

DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.2016.04.011

# 电磁轨道炮轨道形状对电流分布的影响

张 豪, 谢 龙, 高俊杰, 何 勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 电磁轨道炮作为一种新概念动能武器系统, 与传统火炮相比具有发射动能高、攻击距离远等优点。电磁轨道炮利用脉冲电流产生的强磁场与电流产生的洛伦磁力来产生推动力, 而轨道表面的电流分布会对电磁轨道炮的寿命、性能等产生重要的影响。通过二维边界元方法, 采用自编程序对比模拟了几种不同形状轨道的表面线电流分布, 计算结果表明: 通过倒角、采用椭圆弧面以及几何参数的适当选取等方法可以抑制电流密度聚集效应, 增大轨道内侧表面电流密度幅值, 优化轨道表面线电流分布, 为轨道炮的实验设计提供了合理的参考方案。

**关键词:** 电磁轨道炮; 轨道形状; 有限元模拟

中图分类号: TJ399

文献标志码: A

文章编号: 1673-6524 (2016) 04-0048-06

## The Influence of Rail Shape on the Current Distribution in Electromagnetic Railgun

ZHANG Hao, XIE Long, GAO Junjie, HE Yong

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

**Abstract:** As a new concept of kinetic energy weapon, the electromagnetic railgun has such advantages as high kinetic energy and long attack distance. The driving force is the Lorentz force produced by the current in the strong magnetic field. The current distributions in the rail surface play an important role in the life span and performance of an electromagnetic launcher. The current density distribution were investigated using self-compiled codes based on the 2D-boundary element method. The results showed that chamfer, elliptic surface selection and proper geometry parameters could restrain the current density assemble, enhance the current intensity of inner surface of the rail and optimize rail surface current distribution, which provided a reasonable reference for the experimental design of the rail-gun.

**Key words:** electromagnetic railgun; rail shape; finite element simulation

电磁轨道炮是利用脉冲电流产生的强磁场与电流产生的洛伦磁力来推动和加速电枢及弹丸的一种新概念动能武器系统<sup>[1-3]</sup>。它与传统的火炮相比, 具有发射动能高、攻击距离远、综合发射装置体积小、发射成本低、维护保养简单等诸多后者无法比拟的优点。

电磁轨道炮的研究最早可以追溯到第一次世

界大战期间。1978 年澳大利亚国立大学 Rashleigh 和 Marshall 首先利用同极发电机和等离子体电弧电枢成功的将 3 g 聚碳酸酯弹丸加速到 5.9 km/s<sup>[4]</sup>。此举有力地证明了轨道炮的发展潜力, 从而引起了美国科学家和军方的极大关注<sup>[5-8]</sup>。1984 年美国提出的战略防御倡议计划(SDIO) 将电磁轨道炮的研究作为一个重要的研究方向。近年来, 电磁轨道

收稿日期: 2015-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11402242, 11172277); 国防基础科学研究计划 (B1520132013-2)

作者简介: 张 豪 (1988—), 男, 硕士, 主要从事电磁场仿真技术研究。E-mail: homarszhang@163.com

炮技术更是被作为美国海军面向未来 20 年的军事需求重点发展的战略高技术领域之一。

在电磁轨道炮的设计中,一个很重要的考虑是如何减少轨道烧蚀,以提高其多发性能。由于电流趋肤效应及速度趋肤效应的影响,轨道炮中的电流基本上分布于靠近导体表面的薄层中,并且容易在结构的棱角部位产生电流聚集现象。电流聚集会导致局部焦耳热效应显著,从而造成轨道表面的熔化或气化,即发生轨道烧蚀。因此,为了减少轨道烧蚀,首先想到的是如何降低轨道炮表面的电流聚集水平。最直观的想法是:通过改变轨道及电极的形状来改变轨道表面的电流分布模式,使得电流在轨道内侧尽可能均匀分布,从而避免出现局部的电流高度聚集现象。关于轨道参数对电感梯度及电流密度分布等的研究文献中也有些报道<sup>[9-13]</sup>, Keshtkar<sup>[11]</sup>采用有限元的方法研究了矩形轨道几何参数(间距、高度和宽度)对轨道电流分布及电感梯度的影响,结果表明在其分析的几何尺寸范围轨道内侧电流密度随轨道的间距、高度及宽度的减小而增大。Gallant<sup>[12]</sup>使用有限元电磁程序 MEGA 分析了几种不同几何参数的双轨道结构的电感梯度及轨道应力变化。周媛等<sup>[13]</sup>设计了几种矩形、T 形、盈月形及环形轨道,分析了几何参数对其电感梯度的影响,但是没有分析轨道的电流密度分布,通过分析,笔者认为他们设计的一些构型的轨道在其尖角处会发生强烈的电流密度聚集现象,从而造成轨道烧蚀。笔者在理想导体近似下,采用二维边界元方法,对比模拟了几种不同形状轨道的几何参数对于轨道表面线电流分布的影响,通过倒角、采用圆弧面以及适当选取几何参数等方法优化了轨道表面线电流分布,为轨道炮的实验设计提供了合理的参考方案。

## 1 物理模型及数值方法

轨道表面的电流分布模式主要是由其向电流溃入端无限延伸时的渐进分布所决定,而该分布与电极的几何构型没有关系。因此,在单独研究轨道形状的时候,可以不考虑电极的存在,而仅仅考虑 2 条无穷长轨道存在的情况。此时,电流从一条轨道流入,而从另外一条轨道流出,电流分布沿轨道长度方向平移不变。因此,原来的三维问题转化为一个二维问题。

由于轨道一般采用高电导率的材料,其瞬态导电行为为接近于理想导体,表面电流的分布模式与理想导体的表面电流分布模式非常接近。所以,作为一个很好的近似,可以采用理想导体来代替轨道采用的真实导体。采用理想导体近似,可以避免模拟真实导体内部的磁扩散过程,而仅研究导体表面的电流分布,从而提高分析效率。

在垂直于轨道的一个截面  $xOy$  内考虑问题,如图 1 所示。

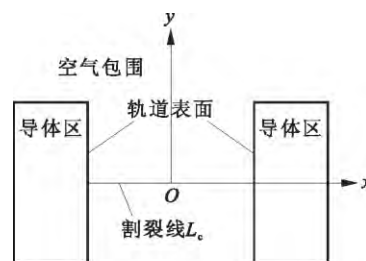


图1 轨道截平面示意图

由于  $x = 0$  和  $y = 0$  平面为对称面,所以只需考虑四分之一模型。在静磁或准静磁近似下,空气中的磁场  $\mathbf{B}$  是无旋的,即有  $\nabla \times \mathbf{B} = 0$ 。于是在空气中可引入磁标势  $\psi$ ,使得  $\mathbf{B} = \nabla \psi$ 。由于  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ,所以  $\psi$  满足拉普拉斯方程,即:

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (1)$$

其对称性为

$$\psi(-x, y) = \psi(x, y), \quad \psi(x, -y) = -\psi(x, y) \quad (2)$$

根据拉普拉斯方程的性质,在轨道表面  $L$  上  $\psi$  满足如下的二维边界积分方程:

$$C(x) \psi(x) - \iint_L \psi(y) \frac{\mathbf{n}(y) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y})}{(\mathbf{x} - \mathbf{y})^2} + \ln |\mathbf{x} - \mathbf{y}| \mathbf{B}_n(y) \Big] dl(y) = 0 \quad (3)$$

式中:  $C(x)$  为点  $x$  在问题平面中的角度(若  $x$  位于问题域内部,则  $C(x) = 2\pi$ ,若  $x$  位于问题域的光滑边界上,则  $C(x) = \pi$ );  $\mathbf{n}(y)$  为轨道表面  $L$  上点  $y$  处的单位法向,由导体区指向空气区;  $\mathbf{B}_n(y)$  为点  $y$  处的法向磁场。

由于磁标势是多值函数,为了得到单值分支,将空气区沿线段  $L_c$  割开,如图 1 所示。由于  $L_c$  位于磁对称面上,磁场的切向分量为 0,从而磁标势在  $L_c$  上为常数。假设电流从左边轨道垂直于纸面流入,而从右边轨道垂直于纸面流出,总电流固定为 1 A 的磁标势为常数  $\psi_0 = \mu_0/2$ ,同时,取  $L_c$  下侧的磁标势为常数  $-\psi_0$ 。

对方程(3) 采用迦辽金边界元方法离散,得到

$$\pi \int \psi^*(x) \psi(x) dl(x) - \int \psi^*(x) dl(x) \cdot \int_L \left[ \psi(y) \frac{\mathbf{n}(y) \cdot (x-y)}{(x-y)^2} + \ln|x-y| \mathbf{B}_n(y) \right] dl(y) = R \quad (4)$$

式中:  $\psi^*(x)$  为检验函数;假定  $L$  是分段光滑的,可直接取  $C(x) = \pi$  (对于线积分,满足  $C(x) \neq \pi$  的集合的测度为 0);  $R$  为割裂线  $L_c$  对于边界积分方程的贡献,其具体形式为

$$R \equiv 2\psi_0 \int \psi^*(x) dl(x) \int_{L_c} \frac{\mathbf{n}(y) \cdot (x-y)}{(x-y)^2} dl(y) \quad (5)$$

采用边界元方法求解该方程,即可得到  $\psi$  和  $\mathbf{B}$  在轨道表面的分布,进而可以计算出轨道表面的线电流密度  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{n} \times \mathbf{B})_z = \frac{1}{\mu_0} (n_x B_y - n_y B_x) \quad (6)$$

## 2 不同构型轨道电流分布分析

结合实验室提供的一些参考设计参数,对几种不同形状的轨道采用自编程序开展计算,分析了几种不同形状轨道内侧电流分布与轨道结构参数的关系,总结出轨道设计的优化方案。

### 2.1 矩形轨道电流密度分布

首先考虑实验上最先采用的矩形轨道,图 2 是其结构示意图。分析了轨道内侧与  $y$  轴间距  $d$ 、轨道高度  $h$  及轨道宽度  $w$  3 个参数对轨道电流密度分布的影响。结合实验室相关研究工作,  $d$ 、 $h$ 、 $w$  的取值如表 1 所示。

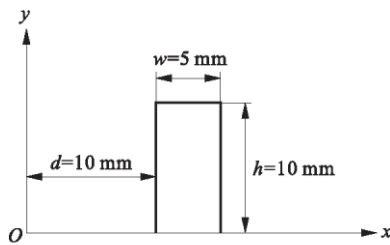


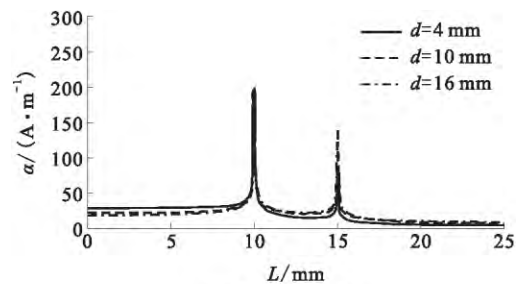
图2 矩形轨道结构示意图

表 1 矩形轨道参数

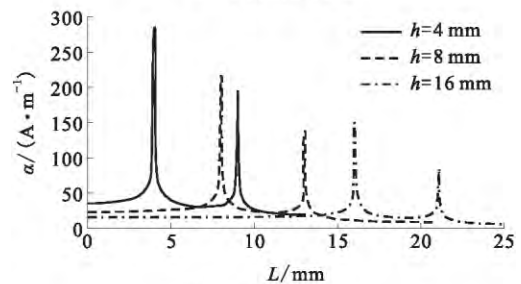
轨道参数	取值	其他参数取值
$d$	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	$h=10$ $w=5$
$h$	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	$d=10$ $w=5$
$w$	3, 4, 5, 6, 7, 8	$d=10$ $h=10$

轨道表面电流密度的计算结果如图 3 所示,其中横坐标表示沿轨道表面的弧长,纵坐标为沿  $z$  方向电流的线电流密度。图 3(a) 展示了不同轨道间距下的电流密度分布曲线,为了清楚起见,图中只

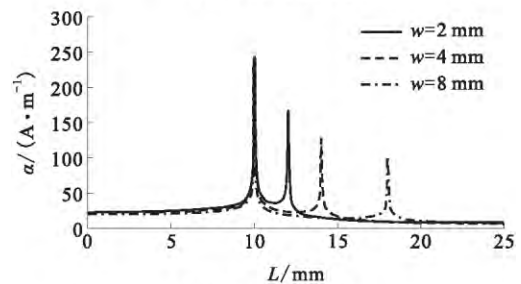
显示了  $d=4, 10, 16$  mm 的 3 条曲线;图 3(b) 是不同轨道高度下的电流密度分布曲线,同样图中只显示了  $h=4, 8, 16$  mm 的 3 条曲线;图 3(c) 是不同轨道宽度下的电流密度分布曲线。从图 3 中可以看出,最明显的一个特征是在轨道的 2 条棱附近发生了强烈的电流聚集,特别是在棱上的电流密度为局部极大值,这会导致局部焦耳热效应显著,从而造成轨道表面的熔化或气化,即发生轨道烧蚀。实际上,棱上电流密度的理论值为无穷大,只是在数值离散时不可能采用无穷小的网格尺寸,所以计算得到的是一个有限值。



(a) 不同轨道间距



(b) 不同轨道高度

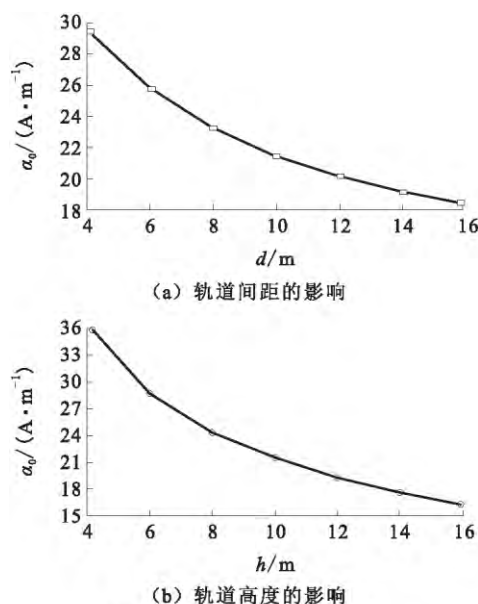


(c) 不同轨道宽度

图3 各参数对轨道电流密度分布的影响

图 3 中另一个特征是第 1 个电流密度极大值左侧(即轨道内侧)的电流密度呈均匀分布态势。当弧长趋于 0 时,线电流密度趋于一个常数  $\alpha_0$ , 称其为平台电流密度。从图 3 可以看出,平台电流密

度  $\alpha_0$  将随轨道间距  $d$  和轨道高度  $h$  的变化而变化, 而轨道宽度  $w$  的改变对平台电流密度没有明显影响。图4展示这种变化的趋势, 其中横坐标分别为轨道间距和轨道高度, 纵坐标为平台电流密度。从图4可以看出, 间距  $d$  和高度  $h$  的减小都可以提高平台电流密度  $\alpha_0$ , 这与 Keshtkar<sup>[11]</sup> 的研究结果一致。以上计算结果表明在综合考虑其他因素的前提下, 适当减小轨道间距  $d$  和轨道高度  $h$  可以提高轨道内侧的电流密度, 而轨道宽度  $w$  对轨道内侧电流密度分布没有明显的影响。

图4 平台电流密度 $\alpha_0$ 曲线

## 2.2 倒角矩形轨道电流密度分布

矩形轨道计算结果呈现的一个明显问题, 就是轨道棱处的电流密度聚集现象, 对此拟通过轨道棱处倒角处理来抑制电流密度聚集。图5是倒角矩形轨道结构示意图。左右倒角半径分别为  $a$  和  $b$ , 计算中取  $a = b = 1, 2, 2.5$  mm。计算结果如图6所示, 平台电流密度值随着倒角半径的增加变化不大。但倒角后, 电流密度的峰值变为有限值, 并且随着倒角半径的增加而减小, 当倒角半径增加到 2.5 mm 时 2 个电流峰合并为 1 个电流峰。所以, 倒角起到了抑制电流聚集的作用。

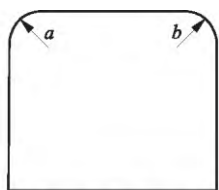


图5 倒角矩形轨道结构示意图

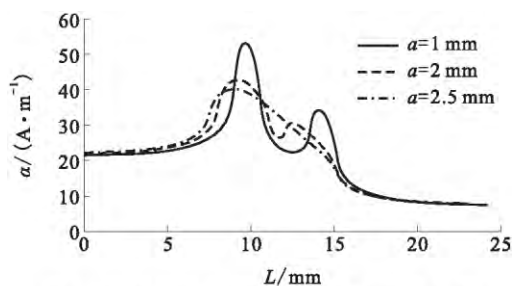


图6 不同倒角半径下电流密度分布曲线

## 2.3 双椭圆弧面轨道电流密度分布

在倒角抑制电流聚集的启发下, 设想用椭圆弧面代替矩形面, 设计一种椭圆轨道。用 2 个椭圆弧面分别代替矩形轨道的内、外侧面, 如图7所示, 称之为双椭圆弧面轨道。

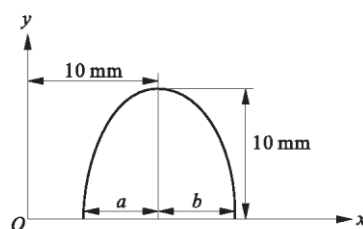


图7 双椭圆弧面轨道结构示意图

结合实验室的相关工作,  $a$  分别取值 2, 3, 4, 5, 6 mm,  $b$  固定 2 mm, 分别计算左侧半轴  $a$  的变化对电流密度分布的影响, 计算结果如图8(a)所示。从图中可以看到当  $a = 2$  mm 时, 这时弧面轨道左右对称, 而且轨道顶部相对比较尖锐, 此时在轨道顶部位置电流密度存在聚集现象, 但是较矩形轨道棱处电流聚集相对较弱。随着左侧半轴  $a$  的增大, 轨道顶部电流聚集明显减弱, 同时轨道内侧的平台电流密度  $\alpha_0$  有所提高, 但是从图中可以看到, 当  $a$  的值增大至 4 mm 时, 轨道内侧表面电流密度分布均匀性降低。 $b$  分别取值 0.5, 1, 4, 6, 8 mm, 此时  $a$  固定 4 mm, 计算右侧半轴  $b$  的变化对电流密度分布的影响, 计算结果如图8(b)所示。当  $b = 0.5$  mm 时, 轨道弧顶比较尖锐, 所以电流密度发生聚集现象。随着  $b$  的增大, 电流密度聚集被抑制, 当  $b = 4$  mm 时, 电流聚集现象基本消失。继续增大  $b$  值则平台电流密度  $\alpha_0$  稍有降低, 而分布均匀性基本不变。综合考虑以上  $a$  和  $b$  对电流密度分布的影响,  $a$  对电流密度分布有两个方面的明显影响,  $a$  的增大首先是可以抑制弧顶的电流聚集, 其次是改变轨道内侧电流密度分布, 电流向轨道底部偏移; 而  $b$  的适当增大主要起到了抑制弧顶电流聚集的作用, 对轨道

内侧电流分布影响不大。所以在实验室轨道设计时  $a$  不能过大, 过大了会影响轨道内侧电流分布的均匀性, 而  $b$  没必要太大, 选取适当值即可抑制弧顶电流聚集现象。

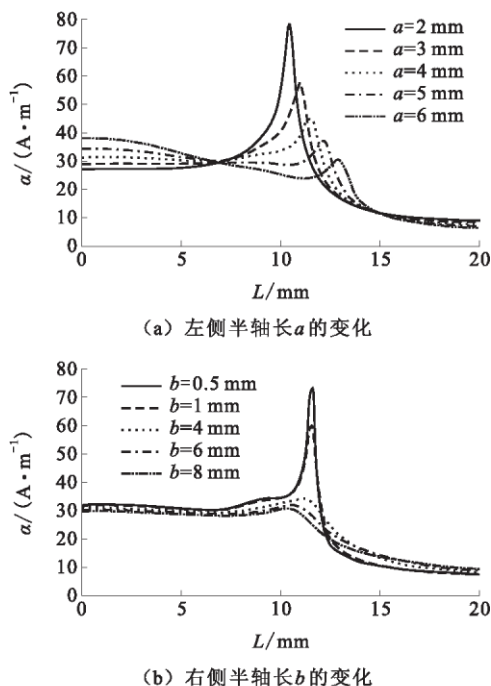


图8 椭圆弧面对电流密度分布的影响

#### 2.4 单椭圆弧面轨道电流密度分布

根据双椭圆弧面轨道电流密度计算的结果,  $b$  适当增大的主要作用在于抑制弧顶电流密度的聚集, 但考虑实验上对于轨道宽度的限制, 设想外侧弧面用倒角矩形代替, 选取较大的倒角半径来达到抑制弧顶电流密度聚集的作用, 同时相比于弧面轨道可以节省一定的空间。图 9 是这种轨道的结构示意图, 轨道左边轮廓线为四分之一椭圆, 右边轮廓线为半径 2.5 mm 的四分之一圆弧加上 7.5 mm 的直线段。左侧的椭圆与右侧的四分之一圆弧通过一条曲线衔接, 以保证曲率连续变化, 称之为单椭圆弧面轨道。

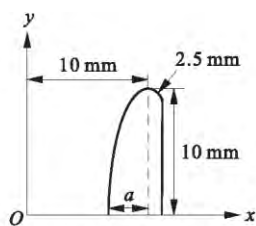


图9 单椭圆弧面轨道结构示意图

计算中选取外侧矩形倒角半径为 2.5 mm, 内侧弧面椭圆半轴长  $a = 2, 3, 4, 5, 6$  mm, 计算结果如

图 10 所示。可以看到  $a$  增大对电流密度分布的影响与双椭圆弧面轨道的规律是一样的。从结果来看  $a = 4$  mm 时计算结果比较理想, 即弧顶电流密度聚集得到了很好的抑制, 同时轨道内侧电流密度从大约 27 A/m 提高到约 31 A/m, 得到了一定的提高并且分布均匀。与双椭圆弧面轨道结构中  $a = b = 4$  mm 的计算结果可比拟, 但是在轨道宽度上得到了缩减(前者为 6.5 mm, 而后者为 8 mm)。

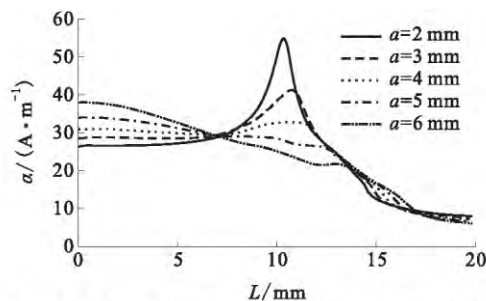


图10 单椭圆弧面轨道椭圆半轴  $a$  对轨道电流密度分布的影响

### 3 结论

笔者通过二维边界元方法, 采用自编程序分析了几种不同形状轨道内侧电流分布与轨道结构参数的关系, 总结出轨道设计的优化方案, 为电磁轨道炮的实验室轨道设计提供了参考依据, 主要结论如下:

1) 对于矩形单轨道构型, 适当地减小轨道间距  $d$  和轨道高度  $h$  可以增大轨道内侧电流线密度, 而轨道宽度对轨道内侧电流密度分布基本没有影响。

2) 倒角设计可以很好地抑制电流密度峰值。

3) 在椭圆弧面轨道中内侧椭圆半轴  $a$  对电密度分布有两个方面的明显影响,  $a$  的增大首先是可以抑制弧顶的电流聚集, 其次是改变轨道内侧电流密度分布, 电流向轨道底部偏移; 而外侧椭圆半轴  $b$  的适当增大主要起到了抑制弧顶电流聚集的作用, 对轨道内侧电流分布影响不大。在这一结论的启示下, 设计了单椭圆弧面轨道, 即轨道内侧采用椭圆弧面, 而外侧采用倒角矩形, 计算结果显示在电流密度分布同样理想的情况下, 这种设计比双椭圆弧面轨道缩减了轨道的宽度, 节省了空间。

#### 参考文献(References)

- [1] MARSHALL R A, WANG Ying. Railguns: their science

- and technology [M]. Beijing: China Machine Press 2004.
- [2] 阚明先, 王刚华, 赵海龙, 等. 磁驱动飞片二维磁流体力学数值模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (8): 2137 – 2141.
- KAN Mingxian, WANG Ganghua, ZHAO Hailong, et al. Two-dimensional magneto-hydrodynamic simulations of magnetically accelerated flyer plates [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25 (8): 2137 – 2141. (in Chinese)
- [3] 何勇, 宋盛义, 关永超, 等. 电磁轨道炮高速滑动接触电阻的定量表征 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26 (4): 87 – 90.
- HE Yong, SONG Shengyi, GUAN Yongchao, et al. Quantitative expression of sliding contact resistance between armature and rail in railgun [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26 (4): 87 – 90. (in Chinese)
- [4] RASHLEIGH S C, MARSHALL R A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49 (4): 2540 – 2543.
- [5] FAIR H D. Electromagnetic launch: a review of the United States national program [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33 (1): 11 – 16.
- [6] FAIR H D. The science and technology of electric launch [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 25 – 32.
- [7] FAIR H D. Electric launch science and technology in the United States [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1): 11 – 17.
- [8] FAIR H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (1): 158 – 164.
- [9] BENO J H. Three-dimensional rail-current distribution near the armature of simple, square-bore, two-rail rail-guns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27 (1): 106 – 111.
- [10] KIM B K, HSIEH K T. Effect of rail/armature geometry on current density distribution and inductance gradient [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35 (1): 413 – 416.
- [11] KESHTKAR A. Effect of rail dimension on current distribution and inductance gradient [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (1): 383 – 386.
- [12] GALLANT J. Parametric study of an augmented railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1): 451 – 456.
- [13] 周媛, 严萍, 袁伟群, 等. 电磁轨道发射中轨道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 Yuan, YAN Ping, YUAN Weiqun, et al. 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)