

# 某舰载发射控制柜的电磁兼容设计

余燕文

中国船舶第七一零研究所, 湖北 宜昌

收稿日期: 2022年5月4日; 录用日期: 2022年6月7日; 发布日期: 2022年6月14日

---

## 摘要

本文简要介绍了某舰载发射机柜的电磁兼容设计, 从滤波、接地、屏蔽设计等方面分别进行论述。试验结果表明, 该机柜满足国军标的相关要求, EMC设计合理有效。

## 关键词

电磁兼容, 接地, 滤波

---

# EMC Design of Ship-Based Launch Control Cabinet

Yanwen Yu

No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang Hubei

Received: May 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 14<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

This article introduces the EMC design of ship-based Launch Control Cabinet. Filtering, grounding and electromagnetic shielding are discussed respectively. The test results show that the cabinet meets the relevant requirements of national military standard, and the EMC design is reasonable and effective.

## Keywords

EMC, Grounding, Filtering

---

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现代舰载设备对可靠性要求越来越高，尤其是电磁兼容性，电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)指在同一电磁环境中多个电子设备能执行各自功能的一种共存状态，即各种设备都能正常工作又互不干扰的兼容状态。

在舰载设备的工作环境中，空间相对狭小且封闭，各系统内部分机之间以及各系统间都存在着电磁干扰，严重时可能整个系统无法正常工作。本文基于 GJB151A-97 对水面舰艇类的相关要求，以及舰载设备工作环境，对某型发射控制柜进行电磁兼容设计，并从滤波、接地、屏蔽等方面进行介绍。

## 2. 机柜总体布局

本发射控制柜主要由柜体、配电单元、电源单元、操控单元、计算机单元等组成，机柜示意图如图 1 所示。柜体为整体铸铝机柜；配电单元完成~380 V 电源和~220 V 电源滤波、配电功能；电源单元完成 AC/DC 电源转换，产成两组 28 V 直流电源，为整套系统提供发射电源和工作电源。各主要单元与柜体间通过钢制导轨连接，单元与单元之间用隔板分开。

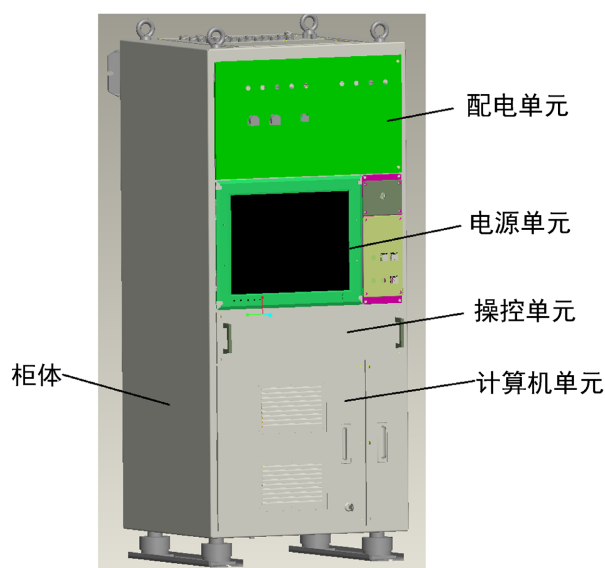


Figure 1. Structure diagram of launch control cabinet

图 1. 发射控制柜结构示意图

## 3. 滤波设计

滤波器能允许有用信号的频率分量通过，同时又阻止其他干扰频率分量通过。EMI 滤波器是一种由电感、电容以及电阻组成的，利用带通、带阻滤波特性将干扰信号滤除，得到有用信号。描述滤波器性能的主要参数是插入损耗，其大小随工作频率不同而改变。插入损耗的定义是：

$$L_{in} = 20\lg(V_1/V_2)$$

式中  $V$  为信号源通过滤波器在负载阻抗上建立的电压(V);  $V_2$  为不接滤波器时信号源在同意负载阻抗上建立的电压(V);  $L_{in}$  为插入损耗(dB)。

选择好合适的滤波器, 如果安装位置及方式不恰当, 仍会破坏滤波器的衰减特性[1]。通常需要考虑以下几点: 将滤波器安装在机柜顶部电源输入端, 距离干扰源尽可能近, 并将滤波器的屏蔽壳直接安装在柜体的金属表面上, 接地线尽可能短, 且滤波器的输入输出引线不能并行或交叉。该设备在电磁兼容试验过程中, 电源线传导发射测试 CE101 和 CE102 项目发生超差现象, 针对低频段的低频频段干扰及高次谐波干扰, 我们联合 EMI 滤波器厂家现场对其滤波特性进行调整, 都产生了较好效果。EMI 滤波器安装位置示意图见图 2。

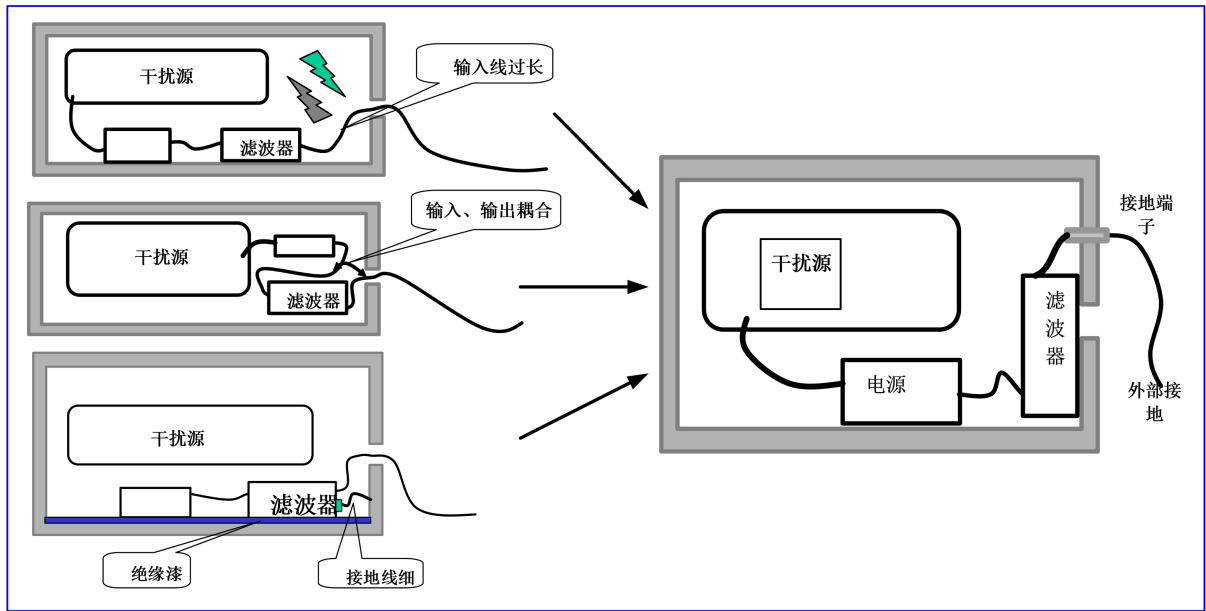


Figure 2. Installation position diagram of EMI filter  
图 2. EMI 滤波器安装位置示意图

## 4. 屏蔽设计

电磁屏蔽是指用金属或磁性材料将需要隔离的设备、电路全部包裹起来, 以阻隔外部电磁波的干扰或防止电磁能量外泄的一种措施。柜体采用铸铝设计, 零部件通过螺钉与柜体进行组装形成一个整体, 各连接处无法避免存在电磁泄露, 需采用相应的措施对电磁泄露进行抑制。

### 4.1. 缝隙

发射控制柜是由多个结构件组合而成的, 各连接处无法避免存在缝隙, 如显示器与柜体、门板与柜体、加固计算机盖板缝隙、顶部航插与盖板等缝隙。机柜缝隙对电磁场的屏蔽作用分为两部分: 反射损耗及传输损耗。反射损耗由于自由空间电磁波阻抗与缝隙处的电磁波阻抗不匹配引起的; 传输损耗是入射电磁波在缝隙中传输时产生的。

$$SE = A_a + R_a = 27.3 \frac{t}{g} + 20 \lg \frac{(1+N)^2}{4|N|}$$

式中  $SE$  为缝隙的总屏蔽效能;  $R_a$  反射损耗(dB);  $A_a$  传输损耗(dB);  $t$  为缝隙的深度或金属板厚度(cm);

$g$  为电场垂直方向缝隙的投影长度(cm);  $N$  为缝隙开口处电磁波阻抗与空间入射电磁波阻抗之比。

在估算缝隙屏蔽效能时可不考虑反射损耗  $R_a$ ，假设我们希望缝隙的屏蔽效能达到 40 dB，分别设定缝隙的深度  $t$  为 0.5 cm、1 cm，经过计算得到对应缝隙的长度为 0.34 cm，0.48 cm。在实际装配中两个组件的接触面不连续的缝隙长度很难控制在毫米级。因此必须在缝隙处增加屏蔽衬垫，以保持屏蔽板的导电连续性，使电磁泄露降到最低[2]。

以显示器安装面的缝隙处理为例，显示器与柜体接缝示意图见图 3，选用圆形导电橡胶条，导电橡胶条具有导电、耐高温、耐腐蚀、阻燃等特性，将柜体的接触面进行导电氧化处理，把导电橡胶条放入柜体上预留的凹槽内，当按上螺钉固定好显示器时，受到挤压的导电橡胶条能填满缝隙，保证电气的连续性，且可以适当缩小缩短螺钉之间的距离，增加安装螺钉的数量，以达到好的屏蔽效果。

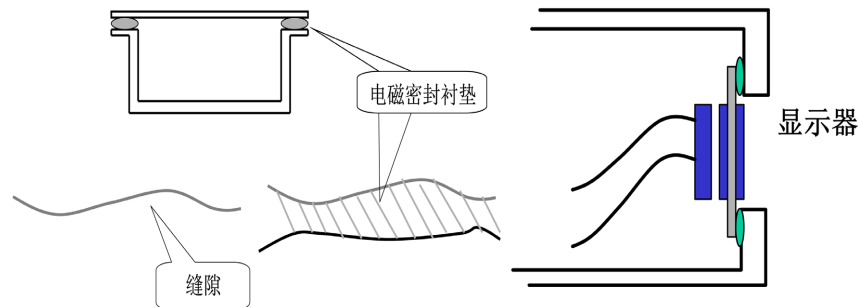


Figure 3. Joint diagram of display and cabinet body  
图 3. 显示器与柜体接缝示意图

## 4.2. 通风孔

通风孔是机柜上电磁屏蔽的薄弱点，造成电气的不连续，使屏蔽性能大大降低。波导管具有截止频率特性，当电磁波的频率低于波导管的截止频率时，无法在波导中传输。蜂窝板的原理是将大量的截止波导管并列焊接起来，可形成很大的开口面积，安装在机柜的通风孔时，在保证通风散热的前提下可有效解决电磁泄露。通风蜂窝板及波导管示意图见图 4。

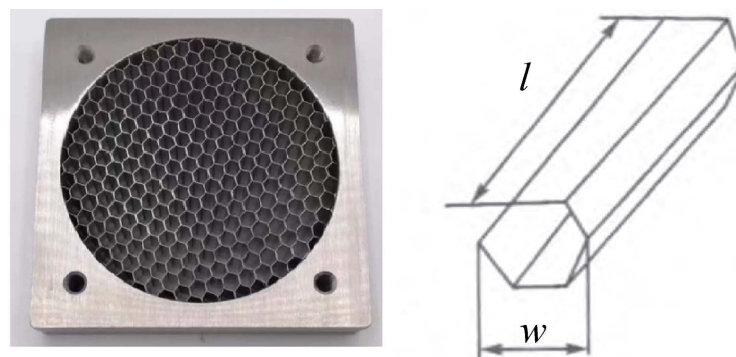


Figure 4. Diagram of ventilated honeycomb panel and wave-guide  
图 4. 通风蜂窝板及波导管示意图

波导管的截止频率  $f_c = (15/w) \times 10^9$  (Hz)，式中  $w$  为波导管内壁的外接圆直径(cm)；整块蜂窝板的屏蔽效能为：

$$SE = A_t - 20 \lg N = 1.823 \times f_c \times l \times 10^{-9} \sqrt{1 - (f/f_c)^2} - 20 \lg N \text{ (dB)}$$

式中： $A_t$  为截止波导管的衰减量(dB)； $f_c$  为波导截止频率(Hz)， $f$  为入射电磁波的频率(Hz)， $l$  为波导管的长度(cm)； $N$  为整块蜂窝板中波导管的数量[3]。

我们选用的波导通风窗的尺寸为  $200 \times 120$ ， $w$  为 3 mm， $l$  为 15 mm， $N$  为 960，经过计算可以得到  $f_c = 50$  GHz，当电磁波频率为 1 GHz 时， $SE = 77$  dB，达到预期的屏蔽效果。

## 5. 接地设计

接地是电路或系统正常工作的基本技术要求之一，也是 EMC 性能高低之关键因素。在电子设备中，合理的应用接地技术，能抑制电磁噪声，大大提高系统的抗干扰能力，减少 EMI。并且良好的接地对电磁场有很好的屏蔽作用，能释放设备机壳上积累的大量电荷，从而避免产生静电放电效应。

EMC 接地的主要原因有：

1) 提升屏蔽效能：各电路模块之间由于存在寄生电容，需要进行必要的隔离和屏蔽处理，这些用于隔离和屏蔽的金属材料需要良好的接地，屏蔽与接地配合使用才能起到屏蔽效果。

2) 提升滤波效果：电路中对电源线在处理时一般都会使用旁路电容，滤除其中无用的交流成分，降低直流电源的文波电压，这些旁路电容需要良好的接地，如果不接地，这些旁路电容就处于悬浮状态，起不到旁路作用。

3) 噪声和干扰抑制：对内部噪声和外部噪声的控制需要设备和系统上的多点地相连，从而为干扰信号提供最低阻抗通道。

该发射控制柜中采用了信号地、电源地、机壳低三套系统，三地分离，互不连接。

信号地：给信号电流提供回流信号源的低阻抗路径，计算机插件箱单独提供信号地。

电源地：为射击电源 28 V 单独建立基准接地，采用浮地形式，防止从机壳地或信号地中引入干扰信号，减少地线间的耦合。

机壳地：将设备正常运行时不带电的金属外壳和接地装置之间进行良好的连接，为了保护人员安全而设置的接线方式。在机柜的两侧预留了机壳地汇流条，滤波器壳体、机箱、电源模块壳体、机架等均就近与机壳地进行良好连接。接地线尽可能短，保证各接地点实测接地电阻小于 10 m $\Omega$ 。

## 6. 其他措施

1) 交流电源线与直流电源线及信号线进行分开捆扎，实现强弱电分离；在电缆上加装防波套，防止交流电源线与直流电源线及信号线之间的耦合；

2) 所有连接器壳体与线缆的外屏蔽层尽量实现完整的 360° 电气连接，所有屏蔽层都应接地；

3) 滤波器的输入与输出线必须分开隔离。当无法分开时，应采用屏蔽线使其相互隔离；

4) 对于通信信号，如 CAN、串口、网络等均采用双绞屏蔽线提高抗干扰性能；

5) 串口、网络等通信接口布局在机柜下门板处，远离顶部的配电单元及电源单元。

## 7. 电磁兼容试验测试

目前该设备已按 GJB 151A-1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》[3]开展电磁兼容试验，分别对发射项目(CE101、CE102、RE101、RE102)和敏感度项目(CS101、CS106、CS114、CS116、RS101、RS103)等十个项目进行了测试。

以 CE101 项目 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射为例，测试配置图及测试照片见图 5 和图 6，监测仪器和设备见表 1。测试时，被试设备处于通电并连续执行操作指令，使设备正常工作，分别选择发射控制柜 AC220V 电源输入线的 L 线、N 线为检测部位。

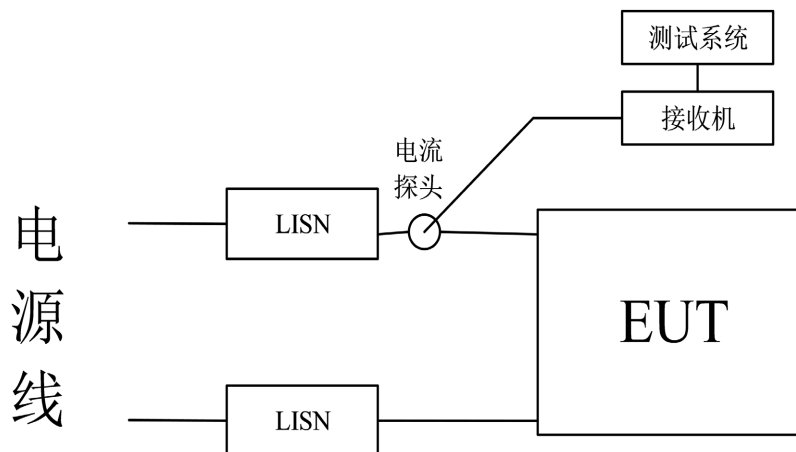


Figure 5. Test configuration diagram of CE101

图 5. CE101 测试配置图

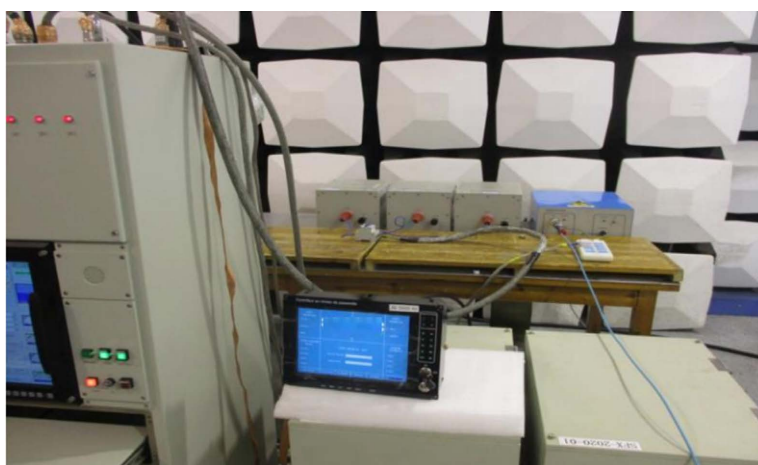


Figure 6. Test photos of CE101

图 6. CE101 测试照片

Table 1. Test instruments and equipment

表 1. 测试仪器和设备

名称	型号	编号	有效日期
接收机	E4440A+N9039A	MY48250072+MY48260004	2022.5.20
电流探头	9207-1	089513	2022.5.20

检测方法：选择 GJB151A-1997 中图 CE101-2 适用于水面舰船的 CE101 极限(50 Hz)中 abc 连线。AC220V 电源线电流为 1.57 A，极限值放宽 3.92 dB。检测数据见图 7 和图 8。

结果分析：理想的交流电应是标准正弦波，但机柜中存在开关电源及变压器等非线性用电设备，会导致波形失真[4]。失真的波形经过傅里叶变换就会出现三次谐波、五次谐波或更高次谐波，正如测试结果曲线中所示的 150 Hz、250 Hz、350 Hz 等幅值较大的噪声电流，观察测试结果曲线可以发现所有值全部位于极限值曲线下方，测试结果合格。

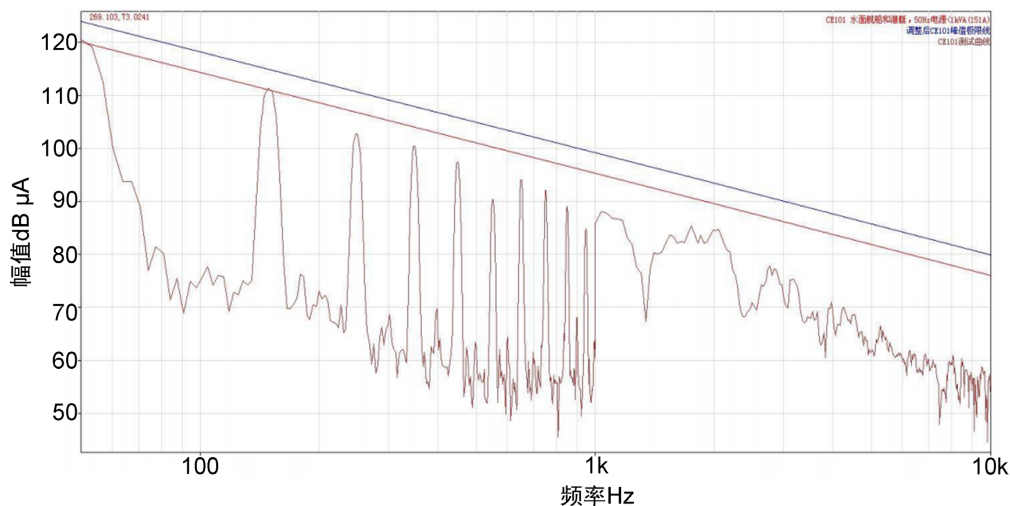


Figure 7. Test result of L line of AC220V power cable of launch control cabinet

图 7. 发射控制柜 AC220V 电源线 L 线测试结果

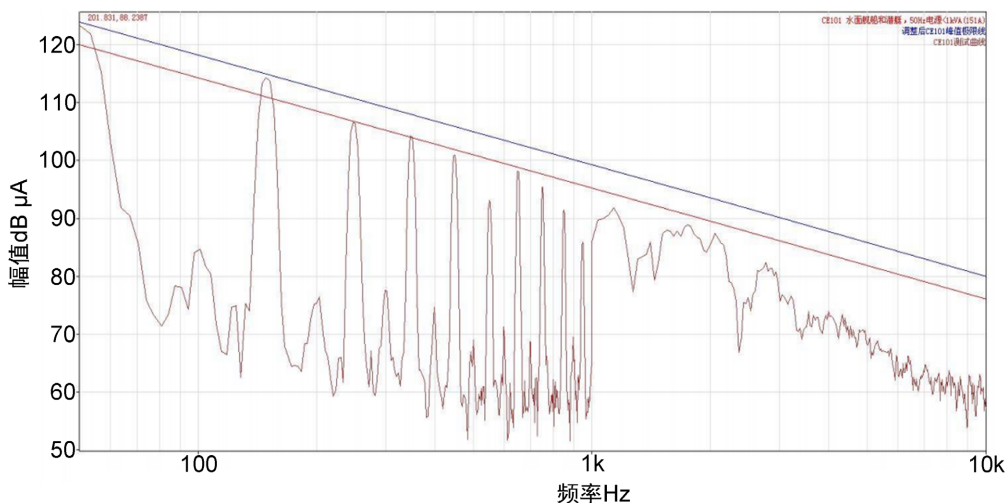


Figure 8. Test result of N line of AC220V power cable of launch control cabinet

图 8. 发射控制柜 AC220V 电源线 N 线测试结果

## 8. 结论

机柜的电磁兼容设计在实际的工程应用中存在很多不确定因素，很难给出定量计算的结果，本文从滤波、屏蔽、接地等方面的工程实践经验介绍了机柜电磁兼容的设计方法，试验结果证明这些方法均对电磁干扰进行了有效抑制，机柜的电磁兼容性能满足 GJB151A-1997 的部分项目要求，达到了预期的效果。

## 参考文献

- [1] 和宏, 张宝峰. 电磁兼容与电磁干扰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 89-91.
- [2] 王业飞, 王群, 唐章宏. 缝隙对屏蔽效能影响的分析与改善[J]. 电波科学学报, 2009(24): 131-133.
- [3] 国防科学技术工业委员会. GJB 151A-1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 1997: 4-24.
- [4] 周剑, 朱宜生. 控制机柜的 CE101 结果分析与整改[J]. 环境适应性和可靠性, 2020(1): 71-75.