

高过载强磁环境下的电子封装一体化防护方法

刘福康¹, 刘运淇², 葛双超^{1*}, 郑涛¹, 李俊龙¹, 李杰¹

(1. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 国防科技创新研究院, 北京 100071)

摘要: 针对电磁轨道炮高过载强磁冲击环境下弹载电子封装设备极易损坏失效的问题, 对高过载强磁冲击传播规律进行分析, 提出了针对高过载强磁环境的电子封装设备一体化防护方法。采用波传播理论推导了多层异质中应力波和电磁屏蔽机理, 构建了应力波和电磁波屏蔽效能与材料厚度的约束模型; 运用NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, 非支配排序遗传算法II)算法得到了Pareto前沿, 通过最优参考点距离法完成了对防护结构参数的优化, 并且通过低温压接及螺纹紧固的方式完成了一体化防护系统的设计及加工。ANSYS仿真结果显示, 优化的防护结构的综合屏蔽性能提升了71.4%, 基于屏蔽模型建立的优化算法所指导的防护结构综合屏蔽性能提升了4.1%。

关键词: 电磁轨道炮; 应力波屏蔽; 电磁波屏蔽; NSGA-II算法; 结构仿真

中图分类号: TP242

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0011

引用格式: 刘福康, 刘运淇, 葛双超, 等. 高过载强磁环境下的电子封装一体化防护方法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(2): 192-202.

LIU Fukang, LIU Yunqi, GE Shuangchao, et al. Integrated protection method for electronic packaging in high overload and strong magnetic fields[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(2): 192-202.

Integrated Protection Method for Electronic Packaging in High Overload and Strong Magnetic Fields

LIU Fukang¹, LIU Yunqi², GE Shuangchao^{1*}, ZHENG Tao¹, LI Junlong¹, LI Jie¹

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Defense Science and Technology Innovation Institute, Beijing 100071, China)

Abstract: To address the vulnerability of onboard electronic packaging equipment to damage and failure under the high overload and strong magnetic shock environment of electromagnetic railguns, this study analyzed the propagation patterns of high overload and strong magnetic shocks. It proposed an integrated protection method for electronic packaging equipment tailored to high overload and strong magnetic environments. Using wave propagation theory, we derived the stress wave and electromagnetic shielding mechanisms within multilayer heterogeneous media, and constructed a constrained model linking stress wave and electromagnetic wave shielding effectiveness to material thickness. The NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) was employed to obtain the Pareto front. The optimal reference point distance method was then used to

收稿日期: 2025-10-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(GZC20241588); 国家自然科学基金资助项目(61973280, 202103021224186)

作者简介: 刘福康(2001—), 男, 硕士生, 主要从事弹载MEMS惯性系统设计方面的研究。

* 通信作者: 葛双超(1985—), 女, 副教授, 博士, 主要从事自动控制技术、微弱信号检测设计方面的研究。E-mail: geshch@nuc.edu.cn。

optimize the protective structure parameters. The integrated protective system was designed and fabricated using low-temperature crimping and threaded fastening techniques. ANSYS simulation results demonstrate that the optimized protective structure achieves a 71.4% improvement in overall shielding performance. The protective structure guided by the optimization algorithm based on the shielding model improves a 4.1% in overall shielding performance.

Key words: electromagnetic railgun; stress wave shielding; electromagnetic wave shielding; NSGA-II algorithm; structural simulation

0 引言

新型动能武器电磁炮采用多级电磁加速装置能够在近距离、短时间内获得巨大的动能,具有速度大、附带损伤小、不易拦截等优势,成为各军事大国的研究热点^[1]。为实现对目标的精确打击,其制导化成为必然趋势。然而,由于瞬间高幅值、大脉宽过载以及强磁冲击的极端环境,电子组件的有效存活成为电磁炮制导化的关键。

为实现强电磁冲击极端环境下电子组件的有效防护,Wen等^[2]提出了基于等效电路的电磁轨道炮仿真方法;Xiao等^[3]基于机电耦合模型对中型轨道炮发射器电磁动力学行为展开分析,且数值模型与实验结果可靠性良好,但没有对模型做不同激励电流下的适应性验证;Yang等^[4]分析了导电和磁性材料对磁场的影响,最后得出“外层导电+内层磁性”组合可以实现屏蔽磁场时平稳无波动。Diahovchenko等^[5]针对电表脉冲电流互感器这类敏感元件的布局与朝向,开发了不同屏蔽结构以保护其免受外部磁场影响,对实心 and 多层等多种几何形状的屏蔽体进行建模并比较其磁通分流效率,但多层结构仅是坡莫合金中间用薄纸夹层分开,并未用多层异质结构屏蔽磁场;Lou等^[6]阐明了集肤效应与邻近效应导致电流对电磁轨道炮轨道的影响;Gu等^[7]建立了四平行非常规导轨增强型轨道炮的三维数值模型,用于模拟其内弹道过程并实现轨道炮多物理场耦合计算;Zhang等^[8]通过研究引信缓冲材料对应力波的相应特性,建立了应力波在引信内部的传播模型,最后发现防竹型缓冲防护结构可有效保护引信内部电子元件;Feng等^[9]基于高冲击加速度计与二阶振动系统建立了双层异质结构动态响应模型,通过求解惯性载荷峰值衰减比来表征结构的缓冲吸能性能,发现相较于单层结构,外层为环氧树脂、内层为聚氨酯的双层异质结构的缓冲效果最

大提升 35.6%;Guo等^[10]构建了单脉冲和连续多脉冲的动力学响应模型,并搭建了基于套筒式子弹的连续双脉冲高过载冲击试验平台,并以加速度衰减比指标,分析了多层结构在多脉冲下的防护性能。与单层结构相比,双层结构的加速度衰减比最高可提升 26.13%,结果表明环氧树脂-聚氨酯组合的防护性能最优,加速度衰减比可达 44.68%。

目前国内外针对电磁轨道炮进行的研究较多,但缺少对高过载强电磁极端环境下的一体化防护方法的研究。电磁轨道炮在发射瞬间会产生应力波与电磁波。本文正是基于波动学理论,深入分析了屏蔽结构对于应力波和电磁波的屏蔽机理,得到一种高过载强电磁屏蔽结构,并通过电磁轨道炮实验验证了其可以在 8 ms 脉宽、20 000g 过载、7 T 磁感应强度的极端环境中存活。

1 防护机理

本设计采用磁路理论近似计算磁屏蔽效能,进而使用 NSGA-II 算法进行优化,从而选择一种屏蔽效能最佳的厚度组合,同时使用 ANSYS Maxwell 仿真分析轨道炮的屏蔽效能,最后通过电磁轨道炮实验进行验证。

1.1 基于波动学理论的屏蔽模型

单色平面波函数表达式为

$$\boldsymbol{E} = E_0 e^{(\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{r} - \omega t)}, \quad (1)$$

式中: $|E_0|$ 为振幅; $\boldsymbol{k}$ 为波矢; ω 为圆频率。振动方向 E_0 和波矢 $\boldsymbol{k}$ 方向相同的为纵波,方向垂直的为横波。在均匀介质中传播的电磁波为横波,而固体既有切变又有容变,因此固体中既可以传播纵波又能传播横波。

对平面波而言,同种介质中的传播过程并不改变波的性质。反射和折射的相位、振幅及能流关系是由界面处的边界条件决定的。结合波阻抗匹配机

制,可以得到波的反射率 R 和透射率 T 的表达式

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (2)$$

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \quad (3)$$

$$R + T = 1, \quad (4)$$

式中: n_1, n_2 分别为第一层和第二层介质的阻抗。

对于波在介质中的衰减,从波的衰减机制的角度分析,应用波动方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, t). \quad (5)$$

在平面波理论模型下,线性、各向同性的均匀介质中,结合波动方程可得波在介质中的振幅衰减可表示为

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (6)$$

式中: A_0 为初始振幅; x 为传播距离; α 为波在介质中的衰减系数。

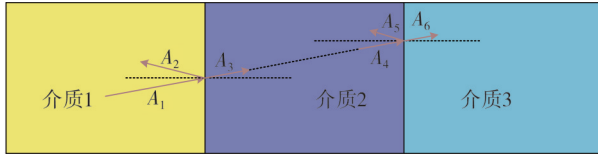


图1 波在不同介质间反射透射的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wave reflection and transmission between different media

$$A_3 = TA_1, A_2 = RA_1, \quad (7)$$

$$A_4 = A_3 e^{-\alpha_2 x}. \quad (8)$$

基于Maxwell方程组的电磁波屏蔽模型,同时考虑了各层结构的波阻抗 $\sqrt{\frac{\mu_n}{\epsilon_n}}$,以及电磁衰减系数 $\alpha_{e(n)}$,其表达式为

$$B_{n+1}^2 = B_n^2 \sqrt{\frac{\epsilon_{n+1}\mu_{n+1}^3}{\epsilon_n\mu_n^3}} \frac{4\eta_n\eta_{n+1}}{(\eta_n + \eta_{n+1})^2} \exp(\alpha_{e(n+1)}d_n), \quad (9)$$

式中: B_n 为电磁波通过第 n 层防护结构后的磁感应强度; ϵ_n 为第 n 层防护结构的介电常数; μ_n 为第 n 层防护结构的磁导率; η_n 为电磁波在第 n 层防护结构中的折射率。

1.2 基于机械波理论的应力波屏蔽模型

为了更清晰地与电磁波的反射折射规律进行对比,可对研究条件进行简化,仅聚焦于垂直入射的场景。在这一特定条件下,若入射波为平面横波或平面纵波,其对应的反射波与折射波也将保持相同的波型(即入射为横波时,反射与折射波

均为横波;入射为纵波时,反射与折射波均为纵波)^[11]。基于此,分别构建入射波、反射波与折射波的振动波函数,具体形式为^[12]

$$\begin{cases} L = L_0 e^{i(kr - \omega t)}, \\ L' = L'_0 e^{i(k'r - \omega't)}, \\ L'' = L''_0 e^{i(k''r - \omega''t)}. \end{cases} \quad (10)$$

与电磁波类似,要得到机械波的反射、折射规律,首先要找出界面处的边值关系。

联合位移连续和能流守恒两个条件得到的关系式 $L_0 = L'_0 = L''_0, k_x = k'_x = k''_x, k_y = k'_y = k''_y$ 可得反射波和折射波振幅与入射波振幅的关系

$$\begin{cases} \frac{L'_0}{L_0} = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1}, \\ \frac{L''_0}{L_0} = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1}. \end{cases} \quad (11)$$

波速

$$v_n = \sqrt{\frac{E_n}{\rho_n}}. \quad (12)$$

结合平均能流密度表达式

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \nu \rho \omega^2 L_0^2, \quad (13)$$

同时考虑波阻抗匹配机制,可得反射率 R 和透射率 T ,表达式分别为

$$R = \left(\frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \right)^2 = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2, \quad (14)$$

$$T = \left(\frac{4\rho_1 v_1 \rho_2 v_2}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \right)^2 = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}. \quad (15)$$

显然满足 $R + T = 1$ 。

能流密度

$$E_n = k A_{n0}^2. \quad (16)$$

波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (17)$$

通过分离式霍普金森杆,得到结构的衰减系数

$$\ln A_0 - \alpha x = \ln A(x). \quad (18)$$

综合以上公式,得应力波屏蔽模型

$$L_{n+1} = L_n \frac{2\rho_n \nu_n}{\rho_n \nu_n + \rho_{n+1} \nu_{n+1}} \exp(\alpha_{a(n+1)} d_n). \quad (19)$$

以上公式中的一些常数见表1。

由于应力波衰减系数与材料的特征值有关,无法通过查阅资料得到,故通过LS-DYNA建立分离式霍普金森杆模型,如图2所示,对所研究的每种材料的衰减系数进行仿真,结果见表2。

表 1 公式参数说明

Tab. 1 Formula parameter description

真空磁导率 $\mu_0/$ ($\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$)	真空介电常数 $\epsilon_0/$ ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)	空气波阻抗 η_0/Ω
$4\pi\times 10^{-7}$	8.854×10^{-12}	377

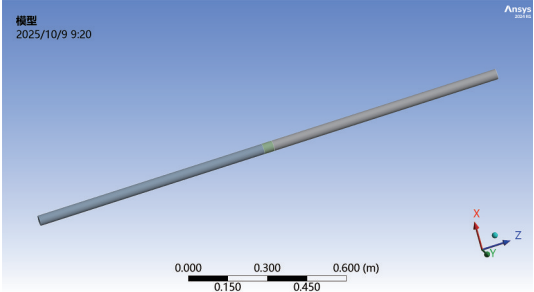


图 2 LS-DYNA 搭建的分离式霍普金森杆

Fig. 2 Separated Hopkinson bar built by LS-DYNA

表 2 仿真所得各材料的衰减系数

Tab. 2 Attenuation coefficients of various materials obtained from simulation

材料	应力/Pa		衰减系数
	0 mm 处	40 mm 处	
Cu	$1.026\ 2\times 10^{-2}$	$4.983\ 9\times 10^{-5}$	-133.180 257 7
Fe	$1.570\ 0\times 10^{-2}$	$6.321\ 2\times 10^{-5}$	-137.873 045 9
PU	$5.398\ 4\times 10^{-11}$	$9.061\ 2\times 10^{-13}$	-102.181 780 9
Mu	$1.490\ 0\times 10^{-2}$	$6.560\ 0\times 10^{-5}$	-135.653 844 0

2 一体化防护结构优化设计

2.1 材料摆放顺序与一体化防护效能分析

防护材料具有防电磁和防应力两个作用。悬浮结构的最内层材料选为聚氨酯,便于灌封电路板。对于结构模型,每层结构采用 2 mm 厚度,剖面如图 3 所示。

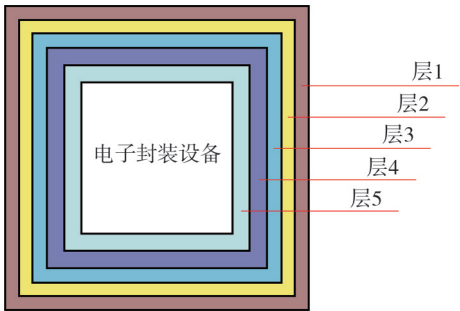


图 3 多层防护结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-layer protective structure

对于层 1 至层 4,文献[13-15]中指出:屏蔽材料的理想顺序为外层是导电材料,选择铜;中层是高饱和磁通密度材料,选择铁、碳钢 1008;内层是高磁导率材料,选择坡莫合金。文献[16]设计并实验了“灌封胶-硬防护壳体-灌封胶”的悬浮壳体,灌封胶选择聚氨酯(此处选择两层),硬防护

壳体为前面已选择的金属壳体。

初步定为五层材料,分别是铜、铁或碳钢 1008(两种材料相互替换作为一层),聚氨酯、坡莫合金、聚氨酯。这五层材料按不同顺序排列组成的结构分成了 48 组,前 24 组的高饱和磁通密度材料选择铁,如表 3 所示;后 24 组的高饱和磁通密度材料选择碳钢 1008,如表 3 所示。其中符号表示为铜(Cu)、碳钢 1008(1008)、铁(Fe)、坡莫合金(Mu)、聚氨酯(PU)。

表 3 铁作为高饱和磁通密度材料的组合

Tab. 3 Combination of iron as a high-saturation magnetic flux density material

Group	Layer				Group	Layer			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	Cu	Fe	Mu	PU	13	Ir	Mu	Cu	PU
2	PU	Cu	Fe	Mu	14	PU	Fe	Mu	Cu
3	Cu	PU	Fe	Mu	15	Fe	PU	Mu	Cu
4	Cu	Fe	PU	Mu	16	Fe	Mu	PU	Cu
5	Cu	Mu	Fe	PU	17	Mu	Cu	Fe	PU
6	PU	Cu	Mu	Fe	18	PU	Mu	Cu	Fe
7	Cu	PU	Mu	Fe	19	Mu	PU	Cu	Fe
8	Cu	Mu	PU	Fe	20	Mu	Cu	PU	Fe
9	Fe	Cu	Mu	PU	21	Mu	Fe	Cu	PU
10	PU	Fe	Cu	Mu	22	PU	Mu	Fe	Cu
11	Fe	PU	Cu	Mu	23	Mu	PU	Fe	Cu
12	Fe	Cu	PU	Mu	24	Mu	Fe	PU	Cu

表 4 碳钢 1008 作为高饱和磁通密度材料的组合

Tab. 4 Combination of carbon steel 1008 as a high saturation magnetic flux density material

Group	Layer				Group	Layer			
	1	2	3	4		1	2	3	4
25	Cu	1008	Mu	PU	37	1008	Mu	Cu	PU
26	PU	Cu	1008	Mu	38	PU	1008	Mu	Cu
27	Cu	PU	1008	Mu	39	1008	PU	Mu	Cu
28	Cu	1008	PU	Mu	40	1008	Mu	PU	Cu
29	Cu	Mu	1008	PU	41	Mu	Cu	1008	PU
30	PU	Cu	Mu	1008	42	PU	Mu	Cu	1008
31	Cu	PU	Mu	1008	43	Mu	PU	Cu	1008
32	Cu	Mu	PU	1008	44	Mu	Cu	PU	1008
33	1008	Cu	Mu	PU	45	Mu	1008	Cu	PU
34	PU	1008	Cu	Mu	46	PU	Mu	1008	Cu
35	1008	PU	Cu	Mu	47	Mu	PU	1008	Cu
36	1008	Cu	PU	Mu	48	Mu	1008	PU	Cu

分别对 48 组结构进行电磁波屏蔽效能和应力波屏蔽效能仿真。

1) 电磁波屏蔽效能仿真分析。

电磁轨道炮模型如图 4 所示,对模型施加脉宽 20 ms 峰值为 3MA 的电流激励,在防护结构外侧产生的电磁感应强度峰值为 1.156 3 T,在结构中心点添加磁感应强度探针作为屏蔽后的磁感应强度值。

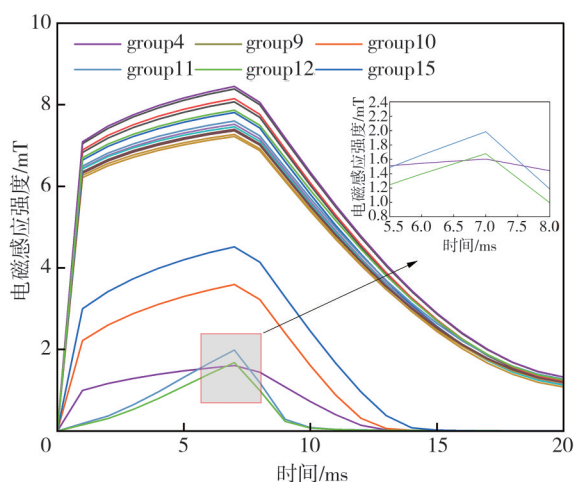


图4 电磁屏蔽效能结果

Fig. 4 Schematic diagram of electromagnetic shielding effectiveness simulation

对48组结构进行仿真,由碳钢1008作为高饱和磁通密度材料的组合的仿真结果可以看出,屏蔽后的磁感应强度都为1.045 T以上,比铁作为高饱和磁通密度材料的结果高3个数量级,故后24组结构不予考虑。前24组的运行结果如图5所示。

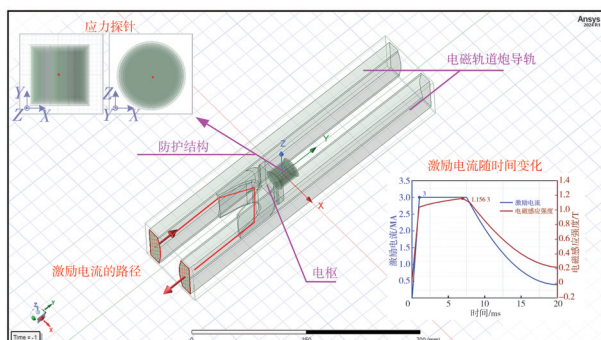


图5 电磁屏蔽效能仿真示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electromagnetic shielding effectiveness simulation

通过对比发现, Group4的磁感应强度峰值1.6287mT是24组中最小的。

2) 应力波屏蔽效能仿真。

电磁轨道炮实验装置在25 000g左右的加速度下的应力大小为17.2 MPa,故仿真时在防护结构的底面施加一个大小为17.2 MPa的压力,在最内层的底面上侧添加应力探针,如图6所示。仿真结果如图7所示。

将各组应力峰值按数量级不同分为不同的显示组合, Group12的应力峰值为0.003 251 7 Pa。

从以上的仿真可得, Group4的电磁防护效果最优, Group12的应力防护效果最优,通过加权

$$A = 0.5 \times 20 \log \left(\frac{B_0}{B} \right) + 0.5 \times 20 \log \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right), \quad (20)$$

式中: B_0 、 B 分别为屏蔽前、后的磁感应强度; σ_0 、 σ 分别为屏蔽前、后的应力。

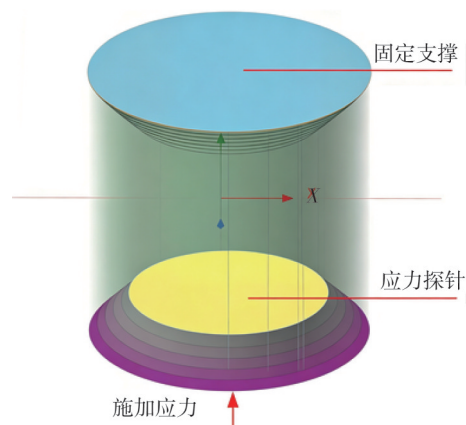


图6 应力波屏蔽效能仿真示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stress wave shielding effectiveness simulation

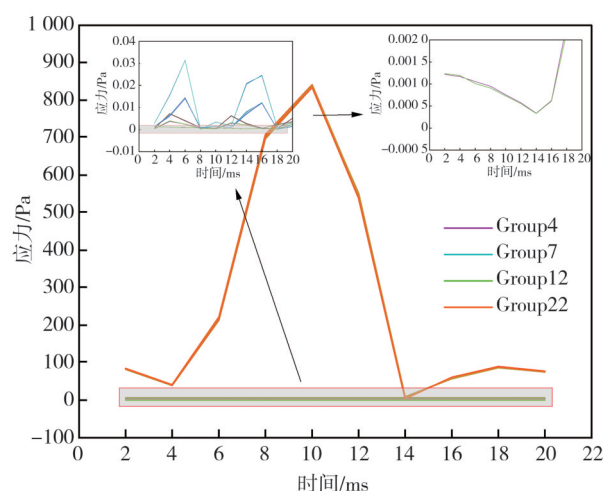


图7 应力波屏蔽效能结果

Fig. 7 Stress wave shielding effectiveness results

相比Group14, Group4的加权A提升了71.4%,故选择Group4作为一体化防护结构。

2.2 一体化防护结构最优参数选取

由2.1节材料摆放顺序与一体化防护效能分析确定了防护结构的材料排列顺序为Group4组合,由外到内依次为铜-铁-聚氨酯-坡莫合金-聚氨酯。下一步将优化确定防护结构每一层的厚度,使其应力波屏蔽效能和电磁波屏蔽效果最佳。

目前常见的多目标优化算法有MOPSO(多目标粒子群优化)、MOEA/D(基于分解的多目标优化)、多目标强化学习及神经网络优化、NSGA-II(第二代非支配排序遗传)。

本场景中只需优化应力波屏蔽效能和电磁波屏蔽效能这 2 个目标,若优化场景存在特殊需求(如目标数 >3 、超大规模多变量),可考虑 MOEA/D 或新兴深度学习算法;若追求极致收敛速度且约束简单,可尝试 MOPSO。但是,在双目标、工程约束明确的防护结构优化中,NSGA-II 仍是最稳妥、最易落地的方案。NSGA-II 是一种用于多目标优化问题的遗传算法,通过非支配排序和拥挤度计算来维持解集的多样性和优化效率^[17-18]。算法的核心步骤包括种群初始化、非支配排序、拥挤度计算、选择、交叉、变异以及合并父代和子代等。NSGA-II 的优势在于能够有效处理高维度、多目标和复杂约束的优化问题,在保证解的多样性的同时提高计算效率。与其他多目标优化算法相比,NSGA-II 具有较好的平衡性和精确性,广泛应用于工程设计、资源优化等领域。Zhao 等^[19]提出了基于改进 NSGA-II 算法的主轴承组件结构多目标优化方法,显著提高了结构的可靠性,降低了应力集中、椭圆度和接触压力。算法流程图如图 8,数据流程如图 9 所示。

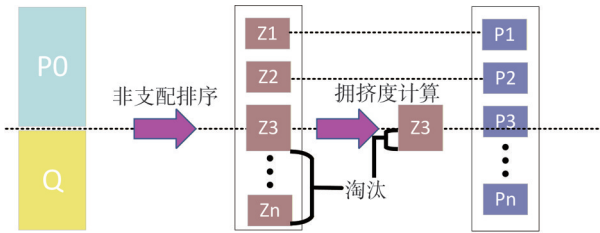


图 8 多目标遗传算法拓扑图

Fig. 8 Diagram of multi-objective genetic algorithm

设定优化参数为由外到内材料厚度依次为 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 。基于 1.1 节和 1.2 节的电磁波和应力波屏蔽模型式(9)、式(19),建立算法的目标函数式(21)与式(22)。

$$S_{tot}^E = 20 \log \frac{B_0}{B}, \quad (21)$$

$$S_{tot}^A = 20 \log \frac{L_0}{L}, \quad (22)$$

式中: S_{tot}^E 、 S_{tot}^A 分别为电磁波和应力波的屏蔽效能; B_0 和 σ_0 分别为屏蔽前的磁感应强度和应力; B 和 σ 对应屏蔽后的磁感应强度和应力。

$$\max f_1 = S_{tot}^E(d_1, d_2, \dots, d_5), \quad (23)$$

$$\max f_2 = S_{tot}^A(d_1, d_2, \dots, d_5). \quad (24)$$

约束条件如式(25)、式(26),其中 d_n 为第 n 层结构的厚度。

$$s.t. \sum_{n=1}^5 d_n = 16, \quad (25)$$

$$0.5 \leq d_n \leq 5, \quad (26)$$

设定种群大小为 100, 迭代次数为 50, 采用模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX)与多项式变异(Polynomial Mutation)完成种群进化, 交叉操作以“两两配对”方式从父代种群中选取个体。

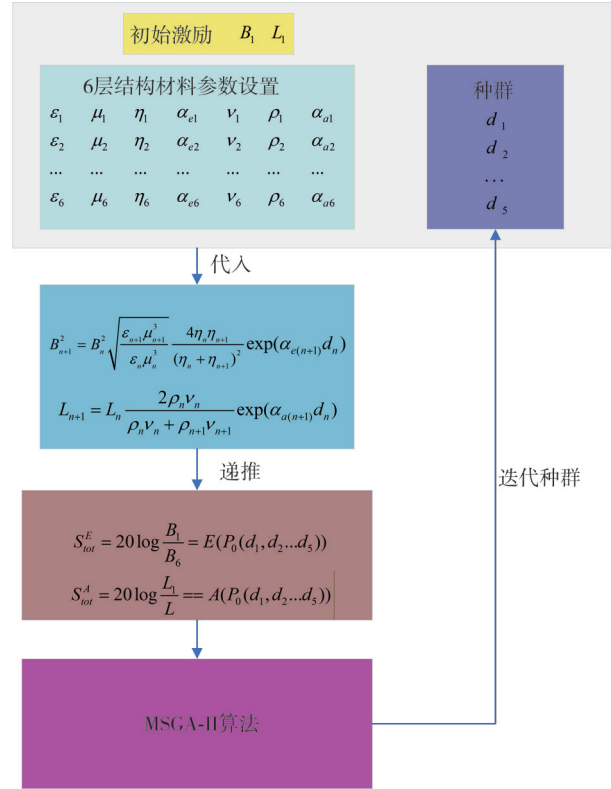


图 9 数据流程图

Fig. 9 Data flow chart

基于分布指数(η_n)计算交叉系数 β ,其中分布指数 η_n 的确定是经过实践验证的结果, η_n 越大后代越接近父代, η_n 越小后代与父代的差异越大,选择 $\eta_n=21$ 是平衡局部精细搜索和全局多样性的折中选择,适合此防护结构精准厚度设计的场景。

通过式(27)、式(28)生成 2 个子代;为满足电磁轨道炮防护壳体的厚度约束,子代生成后进行校验,通过比例缩放与最小值修正确保约束满足。

$$c_1 = 0.5 \times [(1 + \beta)p_1 + (1 - \beta)p_2], \quad (27)$$

$$c_2 = 0.5 \times [(1 - \beta)p_1 + (1 + \beta)p_2]. \quad (28)$$

变异操作采用动态变异概率(基础概率为 1/变量维度=20%,随迭代次数线性降低至 0)避免算法早熟收敛;基于分布指数($\eta_n=21$)计算变异增量 δ ,当随机数 $r < 0.5$ 时按式(29)向层厚最小值方向变异,当 $r \geq 0.5$ 时按式(30)向层厚最大值方向变异(最大

值由总厚度约束动态计算);变异后同样通过函数修正,确保变异个体仍符合厚度设计要求。

$$\delta = 2r^{\frac{1}{1+\eta_m}} - 1, \quad (29)$$

$$\delta = 1 - 2(1-r)^{\frac{1}{1+\eta_m}}. \quad (30)$$

记录第10, 20, 30, 40, 50代的种群迭代结果,得到了对应的帕累托前沿,如图10所示。由于两个目标的数值范围存在一个数量级的差异,为消除量纲影响,对目标函数进行了归一化处理。

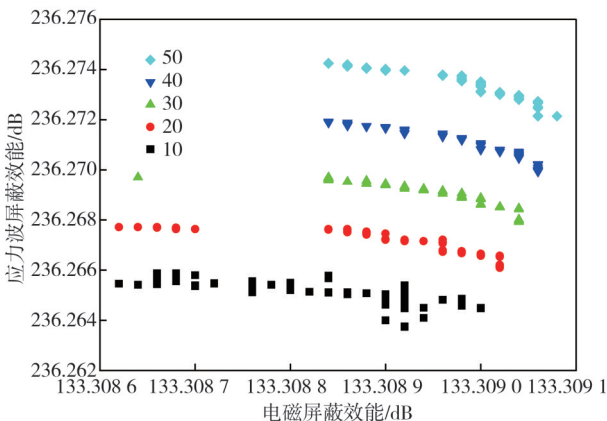


图10 第10~50代帕累托前沿

Fig. 10 The 10th-50th generation Pareto front

在此基础上,采用多目标优化中的参考点法,通过引入决策者偏好的参考点,将多目标权衡转化为最小化与参考点距离的单目标优化问题,既能利用帕累托前沿的非劣性保证解的最优性,又能通过参考点体现决策者对目标空间的偏好倾向。

在目标空间中设定参考点为

$$(f_{1,\text{ref}}, f_{2,\text{ref}}) = (0, 0). \quad (31)$$

针对帕累托前沿的每个解,计算其与参考点的距离,如式(32)所示。

$$d = \sqrt{(f_1 - f_{1,\text{ref}})^2 + (f_2 - f_{2,\text{ref}})^2}. \quad (32)$$

选取与参考点 $(f_{1,\text{ref}}, f_{2,\text{ref}})$ 距离最小的解,作为帕累托前沿的最优解。

运行算法五次后取均值,最优解为5.323 6, 2.781 2, 2.501 4, 2.747 6和2.650 0。

3 仿真及实验验证

根据控制变量法,选取最优解做仿真和实验验证,再选择两组结构对比。在材料排列顺序不变的情况下,变化厚度分配,选择帕累托前沿的一个边界点5.32, 2.78, 2.50, 2.75和2.65;在厚

度分配不变的情况下,变化材料排列,选择表3的Group12进行仿真和实验验证,以同时验证排列顺序和厚度优化的结果,重新组成Group49、Group50、Group51,如表5所示。

表5 3组结构方案

Tab. 5 Three structural schemes

组别	厚度/mm				
	Cu	Fe	PU	Mu	PU
Group49	4.90	2.02	3.04	2.03	4.01
Group50	5.32	2.78	2.50	2.75	2.65
组别	厚度/mm				
	Fe	Cu	PU	Mu	PU
Group51	2.78	5.32	2.50	2.75	2.65

依次通过SolidWorks建模与Maxwell和LS-DYNA对3组厚度方案的结构进行电磁屏蔽防护和应力波屏蔽防护仿真。

3.1 电磁波屏蔽效能仿真

如图5所示,对3组防护结构所组成的电磁轨道炮系统施加激励电流,最内层防护结构的磁感应强度 B 如图11所示。由图11可以看出,Group49、Group50、Group51这3组结构中,Group51的屏蔽效果最优,虽然出现部分空间磁感应强度偏高的现象,但相比之下其峰值依然是最小的。

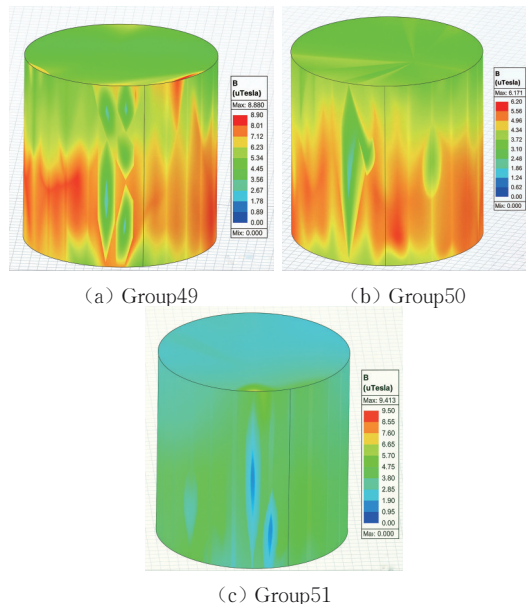


图11 电磁波屏蔽仿真结果

Fig. 11 Simulation results of electromagnetic wave shielding

在防护结构内部取参考点,得到磁感应强度变化如图12所示。由图12可以看出,Group51屏蔽结构内部的磁感应强度峰值是3组结构中最小的,屏蔽效果最好。

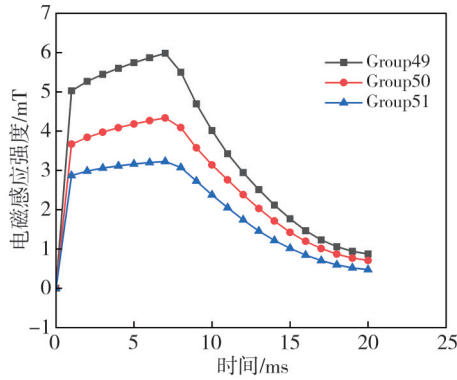


图 12 探针处的磁感应强度变化

Fig. 12 Magnetic flux density variation at probe location

3.2 应力波屏蔽效能仿真

如图 6 所示,对 3 组防护结构底面施加 17.2 MPa 的应力冲击,各组结构轴向方向的应力如图 13 所示。由图 13 可知,Group49 的防护结构最内层反射应力最小。

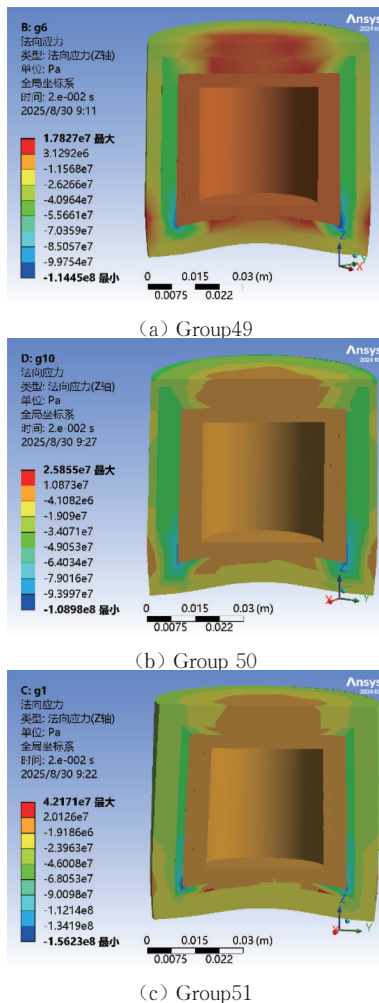


图 13 应力波屏蔽仿真结果

Fig. 13 Simulation results of stress wave shielding

将应力探针放置在最内层防护结构的底部,得到 3 组防护结构屏蔽后的应力结果如图 14 所示。

示,应力由于在屏蔽结构间反射而被消耗,内层应力与外层应力的方向相反。由图 14 可知,3 组结构的探针应力在 20 ms 处都达到峰值,其中 Group49 的应力最小,屏蔽效能最好。

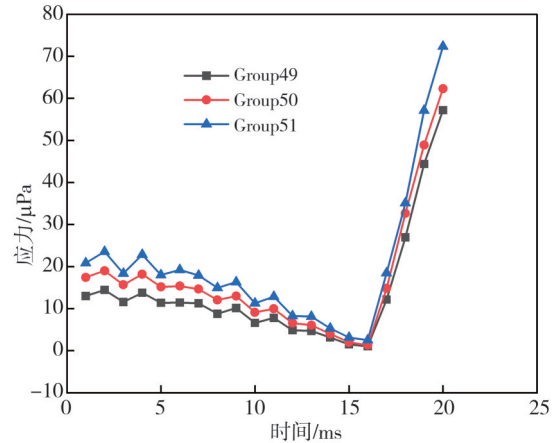


图 14 探针处的应力变化

Fig. 14 Stress variation at probe location

结合式(21)~式(22)来计算屏蔽效能,结果如表 6 所示。由表 6 可得,Group50 总屏蔽效能最高,比 Group49 高 2.4%。

表 6 3 组结构的屏蔽效能

Tab. 6 Shielding effectiveness of three-group structures

组别	电磁波屏蔽效能 SB/dB	应力波屏蔽效能 SL/dB
Group49	115.367 501 4	226.268 625 5
Group50	124.362 841 8	225.362 792 3
Group51	106.400 241 2	231.939 437 3

3.3 实验验证

3.3.1 强磁冲击验证

对 Group49、Group50、Group51 这 3 种防护结构进行强磁脉冲实验,每种结构进行 3 个同样本的实验,最终结果取这 3 个样本的平均值,在防护结构中放置采存系统,实验装置如图 15 所示。

强磁脉冲实验装置在每次实验前,需要校准电容器放电电流最大值 $i(t)_{\max}$ 和线圈产生的磁场强度 B 之间的关系如图 16 所示,得到 $\frac{i(t)_{\max}}{B} \approx 1015.5038 \text{ A/T}$,再通过式(33)、式(34)计算充电电压 U_C ,通过主控台输入电容器的充电电压,从而控制磁场强度 B 的大小。

$$i(t) = \frac{U_C}{\omega L} e^{\frac{-R}{2L}t} \sin \omega t, \quad (33)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{4L - R^2 C}{4L^2 C}}. \quad (34)$$

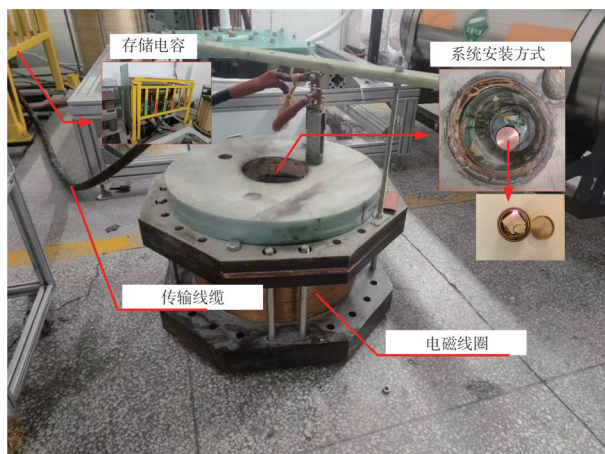


图 15 电磁脉冲实验装置

Fig. 15 Test facility of electromagnetic pulse

通过积分计算得到装置内部产生的磁感应强度峰值大小为 5.16 T, 波形如图 16 所示。

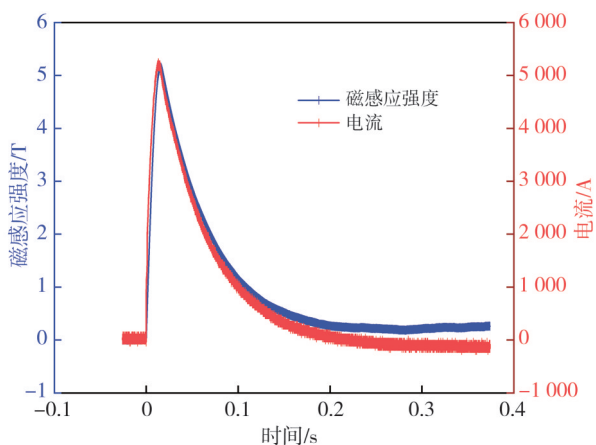
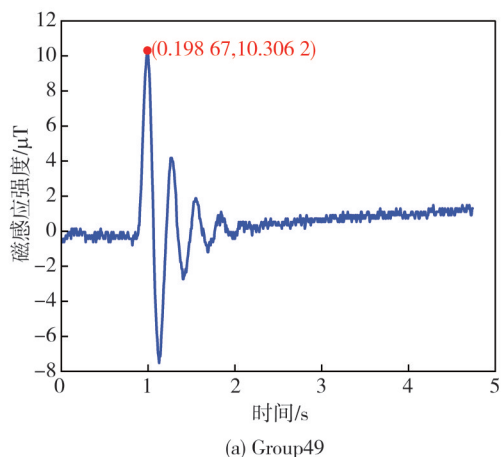


图 16 电磁脉冲实验装置的激励

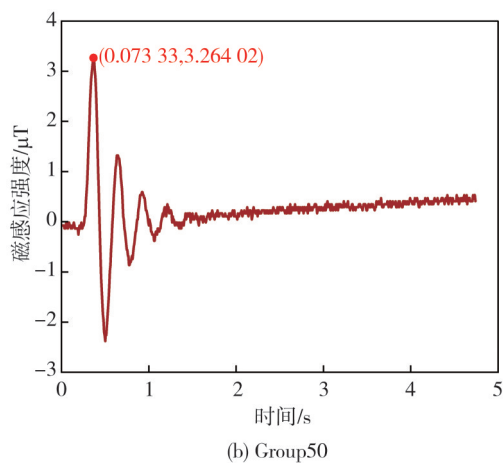
Fig. 16 Excitation electromagnetic pulse test facility

利用磁力计 HMc1053 来记录系统内部屏蔽后的磁感应强度, 3 种防护结构的剩余磁感应强度波形如图 17 所示。

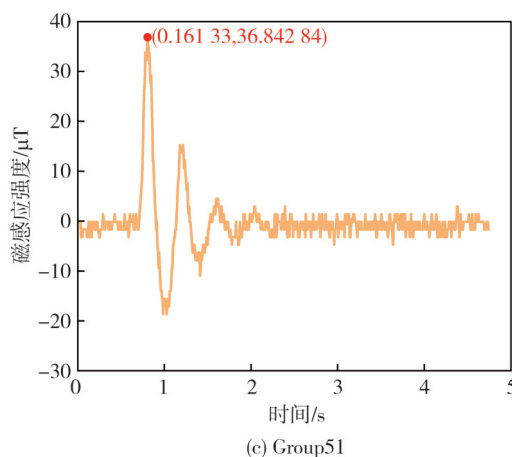
由图 17 可以看出, 实验结果接近仿真结果, 验证了第 2 节防护方法的准确性。



(a) Group49



(b) Group50



(c) Group51

图 17 3 组结构内的磁力计测得的磁感应强度

Fig. 17 Magnetic flux density measured by magnetometers within three structural groups

3.3.2 弹载实验验证

在一体化防护结构内放置由过载传感器、采样电路、电池组成的过载信息采集系统如图 18 所示, 用来采集电磁轨道炮发射瞬间的过载值。



图 18 系统样机

Fig. 18 System prototype

系统样机中的过载传感器为 ENDEVCO 公司的 727 系列型号传感器, 利用其记录电磁轨道炮

发射的过载值。发射装置的电流激励曲线如图 19 所示。

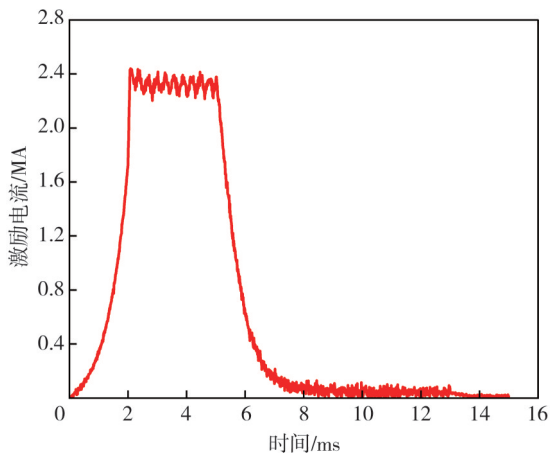


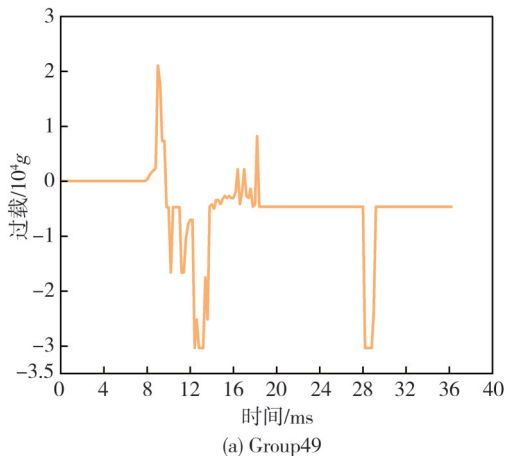
图 19 电磁轨道炮的激励电流曲线

Fig. 19 Excitation current curve of electromagnetic railgun

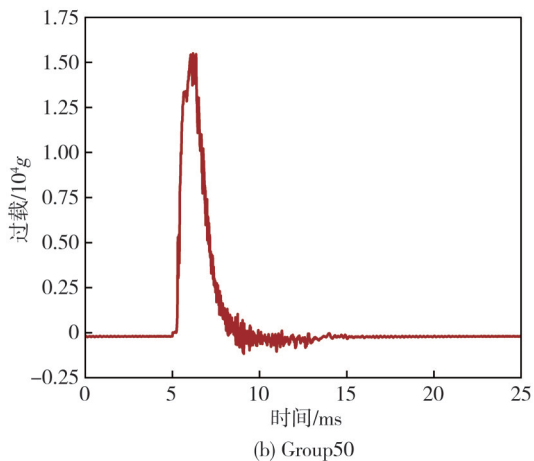
基于一体化防护结构的优化设计,采用结构由外向内“铜-铁-聚氨酯-坡莫合金-聚氨酯”的设计,厚度依次为 5.32, 2.78, 2.50, 2.75 和 2.65 mm。

对所组成的系统进行电磁轨道炮实验,实验后检查防护外壳的形变以及破损情况,发现防护外壳结构完整,无明显形变变形,多级缓存结构内部组件完好,传感器及相关电路电气输出正常。电子封装设备冲击后的形状如图 18 所示。

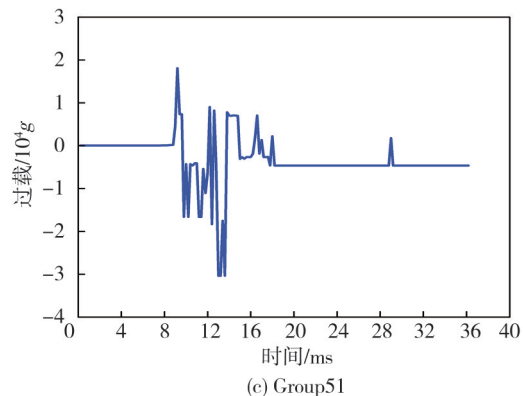
读取采样电路内部记录的过载信息,如图 20 所示。在电磁轨道炮发射瞬间的极端环境下,仅 Group50 结构成功捕获并记录了过载数据,这一结果充分证明该结构具备优异的极端环境耐受能力。而 Group49 与 Group51 的过载超量程,没有成功抵挡过载和电磁冲击。



(a) Group49



(b) Group50



(c) Group51

图 20 3 组结构电磁轨道炮实验过载传感器记录

Fig. 20 Overload sensor records from three-group electromagnetic railgun structure experiments

4 结 论

本文主要介绍了一种高过载强电磁环境下的一体化综合防护方法。通过 LS-DYNA 和 Maxwell 软件对该方法指导下的优化结构模型进行了仿真分析,并对优化结构系统实物进行了电磁轨道炮实验以验证其防过载和应力的性能。主要得出了如下结论:

1) 实验验证了本文所提电磁屏蔽模型和应力波屏蔽模型的准确性,为弹载电子封装设备的防护结构设计提供了理论支撑,为电子封装设备在高过载强磁环境下的防护技术提供了参考。

2) 验证了在同时考虑高过载和强电磁环境时,NSGA-II 多目标优化算法确定防护结构厚度的适用性,为一体化综合防护方法提供了参考。

3) 验证了一体化综合防护方法的正确性,即通过仿真确定了防护结构的排列顺序,通过算法确定了防护结构的厚度分配。

4) ANSYS 仿真结果显示,与优化前的结构相比,优化后的防护结构的综合屏蔽性能提升

71.4%, 基于屏蔽模型建立的优化算法所指导的防护结构综合屏蔽性能提升 4.1%。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 马晓平, 廖欣, 陈兵. 电磁发射超高速制导炮弹国内外研究现状综述[J]. 空天防御, 2021, 4(2): 87-92.
MA Xiaoping, LIAO Xin, CHEN Bing. Research review of hypervelocity projectile by electromagnetic launch at home and abroad[J]. Air & Space Defense, 2021, 4(2): 87-92. (in Chinese)
- [2] WEN R H. A simulation method for the electromagnetic railgun based on equivalent circuit[J]. Magneto-hydrodynamics, 2023, 59(1): 73-82.
- [3] XIAO H C, YIN D M, LI B M. Electrodynamics response study on railgun launcher based on electromechanical coupling model[J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 655-665.
- [4] YANG Y X, LIU P, LI C S, et al. Investigation of the influence mechanism of shield on the strong magnetic field during electromagnetic launch[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 594: 171919.
- [5] DIAHOVCHENKO I, OLSEN R G, ZALOTOV V, et al. Development of effective shielding against electricity meters tampering with strong magnetic fields[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108722.
- [6] LOU Y T, LI H Y, LI B M. Research on proximity effect of electromagnetic railgun[J]. Defence Technology, 2016, 12(3): 223-226.
- [7] GU B F, LI H Y, LI B M. An internal ballistic model of electromagnetic railgun based on PFN coupled with multi-physical field and experimental validation[J]. Defence Technology, 2024, 32: 254-261.
- [8] ZHANG A, LIU P, ZHANG H. Analysis and experiment of stress concentration in penetration fuze buffer materials under stress wave incursion[J]. Frontiers in Physics, 2024, 12: 1401538.
- [9] FENG D H, SHI Y B, ZHAO R, et al. Study on the mechanism of buffer absorbing energy of double-layer heterostructure based on viscoelastic materials for MEMS devices[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 364: 114790.
- [10] GUO H N, SHI Y B, ZHAO R, et al. Impact attenuation mechanism of single/double-layer potting structures of MEMS devices under continuous double-pulse impact[J]. Defence Technology, 2025, 48: 104-114.
- [11] 张克业. 复合含能材料超声波动态燃速测试系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [12] 李楚元. 波的反射率和透射率的统一形式规律[J]. 物理与工程, 2018, 28(3): 51-57.
LI Chuyuan. The uniformity of the reflectance and transmittance of waves[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(3): 51-57. (in Chinese)
- [13] 刘振栋. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[C]//教学方法创新与实践科研学术探究论文集(二). 深圳: 索曼电子(深圳)有限公司, 2022: 129-131.
- [14] 陈玮君, 郑凯, 张贵恩. 宽频电磁屏蔽材料的研究现状[J]. 安全与电磁兼容, 2020(3): 95-97.
CHEN Weijun, ZHENG Kai, ZHANG Guen. Research status of broadband electromagnetic shielding materials[J]. Safety & EMC, 2020(3): 95-97. (in Chinese)
- [15] 李峰. 电磁轨道炮强磁场环境的屏蔽与利用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [16] 杜壮波. 强电磁环境下过载测试系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [17] ZHAO Z B, LIU B, ZHANG C R, et al. An improved adaptive NSGA-II with multi-population algorithm[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(2): 569-580.
- [18] 国玉林. 基于多目标优化的转子装配平衡及动平衡方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [19] ZHAO X, SU T X, LIU X Y, et al. Multi-objective optimization of main bearing assembly structure based on improved NSGA-II[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(1): 43-63.