

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0156

基于移动窗口的串联增强型轨道炮发射过程 电磁场演化模拟分析*

王刚华, 谢 龙, 赵海龙, 阚明先, 肖 波, 何 勇, 宋盛义
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 简要介绍了 Railgun3D 程序的主要控制方程, 使用 Railgun3D 程序对串联增强型轨道炮发射过程进行了模拟, 详细分析了一复杂构型的电枢在梯形驱动电流加载外轨道/电枢上电磁场的演化过程, 对电流涡结构、电流趋肤效应进行了讨论。计算中观察到了不同于普通单轨的现象, 由于增强轨道的存在, 驱动电流在增强轨道上产生了较大的磁场, 由于电磁感应, 在内轨道炮口一端上有显著的磁场和电流分布, 感应电流的大小依赖于驱动电流的变化率。计算给出了多个时刻电枢附近电流涡结构的演化过程, 并在电流下降段, 电枢后表面上电流出现反向, 指出该效应可能是导致电枢与轨道接触应力不足、甚至出现电枢转捩的重要因素。通过中心对称面上电流密度云图, 模拟结果显示出磁扩散与速度趋肤效应在整个过程中的相互竞争决定了电流的分布形态。

关键词: 电磁轨道炮; 电流涡; 速度趋肤效应; 电枢转捩; Railgun3D 程序; 移动窗口法

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Simulational analysis on electromagnetic field evolution in launching process of a series enhanced electromagnetic railgun based on the moving-window method

WANG Ganghua, XIE Long, ZHAO Hailong, KAN Mingxian, XIAO Bo, HE Yong, SONG Shengyi
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: It is very important to simulate and analyze the evolution of the electromagnetic field on the armature/rail in the electromagnetic emission process for optimizing and improving the design of the rail and armature, which is the main basis for controlling the temperature rise of the rail, armature and armature transition. Series enhanced trajectory design is an effective way to improve projectile initial velocity and launch efficiency under the condition of inherent energy storage. In this design, the magnetic field strength on the armature is increased through the series current of the circuit, thus improving the emission ability. A mathematical and physical model is established for the series enhanced orbit. The main control equations of the Railgun3D program are briefly introduced in this paper. The moving window FE/BE Hybrid simulation method is adopted to simulate the series reinforced railgun. This method can make more efficient use of computer resources and focus the simulation on the vicinity of the rail/armature interface. The evolution process of the electromagnetic field of a complex rail/armature under trapezoidal driving current is analyzed in detail. Due to the existence of the enhanced orbit, the driving current produces a large magnetic field on the enhanced orbit. Due to electromagnetic induction, the corresponding induced current will be generated on the inner orbit, that is, there are significant magnetic field and current distribution on the orbit at one end of the muzzle. The magnitude of the induced current depends on the change rate of the driving current. The distribution of current direction near the armature at several times is given, and the evolution process of the current vortex structure is observed. In the current drop section, the results of current reversal on the surface behind the armature are given. It is pointed out that this effect may be an important factor leading to insufficient contact stress between the armature and the track, and even the occurrence of

* 收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-09-28

第一作者: 王刚华(1976—), 男, 博士, 副研究员, wanggh@caep.cn

armature transition. Through the current density nephogram on the central symmetry plane, the simulation results show the competition mechanism between magnetic diffusion and velocity skin effect in the whole process.

Keywords: electromagnetic railgun; current vortex; velocity skin effect; armature transition; Railgun3D program; moving-window method

现代先进兵器对弹丸速度的要求越来越高, 弹丸超高速发射是增大射程、缩短飞行时间的重要前提, 是未来战场取得优势的保证。然而, 传统火炮受限于火药气体的膨胀声速, 发射速度很难超过 2 km/s ^[1]。电磁发射技术在发射潜力上能满足超高速发射的需求, 在原理上不存在声速限制, 是各军事强国重点关注的未来武器技术路线之一^[2-6]。为了提升弹丸初速和发射效率, 近年来, 针对电枢与轨道的作用机理开展了大量研究, 如电枢性能、电枢与导轨的接触问题和匹配性能等^[7-12]。串联增强型轨道设计是在固有储能条件下提高弹丸初速和发射效率的一种有效途径。这种设计方案通过电路串联电流提高了电枢上的磁场强度, 从而提高了发射能力, 后来 Lü 等将这一技术发展到了多匝串联并列轨道炮^[13-14]。

模拟分析电磁发射过程中电枢/轨道上的电磁场演化对于优化和改进轨道、电枢设计极为重要, 是控制轨道、电枢温升、电枢转捩的主要依据。很多学者通过静磁场或时谐分析获得了许多有价值的结论^[15-17], 但是更好地模拟磁场演化需要瞬态分析。因为电磁轨道炮问题的三维有限元模拟是一个复杂的多场耦合的大型问题, 它对于计算机资源(内存、CPU 时间)的耗费很高。电磁轨道炮的发射过程中, 轨道长度在米的量级, 而电枢尺寸上的细微结构往往不到 1 mm , 而且, 电磁场在这些地方的分布非常重要, 这就使得计算网格规模十分庞大, 即使使用自适应网格技术也很难完成全过程电磁场演化模拟。对于串联增强型或多匝串联并列轨道炮而言, 构型更复杂, 计算量也更大。

为了更有效率地使用计算机资源, 从而可以在有限资源情况下尽可能提高程序所能达到的最大解题规模, 本文中将有有限元方法和边界元方法相结合^[18-20], 从而免去对空气域划分网格的需要。此外, 本文中关心的主要物理现象仅发生在电枢-轨道接触面附近, 而在远离轨道-电枢接触面的地方, 场量分布具有渐进平移不变的特性。利用该特点, 可采用所谓“移动窗口法”^[21]来减小实际计算域。其要点是: 在不考虑末端效应的情况下, 假设轨道为无限长, 并且, 在每个时间步, 仅将电枢-轨道接触面附近的一小段轨道纳入计算域, 从而大幅度减少了未知量。采用该方法后, 计算网格始终保持不变, 因此边界元方法中的迦辽金表面积分只需要计算一次。此后, 即使电枢位置发生改变, 也不需要再重新计算上述积分, 这就大大减少了每个时间步的机时。实际计算表明, 该方法有效提高了计算效率, 通过该方法研制的 Railgun3D 程序可以模拟电磁轨道炮的全过程。在此基础上, 本文中将有 Railgun3D 程序拓展到串联增强型轨道的计算, 并对其电磁场演化特征进行细致分析, 观察电流涡结构演化和电流速度趋肤效应等。

1 Railgun3D 程序简介

Railgun3D 程序是中国工程物理研究院流体物理研究所研制的一套电磁轨道炮数值模拟程序, 采用了基于移动窗口法的有限元/边界元耦合模拟技术, 可以模拟电磁轨道炮发射过程中电磁场演化、电枢运动、温度场演化等过程, 能模拟发射中的焦耳加热效应、磁扩散效应等。

Railgun3D 程序中电磁场演化求解如下方程:

$$\frac{\partial(\mu\sigma\mathbf{E})}{\partial t} + \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\eta\nabla \times \mathbf{B}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; \mathbf{E} 为电场强度; η 为磁扩散系数, $\eta=1/(\mu\sigma)$; \mathbf{B} 为磁感应强度。

在空气区, 引入磁标势 ψ , 使得 $\mathbf{B} = \nabla\psi$, ψ 满足拉普拉斯方程, 即:

$$\nabla^2\psi = 0 \quad (3)$$

根据拉普拉斯方程的性质, 在导体表面上, ψ 满足如下的边界积分方程:

$$2\pi \psi(\mathbf{x}) + \oint_{\partial\Omega} \left(-\psi(\mathbf{y}) \frac{\partial}{\partial n(\mathbf{y})} \frac{1}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} + \frac{\mathbf{B}_n(\mathbf{y})}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} \right) dS(\mathbf{y}) = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 为空间坐标, n 为表面法向分量, S 为导体表面积, \mathbf{B}_n 为导体表面 $\partial\Omega$ 上的法向磁场分量。

对于导体内的温度场演化, Railgun3D 程序中考虑了热传导效应和焦耳加热, 求解如下热传导方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma \mathbf{E}^2 \quad (5)$$

式中: ρ 为密度, c_p 为比定压热容, T 为温度, k 为导热系数, $\sigma \mathbf{E}^2$ 为焦耳热效应的功率密度。

Railgun3D 程序中将电枢看作刚体, 仅沿 x 方向 (即轨道方向) 运动, 其位移 X 满足如下运动方程:

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} = \iiint_{V_s} (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_x dV - \iint_{S_5} \mu_f |\sigma_{yy}| dS \quad (6)$$

式中: m 为电枢的质量, V_s 为弹丸体积, \mathbf{J} 为电流密度, μ_f 和 σ_{yy} 分别为轨道/电枢接触面 S_5 上的滑动摩擦系数和法向应力, V 为电枢所包含的体积。

该程序与目前常用的商用软件如 Ansys、Comsol 等相比, 稳态和瞬态电磁场计算均具有同等精度^[12], 瞬态分析计算在速度上具有明显的优势。

2 串联增强型轨道炮发射过程电磁场演化模拟分析

串联增强型轨道炮的轨道和电枢设计示意图如图 1 所示, 该设计中外轨为平面轨道, 内轨道中间使用了弧形轨道, 发射过程中, 电枢下表面采用弧形设计, 安装过程中通过预加应力, 与内轨道弧面紧密接触。为了便于分析发射过程中的电磁场演化过程, 计算中使用了如图 2 所示的理想梯形电流波形。由于模型的几何对称性, 计算中使用通过上下对称面和左右对称面切割获得的四分之一模型, 以减小计算量。

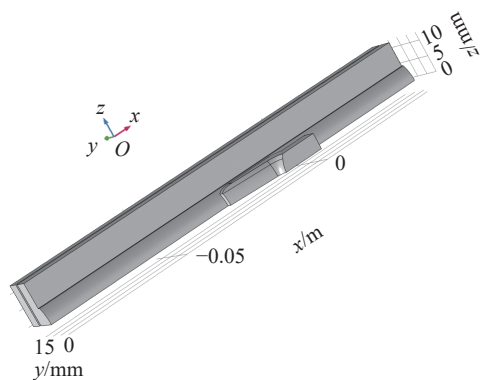


图 1 串联增强型轨道炮的轨道和电枢设计示意图
(四分之一模型)

Fig. 1 Schematic diagram of rail and armature design for a series enhanced railgun (1/4 model)

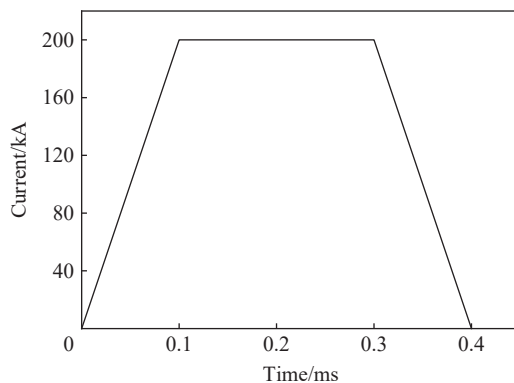


图 2 加载电流波形

Fig. 2 Loading current waveform

图 3~6 给出了电流上升段中间时刻、刚到达电流最大值时刻、电流平台中间时刻、电流下降段中间时刻等几个典型时刻轨道/电枢上的磁场和电流密度分布。从图中可以看出, 内轨道弧形部分与轨道边缘处磁场和电流分布较强, 与一般的单轨结构不同, 由于增强轨道的存在, 驱动电流在增强轨道上产生了较大的磁场, 该磁场遍布整条外轨道, 由于电磁感应, 在内轨道上会产生相应的感应电流, 不过, 在内轨道的左端, 其上的电流主要由流经轨道的驱动电流决定, 内轨道的右端则主要是感应电流, 而对于一般的单轨轨道炮而言, 其右端电流基本为零。增强轨道的引入使得轨道电枢上的磁场和电流分布变得更复杂, 在进行电枢设计与分析时必须慎重考虑。

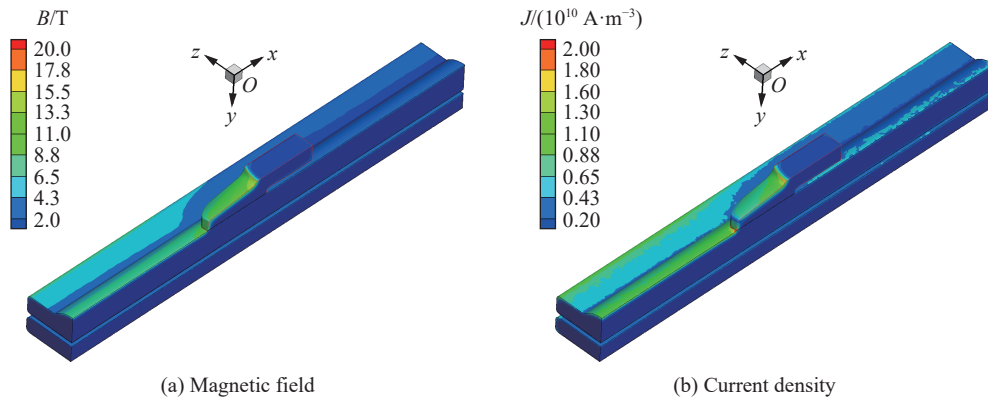


图 3 48 ns 时刻磁场与电流密度分布

Fig. 3 Distributions of magnetic field and current density at 48 ns

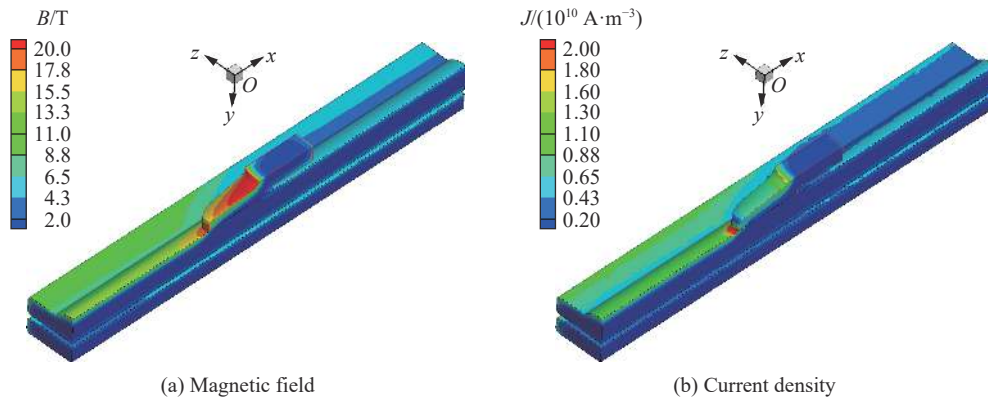


图 4 108 ns 时刻磁场与电流密度分布

Fig. 4 Distributions of magnetic field and current density at 108 ns

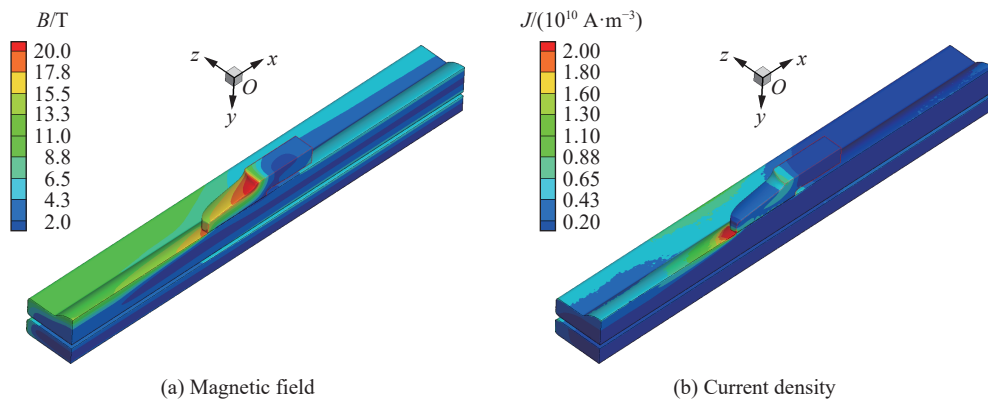


图 5 204 ns 时刻磁场与电流密度分布

Fig. 5 Distributions of magnetic field and current density at 204 ns

对比图 3~6, 内轨道右端感应电流在驱动电流上升段较大, 在驱动电流平台时间段内, 内轨道右端感应电流变小, 在驱动电流下降段, 该感应电流再次变大, 这一变化过程正好反映了计算获得的感应电流与该处磁通量变化相关, 是比较合理的物理图像。

图 7 给出了电枢附近 48、204 ns 时刻的电流方向和电流密度分布, 图中带箭头线长度一致, 只代表电流方向。从图 7 可以清晰地看出前面所述的轨道上各部分的电流走向。在电枢上, 该结构设计的电

枢, 其头部外侧形成了电流涡结构, 并随着电流增大, 驱动电流从电枢后表面向头部扩散, 该电流涡结构向头部漂移。该涡结构的形成与内轨道上产生的感应电流有关, 是轨道上电流进一步在电枢上产生的感应电流。不过总的看来, 产生涡流处电流密度较小。

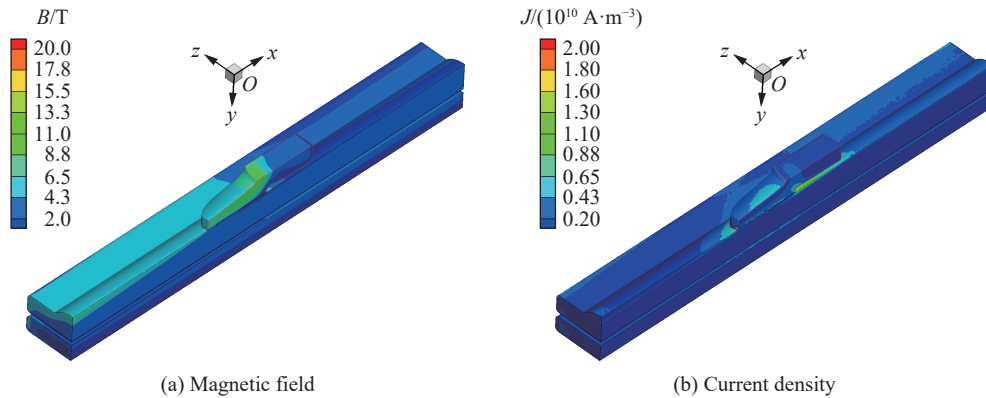


图 6 348 ns 时刻磁场与电流密度分布

Fig. 6 Distributions of magnetic field and current density at 348 ns

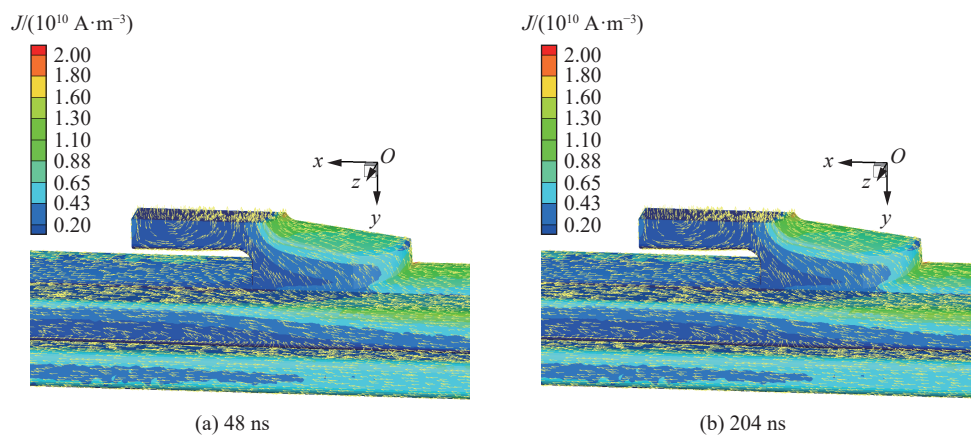


图 7 两个不同时刻的电流密度分布与电流方向

Fig. 7 Current density distributions and current directions at two different moments

在电流下降段, 负的电位变化率使得电枢后表面电流出现反向, 紧挨电枢头部处轨道电流密度较大, 电枢中段侧面出现电流涡结构, 如图 8 所示。电枢上后表面电流方向的改变使得电枢受力情况变得复杂, 如图 9 所示, 尽管电枢总体受力方向没有改变, 但后表面上洛伦兹力转向炮膛中央, 这有可能导致电枢与轨道接触应力不足, 甚至出现电枢转捩, 而电枢转捩可能是对轨道造成较大的破坏性损伤、炮管震动、电枢翻转等的重要诱因, 进而会影响轨道炮的重复发射性能、发射精度等。Wang 等^[22]也观察到了这种在电流下降段诱发的涡流现象, 并用下坡转捩理论进行了解释。

电枢加速过程中, 轨道/电枢上的电流分布受扩散和速度趋肤效应两种机制控制。为了便于观察, 在轨道/电枢对称面上作电流密度分布二维视图, 见图 10。在 48 ns 时, 电枢运动速度低, 电流扩散效应显著, 是决定电流分布的主导因素。至 108 ns, 电枢速度有所提高, 电流进一步扩散的同时, 可以观察到速度趋肤效应的影响, 该时刻电流密度整体增大是由于电流上升。至 204 ns, 电枢速度已经较高, 速度趋肤效应比较明显, 成为电流相对大小分布的主导因素, 但由于电流依然向轨道和电枢内部扩散, 使得该观察窗口内电流密度峰值有所下降。随着电枢速度进一步提高, 速度趋肤效应愈加明显。在电流下降段的 348 ns 时刻, 电流峰值下降导致电流密度下降, 轨道/电枢部分区域电流反向, 只是电流分布更复杂。

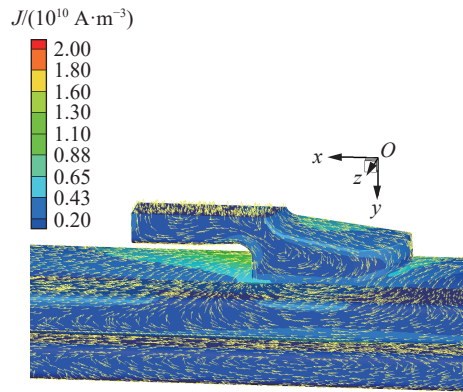


图 8 348 ns 时刻电流密度分布与电流方向

Fig. 8 Current density distribution and current direction at 348 ns

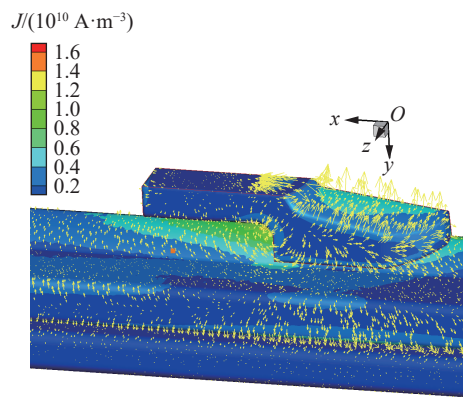


图 9 348 ns 时刻电流密度分布与洛伦兹力方向

Fig. 9 Current density distribution and Lorentz force direction at 348 ns

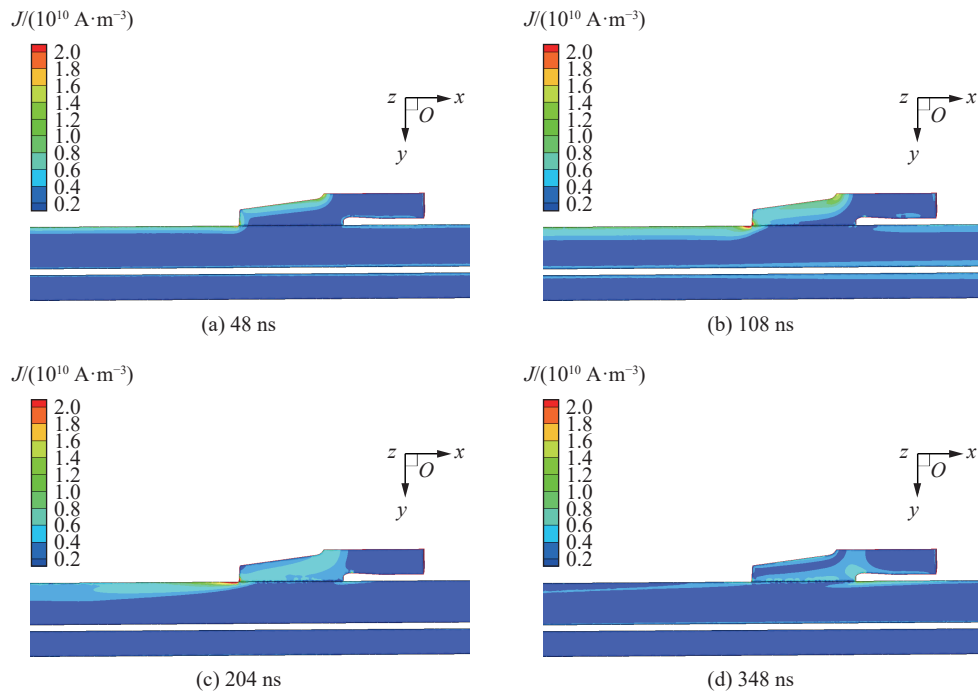


图 10 4 个不同时刻电流密度的二维分布

Fig. 10 Two-dimensional distributions of current density at four different moments

3 结 论

利用流体物理研究所研发的 Railgun3D 电磁轨道炮数值模拟程序对串联增强型轨道炮进行了模拟, 详细分析了一复杂构型的轨道/电枢在梯形驱动电流加载下电磁场的演化过程。由于增强轨道的存在, 驱动电流在增强轨道上产生了较大的磁场, 由于电磁感应, 在内轨道上会产生相应的感应电流, 即在炮口一端的轨道上有显著的磁场和电流分布, 感应电流的大小依赖于驱动电流的变化率。

给出了多个时刻电枢附近的电流方向分布, 观察到了电流涡结构的演化过程, 并在电流下降段给出了电枢后表面上电流反向结果, 指出该效应可能是导致电枢与轨道接触应力不足、甚至出现电枢转捩的重要因素。

中心对称面上电流密度云图显示出磁扩散与速度趋肤效应在整个过程中的竞争机制。

参考文献:

- [1] KULKARNI A S, THOMAS M J. Comparison between the performance analysis of passive compulsators with slotted and slotless armature windings driving a railgun [J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2019, 20(6): 20190132A. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0132.
- [2] MARSHALL R A, WANG Y. Railguns: their science and technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [3] KUMAR V P, SWARUP S, RAJPUT S, et al. Design and development of 4-MJ capacitor bank-based pulsed power system for electromagnetic launcher [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(3): 1681–1689. DOI: 10.1109/TPS.2019.2896013.
- [4] MCNAB I R. Electromagnetic launch to space [J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2007, 60: 54–62.
- [5] ZHANG H, DAI K R, YIN Q. Ammunition reliability against the harsh environments during the launch of an electromagnetic gun: a review [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 45322–45339. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907735.
- [6] PONIAEV S A, REZNIKOV B I, KURAKIN R O, et al. Prospects of use of electromagnetic railgun as plasma thruster for spacecrafts [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 150: 92–96. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.035.
- [7] MCNAB I R, CRAWFORD M T, SATAPATHY S S, et al. IAT armature development [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(1): 442–451. DOI: 10.1109/TPS.2010.2082568.
- [8] GUO W, ZHANG T, LI J X, et al. Design and testing a novel armature on railgun [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(5): 1119–1124. DOI: 10.1109/TPS.2015.2393365.
- [9] PROULX G A. Railgun with steel barrel sections and thermal management system [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(5): 1642–1646. DOI: 10.1109/TPS.2015.2411259.
- [10] STONKUS R, RAČKAUSKAS J, SCHNEIDER M, et al. Structural mechanics of railguns with open barrels and elastic supports: the influence of multishot operation [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(5): 1510–1515. DOI: 10.1109/TPS.2014.2387791.
- [11] 王刚华, 谢龙, 王强, 等. 电磁轨道炮电磁力学分析 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2011(1): 69–71, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6524.2011.01.018.
WANG G H, XIE L, WANG Q, et al. Analysis on electromagnetic mechanics in electromagnetic railgun [J]. *Journal of Gun Launch and Control*, 2011(1): 69–71, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6524.2011.01.018.
- [12] WANG G H, XIE L, HE Y, et al. Moving mesh FE/BE hybrid simulation of electromagnetic field evolution for railgun [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(8): 1424–1428. DOI: 10.1109/TPS.2016.2584981.
- [13] LV Q A, LI Z Y, LEI B, et al. Primary structural design and optimal armature simulation for a practical electromagnetic launcher [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(5): 1403–1409. DOI: 10.1109/TPS.2013.2251679.
- [14] 邢彦昌, 吕庆敖, 雷彬, 等. 多匝串联并列轨道炮 U 形电枢接触界面熔蚀规律分析 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(11): 2081–2091. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.001.
XING Y C, LYU Q A, LEI B, et al. Analysis of melting erosion characteristic on the contact interface between u-shaped armature and rails for multiturn serial-parallel railgun [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(11): 2081–2091. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.001.

- [15] 徐蓉, 袁伟群, 成文凭, 等. 增强型电磁轨道发射器的电磁场仿真分析 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(4): 1065–1070. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2014.04.015.
XU R, YUAN W Q, CHENG W P, et al. Simulation and analysis of electromagnetic field for augmented railgun [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 1065–1070. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2014.04.015.
- [16] 任先进, 张春. 静止条件下电磁轨道炮膛内磁场环境仿真分析 [J]. *火控雷达技术*, 2018, 47(2): 82–84; 90. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8652.2018.02.018.
REN X J, ZHANG C. Simulation analysis of in-bore magnetic field environment of electromagnetic rail-gun at static condition [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2018, 47(2): 82–84; 90. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8652.2018.02.018.
- [17] 王志恒, 万敏, 李小将. 轨道炮电枢电力转矩形成机理与仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(3): 1090–1095. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803040.
WANG Z H, WAN M, LI X J. Formation mechanism and simulation analysis of railgun armature electromagnetic transition [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 1090–1095. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803040.
- [18] 饶寿期. 有限元法和边界元法基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [19] 周平, 徐金平. 求解电磁场有限元边界元方程组的有效方法 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2005, 35(3): 343–346. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2005.03.005.
ZHOU P, XU J P. Method for solving linear equations of hybrid finite element-boundary element method for EM problems [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2005, 35(3): 343–346. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2005.03.005.
- [20] 金伟其, 周立伟, 倪国强, 等. 一种计算轴对称磁场的边界元-有限元混合法的研究 [J]. *北京理工大学学报*, 1991, 11(4): 37–44.
JIN W Q, ZHOU L W, NI G Q, et al. A combined boundary element-finite element method for computing the rotational symmetrical magnetic field [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1991, 11(4): 37–44.
- [21] LIU J F, XI X L, WAN G B, et al. Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving-window finite-difference time-domain method [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(3): 852–855. DOI: 10.1109/TPS.2010.2098890.
- [22] WANG Z J, CHEN L X, XIA S G, et al. Experiments and analysis of downslope low-voltage transition in C-type solid armature rail gun [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(7): 2601–2607. DOI: 10.1109/TPS.2020.2999396.

(责任编辑 张凌云)