

文章编号 1004-924X(2023)11-1660-12

## 机载数字化设备屏蔽效能的提高

韩松伟<sup>1</sup>, 韩松辉<sup>2</sup>, 许 亮<sup>1\*</sup>, 王 鑫<sup>1</sup>, 刘立刚<sup>1</sup>

(1. 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. 中国铁路沈阳局集团公司吉林机务段, 吉林 吉林 132000)

**摘要:** 为了降低机载数字化设备的电磁波辐射发射强度, 对数字信号的频谱进行分析, 指出数字信号所包含的基波及其高频谐波是设备电磁辐射的源头; 分析了屏蔽层抑制电磁辐射的机理, 结果表明高电导率、非磁性屏蔽层对电场及高频磁场有很好的屏蔽效果; 研究了缝隙对屏蔽体屏蔽效能的影响, 提出了一种提高缝隙屏蔽效能的双层填充屏蔽方法; 然后分析了电磁波通过屏蔽层时的吸收损耗, 提出了一种提高双绞屏蔽电缆/同轴电缆屏蔽效能的双层屏蔽方法; 最后以实际工程项目为例, 该项目设备已满足 GJB151B-2013 RE102 要求的情况下, 仍然干扰北斗设备搜星定位。对它进行电磁兼容改进, 改进后实验室测量 RE102 项, 设备电磁辐射发射强度平均降低约 12 dB $\mu$ V/m; 外场地面及飞行实验结果表明, 设备正常工作情况下, BDB1, BDB3 频点的带内积分功率分别提高 0.59 dBm 和 1.84 dBm, 北斗设备收星数量由 3 颗及以下上升至 9 颗及以上, 北斗设备可正常定位。

**关键词:** 数字化设备; 电磁兼容; 双层屏蔽; 双层填充屏蔽; 屏蔽效能

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233111.1660

## Improvement of shielding effectiveness of airborne digital equipment

HAN Songwei<sup>1</sup>, HAN Songhui<sup>2</sup>, XU Liang<sup>1\*</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, LIU Ligang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China;

2. Jilin Locomotive Depot of China Railway Shenyang Bureau Group Corporation,  
Changchun 132000, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuliang\_998@163.com

**Abstract:** To reduce the electromagnetic radiation emission intensity of airborne digital equipment, the spectrum of the digital signal is analyzed, revealing that the fundamental wave and its high-frequency harmonics are the sources of electromagnetic radiation emissions. Next, the rationale of shielding layer to suppress electromagnetic radiation is analyzed. The results indicate that the high-conductivity non-magnetic shielding layer has a good shielding effect on the electric field and high-frequency magnetic field. The influence of the gap on the shielding effectiveness of the shield is analyzed again, and a new method of double-layer fill shielding is proposed and validated. Then, the absorption loss of the electromagnetic wave is analyzed, and a new method for improving the shielding effectiveness of twisted-pair shielded cable/coaxial cable double-layer shielding is proposed and validated. Finally, an actual engineering project is considered as

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-03-02.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20200403057SF)

an example. The project equipment satisfies the GJB151B-2013 RE102 requirements and still interferes with the Beidou equipment Star(BDS) Searching and positioning. The electromagnetic compatibility is improved using the proposed method. After the improvement, the emission intensity of electromagnetic radiation is significantly reduced, by 12 dB $\mu$ V/m on average. The ground and flight experiments verify that the integral power of the BDB1 and BDB3 frequency points is increased by 0.59 and 1.84 dBm, respectively, under normal operating conditions, and the number of BDS searching satellites is increased from  $\leq 3$  to  $\geq 9$ , the BDS can operate normally.

**Key words:** digital equipment; electromagnetic compatibility; double-layer shielding; double-layer fill shielding; shielding effectiveness

## 1 引言

随着技术的快速发展,无人机搭载的航电设备越来越多,设备集成化程度也越来越显著。机载光电设备作为无人侦察机的“眼睛”,所处的电磁环境也越来越恶劣。先进的无人机载光电设备,除了要具有作用距离远、跟踪精度高、监测范围广等特点,还要在复杂机载电磁干扰环境中具有优良的电磁兼容性能,既不能干扰其他电子设备,也能抵抗外来的电磁干扰<sup>[1-2]</sup>。近年来,由于机载设备电磁兼容问题导致的飞机安全事故频发,因此提升机载设备的电磁兼容性,对于提高设备可靠性和飞行安全性具有重要意义。

机载设备的电磁兼容性主要包括两个层面:第一,机载设备、电子系统与分系统在已经明确的电磁环境下运行,不会因为相互的电磁干扰造成损害或影响飞机的正常运行;第二,机载设备、电子系统与分系统在已经明确的电磁环境下运行,产生的电磁干扰在可接受范围内,不影响正常工作<sup>[3-5]</sup>。20世纪70年代末期以来,机载设备的数字化程度越来越高,电磁兼容性方面的问题也越来越突出。数字信号的电磁辐射频谱具有覆盖范围广、频率高的特点。即使在设计阶段已经对机载设备的电磁兼容性进行了周全的考虑,但是由于电磁兼容问题的复杂性,国产化元器件性能的不稳定性,设备制造工艺成熟度等多方面因素,机载设备在制造过程中仍不可避免地出现各种电磁干扰因素。这些因素相互耦合,导致某些机载设备无法同时工作,不满足电磁兼容性要求,需要对其电磁兼容性进行提升,以达到电磁兼容要求。

机载设备具有特殊性,在追求高可靠性、高性能的同时,设备需要在质量及空间尺寸强约束的条件下,实现与其他机载设备的电磁兼容。因此,传统的电磁兼容工艺、方法已不能完全满足机载设备的电磁兼容要求。本文通过理论分析数字信号的特点,结合机载设备的特殊性,提出了一种双层填充电磁屏蔽方法,并将该方法应用到实际机载光电设备中,解决了该设备与机载北斗设备的电磁兼容问题。经过外场对设备的电磁辐射测试及实验室 RE102 项目的考核,证明了该方法的有效性。

## 2 数字信号的屏蔽效能

### 2.1 数字信号频谱分析

数字电子设备传输的信号为数字信号,因此数字信号的频谱特征是判断该系统能否与其他电子系统相兼容的重要条件。数字信号大致可分为时钟信号、视频信号、通信信号和控制信号等,这些信号的时域波形与周期脉冲信号的时域波形相似,可近似看作不同周期脉冲信号的叠加。因此,通过分析周期脉冲信号来了解数字信号的频谱结构及特征,以便在数字电子设备的早期设计过程中,针对有问题的波段采取电磁兼容措施,降低数字信号的辐射发射强度<sup>[6-7]</sup>。

以典型周期脉冲信号  $f(t)$  为例,其脉冲宽度为  $\tau$ ,幅度为  $E$ ,周期为  $T$ ,如图 1 所示。

此信号在 1 个周期内可表达为:

$$f(t) = E \left[ u\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right], -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}. \quad (1)$$

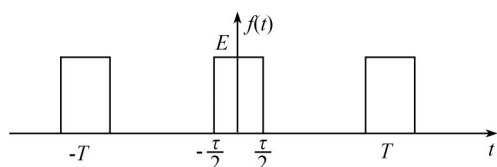


图1 周期脉冲信号

Fig. 1 Periodic pulse signal

将  $f(t)$  展开为傅里叶级数:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)], \quad (2)$$

$$\text{式中: } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T};$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt = \frac{E\tau}{T};$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2E}{n\pi} \sin\left(\frac{n\omega\tau}{2}\right).$$

因为  $f(t)$  为偶函数, 所以  $b_n = 0$ , 则有:

$$f(t) = \frac{E\tau}{T} + \frac{2E}{n\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \cos(n\pi t). \quad (3)$$

由式(3)可知, 周期脉冲信号包含基频信号 ( $n=1$  时) 及频率为基频信号频率整数倍的高频信号 ( $n>1$  时)。  $n$  越大, 傅里叶级数越趋近于周期脉冲信号, 如图2所示。

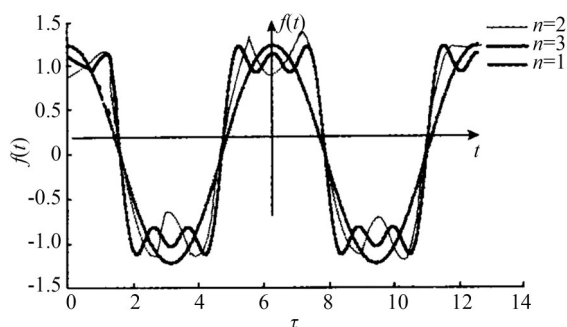


图2 脉冲信号傅里叶级数

Fig. 2 Fourier series of pulse signal

从图2可以看出: 傅里叶级数中高频分量越多, 叠加后的波形越趋近于周期脉冲信号  $f(t)$ ; 傅里叶级数的高频分量主要影响脉冲信号跳变沿的陡度, 低频分量主要影响脉冲信号的幅值<sup>[8]</sup>。

数字系统内部包含多种不同频率的周期脉冲信号, 这些脉冲信号所包含的基波及其高频谐

波会向外辐射电磁波, 是电磁辐射的源头, 辐射的电磁波频谱覆盖范围很宽, 必须进行有针对性的电磁屏蔽设计<sup>[9-10]</sup>。

## 2.2 屏蔽对电磁辐射的抑制

数字电子设备会向外辐射电磁波, 为了降低电磁波的辐射强度, 干扰源必须被屏蔽。图3所示为一个位于自由空间中的载流导体周围的电场和磁场。如果将一个非磁性屏蔽层放在导体周围, 电场线会终止于屏蔽层, 但对磁场的影响很小, 如图4所示。

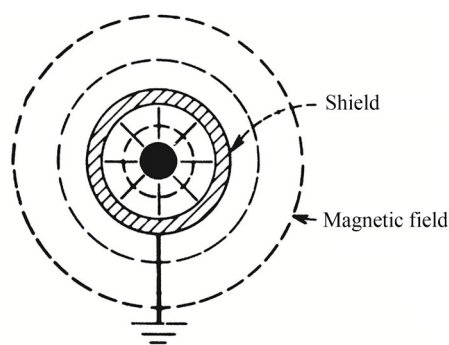


图3 载流导体周围的场

Fig. 3 Fields surrounding current-carrying conductor

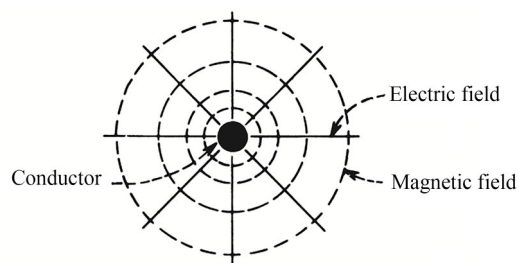


图4 被屏蔽导体周围的场(屏蔽层在一点接地)

Fig. 4 Fields around shielded conductor (shield grounded at one point)

如果有与中心导体上的电流相等, 方向相反的电流在屏蔽层上流动, 它将产生一个强度相等, 方向相反的外部磁场, 这个磁场会抵消中心导体中的电流在屏蔽层外部产生的磁场, 如图5所示, 屏蔽层外部没有场。

以一个典型的双端接地, 载有电流  $I_1$  的电路为例来说明屏蔽层对磁场的屏蔽效果, 如图6(a)所示。为了防止该电流产生电磁辐射, 对载有电流  $I_1$  的导体进行屏蔽处理, 且屏蔽层双端接地, 其等效电路如图6(b)所示。

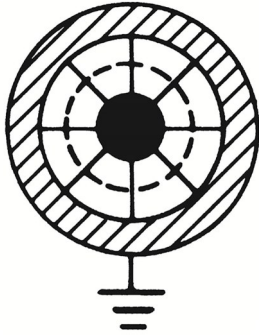


图 5 被屏蔽导体周围的场(屏蔽层接地,屏蔽层传输的电流等于内导体的电流,方向相反)

Fig. 5 Fields around shielded conductor (shield grounded and carrying acurrent equal to conductor current but in opposite direction)

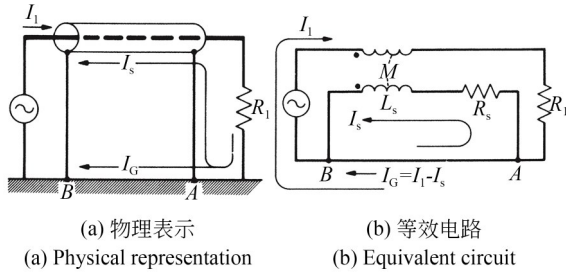


图 6 屏蔽层和接地面之间的电流分流

Fig. 6 Division of current between shield and ground plane

分析该等效电路,其绕地回路路径为(A- $R_s$ - $L_s$ -B-A),屏蔽层电流 $I_s$ 为:

$$0 = I_s(j\omega L_s + R_s) - I_1(j\omega M), \quad (4)$$

其中: $M$ 为屏蔽层和中心导体之间的互感, $L_s$ 为屏蔽层的自有电感, $R_s$ 为屏蔽层的自有电阻。

$$L_s = \frac{\Phi}{I_s}, \quad (5)$$

$$M = \frac{\Phi}{I_s}. \quad (6)$$

因为屏蔽层电流产生的所有磁通都环绕中心导体,式(5)和式(6)中的磁通量 $\Phi$ 是相同的。因此,屏蔽层和中心导体之间的互感等于屏蔽层的自感,即有:

$$M = L_s. \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)并重新整理, $I_s$ 表示为:

$$I_s = I_1 \left( \frac{j\omega}{j\omega + R_s/L_s} \right) = \left( \frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \right) I_1, \quad (8)$$

式中: $\omega_c = R_s/L_s$ ,为屏蔽层的截止频率,当

$\omega \gg \omega_c$ 时(一般为5倍以上),屏蔽层电流 $I_s$ 接近中心导体电流 $I_1$ 。由于屏蔽层和中心导体之间的互感,同轴电缆起到共模扼流圈的作用,在高频时,屏蔽层提供了一个具有比接地面更低的总电路电感的返回路径,当 $\omega \leq 5\omega_c$ 时,通过地线返回更多的电流,电缆提供的屏蔽会大大减小。由于在高频时屏蔽层电流 $I_s$ 与中心导体电流 $I_1$ 大小接近,方向相反,因此产生的磁场可相互抵消,该方法可有效屏蔽高频磁场。

### 2.3 缝隙对屏蔽效能的影响

数字电子设备在进行EMC设计时,会采取滤波及屏蔽的设计方法。为了衡量屏蔽措施的有效性,引入屏蔽效能的概念。当电磁波通过屏蔽体时,其场强会明显降低,定义同一位置无屏蔽体时电磁场的强度与加屏蔽体后电磁场的强度之比为该屏蔽体的屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)。

由于机械加工、电缆走线、功能需求和散热需要等多重原因,数字电子设备壳体表面广泛存在缝隙、孔洞等不连续点。根据缝隙天线理论,可以确定单孔隙的屏蔽效果。当缝隙天线的最大线尺寸等于 $1/2$ 波长时,该缝隙是最有效的辐射体,定义这个尺寸的屏蔽效果为0 dB。随着孔隙变短,辐射效能会以每10倍长度20 dB的速率下降,屏蔽效能会以同样的速率增加。因此,对于一个最大线性尺寸等于或者小于 $1/2$ 波长的孔隙,以dB为单位的屏蔽效能 $SE_g$ 可表示为:

$$SE_g = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2l} \right). \quad (9)$$

对于电磁波而言,存在如下关系:

$$c = \lambda f, \quad (10)$$

其中: $c$ 为光速, $\lambda$ 为电磁波波长。将式(10)代入式(9),整理后得:

$$SE_g = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2L} \right) = 20 \log \left( \frac{150}{f_{\text{MHz}} l_{\text{meters}}} \right), \quad (11)$$

其中: $f_{\text{MHz}}$ 为电磁波频率, $l_{\text{meters}}$ 为孔隙的最大线性尺寸。

对于设备上的缝隙,如图7所示,有式(12)成立:

$$H_g = H_0 e^{-\pi t/L}. \quad (12)$$

将式(12)代入屏蔽效能公式有:

$$SE_g = 20 \lg \left( \frac{H_0}{H_g} \right) = 27.27 \left( \frac{t}{L} \right), \quad (13)$$

其中: $SE_g$ 为屏蔽效能, $H_0$ 为入射场, $H_g$ 为出射场; $L$ 为狭缝截面的最大长度; $t$ 为狭缝厚度<sup>[11-12]</sup>。

由式(13)可以看出,缝隙的屏蔽效能与电磁波的特性、缝隙的最大尺寸和深度等因素有关,其中最主要的因素是缝隙的最大尺寸和缝隙的深度。减小缝隙的最大尺寸 $L$ 、增加缝隙的深度 $t$ 有利于提高缝隙的屏蔽效能。

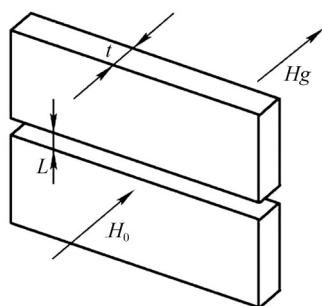


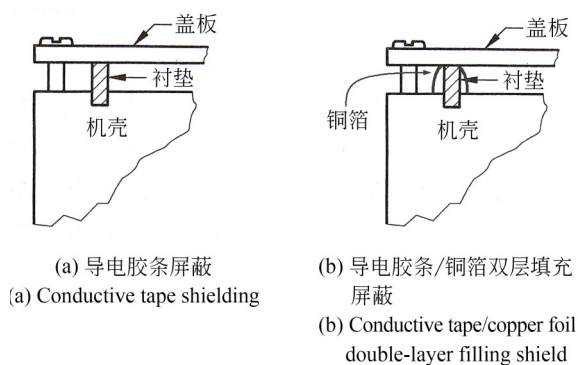
图 7 屏蔽体缝隙

Fig. 7 Shield gap

由式(11)可知,在辐射发射场电磁波频率一定的情况下,可以通过减小缝隙尺寸来提高设备的屏蔽效能。

数字电子设备常用的缝隙屏蔽方法主要分为两种:紧固点(包括螺钉、铆钉、点焊等)连接和在缝隙中安装电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)衬垫。紧固点连接的方案工艺简单、成本低廉,一般是首选方法,但提供的屏蔽效果不是很好。对于活动缝隙或不允许采取太多紧固点的屏蔽体,选择在缝隙中安装 EMI 衬垫的方法,EMI 衬垫和机壳上的表面镀层结合可在部件之间提供良好的电连续性,使接触点的阻抗减小到最小,增加壳体的屏蔽效果。通常采取两种方式相结合的设计,在设备不同部件的接触面上加工凹槽,在凹槽内安装合适的 EMI 衬垫(导电橡胶条),并通过固定螺钉将部件紧固,结构示意图如图 8(a)所示。

为了进一步提升设备缝隙处的屏蔽效能,在传统处理缝隙措施的基础上进行改进,采用铜箔粘贴在导电胶条之上,做“双层填充”屏蔽,如图 8(b)所示。两种导电材料相互补充,同时具备了优越的填充性与导电、导磁性,不仅减小了缝隙尺寸,还提高了填充材料的导电率与导磁率,使屏蔽体的屏蔽效能获得大幅度提升,提升前后实



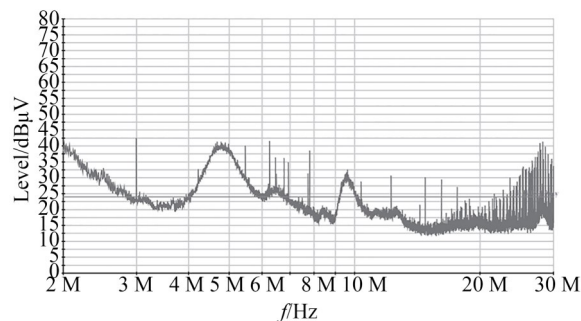
(a) 导电胶条屏蔽  
(a) Conductive tape shielding

(b) 导电胶条/铜箔双层填充屏蔽  
(b) Conductive tape/copper foil double-layer filling shield

图 8 部件接缝处屏蔽层填充

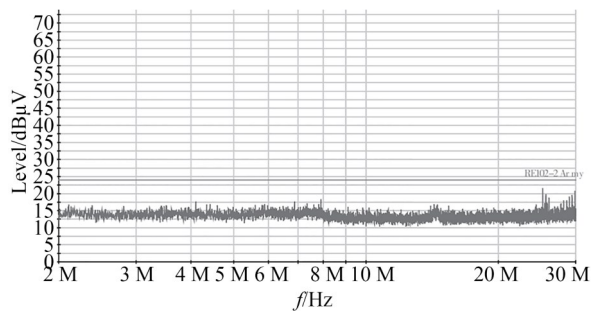
Fig. 8 Shielding at component joints

验室测试结果如图 9 所示。



(a) 导电胶条屏蔽 RE102 测试

(a) Conductive tape shielding RE102 test



(b) 双层填充屏蔽 RE102 测试

(b) Double-layer filled shielding RE102 test

图 9 双层填充屏蔽前后 RE102 测试对比

Fig. 9 Comparison of RE102 test before and after double-layer filling shield

## 2.4 电磁波的吸收损耗

当电磁波穿过媒质,它的幅度呈指数下降<sup>[13]</sup>,如图 10 所示。这种衰减的产生是因为屏蔽体中感应的电流产生了欧姆损耗和材料发热<sup>[14-15]</sup>,可以表示为:

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \text{ 或 } H_1 = H_0 e^{-t/\delta}, \quad (14)$$

其中: $E_1(H_1)$ 是屏蔽体中距离 $t$ 处的场强,当场强衰减到原来的 $1/e$ 或者 $37\%$ 的距离定义为趋肤深度 $\delta$ 。

穿过屏蔽体的吸收损耗为:

$$A=20\log\frac{E_0}{E_1}.$$

(15)

将式(14)代入式(15),则有:

$$A=20\log e^{t/\delta}=20\frac{t}{\delta}\log e=8.69\frac{t}{\delta}.$$

(16)

由推导出的式(11)可知,屏蔽体中一个趋肤深度厚的吸收损为 $8.69\text{ dB}$ ,屏蔽体的厚度加倍,吸收损耗也会加倍,如表1所示。

由表1可以看出:

(1) 当 $f\geqslant1\text{ MHz}(10^6\text{ Hz})$ 时,用 $0.5\text{ mm}$ 厚的金属板制成的屏蔽体,可将场强减弱为原场强的 $1/100$ 左右。因此,在选择材料时,应着重考虑材料的机械强度、刚度、工艺性及防潮、防腐等

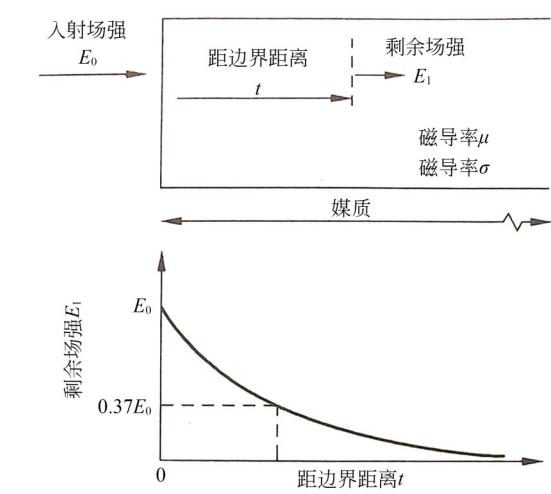


图 10 电磁波通过屏蔽体呈指数衰减

Fig. 10 Electromagnetic wave attenuates exponentially after passing through shield

因素;

(2) 当 $f\geqslant10\text{ MHz}(10^7\text{ Hz})$ 时,用 $0.1\text{ mm}$ 厚的铜皮制成的屏蔽体可将场强减弱为原场强的

表 1 几种金属的电导率、磁导率及所需的屏蔽厚度

Tab. 1 Conductive, permeability and requird shielding thickness of sevrall metals

| 金属   | 电阻率 $\rho=1/\sigma$<br>$10^{-2}\Omega\cdot\text{mm}$ | 相对磁导率  | 频率<br>$f/\text{Hz}$ | 材料厚度/mm            |              |              |
|------|------------------------------------------------------|--------|---------------------|--------------------|--------------|--------------|
|      |                                                      |        |                     | 透入深度 $\delta$      | 2.3 $\delta$ | 4.6 $\delta$ |
|      |                                                      |        |                     | $A=8.69\text{ dB}$ | 20 dB        | 40 dB        |
| 铜    | 0.0172                                               | 1      | $10^5$              | 0.21               | 0.49         | 0.98         |
|      |                                                      |        | $10^6$              | 0.067              | 0.154        | 0.308        |
|      |                                                      |        | $10^7$              | 0.021              | 0.049        | 0.098        |
|      |                                                      |        | $10^8$              | 0.006 7            | 0.015 4      | 0.030 8      |
| 黄铜   | 0.06                                                 | 1      | $10^5$              | 0.39               | 0.9          | 1.8          |
|      |                                                      |        | $10^6$              | 0.124              | 0.285        | 0.57         |
|      |                                                      |        | $10^7$              | 0.039              | 0.09         | 0.18         |
|      |                                                      |        | $10^8$              | 0.012 4            | 0.028 5      | 0.057        |
| 铝    | 0.03                                                 | 1      | $10^5$              | 0.275              | 0.64         | 1.28         |
|      |                                                      |        | $10^6$              | 0.088              | 0.20         | 0.4          |
|      |                                                      |        | $10^7$              | 0.027 5            | 0.064        | 0.128        |
|      |                                                      |        | $10^8$              | 0.008 8            | 0.020        | 0.004        |
| 钢    | 0.1                                                  | 50     | $10^5$              | —                  | —            | —            |
|      |                                                      |        | $10^6$              | 0.023              | 0.053        | 0.016        |
|      |                                                      |        | $10^7$              | 0.007              | 0.016        | 0.032        |
|      |                                                      |        | $10^8$              | 0.002 3            | 0.005 3      | 0.001 6      |
| 铁镍合金 | 0.65                                                 | 12 000 | $10^2$              | 0.38               | 0.85         | 1.7          |
|      |                                                      |        | $10^3$              | 0.12               | 0.27         | 0.54         |
|      |                                                      |        | $10^4$              | 0.038              | 0.085        | 0.17         |
|      |                                                      |        | $10^5$              | 0.012              | 0.027        | 0.054        |

1/100 甚至更低。因此,在选择材料时,可选用表面贴有铜箔的绝缘材料作为屏蔽体;

(3) 当  $f \geq 100 \text{ MHz}$  ( $10^8 \text{ Hz}$ ) 时,可选用在塑料壳体上镀或者喷以铜层或银层制成屏蔽体。

在数字电子设备中,考虑到设备的电磁兼容性,为提高设备的抗干扰性,降低对外辐射的电磁波强度,广泛使用双绞屏蔽电缆及同轴电缆。常用的屏蔽电缆均采用编织屏蔽层,其优点是弹性好、耐久、强度高和弯曲寿命长,但对中心导体的覆盖度不够,只能达到 60%~98%,编织层遍布细小的孔洞,破坏了纵向屏蔽电流的均匀性,由式(11)可知,在较高的频率下,屏蔽效能会大幅下降<sup>[16]</sup>。

为了提升屏蔽电缆的屏蔽效能,本文在常规屏蔽电缆外层增加一层镀镍屏蔽带,即对电缆进行双层屏蔽处理。根据电路理论,在屏蔽体中入射场产生感应电流,这些电流反过来产生附加的场,可抵消原来的场,如图 11 所示。

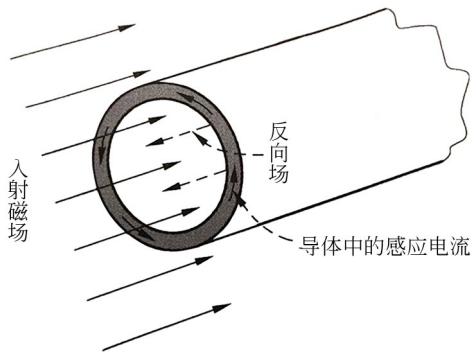


图 11 入射场与感应电流产生的反向场

Fig. 11 Incident field and reverse field generated by induced current

屏蔽电缆已有屏蔽层,数字信号传输产生的共模电流仍通过屏蔽层返回,发射电磁辐射,如图 12 所示。利用上述的电路理论,将同轴电缆看作一个整体,采用双层屏蔽方法,在同轴电缆外部再增加一层外层屏蔽层,该屏蔽层上由内部入射场产生一反向感应电流,以抵消内层屏蔽电

共模噪声带来的电磁辐射,提高屏蔽效能,如图 13 所示。

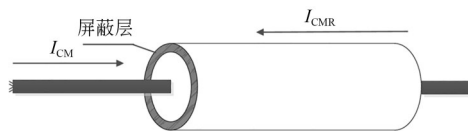


图 12 屏蔽电缆的共模噪声

Fig. 12 Common-mode noise of shielded cable

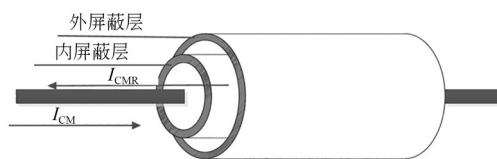


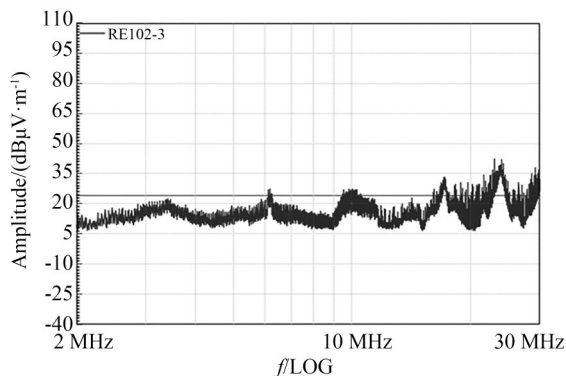
图 13 双层屏蔽同轴电缆的共模噪声

Fig. 13 Common-mode noise of double-layer shielded coaxial cable

由式(11)可知,屏蔽体存在的孔隙越小,屏蔽效能越高。采取双层屏蔽措施后,屏蔽体在保持原有编织屏蔽层优点的同时,减小了屏蔽层的孔隙,提高了屏蔽效能。

双层屏蔽体属于良导体,具有一定的厚度,可以通过反射作用屏蔽电场,也可以通过吸收作用屏蔽磁场。根据表 1 选择铝质屏蔽带的厚度。

对设备内部电缆采取双层屏蔽措施后,电缆的屏蔽效能得到提升,实验室测试结果如图 14 所示。



(a) 双层屏蔽前

(a) Without double-layer shielding

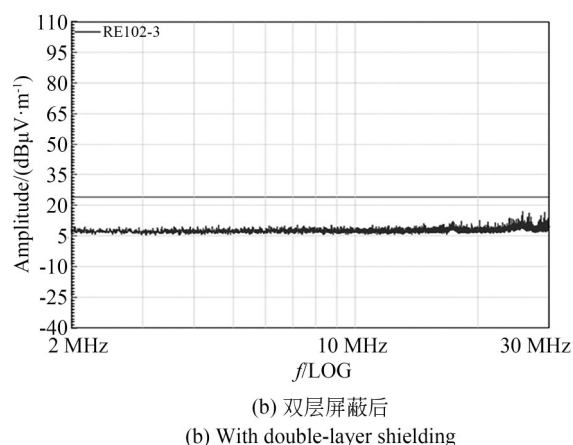


图 14 双层屏蔽前后 RE102 测试对比

Fig. 14 Comparison of RE102 test before and after double-layer shielding

### 3 工程应用

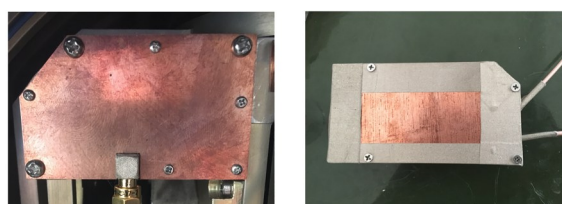
国内某型无人机机载光电设备已进行了充分的电磁兼容性设计,但由于该无人机空间布局的限制,装机后光电设备与北斗设备距离过近,同时光电设备存在玻璃窗口,且该型北斗设备的抗干扰能力差,常规的电磁兼容工艺无法满足该项目的实际需求。

经过反复分析及测试发现,光电设备输出的视频信号为 SDI 数字信号,频谱覆盖范围宽,使北斗设备中心工作频段附近的底部噪声增大,降低了它接收卫星信号的信噪比,导致接收卫星信号的能力减弱,搜星数量减少。采用本文提出的

电磁屏蔽方法对光电设备进行改进。

#### 3.1 电路板屏蔽改进

光电设备采用铜制屏蔽盒对电路板进行屏蔽,屏蔽盒原有 4 个螺钉。根据式(11),在此基础上新增 4 个螺钉以减小相邻螺钉的间距,如图 15(a)所示,或使用屏蔽带对屏蔽壳体边缘进行包裹处理,如图 15(b)所示。上述两种方法都可降低盒与盖之间的缝隙尺寸  $L$ ,使盒与盖保持良好的电接触,消除缝隙泄漏的影响,提高电路板的屏蔽效能。



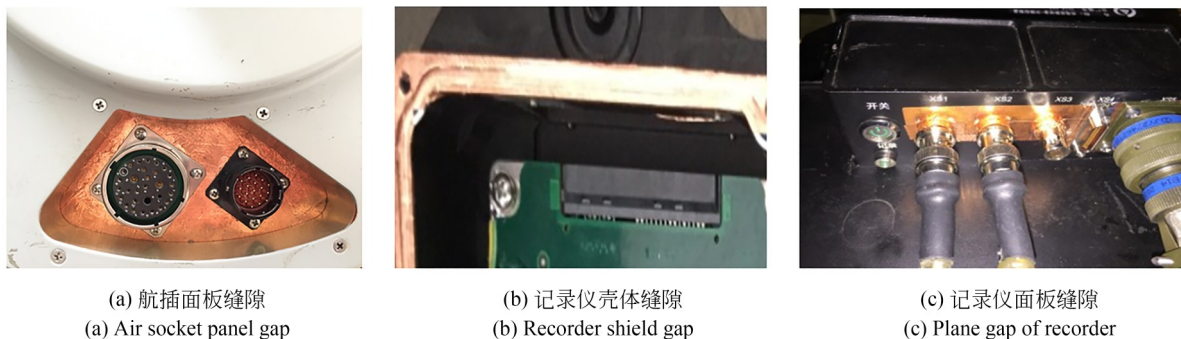
(a) 时钟恢复电路板 (b) 光纤电路板  
(a) Clock recovery circuit board (b) Fiber optic circuit board

图 15 电路板屏蔽处理

Fig. 15 Circuit board shield treatment

#### 3.2 设备缝隙“双层填充”屏蔽

光电设备不同部分的结合处存在缝隙,是其屏蔽效能降低的主要原因之一<sup>[17]</sup>。光电设备铝质航插面板与壳体之间的缝隙如图 16(a)所示,记录仪壳体缝隙如图 16(b)所示,记录仪连接器面板与视频插座之间缝隙如图 16(c)所示,采用“双层填充”屏蔽方法提高屏蔽效能,使铜箔与橡胶条之间紧密贴合,并进行平整处理。



(a) 航插面板缝隙  
(a) Air socket panel gap

(b) 记录仪壳体缝隙  
(b) Recorder shield gap

(c) 记录仪面板缝隙  
(c) Plane gap of recorder

图 16 缝隙双层填充屏蔽处理

Fig. 16 Crevice with double-layer filling shield treatment

#### 3.3 电缆“双层屏蔽”

光电设备的视频信号为高频数字信号,由于

连接器插头与视频电缆之间存在缝隙,在传输信号时会向外辐射电磁波。电缆插头采用镀镍屏

蔽带处理,使它与连接器圆周进行导电连接,并在航插内部及尾夹处进行紧固处理,减小插头与电缆之间的缝隙,如图 17(a)和 17(b)所示。同

时,电缆中传输视频的同轴电缆做“双层屏蔽”处理,有效地控制视频传输电缆的电磁辐射,如图 17(c)所示。

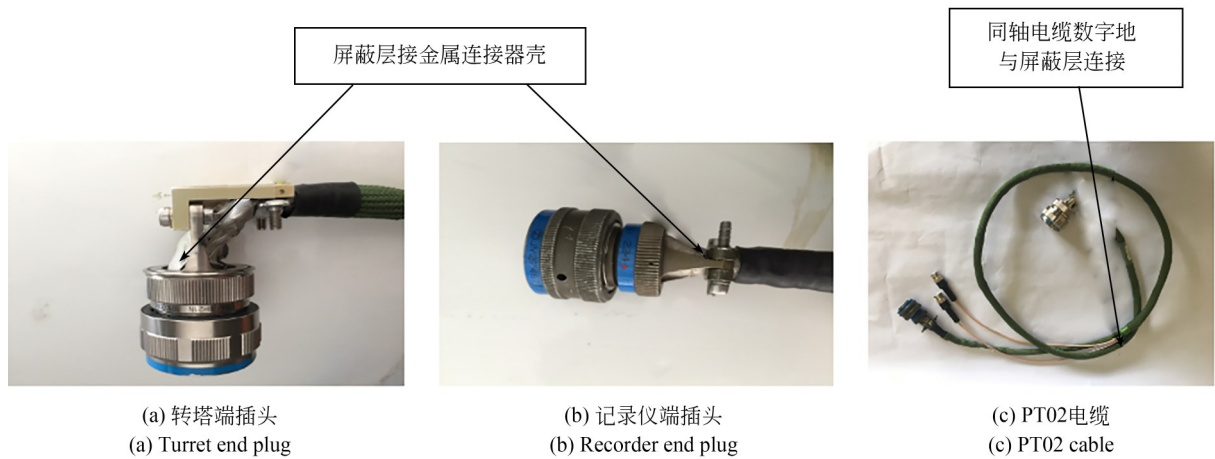


图 17 电缆屏蔽处理  
Fig. 17 PT02 cable shield treatment

4 外场与实验室测试结果

4.1 外场地面验证

光电设备通过减小电路板屏蔽壳缝隙,对设备缝隙采取双层填充屏蔽,对内部电缆采取双层屏蔽等措施后,装机进行测试。光电设备正常工作时,在 BD1 频点处(带宽 4.092 MHz 的条件下),BD3 频点处(带宽 20.46 MHz 的条件下),相对于背景电平的带内积分功率提高不大于 5 dBm。

首先,将测试天线固定于机载北斗天线旁边位置(尽量靠近机载天线)连接频谱仪,如图 18 所示;光电设备断电,测试机上北斗天线处 BDB1, BDB3 频点的带内积分功率,如图 19 所示;光电设备上电,测试机上北斗天线处 BDB1, BDB3 频点的带内积分功率,如图 20 所示;测试完毕后,将各频点两次测试得到的带内积分功率进行比较

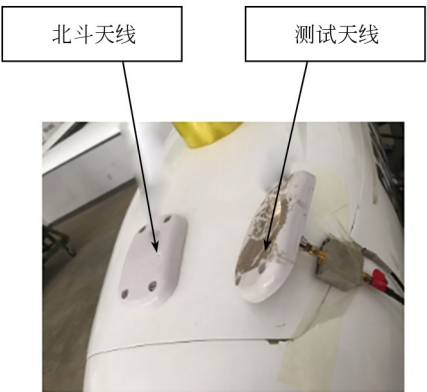


图 18 测试天线位置  
Fig. 18 Test antenna position

验证,测试结果如表 2 所示。

光电设备上电正常工作情况下,与断电时对比, BDB1, BDB3 频点的带内积分功率分别提高 0.59 dBm 和 1.84 dBm,满足频点带内积分功率

表 2 带内积分功率对比

Tab. 2 In band integrated power comparison (dBm)

| 频 点  | 机上北斗天线处带内积分功率 |        | 带内积分功率提升 |
|------|---------------|--------|----------|
|      | 光电设备断电        | 光电设备上电 |          |
| BDB1 | -68.31        | -67.72 | 0.59     |
| BDB3 | -58.74        | -56.9  | 1.84     |

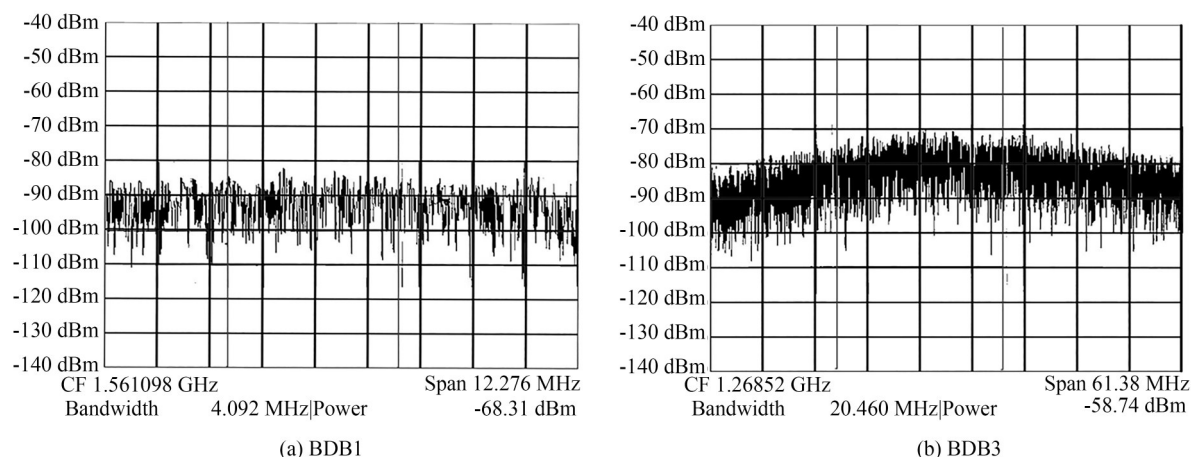


图 19 光电设备上电前 BDB1, BDB3 的带内积分功率

Fig. 19 Integrated power in band of BDB1 and BDB3 before photoelectric equipment power on

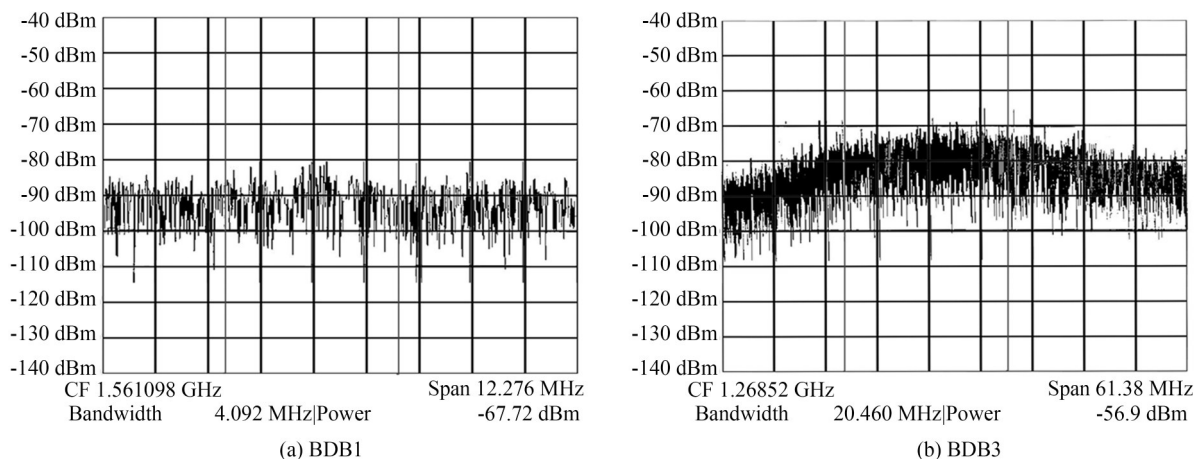


图 20 光电设备上电后 BDB1, BDB3 的带内积分功率

Fig. 20 Integrated power in band of BDB1 and BDB3 after photoelectric equipment power on

提高不大于 5 dBm 的要求,机上北斗设备可正常工作。

## 4.2 实验室验证

对光电设备的电磁兼容性进行改进,在实验室对光电设备在北斗设备工作的频段做 RE102 测试,改进前后电磁兼容实验结果如图 21 所示。

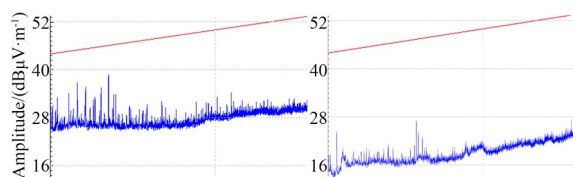


图 21 RE102 实验结果对比(1~3 GHz)

Fig. 21 Comparison of RE102 test results(1-3 GHz)

由图 21 可知,光电设备在北斗设备工作的频段区间满足 GJB151B-2013 要求,电磁兼容改进前设备的电磁兼容辐射曲线在 28 dB $\mu$ V/m 附近,改进后设备的电磁兼容辐射曲线在 16 dB $\mu$ V/m 附近,平均降低约 12 dB $\mu$ V/m。实验结果表明,光电设备采用的电磁兼容改进措施有效,设备屏蔽效能大幅度提高。

## 4.3 飞行验证

对光电设备进行了外场地面实验与 RE102 项实验验证后,随飞机进行了飞行验证。飞行过程中,光电设备上电正常工作。由于采取的屏蔽措施有效提升了设备的屏蔽效能,设备的电磁辐射强度降低,对北斗接收机接收卫星信号端的信噪比几乎无影响。北斗接收机接收卫星信号的

数量稳定在 9 颗及以上,可正常工作。在随后的性能鉴定飞行中,该型光电设备圆满完成了性能鉴定工作。

## 5 结 论

本文通过分析数字信号的频谱特征,明确了脉冲信号所包含的基波及其高频谐波是数字电子设备电磁辐射的源头;通过分析屏蔽层抑制电磁辐射的机理,得出高电导率、非磁性屏蔽层对电场及高频磁场具有很好的屏蔽效果;通过分析缝隙对屏蔽效能的影响,提出了一种处理设备壳体缝隙的双层填充屏蔽法,实验结果表明该方法

大幅度提升了设备壳体的屏蔽效能;通过分析电磁波的吸收损耗,结合缝隙对屏蔽体的影响,提出了一种处理设备常用屏蔽电缆的双层屏蔽法,实验结果表明该方法大幅度降低了屏蔽电缆的电磁辐射强度。

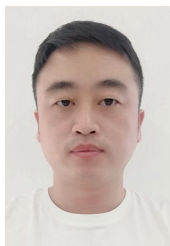
将双层填充屏蔽法和双层屏蔽法应用到实际工程项目中,某型机载光电设备改进后的屏蔽效能获得进一步提升,实验室测量 RE102 项,光电设备辐射信号强度进一步降低,平均降幅约为 12 dB $\mu$ V/m;在外场飞行验证中,机上北斗设备能够接收正常工作所需的卫星数量(稳定在 9 颗及以上),有效解决了光电设备与机上北斗设备的电磁兼容问题。

## 参考文献:

- [1] 李洪烈. 改装机载电子设备中的电磁兼容设计与分析[J]. 飞机设计, 2009, 29(4): 56-59.  
LI H L. Designs and analysis for electro magnetic compatibility on improvement of airborne electrical equipment[J]. *Aircraft Design*, 2009, 29(4): 56-59. (in Chinese)
- [2] 肖文光, 陈之涛. 某无人机载雷达电源模块传导发射 EMC 设计[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(3): 59-63.  
XIAO W G, CHEN ZH T. EMC design of conducted emission of power module in UAV-borne radar[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2017, 46(3): 59-63. (in Chinese)
- [3] 傅诺毅. 大功率电机 RE 测试用高速穿墙屏蔽轴的研制[J]. 安全与电磁兼容, 2020(6): 97-101.  
FU N Y. Development of high speed feed-thru shielding shaft for RE test of high power motor[J]. *Safety & EMC*, 2020(6): 97-101. (in Chinese)
- [4] 李洋, 易文俊. 弹载存储系统的电磁兼容仿真与优化[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 130-134.  
LI Y, YI W J. Electromagnetic compatibility simulation and optimization of missile storage system[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 130-134. (in Chinese)
- [5] PAUL C. *RFundamentals of Electfcic Circuit Analysis*[M]. New York: Wiley Hoboken, 2001.
- [6] HOWELL E K. How switches produce electrical noise [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1979, EMC-21(3): 162-170.
- [7] 杨松楠, 张晓晖, 刘媛媛, 等. 用于磁屏蔽室屏蔽叠层优化的 CSA-NSGAI 算法[J]. 光学精密工程, 2022, 30(14): 1749-1763.  
YANG S N, ZHANG X H, LIU Y Y, *et al.* CSA-NSGAI algorithm for magnetically shielded room shield lamination optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(14): 1749-1763. (in Chinese)
- [8] 王增发, 孙丽娜, 孙学军. 机载光电侦察平台 EMC 环境频谱研究[J]. 电子测量技术, 2013(1): 55-59.  
WANG Z F, SUN L N, SUN X J. Research on EMC environmental spectrum of airborne photoelectric reconnaissance platform[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2013(1): 55-59. (in Chinese)
- [9] 陈玮君, 郑凯, 张贵恩. 宽频电磁屏蔽材料的研究现状[J]. 安全与电磁兼容, 2020(3): 95-97.  
CHEN W J, ZHENG K, ZHANG G E. Research status of broadband electromagnetic shielding materials[J]. *Safety & EMC*, 2020(3): 95-97. (in Chinese)
- [10] TAN D C, JIANG C M, LI Q K, *et al.* Development and current situation of flexible and transparent EM shielding materials[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32(21): 25603-25630.
- [11] OTT H W. *Electromagnetic Compatibility Engineering* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [12] 杨士元. 电磁屏蔽理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
YANG SH Y, *Theory and Practice of Electromagnetic Shielding* [M]. Beijing: National Defence In-

- dustrial Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 葛跃进. 某机载电子设备的电磁兼容设计[J]. 中国制造业信息化, 2007, 6(11): 56-58.  
GE Y J. The design of electromagnetic compatibility for air-borne electronic instrument [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2007, 6(11): 56-58. (in Chinese)
- [14] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
LIU SH H, LIU J M, DONG X L. *Electromagnetic Wave Shielding and Absorbing Materials* [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [15] RAY B, PARMAR S, DATE K, *et al.* Optically transparent polymer composites: a study on the influence of filler/dopant on electromagnetic interference shielding mechanism [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(16): 50255.
- [16] 廖敦微, 郑月军, 崔浩, 等. 双层微纳结构增强电磁屏蔽的机理分析与验证[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11): 1310-1316.  
LIAO D W, ZHENG Y J, CUI H, *et al.* Mechanism analysis and verification of double-layer micro-nano structure to enhance electromagnetic shielding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(11): 1310-1316. (in Chinese)
- [17] 冯晓国, 张舸, 汤洋. 薄膜型金属网栅的电磁屏蔽特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 686-691.  
FENG X G, ZHANG G, TANG Y. Electromagnetic shielding properties of metallic mesh coatings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 686-691. (in Chinese)

#### 作者简介:



韩松伟(1980—),男,吉林蛟河人,硕士,副研究员,2005年于北京航空航天大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事机载光电侦察设备总体设计方面的研究。E-mail:hsw2109@sina.com