

串联增强型四极轨道发射器电磁推力仿真

苗海玉, 刘少伟, 刘 明, 杨志勇

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 为实现用更小的导轨电流弹射大质量抛体,基于四极电磁轨道发射器提出了串联增强型四极电磁轨道发射方案,分别建立了增强型发射器的主、副导轨产生电磁推力的数学模型,对电磁推力的特性分别进行了仿真研究,根据预设电磁推力的大小确定了导轨层数的公式,并对传统型和增强型发射器的弹射过程进行了建模仿真。仿真结果表明:增强型发射器的电磁推力在更低的位置能趋近最大值,当大质量的抛体弹射速度相同时,增强型发射器的导轨电流小于传统型发射器导轨电流的 60%。

关键词 轨道发射器;电磁推力;主、副导轨;大质量抛体

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.013

中图分类号 TM153+.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0071-06

Simulation and Analysis of Electromagnetic Propulsion for Series-Connected Augmented Quadrupole Railgun

MIAO Haiyu, LIU Shaowei, LIU Ming, YANG Zhiyong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To realize the ejection of heavy projectile with smaller current, a series-connected augmented quadruple electromagnetic rail launcher is proposed based on quadruple rail launcher. The mathematics model of electromagnetic thrust generated by the main rails and auxiliary rails of augmented rail launcher is established respectively and the characteristics of electromagnetic thrust are simulated, and a formula of determining the number of rail plies according to preset thrust is given. The ejection process of traditional and augmented rail launcher was modeled and simulated. The results show that the electromagnetic thrust of augmented launcher approaches the maximum at a lower position and the rail current of augmented rail launcher is less than 60% of the traditional rail launcher when ejecting the projectile to same speed.

Key words: rail launcher; electromagnetic thrust; main and auxiliary rails; heavy projectile

电磁轨道发射是依靠作用在电枢上的电磁力将抛体加速至预定速度的新型发射方式。与传统的发射方式相比,电磁轨道发射具有的推力可控、恒定加速等优势^[1-2],因此,非常合适弹射像导弹等对过载有严格要求的大质量智能抛体^[3-5]。由此也要求发

射器能够产生更大的电磁力,需要提高导轨的电流或者电感梯度^[6-8]。常规轨道发射器的电感梯度已经基本固定在 $0.5 \mu\text{H}/\text{m}$ 左右^[5],而增大脉冲电流不仅增加了高功率脉冲电源的规模,往往还发生导轨严重烧蚀、电磁力破坏和系统电阻增大等危

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51605488)

作者简介: 苗海玉(1993—),男,山东淄博人,硕士生,主要从事电磁发射技术研究。E-mail: haiyu1321102326@163.com

引用格式: 苗海玉, 刘少伟, 刘明, 等. 串联增强型四极轨道发射器电磁推力仿真 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 71-76. MIAO Haiyu, LIU Shaowei, LIU Ming, et al. Simulation and Analysis of Electromagnetic Propulsion for Series-Connected Augmented Quadrupole Railgun [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 71-76.

害^[9-11]。为了克服增大电流带来的缺点,研究人员开始研究电感梯度更大的增强型电磁轨道发射器^[12-15]。同时,大脉冲电流会让抛体在弹射过程中将经过一个很恶劣的电磁环境,特别是轨道炮电流产生的很高脉冲电磁场^[16]。如此强的电磁场会破坏智能抛体电子元件的工作性能。因此用更小的导轨电流弹射大质量的抛体显得很有必要。

针对大质量抛体的特点,为了实现用更小的导轨电流将大质量的抛体弹射到指定速度,本文基于四极电磁轨道发射器提出了一种串联增强型四极轨道发射器并对其进行仿真研究。

1 增强型四极轨道发射器电磁推力模型

串联增强型四极轨道发射器模型见图1。在传统的四极轨道发射器的基础上,在每个轨道外侧再增加一层副导轨。外层副导轨与内层主导轨的连接方式为串联连接,电流从轨道1和轨道6进入,从轨道4和轨道7流出,电流的路径为#1→#3→#2→电枢→#4和#7;#6→#8→#5→电枢→#4和#7,电枢运动的方向为 x 轴方向。

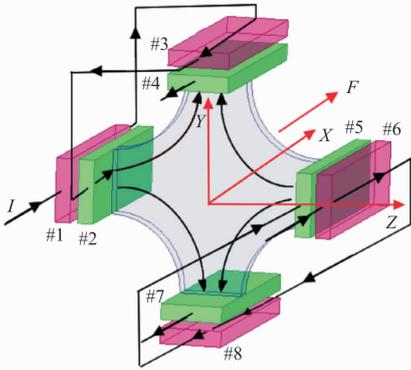


图1 串联增强型发射器模型

Fig. 1 The model of a series-connected augmented rail launcher

图2为空间中长为 l 的通电导线AC在点 $P(x, y, z)$ 产生的磁场强度。

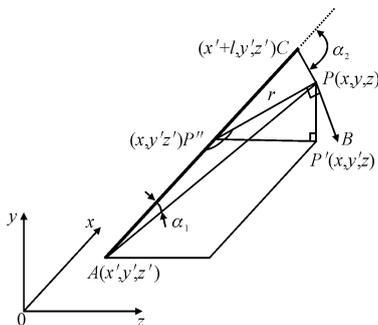


图2 载流直导线产生的磁场强度

Fig. 2 The magnetic field intensity produced by electrified straight wire

根据“毕奥-沙伐”定理可得, $P(x, y, z)$ 点处的磁感应强度为^[17]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I 为导线中电流; α_1, α_2 为 P 点与载流导线两端点的连线与该导线的夹角,如图2,由图中的几何关系得:

$$\begin{aligned} \cos\alpha_1 &= \frac{x-x'}{\sqrt{r^2+(x-x')^2}} \\ \cos\alpha_2 &= \frac{x-x'-l}{\sqrt{r^2+(l-x-x')^2}} \\ r &= \sqrt{(z-z')^2+(y-y')^2} \end{aligned} \quad (2)$$

将载流长方体轨道看成由无数多根载流直导线组成,见图3。由式(1)得,坐标为 (y', z') 的电流元 $dI = \frac{I}{hw} d\sigma = \frac{I}{hw} dy' dz'$ 在点 $P(y, z)$ 处产生的磁场强度为:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi hwr} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) dy' dz' \quad (3)$$

则整个主导轨在该点处产生的磁场强度为:

$$B_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-w}^0 \frac{\mu_0 I}{4\pi hwr} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) dy' dz' \quad (4)$$

式中: h, w 为导轨的高和宽; d 为主导轨和副导轨的距离。

副导轨在该点处产生的磁场强度为:

$$B_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-(2w+d)}^{-(w+d)} \frac{\mu_0 I}{4\pi hwr} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) dy' dz' \quad (5)$$

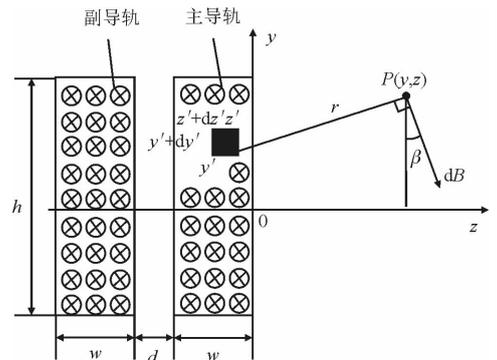


图3 导轨电流产生的磁场强度

Fig. 3 The magnetic field intensity produced by current of rail

根据磁场叠加原理,所有轨道在 P 点产生的磁感应强度为:

$$B = \sum_{i=1}^n B_i \quad (6)$$

电枢受到的电磁推力为:

$$F = \iint_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (7)$$

式中: \mathbf{J} 为电枢中电流密度; dV 为对电枢进行体积分。串联增强型四极电磁发射器的主副导轨分别产

生的磁场在电枢处的方向相同,2 个磁场相互叠加,使磁场强度 B 增大,因此电磁推力增大。

2 发射器参数对电磁推力的影响分析

2.1 电枢位置对电磁推力的影响

增强型四极电磁发射器的主导轨只有位于电枢下方的部分通电,而副导轨则是整个导轨通电。图 4 为传统型四极发射器和增强型四极发射器的磁场分布云图。从图中可以看出增强型四极发射器的副导轨在电枢上方也产生磁场,使电枢产生向上的电磁推力,并使电磁推力进一步增大。若副轨道与主轨道相对于电枢的位置相同时,前者产生的电磁推力是后者所产生的 2 倍左右,但是副轨道与电枢的距离大于主轨道与电枢的距离,使得副轨道产生的电磁推力达不到 2 倍。

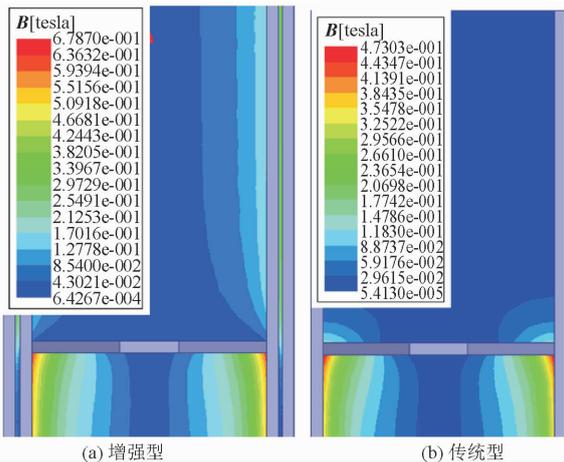


图 4 发射器膛内磁场强度分布

Fig. 4 The magnetic field distribution in launcher bore

图 5 为传统型和增强型四极发射器在施加不同电流时电磁推力的变化曲线。发射器口径为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 导轨参数为 $4\text{ m} \times 250\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 主、副导轨距离 20 mm , 电枢位于距离导轨下端 1 m 处。从图中可以看出增强型发射器的电磁推力约是传统型发射器电磁推力的 2.5 倍,因此副轨产生的电磁推力是主轨道产生的电磁推力的 1.6 左右。

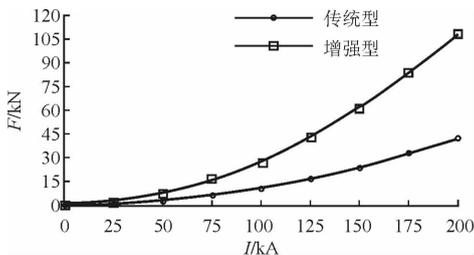


图 5 电磁推力与导轨电流的关系

Fig. 5 The relationship between the electromagnetic thrust and current

在发射的过程中,普通四极电磁发射器的轨道通电长度随着电枢位置变化,导致电磁推力受电枢位置的影响。因此,在电磁弹射时,电枢的初始位置会影响电枢的初始推力,进而影响电枢的整个弹射过程。图 6 为电枢在不同位置时主、副导轨产生电磁推力和总电磁推力的变化曲线。其中导轨电流 200 kA ,其余参数同前。

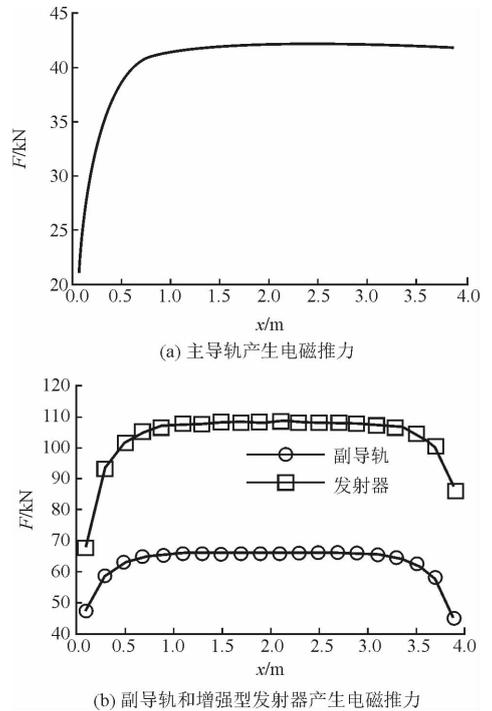


图 6 电磁推力与电枢位置的关系

Fig. 6 The relationship between the electromagnetic thrust and position of armature

从图 6(a)中可以看出,当电枢的位置越靠近发射器底部时,电磁推力越小,当电枢位于距离导轨底部 1 m 处时,电磁推力才趋近最大值。在弹射大质量抛体过程中,需要初始时刻就获得较大的电磁推力来产生较大的加速度,因此电枢安放的位置大约在 1.0 m 处。

从图 6(b)中可以看出,当电枢越靠近发射器两端时,副导轨产生的电磁推力越小;当电枢位于中间大部分区域时,电磁推力稳定输出。与主导轨不同的是,当电枢位于大约 0.5 m 时,副导轨产生的电磁推力就趋近为最大值,说明副导轨产生的电磁推力比主导轨提前到达最大值。从增强型发射器总电磁推力变化曲线来看,在电枢初始位置选择时,增强型发射器的电枢初始位置要比传统型发射器的初始位置低,距离导轨底部约 0.5 m 。

2.2 导轨层数对电磁推力的影响

图 7 为副导轨产生电磁推力随主、副导轨的距离 d 的变化曲线,导轨电流为 200 kA ,其余参数同前。从图中可以看出,随着主、副导轨的距离增大,

副导轨产生的电磁推力不断减小,而且距离越小时,电磁推力减小得越快。由图7曲线可得副导轨产生的电磁推力关于距离的函数 $F = f(d)$ 。因此,发射器导轨的层数 n 由以下公式确定:

$$F_a = F_m + \sum_{i=1}^n f(d_i) \quad (8)$$

式中: F_a 为预设发射器的电磁推力; F_m 为主轨道产生的电磁推力; d_i 为第 i 层副轨道与主轨道的距离,见图8,图中 w 为导轨的宽度。

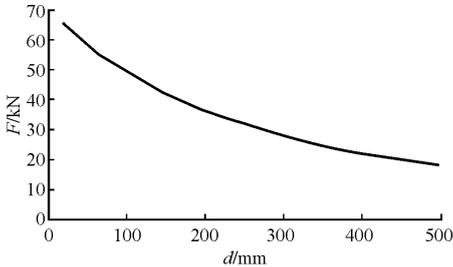


图7 副导轨产生的电磁推力与导轨距离关系

Fig. 7 The relationship between the electromagnetic thrust generated by auxiliary rail and spacing of rails

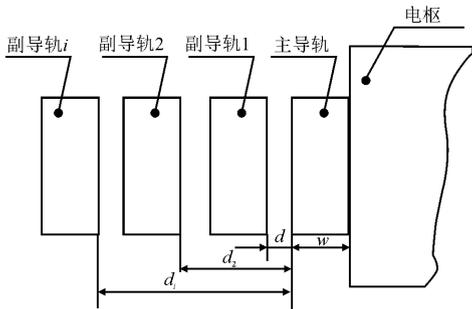


图8 导轨距离示意图

Fig. 8 The schematic diagram of rail spacing

图9为增强型四极发射器的总电磁推力随副导轨层数的变化曲线。相邻两层导轨的距离相等,其余参数同前。从图中可以看出随着导轨层数的增加,发射器的电磁推力明显增大。但是,随着副导轨的层数的增多,发射器的电磁推力增加的幅度减小。当两个相邻导轨的距离的增大时,发射器的电磁推力变小,并且副导轨的层数越多时,距离对电磁推力的影响越大。

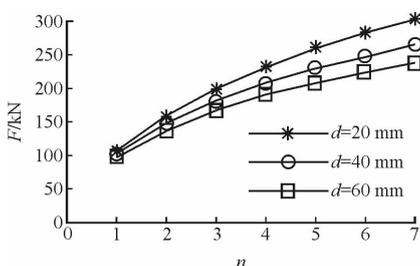


图9 发射器电磁推力与导轨层数的关系

Fig. 9 The relationship between the electromagnetic thrust of launcher and the number of rail piles

虽然副导轨的层数越多产生越大的电磁推力,

但是对于弹射像导弹这种大质量并且对过载要求很高的抛体,过大的电磁推力产生的过载会超过抛体所能承受的最大过载,会对抛体造成损坏,而且过多的层数会使发射器体积庞大,限制了发射装置的机动性。因此,在选择导轨层数时需要考虑抛体的质量、最大过载、电流大小、抛体出筒速度要求等问题。

3 抛体运动学仿真

与传统的抛体相比,大质量的智能抛体在弹射过程中有对抛体过载的要求。为验证增强型四极电磁轨道发射器的可行性,利用 Ansys Ansoft 和 Matlab 软件对抛体的发射过程建模仿真。

3.1 运动模型

抛体在弹射的过程中,在轨道轴向方向上受到电磁推力、轨道摩擦阻力和空气阻力。则抛体的受力方程为^[18-21]:

$$\begin{cases} F_t - F_f - F_p = ma \\ F_f = \mu_f F_n \\ F_n = F_{n0} + \frac{\mu}{1-\mu} \frac{P}{2A} (F_t + F_p) \\ F_p = [(\gamma+1)/\gamma] \rho_0 [Av^2 + Axa + (c_{f2} P v^2 x)/2] \end{cases} \quad (9)$$

式中: F_t 为电磁推力; F_f 为轨道摩擦阻力; F_p 为空气阻力; m 为抛体总质量; a 为抛体加速度; μ_f 为摩擦因数,取 0.68^[22]; F_n 为轨道对电极的正压力; F_{n0} 为轨道对电极的初始正压力; P 为轨道与电极截面的接触长度; A 为电极横截面面积; γ 为气体比热比,取 1.40; ρ_0 为空气的密度,取 1.29 kg/m³,假设为定值; v 为抛体速度; x 为抛体位移; c_{f2} 为等离子体与轨道间的粘滞摩擦系数。

则抛体的速度和位移分别为:

$$\begin{cases} v(t) = \int_0^t \frac{F(t) - F_f - F_p}{m} dt \\ x(t) = \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F(t) - F_f - F_p}{m} dt \right) dt + x_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_0 为电极的安装位置。

仿真过程中的电磁推力因为受到电流和电极位置的影响,所以电磁推力 F_t 由 Ansoft 仿真得出;因为抛体在发射器中的速度较小,电极没有达到等离子体状态,因此在仿真过程中忽略式(9)中空气阻力 F_p 中第3项对 F_p 的影响。

抛体在弹射出筒时的速度 v 大于 20 m/s,抛体的最大过载为 20g,抛体和电极的总质量 $m = 1$ t。其余参数与第2节相同。

3.2 仿真结果

图10为传统型发射器和增强型发射器(2层导

轨)抛体发射速度随抛体位置的变化曲线。电流峰值为 300 kA,如图 11 所示,电枢的初始位置为 0.5 m处。从图中可以看出,在弹射过程中 2 种加速器的电枢一直加速运动,传统型发射器的抛体出筒速度刚刚达到 20 m/s,而增强型发射器的抛体出筒速度则达到 36 m/s。

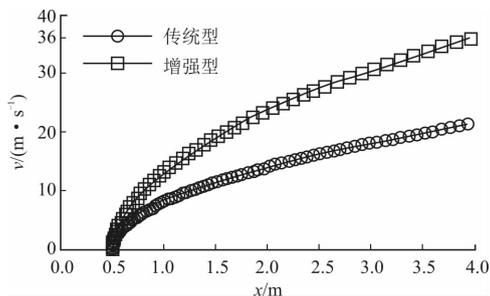


图 10 抛体速度与位置关系

Fig. 10 The relationship between the projectile velocities and the projectile position

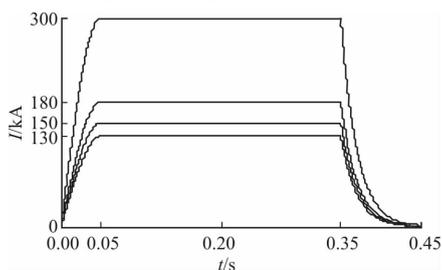


图 11 导轨电流

Fig. 11 The rail currents

表 1 为不同轨道层数的发射器在抛体的出筒速度刚刚达到 20 m/s 时,导轨电流峰值表。仿真中,发射器导轨中的电流见图 11,电流峰值时间相同。从表中可以看出,在相同的弹射速度时,增强型发射器需要的导轨电流要比传统型发射器的小。而且随着导轨层数的增加,所需的电流将减小,但是导轨层数越多,电流减小的程度越小。因此,在弹射速度相同时,增强型发射器在电流选择上比传统型发射器更有优势;但是,3 层和 4 层导轨的增强型发射器与 2 层增强型发射器相比,这种优势不明显。

表 1 发射器弹射速度与电流峰值表

Tab. 1 The launcher ejection velocities and current peak

发射器类型	出筒速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	电流峰值/kA
传统型	21.21	300
增强型		
2 层导轨	22.74	180
3 层导轨	23.00	150
4 层导轨	22.89	130

4 结论

本文基于普通四极电磁轨道发射器提出了串联

增强型四极电磁发射器,建立了增强型四极发射器的电磁推力模型,给出了增强型发射器的导轨层数的确定方法,仿真研究了增强型发射器的电磁推力特性和抛体的运动过程,仿真结果表明增强型四极轨道发射器具有以下优势:

1)当发射器的电磁推力达到最大值时,增强型发射器的电枢位置更低。

2)增强型四极发射器的电磁推力约为传统型四极发射器的 2.5 倍,而且增强型发射器的电磁推力随导轨层数增多而增大,但增大程度越来越低。

3)与普通四极发射器相比,增强型四极发射器能用更小的电流将抛体弹射相同的速度。随着增强型发射器的导轨层数的增多,所需的导轨电流将减小。

参考文献(References):

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理 [M]. 北京:国防工业出版社,1995:11-14.
WANG Y, XIAO F. Principal of Electrical Gun [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 11-14. (in Chinese)
- [2] 贺翔,曹群生. 电磁发射技术研究进展和关键技术 [J]. 中国电子科学研究院学报,2011,6(2):130-135.
HE X, CAO Q X. Development and Critical Techniques of Electromagnetic Launch Technology [J]. Journal of CAEIT, 2011, 6(2): 130-135. (in Chinese)
- [3] 李军,严萍,袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状 [J]. 高电压技术,2014,40(4):1052-1064.
LI J, YAN P, YUAN W Q. Electromagnetic Gun Technology and Its Development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)
- [4] YANG Z Y, FENG G, XUE X P. An Electromagnetic Rail Launcher by Quadrupole Magnetic Field for Heavy Intelligent Projectiles [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(1): 1095-4099. (in Press)
- [5] 万敏,王志恒,李小将. 串联增强型电磁轨道炮技术特点与发展现状 [J]. 火炮发射与控制学报,2015,36(3):91-96.
WAN M, WANG Z H, LI X J. Technical Characteristics and Development Status of Series-Connected Augmented Railgun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2015, 36(3): 91-96. (in Chinese)
- [6] 邢彦昌,吕庆敖,向共军,等. 电磁轨道炮电感梯度影响因素分析 [J]. 军械工程学院学报,2014,26(6):30-35.
XING Y C, LV Q A, XIANG G J, et al. Influencing Factor Analysis on Electromagnetic Railgun Induct-

- ance Gradient [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(6): 30-35. (in Chinese)
- [7] 聂建新, 韩晶晶, 焦清介. 电磁轨道发射器的几何尺寸对电感梯度的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 728-732.
NIE J X, HAN J J, JIAO Q J. Effect of Rail-Type Electromagnetic Launch Dimensions on Inductance Gradient[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 728-732. (in Chinese)
- [8] 周媛, 严萍, 袁伟群. 电磁发射装置中导轨几何参数对电感梯度的影响[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 23-27.
ZHOU Y, YAN P, YUAN W Q. Effect of Rail Geometrical Parameters on Inductance Gradient of EML [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(3): 23-27. (in Chinese)
- [9] Shen Shou Max Chung, Yu-Chou Chuang. Characteristics of Electromagnetic Radiator of A Railgun at the Final Stage [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(1): 49-58.
- [10] BENO J H, WELDON W F. Active Current Management for Four-Rail Railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 39-44.
- [11] 贾强. 电磁轨道技术及应用研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012: 7-10.
JIA Q. Research on Electromagnetic Railgun with Applications [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2012: 7-10. (in Chinese)
- [12] KOTAS J F, GUDERJAHN C A, LITTMAN F D. A Parametric Evaluation of Railgun Augmentation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1986, 22(6): 1572-1577.
- [13] FULLER R L, KITZMILLER J R, INGRAM M W. Design and Testing of a 0.60 Caliber Augmented Railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 45-49.
- [14] KOBAYASHI K. Augment Railgun and Sequential Discharge [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1993, 29(1): 447-450.
- [15] 郑红星, 萧剑平, 曹桂珍, 等. 小型战术导弹电磁兼容性测试与仿真分析研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(1): 44-48.
ZHENG H X, XIAO J P, CAO G Z, et al. The Electromagnetic Compatibility Testing and Simulation Analysis Research of Small Tactical Missiles [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles, and Guidance, 2013, 33(1): 44-48. (in Chinese)
- [16] 常悦, 王军波, 王晓, 等. 引信电磁环境实验方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(2): 147-150.
CHANG Y, WANG J B, WANG X, et al. Research on Electromagnetic Environmental Test Methods of Fuze [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles, and Guidance, 2009, 29(2): 147-150. (in Chinese)
- [17] 陈重, 崔正勤. 电磁场理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 128-131.
CHEN C, CUI Z Q. The Electromagnetic Field Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003: 128-131. (in Chinese)
- [18] AIGNER S, IGENBERS E. Friction and Ablation Measurement in a Round Bore Railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1): 23-39.
- [19] 胡玉伟. 电磁轨道炮仿真及性能优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
HU Y W. Research on Simulation and Performance Optimization for Electromagnetic Railgun [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] 蒋启龙, 付磊. 一种改进型轨道电磁发射方式 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(4): 586-590.
JIANG Q L, FU L. Improved Electromagnetic Rail Launcher [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(4): 586-590. (in Chinese)
- [21] AIGNER S, LGENBERGS E. Friction and Ablation Measurements in a Round Bore Railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 18(1): 33-39.
- [22] 金志明. 枪炮内弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 79-81
JIN Z M. Gun Interior Ballistics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 79-81. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)