

小型机载光电平台电磁屏蔽设计

刘 剑^{1,2}, 李永刚², 黄 猛²

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 复杂的战场电磁环境严重影响了机载光电平台的安全性、可靠性和技术指标。为了提高小型机载光电平台的战场工作效能,从屏蔽的角度出发,对其进行了电磁兼容性设计。首先阐述了电磁屏蔽的屏蔽效能,并分别从屏蔽材料的选择、ABS 外壳屏蔽、缝隙处屏蔽及敏感单元双层屏蔽等方面对小型机载光电平台进行了电磁屏蔽设计。通过电磁兼容性试验对屏蔽效果进行了验证。试验结果表明,采取合理的屏蔽措施后,小型机载光电平台的视频图像显示正常;传导发射值降低了约 20 dB μ V;电场辐射发射值降低了约 10 dB μ V/m;并且其余各项试验均得到了不同程度的改善。为机载光电平台电磁兼容性设计提供了参考。

关键词: 电磁屏蔽; 机载光电平台; 传导辐射; 电磁干扰

中图分类号: TN973.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0920002

Design of electromagnetic shielding for minitype airborne electric-optical platform

Liu Jian^{1,2}, Li Yonggang², Huang Meng²

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Complicated battlefield electromagnetic environment seriously affects the safety, reliability and technical index of airborne electro-optical platform. Electromagnetic shielding of minitype airborne electro-optical platform was designed in order to improve its battle efficiency. Firstly, the shielding effectiveness of electromagnetic shielding was expounded. Design of electromagnetic shielding was carried out for minitype airborne electro-optical platform from the aspects of circuit board, ABS shell, gaps and video transmission. The shielding effects were verified by electromagnetic compatibility test. The test results show that the video image is normal, conduction emission value is reduced by about 20 dB μ V, radiation emission value was reduced by about 10 dB μ V/m, and other items test are improved to varying degrees, which provide a reference for the design of electromagnetic compatibility for minitype airborne electro-optical platform.

Key words: electromagnetic shielding; airborne electro-optical platform; conduction radiation; electromagnetic interference

收稿日期:2016-01-05; 修订日期:2016-02-03

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新工程项目(Y3CX1SS14C)

作者简介:刘剑(1973-),男,博士生,主要从事机械设计及自动化控制方面的研究。Email:translation2002@163.com

导师简介:史国权(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事精密加工方面的研究。

0 引言

小型机载光电平台由于具有体积小、重量轻、携带方便、易操作等优点,在侦察、监视、情报收集等领域被广泛应用。伴随着应用领域、应用场合的多样化,其使用环境也变得越来越复杂,所以小型机载光电平台必须具有抗干扰和适应各种恶劣环境条件的能力。小型机载光电平台是一种集光学、机械、电子学于一体的高集成化设备,具有结构精密,电路复杂,高低频交错、强弱信号交叉等特点^[1]。

在设计中运用三维软件对系统进行紧凑布局,并通过大量选用非金属材料、采用 3D 打印等手段进行异形加工,可实现其小型化、轻量化的要求。然而复杂的战场电磁环境,使其在工作时会产生或遭受电磁耦合和电磁辐射,所以极易遭受干扰,同时也极易引起干扰。较轻的干扰会使视频图像质量受损,系统性能下降;严重的干扰就会使各功能丧失,从而出现故障^[2]。所以抑制或降低系统的电磁干扰,提高系统的可靠性及抗电磁干扰能力,就显得尤为突出。

屏蔽是抑制辐射干扰、提高系统电磁兼容性的有效手段之一。它是采用电磁屏蔽材料将电磁敏感源与电磁干扰源封闭隔离,以达到降低电磁干扰的目的。对于电磁屏蔽在不同领域的设计与应用,参考文献[3-9]也进行了相关报道。参考文献[1,10]对光电侦察平台的电磁特性进行了研究。由于小型机载光电平台有其自身特殊性,所以必须根据其自身的特点,研究适用于该系统的屏蔽技术,期望能提高系统的电磁兼容性。

1 屏蔽效能

通常用屏蔽效能来表示屏蔽体对电磁干扰的屏蔽能力和效果。影响屏蔽体屏蔽效能的因素主要有材料、连接效果、表面的不连续性、与干扰源间的距离以及骚扰源频率等。

屏蔽效能以电场形式表示为:

$$SE_E = 20 \lg \left| \frac{E_0}{E_S} \right| \quad (1)$$

屏蔽效能以磁场形式表示为:

$$SE_H = 20 \lg \left| \frac{H_0}{H_S} \right| \quad (2)$$

式中: E_0 、 E_S 分别为屏蔽前、屏蔽后的电场强度; H_0 、 H_S 分别为屏蔽前、屏蔽后的磁场强度。

以 dB 为单位,屏蔽效能可用反射损耗、吸收损耗和多次反射因子三项之和表示,即为:

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \quad (3)$$

式中: SE_{dB} 为总的屏蔽效能; A_{dB} 为屏蔽层内部吸收损耗; R_{dB} 为反射损耗; C_{dB} 为多重反射修正因子。

假设阻挡层均为电良导体,对各项做近似优化处理,可得:

$$A_{dB} = 20 \lg e^{t/\delta} \quad (4)$$

$$R_{dB} = 20 \lg \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu \epsilon}} \right) \quad (5)$$

$$B_{dB} \approx 20 \lg |1 - e^{-2t/\delta} e^{-j2t/\delta}| \quad (6)$$

式中: t 为屏蔽层厚度; ω 为频率; μ 为相对电导率; σ 为相对磁导率; ϵ 为相对介电常数; δ 为在某个频点上的透入深度, $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ 。对于厚度远大于透入深度 $t \cdot \delta$ 的良导体构成的屏蔽层, B_{dB} 可忽略。

2 电磁干扰问题

由于在某小型机载光电平台的设计阶段,对其电磁兼容性设计考虑不周,所以,按照 GJB151B-2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》中的相关要求,对某小型机载光电平台进行相应的电磁兼容试验,发现设备的电磁兼容性不能满足要求。其中超标较严重的有 10 kHz~10 MHz 电源线传导发射 (CE102)、10 kHz~18 GHz 电场辐射发射 (RE102) 及电场辐射敏感度 (RS103) 等三个测试项目。

2.1 CE102

对某小型机载光电平台进行了 CE102 测试。发现在 0.5~8 MHz 区段传导发射值超标较严重,其最大值约为 78 dB μ V,与基准曲线相比,超标约 18 dB μ V,如图 1 所示。

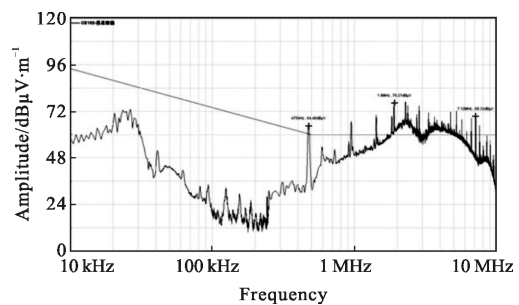


图 1 10 kHz~10 MHz 电源线传导发射扫描结果

Fig.1 Scanning result of power cord conducted emission in 10 kHz-10 MHz

2.2 RE102

对光电平台进行了 RE102 测试。选取超标最为严重的 30~200 MHz 范围内的垂直极化测试曲线进行分析。光电平台的辐射值约为 50 dB μ V/m, 与基准曲线相比, 超标约 22 dB μ V/m, 如图 2 所示。

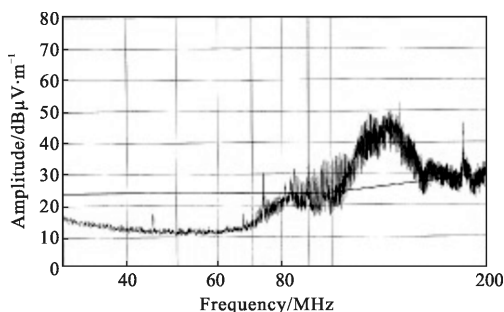


图 2 30~200 MHz 垂直极化扫描结果

Fig.2 Scanning result of vertical polarization test in 30~200 MHz

2.3 RS103

在对某光电侦察平台进行了 RS103 测试, 发现视频图像会逐渐出现黑色条纹, 甚至会布满整个视频窗口, 如图 3 所示。



图 3 视频图像截图

Fig.3 Video screenshot

由于光电侦察平台有众多不合格项目, 所以必须对其进行电磁兼容性的整改设计。文中着重从屏蔽的角度出发, 对其进行全面的屏蔽设计, 期望能有效改善上述电磁干扰问题。

3 屏蔽措施

理想的电磁屏蔽体应该是一个完整的、连续的导体, 所以能将电磁干扰隔离^[1]。而小型光电平台由于有玻璃窗口、转动轴系及非金属外壳的存在, 使其外表面不能构成完整的导体, 故产生较大的电磁泄漏空间。需对其进行合理的电磁屏蔽设计。

3.1 屏蔽材料的选择

小型机载光电平台的结构框架大多采用铝合金

铸造或机械加工而成; 内部构件根据其使用功能不同而采用不同的金属材料。电磁干扰是以电磁波的形式在空间进行传播的, 电磁波按不同频率可分为低频干扰和高频干扰。当电磁干扰源以低频段干扰源为主时, 需选择铁磁类的高磁导率材料进行屏蔽。铁磁类材料利用自身的高磁导率, 对干扰磁场进行分路, 从而达到屏蔽的作用。然而当磁场很强时, 高磁导率材料会在强磁场中饱和而失去屏蔽效果, 也就是电磁场的透入深度大于金属的厚度。表 1 列出了铜、铝、钢三种常用金属材料的电磁场频率与透入深度对应关系。

表 1 材料的电磁场频率与透入深度的关系
Tab.1 Relationship between electromagnetic frequency and penetration depth

Metal material	Frequency f /MHz	Penetration depth δ /mm
Copper	0.1	0.21
	1	0.067
	10	0.021
	100	0.006 7
Aluminium	0.1	0.275
	1	0.088
	10	0.027 5
Steel	100	0.008 8
	0.1	0.035
	1	0.023
	10	0.007
	100	0.002 3

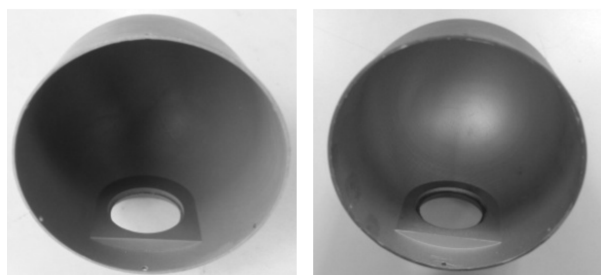
由于光电平台的电磁干扰主要是高频电场干扰, 所以基本上均采用铝合金材料作为基体材料或者电磁屏蔽材料。

3.2 ABS 外壳屏蔽

一般机载光电平台外壳都选择铝合金、镁铝合金等金属材质进行加工而成, 而小型机载光电平台为了满足小型化、轻量化的要求, 所以其支撑框架采用铝合金材料, 并且进行导电氧化处理; 而外壳选用重量更轻的 ABS 工程塑料, 如图 4(a)所示, 并且可通过注塑、3D 打印等方式进行随形、异形加工。然而, 使用非金属外壳相当于提供了一个巨大的电磁辐射空间, 使外部电磁干扰很容易辐射至设备内部, 势必会导致光电平台抗电磁干扰能力减弱。

要想增加光电平台的抗电磁干扰能力, 最简单有效的方法就是使其外部形成连续的导体, 能够

阻挡外部或内部的电磁辐射。由于电磁屏蔽涂料具有屏蔽效率高、耐环境性好、附着力强等优点,且可在形状复杂的表面上获得优良的电磁屏蔽效果。所以电磁屏蔽涂料能较好地解决上述问题,即将电磁屏蔽涂料涂布于 ABS 外壳的内表面,形成一层屏蔽涂层,如图 4(b)所示。利用其涂层对电磁波的反射和吸收,既可防止外界电磁波对光电平台内部电路、元器件等的干扰,还可防止光电平台内部信息向外界泄露,从而提高机载光电平台的电磁兼容性。几种典型电磁屏蔽涂料的性能见表 2。



(a) 无屏蔽措施 (a) No shielding
(b) 有屏蔽措施 (b) With shielding

图 4 ABS 外壳

Fig.4 ABS shell

表 2 电磁屏蔽涂料的性能

Tab.2 Performance of electromagnetic shielding paint

Stuffing	Surface resistivity Ω/sq	Recommended thickness $/\mu\text{m}$	Shielding efficiency $/\text{dB}$	Suitable substrate
Ag/Cu	≤ 0.06	20	40-80	ABS、PC、PPO thermoplastic plastics
Cu	≤ 0.3	40	20-60	
Ag	≤ 0.04	20	50-90	
Ni	≤ 0.4	50	20-60	

单纯从屏蔽效率来说,Ag 基涂料屏蔽效率最高。文中从成本及屏蔽效率综合考虑,采用 Ag/Cu 基体涂料为设备外壳的电磁屏蔽涂料。

3.3 缝隙处的屏蔽

当电磁波入射到光电平台时,将感应出电流,如图 5 所示。如果光电平台外壳与框架间不存在接缝,则感应电流在整个平台的外部表面上是连续的,这样的结构肯定会提供很好的屏蔽。但光电平台的结构特性决定了其外部表面必须是由多个外壳体组成,这样就会使外部表面形成了接缝,最终导致局部

的电不连续性,使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,可以大大提高光电平台的屏蔽效能。

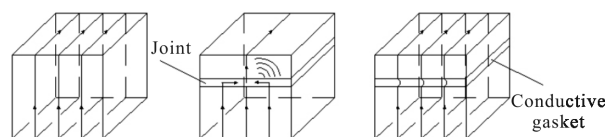


图 5 导电衬垫的屏蔽机理

Fig.5 Shielding mechanism of conductive gasket

导电衬垫是一种导电性高、弹性好的材料。它的作用是减少接缝或接合处的槽、孔或缝隙,所以将导电衬垫填充在金属材料间的缝隙处,能保持屏蔽体的导电连续性,使电磁干扰辐射得到有效隔离。导电衬垫有以下特点:

(1) 应有足够的弹性和厚度,以补偿由于接缝在压紧时所出现的不一致;

(2) 所用材料应耐腐蚀,并与屏蔽壳体材料的电化学性能相容;

(3) 转移阻抗尽可能低,转移阻抗越低,屏蔽效能越高;

弹性变形、环境密封性或寿命符合产品整体要求。

常用的导电衬垫有金属螺旋管、导电橡胶、金属丝网、指形簧片、导电布等。选用导电衬垫时,通常从屏蔽效能、弹性和形变恢复能力、有无环境密封性、安装结构要求、价格等几个方面考虑。对于机载光电平台,考虑到环境密封性及安装方式,选用导电橡胶作为填充壳体间缝隙的材料。

3.4 双层屏蔽

光电设备中的一些敏感部位,如视频处理模块、光电探测器及信号传输通道等,均要求屏蔽层具有较高的屏蔽效能。经常采用双层屏蔽的结构形式对其进行屏蔽。双层屏蔽中的中间夹层一般为空气,在两层屏蔽板的材料、厚度均相同的情况下,双层屏蔽的吸收损耗和反射损耗均为单层屏蔽的两倍,多次反射损耗取决于两层屏蔽层之间的距离。当两层屏蔽板的距离为零时,双层屏蔽等同于单层屏蔽,所以在两层屏蔽板间距很小时,为避免两层屏蔽板直接接触,屏蔽层间可通过添加绝缘材料、喷涂绝缘漆或绝缘氧化涂覆等方式将其隔开。所以经过处理后双层屏蔽的反射损耗肯定不小于单层屏蔽的反射损耗。所以为了提高小型机载光电平台的屏蔽效能,需

要对上述敏感部件采取双层屏蔽措施。

对光电探测器分别进行单层屏蔽和双层屏蔽,其屏蔽效能如图 6 所示。图 6 中实线所示为单层屏蔽腔体的内腔体中心处屏蔽效能的计算结果,虚线所示为双层屏蔽腔体的内腔体中心处屏蔽效能的计算结果。可见,在 0.1~4.5 GHz 中双层屏蔽腔体的屏蔽效能比单层的屏蔽效能整体上有很大提高;并且两者的曲线变化趋势基本一致。

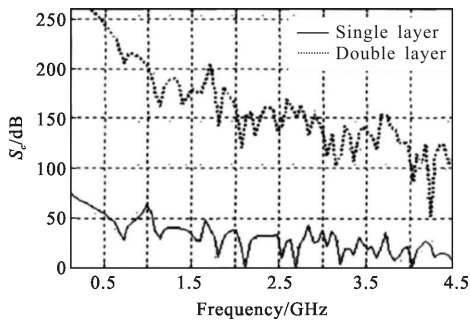


图 6 单层屏蔽与双层屏蔽的屏蔽效能对比

Fig.6 Shielding effectiveness comparison of single layer with double layer

4 试验验证

为了验证小型机载光电平台采取屏蔽措施后电磁兼容性改善效果,在标准 EMC 实验室里,依据 GJB151B-2013 对其进行了 CE102、RE102、RS103 等三项超标较为严重的电磁兼容试验。

4.1 CE102

对电源板采用金属屏蔽体设计,电源线进行了双层屏蔽处理,再进行测试,光电平台的传导发射值最高为 56 dB μ V,如图 7 所示,传导发射值降低了约 22 dB μ V 以上。其值低于标准中的门限值要求。

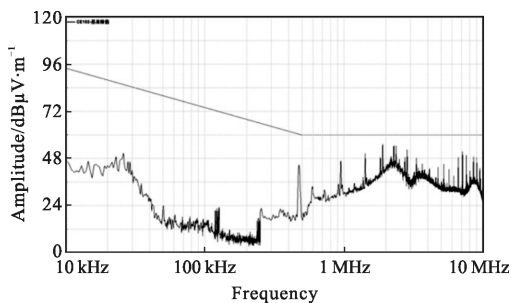


图 7 10 KHz~10 MHz 电源线传导发射扫描结果

Fig.7 Scanning result of power cord conducted emission in 10 kHz-10 MHz

4.2 RE102

对屏蔽后的光电平台进行了 30~200 MHz 垂直极化的电场辐射发射(RE102)测试,测试曲线如图 8 所示。其电场辐射发射值约为 40 dB μ V/m,其电场辐,降低约 10 dB μ V/m,并且超标区域也由 80~200 MHz 减小到 130~160 MHz。

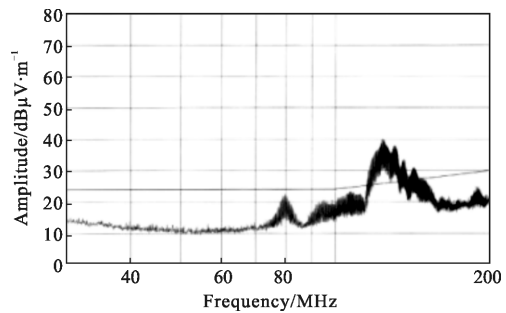


图 8 30~200 MHz 垂直极化扫描结果

Fig.8 Scanning result of vertical polarization test in 30-200 MHz

4.3 RS103

对屏蔽后的光电平台进行辐射敏感度实验,发现视频图像的黑色条纹消失,视频图像输出正常,如图 9 所示。所以经过一系列的屏蔽措施后,使光电平台外壳与支撑框架形成良好的连续导体,有效地隔离了外部电磁辐射与光电平台内部敏感部件的干扰,从而保证了光电平台视频图像的正常输出。

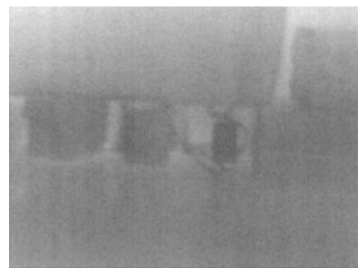


图 9 视频图像截图

Fig.9 Video screenshot

测试结果表明,对小型机载光电平台采取有效的屏蔽措施后,可提高其电磁兼容性。

5 结论

文中根据电磁屏蔽的相关理论,并结合试验结果,有针对性地对某小型机载光电平台进行了电磁屏蔽设计,并通过验证试验对设计的正确性进行了验证。试验结果表明,采用合理的屏蔽措施后,可使

小型机载光电平台的电磁兼容性得到有效改善。然而仅依靠屏蔽技术是无法完全满足设备电磁兼容性要求的。所以要想使小型机载光电平台满足复杂的电磁环境要求,就必须对其采取屏蔽、滤波、接地等多种措施,将电磁干扰控制到系统允许的范围内,为小型机载光电平台的可靠性工作提供保障。

参考文献:

- [1] Li Yonggang, Sun Lina, Zhang Bao, et al. Design of electromagnetic shielding for electro-optic reconnaissance platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2045–2049. (in Chinese)
李永刚, 孙丽娜, 张葆, 等. 光电侦察平台电磁屏蔽设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2045–2049.
- [2] Li Yonggang, Wang Ping, Li Zhiqiang. Design of electromagnetic compatibility for airborne electro-optical imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45 (6): 669–673. (in Chinese)
李永刚, 王平, 李志强. 机载光电成像系统电磁兼容性设计 [J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 669–673.
- [3] 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)
马鹏阁, 齐林, 羊毅, 等. 机载多脉冲激光雷达作用距离增强算法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2540–2545.
- [4] Ma Yunshuang, Wen Yinghong, Zhang Dan, et al. Research and experiment verification on the crosstalk characteristics of shielded cables in EMU [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1188–1193. (in Chinese)
马云双, 闻映红, 张丹, 等. 动车组屏蔽线缆间串扰特性及其试验验证研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1188–1193.
- [5] Zhao Huijie, Liu Xiaokang, Zhang Ying. CCD imaging electrical system of AOTF imaging spectrometer [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(5): 1991–1295. (in Chinese)
赵慧洁, 刘小康, 张颖. 声光可调谐滤波成像光谱仪的 CCD 成像电子学系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1991–1295.
- [6] Tang Yong, Gu Hongbin, Zhang Congzhe. High accurate optical head pose tracker system [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(2): 488–494. (in Chinese)
汤勇, 顾宏斌, 张丛喆. 高精度光学头部位置定位系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 488–494.
- [7] Liu Xiaohan, Zhao Jingli, Feng Xiaoguo, et al. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(1): 80–86. (in Chinese)
刘小涵, 赵晶丽, 冯晓国, 等. 高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 80–86.
- [8] Liu Tiegen, Wang shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681–1688. (in Chinese)
刘铁根, 王双, 江峻峰, 等. 航空航天光纤传感器技术研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681–1688.
- [9] Zhang Lanyong, Liu Fanming, Li Bing. Equivalent dipole modeling and predicting of electromagnetic emissions of printed circuit boards [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 942–947. (in Chinese)
张兰勇, 刘繁明, 李冰. 印制电路板电磁辐射等效偶极子建模与预测 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 942–947.
- [10] Wang Xengfa, Sun Lina, Sun Xuejun. Spectrum research of airborne opto-electronic reconnaissance platforms EMC environment [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2013, 36(1): 55–59. (in Chinese)
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, 36(1): 55–59.