

引用格式: 阎芳, 刘旭红, 王鹏, 等. 高强辐射场下不同孔阵的金属腔体屏蔽效能研究[J]. 电光与控制, 2019, 26(8): 90-94, 100. YAN F, LIU X H, WANG P, et al. Shielding effectiveness of metallic cavities with different aperture arrays in high intensity radiated field[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8): 90-94, 100.

高强辐射场下不同孔阵的金属腔体屏蔽效能研究

阎芳^{1,2,3}, 刘旭红^{1,3}, 王鹏^{1,2,3}, 马振洋^{1,2,3}, 史春蕾^{1,2,3}, 于新海^{1,2,3}, 赵聪^{1,3}

(1. 中国民航大学民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300; 2. 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300; 3. 中国民航大学适航学院, 天津 300300)

摘要: 提高屏蔽腔体的屏蔽效能可增强民用航空机载电子系统的高强辐射场(HIRF)防护能力。基于Robinson模型, 提出一种可计算带有非中心孔阵金属屏蔽腔体屏蔽效能的修正模型。选用民航机载通信设备作为研究对象, 运用修正模型计算其屏蔽效能, 与三维电磁仿真软件的结果对比验证了所提模型的正确性。此外, 通过软件仿真分析了HIRF作用下不同孔阵、频率、位置对设备内部电场分布的影响。仿真结果可为民航机载电子设备的屏蔽壳体设计以及内部敏感器件布局提供参考。

关键词: 高强辐射场; Robinson模型; 民航机载电子设备; 屏蔽效能

中图分类号: V243.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.017

Shielding Effectiveness of Metallic Cavities with Different Aperture Arrays in High Intensity Radiated Field

YAN Fang^{1,2,3}, LIU Xu-hong^{1,3}, WANG Peng^{1,2,3}, MA Zhen-yang^{1,2,3},
SHI Chun-lei^{1,2,3}, YU Xin-hai^{1,2,3}, ZHAO Cong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Civil Aircraft Airworthiness and Repair Key Laboratory of Tianjin, Tianjin 300300, China;
3. School of Airworthiness, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Improving shielding effectiveness of the shield cavity can enhance the protection capability of High Intensity Radiated Field (HIRF) of the airborne electronic system in civil aviation. Based on Robinson's model, a modified model is proposed to calculate the shielding effectiveness of a metallic shield cavity with non-central aperture array. The airborne communication equipment in civil aviation is taken as the research object. The modified model is utilized to compute the shielding effectiveness of the airborne communication equipment in civil aviation, and the correctness of the model is verified by comparing with the results of the 3D electromagnetic simulation software. Moreover, the impact of different aperture arrays, frequencies and positions on the internal electric field distribution of the equipment is analyzed by software simulation. The simulation result can serve as a reference for the design of a shield cavity and the layout of internal sensitive devices for airborne electronic equipment in civil aviation.

Key words: high-intensity radiated field; Robinson's model; airborne electronic equipment in civil aviation; shielding effectiveness

0 引言

随着科学技术的发展、电磁环境的日益复杂以及

机载电子系统的高度集成化、模块化^[1-2], 机载电子设备高强辐射场(High-Intensity Radiated Field, HIRF)防护受到很大关注。HIRF是由地面、舰船、海上平台以及航空器上的雷达、无线电、卫星上传数据等高功率发射器的辐射产生的, 其环境覆盖的频率范围很广, 从10 kHz~40 GHz, 电磁场强度最高可达几千伏每米, 航空器电子/电气系统极易受到HIRF环境的干扰, 严重时甚至会造成永久性损坏, 影响飞机的安全飞行^[3]。

收稿日期: 2018-08-03

修回日期: 2019-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(61601468); 中央高校基本科研业务费专项资金(3122017044)

作者简介: 阎芳(1982—), 女, 山东烟台人, 硕士, 副研究员, 硕导, 研究方向为机载电子软件适航技术。

采用屏蔽技术是提高机载电子设备对 HIRF 防护的主要手段之一。但在实际应用中,由于散热、通风等需求,在金属屏蔽腔体上不可避免地存在一些孔缝,导致金属屏蔽腔体的屏蔽效能降低^[4]。因此,为了增强机载电子设备 HIRF 防护能力,提高金属屏蔽腔体屏蔽效能是技术途径之一。

目前国内对带孔金属屏蔽腔体屏蔽效能的研究较多。文献[5-6]主要通过改变平面波仰角、极化方向、方位角等开展单一孔缝下屏蔽腔体的屏蔽效能仿真分析;文献[7]主要针对装有 PCB 板的单一矩形孔缝进行屏蔽效能研究;文献[8]主要以计算机机箱为研究对象,采用传输线法研究不同辐射源和不同结构的屏蔽腔体的屏蔽效能;文献[9]采用扩展的传输线理论计算分析单一孔缝下凸面结构对电场屏蔽效能的影响。这些研究工作是基于 Robinson 模型对单一孔缝的金属屏蔽腔体开展的,而专门针对机载电子设备以及带孔阵非理想金属屏蔽腔体进行的研究较少。

本文基于 Robinson 模型提出一种修正模型,通过对比修正模型计算结果和三维电磁仿真软件得到的屏蔽效能结果,验证了本文模型的准确性。此外,本文也采用仿真分析研究了 HIRF 作用下不同孔阵、频率、位置对屏蔽腔体内部电场分布的影响。

1 机载通信设备

机载通信设备主要用于飞机与地面、飞机与飞机之间的相互通信,容易受到 HIRF 的干扰^[10],因此选用机载通信设备的屏蔽体作为研究对象,长度 $a = 350 \text{ mm}$,宽度 $d = 190 \text{ mm}$,高度 $b = 180 \text{ mm}$,屏蔽体厚度 $t = 5 \text{ mm}$ 。

通过分析机载通信设备可知其存有非中心的、不同形状的通风孔阵,该孔阵是 HIRF 耦合的主要途径^[11]。但是由于 Robinson 模型是针对单一的中心孔缝进行计算研究,因此将 Robinson 进行扩展,研究复杂孔阵下屏蔽体的屏蔽效能。

2 Robinson 模型与扩展

2.1 Robinson 模型

根据 ROBINSON 等^[12-13]建立的传输线理论模型 (Robinson 模型),得到矩形腔体和其对应的等效电路分别如图 1 和图 2 所示。矩形腔体的尺寸为 $a \times b \times d$,厚度为 t ,中心孔缝的尺寸为 $l \times w$ 。入射波为垂直入射、垂直极化的平面波,由电压源 V_0 和阻抗 $Z_0 = 377 \text{ } \Omega$ 等效^[14-17], E 为腔体内屏蔽效能观测点,其距离孔缝所在平面的距离为 p 。箭头 E 代表电场,箭头 H 代表磁场。

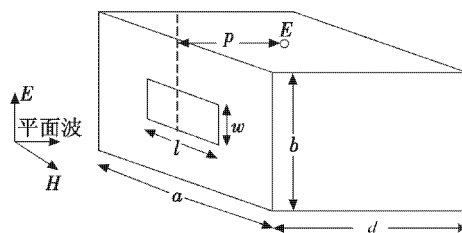


图 1 单一孔缝的屏蔽腔体

Fig. 1 The shielding cavity with a single aperture

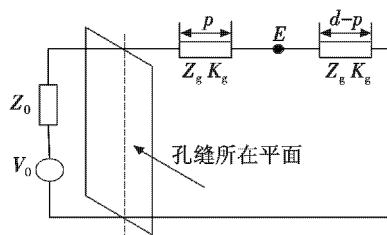


图 2 等效电路模型

Fig. 2 The equivalent circuit model

图 2 中, Z_g 与 K_g 分别为屏蔽体的阻抗和传播系数。

根据等效电路法得到理想型的 PEC 金属材质孔缝的等效阻抗^[18-19]

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{os} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (1)$$

式中:共面传输线 $Z_{os} = 120 \pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1}$,

有效宽度 $w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right)$;入射波的传播系数

$k_0 = 2\pi/\lambda$ 。

2.2 修正的 Robinson 模型

2.2.1 矩形孔阵的屏蔽效能

Robinson 模型是针对理想型的 PEC 金属材质进行分析的,而对于非理想金属屏蔽体的分析需引入屏蔽体的阻抗,表达式为

$$Z = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (2)$$

式中: μ, σ 分别代表磁导率和电导率; f 为频率。此时 Robinson 模型修正后的等效电路如图 3 所示。

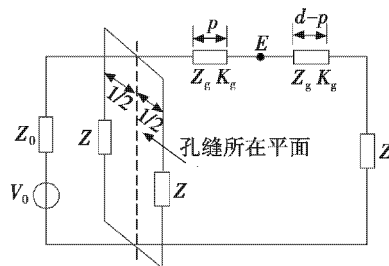


图 3 修正后的等效电路模型

Fig. 3 The modified equivalent circuit model

对具有非中心孔阵的屏蔽腔体求解电场屏蔽效能,需引入偏心系数 C_m [20],算式为

$$C_m = \frac{\int_{x_0}^{x_0+l} \int_{y_0}^{y_0+w} \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n(y-y_0)\pi}{w}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m(x-x_0)\pi}{l}\right) dx dy}{XY} \quad (3)$$

式中: (X, Y) 为孔缝中心点 O 的坐标; (x_0, y_0) 为孔缝左下角起始坐标,如图4所示。图中,横坐标为屏蔽体的长,纵坐标为屏蔽体的高。

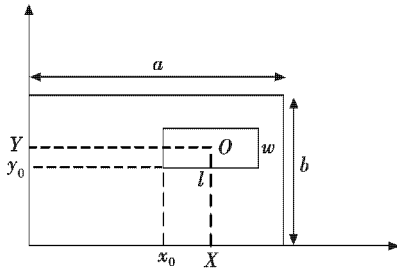


图4 任意位置开单孔几何模型

Fig.4 The geometric model of opening an aperture at any position

得到任意位置处孔缝的等效阻抗为

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} C_m Z_{os} \frac{Z + jZ_{os} \tan \frac{k_0 l}{2}}{Z_{os} + jZ \tan \frac{k_0 l}{2}} \quad (4)$$

各孔缝由于位置引起的差别由偏心系数体现,因此孔缝阵列的阻抗为

$$Z_{apn} = \sum Z_{ap} \quad (5)$$

由 Z_0, Z_{apn}, V_0 形成戴维南等效电路以后的等效电压、等效阻抗为

$$\begin{cases} V_1 = \frac{V_0 Z_{apn}}{Z_0 + Z_{apn}} \\ Z_1 = \frac{Z_0 Z_{apn}}{Z_0 + Z_{apn}} \end{cases} \quad (6)$$

观测点 E 的输入电压和阻抗分别为

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos K_{mng} p + j(Z_1/Z_{mng}) \sin K_{mng} p} \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_{mng} \tan K_{mng} p}{1 + j(Z_1/Z_{mng}) \tan K_{mng} p} \quad (8)$$

式中:带有多个孔缝屏蔽体的阻抗 $Z_{mng} = Z_0 / (1 - (m\lambda/2a)^2 - (n\lambda/2b)^2)^{1/2}$,带有多个孔缝屏蔽体的传播系数 $K_{mng} = k_0 (1 - (m\lambda/2a)^2 - (n\lambda/2b)^2)^{1/2}$ 。

观测点 E 处的电压为

$$V_{mne} = V_2 Z_3 / (Z_2 + Z_3) \quad (9)$$

式中,观测点 E 处的阻抗 $Z_3 = Z_{mng} \frac{Z + jZ_{mng} \tan K_{mng} (d-p)}{Z_{mng} + jZ \tan K_{mng} (d-p)}$ 。

将不同模式下 E 处的电压结果线性迭加,从而求出 E 处的总电压为

$$V_{E, total} = \sum V_{mne} \quad (10)$$

无屏蔽壳时,点 E 处总电压 $V'_E = \frac{V_0}{2}$,因此电场屏蔽效能为

$$E_{SE} = 20 \lg \left| \frac{V'_E}{V_{E, total}} \right| = 20 \lg \left| \frac{V_0}{2V_{E, total}} \right| \quad (11)$$

2.2.2 圆形孔阵的屏蔽效能

机载通信设备的通风孔阵除了矩形孔阵之外还有圆形孔阵,此时将算式再次修正。圆形孔缝的半径与相同面积方孔缝边长之间的关系为

$$l = w = \sqrt{\pi} r \quad (12)$$

式中: r 为圆形孔缝的半径; l 与 w 为正方形孔的边长。

将式(12)代入式(3)得到圆形孔缝下的偏心系数为

$$C_m = \frac{\int_{x_0+\sqrt{\pi}r}^{x_0+\sqrt{\pi}r} \int_{y_0+\sqrt{\pi}r}^{y_0+\sqrt{\pi}r} \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n(y-y_0)\sqrt{\pi}}{r}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m(x-x_0)\sqrt{\pi}}{r}\right) dx dy}{XY} \quad (13)$$

圆形孔缝的等效阻抗为

$$Z_{apr} = \frac{1}{2} C_m Z_{os} \frac{Z + jZ_{os} \tan \frac{\sqrt{\pi} k_0 r}{2}}{Z_{os} + jZ \tan \frac{\sqrt{\pi} k_0 r}{2}} \quad (14)$$

式中: $Z_{os} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1}$, $w_e = \sqrt{\pi} r -$

$\frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi^{3/2} r}{t} \right)$ 。将 Z_{apr} 代入式(5)替换 Z_{ap} ,得到圆形孔阵下的阻抗,然后通过式(6)~式(11)得到圆形孔阵下屏蔽腔体的屏蔽效能。

3 机载通信设备屏蔽效能分析

3.1 修正模型的验证

利用电磁仿真软件 CST,参考机载通信设备结构建立理想仿真模型如图5所示。金属腔体参照实际机载通信设备屏蔽腔体的大小进行设置。在屏蔽腔体的一侧开有矩形孔缝阵列模拟通风口,单个矩形孔的尺寸为 $25 \text{ mm} \times 101.5 \text{ mm}$,孔缝的间距为 0.5 mm 。

在图5a模型的基础上,保持单个孔的面积不变,将矩形孔修改为圆形孔,如图5b所示,屏蔽体的长宽

高分别为 350 mm,190 mm 和 180 mm,单个圆形孔直径为 56.84 mm,圆孔的间距为 0.5 mm。

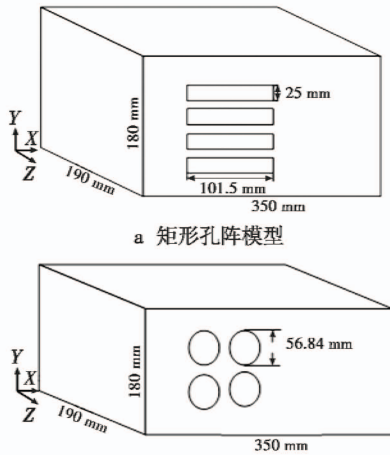


图 5 理想仿真模型

Fig. 5 The ideal simulation model

设置平面波源模拟 HIRF 的作用,从两个模型的孔阵正前方沿 Z 方向朝金属腔体进行照射,平面波源为垂直极化方式,频率范围为 0 ~ 2 GHz。图 6 为矩形孔阵与圆形孔阵下等效电路计算结果与仿真结果对比图,结果表明低频时计算结果与仿真结果基本吻合,但在高频时两结果之间存在一定的差异。

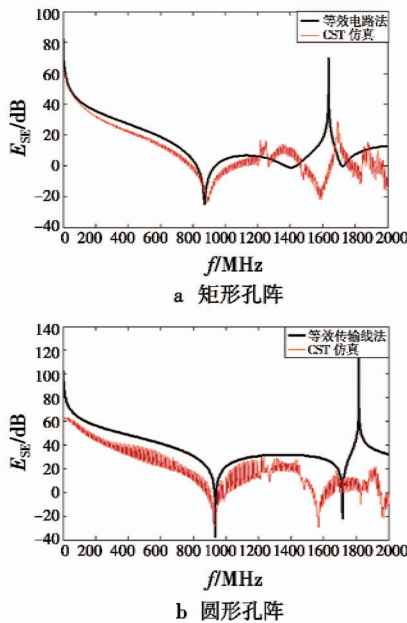


图 6 屏蔽效能验证

Fig. 6 Verification of shielding effectiveness

3.2 不同孔阵下电场强度分布

由 Robinson 模型可知,孔缝的形状、频率和观测位置会影响屏蔽腔体内电场强度分布。针对带有相同面

积不同孔缝的屏蔽腔体开展仿真,带有矩形孔和圆形孔的仿真模型分别采用 3.1 节建立的模型。将矩形孔改为正方形孔,屏蔽体的长宽高分别为 350 mm,190 mm 和 180 mm,单个正方形孔的尺寸为 50.37 mm × 50.37 mm,模型的其他参数与 3.1 节相同,如图 7 所示。

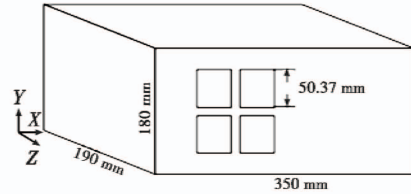


图 7 正方形孔阵模型

Fig. 7 The cavity with square aperture arrays

仿真的频率范围为 10 kHz ~ 12 GHz,屏蔽腔体中心点电场强度如图 8 所示,正方形孔条件下的电场强度小于矩形孔条件下的电场强度,而圆形孔条件下的电场强度最小。

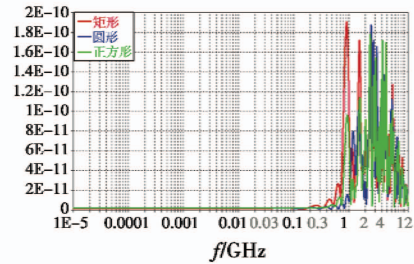


图 8 不同孔阵下屏蔽腔体中心点电场强度

Fig. 8 Electric field intensity at the center of the shielding cavity under different aperture arrays

3.3 不同频率下电场强度分布

利用 CST 仿真分析不同频率下机载设备在 Z = 0 cm 平面上的场强分布。频率分别为 3 MHz,30 MHz,3 GHz,6 GHz 和 12 GHz,仿真结果如图 9 所示。结果表明:低频时,电场场强随着频率的增大而降低;高频时,随着频率增大,耦合进屏蔽腔体的场强增大,也相对复杂。在 6 GHz 时,设备内的电场场强达到最大,主要是由于在该频率出现谐振。

3.4 不同测试位置下电场强度分布

通过观察图 9 的三维仿真图分析电场强度随 X 轴和 Y 轴的变化情况,结果表明,中心位置处的电场强度高于其他位置处的电场强度。离屏蔽体较近点的电场强度也相对较高,主要是由于平面波对屏蔽体进行辐照时在其尖端处产生了电流发生放电现象,导致电场强度变大。因此,在腔体内放置敏感器件时要尽量远离中心位置和腔体的边缘处,减少干扰,保证设备的正常工作。

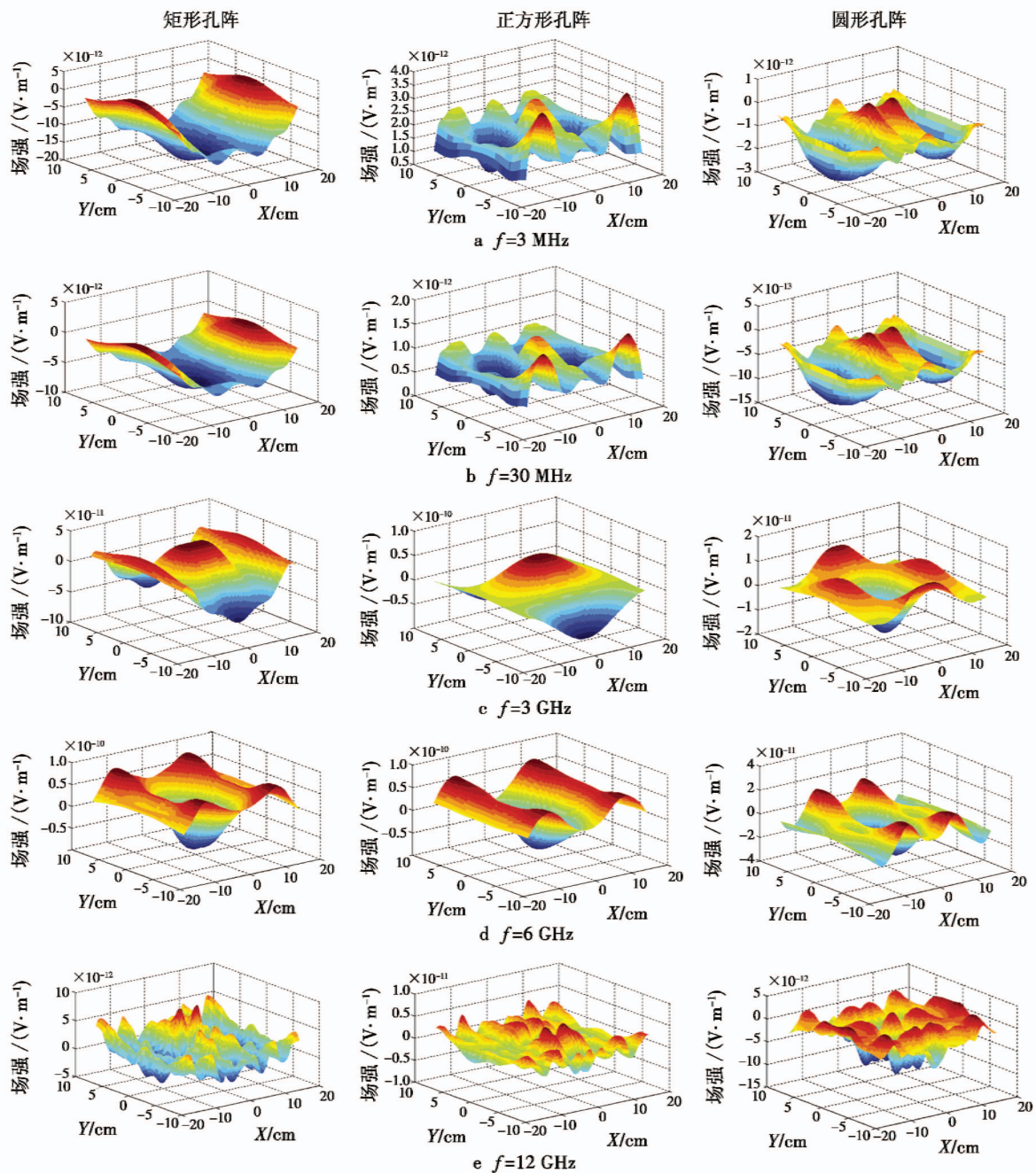


图9 不同频率下,机载通信设备在 $Z=0$ cm平面的场强分布

Fig.9 Electric field intensity distribution in Plane $Z=0$ cm under different frequencies

4 结论

本文对 Robinson 模型进行修正,以计算带有非中心孔阵的非理想金属腔体屏蔽效能。利用电磁仿真软件 CST 的结果对模型进行验证,结果表明在 1 GHz 以内修正模型准确有效。利用 CST 仿真软件分析不同形状孔阵在不同频率时内部不同位置对电台收发机内部电场强度的影响,结果表明,在设计屏蔽壳的通风孔以及散热孔阵时选择圆形孔阵可以提高屏蔽体的屏蔽效能、增强 HIRF 防护能力、提高飞机的可靠性。对于机

载电子设备内重要敏感元器件的布局要远离屏蔽体以及中心位置,减小 HIRF 对元器件的损伤。

参考文献

- [1] 唐建华. 飞机研制的新要求——谈高强度辐射场(HIRF)防护[J]. 国际航空, 2007(11): 65-66.
- [2] 章光灿. 民用飞机高强度辐射场(HIRF)防护适航验证方法研究[J]. 科技视界, 2016(6): 97-98.
- [3] 贾宝惠, 刘东山. 飞机高强度辐射场(HIRF)防护分析[J]. 航空制造技术, 2011(8): 86-89.

(下转第 100 页)

参 考 文 献

- [1] 杨凤闹,徐开,李峰. 基于能耗约束的控制力矩陀螺可重构性分析[J]. 电光与控制,2017,24(3):77-80.
- [2] 徐春雷,韩长远. 基于锁相环和双模速度双重控制的永磁无刷直流电机的研究[J]. 电气传动自动化,2016,38(1):21-24.
- [3] 武俊峰,吴一辉,安静,等. 姿控飞轮变结构变速积分控制的实现[J]. 光学精密工程,2010,18(1):149-155.
- [4] 王灿,刘刚,王志强. 一种永磁无刷直流电机自抗扰-锁相环双模控制方法[J]. 微电机,2010,43(1):33-37.
- [5] 张利,房建成,刘刚. 有位置传感器无刷直流电机双模速度控制系统[J]. 微电机,2004,37(3):33-36,48.
- [6] 姚嘉,刘刚,房建成. 控制力矩陀螺用高速高精度无刷直流电机控制系统[J]. 微计算机信息,2005,15(3):3-5.
- [7] 张佳为,赵辉,马克茂. 陀螺飞轮的锁相环稳速控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(12):86-90,95.
- [8] CUI P L, YAN N. Research on modeling of the agile satellite using a single gimbal magnetically suspended CMG and the disturbance feedforward compensation for rotors[J]. Sensors, 2012, 12(12):16964-16987.
- [9] 杨鹏,王飞,贾春奇,等. 无刷直流电机闭环控制仿真系统的研究[J]. 微电机,2013,46(11):76-78.
- [10] MILLAN P, ORIHUELA L, BEJARANO G, et al. Design and application of suboptimal mixed H_2/H_∞ controllers for networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4):1057-1065.
- [11] LEE J D, KHOO S Y, WANG Z B. DSP-based sliding-mode control for electromagnetic-levitation precise-position system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2):817-827.
- [12] 刘成颖,刘龙飞,孟凡伟,等. 基于遗传算法的永磁直线同步电机伺服系统参数设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(12):1751-1757.
- (上接第 94 页)
- [4] 刘英,黄军玲,谢家雨. 直升机平台孔缝耦合仿真分析[J]. 电光与控制,2016,23(4):101-104.
- [5] 胡溥宇,赵昱,杨锦鹏,等. 任意平面波辐照下开孔矩形腔体屏蔽效能快速计算方法[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3651-3660.
- [6] 彭强,周东方,侯德亭,等. 带缝隙矩形腔的屏蔽效能传输线法修正及扩展分析[J]. 强激光与粒子束,2013,25(9):2355-2362.
- [7] 汪柳平,高攸纲,沈远茂,等. 装有 PCB 有孔矩形腔屏蔽效能的传输线法分析[J]. 电波科学学报,2008,23(4):740-744.
- [8] 毛湘宇,杜平安,聂宝林. 基于 TLM 的机箱孔缝电磁屏蔽效能数值分析[J]. 系统仿真学报,2009,21(23):7493-7497.
- [9] 范杰清,郝建红,柴培华. 基于扩展传输线法的异型腔电场屏蔽效能[J]. 电工技术学报,2014,29(5):228-232,238.
- [10] 马银才,张兴媛. 航空机载电子设备[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [11] 田东,陈少昌. 复杂矩形腔屏蔽效能分析[J]. 电光与控制,2010,17(10):93-96.
- [12] ROBINSON M P, BENSON T M, CHRISTOPOULOS C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3):240-248.
- [13] KRAFT C H. Modeling leakage through finite apertures with TLM [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1994:73-76.
- [14] 杨正桃. 民用和军用飞机机载电子设备电磁兼容性要求比较[J]. 计算机工程应用技术,2009(7):124-125.
- [15] GONSCHOREK K H. 设备设计与系统集成的电磁兼容[M]. 杨自佑,崔强,译. 北京:机械工业出版社,2014.
- [16] 杨楠. 双层加载电路板屏蔽腔屏蔽效能研究[J]. 现代电子技术,2013,36(22):5-9.
- [17] GUPTA K C, GARG R, BAHL I, et al. Microstrip lines and slotlines[M]. Norwood, MA: Artech House, 1979.
- [18] 魏光辉,李凯,潘晓东,等. 含孔缝金属腔体电磁场增强效应的形成机理仿真[J]. 高电压技术,2014,40(6):1637-1643.
- [19] HU T, CHEN D, FOROUSHIAN F, et al. Shielding effectiveness analysis and modification of the coupling effect transmission line method on cavities with multi-sided apertures[J]. Electronics, 2018, 52(7):1-14.
- [20] 罗静雯,杜平安,任丹,等. 一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法[J]. 物理学报,2015,64(1):010701-1-010701-8.