

新型舰载机柜轻质门的电磁屏蔽设计与实验分析

李 健 晁 欢 杭佳棋

(常州大学机械工程学院,常州 213164)

摘 要 传统铸铝合金舰载机柜门质量较重,且电磁屏蔽效果不理想,为了解决这一问题,设计了一种电磁屏蔽效果较好的新型机柜轻质门。介绍了新型舰载机柜轻质门的电磁屏蔽要求和结构形式,详细论述了其电磁屏蔽效能的理论分析,并利用 Ansoft HFSS 仿真软件计算仿真,探究其电磁屏蔽效能;同时,对实物进行了测试并分析测试结果。结果表明:所设计的新型机柜轻质门的屏蔽效能达到了设计目标,可以为电子设备的正常运行提供更好的保护。Ansoft HFSS 仿真软件计算结果与实验验证结果较为接近,在设计阶段具有可行性。

关键词 舰载机柜,轻质门,Ansoft HFSS,电磁屏蔽仿真

The electromagnetic shielding design and analysis for new ship-based cabinet door

Li Jian Chao Huan Hang Jiaqi

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164)

Abstract The traditional cast aluminum alloy ship-based cabinet door have heavy quality, and the electromagnetic shielding effectiveness is not ideal. In order to solve this problem, a new type of ship-based cabinet light weight door with better electromagnetic shielding effect was designed. The request and structure of electromagnetic shielding for a ship-based cabinet light weight door was introduced. The theoretical analysis simulation computation of electromagnetic shielding efficiency was presented in detail, and simulation software of Ansoft HFSS was used for thermal simulation analysis to study the electromagnetic shielding effectiveness. The object was tested and the test result was analyzed. The results showed that, the designed door can meet the electromagnetic shielding efficiency, and can provide better protection for the normal operation of electronic equipment. The calculation results of electromagnetic shielding simulation software of Ansoft HFSS can be consistent with the experimental results, and it was feasible in the design stage.

Key words ship-based cabinet, light weight door, Ansoft HFSS, electromagnetic shielding simulation

迅速发展的电子技术促使各种电子设备运用到国防及民生中,尤其在国防上,电子设备对武器装备自动化、智能化和信息化的影响越来越显著^[1-3]。舰载机柜作为电子设备的载体,其电磁兼容性设计是实现系统可靠运行的重要环节。随着电子设备的逐渐增多,需要更加紧密的结构,狭小空间里的电磁干扰将会影响系统的正常运行,因此电磁兼容性是舰载机柜设计必须考虑的问题。提高电子电器产品抗电磁波辐射和电磁波干扰能力的方法很多,除了通过设计正确的电路和合理布局电子元件的方式来提

高抗电磁波辐射和干扰的能力外,采用电磁屏蔽涂料对其实施屏蔽是较为行之有效的途径^[4-5]。

3D 机织复合材料是一种先进的结构复合材料,不仅整体受力性能优异,而且具有防湿热、抗盐雾的优点。利用高性能纤维(如碳纤维,凯夫拉纤维等)制成的 3D 机织复合材料,质量仅为钢材的 15%~20%(wt,质量分数,下同),而力学性能比高强度钢更为优异^[6]。电磁波屏蔽涂料因其具有成本低、工艺简便、应用方便灵活和适应性强的特点,已成为电磁屏蔽材料领域研究和应用的热点^[7-8]。传统的环

基金项目:江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2014037-24)

作者简介:李健(1963-),硕士,副教授,主要研究方向为特种装备技术。

树脂纤维导电性能较差,而采用化学镀法可增强其导电性。因此,化学镀已成为新型电磁屏蔽复合填料的常用制备技术之一^[9-10]。本研究采用化学镀 Cu-Ni-P 合金处理的 3D 机织复合材料去设计舰载机柜轻质门,不仅环境适应性好,而且可以为内部电子设备的正常运行提供良好的屏蔽条件和保障,应用前景广阔。

1 屏蔽效能理论分析

入射电磁波遇到电磁屏蔽材料后,与电磁屏蔽材料发生作用,并被电磁屏蔽材料反射回去或者被电磁屏蔽材料所吸收,从而使得它的功率越来越小^[11-12]。电磁屏蔽材料对电磁场的屏蔽效能(SE dBV/m)主要包括材料表面阻抗突变引起的反射损耗(R)、内部传输的能量损耗(A)和内部反射损耗(B)。机柜门屏蔽性能可以用屏蔽效能来衡量,见式(1):

$$SE = R + A + B \quad (1)$$

其中 R、A 和 B 可由式(2)~式(4)计算:

$$R = 50 - 10/\lg(\rho \times f) \quad (2)$$

$$A = 1.7d(f \times \rho)^{1/2} \quad (3)$$

$$B = 20\lg(1 - e^{-2\pi/\sigma}) = 20\lg(1 - 10^{-0.1A}) \quad (4)$$

式中, f 为电磁波的频率, Hz; d 为涂层的厚度, m; ρ 为体积电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

当 SE 大于 10 时, B 可忽略,此时 SE 可由式(5)计算。

$$SE = 50 - 10 \times \lg(\rho \times f) + 1.7d(f/\rho)^{1/2} \quad (5)$$

由式(5)可知:电磁波的频率(f)与涂层的厚度(d)一定时,体积电阻率(ρ)越小,屏蔽效能越大。

电磁屏蔽材料的电磁屏蔽效果不仅受到电磁波频率、相对导磁率和相对电导率等因素的影响,还会受到屏蔽材料致密性、膜层厚度以及测试方法等诸多因素的影响。由于铝在空气中容易氧化形成不导电的氧化膜,为了保证接触表面能够导电,所以轻质门与柜体的接触表面必须进行导电涂覆处理并且安装导电橡胶条密封条。机柜缝隙、孔洞和电缆导致的泄露严重影响了机柜的屏蔽效果。

假设机柜轻质门是理想的屏蔽体,根据文献[13-15]可以分别估算出在 30、100、500MHz 和 1GHz 时的屏蔽效能分别约为 80.26、75.69、69.68dBV/m 和 66.73dBV/m。由计算值可以看出,屏蔽效果已经比较满意。

2 机柜轻质门结构及电磁屏蔽要求

舰载机柜主要由轻质门和柜体组成,轻质门由

3D 机织复合材料和铝合金框架复合而成,柜体由铝合金整体铸造而成,柜体顶部安装转接板,见图 1。

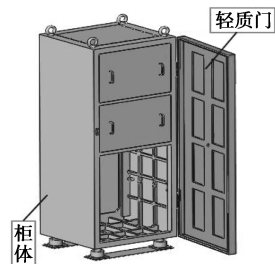


图 1 机柜示意图

根据《军用电子装备通用机箱机柜屏蔽效能要求和测试方法》的使用要求,该舰载机柜按 2 级屏蔽效能进行设计。电磁波频率在 10kHz~30MHz 范围内时,屏蔽效能最低要求为 10dBV/m;电磁波频率在 30~230MHz 范围内时,屏蔽效能最低要求为 40dBV/m;电磁波频率在 230~1000MHz 范围内时,屏蔽效能最低要求为 30dBV/m。

轻质门通过铰链和多点门锁与柜体连接,顶部转接板通过螺钉直接安装在柜体上方。机柜轻质门、顶部转接板与柜体接触表面进行了导电涂覆处理并且安装了 D 型导电橡胶密封条。

机柜轻质门(前门)由高性能铝合金与 3D 机织材料手糊成型,见图 2 和图 3。此机柜轻质门具有良好的抗弯抗扭刚度、抗振和抗冲击特性。更重要的是,3D 织物经过化学镀 Cu-Ni-P 合金预处理,大幅度提高了电磁兼容性。

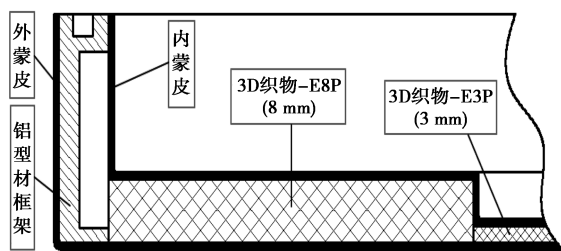


图 2 轻质门截面图

(3D 织物-E8P 为总厚度 8mm 的 3D 织物;
3D 织物-E3P 为总厚度 3mm 的 3D 织物。)



图 3 机柜轻质门实物图

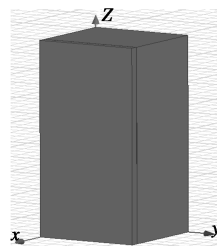


图 4 机柜模型图

3 运用 Ansoft HFSS 软件建模分析

3.1 建模

设置解决方案类型为终端驱动(Driven Terminal),建模单位设置为 mm,见图 4。设计尺寸为:机柜外形 610mm×600mm×1500mm,壁厚 8mm。

定义机柜轻质门与柜体之间的缝隙为普通缝隙,辐射天线定义在机柜的中心位置。柜体材料为铝(电导率 0.61,相对磁导率为 1),轻质门屏蔽复合材料(电导率 0.92,相对磁导率为 1),衬垫材料选用 D 型导电橡胶条。

软件提供了 2 种不同的求解类型,包括激励求解和本征模求解,激励求解又因 S 参数的不同而分为激励求解和激励终端求解。考虑球型偶极子测试的可比性,选择激励终端求解模式,频率分析到 1GHz。

3.2 仿真计算

分别考察机柜垂直极化和水平极化时的屏蔽效能,结果见图 5。由图可知,机柜垂直极化和水平极化时的屏蔽效能相差无几。

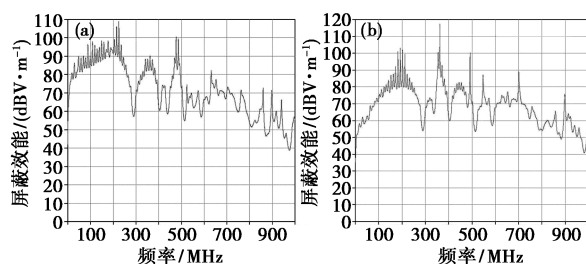


图 5 机柜垂直极化(a)和水平极化(b)时屏蔽效能的变化趋势图

考察导电橡胶性能变差时,机柜轻质门的屏蔽效能变化情况,结果见图 6。由图可知,当机柜轻质门屏蔽条性能变差时,由于其电导率等电磁参数变差,表面接触阻抗增加,机柜在垂直极化时各个方向的屏蔽效能都有较大程度的下降。

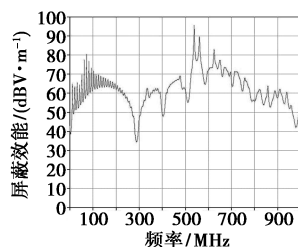


图 6 导电橡胶性能变差时机柜的屏蔽效能变化趋势图

在机柜与轻质门之间的缝隙为空气,即不填充导电橡胶密封条时,考察机柜的屏蔽效能变化

情况,结果见图 7。由图可知,机柜的泄露程度会增大,当电磁波频率足够大时,甚至会出现负的屏蔽效能。

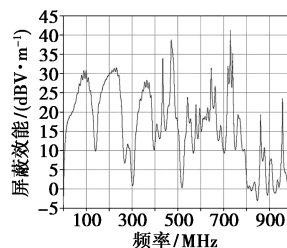


图 7 无导电橡胶时机柜屏蔽效能

4 实验分析

按照《军用电子装备通用机箱机柜屏蔽效能要求和测试方法》中的要求,机柜的电磁屏蔽性能测量应采用如下方法:首先将发射源天线在实验指定的频率范围内进行测量并且校准,然后将发射源天线放置在机柜内部指定位置,使用相同的设备在指定频率范围内再次测量,最后将同一频率时的读数进行对比,即可得到此频率下的屏蔽效能。

测试频段分为低频段(10~111kHz)和中频段(30MHz~1GHz),在低频段测试磁场屏蔽效能,在中频段测试平面电磁波的屏蔽效能。

4.1 低频段(10~111kHz)的屏蔽效能测试

发射天线和接收天线均采用环天线,并且信号源和发射环天线、接收机和接收环天线之间应采用屏蔽双绞线连接,通过沿整个圆周固定在机柜上的射频连接器引出。接收环天线和发射环天线应位于同一平面内(共面),两天线的环心连接线应垂直于测试点所在壁面。接收环天线与机柜内壁相距 70mm,发射环天线与外壁相距 60mm。

10~111kHz 频率范围内机柜的测试布置见图 8,重点测试缝隙处的磁场泄漏。

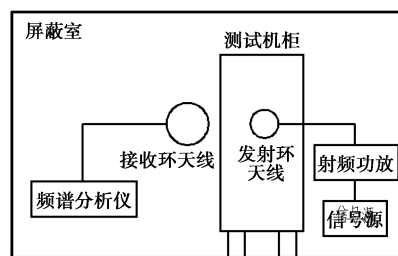


图 8 泄漏磁场测试布置图

4.2 中频段(30MHz~1GHz)的屏蔽效能测试

发射天线采用球形偶极子天线,接收天线采用双锥天线(30~200MHz)和对数周期天线(200MHz~

1GHz),接收天线距离机柜壁面 1m。在水平和垂直两种极化方式下进行测试。

30MHz~1GHz 频率内机柜的电磁屏蔽效能测试布置见图 9。

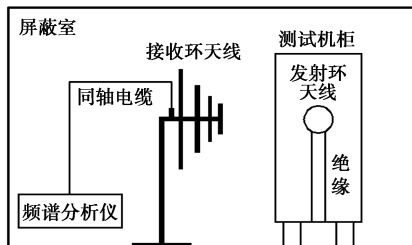


图 9 机柜电磁屏蔽测试布置图

机柜在 10~111kHz 频段的磁场屏蔽效能测试结果见图 10,机柜在 30MHz~1GHz 频段的电磁屏蔽效能测试结果见图 11。

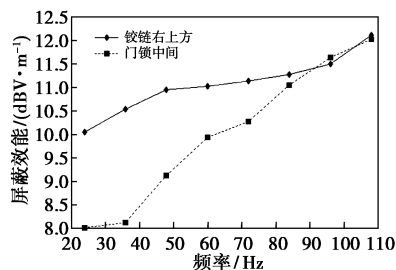


图 10 前门磁场屏蔽效能测试结果图

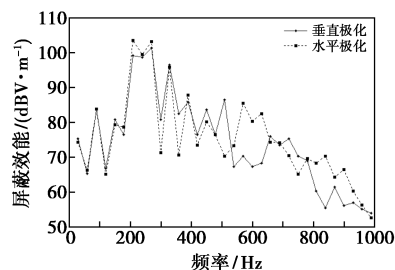


图 11 前门电磁屏蔽效能测试结果图

综上,在低频波段磁场屏蔽效能测试结果在 8~13dBV/m 范围内,基本与仿真数据基本吻合,但是在高频段仿真与实验的误差较大。

5 结论

(1)对比分析仿真数据与实验数据,在测量频率范围内新型机柜轻质门的屏蔽效能测试结果普遍低于仿真计算值,但基本优于 2 级屏蔽效能机柜的要求,可以为电子设备的正常运行提供更好的保护。

(2)新型机柜轻质门的屏蔽效能更加容易实现,只需采用常规的屏蔽和紧固条件就可以达到设计的要求。

(3)导电橡胶密封条的质量对机柜屏蔽效能的影响很大,导电橡胶密封条性能变差时,机柜轻质门的屏蔽效能出现很大程度的下降。

参考文献

- [1] 谢希权,雷讯,胡蒙.航空武器装备信息化建设要素总体研究[J].航空电子技术,2004,35(4):1-4.
- [2] Wu Y L,Chen M Y,Yang K S,et al.Novel condensate-free refrigerated cold plate for electronic cooling[J].HVAC&R Research,2010,16(1):3-14.
- [3] 卢锡铭,吴亮.电子设备热仿真及优化技术研究[J].工业控制计算机,2013,26(4):125-127.
- [4] 管登高,黄婉霞,陈家钊,等.镍基电磁波屏蔽复合涂层的研制及其在 EMC 中的工程应用[J].电讯技术,2000(6):13-18.
- [5] 管登高,孙传敏,孙遥,等.镀 Ni-Cu 硅酸钙镁晶须/环氧树脂电磁屏蔽涂料研究[J].化工新型材料,2011,39(6):40-52.
- [6] 祝成炎.3D 立体机织物及其复合材料[J].丝绸,2005,1(8):44-47.
- [7] Hiroo Takushima, Katsuhei Matsuei, Yukio Nishimura, et al.High efficiency infrared radiant using transitional element oxide[J].Journal of Japanese Ceramic Society,1982,90(7):373.
- [8] Akazawa T,Matsubara H,Takahashi J,et al.Sintering and infrared radiation property of Mn-substituted cordierite solid solution[J].J Ceram Soc Jap,1993,101(9):991-995.
- [9] 杨礼林,宣天鹏,杨广舟.电磁屏蔽涂镀层的研究现状及进展[J].稀有金属快报,2005,24(8):8-13.
- [10] Chung D D L.Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J].Carbon,2001,39(7):279-285.
- [11] Cao M S,Wang X X,Cao W Q,et al.Ultrathin grapheme: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding[J].Journal of Materials Chemistry C,2015,3:6589-6599.
- [12] 李慧剑,刘泽良,余为,等.泡沫铝/环氧树脂复合材料电磁屏蔽及力学性能实验[J].材料导报,2015,29(7):150-154.
- [13] 管登高,孙传敏,孙遥,等.片状镀银铜粉/丙烯酸树脂电磁屏蔽复合涂层的研制[J].电镀与涂饰,2011,30(5):63-65.
- [14] 沈菊军,史建东.导电衬垫材料的屏蔽效能研究[J].电子机械工程,2006,22(5):10-12.
- [15] 沈文军.舰载铸铝密闭机柜的电磁兼容设计[J].现代雷达,2002(3):1-2.

收稿日期:2017-07-26