

电磁轨道炮电磁力学分析

王刚华, 谢 龙, 王 强, 宋盛义, 胡熙静, 王文斗

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在矩形电枢与简单轨道的基础上建立了电磁轨道炮轨道和电枢上磁场扩散的二维有限元计算模型, 模型没有考虑轨道与电枢的形变。分析了电枢运动引起的速度趋肤效应, 随着轨道与电枢相对速率的增加, 磁场、电流的趋肤效应越明显, 当速度大于 $1\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 磁场和电流集中分布在轨道内表面与电枢后表面附近很小的区域, 继续增大相对速率不会使磁场分布发生明显变化。采用 ANSYS 软件计算了静态复杂电枢结构情形下轨道电枢上的磁场和电流分布, U 形电枢结构对于抑制电枢与轨道交界处磁场、电流的过分集中有明显的改善作用。

关键词: 流体力学; 电磁轨道炮; 电枢; 速度趋肤效应

中图分类号: TJ399

文献标志码: A

文章编号: 1673-6524 (2011) 01-0069-03

Analysis on Electromagnetic Mechanics in Electromagnetic Railgun

WANG Gang-hua, XIE Long, WANG Qiang, SONG Sheng-yi, HU Xi-jing, WANG Wen-dou

(Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Based on rectangle armature and simple rail, 2D finite element calculation model was established to solve the diffusion problems of current and magnetic field in electromagnetic railgun. The model did not take account of the deformation of rail and armature. The velocity skin effect resulted from armature movement was analysed. With the increase of relative rate of rail and armature, the velocity skin effect of magnetic field and current were more obvious. When the velocity is more than $1\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, magnetic field and current concentrated to distribute in very small area on the inner surface of rail and back surface of armature. The continuing increase of relative rate did not make magnetic field distribution to change obviously. The magnetic field and current distribution under condition of static and complex armature structure were calculated by use of ANSYS software, and U shape armature structure showed to have evident improving effect for eliminating excessive concentration of magnetic field and current near the interface of rail and armature.

Key words: fluid mechanics; electromagnetics; electromagnetic railgun; armature; velocity skin effect

电磁轨道炮技术是一类新原理的发射或推进技术, 作为电磁发射的高速武器, 是新概念武器家族的重要成员, 目前其主要目标是将其用于坦克、反坦克、防空和远程火力系统中^[1-2]。电磁轨道炮具有发射速度高(理论上可达几十公里每秒)、方便灵活、毁伤效果好、发射成本低、可重复发射和发射弹丸质量可调等特点^[3]。电磁轨道炮系统主要由发

射器以及为发射器供能的脉冲电源两大分系统组成(见图1)^[4]。发射器分系统包括两根平行的导电轨道、电枢、弹丸和绝缘紧固件等; 脉冲电源分系统包括初始储能子系统、脉冲成形及传输子系统、充电和控制子系统等。

如图1所示, 电磁轨道炮的发射原理是利用流经导电轨道和滑动电枢的强电流产生磁场, 载流电

收稿日期: 2009-12-08; 修回日期: 2010-02-28

基金项目: 中国工程物理研究院科学发展基金

作者简介: 王刚华 (1976—), 男, 博士, 主要从事磁流体力学、电磁加载和等离子体物理研究。E-mail: wanggh@caep.ac.cn

枢在此磁场中受电磁力作用,从而驱动与电枢一体的弹丸运动。可见,电磁轨道炮是完全依靠电能和电磁力加速弹丸的一种超高速发射装置。

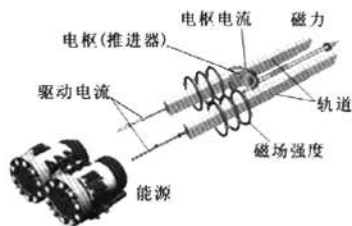


图1 电磁轨道炮装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of electromagnetic railgun

电磁轨道炮的驱动电流脉冲幅值通常为数百千安到兆安量级,对于平行轨道而言,电流在两根轨道上异向流动,其产生的洛伦茨力使得两根轨道相互排斥,因此,有必要对轨道进行力学分析,以确定轨道紧固件的设计,防止轨道在发射过程中被破坏。另外,电流脉冲宽度为几个微秒,由于持续时间短,电流在轨道和电枢上只能有效地穿透表面下一定深度,在这一穿透深度内,金属将被大电流加热至高温状态,甚至可能达到熔点,对轨道形成烧蚀,这对于轨道炮的重复发射带来严重影响。为了深入地理解这一现象,有必要清楚地知道轨道和电枢上的电流、磁场的分布情况。

1 轨道炮二维磁扩散问题的有限元模型

图2为简化的轨道-矩形电枢示意图,将坐标系建立在电枢上,两坐标轴交点坐标为(0,0),轨道以速度 v 相对电枢向左运动,轨道内表面磁场设为 B_0 ,电枢厚度为 l ,轨道厚度为 h ,轨道间距为 $2w$,电枢位置距离轨道为 d 。

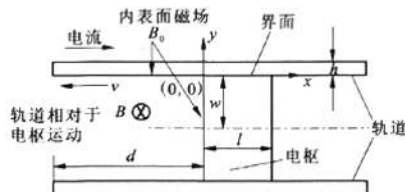


图2 轨道电枢模型示意图

Fig 2 Schematic diagram of rail and armature model

在上述坐标系内可建立磁扩散控制方程:

在轨道内:(拉格朗日坐标)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right), -d < x < l, 0 < y < h \quad (1)$$

在电枢内:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right), 0 < x < l, -w < y < 0 \quad (2)$$

式中: η 为电阻率,初始条件为:在电枢区域及轨道内部,磁场为零。

第1类边界条件: $B|_{x=l} = B|_{y=h=0}$,

$$B|_{x=0, -w < y < 0} = B|_{y=0, -d < x < 0} = B_0(t);$$

自然边界条件:

$$\frac{\partial B}{\partial x} \Big|_{x=-d, 0 < y < h} = 0, \frac{\partial B}{\partial x} \Big|_{y=-w, 0 < x < l} = 0。$$

对控制方程采用时间向后离散可得:

$$\frac{B^n - B^{n-1}}{\Delta t} = \eta \left(\frac{\partial^2 B^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B^n}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

于是,在1个时间步内,原问题等效为以下的稳态问题:

$$-\eta \Delta t \left(\frac{\partial^2 B^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B^n}{\partial y^2} \right) + B^n = B^{n-1} \quad (4)$$

改变记号为 $B^n \rightarrow B, B^{n-1} \rightarrow f$ 伽辽金有限元方程为:

$$\int_{\Omega} \left\{ \eta \Delta t \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) + N_i^e N_j^e \right\} \times B_j dx dy = \int_{\Omega} N_i^e N_j^e f_j dx dy \quad (5)$$

式中: e 为有限元单元,单元刚度矩阵为:

$$K_{i,j}^e = \frac{\eta \Delta t}{4 \Delta^e} (b_i^e b_j^e + c_i^e c_j^e) + \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{i,j}) \quad (6)$$

单元右端项为:

$$\bar{b}_j^e = \frac{\Delta^e}{12} (f_1^e + f_2^e + f_3^e + f_4^e) \quad (7)$$

对轨道上磁扩散的描述采用拉格朗日坐标,从而消除了速度项。在1个时间步 Δt 结束后,得到的轨道上的磁场分布是在相对于轨道静止的参考系下的磁场分布 $\bar{B}(x', y)$ 。其中, x' 为拉格朗日坐标。由于欧拉坐标 x 与 x' 的关系为:

$$x = x' - v \Delta t \quad (8)$$

所以实验室参考系下的磁场分布为 $B(x, y)$ 为:

$$B(x, y) = \bar{B}(x + v \Delta t, y) \quad (9)$$

也就是说,将分布 $\bar{B}(x, y)$ 向负 x 轴方向平移 $v \Delta t$,就得到分布 $B(x, y)$ 。

电流密度为:

$$j_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial y}, \quad j_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} \quad (10)$$

单位体积的磁场力:

$$\left. \begin{aligned} f_x &= -Bj_y = -\frac{1}{\mu} B \frac{\partial B}{\partial x} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial B^2}{\partial x} \\ f_y &= -Bj_x = -\frac{1}{\mu} B \frac{\partial B}{\partial y} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial B^2}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2 矩形电枢计算结果与分析

设轨道间距为 6 cm, 轨道厚度为 0.5 cm, 电枢厚度为 2 cm, 轨道内表面磁场设为 $B_0 = 1$ T, 轨道相对于电枢的运动速度 v 分别取为 1、100、1 000 和 5 000 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于轨道电枢沿电枢中线对称, 故计算区域只选取一半区域。

如图 3 所示, 分别给出了不同速度下轨道和电枢上的磁场分布, 比较各图可发现, 随着轨道和电枢相对速度的增大, 磁场往表面集中的趋势愈加明显, 这就是速度趋肤效应^[5]。当轨道和电枢相对速度大于 1 000 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后, 磁场的趋肤深度随相对速度的增加不再发生明显变化, 因此, 当进行高速轨道炮设计需要考虑速度趋肤效应时, 对于大于 1 000 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度的情况, 可以用 1 000 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的趋肤深度作为估计, 而不会带来大的误差。

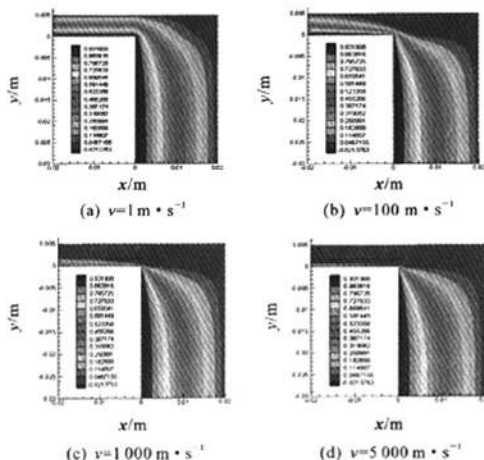


图3 不同相对速度下轨道和电枢上的磁场分布

Fig 3 Magnetic field distribution on rail and armature under different relative rates

图 4 为不同速度下轨道和电枢上的电流密度分布图, 比较这几幅图同样可得出随着相对运动速度的增大电流往表面集中愈加明显的结论。在轨道和电枢拐角点交接处, 电流密度远大于其他地方, 如此强的电流将对轨道进行焦耳加热, 可将轨道和电枢烧蚀、汽化, 甚至产生等离子体。此外, 这种分布也造就了图 5 所示的 y 方向的磁力分布, 由

于交界面上 y 方向的磁力 f_y 分布的不连续性, 使得轨道和电枢有相互分离的趋势, 一旦两者之间形成了缝隙, 焦耳加热形成的等离子体将穿透进入交界面, 在轨道电枢间形成电弧, 发生转换, 加速轨道烧蚀现象, 这对于电磁轨道炮来说, 是极其不利的, 可影响轨道炮的发射效率、多发性能及工作寿命。以上这些, 可能是大家改进轨道和电枢结构的主要原因。

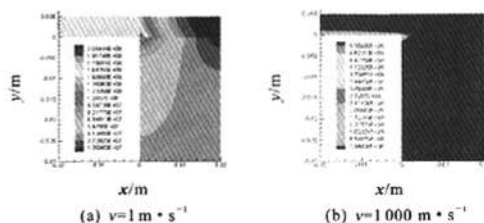


图4 不同相对运动速度下轨道和电枢上的电流密度分布图

Fig 4 Current density distribution on rail and armature under different relative rates

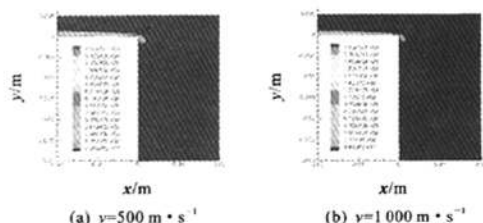


图5 不同相对运动速度下轨道和电枢上的 y 方向磁力分布图

Fig 5 Magnetic force in y direction on rail and armature under different relative rates

3 复杂结构电枢上磁场、电流等分布的有限元分析

前述的理论和计算分析都假设电枢的形状为矩形规则电枢, 然而, 在实际中, 电枢的形状常常复杂多样, 电磁轨道也有单轨和双轨之分。对于这种复杂的情况, 在不考虑速度趋肤效应时, 可选用商业软件 ANSYS 等进行分析。

图 6 和 7 为采用 ANSYS 软件对串联增强型轨道炮进行分析的结果, 计算中所用电极为 U 形电枢, 并假定电流在轨道上均匀分布, 图示磁场电流分布为静态分析结果。从图中可以看出, 与使用矩形电枢相比, 在轨道电枢交界处的拐角点附近, 没有出现电流、磁场的大幅度集中, 这对于抑制轨道烧蚀有极其重要的作用。

(下转第 76 页)

sensor and transducer[J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(11): 9-11. (in Chinese)

- [4] 李传琦, 邹其洪. CAV414 集成电路与电容性传感器应用[J]. 国外电子器件, 2003(2): 22-23.

LI Chuan-qi, ZOU Qi-hong. Application of CAV414 integrate circuit and a capacitive sensor[J]. International Electronic Elements, 2003(2): 22-23. (in Chinese)

- [5] 黄晓东, 张筱朵, 王斌. 单片集成 MEMS 电容压力传感器接口电路设计[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(7): 502-504.

HUANG Xiao-dong, ZHANG Xiao-duo, WANG Bin. Design of the interface circuit for monolithic MEMS capacitive pressure sensor[J]. Micronanoelectronic Tech-

nology, 2007, 44(7): 502-504. (in Chinese)

- [6] 陈力, 陈仁文. AD7745 在微机械电容式传感器测量电路中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(4): 75-76.

CHEN Li, CHEN Ren-wen. The application of AD7745 in micromechanical capacitive sensors measuring circuit [J]. Instrumentation Customer, 2006, 13(4): 75-76. (in Chinese)

- [7] 张利霞, 杨忠华, 孙金花, 等. 一种电容式传感器信号调理电路的设计[J]. 物探装备, 2007, 17(2): 79-82.

ZHANG Li-xia, YANG Zhong-hua, SUN Jin-hua, et al. Design of signal conditioning circuit for a kind of capacitive sensor[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2007, 17(2): 79-82. (in Chinese)

(上接第 71 页)

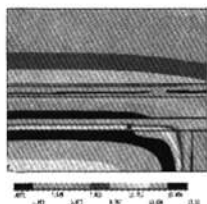


图6 双轨U形电枢磁场分布

Fig 6 Magnetic field distribution on rail and Ushape armature

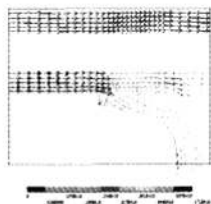


图7 双轨U形电枢电流分布

Fig 7 Current density distribution on rail and Ushape armature

4 结 论

对于矩形电枢模型, 采用有限元方法, 对轨道和电枢上的静态磁场、电流分布进行了详细计算和分析; 给出了不同速度下轨道电枢上的磁场分布, 磁场主要集中分布轨道内表面和电枢后表面, 轨道、电枢的相对速度越大, 这种集中越明显。

采用 ANSYS 软件计算了串联增强型轨道炮的轨道电枢上磁场、电流分布, 指出使用 U 形电枢与使用矩形电枢相比, 在轨道电枢交界处的拐角点附近, 没有出现电流、磁场的大幅度集中, 这有益于抑

制轨道烧蚀。

参考文献 (References)

- [1] WALLS W A, WELDON W F, PRATAP S B. Application of electromagnetic guns to future naval platforms [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, MAG-35(1): 262-267.
- [2] SCHMIDT E M. Comparison of conventional and electromagnetic gun launch[C]. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, 2004.
- [3] FAIR H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era[C]. 12th Electromagnetic Launch Symposium, Snowbird, Utah, America, 2004.
- [4] TZENG J T, SCHMIDT E A. Advanced materials bring electromagnetic gun technology one step closer to the battlefield[J]. The AMPTIAC Quarterly, 2004, 18(4): 79-84.
- [5] YOUNG F J, HUGHES W F. Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers [J]. IEEE Trans. Magn, 1982, MAG-18(2): 33-41.

作者: [王刚华](#), [谢龙](#), [王强](#), [宋盛义](#), [胡熙静](#), [王文斗](#), [WANG Gang-hua](#), [XIE Long](#),
[WANG Qiang](#), [SONG Sheng-yi](#), [HU Xi-jing](#), [WANG Wen-dou](#)
作者单位: [中国工程物理研究院, 流体物理研究所, 四川, 绵阳, 621900](#)
刊名: [火炮发射与控制学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF GUN LAUNCH & CONTROL](#)
年, 卷(期): 2011(1)

参考文献(5条)

1. [YOUNG F J;HUGHES W F Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers](#) 1982(02)
2. [TZENG J T;SCHMIDT E A Advanced materials bring electromagnetic gun technology one step closer to the battlefield](#) 2004(04)
3. [FAIR H D Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era](#) 2004
4. [SCHMIDT E M Comparison of conventional and electromagnetic gun launch](#) 2004
5. [WALLS W A;WELDON W F;PRATAP S B Application of electromagnetic guns to future naval platforms](#) 1998(01)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hpfsykzxb201101018.aspx