

文章编号: 2095-4980(2019)01-0090-06

电磁弹射装置脉冲强磁场防护设计

李巧燕, 王保国, 郭文卿, 张德伟, 马通边, 郭树楷, 吕 哲, 舒行科

(中国电子科技集团公司 第 33 研究所, 山西 太原 030006)

摘 要: 针对电磁弹射装置激励和发射过程中产生的感应脉冲强磁场对周边电子设备造成的电磁干扰(EMI)威胁特征, 基于有限积分技术(FIT)对弹射装置内磁场环境进行仿真分析, 并对发射器结构开展磁场屏蔽特性设计研究。以某装置应用为例, 在 5 kHz 以下低频段, 内部磁场值可达 10 T, 通过多层梯度复合磁屏蔽结构设计, 实现磁场屏蔽效能达 40 dB, 满足了该系统磁防护设计要求。

关键词: 电磁弹射装置; 电磁防护; 脉冲强磁场; 屏蔽效能; 仿真

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0090

Protection design of electromagnetic ejection device with pulse high magnetic field

LI Qiaoyan, WANG Baoguo, GUO Wenqing, ZHANG Dewei,

MA Tongbian, GUO Shukai, LYU Zhe, SHU Xingke

(No.33 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi 030006, China)

Abstract : Previous studies mainly focus on electromagnetic environment simulation of electromagnetic launching device, but rarely take account of the magnetic protection. According to the minatory characteristics of electromagnetic radiation and Electro-Magnetic Interference(EMI) which the electromagnetic launching device's enclosure is exposed to, and based on the Finite Integration Technique(FIT), the simulation research of magnetic shielding character of the device enclosures is conducted and the magnetic field shielding characteristics of the device are studied. Taking a device for example, the maximum magnetic flux density is 10 T, the main frequency is below 5 kHz, and the magnetic frequency is 40 dB, which meets the design requirements of the system magnetic protection.

Keywords: electromagnetic launching device; electromagnetism protection; pulsed high magnetic field; shielding effectiveness; simulation

电磁弹射装置是一种利用电磁力将特定物体加速到超高速的发射装置^[1], 作为该装置的目标物在管内发射过程中将承受比常规装置发射更恶劣的电磁环境: 包括脉冲电流在导轨与电枢上感应产生的脉冲强磁场; 电枢相对导轨高速滑动摩擦产生的等离子体电磁辐射; 脉冲电源与弹射装置负载回路接通时电路瞬变产生的电磁辐射; 出炮口瞬间弹射装置回路磁通突变感应产生的强电场^[2]。其中弹射装置特有的脉冲强磁场是电子设备受到的最主要电磁干扰, 同时对绝大多数电子设备有可能会产生致命的破坏。所以, 针对脉冲强磁场的防护已成为电磁弹射系统电磁安全性的关键内容。电磁炮对周边电子系统的影响: 电磁炮发射时会瞬时产生几十千伏电流, 能够形成几十~几千赫兹的强磁场干扰, 会对周边供电系统造成电压输出不稳; 控制、监控系统造成失效; 话务通信设备的话音质量下降等现象。同时脉冲强磁场的高磁通密度也会对弹丸的磁敏感探测元件以及用于修正弹道的电机等造成巨大伤害。

以某装置应用为例, 其产生的干扰源辐射场属于低频脉冲强磁场^[3], 磁防护难度大, 设计要求高: 一方面针对该装置需要体积小、质量小, 并实现良好屏蔽; 另一方面针对强磁场需采用导电材料与高饱和度高导磁材料结合的多层结构来实现。因此基于有限积分技术(FIT)进行仿真研究和复合结构的磁防护设计尤为重要。

收稿日期: 2017-06-17; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家国防科技合作专项资助项目(L2015RR0080)

1 弹射装置发射过程仿真模型的设计

对于电磁弹射装置发射过程的研究,采用静态弹射装置磁场代替弹射装置发射过程磁场。为了更好地模拟弹射装置实际发射过程中电流及磁场的分布,根据弹射装置发射原理建立考虑速度趋肤效应的弹射装置面电流几何模型,最后给出弹射装置脉冲电流特性。

1.1 电磁弹射装置发射原理

电磁弹射装置发射原理^[4]如图 1 所示,脉冲大电流 I 在导轨与电枢上感应产生强磁场 B ,电枢上的脉冲电流与导轨磁场作用产生安培力 $F = \int_V (J \times B) dV$,推动电枢在导轨间高速滑动,同时将电枢前端的集成发射包以超高速发射出去。

电磁弹射装置发射过程是典型的瞬态、强非线性、多物理场耦合、多尺度问题。电磁弹射装置发射持续时间在 ms 级,脉冲大电流在电枢与导轨之间感应出十几 T 的磁场,产生的电磁力将电枢以几万 g 的加速度发射出炮口。相应的等效电路模型如图 2 所示。其中 I 为脉冲电源馈给电流, U_b 为炮尾电压, U_a 为电枢处电压降。为分析方便,忽略电枢运动产生的反向电动势。 L_t 和 R_t 分别为导轨电感与电阻,由于电枢运动, L_t 和 R_t 是实际接入电路导轨长度 L 的函数。 R_a 为电枢电阻, V_p 为电枢及弹丸速度。

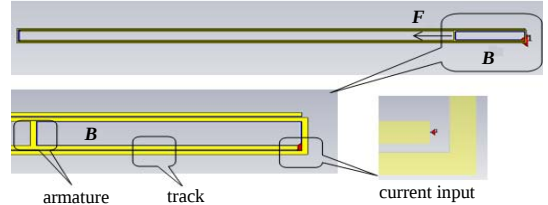


Fig.1 Principle of electromagnetic ejection device
图 1 电磁弹射装置原理

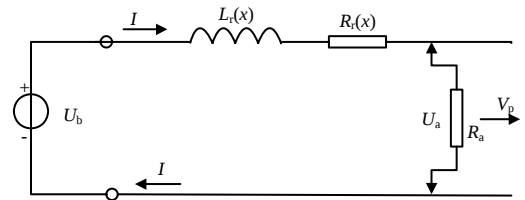


Fig.2 Circuit model of electromagnetic ejection device
图 2 电磁弹射装置电路模型

1.2 电磁弹射装置面电流几何模型

电磁弹射装置发射过程的速度趋肤效应使得电流集中于导轨内侧与电枢后边缘,而流经导轨与电枢的脉冲电流自身的趋肤效应及邻近效应,进一步增强这种分布趋势^[5-6]。

如果直接建立弹射装置的三维全尺寸模型,模型中电流分布将与实际受到速度趋肤效应影响的电流分布存在较大差别,并进一步影响弹射装置的磁场分布与电枢所受洛伦兹力。因此考虑到速度趋肤效应对电流分布的影响,建立电磁弹射装置几何模型用于磁场分析,图 3 为模型示意图。

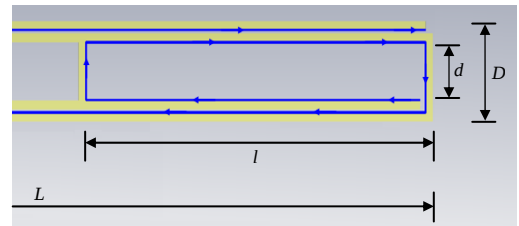


Fig.3 Geometry of electromagnetic orbit
图 3 电磁轨道几何模型图

1.3 电磁弹射装置脉冲电流特性

电磁弹射装置电源目前主要采用高储能电容器组模块组成脉冲形成网络(Pulse Forming Network, PFN),各模块同时触发放电可得到单峰脉冲电流,各模块按时序依次放电可得到平稳电流区间,使得集成发射包加速度保持平稳。

弹射装置面电流分布模型由表面电流特征表示,仿真输入^[7]采用双指数脉冲电流 $I = I_0(e^{-at} - e^{-bt})$,近似代替实际脉冲电源放电电流曲线。如图 4 所示的脉冲电流峰值为 620 kA,峰值时刻在 0.4 ms。

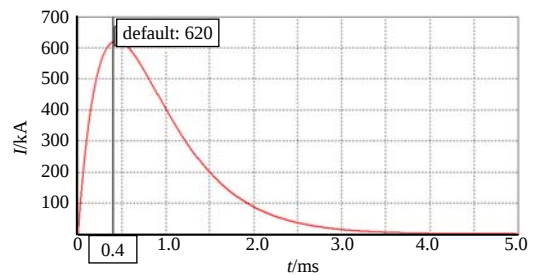


Fig.4 Pulse current curve
图 4 脉冲电流曲线

2 某弹射装置内磁环境分析

2.1 弹射装置内磁场时域与频域分布

在电枢附近 YOZ 面上选取多个监测点,如图 5 所示。仿真计算得各监测点的磁场强度时域变化规律如图 6 所示。通过仿真磁通量密度主要集中在轨道内侧及电枢后端。轨道附近 YOZ 平面各位置

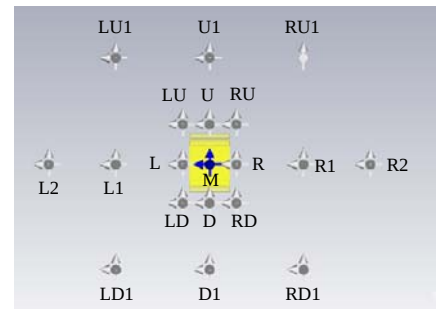


Fig.5 Layout of magnetic field monitoring points
图 5 磁场监测点布局图

中, 点 M、点 L、点 R 处磁场强度较大, 其他点磁场强度较小约为最大值的 1/10, 点 L1(R1)较点 L(R)衰减到近 1/16, 点 L2(R2)较点 L(R)衰减到近 1/50。可见低频脉冲磁场呈明显空间衰减特性, 随着离轨道距离的增大, 磁场强度值衰减尤为严重。分析脉冲磁场频谱特性, 对考察点 L1 处磁场进行快速傅里叶变换, 得到图 7 所示 L1 点处脉冲磁场幅频曲线, 主要频率成分集中在 5 kHz 以下的低频段, 增加了弹射装置磁场的屏蔽防护难度。

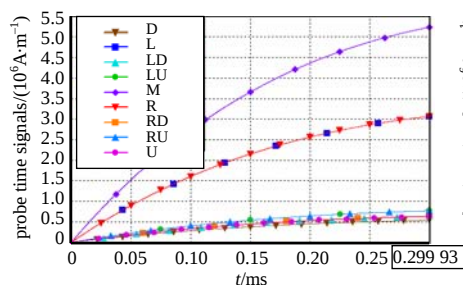


Fig.6 Time domain variation of pulsed magnetic field
图 6 脉冲磁场时域变化

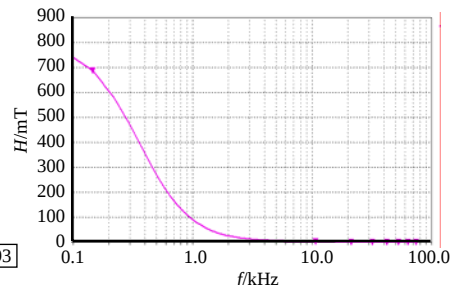
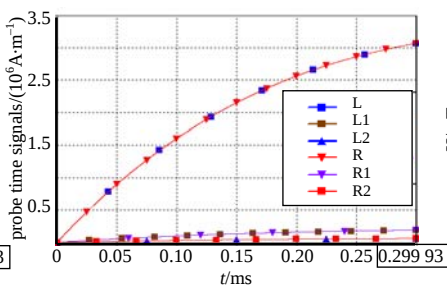


Fig.7 Spectrum characteristics of pulsed magnetic field at the point of L1 observation
图 7 考察点 L1 处的脉冲磁场频谱特性

2.2 电枢位置变化引起磁场变化分布

1) 随着电枢位置变化, 电枢距离电流输入端越来越远($l=100\text{ mm}, 200\text{ mm}, 300\text{ mm}, 400\text{ mm}, 500\text{ mm}, 1\ 000\text{ mm}$)时, 对于电流输入端某固定点 R 的磁场强度变化情况如图 8 所示。 $l=100\text{ mm}$ 时, 磁场强度最大, $l=200\text{ mm}$ 及更远时已经衰减到近 1/40。

2) 当电枢处于不同位置($l=100\text{ mm}, 200\text{ mm}, 300\text{ mm}, 400\text{ mm}, 500\text{ mm}, 1\ 000\text{ mm}$)时, 对于电枢附近某固定点 R' 的磁场强度变化情况如图 9 所示。由于没有考虑电枢运动和电流注入时间的关系, 只是针对不同电枢位置, 重新输入电流来仿真, 可以看出, 磁场最大值就在电枢附近, 变化不大。

2.3 脉冲强磁场全时域变化分布

特别考察点 M 和点 L(R)整个时域上磁场变化曲线, 确定磁场最大值。峰值时刻与脉冲电流峰值时刻一致, 均为 0.4 ms。峰值时刻 M 点处磁场强度最大约为 10 T, 如图 10 所示。

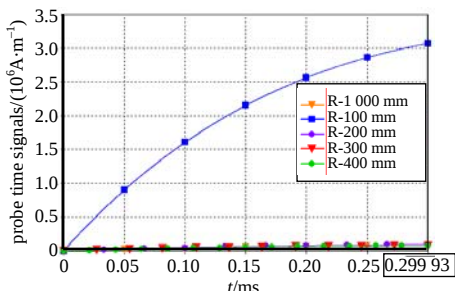


Fig.8 Field change of current input port with armature position change
图 8 随电枢位置变化的电流输入端口磁

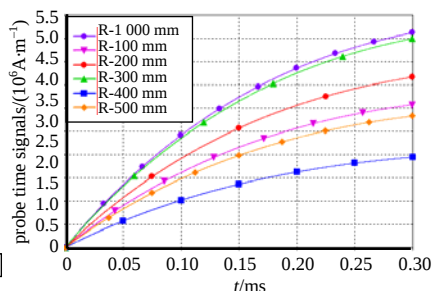


Fig.9 Change of the magnetic field near the armature position with the armature position
图 9 随电枢位置变化的电枢附近磁场变化情况

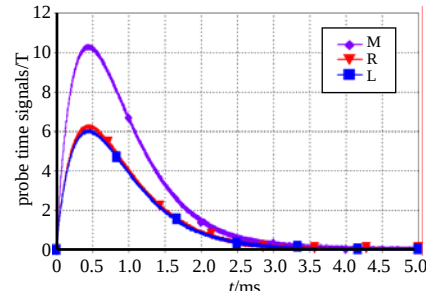


Fig.10 All time variation of pulse magnetic field
图 10 脉冲磁场全时域变化

3 某弹射装置脉冲强磁场试验分析

针对某弹射装置脉冲强磁场特性确定其试验测量方法以及测量位置的选取, 并针对脉冲强磁场存在响应时间短、磁场强度大的特殊性, 采用实时频谱仪测量频段: 2 Hz~100 kHz, 分辨力带宽: 500 Hz; 外衰减器: 32 dB, 以保护频谱仪设备安全。并对实验结果进行数据分析, 同时与仿真结果作比较, 其磁场曲线趋势有较好相似性。

3.1 某弹射装置充电过程磁场测量

通过图 11 和图 12 所示的两次不同充电电压所测得的电磁场辐射频谱图可以看出, 充电过程中产生的辐射, 主要工频交流电及谐波, 其能量变化随电压的变化不大。

3.2 电磁炮发射过程磁场辐射测量

试验通过对实测数据进行分析处理,将外接衰减、天线系数、线缆损耗等计入,计算其磁通量密度。由图 13 拟合曲线可知,强磁场频率基本集中在 10 kHz 范围之内,且磁场值随着频率的增大呈现下降趋势。

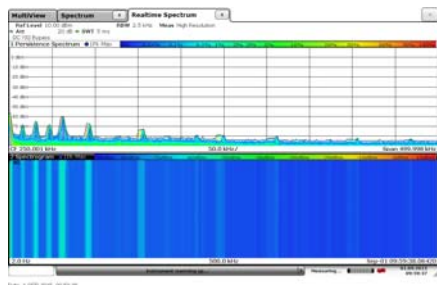


Fig.11 Measurement of the radiation spectrum of the 500 V charged magnetic field
图 11 实测 500 V 充电磁场辐射频谱

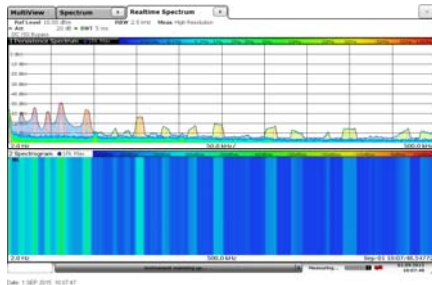


Fig.12 Measurement of the radiation spectrum of the 2000 V charged magnetic field
图 12 实测 2000 V 充电磁场辐射频谱

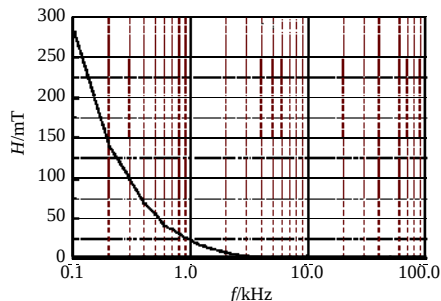


Fig.13 Instantaneous flux density spectrum of gun tube
图 13 炮管击发瞬间磁通量密度频谱图

3.3 试验内容与仿真结果对比

由图 14 可知,仿真结果与测试结果进行对比,曲线有较好的相似性,且在参考点处,仿真结果有较好的磁场值。由于存在漏磁以及实际材质的耦合与趋肤效应,同时在不同材质介质中存在磁导率与磁饱和度的差异性,故对轨道内部磁场存在积聚作用也不同。

4 某弹射装置磁屏蔽设计分析

考虑到某弹射装置内脉冲强磁场的辐射干扰威胁,针对强度大、频率低、体积小、质量轻等特性,单纯的导电与导磁材料均难以达到理想的屏蔽效果^[8],需采用饱和磁感应强度高与磁导率大同时电导率高、质量轻的材料复合形成。并针对该应用的整体设计要求,进行多层嵌套结构设计,解决某弹射装置脉冲强磁场辐射干扰的各种问题。同时考虑到某弹射装置的军事应用,拟采用轻质碳纤维取代铜铝等导电材料结合高饱和度与高导磁材料铁钴硅钢实现强磁场屏蔽。该项技术攻关完成后,可将发射器产生的强磁场辐射衰减至 ≤ 0.01 T。

4.1 磁屏蔽模型

为了减小脉冲磁场对外电磁辐射的强度,在发射器外部设计多层屏蔽。按照某装置应用,设置制备相应圆柱体模型。考虑到对强磁场($B \leq 2.2$ T)防护,需要设置具有高饱和度铁磁材料作为最内层衰减,同时考虑到军事轻质应用,采用碳纤维导电材料作为中介层,兼顾结构强度及屏蔽部分交变磁场的作用,外部采用兼具高饱和度与高磁导率材料的硅钢。

4.2 屏蔽后脉冲强磁场时域变化情况

仿真计算得各监测点的磁场强度时域变化规律如图 15 所示。定性而言,变化规律与屏蔽前一致。数值上,屏蔽层内磁场加强,屏蔽层外磁场显著降低。

4.3 屏蔽前后磁场的三维分布

磁场分布三维结果如图 16 所示,屏蔽前后磁场分布对比如图 17 所示,双层屏蔽后磁场分布如图 18 所示。

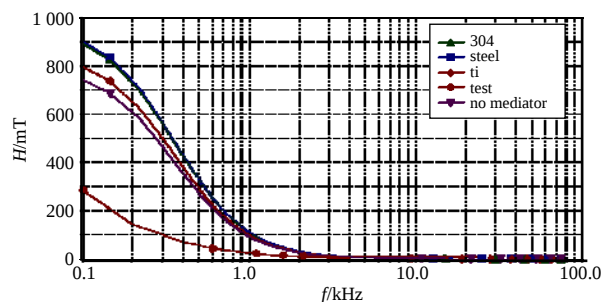
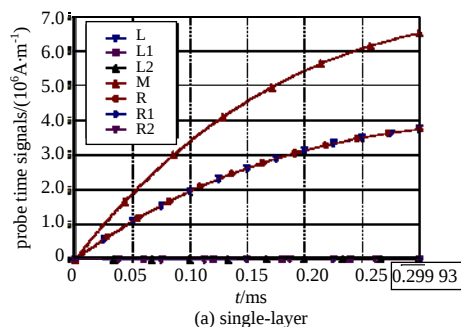
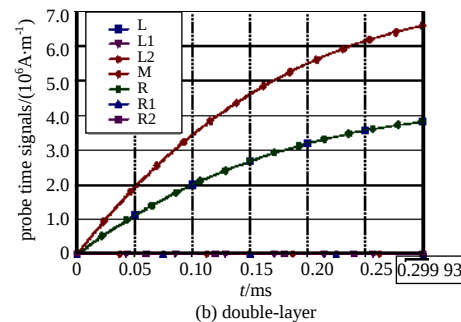


Fig.14 Comparison between simulation and test curves
图 14 仿真与测试曲线对比



(a) single-layer



(b) double-layer

Fig.15 Time domain of pulse magnetic field after single-layer and double-layer shielding
图 15 单层和双层屏蔽后脉冲磁场时域变化

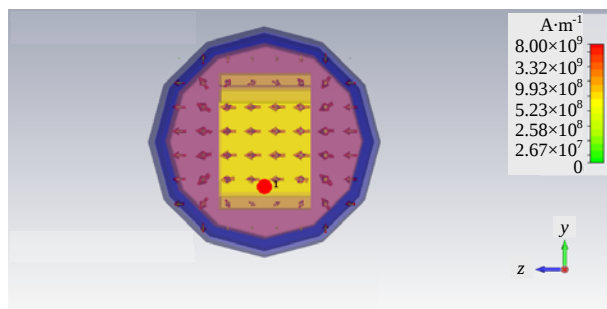


Fig.16 Three dimensional magnetic field simulation distribution
图 16 三维磁场仿真分布

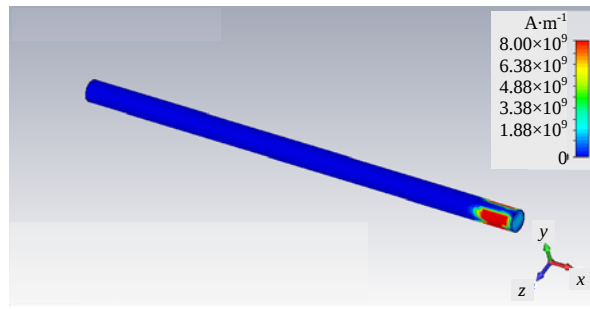


Fig.17 Magnetic field distribution after double-layer shielding
图 17 双层屏蔽后磁场分布

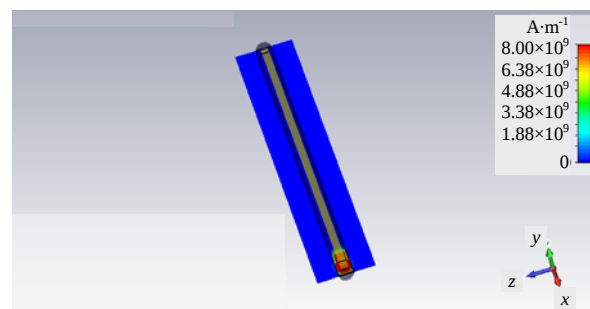
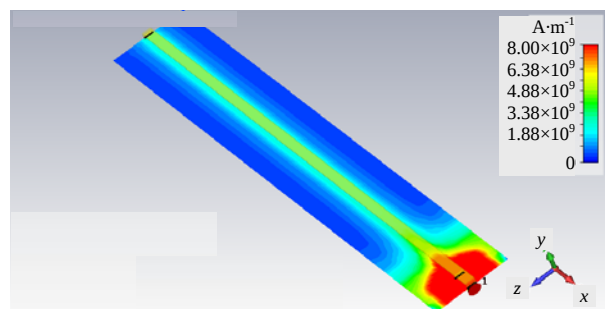


Fig.18 Magnetic field distribution of the cross section of shield
图 18 屏蔽前后截面磁场分布图

4.4 磁屏蔽效能评估

电磁弹射装置内脉冲强磁场具有磁通密度大、频率范围低、瞬态变化等特点，针对某弹射装置内强磁场，要求屏蔽目标达到磁场有效防护。

屏蔽后考察点处磁场屏蔽效能 $SE^{[9]}$ 定义为： $SE = 20\lg(B_1/B_2)$ 。

由于某弹射装置磁场瞬态变化， B_1 与 B_2 为无/有屏蔽情况下的峰值磁场强度。

单层屏蔽效果：L1 点处磁场为 0.067 T，屏蔽效能： $SE \approx 11$ dB。

双层屏蔽效果：L1 点处磁场为 0.002 5 T，屏蔽效能： $SE \approx 40$ dB。

对轨道内部强磁场进行多层磁防护设计后，外部磁场值衰减到 0.002 5 T (≤ 0.01 T)，完全起到磁防护作用，并避免了发射瞬间强电场对周边电子系统产生的辐射威胁。

5 结论

本文采用有限积分技术对电磁弹射装置内磁场环境以及产生的强磁场防护特性进行了仿真研究，同时结合轨道内脉冲强磁场的低频特性，对某弹射装置发射器进行磁场屏蔽有效防护设计，并研究了周边电子系统在外电磁波辐射下的磁防护性能。研究结果有助于提高电磁弹射装置激励和发射产生的脉冲强磁场对周边电子设备磁辐射防护安全性。

参考文献：

- [1] LEHMANN P, RECK B, VO M D, et al. Acceleration of a suborbital payload using an electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 480–485.
- [2] 马歇尔·理·埃. 电磁轨道炮的科学与技术[M]. 王莹, 译. 北京: 兵器工业出版社, 2006. (MARSHALL R A. The science and technology of electromagnetic rail gun[M]. Translated by WANG Ying. Beijing: Weapon Industry Press, 2006.)
- [3] CIONLINI R, SCHNEIDER M, TELLINI B. The use of electronic components in railgun projectiles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 578–583.
- [4] 王刚华, 谢龙, 王强. 电磁轨道炮电磁力学分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(1): 69–76. (WANG Ganghua, XIE Long, WANG Qiang. Electromagnetic analysis of electromagnetic rail gun[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2011(1): 69–76.)
- [5] 王振春, 何锁纯, 刘福才. 增强型轨道电磁炮电磁过程的仿真研究[C]// 中国电工技术学会学术年会论文集. 北京:

- 中国电工技术学会, 2011:189–193. (WANG Zhenchun, HE Suochun, LIU Fucui. Simulation research of electromagnetic process in the augmented railgun[C]// Proceedings of the Annual Meeting of the China Electrotechnical Society of Science and Technology. Beijing, China: China Electrotechnical Society, 2011:189–193.)
- [6] SCHNEIDER M, RACKAUSKAS J, LOFFLER M J. Electromechanical modeling of components of a linear electromagnetic accelerator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10):2796–2799.
- [7] BECHERINI G, DI FRAIA S, CIOLINI R, et al. Shielding of high magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1):604–609.
- [8] 贾强. 电磁轨道炮技术及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2012:7–10. (JIA Qiang. Research on electromagnetic railgun with applications[D]. Taiyuan, China: Zhongbei University, 2012:7–10.)
- [9] POUHE D, MONICH G. Assessment of shielding effectiveness of gaskets by means of the modified Bethe's coupling theory[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(2):305–315.

作者简介:



李巧燕(1979–), 女, 山西省晋中市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护技术. email:cdliqy88@126.com.

王保国(1965–), 男, 山西省晋中市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护.

郭文卿(1985–), 男, 山西省代县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护仿真.

张德伟(1985–), 男, 山西省吕梁市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护技术.

郭树楷(1985–), 男, 山西省吕梁市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护技术.

吕 哲(1986–), 男, 山西省运城市人, 双学士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护技术.

马通边(1971–), 男, 山西省晋中市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护.

舒行科(1983–), 男, 武汉市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护技术.