1		无屏蔽时		达标值	天线类型
	测试结果	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化		
10kHz	95	94	94	94	94	93	93	94	95	95	94	94	-25	-25	86.7	环天线
150kHz	121	121	121	119	121	120	121	121	120	121	121	120	-16	-16	115	
15MHz	129	130	129	130	128	128	129	128	129	129	130	130	-13	-13	120	
100MHz	128	127	127	128	128	125	128	128	125	125	126	126	-15	-13	120	半波偶极子天线
450MHz	128	129	128	129	128	128	127	127	128	128	128	127	2	3	120	
950MHz	128	127	126	127	127	126	127	126	127	125	127	126	6	6	120	
3GHz	127	126	128	127	127	126	126	126	126	127	128	128	2	1	120	喇叭天线
6GHz	126	125	125	126	128	127	127	126	128	127	125	126	1	2	120	
10GHz	127	126	125	127	126	127	128	127	127	126	126	125	-4	-5	120	
18GHz	125	126	124	125	125	125	126	125	117	118	118	118	-8	-9	112.7	
26GHz	121	121	120	121	121	119	120	120	114	113	113	115	-12	-13	106	
35GHz	115	115	114	115	114	115	113	114	109	110	111	112	-15	-15	105	
39.5GHz	113	114	114	114	112	112	114	115	107	109	110	111	-18	-17	103	

2.6 光纤波导管设计

屏蔽机柜所有通信系统均通过光纤进出, 光纤通过屏蔽机柜柜体时需通过波导管。通过最高截止频率计算波导管的内径与长度, 波导管长度须至少为直径6倍以上, 为进出屏蔽机柜的传输光纤选择Φ3.2\*140镀锌波导管21只。确保其与整体屏蔽效能指标相一致。

2.7 设计小结

屏蔽机柜材料: 选用具有良好导电性和导磁性的3mm厚冷轧钢板。

屏蔽机柜柜门: 配置2樘屏蔽门, 柜体前后均设屏蔽门, 保证屏蔽门的开启; 采用刀-簧插入式电磁密封技术, 复合镀铜镍密封刀, 保证电磁密封可靠。

电源滤波器: 采用串联的方式与机柜的电源线连接, 有效阻断电源线传输时产生高频电磁干扰。

波导管: 为提高屏蔽机柜的整体屏蔽性能, 光纤或网线出入屏蔽机柜时采用内径为3.2mm的波导管。

通风波导窗: 采用真空钎焊六角形蜂窝式波导窗, 采用真空钎焊, 达到了耐高温且强度高, 便于运输、施工和保证施工质量。

3 屏蔽性能测试

3.1 检测示意图

接收天线根据测试频段不同分别为环形天线、偶极子天线和喇叭天线, 并且进行水平极化和垂直极化测试, 屏蔽效能取其中的最小值。

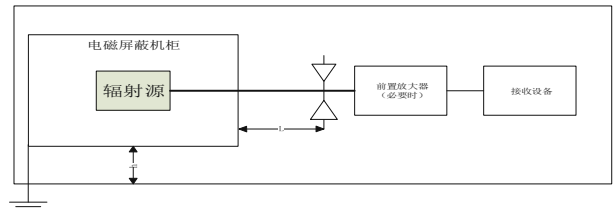


图4 辐射源内置法测量示意图

说明:

L为接收天线与被测机柜壳体受试壁面间的距离。

h为被测电磁屏蔽机柜到地面的高度。

3.2 测量计算方法

从两次传输损耗测量得到屏蔽效能SE (dB):

$$SE = P_0 - P_S + A_{att} \tag{4}$$

式中:

$P_0$ 是无屏蔽时测量的参考电平值。

$P_S$ 是有屏蔽时测量的电平值。

$A_{att}$ 是经过校准的同轴衰减器的衰减, 插入它用于 $P_0$ 参考电平测量, 为的是保护接收机防止过载。由于本次测试不加功率放大器和同轴衰减器也能满足屏蔽效能达标值的要求, 因此没有加入功率放大器和同轴衰减器, 故 $A_{att}$ 的值为0dB。

3.3 被测示意图

说明: D为屏蔽门、H为波导窗、T波导管安装区如8所示。

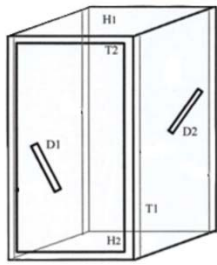


图5 测量屏蔽效能的位置示意图

### 3.4 测试结果

#### 3.4.1 测试样品



图6 测试样品

#### 3.4.2 测试数据

根据GJB5792A-2021中D级电磁屏蔽体的要求,对研制的机

柜进行测试,测试频率及屏蔽效能如表1所示。

测试结果如表1所示,所生产的机柜满足GJB5792A-2021中的D级要求。

### 4 结束语

屏蔽效能是电磁屏蔽机柜最重要的指标,在研制过程中,要正确深入的理解电磁屏蔽原理并结合施工工艺、屏蔽体的耐腐年限及结构形式等因素进行设计,本文针对GJB5792A-2021中的D级要求,阐述了一款电磁屏蔽机柜的设计并列测试方法,对生产的机柜进行屏蔽效能测试,对于后续高屏蔽性能机柜研制具有一定的参考意义。

### [参考文献]

[1]李彬,王聪.浅析常见电磁屏蔽效能测试军用标准[J].中国标准化,2022,(13):145-147+151.

[2]闫建华.电力系统电磁屏蔽防护机柜结构设计技术[J].电子制作,2020,(14):71-72.

[3]杨佳玉.MCSEM机柜电磁兼容分析与设计[D].吉林大学,2023.

### 作者简介:

黄鑫(1996—),男,汉族,贵州省毕节市人,本科,工程师,研究方向为军用机柜、机箱设备研究与设计。