

## 光电侦察平台电磁屏蔽设计

李永刚<sup>1,2</sup>, 孙丽娜<sup>1</sup>, 张葆<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了使光电侦察平台满足现代战场复杂的电磁环境要求, 对某型光电侦察平台进行了电磁屏蔽设计。电磁屏蔽技术是抑制辐射干扰、提高系统电磁兼容性的最有效手段之一。分析了光电侦察平台在进行电磁屏蔽时的技术难点, 根据其特有的技术难点, 提出了一些实际可行的解决措施。对改进后的光电侦察平台进行了电场辐射发射(RE102)试验测试。测试结果表明经过合理的电磁屏蔽处理, 可使光电侦察平台电场辐射发射值降低约 10 dB $\mu$ V/m, 提高了光电侦察平台的电磁兼容性。综合采取屏蔽、接地及滤波等技术手段, 可使光电侦察平台的电磁兼容性满足 GJB151A-1997 中的规定。

**关键词:** 电磁兼容; 屏蔽; 光电侦察平台; 电磁干扰

**中图分类号:** TN973.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2045-05

## Design of electromagnetic shielding for electro-optic reconnaissance platform

Li Yonggang<sup>1,2</sup>, Sun Lina<sup>1</sup>, Zhang Bao<sup>1</sup>, Li Ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to satisfy complicated electromagnetic environment, electromagnetic shielding for electro-optic reconnaissance platform was designed specially. Shielding is one of the most effective methods for inhibiting radicalization interference and improving electromagnetic compatibility(EMC) of the system. Shielding difficult points of electro-optics reconnaissance platform was analyzed in detail, and the resultful measures were taken to solve the problem of radicalization interference for electro-optics reconnaissance platform. Radiated emission (RE102) tests were made to prove the effects of the improved reconnaissance electro-optics platform. Test results show that the degree of RE102 can be reduced about 10 dB $\mu$ V/m, and the EMC of electro-optics reconnaissance platform is improved. Through the combination of analyses and calculations by shielding, grounding and filtering, the EMC of electro-optics reconnaissance platform can satisfy the requirements of standard GJB 151A-1997.

**Key words:** electromagnetic compatibility(EMC); shielding; electro-optic reconnaissance platform; electromagnetic interference

收稿日期: 2012-12-15; 修订日期: 2013-01-20

基金项目: 国家“863”计划(2008AA121803); 国家重点基础研究发展计划(2009CB72400607)

作者简介: 李永刚(1979-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光电仪器光机结构设计方面的研究。Email: ciomliyong@tom.com

导师简介: 张葆(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电仪器总体设计研究方面的研究。Email: clesky@vip.sina.com

## 0 引言

现代战场上集中了高密度、高灵敏度、大功率、宽频带等各种各样的电子系统与设备,由此带来的战场电磁兼容问题十分突出,很大程度上会导致各个作战单元之间互相影响,从而直接制约电子装备作战效能的发挥<sup>[1]</sup>。光电侦察平台在战场侦察、监视、指挥、通信、控制、情报系统及后勤保障等方面获得了日益广泛的应用。它具有结构精密,电路复杂,高低频交错、强弱信号交叉等特点,既易受干扰也易引起干扰。所以在工作时会产生电磁耦合和电磁辐射,若不加以控制,就会使系统内或系统间其他设备受到电磁干扰,造成系统性能下降甚至出现故障。因此,开展研究它的电磁兼容性对未来的高效作战提供了保障。屏蔽是抑制辐射干扰、提高系统电磁兼容性的最有效手段之一。它是采用电磁屏蔽材料将电磁敏感电路封闭隔离,使其内部电磁场强度低于预计值的一种措施,或是采用电磁屏蔽材料将电磁辐射干扰源封闭隔离,使其外部电磁场强度低于预计值的一种措施<sup>[2]</sup>。

参考文献[3-7]报道了一些抑制设备电磁辐射的措施,对文中的有一定的参考价值。由于光电侦察平台自身的特殊性以及苛刻的电磁环境要求,文中将深入挖掘适用于本系统的屏蔽技术,期望能显著提高系统的电磁兼容性。同时,在整个电磁兼容试验中,电场辐射发射(RE102)是光电侦察平台最易超标的,也是最难避免的试验项目。文中将重点研究屏蔽技术在提高光电侦察平台电场辐射发射中的应用。

## 1 光电侦察平台屏蔽难点分析

光电侦察平台基本都是“光-机-电”一体化集成系统,相比其他设备有着很多特殊性,所以给设备屏蔽带来了很大困难,主要体现在以下几个方面。

### 1.1 光学玻璃窗口

光学玻璃窗口的作用有:参与系统成像;保护内部光学系统;保证气动外形。所以光学玻璃窗口要选用与内部光学系统相匹配的玻璃材料,而不能使用导电性能良好的金属材料,这样就形成了电磁辐射泄漏窗口。

### 1.2 转动轴系

理想的电磁屏蔽体必须是一个完整的、连续的

导体。而光电侦察平台为了满足稳定精度、搜索范围的要求,其结构形式一般采用两框架两轴稳定,三框架三轴稳定及四框架两轴稳定等。无论那种结构形式,都必须要有精密的轴系来支撑。由于转动轴系及框架外壳的存在,使其结构必然形成不连续的导体,较易引起电磁泄漏。

### 1.3 复杂的集成度

典型的机载光电侦察平台一般都是由可见光、红外、激光、数码相机等有效载荷集成到一起,加上测速、测角、定位等功能模块,来实现对目标的全方位侦察。各种元器件集成到一起,相互间就会产生电磁干扰。轻微的干扰是系统内部可以正常工作,但对外辐射干扰难以预测,不易采取措施保证对外无干扰。严重的电磁干扰甚至会使系统内部各功能丧失。

### 1.4 进口元器件

国内在成像技术研发方面的发展与国外有着较大的差距,目前从国外获得的一些元器件诸如探测器、陀螺及电机等,其中的一些指标基本都是按民用标准执行。一般都需要对这些元器件进行二次加工处理,使其能达到所需的技术指标要求。

由于光电侦察平台具有以上众多的、不同于其他设备的特点,要对它采取相应措施,使其电磁兼容性满足严格的标准要求,就显得相当困难了。

## 2 光电侦察平台屏蔽措施

在某型光电侦察平台电磁兼容整改设计中,主要采取了以下屏蔽措施,来提高其电磁兼容性。

### 2.1 光学玻璃窗口屏蔽

光学玻璃窗口要选用与内部光学系统相匹配的玻璃透明材料。所以对玻璃窗口的屏蔽处理基本上都是在窗口玻璃表面镀一层电介质层,并要求玻璃的镀电介质层与金属外壳良好接触,即可提高其屏蔽效果。但是这样就会降低整个光学系统的透过率。

一种新的工艺技术就是在玻璃窗口表面镀一层感性网栅膜实现电磁屏蔽,作为一种非连续透明导电膜,感性网栅膜在电磁屏蔽方面有广泛应用。该方法对光学系统的透过率影响相对较小。并且可以根据实测的系统内部电磁干扰频段选择不同的网格尺寸<sup>[3,8]</sup>。实践证明这种工艺技术可有效提高玻璃窗口的屏蔽性能,如图1所示。作为一种薄膜屏蔽材料,具有厚度薄、质量轻、屏蔽带宽宽的特点,是透明玻璃窗口电磁兼容设计的首选结构材料。

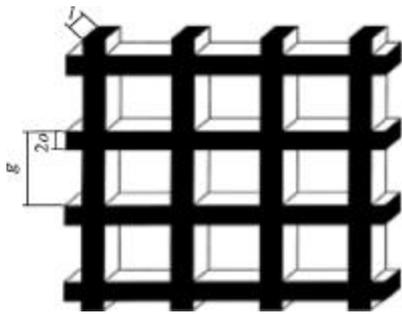


图 1 金属网栅薄膜基本结构  
Fig.1 Base structure of metal grating film

## 2.2 孔缝处的屏蔽

理想的电磁屏蔽体是一个完整的、连续的导体,故能将电磁干扰隔离。而光电侦察平台是一个复杂的光电成像测量设备,势必会存在孔、缝等电磁泄露空间,引发系统内各组件及系统间相互作用产生耦合,从而影响系统的正常工作。故在进行系统电磁屏蔽设计时,需要处理好孔、缝等部位。

### 2.2.1 截止波导

波导是用简单的管状金属结构制作,并呈现高通滤波器的特性。波导可以阻止或衰减截止频率以下的信号,同时允许截止频率以上的信号通过,如图 2 所示,这与高通滤波器的频率特性相似。利用这个特性,可以使干扰信号的频率落在波导的截止区内,这样波导起到了电磁屏蔽的作用,称为截止波导。

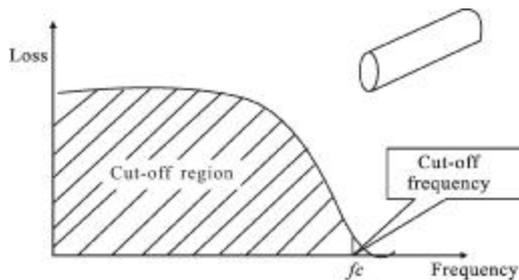


图 2 截止频率  
Fig.2 Cut-off frequency

对于圆形截面的波导可表示为:

$$f_c = 6.90/D \quad (1)$$

对于矩形截面的波导可表示为:

$$f_c = 5.90/L \quad (2)$$

式中: $D$  为圆形波导直径(单位为 in, 1 in=2.54 cm); $L$  为矩形截面的对角线长度(单位为 in); $f_c$  为截止频率(单位为 MHz)。

要保证波导对电磁波有较大的衰减,应使波导

的截止频率为要屏蔽的电磁波频率的 5 倍以上。当满足这个条件时,长度为  $T$  的波导对电磁波的衰减  $S$  可通过以下两种方式计算。

对于圆形截面的波导衰减:

$$S = 32T/D \text{ (dB)} \quad (3)$$

对于矩形截面的波导衰减:

$$S = 21T/L \text{ (dB)} \quad (4)$$

式中: $T$  为波导管长度(单位为 in)。

通过近场频谱仪对光电侦察平台进行近场探测,在光学窗口处探测到 135 MHz 附近产生高于基准值约 10 dB 的小包络,运用波导理论对窗口处进行电磁屏蔽设计。由于光学窗口直径为  $\Phi 60$  mm,所以同样选用波导管的直径为  $\Phi 60$  mm,通过公式(1)计算得到  $f_c$  约为 3 GHz,满足波导截止频率的选用要求。又根据公式(3)可知,要使衰减值大于 10 dB,则波导管长度至少要为 18.7 mm,故选择此波导管的长度为 20 mm,即可衰减约 10 dB 的辐射值。

### 2.2.2 导电衬垫

导电衬垫是一种导电性高、弹性好的材料。将这种材料填充在缝隙处,能保持屏蔽体的导电连续性,是解决电磁泄漏的好方法。其作用是减少接缝或接合处的槽、孔或缝隙,使电磁干扰辐射不会散发出去。

当电磁波入射到光电侦察平台时,将感应出电流。如图 3 所示,若平台外壳与框架间不存在接缝,则感应电流在整个外壳上是连续的,显然这样的平台结构将提供很好的屏蔽;但由于接缝的存在,导致局部电不连续性,一部分电流产生场耦合;在接缝处加入导电衬垫,保持两个界面间的电连续性,可以大大提高光电侦察平台的屏蔽。

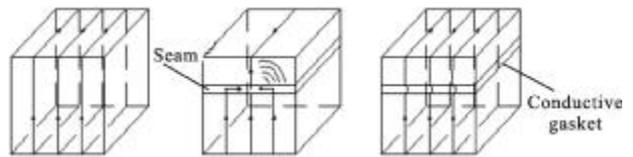


图 3 导电衬垫的屏蔽机理

Fig.3 Shielding technical principle of conductive gasket

在选用导电衬垫时,需要考虑一下它的特性参数:转移阻抗、硬度、压缩永久形变及衬垫厚度等,根据不同的尺寸空间合理选用。

## 2.3 各单元电路模块化封装

光电侦察平台包含了中央控制模块、图像数据转换模块、图像跟踪模块、伺服驱动模块及测速、测

角单元模块等。在电磁兼容试验中,各个模块会同时对外界环境产生干扰,同时内部之间也会相互产生干扰。所以就需要将各个模块分别屏蔽封装,加以良好的接地,可大大减小光电侦察平台干扰外界及相互干扰的幅度。各单元模块均为铝合金箱体加盖板的形式,从屏蔽的角度来看,各功能模块事实上也是一个屏蔽体,这样做不仅利于装配,还便于维护,更重要的是具有双重屏蔽的效果。

同时,对光电侦察平台内部空间及元器件进行设计布局时,应对电磁敏感的模块或元器件尽可能远离光学窗口等孔缝位置,同时避开电磁能量高的地方,这样有助于提高光电侦察平台对外界电磁辐射干扰的抵抗能力。

#### 2.4 有利于衰减辐射的结构

在光电侦察平台中,有些缝隙是必然存在的。例如两个相对旋转的框架之间,主体框架与盖板之间,都会产生缝隙。如果处理不当,就会产生电磁泄漏。

如图 4 所示,采用锯齿交错结构,可有效的衰减电磁波辐射。电磁波被多次反射和吸收后,才能到达外界或者进入系统内部,而在每次反射及吸收的过程中,电磁波就会逐步的衰减,从而达到了衰减辐射的目的。

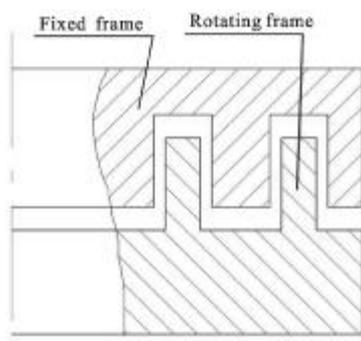


图 4 锯齿结构

Fig.4 Toothed structure

在处理主体框架与盖板之间的缝隙时,往往都是通过加导电胶条来实现良好的导电接触。在结构主体框上应加工出适合放置导电胶条的深槽,这样有利于放置、挤压导电胶条,其结构如图 5 所示。需要注意的是,导电胶条应该放置在靠螺孔内部,同时起到密封及防护螺孔的辐射的作用。

另外,减小屏蔽体缝隙的长度和宽度、提高连接面的加工精度、增大接触面积、在接缝处涂导电涂料、减小螺钉间距等措施,都能在一定程度上提高系统的抗电磁干扰能力。

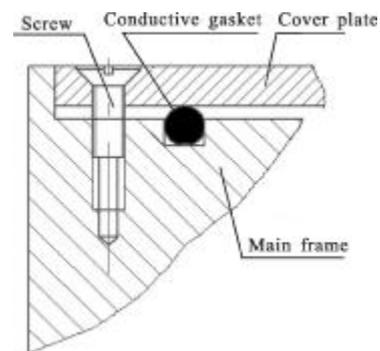


图 5 密封结构

Fig.5 Sealing structure

#### 2.5 电缆与连接器的屏蔽

屏蔽电缆主要可分为编织型、包容型及混合型等几个类型。

编织型电缆在低频时的屏蔽较大,随频率增高,其值近似不变,这主要是由于低频屏蔽主要取决于屏蔽层的直流电阻。包容型电缆在高频时的屏蔽高于低频,并且频率越高,屏蔽越大。混合型屏蔽电缆的屏蔽在低频时主要取决于编织层的性能,在高频时起主要作用的是包容型屏蔽层。同时屏蔽层越多,屏蔽也就越高。因此,对于屏蔽要求较高的电缆,必须采用多层混合型屏蔽。

连接器屏蔽的目的就是提供一个从屏蔽体到大地的低阻抗的途径。将连接器针(点)上信号分类,最好一个连接器走同一类信号,当不能做到这一点时,应把两类信号针间空出一排,加大其间距,降低干扰,保证整机的电磁兼容性。本来已隔离开的两种信号不应在同一连接器中传输。连接器选择金属外壳型的。这样可以用螺钉将连接器与金属屏蔽体紧紧连接在一起,形成良好的导体。

### 3 试验结果

在标准 EMC 试验室里,对整改前光电侦察平台进行了 10~18 GHz 电场辐射发射(RE102)测试。发现在 2~30 MHz 和 30~200 MHz 两区段超标比较严重。对光电侦察平台实施上述屏蔽措施,并且经过反复测试试验,明确了 2~30 MHz 范围内的超标主要是由于电源及电源线引起。通过对电源线采取多层混合屏蔽处理,使得处理后电源线的电场辐射发射值较之前降了大约 15 dB $\mu$ V/m。

光电侦察平台在 30~200 MHz 范围内超标最为严重,并且垂直极化超标量值远大于水平极化超标量

值。其垂直极化测试试验结果如图 6 所示。当不采用屏蔽措施时,光电侦察平台的辐射值约为 $50 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ,见图 6(a);采取屏蔽措施后,光电侦察平台的辐射值为 $40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ,见图 6(b),当然,仅仅简单的依靠屏蔽显然不能很好的抑制电磁干扰,要想使光电侦察平台满足国军标及复杂电磁环境的要求,就需要将屏蔽、滤波、接地等措施综合处理,结果见图 6(c)。

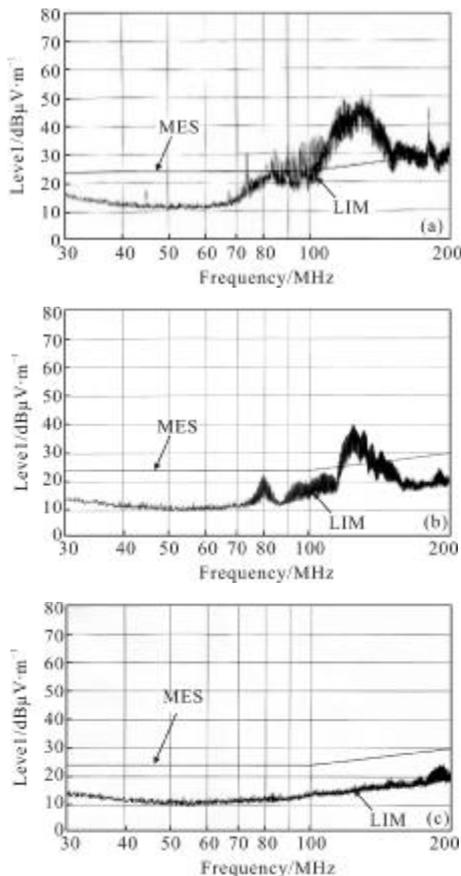


图 6 30~200 MHz 垂直极化扫描结果

Fig.6 Scanning result of vertical polarization test in 30-200 MHz

可以看出,经过合理的屏蔽处理,可使光电侦察平台电场辐射发射的辐射值降低约 $10 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ,并且使超标区域由原来的 $80 \sim 200 \text{ MHz}$ 减小到 $130 \sim 160 \text{ MHz}$ ,有效的降低了电磁干扰,提高了光电侦察平台的电磁兼容性。

测试结果表明,综合采取屏蔽、滤波、接地等措施后,实测曲线均在极限曲线下方,光电侦察平台电场辐射发射的辐射值在其最敏感的区域,且有约 $6 \sim 10 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 的裕量,满足GJB 151A-1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》的要求。另外,CE102、CS101、CS114、CS115、CS116、RS103等测试

项目在测试范围内均未出现敏感现象。

## 4 结 论

在对某型光电侦察平台进行电磁兼容性整改设计的过程中,采用电磁屏蔽技术,可将光电侦察平台电场辐射发射值降低约 $10 \sim 15 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ,提高了光电侦察平台的电磁兼容性。然而,要完全消除系统内部或者外部电磁干扰是不可能的。要使光电侦察平台满足复杂的电磁环境要求,就需要采取屏蔽、滤波、接地等多种措施,减小系统内部的或外部的电磁干扰,将电磁干扰控制到系统允许的范围内,从而保证系统间或系统内的电磁兼容性。

## 参考文献:

- [1] Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi, et al. Algorithm of improving multi-pulsed LADAR range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2540-2545. (in Chinese)
- [2] Li Bo, Huang Daqing. Research of an EMC design methodology based on prediction method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 2499-2500. (in Chinese)
- [3] Liu Xiaohan, Xu Nianxi, Zhao Jingli, et al. Method of decreasing surface resistance of inductive mesh [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 966-969. (in Chinese)
- [4] Ge Xinhong, Guo Lihong, Meng Fanjiang, et al. Electromagnetic radiation test of high power TEACO2 laser and shielding cabin design [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 983-991. (in Chinese)
- [5] Huang Daqing, Li Bo. Novel tailoring method for conducting and radiating electromagnetic compatibility testing of unmanned aerial vehicle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 380-387. (in Chinese)
- [6] Xiao Ying, Jin Longxu. Analyzing of the earthing design based on EMC [J]. *Optical Technique*, 2006, 32: 613-616. (in Chinese)
- [7] Xu Zhongsheng, Geng Haipeng, Duan Yuhong, et al. Study on electromagnetic compatibility of military optoelectronic equipment [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5 (3): 72-75. (in Chinese)
- [8] Fan Youyu, Yang Yi, Jiang Xiongwei, et al. Design of perspective device of metallic plate based on metamaterials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 12-16. (in Chinese)