强电磁干扰下引信体屏蔽效能特性

戚俊成[°],高子博[°],马博翔[°],范宏辉[°],刘登峰[°],张惠芳^{°*}

(中北大学 a. 信息与通信工程学院 b. 机电工程学院,太原 030051)

摘要:目的 针对引信系统外壳上的开孔和贯通线引起的电磁兼容问题,分析外部强电磁干扰对引信内部的 耦合规律,研究开孔参数对引信屏蔽效能的影响。方法 根据麦克斯韦方程组和边界条件等经典电磁理论, 利用有限元仿真分析软件,研究外部强电磁干扰下,引信上不同的尺寸的通孔对引信内部电场分布的影响, 进一步提出相应的屏蔽措施。结果 当引信上开 20 mm 孔洞时,当外界电磁波频率大于圆孔的截止频率时, 引信内部电场强度最强可以达到 4 000 V/m,减小引信上的孔洞后,引信内部的电场强度整体下降 3 000 V/m 左右。在使用导电橡胶填充通信孔洞后,引信内部电场强度急剧下降,增加了套管之后,腔体内部的电场 强度显著降低,屏蔽效果非常显著。结论 引信上的开孔的形状和大小等因素均对屏蔽效果有较大影响,在 引信生产和设计中,均需采用导电橡胶填充、增加套管和多个小孔代替一个大孔等措施提高引信的电磁兼 容能力。

关键词:引信;电磁防护;电磁干扰;电磁屏蔽;屏蔽效能;麦克斯韦方程组
中图分类号:TJ430.1;O441.4
文献标志码:A
文章编号:1672-9242(2024)08-0009-08
DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.002

Shielding Efficiency Characteristics of Fuze under Strong Electromagnetic Interference

*QI Juncheng*¹, *GAO Zibo*², *MA Boxiang*², *FAN Honghui*², *LIU Dengfeng*², *ZHANG Huifang*^{2*} (a. School of Information and Communication Engineering, b. School of Mechanical and Electrical

Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: In view of the electromagnetic compatibility problem caused by the open hole and through wire on the shell of fuze system, the work aims to analyze the coupling law of external strong electromagnetic interference to the interior of fuze, and study the effect of hole parameters on the shielding efficiency of the fuze. According to the classical electromagnetic theory such as Maxwell equations and boundary conditions, the finite element simulation analysis software was adopted to study the effect of different sizes of through holes on the fuze on the internal electric field distribution under the strong external electromagnetic interference, and the corresponding shielding measures were further put forward. When a 20 mm hole was opened in the fuze and the frequency of external electromagnetic wave was greater than the cut-off frequency of the circular hole, the strongest electric field intensity in the fuze could reach 4 000 V/m. After the hole in the fuze was reduced, the electric field intensity in the fuze decreased by about 3 000 V/m as a whole. After the communication hole was filled with conductive rubber,

*通信作者(Corresponding author)

收稿日期: 2024-06-29; 修订日期: 2024-08-12

Received: 2024-06-29; Revised: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(62201522);山西省基础研究计划资助项目(202203021212157).

Fund: The National Natural Science Foundation of China (62201522); Fundamental Research Program of Shanxi Province (202203021212157) 引文格式: 威俊成,高子博,马博翔,等. 强电磁干扰下引信体屏蔽效能特性[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 9-16.

QI Juncheng, GAO Zibo, MA Boxiang, et al. Shielding Efficiency Characteristics of Fuze under Strong Electromagnetic Interference[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 9-16

the electric field intensity inside the fuze dropped sharply, and after the sleeve was added, the electric field intensity inside the cavity dropped significantly, and the shielding effect was remarkable. The shape and size of the open hole on the fuze have great effect on the shielding efficiency. In the production and design of the fuze, it is necessary to fill the hole with conductive rubber, increase the sleeve and several small holes instead of a large hole to improve the electromagnetic compatibility of the fuze. **KEY WORDS:** fuze; electromagnetic protection; electromagnetic interference; electromagnetic shielding; shielding efficiency; Maxwell equations

引信作为引燃或引爆弹药的核心控制系统,也是 实现精确、高效打击的重要装置,它的可靠性直接关 系到整个武器系统的安全性和可靠性。在现代信息战 争环境中,武器系统面对非常复杂的电磁环境^[1],除 了雷电等自然因素外,还有无线电通信、侦查雷达、 电磁设备、电磁脉冲信号、电磁炸弹等各类人为电磁 干扰源^[2-4],使得现代引信所面临的电磁隐患越来越 多。随着武器装备集成化、智能化程度的不断提高, 为提升武器装备的作战性能,现代引信内部包含大 量的电子集成电路^[5],各类电磁干扰信号使其内部 电路极有可能受到强电磁环境干扰而出现瞎火、早 炸等问题^[6],严重制约了武器系统的安全性和工事科 学技术发展的需要,是提高武器系统安全性和可靠性 的重要组成部分。

在引信系统抗电磁干扰方面,主要的研究方向是 针对引信系统的薄弱环节进行电磁加固,重点从提高 自身抗干扰性能和阻断耦合途径方面展开研究。自身 抗干扰性能是由引信外壳材料、结构及电路板的抗干 扰性能决定的。在材料选择方面,研究者[7-8]将电导 性良好的复合材料用作引信电磁屏蔽材料,为引信提 供良好电磁保护的同时,还具有良好的隔热、稳定 的结构以及易加工等性能。同时,根据具体使环境 要求^[9-10],改进不同缝隙的屏蔽技术、螺钉的布置、 开孔以及信号电缆的屏蔽策略。在电路电磁兼容设计 方面,通过差分对即可提高运放的抗干扰能力[11-12], 也可从器件处理、布线地线设计、器件布局等方面提 高电路板的抗电磁干扰能力,为引信电路的电磁兼容 性设计提供了解决方案。通过软件陷阱法、指令冗余 法和看门狗电路的设置,结合滤波法和屏蔽法等解决 方案^[13-14],对于电路板单片机以及 RAM 存储器件进 行了电磁防护。在阻断耦合途径方面,要提高引信的 抗外部强电磁干扰性能,重点从耦合途径进行抗干扰 性能加固[15-16],提高其屏蔽性能,并充分考虑引信内 部谐振的影响,才能从整体上提高现代引信的抗干扰 性能。

根据电磁屏蔽原理,屏蔽性能最好的引信系统是 没有任何间隙且完全封闭的壳体^[17-19]。在实际的引信 生产中,引信壳体通常由金属材料制作,壳体上会存 在一些信号传输开孔,同时在接缝处还存在间隙。因 此,引信壳体上的孔和接缝成为影响引信壳体抗外部 电磁干扰屏蔽效能的主要因素。本文针对引信系统外 壳上的开孔和贯通线引起的电磁兼容问题,研究了开 孔参数对引信屏蔽效能的影响,分析了外部强电磁 干扰的耦合规律,相应地提出了在引信电磁兼容性 设计上的改进方案,并利用仿真软件对抗干扰性能 进行了仿真验证,为引信产品的电磁兼容设计提供 理论指导。

1 电磁理论基础

1.1 电磁辐射及防护理论

麦克斯韦方程以完整的数学形式准确概括了自 然界宏观电磁现象的基本规律,能够解释经典电磁学 中的所有物理现象,是合理设计引信使其满足功能要 求的同时,不引起电磁干扰,也不会被外界电磁干扰 的理论基础。麦克斯韦方程组包括全电流定律、电磁 感应定律、磁通连续性方程和电荷守恒定律,方程组 的积分形式为:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$
(1)

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$
⁽²⁾

$$\oint_{S} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \tag{3}$$

$$\oint_{S} \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_{V} \rho dV \tag{4}$$

式中: *Ē*、*D*、*B*、*H*分别为电场强度矢量、电 位移矢量、磁感应强度和磁场强度矢量。由式(1)~ (4)所示的麦克斯韦方程组可以看出,除了电荷、 电流产生电场、磁场之外,变化的电场和磁场也可以 相互产生,彼此互为源。因此,在分析电磁问题时, 除考虑电场及磁场自身的规律之外,还要研究时变的 电场和时变的磁场之间的相互作用关系,研究场和 源、场和介质的之间关系。

1.2 电磁场的边界条件

当电磁波从一种介质进入到另一种介质时,由于 介质的介电常数、磁导率和电导率参数的变化,使得 电磁波在 2 种介质中的波阻抗不同,进而不同介质中 的电场矢量 Ē 和磁场矢量 Ĥ 也会发生相应的改变。 根据积分形式的麦克斯韦方程,即可推导得到电磁波 在不同介质分界面的边界条件,进而分析 2 种介质中 的电磁波矢量变化。针对外界强电磁波的屏蔽和衰减 等问题,可以由无源条件下(ρ=0和*J*=0)电磁场 的边界条件给出,如式(5)~(8)所示。

$$\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} \tag{5}$$

$$E_{1n} = E_{2n}$$
(6)
$$\vec{H}_{1t} = \vec{H}_{2t}$$
(7)

 $\vec{H}_{1t} = \vec{H}_{2t} \tag{7}$ $\vec{H}_{1n} = \vec{H}_{2n} \tag{8}$

由式(5)~(8)可以看出,当电磁波穿过2种 介质的边界时,边界条件提供了电场和磁场矢量各分 量的约束关系。式(5)和式(6)表明,电场强度矢 量的切向分量和法向分量在穿过2种不同介质的分 界面时是连续的。式(7)和(8)表明,磁场强度矢 量的切向分量和法向分量在边界面上是连续的。

1.3 电磁场的屏蔽

电磁屏蔽是提升引信电磁兼容性能的最基本措施^[20-24],电磁屏蔽的主要作用是减少引信自身电磁辐射对环境的影响和阻止外部干扰对引信的影响。电磁屏蔽的原理是利用隔离电磁能量的材料抑制干扰电磁波在空间中传播,使电磁能量处于互不干扰的独立环境中。在设计引信时,需重点关注引信壳体上的开孔等电磁能量容易进出的地方,适当添加保护装置或对引信壳体进行优化设计,即可达到引信电磁屏蔽的目的。

根据电磁波的传输特性,电磁波穿过金属等屏蔽 介质时主要包含3个物理过程:反射、吸收与多重反 射。由于屏蔽介质与自由空间的波阻抗不同,电磁波 在2种介质分界面上会产生反射,大部分能量被反射 回自由空间,其余部分进入屏蔽介质内传播。由于一 般屏蔽介质不是理想导体,会有一部分能量被吸收, 另一部分能量在到达屏蔽体的另一个界面时,会再次 发生反射,最后只有一小部分电磁波会穿透屏蔽介 质,如图1所示。



图 1 电磁波在屏蔽介质中的传输原理 Fig.1 Transmission principle of electromagnetic wave in the medium

图 1 为置于空气中的屏蔽介质的传输原理图,金 属材料被用作屏蔽介质,分析该介质的电磁屏蔽性能, 就是求解给定边界条件下的麦克斯韦方程组。平面波 通过厚度为 d 的金属介质的穿透系数可表示为^[25]:

$$s = (1 - \rho_0)(1 - \rho_l)e^{-jkd} \left(1 + \rho_t^2 e^{-2jkd} + \rho_t^4 e^{-4jkd} + \cdots\right)$$
(9)

式中: ρ_0 和 ρ_t 分别为电磁波两个界面上的反射 系数; k为电磁波在空气中波数。

$$\rho_0 = \frac{\eta_0 - \eta_m}{\eta_0 + \eta_m}, \rho_t = \frac{\eta_m - \eta_m}{\eta_0 + \eta_m}$$
(10)

式中: η₀和 η_m分别为空气和屏蔽介质的波阻抗, 可由空气及屏蔽介质的介电常数、磁导率和电导率等 电磁学特性参数直接计算得到^[25]。

1.4 屏蔽效能

屏蔽效能 SE (Shielding Efficiency)是屏蔽介质 性能的定量评价,定义是空间某点上未加屏蔽介质的 电场强度与加屏蔽介质后该点的电场强度的比值,表 示为:

$$S_{\rm E} = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} \tag{11}$$

式中: *E*₁和 *E*₂分别是未作屏蔽和屏蔽后的电场 强度; *S*_E为电场屏蔽效率。屏蔽效能越大,则该材料 及相对应的屏蔽体的屏蔽效果越好。

1.5 圆形通孔的屏蔽特性分析

根据电磁波的传输特性,引信上的圆形通孔可以 看作是圆形波导。由于边界限制,根据式(5)~(8) 所示的边界条件,可以得到波导中电磁波的传播特性 与自由空间中不同。波导可以传输多种模式的电磁 波,每种模式都对应一个特定的截止波长和截止频 率。在圆形波导所有传输模式中,TE₁₁模截止波长最 长,对应的截止频率最低,TE₁₁模截止波长^[26]为:

$$\lambda_{\rm c} = 3.4126a \tag{12}$$

式中: *a* 为圆形通孔的半径。根据圆形波导的截止特性,所有的波长大于截止频率的电磁波都无法在圆孔中传播,无法以导行电磁波的形式进入引信壳体内部。

2 仿真结果及分析

2.1 模型建立

在边界条件的约束下,根据麦克斯韦方程组所求 解的电磁场问题具有唯一解。本文利用 CST 软件, 基于有限元仿真方法,引入边界条件后,对引信内部 的电磁场分布特性进行了求解。为了仿真分析外部强 电磁干扰下引信内部的电磁环境,首先需要先对引信 进行近似建模。引信近似建模为一个空心的圆柱腔 体,直径为80mm,高100mm,在主引信上通信孔, 用于通过线缆等与传感器、弹体等传输信号,引信腔 体所用材料为软件材料库自带的不锈钢。引信主体的 前端,由无线电发射和接收等信号探测模块,最后由 聚四氟乙烯做的天线保护盖保护引信的同时,保证引 信识别模块的信号探测与传输。建立好的模型如图 2 所示。

2.2 外部强电磁干扰下的仿真结果

现代战场上引信弹药周围的电磁环境非常复杂, 对引信生存能力影响最大的是高功率电磁干扰。本文 重点研究了干扰场强约为 1 000 V/m, 频率范围为 1~30 GHz 电磁波在垂直入射情况下,不同的开孔尺 寸电磁波对引信内部的影响情况。仿真结果如图 3~6 所示。



图 2 引信模型 Fig.2 Diagram of fuze model



a 1 GHz

图 3 垂直入射情况下 20 mm 通孔的仿真结果 Fig.3 Simulation results electromagnetic field of 20 mm hole at vertical incidence



图 4 垂直入射情况下 8 mm 通孔的仿真结果 Fig.4 Simulation results of 8 mm hole at vertical incidence





Fig.5 Distribution law of electric field intensity with frequency at 40 mm from the bottom of the cavity



图 6 腔体内部距离下底面 40 mm 的屏蔽效能 随着频率的分布规律 Fig.6 Distribution of shielding efficiency with frequency at

40 mm from the bottom of the cavity

由图 3 和图 4 所示的电场分布图中可以看出,当 引信壳体上的孔洞较大时,垂直入射电磁波进入壳体 内部的电场很强。当减小孔洞直径时,进入腔体内部 的电磁波能量成倍地减少。根据式(12),可以计算 得到 20 mm 圆形通信孔对应的截止频率和截止波长 分别为 8.8 GHz 和 34.126 mm, 8 mm 圆形通信孔对 应 的 截 止 频 率 和 截 止 波 长 分 别 为 22 GHz 和 13.65 mm。由图 5 和图 6 所示的电场和屏蔽效能曲线 变化规律可以看出,随着电磁波频率升高,即电磁波 波长变短。当波长小于孔洞的截止波长时,其在孔洞 的穿透能力也变强,进入引信内部的电磁能量升高。

由于引信是金属腔体,在其各个表面上都有很强的反射,进入引信内部的电磁波和引信内部电路辐射 出来的电磁波都会形成谐振状态。由图 5 所示的腔内 电场强度分布规律可以看出,在 1~30 GHz 的整个频 段范围内,引信内部存在多个谐振点,使得电场强度 成倍地增加。在 20 mm 孔洞时,谐振频率点的电场 最强可以达到 4 000 V/m,减小孔洞后,谐振频率点 的最强下降到 3 000 V/m。在整个频段范围内,引信内 部的电场强度整体下降非常明显,屏蔽效果非常显著。 由图 6 所示的屏蔽效能曲线可以看出,20 mm 的孔洞在 整个频段范围内,屏蔽效果都比较低,减小孔孔洞后, 当波长小于截止波长后,屏蔽效能急剧下降。整体而言, 减小孔洞直径之后,屏蔽效能增加了大约 40 dB。

综合仿真结果,根据外部环境电磁波频率范围, 合理设计通信孔的尺寸,使其能够有效地屏蔽电磁 波。由于引信内部可能出现谐振状态,使得引信内部 的部分区域电磁能量非常的强,极易烧毁该区域的电 子元器件,因此在引信设计过程中,在无法完全消除 电磁干扰的情况下,应该不断优化引信内部电路的布 置方案,使其不处于强电场区域,或者在引信内部适 当地增加吸波材料涂层,避免产生电磁波的谐振状态。

2.3 抗外部电磁干扰

2.3.1 填充通信孔

针对引信壳体外部强电磁干扰通过壳体上通信 孔缝耦合进入引信内部的问题,可在壳体开孔、缝隙 等区域填充导电橡胶,或者利用导电橡胶尽量缩小相 关的通信空隙。这样可以尽量减少电磁波耦合进入引 信壳体内部,降低外部强电磁干扰对引信内部的电磁 干扰,保障了系统在强电磁干扰环境下正常工作。 6 GHz 处,引信内部在不同导电橡胶填充情况下的电 场分布特性如图 7 所示,1~10 GHz 频段内引信内部 电场的变化规律如图 8 所示。

由图 7 和图 8 的仿真结果可以看出,在使用导电 橡胶填充通信孔洞后,引信内部的电场强度整体降低 很多,屏蔽效能也得到了有效提升。随着导电橡胶填 充的增多,引信内部电场强度急剧下降。因此,在设 计和生产引信过程中,在无法避免的孔洞或者狭缝 上,应尽可能多地使用导电橡胶填充。

2.3.2 增加滤波腔体

根据微波技术原理,对于特定的圆形波导,只允 许小于截止波长的电磁波通过,对于其他的电磁波,









将很快衰减掉[27]。本文研究了固定通信孔直径的情况 下,增加相应的套管,将孔洞延长以达到增加电磁波 在孔内的传输衰减。通信孔半径为10mm,原始模型、 减小通信孔所在面的金属厚度、增加 10 mm 不锈钢 套环和 10 mm 导电橡胶套环对腔体内部电场分布特 性如图9所示。



a 原始引信内部电场分布



b减小通信孔所在面的金属厚度

图 9

在图 9b 中, 当减小通信孔所在面的金属厚度之 后,内部电场明显增强,增加了套管之后,腔体内部 的电场强度显著降低,且随着金属套管的加长,屏蔽 效果进一步提升。同时,将金属材料替换成电导率比 较高的柔性导电橡胶,同样也能起到相同的屏蔽效 果。因此,在设计引信的时候,可以在一些穿过通孔 的导线上,尽可能多地套上金属或者导电橡胶套管, 提高引信的抗外部电磁干扰能力,进而实现提高整个 引信的抗外部电磁干扰能力。

2.3.3 多个小孔代替大孔

对于一些面积无法减小的引信前端通信孔,在开 孔面积不变的情况下,可以将一个大通信孔用多个小 孔代替,用4个半径为5mm的通信孔代替一个半径 为 10 mm 通信孔的引信结构及相应的仿真结果如图 10 所示。





c 增加10 mm 高的金属套管

d 增加10 mm 高的导电橡胶套管

Fig.9 Electric field distribution inside the fuze at 5 GHz after addition of filter cavity: a) electric field distribution inside the original fuze; b) reduction of metal thickness of the communication hole; c) addition of 10 mm high metal metal; d) addition of 10 mm high conductive rubber sleeve

增加滤波腔体后引信内部 5 GHz 处的电场分布



b4个5 mm 通信孔

图 10 多个小通信孔仿真结果

Fig.10 Simulation results of multiple small communication holes: a) 10 mm communication hole with a radius of 10 mm; b) 4 communication holes with a radius of 5 mm; c) electric field distribution of the fuze corresponding 4 communication holes with a radius of 5 mm

由图 10 可以看出,将图 10a 中半径为 10 mm 的 一个通信孔用图 10b 所示的半径为 5 mm 的 4 个通信 孔代替。由图 10c 和图 9b 所示的引信内部电场分布 图可以看出,在总开孔面积相同的情况下,用多个小 孔代替一个大孔,可以明显降低引信内部的电场强 度,能起到很好的抗外部电磁干扰效果。

3 结论

本文基于电磁波传输理论,采用有限元法,仿真 分析了引信壳体上信号传输窗口的开孔或者缝隙形 状对引信壳体屏蔽效能的影响,对提高武器系统的电 磁兼容特性,进一步提高武器系统安全性和可靠性, 实现精确、高效打击具有重要意义。在引信的设计生 产中,尽量减小孔洞直径,以提高引信的电磁兼容特 性。针对于一些无法减小孔径的孔洞,可以使用导电 橡胶填充、增加套管或者多个小孔代替一个大孔等方 式,同样也能起到提升引信屏蔽效果的目的。本文提 出的屏蔽效能的策略和相应的屏蔽措施等相关理论 成果能为引信壳体信号开孔策略及相关电磁防护措 施提供理论基础和一定的参考价值。

参考文献:

 杨培宇. 战略高技术创新体系研究[D]. 长沙: 国防科 技大学, 2017.

YANG P Y. Research on Strategic High-Tech Innovation System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.

- [2] 刘尚合,刘卫东.电磁兼容与电磁防护相关研究进展
 [J].高电压技术, 2014, 40(6): 1605-1613.
 LIU S H, LIU W D. Progress of Relevant Research on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605-1613.
- [3] 赵红梅,苏海斌,王健.战场电磁环境复杂度与战术通 信性能的相关性研究[J].装备环境工程,2018,15(11): 113-117.
 ZHAO H M, SU H B, WANG J. Correlation of Battle Electromagnetic Environment Complexity and Tactics

Communication System Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 113-117.

- [4] LIU B H, DAVID C C. Eigenmodes and the composite Quality Factor of a Reverberation Chamber[R]. Washington: US Department of Commerce, 1983.
- [5] 李晓晶. 引信全电子安全系统控制电路设计与分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
 LI X J. Design and Analysis of Full electronic security systems Control Circuit for Fuze[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [6] 张颖, 兰光武, 韩冬梅, 等. 电磁兼容技术在某武器系 统设计中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(12):

27-30.

ZHANG Y, LAN G W, HAN D M, et al. Application of Electromagnetic Compatibility in Weapon System Design[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(12): 27-30.

- [7] 翁立, 闵永刚. 石墨烯基吸波复合材料的研究新进展
 [J]. 功能材料, 2017, 48(12): 12041-12049.
 WENG L, MIN Y G. New Research Progress of Electromagnetic Shielding and Absorbing Composites Based on Graphene[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(12): 12041-12049.
- [8] 王丽,王哲,宁国艳,等.木基导电电磁屏蔽材料的研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2320-2328.
 WANG L, WANG Z, NING G Y, et al. Research Progress of Electromagnetic Shielding Wood-Based Conductive Materials[J]. Materials Review, 2018, 32(13): 2320-2328.
- [9] 王连坡, 茅文深. 电磁屏蔽技术在结构设计中的应用
 [J]. 舰船电子工程, 2009, 29(1): 173-177.
 WANG L P, MAO W S. Application of Electromagnetic Shielding Technology in Structure Design[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(1): 173-177.
- [10] 王立,张凯,田海涛. 电子设备结构设计中的电磁屏蔽 技术[J]. 中国水运(下半月刊), 2011, 11(2): 111-113.
 WANG L, ZHANG K, TIAN H T. Electromagnetic Shielding Technology in Structural Design of Electronic Equipment[J]. China Water Transport, 2011, 11(2): 111-113.
- SETTI G, SPECIALE N. Design of a Low EMI Susceptibility CMOS Transimpedance Operational Amplifier[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6/7/8): 1143-1148.
- [12] RICHELLI A. CMOS OpAmp Resisting to Large Electromagnetic Interferences[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(4): 1062-1065.
- [13] 侯民胜,问建.单片机的 ESD EMP 效应及加固技术研究[J].电子工程师,2007,33(2):59-62.
 HOU M S, WEN J. A Study on ESD EMP Effects of Single Chip Computer and Hardening Technology[J]. Electronic Engineer, 2007, 33(2): 59-62.
- [14] 侯民胜, 王鹏刚, 洪善民. 数据存贮器的电磁脉冲效应 及加固方法研究[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(2): 59-61.
 HOU M S, WANG P G, HONG S M. Study on EMP Effects to Data RAM and Hardening Technology[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(2): 59-61.
- [15] 何小健,杨钊,刘强,等. 机电引信碰击开关的电磁屏 蔽方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(1): 81-83.
 HE X J, YANG Z, LIU Q, et al. Electromagnetic Shielding Method for Fuze Impact Switch[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(1): 81-83.
- [16] 陈凯柏, 刘少华, 毕军建, 等. 毫米波近炸探测器超宽带电磁脉冲防护加固措施研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 27-33.
 CHEN K B, LIU S H, BI J J, et al. Protection and Reinforcement Measures of Ultra-Wideband Electromagnetic

Pulse for Millimeter Wave Proximity Detector[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 27-33.

- [17] VAEZIKAKHKI S, SAEID MOSAVINEJAD S, BAHADORZADEH M. Study the Effect of Different Parameters and Improving the Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure with Extra Wall[J]. American Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019, 3(2): 53.
- [18] TRUONG N D, VAN NGHIA T, CHINH B D, et al. Combination of Metal Shielding and Distance Estimation for Electromagnetic Compatibility Guarantee[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2019, 11(9): 135-147.
- [19] 刘述民,张勇强,王全顺,等.飞行控制装备电磁干扰 机理及防护研究[J].装备环境工程,2012,9(6):17-20. LIU S M, ZHANG Y Q, WANG Q S, et al. Research on Electromagnetic Interference and Protection of Flight Control Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 17-20.
- [20] 沈阳,李修和,李勇. 雷达装备复杂电磁环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 1-5. SHEN Y, LI X H, LI Y. Research on Complex Electromagnetic Environmental Worthiness Evaluation of Radar Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 1-5.
- [21] 彭光辉.小尺寸屏蔽体孔缝仿真建模及屏蔽体内部场 分布研究[D].南京:东南大学,2019.
 PENG G H. Simulation Modeling of Small-Sized Shields' Slots and Research on Field Distribution in Shields[D].
 Nanjing: Southeast University, 2019.
- [22] 孙荣平, 成本茂, 郭龙. 复杂电磁环境下机载电子设备 的电磁兼容仿真研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2):

57-60.

SUN R P, CHENG B M, GUO L. Study on EMC Simulation of Airborne Avionics under Complex Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 57-60.

- [23] 郝建红, 公延飞, 范杰清, 等. 一种内置条状金属板的 双层金属腔体屏蔽效能的理论模型[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 57-64.
 HAO J H, GONG Y F, FAN J Q, et al. An Analytical Model for Shielding Effectiveness of Double Layer Rectangular Enclosure with Inner Strip-Shaped Metallic
- Plate[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 57-64.
 [24] 周尚武, 徐英, 周勇. 一种装备战场电磁兼容性综合评 估方法[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 16-20.
 ZHOU S W, XU Y, ZHOU Y. A Method for Battlefield Electromagnetic Compatibility Evaluation of Equipment[J].
 Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(4): 16-20.
- [25] 徐美芳,苏新彦. 电磁场与电磁波[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022.
 XU M F, SU X Y. Electromagnetic Fields and Waves[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2022.
- [26] 王新稳. 微波技术与天线[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 43-66.
 WANG X W. Microwave Technology and Antennas[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 43-66.
- [27] 安静, 吴敏, 高建强, 等. 金属腔体多耦合通道电磁特 性研究[J]. 微波学报, 2019, 35(5): 63-66.
 AN J, WU M, GAO J Q, et al. Study on Electromagnetic Characteristics of Multi-Coupling Channels for the Metal Cavity[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(5): 63-66.