

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.026

电磁轨道炮纤维缠绕身管多物理场耦合仿真研究

夏健强

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为了探究电磁发射过程中发射装置的性能,结合理论推导及有限元仿真技术,对其发射时多物理场耦合特性进行分析。以串联增强型电磁轨道炮纤维缠绕身管为研究对象,利用 ACP 模块对纤维缠绕身管约束结构进行符合材料的铺层建模,建立有效的约束结构网格模型。通过分段耦合方法手动调整不同时刻电枢在电磁场中的位置,将不同段的电磁场仿真结果作为温度场、结构场的载荷源,对电磁轨道炮身管进行多物理场耦合仿真计算,得到身管各部件的电磁场、温度场以及结构场各物理特性分布,为后续电磁轨道炮身管优化设计提供理论支持。

关键词:电磁轨道炮;纤维缠绕;复合材料;约束结构;多物理场耦合仿真

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0134-05

Multi-Physics Coupling Simulation Study of Filament-Wrapped Barrel in Electromagnetic Railgun

XIA Jianqiang

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the performance of the launching device during electromagnetic launch, this study analyzes the multi-physics coupling characteristics during launch by combining theoretical derivation and finite element simulation. Taking the filament-wrapped barrel of a series-augmented electromagnetic railgun as the research object, the ACP module was used to model the composite material layup of the filament-wrapped barrel constraint structure, establishing an effective mesh model of the constraint structure. Through a segmented coupling method, the position of the armature in the electromagnetic field at different times was manually adjusted. The simulation results of the electromagnetic field in different segments were used as load sources for the thermal and structural fields, enabling multi-physics coupling simulation of the electromagnetic railgun barrel. The distributions of electromagnetic, thermal, and structural field characteristics across various components of the barrel were obtained, providing theoretical support for the subsequent optimized design of electromagnetic railgun barrels.

Keywords: electromagnetic railgun; filament winding; composite material; constraint structure; multi-physics coupling simulation

0 引言

从能源角度出发,人类社会武器发射共经历了机械能、化学能、电磁能3个阶段^[1]。电磁轨道发射技术是现代人类社会运用电磁能发射的重要智慧结晶之一。与其他发射方式相比,电磁轨道发射能够赋予弹丸更大的电磁推力,从而具有赋予弹丸更高初速度的能力,使其能够打击更远距离的目标^[2-3]。因此,电磁轨道发射技术近些年受到广泛关注与研究。

电磁轨道炮按轨道电结构形式可分为普通轨道炮与多轨增强型轨道炮。与普通轨道炮相比,多轨增强型轨道炮具有更高的电感梯度,能够产生更大的电磁推力,但其结构更为复杂,增加的导轨使得身管质量也随之增加。为了减轻身管质

量,以高强纤维和环氧树脂浇筑而成的复合材料代替高密度的合金钢作为约束结构材料是未来的趋势之一。同时,电磁轨道身管在发射过程中往往伴随着暂态的电磁、热、结构等多物理场强相互作用,这使得研究人员难以得出其准确的理论解析机制。现阶段各国关于电磁轨道发射研究主要以多物理场仿真研究为主,关注点主要集中在普通轨道炮的电枢与导轨上^[4-7],忽略了电枢导轨之外结构以及电枢位移对身管的电磁-热-结构耦合特性的影响。

本文以串联增强型电磁轨道炮纤维缠绕发射身管为研究对象,将电枢运动手动分为若干小段,并利用 ANSYS Workbench 中的 Maxwell 3D、Transient Thermal 与 Transient Structural 模块对电枢不同运动时间段的身管进行电磁-热-结构多

作者简介:夏健强(1998—),男,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为电磁轨道发射技术,1874420381@qq.com。

物理场分段耦合仿真。仿真时综合考虑电磁力、焦耳热、摩擦力、接触力以及纤维缠绕约束预紧力的影响。根据仿真结果重点分析其多物理场耦合特性,为后续优化设计提供参考。

1 多物理场耦合数学模型建立

电磁发射装置主要由电枢、导轨、绝缘支撑和外层约束结构组成,其三维模型如图 1 所示。兆安级别的电流从主导轨最前端输入,经过电枢后从副导轨最后端输出,从而形成电流回路。在此过程中,绝缘支撑能够隔离电流、提供安全性、支撑固定元件和提供隔热保护。同时,外层约束结构为发射装置提供预紧力,确保电枢和导轨之间良好的电接触。

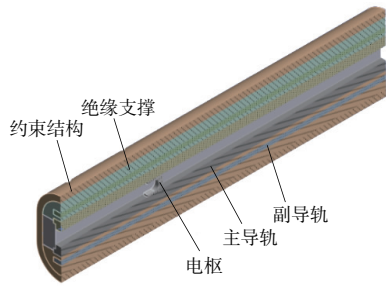


图 1 增强型电磁轨道炮身管模型

在此过程中发射装置受到复杂的时变电磁-热-结构相互耦合作用,其相互耦合关系如图 2 所示。

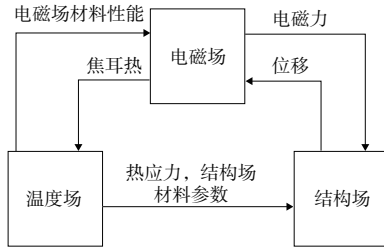


图 2 多物理场耦合关系

1.1 电磁场控制方程

在电磁发射装置的计算模型中,传导电流远大于位移电流,因此通常可以忽略位移电流的影响。基于麦克斯韦方程组中的高斯定律、法拉第电磁感应定律、磁通连续性定律和安培定律,可以建立描述电磁发射装置电磁场行为的控制方程

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \times (v \times B) \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

式中 B 、 H 、 J 、 E 、 D 、 v 、 ρ_e 分别为磁感应强度、磁场强度、传导电流面密度、电场强度、电通密度、媒质运动速度和自由电荷体密度。

在有媒质存在时, E 和 B 都和媒质性质有关,上述电磁场方程组尚不完备,需要给出电磁场辅助方程

$$D = \varepsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

$$J = \gamma E \quad (7)$$

式中 ε 、 μ 、 γ 分别为相对介电常数、相对磁导率和电导率。

联立上述电磁场控制方程以及辅助方程可推导出电磁场磁扩散方程

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\mu \gamma} \nabla^2 B + \nabla \times (v \times B) \quad (8)$$

通过上式可得出其电场强度以及传导电流面密度,进一步由安培力定律可得出电磁发射装置中电枢以及导轨所受的洛伦磁力计算公式

$$F = \int_V J \times B dV \quad (9)$$

式中 F 、 V 分别为结构体所受力和结构体体积。

1.2 热场控制方程

电磁发射装置的发射过程中,通过电枢导轨的电流会产生大量的焦耳热。热量将主要通过热传导方式进行传递,从而导致装置呈现出一定的温度分布。为了简化计算,忽略接触电阻焦耳热及摩擦热的影响,只考虑电枢导轨间传导电流焦耳热的影响可得出装置的热传导方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{j^2}{\gamma} \quad (10)$$

式中 ρ 、 C_p 、 j 分别为材料密度、定压比热容、电流密度标量值。

1.3 结构场控制方程

在发射过程中,枢轨同时受到电磁力和身管的约束。此外,由于发射过程中产生的热量,装置会出现温度分布不均匀的情况,从而引起热应力的产生,并对装置的力学性能产生影响。根据经典线性热弹性理论,微元体的总应变可以视为温度引起的热应变与弹性应力引起的弹性应变相互作用的结果^[8]。结合经典弹性力学基本方程,可以得到以下结构场控制方程组

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{\nu+1} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^e \quad (13)$$

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + f_j = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \quad (15)$$

式中 ε_{ij}^T 、 α 、 ΔT 、 ε_{ij}^e 、 G 、 σ_{ij} 、 ν 、 ε_{ij} 、 δ_{ij} 、 f_j 、 ρ 、 u 分别为热应变、热膨胀系数、温升、弹性应变、弹性剪切模量、应力、泊松比、应变、克罗内符号、体力密度、材料密度和位移, $\sigma_{kk} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$ 。

2 多物理场耦合仿真模型建立

采用 Workbench 中 Maxwell 3D 模块、Transient Thermal 模块以及 Transient Structure 模块对电磁轨道炮发射过程中电磁-热-结构多物理场耦合现象进行仿真分析。由于多物理场双向耦合复杂性,现有有限元软件暂不能实现电磁发射装置发射过程中多物理场双向耦合仿真计算。为了考虑电枢运动对电磁炮多物理场特性的影响,本文将电枢在身管中运动时间分为若干段,在结构场的计算完成相应时间节点电枢位移后,手动调节 Maxwell 中电枢的位置,然后计算下一时间节点电磁场响应特性,并将该时间节点电磁场结果导入温度场与结构场计算,循环往复,直到完成计算。

2.1 多物理场网格模型建立

原模型电磁炮身管模型全长 5 180 mm,身管由电枢、导轨、绝缘支撑和纤维缠绕约束结构组成。电枢起始位置距炮尾 400 mm,1.7 ms 电流达到最大,由如图 3 所示的电磁炮实验测试数据可知,该时刻电枢位移 393.51 mm,距炮尾 793.51 mm。由于三维仿真计算量较大,为适当简化,提高计算效率,只关注电流最大时间段内身管耦合特性,即距炮尾 793.51 mm 这段身管。考虑到炮口段的影响,课题组针对原模型建立了电磁轨道炮样机,样机中身管长度 1 500 mm。

同时考虑到绝缘支撑及纤维缠绕约束材料电导率远小于枢轨材料电导率,在 Maxwell 中可忽略绝缘支撑及纤维缠绕约束结构对电磁场的影响。

对多物理场进行仿真时,电磁场、热场、结构场分别通过 Maxwell 3D、Transient Thermal 以及 Transient Structure 进行仿真。在 Maxwell 网格划分时,需要定义一个求解空气域来近似模拟电磁场

在空气中的传播特性。其网格划分如图 4 所示。

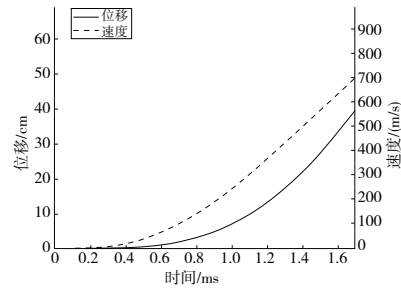


图3 实验测试运动曲线

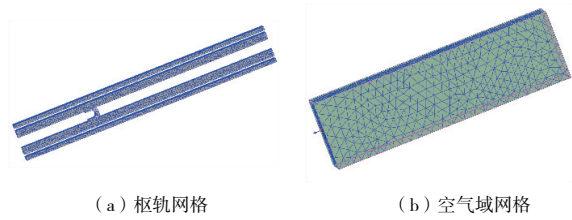


图4 电磁场网格模型

热场和结构场共用一套六面体网格。约束结构采用玻璃纤维-碳纤维-玻璃纤维夹心式复合结构。为避免层合板受力后产生翘曲变形,每层复合结构采用对称铺设单层厚度取 1 mm,其缠绕工艺参数如图 5 所示。利用 ACP 模块设置复合材料缠绕角度、铺层厚度和铺层顺序,从而建立纤维缠绕约束结构的有限元网格模型。对于电枢、导轨和绝缘支承结构,可采用 Mesh 模块生成网格。最后,将 ACP 模块建立的约束结构纤维铺层网格模型与 Mesh 模块建立的网格模型一起导入 Model 模块中。其网格如图 6 所示。

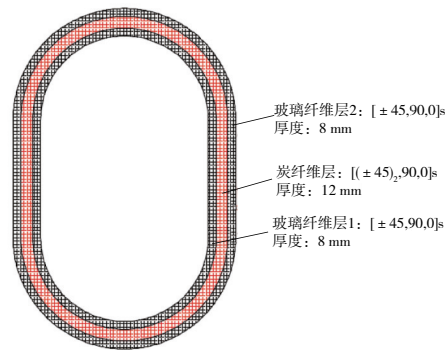


图5 约束结构缠绕工艺参数图



图6 热场与结构场网格模型

2.2 模型材料及边界条件设定

查阅相关论文及书籍^[9-10],在 ANSYS 库中建立对应的材料库,并将铜合金、6061 铝合金、环氧层压板、Epoxy Carbon UD 和 Epoxy E-Glass UD 材料分别赋予电枢、导轨、绝缘支撑以及约束结构。

通入如图 7 所示实测激励电流。从图 7 中可以看出电流在 1.7 ms 时达到最大值,根据电磁场控制方程可知该时刻电枢导轨受力最大。为了减少计算机计算量,可只关注 1.7 ms 内仿真特性。

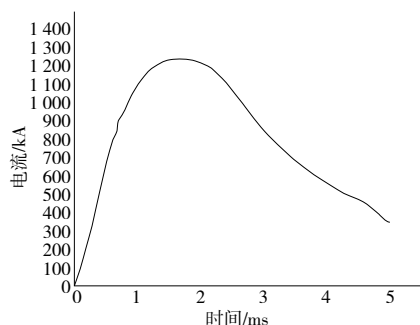


图 7 激励电流

在实际的仿真过程中,固定约束限制了约束段的所有自由度,这往往会导致应力奇异问题的出现。为了使仿真结果更加合理,将身管结构在炮尾端固定约束更改为远端位移的约束。考虑到常规等温参数施加预应力法不适用于本文考虑温度场效应模型,本文通过类比轴孔之间的过盈配合,设置约束结构和筒体之间的过盈量来更好地模拟考虑温度场身管模型的预紧力。根据马歇尔准则,可将过盈量设置为 0.1 mm。

3 多物理场耦合仿真结果分析

3.1 电磁场结果分析

将模型导入 Maxwell,并设置好相应的参数,可通过瞬态磁场求解器求解出相应电流密度。

图 8 为不同时刻枢轨装置的电流密度云图。由于电枢电阻率大于导轨电阻率,电流会选择电阻最短路径通过,因此单独观察每个时刻电流密度分布图 8 中可以发现,电枢电流主要集中在喉部 U 形区域附近。同时,由于主导轨受临近效应影响大于副导轨,观察云图 8 可以发现主导轨电流集中在导轨两侧的内表面,而副导轨电流密度则集中在导轨两侧。通过比较不同时刻枢轨装置电流密度云图 8,可以发现,电流密度随着电枢位

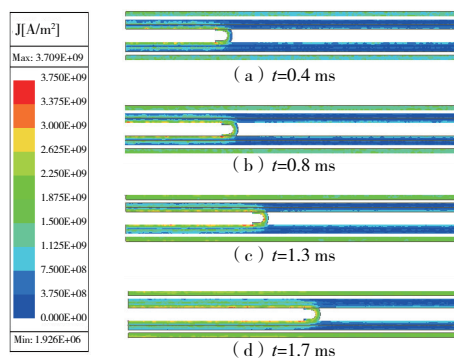


图 8 电流密度云图

3.2 温度场结果分析

将 Maxwell 中产生的焦耳热作为热源导入 Transient Thermal 模块进行热分析可得出电磁发射身管温度分布。

图 9 和图 10 分别为在 1.7 ms 电流最大时刻的电枢与导轨温度云图(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。电枢与导轨主要热源为焦耳热。由于电枢电流密度在 U 形喉部处最大,这表明该位置的焦耳热功率最高。因此,该位置温度始终最高,并随着时间的累积,在 1.7 ms 时达到 82.568 °C。同时,考虑到电磁场中电流密度及导轨接入电流长度随着电枢移动而增多。观察导轨温度云图 10 可以发现,在起始段的边缘内侧温度较高。随着电枢向前运动,后续接入电流的导轨段温度也会逐渐升高。副导轨整段始终接入电流,因此观察温度云图可以发现任意时刻导轨温度分布与电流密度分布相似,导轨的两侧温度较高。

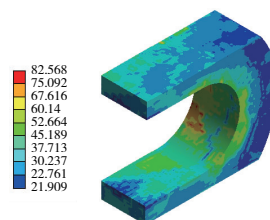


图 9 电流最大时刻电枢温度分布

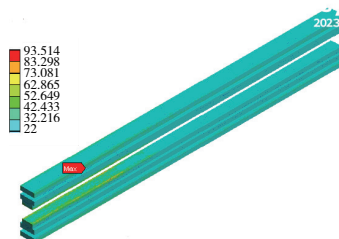


图 10 电流最大时刻导轨温度分布

3.3 结构场结果分析

将 Maxwell 中计算的电磁力与 Transient Thermal 中计算的温度作为输入条件导入 Transient Structure 模块进行力学分析可得出其应力分布。

图 11 为不同时刻装置整体应力云图。从各个时刻整体应力云图可以看出,由于约束结构预紧力、枢轨所受电磁力及热应力共同作用,使得电枢所受应力大于其他部件,导轨与电枢接触部分应力大于导轨其他部分应力。对比不同时刻整体应力云图分布可以发现,最大应力逐渐增大,于电流最大时刻 1.7 ms,电枢 U 形区域最大应力达到 413.76 MPa。同时,随着电枢受电磁力驱动,导轨上应力随着电枢运动向炮口扩散。

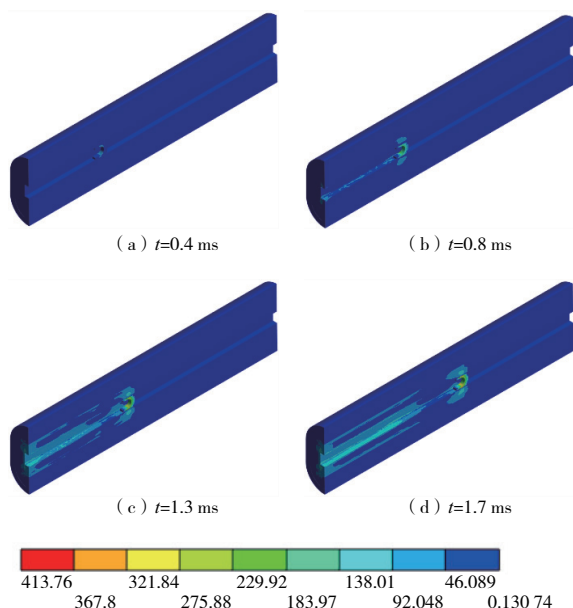


图 11 不同时刻身管整体应力分布

图 12 为不同时刻纤维缠绕约束结构应力云图。从各个时刻约束结构云图可以发现,轨道受到指向两侧扩张电磁斥力,使得约束结构应力集中在轨道布置上下两侧。比较不同时刻应力云图可以发现,随着激励电流增大,导轨两侧所受电磁斥力逐渐增大,使得约束结构应力逐渐由圆弧两侧向平面两侧扩散。峰值电流时刻 1.7 ms,约束结构最大应力达到 74.728 MPa。

为了保证身管发射稳定性,在发射过程中导轨受力所发生的变形量需控制在 1% 口径范围内^[11]。在 1.7 ms 计算时间段内,主导轨于 1.6 ms 变形量达到最大,最大变形量为 0.128 mm,最大变形口径比为 0.388%,远小于 1%。可以看出,在过盈量为 0.1 mm,约束结构作用下,能够保证身

管具有足够刚度,从而保证身管发射稳定性。

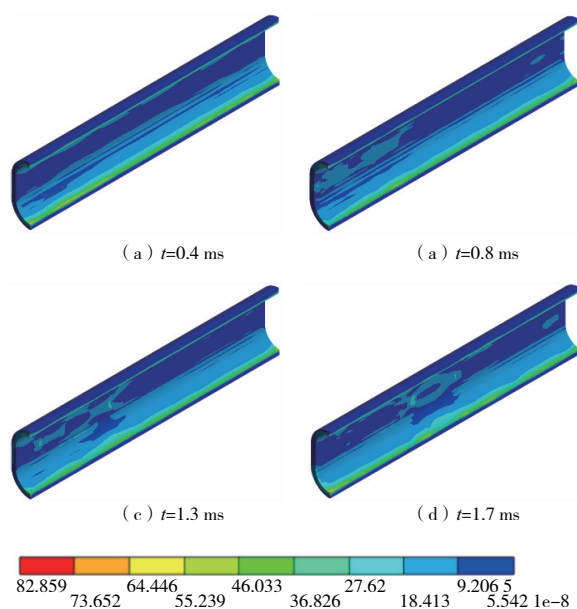


图 12 不同时刻约束结构应力分布

4 结语

本文旨在研究约束结构作用下增强型电磁轨道炮身管发射过程的多物理场耦合特性。然而,目前 Maxwell 模型尚不能直接计算始终保持接触运动的情况。为了解决这个问题,通过手动调整 Maxwell 模型中的电枢位移,将不同时刻的 Maxwell 计算结果导入热场和结构场进行分段研究。由于需要考虑温度场的影响,常规的等温参数法不适用。基于过盈配合思想,建立约束结构与内筒过盈配合模型施加预紧力,最终建立了增强型电磁轨道炮纤维缠绕预紧身管的多物理场耦合仿真模型。通过对仿真结果的分析,可发现装置的电流密度、温度和应力分布具有一定的相似性。尽管电枢导轨所受到的电磁力较大,但在纤维缠绕约束结构预紧力的作用下,身管的最大变形口径仅为 0.388%,这表明本文的设计能够保证身管的发射性能。除此之外,本文所构建的身管多物理场耦合仿真模型可以进一步指导纤维缠绕约束结构的铺层顺序、铺层角度和铺层厚度等优化工作。

参考文献:

- [1] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报,2023,38(15):3943-3959.
- [2] 苏子舟. 电磁轨道炮技术[M]. 北京:国防工业出版社,2019:12-14.

(下转第 147 页)

转子在共振转速下试验测试的响应幅值和仿真预测响应幅值如表 3 所示。

表 3 不同平衡量下试验测试幅值和仿真预测幅值对比分析

参数	试验测试/ μm	仿真预测/ μm
0.4g	54	51
0.6g	79	73
0.8g	102	95

从表 2、表 3 可知,不同平衡量下,挤压油膜阻尼器支承转子结构试验测试和仿真预测共振转速最大误差为 6.96%,挤压油膜阻尼器支承转子结构试验测试和仿真预测共振转速对应的振动位移幅值最大误差为 8.22%,由此验证了挤压油膜阻尼器油膜等效刚度、等效阻尼参数识别结果的准确性。

4 结语

针对挤压油膜阻尼器支承转子结构,开展了挤压油膜阻尼器参数识别方法研究:

1) 将挤压油膜阻尼器非线性刚度、非线性阻尼进行等效线性化处理,在 3 组不平衡量下(0.4g、0.6g、0.8g)基于试验测试数据识别得到了阻尼器等效刚度、等效阻尼随转速变化曲线。

2) 基于识别得到的参数,进行了转子动力学计算,试验测试和仿真预测共振转速最大误差为 6.96%,共振转速的振动位移幅值最大误差为 8.22%。这很好地验证了识别结果的准确性。

参考文献:

- [1] PINKUS O, STERNLICHT B, SAIBEL E. Theory of hydrodynamic lubrication [J]. Journal of Applied Mechanics, 1962, 29(1): 221-222.
- [2] STERNLICHT B, LEWIS P. Vibration problems with high-speed turbomachinery [J]. Journal of Engineering for Industry, 1968, 90(1): 174-185.
- [3] LUNDIN C D, KHAN K K, YANG D, et al. Failure analysis of a service-exposed hot reheat steam line in a utility steam plant [J]. WRC Bulletin, 1990, 354: 1-38.
- [4] BURROWS C R, SAHINKAYA M N. Frequency-domain estimation of linearized oil-film coefficients [J]. Journal of Lubrication Technology, 1982, 104(2): 210-215.
- [5] MA Y H, ZHU H X, ZHANG D Y, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behavior of the elastic ring support with metal rubber [C]//Volume 4B: Dynamics, Vibration and Control. San Diego, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2013: V04BT04A053.
- [6] MA Y H, ZHU H X, WANG C, et al. Compression mechanics of the SC-MR support for rotor system [C]//Volume 7A: Structures and Dynamics. Düsseldorf, Germany: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V07AT31A017.
- [7] 邹谭. 基于桥梁结构响应的车辆荷载识别方法研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- [8] 杨慧, 李奉阁, 闫维明, 等. 基于 ANN 和动应变的梁桥移动荷载识别及试验 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 305-313.

收稿日期: 2024-02-26

(上接第 138 页)

- [3] 向红军, 乔志明, 吕庆敖. 电磁轨道炮原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022: 5-8.
- [4] 林庆华, 栗保明. 基于瞬态多物理场求解器的电磁轨道炮发射过程建模与仿真 [J]. 兵工学报, 2020, 41(9): 1697-1707.
- [5] 赵赛, 祝丽花, 郝建英, 等. 电磁轨道发射装置电磁热力强耦合计算及分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(4): 56-62, 76.
- [6] HSIEH K T, THIAGARAJAN V. A novel split-domain iteration scheme for solution of electromagnetic diffusion problems modeled by the hybrid finite-element-boundary-element formulation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 587-590.
- [7] SHVETSOV G A, STANKEVICH S V. Three-dimensional numerical simulation of the joule heating of various shapes of armatures in railguns [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 456-460.
- [8] 郭永明, 王娜娜, 张彤. 湿式离合器热固耦合仿真分析与试验研究 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(2): 150-154.
- [9] 王琪. 电磁发射过程的多物理场耦合效应研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [10] 肖宏成, 尹冬梅, 林庆华, 等. 轨道炮复合身管纤维缠绕封装结构优化设计及预应力模拟 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 152-158.
- [11] 吴立周, 古刚, 耿昊, 等. 螺栓紧固型轨道发射器预紧力 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 045005.

收稿日期: 2024-02-26