

脉冲激光发射模块电磁屏蔽效能仿真分析

孙文东¹, 霸书红¹, 陈慧敏²

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159;

2. 北京理工大学 机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

摘要: 目的 提高脉冲激光发射模块的电磁兼容性。方法 基于腔体的电磁屏蔽机理, 使用 HFSS 软件, 建立脉冲激光发射模块腔体模型, 以电磁敏感度、电磁干扰 2 个方面对腔体电磁屏蔽效能进行仿真分析。结果 设计的双层屏蔽腔体在电磁波辐照频率为 1~100 kHz 时, 屏蔽效能达到 28 dB; 电磁波辐照频率为 0.2~18 GHz 时, 屏蔽效能达到 47 dB。结论 当电磁波辐照频率在 1~100 kHz 时, 腔体的屏蔽效能随频率的增加而增大。辐射源外部激励时, 双层屏蔽腔体使用外层铁内层铜屏蔽效能较高。电磁波辐照频率在 0.2~18 GHz 时, 腔体的屏蔽效能随频率的增大而减小, 且发生了谐振效应。当腔体厚度相等时, 双层屏蔽的屏蔽效能高于单层屏蔽。使用电缆连接器代替孔洞进行信号传输时, 腔体屏蔽效能增加。

关键词: 脉冲激光发射模块; 电磁兼容; 带孔圆柱腔体; 双层屏蔽; 屏蔽效能; HFSS 仿真

中图分类号: TJ430.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0054-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.008

Simulation Analysis of Electromagnetic Shielding Effectiveness on Pulse Laser Transmitting Module

SUN Wen-dong¹, BA Shu-hong¹, CHEN Hui-min²

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Key Laboratory of Electromechanical Dynamic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the electromagnetic compatibility of pulsed laser transmitting module. Based on the electromagnetic shielding mechanism of cavity, HFSS software was used to establish the cavity model of pulsed laser emission module, and the electromagnetic shielding effectiveness of cavity was simulated and analyzed in terms of electromagnetic sensitivity and electromagnetic interference. The shielding effectiveness of the double-layer shielding cavity can reach 28 dB when the electromagnetic radiation frequency is from 1 kHz to 100 kHz. When the electromagnetic wave irradiation frequency is 0.2-18GHz, the shielding effectiveness reaches 47 dB. When the radiation frequency of electromagnetic wave is between 1 kHz and 100 kHz, the shielding effectiveness of cavity increases with the increase of frequency. When the radiation source is excited externally, the shielding effectiveness of the double-layer shielding cavity is higher by using the outer layer of iron and the inner layer of copper. When the electromagnetic wave irradiation frequency

收稿日期: 2022-09-13; 修订日期: 2022-10-23

Received: 2022-09-13; Revised: 2022-10-23

作者简介: 孙文东 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光点火技术。

Biography: SUN Wen-dong (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: laser ignition technology.

通讯作者: 霸书红 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型含能材料及光电对抗效应。

Corresponding author: BA Shu-hong (1970-), Male, Doctor, Professor, Research focus: new energetic materials and photoelectric countermeasures.

引文格式: 孙文东, 霸书红, 陈慧敏. 脉冲激光发射模块电磁屏蔽效能仿真分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 054-061.

SUN Wen-dong, BA Shu-hong, CHEN Hui-min. Simulation Analysis of Electromagnetic Shielding Effectiveness on Pulse Laser Transmitting Module[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 054-061.

is 0.2-18 GHz, the shielding effectiveness of the cavity decreases with the increase of the frequency, and the resonance effect occurs. When the cavity thickness is equal, the shielding effectiveness of double-layer shielding is higher than that of single layer shielding. When using cable connectors instead of holes for signal transmission, cavity shielding effectiveness increases.

KEY WORDS: pulse laser transmitter module; electromagnetic compatibility; cylindrical cavity with hole; double shielding; shielding effectiveness; HFSS simulation

现代战争中,以电子武器装备作为作战基础,武器平台等应用场景越来越密集地使用电子设备。同时,电磁攻击武器的发展,多样化的电磁干扰方式对信息化武器装备构成巨大威胁^[1]。脉冲激光发射模块由半导体激光器、激光驱动电路、光学系统组成,其在激光引信有着重要应用,通常利用发射模块发出的激光束探测目标,并引爆导弹战斗部。为防止工作时与其他电子设备相互干扰,以及在恶劣电磁环境下工作,需要进行电磁兼容性研究^[2]。电磁兼容(EMC)分为电磁干扰(EMI)和电磁敏感度(EMS),是指电子设备在设计电磁辐射环境下正常工作,同时又不影响其他电子设备或系统正常工作的能力。目前电子装置电磁兼容设计主要有 3 种方法:滤波、接地、屏蔽。其中屏蔽技术采用屏蔽结构来吸收、反射电磁波,将屏蔽区域与其他区域隔离开来。屏蔽技术因其方便、高效而备受关注^[3]。

针对电子装置电磁屏蔽问题,国内外学者对其进行了广泛研究。Sevgi^[4]证明了材料屏蔽效能的主要限制是由于无法避免接缝、孔洞和电缆穿透。Ren 等^[5]、Basyigit 等^[6]、Kubík 等^[7]分别对穿孔屏蔽罩的屏蔽效能进行了数值模拟。Bachir 等^[8]采用多层结构 Al-epoxy-Ni 来减少屏蔽层的厚度。Chien 等^[9]得出六边形波导、蜂窝状波导或者双层屏蔽可提高屏蔽体的屏蔽效能。何勇等^[10]得出采用 45 号钢组合屏蔽机制,可有效抑制电磁干扰。冯颖等^[11]、宋定宇^[12]对屏蔽体的电磁辐射问题进行了研究。张郑等^[13]、于海波等^[14]采用 HFSS 软件对孔缝箱体进行了仿真分析。宋航等^[15]得出有孔双层屏蔽腔体屏蔽效能随着频率的增加总体上呈下降趋势。胡叶青等^[16]利用场论方法推导了圆柱壳双层铁磁屏蔽体屏蔽效能的计算公式。张岩等^[17]得出双层腔体屏蔽效能随内外层重叠面积的减小而增加。吴刚等^[18]得出金属双层腔体的屏蔽效能要优于单层腔体。为了解决电磁安全问题,我国实行 GJB 151B—2013^[19]和 GJB 573B—2020^[20],分别对电子设备电磁兼容设计目标提出要求。

综上所述,可见前人对双层腔体屏蔽效能研究较少,另外发现以高频宽带电磁波作为辐射源,对腔体屏蔽效能的相关研究也较少。在电磁敏感度方面,为防止模块意外工作或失效,模块需要具有抗高频电磁辐射性能。同时,在电磁干扰方面,为避免模块工作时影响同一系统下的其他电子设备正常工作,需要降

低模块内部的低频电磁辐射发射。基于上述原因,利用 HFSS 软件,建立脉冲激光发射模块单双层腔体模型,采用电磁波宽带扫频的方式,对腔体屏蔽效能进行仿真分析,为电磁兼容屏蔽设计及屏蔽腔体电磁波宽带扫频研究奠定基础。

1 腔体屏蔽效能理论分析

屏蔽效能(η_{SE})是评价屏蔽体屏蔽效果的指标,等于屏蔽前后一点的电磁场强度之比,以分贝(dB)表示:

$$\eta_{SE} = 20 \lg \frac{E_0}{E_S} = 20 \lg \frac{H_0}{H_S} \quad (1)$$

屏蔽模型分为单层屏蔽和多层屏蔽。单层屏蔽是最常用的屏蔽结构,材料的屏蔽效能由 3 种机制影响,分别为反射、吸收和材料内部的多次反射(如图 1 所示),可表示为式(2)^[8,11,21]。

$$\eta_{SE} = R + A + B \quad (2)$$

式中: R 为表面反射损耗,dB; A 为吸收损耗,dB; B 为多次内反射损耗,dB。

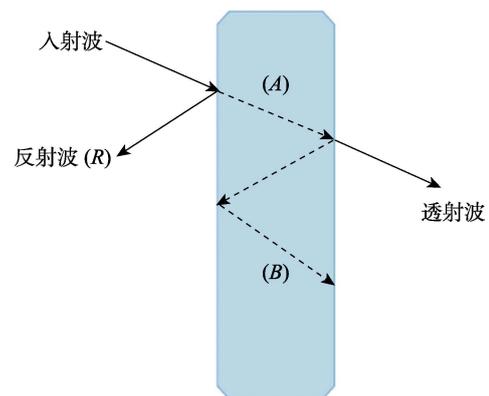


图 1 单层屏蔽原理

Fig.1 Single layer shielding principle

$$R = 20 \lg(Z_0/4Z_s) = 168.14 - 10 \lg \left(\frac{\mu_r f}{\sigma_r} \right) \quad (3)$$

$$A = 8.686d/\delta = 131d\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (4)$$

$$B = 20 \lg(1 - e^{-2d/\delta}) \quad (5)$$

式中: μ_r 为相对磁导率; σ_r 为相对电导率; d 为屏蔽体厚度; f 为频率; δ 为趋肤深度; Z_s 为屏蔽阻抗; Z_0 为自由空间固有阻抗。

由式(3) — (5)可知,屏蔽低频磁场时,由于频率低,吸收损耗小,而且波阻抗低,导致反射损耗小,需要用磁导率高的材料提供磁通路实现屏蔽效果。屏蔽高频电磁波时,主要利用材料的吸收损耗,即金属导体的趋肤效应实现屏蔽效果,其主要机理是在屏蔽体表面产生抗磁涡反磁场抵消原有磁场。当电磁波辐照频率越高,材料趋肤效应就越明显,所需厚度就越低,此时屏蔽效能与材料的磁导率、电导率和材料厚度成正比。

多层屏蔽机制是利用多层不同材料的反射损耗和吸收损耗,以及屏蔽材料之间的多次反射。多层结构屏蔽效能的理论模型是基于远场区域的发射波矩阵,如图2所示。其中多层屏蔽反射损耗等于各层材料反射损耗之和,多层屏蔽的吸收损耗等于各层材料吸收损耗之和,多次反射损耗与屏蔽材料之间的距离有关^[8,22-23]。

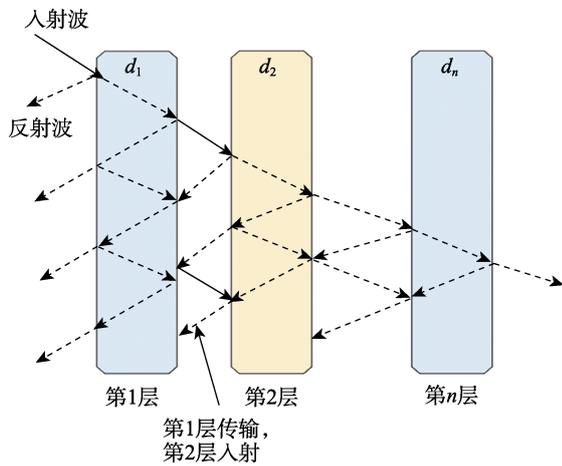


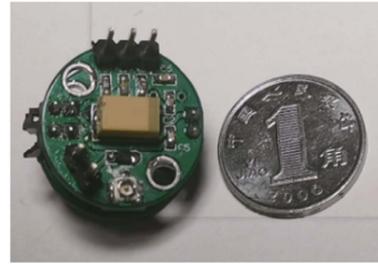
图2 多层屏蔽原理
Fig.2 Multi-layer shielding principle

2 脉冲激光发射模块电磁敏感度仿真分析

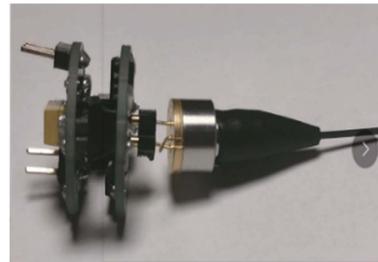
电磁仿真技术的本质是利用麦克斯韦方程、场边界条件和介质的本构关系来求解电磁场分布。HFSS软件基于有限元法,使用四面体网格单元来解决特定的电磁问题,利用计算机求解直至满足指定的收敛要求值。

2.1 脉冲激光发射模块腔体模型建立

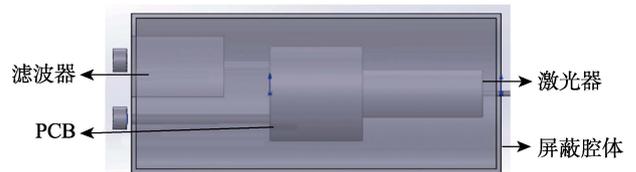
由图3所示,脉冲激光发射模块由脉冲尾纤半导体激光器、激光驱动电路、滤波器、屏蔽腔体组成。激光驱动电路PCB尺寸为 $\phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,如图3a所示;半导体激光器尺寸为 $\phi 26\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,如图3b所示。激光发射模块工作时,需要从外界引入电源线、信号线,模块内部需引出光纤,需要在腔体上开孔。在实际操作中,若电源线、信号线进出腔体未经滤波,腔体的屏蔽效能将大大降低,因此需要在电源线、信号线输入端口安装滤波器。



a 激光驱动电路 PCB



b 激光器嵌入 PCB 板

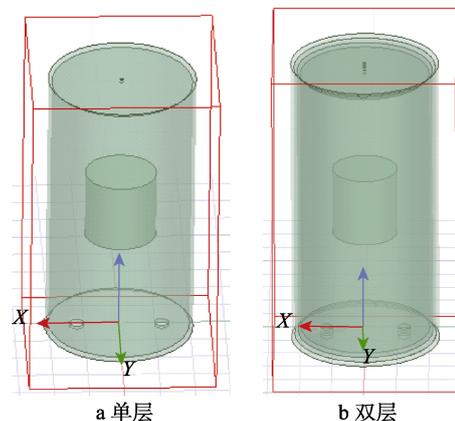


c 发射模块构成

图3 脉冲激光发射模块

Fig.3 Internal parts of laser transmitting module:a)Laser drive circuit PCB; b)Laser embedded in PCB; c)Composition of transmitting module

在此基础上,在 HFSS 软件中分别建立激光发射模块单层、双层腔体模型,尺寸为 $\phi 40\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。为保证模块具有良好的抗静电属性,屏蔽腔体采用金属良导体作为屏蔽材料。在腔体的上表面中心设置直径为 1 mm 的孔洞,用于光纤引出,在腔体的下表面设置2个直径为 4 mm 孔洞,分别用于电源线、信号线的引入。考虑激光器和滤波器的安装位置后,在腔体内建立尺寸 $\phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的PCB板。模型建立后,在腔体外设置辐射边界条件。发射模块单双层屏蔽腔体模型如图4所示。



a 单层

b 双层

图4 屏蔽腔体模型

Fig.4 Shielded cavity model:a) single layer; b) double layer

电磁波入射激励源设置为平面波, 大小为 200 V/m。激励源设置为距离腔体下底面中心 20 mm, 平面波垂直于腔体底面照射, 传播方向沿 Z 轴正半轴传播, 电场矢量方向沿 X 正半轴传播。激励源位置与腔体内部观测点如图 5 所示。平面波辐照频率设置为 0.2~18 GHz, 为保证仿真结果精度, 采用离散式扫频, 间隔为 0.2 GHz, 迭代次数为 10 次, 迭代精度为 0.01。

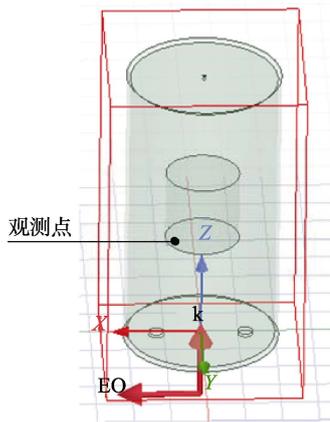


图 5 激励源位置与观测点

Fig.5 Excitation source location and observation point

2.2 单层屏蔽腔体屏蔽效能仿真分析

为了探究腔体厚度对其屏蔽效能的影响, 使用金属铜作为屏蔽材料, 保证腔体内部尺寸不变, 在不同厚度下, 腔体屏蔽效能如图 6 所示。由图 6 可知, 在电磁波频率为 0.2~18 GHz 时, 随着电磁波辐照频率的增大, 腔体屏蔽效能逐渐减小。进一步分析得出, 由于腔体设置的孔洞引起电磁泄露, 导致腔体屏蔽效能极度降低。在某些频点处, 腔体屏蔽效能达到极小值, 此时腔体内部发生谐振效应, 腔体孔洞形成耦合辐射源, 使得腔体内部辐射场强迅速增强。还可得出, 腔体的屏蔽效能与材料厚度呈正比关系。对于高频电磁波, 屏蔽效能主要取决于屏蔽材料的吸收损耗, 当屏蔽材料厚度增加时, 吸收损耗增大。

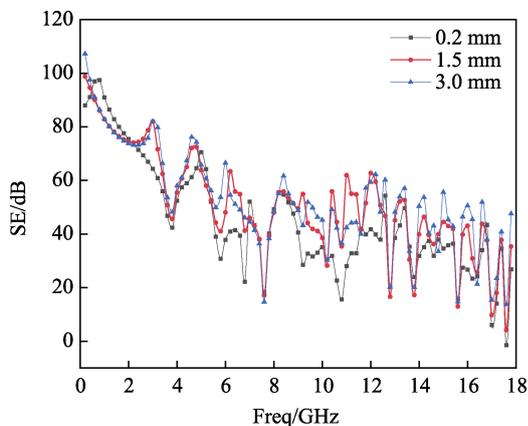


图 6 不同厚度下铜腔体的屏蔽效能

Fig.6 Shielding effectiveness of copper cavity with different thickness

探究了高电导率材料和高磁导率材料作为屏蔽材料的屏蔽效果, 当使用金属铝、金属铁作为屏蔽材料, 厚度设置为 1.0 mm 时, 腔体屏蔽效能如图 7 所示。由图 7 可知, 当腔体厚度为 1.0 mm 时, 铜的屏蔽效能高于铝。这是由于铜的电导率高于铝, 高电导率材料具有较强的趋肤效应, 同时也具有较高的吸收损耗效能。相较于铜和铝, 铁的屏蔽效能较低。根据理论分析, 金属铁具有高磁导率的特点, 屏蔽高频电磁辐射也应具有良好的屏蔽效果, 但随着电磁波的频率逐渐增大时, 铁的磁导率越来越小, 逐渐失去屏蔽效果^[24-25]。由图 7 中还可得知, 铁腔体与铜、铝腔体的谐振频率有所区别, 这是因为腔体的谐振频率与腔体内部磁导率、介电常数和腔体尺寸有关^[26]。

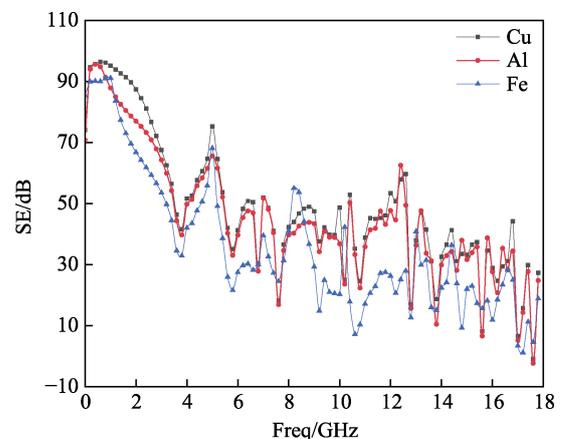


图 7 1.0 mm 厚度不同材料下腔体屏蔽效能

Fig.7 Shielding effectiveness of cavity under 1.0 mm thickness with different materials

由于腔体设置的孔洞随着电磁波频率增大, 腔体屏蔽效能越来越低, 在特定频率下发生的谐振反应, 使腔体屏蔽效能不足 10 dB。另外, 高电导率材料对低频电磁辐射屏蔽效果较差。为进一步提高腔体的屏蔽效能, 本文利用双层屏蔽的机理对腔体屏蔽效能进行仿真分析。

2.3 双层屏蔽腔体屏蔽效能仿真分析

当腔体实现高低频段电磁屏蔽时, 通常在高磁导率材料表面电镀高电导率材料或使用双层屏蔽机理。在图 4b 基础上, 建立外层铜, 内层铁的腔体模型, 每层厚度均为 0.5 mm, 并保持上下层平行, 之间间距 0.5 mm 分别设置为空气和环氧树脂, 腔体内部尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 其他参数设置不变。当电磁波频率 0.2~18 GHz 时, 腔体的屏蔽效能如图 8 所示。

对比图 6、图 8 可知, 当腔体厚度为 1.5 mm 时, 双层屏蔽的屏蔽效能高于单层屏蔽, 且双层材料之间的介质层为环氧树脂时, 腔体的屏蔽效能较高。通常来说, 当腔体使用双层屏蔽时, 屏蔽效果并不能达到理想效果。这是由于电磁波穿过第 1 层屏蔽材料时, 剩余电磁波会在 2 层材料之间发生多次反射, 内层屏

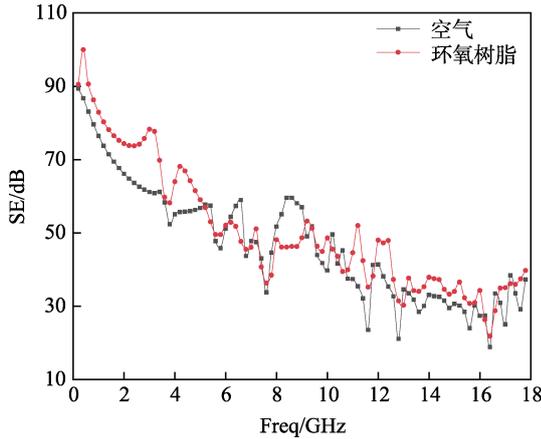


图 8 双层腔体屏蔽效能
Fig.8 Double-layer cavity shielding effectiveness

蔽材料多次遭受电磁侵扰，导致腔体屏蔽效能降低。在 2 层屏蔽材料之间填充环氧树脂是为了改善材料之间的多重反射。当电磁波辐照双层屏蔽腔体时，第 1 层金属铜对该电磁波进行吸收损耗，部分电磁波穿过屏蔽，在传播过程中，绝缘物质环氧树脂具有高渗透率的特点，剩余电磁波被第 2 层金属铁吸收。由于存在阻抗不匹配特性，双层屏蔽可以衰减更多的电磁波。故选择外层 0.5 mm 厚度铜，内层 0.5 mm 厚度铁，间距 0.5 mm 填充环氧树脂作为脉冲激光发射模块屏蔽腔体。

由 2.2 节得出，由于孔洞的设置导致腔体屏蔽效能急剧降低，为进一步增强腔体的屏蔽效能，通过连接器实现腔体内外电源信号的传输。母线连接器嵌入尺寸为 8 mm×6 mm×3 mm，外围尺寸设置为 12 mm×10 mm×3 mm。为了耦合公线连接器，在母线连接器上设置 8 mm×6 mm×3 mm 孔洞，将连接器材质设置为钢，其他参数设置不变，建立激光发射模块屏蔽腔体模型，如图 9 所示。模型建立后，其他参数设置不变。当电磁波辐照频率为 0.2~18 GHz 时，腔体的屏蔽效能如图 10 所示。

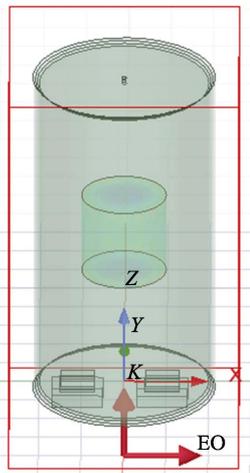


图 9 发射模块屏蔽腔体模型
Fig.9 Model of the transmitting module's shielding cavity

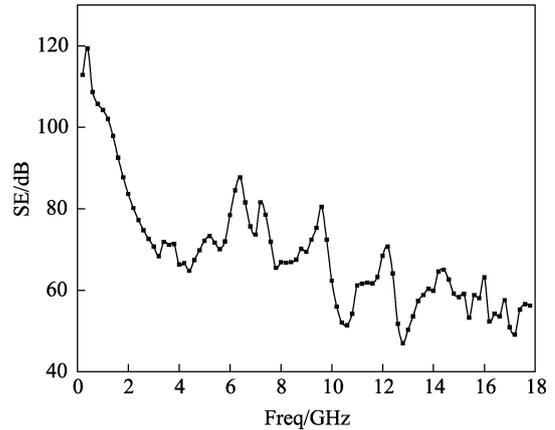


图 10 发射模块屏蔽腔体屏蔽效能
Fig.10 Effectiveness of the transmitting module's shielding cavity

由图 10 可知，当电磁波辐照频率在 0.2~18 GHz 时，腔体屏蔽效能达到 47 dB。由于连接器的设置，使得腔体表面孔洞面积减少，有效解决了由于孔洞引起的电磁泄露现象。与图 8 对比可知，当腔体添加电缆连接器后，屏蔽效能增加约 26 dB，腔体内部观测点场强如图 11 所示。当电磁波辐照频率为 12.8、17.2 GHz 时，腔体内部 PCB 板的场强如图 12 所示。

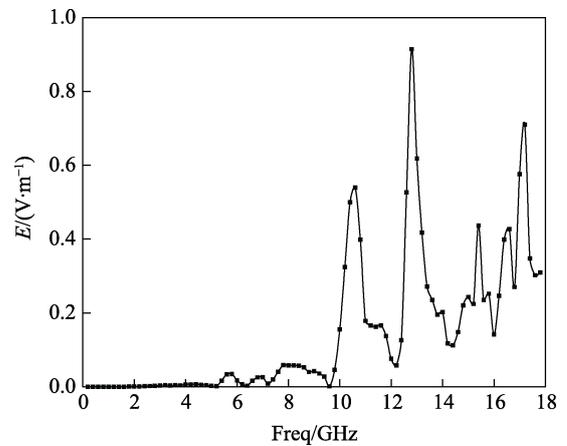


图 11 观测点场强
Fig.11 Field intensity at observation point

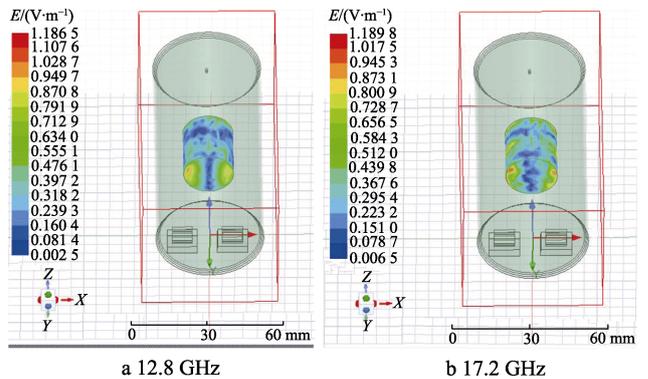


图 12 腔体内部 PCB 板场强
Fig.12 PCB field intensity inside the cavity

由图 11、图 12 可知,在电磁波频率为 0.2~18 GHz 时,腔体内部场强降低到 1.5 V/m 以下,腔体内部得到有效屏蔽。另外,当有电缆直接穿入屏蔽腔体时,会导致腔体的屏蔽效能急剧降低。因此,在电磁兼容设计中,除要对模块的屏蔽腔体进行设计外,还需选用相应信号、电源滤波器,并与模块进行搭接,同时需考虑电路版的放置问题,避开腔内场强高的区域。

3 脉冲激光发射模块电磁干扰仿真分析

脉冲激光发射模块工作频率为 1~100 kHz,当发射模块工作时,需要由 PCB 板产生频率在 1~100 kHz 的脉冲电流,因此模块内部易产生 1~100 kHz 电磁辐射,干扰同系统下的电子设备正常工作。在图 9 所示屏蔽腔体模型的基础上,将腔体内部 PCB 板设置为理想辐射激励源,方向沿 Z 轴负半轴传播,如图 13 所示。

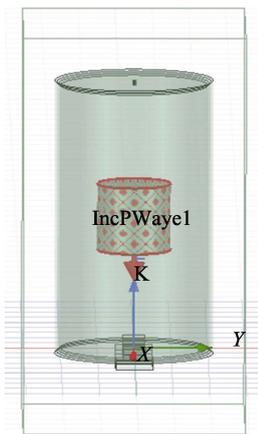


图 13 电磁波传播方向

Fig.13 Electromagnetic wave propagation direction

将电磁波工作频率设置为 1~100 kHz,扫频间隔为 1 kHz,其他参数设置如上。为了探究双层屏蔽腔体材质不同对内外屏蔽效能的影响,在腔体外部设置电磁波激励源,工作频率设置为 1~100 kHz,扫频间隔为 1 kHz,腔体屏蔽效能如图 14 所示。

由图 14 可知,当电磁波频率在 1~100 kHz 时,随着频率的增加,腔体的屏蔽效能逐渐变大。当辐射源在外部激励时,腔体屏蔽效能较高,为 28 dB。此时,腔体外层为铜材料,内层为铁材料。进一步分析得出,当屏蔽幅值较高的低频电磁场时,金属铁易被饱和磁化,失去屏蔽效果,而金属铜不易饱和。当铜作为第 1 层屏蔽材料时,可以进一步衰减电磁波,再由铁进一步吸收衰减。当电磁波辐射频率较低时,腔体屏蔽效能主要依靠材料反射损耗。电磁波频率越低,材料磁导率越高,反射损耗效能越高,此时主要由腔体内层金属铁屏蔽电磁波。当电磁波频率逐渐增大时,材料的反射损耗逐渐降低,吸收损耗逐渐增大,

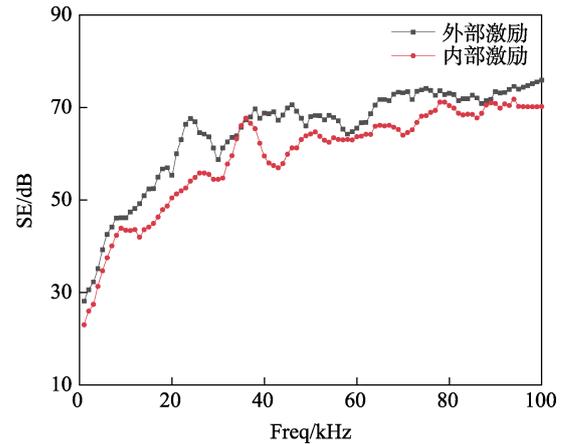


图 14 腔体屏蔽效能

Fig.14 Cavity shielding efficiency

电磁波频率越高,材料磁导率、电导率越高,吸收损耗越大,此时腔体外层金属铜与内层金属铁对电磁波屏蔽均起良好作用。仿真结果表明,屏蔽腔体的设置可有效减弱激光发射模块工作时带来的电磁干扰问题。

4 结论

为提高脉冲激光发射模块电磁兼容性能。本文基于 HFSS 仿真软件,以电磁敏感度、电磁干扰 2 个方面对脉冲激光发射模块腔体屏蔽效能进行仿真分析,主要得出以下结论:

1) 当电磁波辐照频率为 0.2~18 GHz 时,腔体屏蔽效能随频率的增大而减小。腔体使用单层屏蔽时,使用高电导率材料腔体屏蔽效能较高,屏蔽效能与腔体厚度成正比。当腔体厚度相等时,双层屏蔽的屏蔽效能高于单层屏蔽。孔洞是导致腔体屏蔽效能下降的主要原因,当使用连接器代替孔洞信号传输时,腔体屏蔽效能增加。

2) 当电磁波辐照频率为 1~100 kHz 时,腔体屏蔽效能随频率的增大而增加。当辐射源在外部激励时,双层屏蔽腔体使用外层铁内层铜屏蔽效能较高。

3) 使用外层 0.5 mm 厚度铜,内层 0.5 mm 厚度铁,间距 0.5 mm 填充环氧树脂作为脉冲激光发射模块屏蔽腔体,当电磁波辐照频率为 1~100 kHz 时,腔体屏蔽效能达到 28 dB;当电磁波辐照频率为 0.2~18 GHz 时,腔体屏蔽效能达到 47 dB。

该仿真结果对工程实践电磁兼容屏蔽腔体设计具有很好的参考价值与借鉴意义。在实际工程实践屏蔽腔体设计中,除了利用上述进行优化,还应考虑局部屏蔽、滤波、接地、板内合理布线等提高模块电磁兼容性。

参考文献:

- [1] 何立萍. 战场电磁环境及其对导弹武器装备的威胁[J].

- 航天电子对抗, 2009, 25(1): 1-3.
- HE Li-ping. Electromagnetic Environment and Its Threat to Missile Weapon Equipment in the Battlefield[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(1): 1-3.
- [2] 葛晶晶, 姚竹亭, 甄晓辉. 电磁兼容设计在电子武器和装备中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(4): 158-160.
- GE Jing-jing, YAO Zhu-ting, ZHEN Xiao-hui. Application of EMC Design to Electronic Weapon and Equipment[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(4): 158-160.
- [3] 刘靖洁, 刘晓方, 陈桂明. 屏蔽在电磁兼容设计中的应用[J]. 山西电子技术, 2006(5): 25-26.
- LIU Qing-jie, LIU Xiao-fang, CHEN Gui-ming. The Application of Shielding in Electromagnetic Compatibility Technology[J]. Shanxi Electronic Technology, 2006(5): 25-26.
- [4] SEVGI L. Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(1): 211-216.
- [5] REN Dan, DU Ping-an. Numerical Simulation for the Shielding Effectiveness of Enclosure with Apertures[C]//2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu: IEEE, 2012.
- [6] BASYIGIT I B, CAGLAR M F, HELHEL S. Magnetic Shielding Effectiveness and Simulation Analysis of Metallic Enclosures with Apertures[C]//2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). Bursa: IEEE, 2015.
- [7] KUBÍK Z, SKÁLA J. Shielding Effectiveness Simulation of Small Perforated Shielding Enclosures Using FEM[J]. Energies, 2016, 9(3): 129.
- [8] BACHIR G, ABDECHAFIK H, MECHERI K. Comparison Electromagnetic Shielding Effectiveness between Single Layer and Multilayer Shields[C]//2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra: IEEE, 2016.
- [9] CHIEN Tang tan, MINH TU B T, DO T N. Improvement of Shielding for Electromagnetic Compatibility[C]//2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). Danang: IEEE, 2016.
- [10] 何勇, 张祥金. 小型化脉冲激光引信发射系统电磁辐射干扰研究[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 149-156.
- HE Yong, ZHANG Xiang-jin. Electromagnetic Radiation Interference of Miniaturized Pulse Laser Fuze Emission System[J]. Applied Laser, 2019, 39(1): 149-156.
- [11] 冯颖, 张合, 张祥金. 脉冲激光引信发射接收模块的电磁干扰[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 249-254.
- FENG Ying, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Electromagnetic Interference Technique of Transmitter and Receiver Modules for Pulsed Laser Fuze[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 249-254.
- [12] 宋定宇. 基于结构小型化的脉冲激光电磁辐射干扰研究[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 1012-1017.
- SONG Ding-yu. Research on EMI of Pulsed Laser Based on Miniaturization of Structure[J]. Applied Laser, 2019, 39(6): 1012-1017.
- [13] 张郑, 冯成德. 基于 HFSS 的电源机箱屏蔽效能的仿真分析[J]. 机械, 2020, 47(7): 35-41.
- ZHANG Zheng, FENG Cheng-de. Simulation Analysis of Shielding Effectiveness of Power Supply Case Based on HFSS[J]. Machinery, 2020, 47(7): 35-41.
- [14] 于海波, 张茂强, 张晓波, 等. 高集成电力电子设备外壳屏蔽效能评估[J]. 安全与电磁兼容, 2021(1): 69-72.
- YU Hai-bo, ZHANG Mao-qiang, ZHANG Xiao-bo, et al. Shielding Effectiveness Evaluation of High Integrated Power Electronic Equipment Enclosure[J]. Safety & EMC, 2021(1): 69-72.
- [15] 宋航, 饶育萍, 张超, 等. 有孔双层屏蔽腔体的宽频带屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1684-1688.
- SONG Hang, RAO Yu-ping, ZHANG Chao, et al. Shielding Effectiveness of Double Layer Rectangular Enclosure with Aperture to Wide Band Electromagnetic Pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1684-1688.
- [16] 胡叶青, 林春生, 周建军. 多层圆柱壳屏蔽体的径向静磁屏蔽效能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1306-1309.
- HU Ye-qing, LIN Chun-sheng, ZHOU Jian-jun. Analysis of Magneto-Static Shielding Effectiveness of the Double-Layer Spherical Enclosure[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1306-1309.
- [17] 张岩, 田铮, 王川川, 等. 双层腔体屏蔽效能随孔缝位置与数量变化规律研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3350-3360.
- ZHANG Yan, TIAN Zheng, WANG Chuan-chuan, et al. Research on the Variation of Shielding Effectiveness of Double-Layer Shielding Enclosure with the Position and Number of Apertures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3350-3360.
- [18] 吴刚, 邵小亮, 孙靖虎, 等. 有孔双层矩形金属机壳屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 94-99.
- WU Gang, SHAO Xiao-liang, SUN Jing-hu, et al. Shielding Effectiveness of Metallic Double-Stage Enclosures with Apertures[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 94-99.
- [19] GJB 151B—2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S].
- GJB 151B—2013, Military Equipment and Subsystem Electromagnetic Emission and Sensitivity and Sensitivity Requirements and Measurements[S].
- [20] GJB 573B—2020, 引信及引信零部件环境与性能试验方法[S].
- GJB 573B—2020, Environmental and Performance Test Methods for Fuzes and Fuze Components[S].
- [21] 林厦. 电子设备的强电磁脉冲屏蔽防护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

- LIN Xia. Research on Shielding Protection Against Strong Electromagnetic Pulse for Electronic Equipments[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [22] 王园, 赵家升. 双层屏蔽的分析计算[C]//全国电磁兼容学术会议. 青岛:中国通信学会, 2000.
- WANG Yuan, ZHAO Jia-sheng. Analysis and calculation of double shielding[C]//National Electromagnetic Compatibility Academic Conference. Qingdao: Chinese Communication Society, 2000.
- [23] 方伟. 双屏蔽层屏蔽效能分析及其设计应用[J]. 科技创新导报, 2011, 8(36): 109.
- FANG Wei. Analysis of Shielding Effectiveness of Double Shielding Layers and Its Design and Application[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 8(36): 109.
- [24] 顾金良, 王松岩, 李安源. 电子设备的屏蔽效能分析及设计方法[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, 26(4): 76-80.
- GU Jin-liang, WANG Song-yan, LI An-yuan. Analysis and Design of Shielding Efficiency in Electronic Equipment[J]. Intelligence Command Control and Simulation Technigues, 2004, 26(4): 76-80.
- [25] GJB1210—1991, 接地、搭接和屏蔽设计的实施[S]. GJB1210—1991, Implementation of Grounding, Bonding and Shielding Designs[S].
- [26] GJB6785—2009, 军用电子设备方舱屏蔽效能测试方法[S]. GJB6785—2009, Test Method for Shielding Effectiveness of Military Electronic Equipment Shelter[S].

责任编辑: 刘世忠