

分布储能式电磁轨道炮效率分析

温艳玲, 戴玲, 祝琦, 王少杰, 林福昌

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 分布储能式电磁轨道炮在长导轨发射中具备高发射效率优势, 为实现分布储能式电磁轨道炮的恒流特点, 建立可供发射器参数、结构设计参考的仿真模型尤为重要。针对口径为 60 mm×80 mm 的矩形轨道炮, 根据电流波形的平稳性要求, 沿导轨方向设置电流馈入点, 诊断电枢位置并分时序触发各馈入点电源, 以测试分布储能式电磁轨道炮的工作性能。在 COMSOL 三维磁场中建立矩形导轨-电枢模型, 基于电流和磁场的多物理场耦合有限元分析得到磁场和电流的分布, 并利用电磁场仿真结果实现电流趋肤效应下轨道电阻梯度计算。基于 MATLAB SIMULINK 平台对电容储能型脉冲功率电源模块建立电气电路; 分析分布储能式电磁轨道炮非线性时变的动态特性并建立轨道及电枢阻抗模型, 计算正向电磁力、滑动摩擦力构造电枢的运动方程, 并使用信号电路建立电枢-导轨模块, 通过 Simulink 测量模块连接两个隔离的网络, 仿真计算得到导轨电流及电枢的出膛速度。设计了总储能为 4.16 MJ 的分布式储能轨道炮, 结果显示, 电容预充电压为 10.8 kV 时, 导轨长为 3 m 的分布式电磁轨道炮可将 1 kg 的弹丸加速至 1.4 km/s, 与炮尾集中式电磁轨道炮相比, 系统发射效率可提升约 3%。

关键词: 分布储能式; 电磁轨道炮; 效率; 电阻梯度

中图分类号: TJ866

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190332

Efficiency of distributed energy storage electromagnetic railgun

Wen Yanling, Dai Ling, Zhu Qi, Wang Shaojie, Lin Fuchang

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A distributed energy storage (DES) electromagnetic railgun has the advantage of higher efficiency, compared with a breech-fed railgun. A railgun with a caliber of 60 mm×80 mm is designed. In order to stabilize the current waveform, current feed-in points are set along the length of the gun, and the armature position is diagnosed and the pulse power system is triggered by real-time feedback signal to test the performance of the DES railgun. The resistance gradient is calculated by finite element analysis: the coupling field of current field and magnetic field is applied to the rectangular rail-armature model established in the 3D magnetic field of COMSOL. Based on the platform of MATLAB SIMULINK, the power circuit of capacitive energy storage pulse power supply module is established. The impedance models of rail and armature are established according to the non-linear time-varying dynamic characteristics of DES electromagnetic railgun, and the forward electromagnetic force and sliding friction force are calculated to construct the motion equation of armature. The armature-railgun module is built by signal circuit, and the two isolated networks connected through SIMULINK measurement module. The variable step-size ode23tb solver calculate the railgun current and exit velocity. A 4.16 MJ DES electromagnetic railgun is designed. The results show that with 10.8 kV pre-charging voltage of the capacitance, a 3 m long DES electromagnetic railgun can accelerate the 1 kg projectile to 1.4 km/s. Compared with the breech-fed electromagnetic railgun, the launching efficiency of the system can be increased by about 3%.

Key words: distributed energy storage; railgun; efficiency; resistance gradient

电磁轨道炮是在导轨上借助电磁推力发射弹丸的装置, 高速、稳定性好、轻小型化等优良性能为其在军事领域的应用提供了前景, 成为脉冲功率技术发展应用的必然趋势。1979 年, 为改善电磁轨道炮的转换效率, Marshall 提出了分散储能型导轨炮^[1], 在保证出膛前各级储能电流降至零的同时, 使导轨中的电流近似恒定。

收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2019-10-31

作者简介: 温艳玲 (1996—), 女, 硕士, 从事脉冲功率技术研究; wyl_violin@sina.cn。

通信作者: 戴玲 (1976—), 女, 博士, 从事脉冲功率技术研究; dailing@mail.hust.edu.cn。

Matthew 测量并量化了方孔口径轨道炮的发射性能,验证了分布储能式电磁轨道炮比后膛式馈送结构效率更高的理论预测^[2]。ISL 使用 200 个电容器形成总储能为 10 MJ 的 DES 轨道炮,将质量为 650 g 的钛制弹丸加速至 2 300 m/s^[3-4]。目前国内对于分布储能式电磁轨道炮的研究以理论分析和仿真计算为主。贾义政等人建立了炮尾集中式电磁轨道炮的数学模型,并对电磁轨道炮的导轨参数进行了优化设计^[5-6]。周媛等人基于 Pspice 仿真计算发现与后膛发射的弹丸相比,分布储能式系统的总效率可提高到 2.2%^[7-8]。基于 COMSOL 三维瞬态电磁场建模,实现了电流趋肤效应下导轨电阻梯度的计算,并在 SIMULINK 平台测试了分布式储能轨道炮的工作性能:将分布储能式电磁轨道炮系统分为电容储能型脉冲功率电源部分和轨道炮负载部分,根据电源参数设计脉冲放电网络,建立电容储能型脉冲功率电源系统;构造控制方程及运动方程,考虑发射过程中各元件的动态电阻及动态电感,建立以电枢-弹丸-导轨为负载终端的发射器阻抗模型,形成电枢-轨道的发射器系统。

1 电流趋肤效应仿真计算

1.1 发射器仿真建模

矩形轨道具有宽度(w)、厚度(h)和间隔距离(d)三个结构参数。两导轨沿 x 轴平行分布,模型尺寸取 $w=60$ mm, $h=80$ mm, $d=80$ mm。轨道及电枢均设置为铜材质,采用自由三角形网格划分求解模型,剖分结果如图 1 所示。图 1 中 A 为电流输入端,输入波形如图 2 所示,在电流上升阶段,电流在 0.456 ms 时间内从 0 增至 1.23 MA。在 0.456~5.8 ms 内电流可近似恒定,用以近似模拟分布储能式电磁轨道炮的导轨电流。为避免轨道端部的电流反射,在轨道末端设置绝缘终端。则根据 A 端的电压、电流及导轨长度易求得电阻梯度。

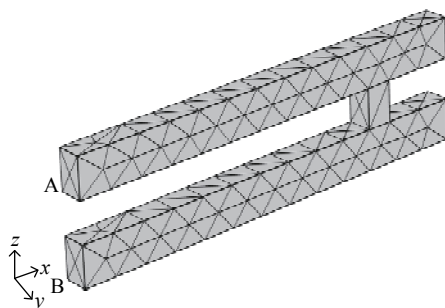


Fig. 1 Mesh of rails and armature

图 1 导轨与电枢的剖分网格

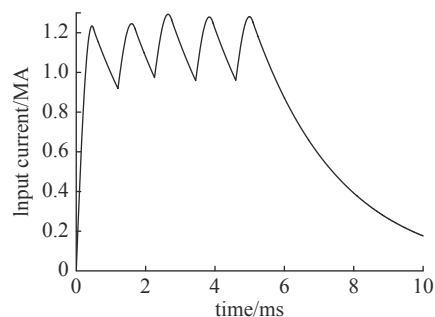


Fig. 2 Input current

图 2 输入的电流波形

1.2 结果分析

图 3(a)~3(d) 分别为时间 $t=0.03, 1, 4, 5$ ms 时单根导轨在 xy 平面上的电流密度分布图。从图 3(a)~图 3(b) 可以看出,由于发射初期(即电流上升阶段)磁场在导轨内部扩散深度较浅,导轨电流的趋肤效应明显,且随着电流的上升,趋肤深度减小,电流集中在导轨表面。由图 3(b)~图 3(d) 可知,在电流近似恒定期,随着磁场扩散深度的增加,电流向内部扩散明显。图 4 呈现了电阻梯度 R'_r 随时间的变化情况,由于发射初期,电流趋肤效应明显,电阻梯度较大,随着电流趋肤效应的减小,电阻梯度整体也呈现减小的趋势。

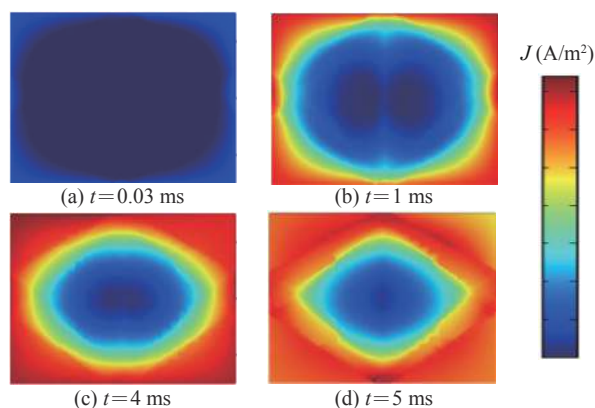


Fig. 3 Current density distribution map of single rail at different moments

图 3 不同时刻单导轨 yz 截面电流密度分布图

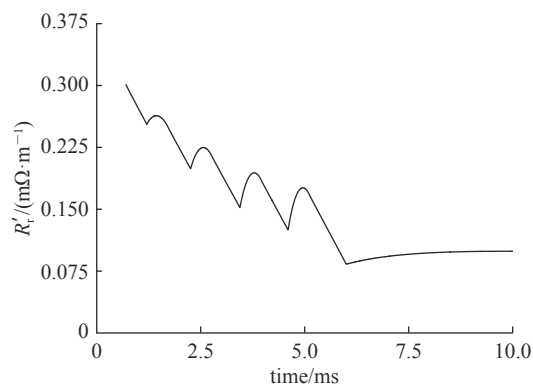


Fig. 4 Changes of resistance gradient with time

图 4 电阻梯度随时间变化情况

2 分布储能式电磁轨道炮系统

2.1 电容储能型脉冲功率电源系统

电容储能型脉冲形成网络(PFN)由多个脉冲形成单元(PFU)并联构成。PFU的电路拓扑如图5所示,电源采用电容器 C 作为初始储能元件,脉冲晶闸管 T 作为触发导通开关。当电容器直接对负载放电可能会造成放电电流峰值大、脉宽窄,所以需要选取大小合适的调波电感 L 用以限制电流峰值、增加电流脉宽。当脉冲电流处于下降阶段时,电流通过续流二极管避免对电容器 C 反向充电,同时也使得电容器储存的能量能够被更充分的利用。拓扑结构中考虑了电容杂散电阻 R_{ES} 、杂散电感 L_{ES} 及线路杂散电阻 R_{cable} 、杂散电感 L_{cable} 。

取电容器电容值 C 为 $1786\ \mu\text{F}$,初始储能 u_c 为 $10.8\ \text{kV}$,加入调波电感 $5\ \mu\text{H}$,负载电阻 R 设置为 $10\ \text{m}\Omega$,则PFU的输出电流波形如图6所示,峰值电流为 $154.7\ \text{kA}$ 。

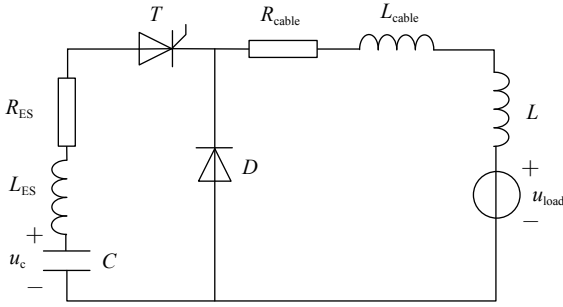


Fig. 5 Topology of the PFU
图5 PFU电路拓扑结构

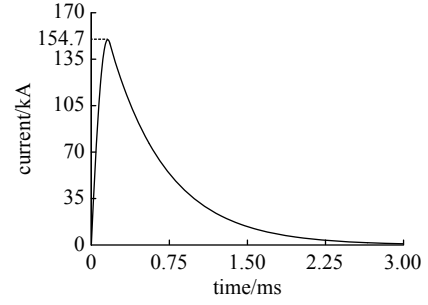


Fig. 6 Current waveform of PFU
图6 PFU电路的输出电流

在脉冲电流的上升阶段,二极管反向截止,PFU电路为 R - L - C 二阶放电回路,电路方程为

$$L_z C d^2 I / dt^2 + R_z C dI / dt + I = 0 \quad (1)$$

式中: L_z 为回路的总电感; R_z 为回路总电阻。由于 R_z 很小,回路为弱阻尼振荡,则电流可描述为

$$I(t) = (U_0 / \omega L) \exp(-\alpha t) \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: U_0 为电容预充电压; α 为衰减系数; ω 为阻尼震荡频率。采用解析法验证PFU输出峰值,由脉冲电源放电的公式可以求得

$$I_{\max} = u_c \sqrt{C / L_z} \exp\left[\left(-\alpha / \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}\right) \arctan\left(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} / \alpha\right)\right] = 154.7\ \text{kA} \quad (3)$$

式中: $L_z = L_{ES} + L_{cable} + L$; $\omega_0^2 = 1 / L_z C$; $\alpha = (R_{ES} + R_{cable} + R) / 2L_z$ 。求得峰值电流为 $154.7\ \text{kA}$,故PFU仿真电流峰值和理论推导结果一致。

多个PFN系统沿导轨方向铺成分布储能式脉冲放电系统,通过诊断电枢的位置判断其是否经过下一个PFN单元,用以确定PFN单元的触发时间,从而达到在发射过程中电流波形的平稳性要求。PFN沿轨道铺设的简化模型如图7所示。

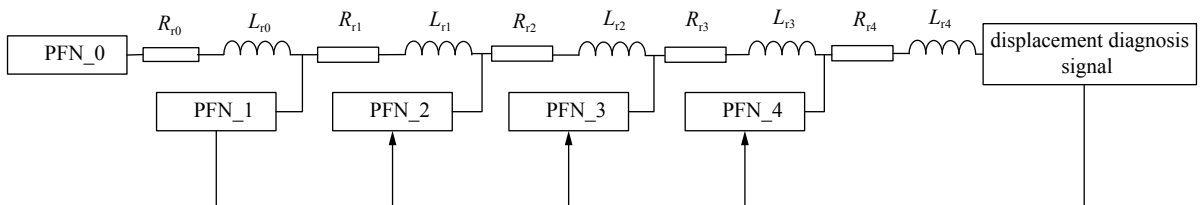


Fig. 7 Trigger strategy of DES
图7 DES的触发策略

$R_{r0} \sim R_{r4}$ 为分段轨道电阻; $L_{r0} \sim L_{r4}$ 为分段轨道电感。

2.2 发射器系统

2.2.1 轨道阻抗模型

发射过程中,随着电枢向炮口运动,接入到回路中的导轨长度增加,电路中的轨道电阻及轨道电感也不断变化。对于5级分布储能式电磁轨道炮($i=1 \sim 5$)来说,导轨被分为5段,每段回路中的轨道电阻、轨道电感可表述

为与位移相关的梯度量和初始常量之和的形式,即

$$R_{ri} = R_{r0i} + xR'_{ri}, L_{ri} = L_{r0i} + xL'_{ri} \quad (4)$$

式中: L_{r0i} 是第 i 段的轨道电阻、电感初始常量; R'_{ri} 和 L'_{ri} 为第 i 段的轨道电阻梯度及轨道电感梯度。 R'_{ri} 已由第一部分计算得到,一般仿真中将 L'_{ri} 设置为常数,这里取 $0.45 \mu\text{H/m}$ 。

2.2.2 电枢阻抗模型

电枢在高速运动由对于速度趋肤效应的存在,电流在电枢与导轨接触面尾端聚集,电枢阻抗 $R_a(t, I)$ 是与通流时间 t 及导轨电流 I 相关的函数,表示为^[9-10]

$$R_a = (d/h_a) \sqrt{\pi\mu_{a0}\rho_a/2t} \quad (5)$$

式中: h_a 为电枢的高度; ρ_a 为电枢瞬时电阻率; μ_{a0} 为电枢磁导率; d 为轨道间距。

使用与电流成比例的等效电阻率来考虑电枢金属的电阻受电枢温度变化的影响^[9-10]

$$\rho_a = \rho_{a0} + \beta_a I / h_a \quad (6)$$

式中: ρ_{a0} 为电枢金属的初始电阻率; β_a 是与电枢金属材料相关的常数。

2.2.3 电枢-弹丸受力分析

电枢运动时,由于导轨的支撑和导向作用,导轨对其产生摩擦力 F_f 阻碍电枢向前

$$F_f = \mu_f F_n \quad (7)$$

式中: μ_f 为电枢和轨道之间的滑动摩擦因数; F_n 为电枢和轨道之间的正压力。当速度超过阈值 v_c 时,滑动摩擦系数计算式为^[11]

$$\mu_f = \begin{cases} \mu_c, & v \leq v_c \\ 4(\mu_1/\mu_2)v^{-0.4}, & v > v_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_1 为弹丸在膛内的静摩擦系数; μ_2 为 PC 在钢材上的静摩擦系数; μ_c 为常值摩擦系数。

轨道对电枢的正压力模型可描述为^[12]

$$F_n = (k_1 P / 2A) F \quad (9)$$

式中: k_1 为电枢径向力与轴向力的比率; P 为轨道与电枢截面的接触长度; A 为电枢的横截面积; F 为电枢受到的电磁力,且 $F = L'I^2/2$ 。

根据牛顿运动定律,电枢的运动方程可由微分方程式表示

$$d^2x/dt^2 = dv/dt = (F - F_f)/m_{a+p} \quad (10)$$

式中: m_{a+p} 是电枢和弹丸的质量之和。

轨道及电枢-弹丸系统设计参数如表 1 所示。

表 1 电磁轨道炮的系统参数

Table 1 Parameters of electromagnetic railgun

$L'_{ri}/(\mu\text{H}\cdot\text{m})$	$\rho_{ri}/(\text{m}\cdot\Omega)$	$R'_{ri}/\mu\Omega$	u_c	u_2	m_{a+p}/kg	$\rho_a/(\text{m}\cdot\Omega)$	k_1	$\beta_a/(\text{m}^2\cdot\Omega\cdot\text{A}^{-1})$	u_1
rail					armature-projectile system				
0.45	1.67×10^{-8}	7.9	0.34	0.32	1	1.67×10^{-8}	2.5×10^{-2}	3×10^{-16}	0.68

3 效率分析

对导轨长为 3 m 的分布储能式电磁轨道炮系统建立仿真,通过仿真结果调整并确定导轨上电流馈入点的位置,利用实时反馈信号使弹丸经过馈入点后立即触发该位置的电源模块。电源系统沿导轨铺设的位置 x 及各触发点的 PFU 单元数如表 2 所示,电容预充电压 10.8 kV,总储能为 4.16 MJ。

仿真得到导轨电流波形、电枢的速度和位移曲线,如图 8 所示。在发射初期的电流上升阶段,电流在 0.27 ms 时间内从 0 增至 1.36 MA,并在 $1 \mu\text{s} \sim 4 \text{ms}$ 内可认为近似恒定,在此期间

表 2 触发单元铺设方式

Table 2 PFU laying mode

trigger sequence	x/m	total units
1	0	14
2	0.1	8
3	0.2	7
4	1.1	6
5	1.9	5

的电流最大值为 1.49 MA, 最小值为 1.08 MA。弹丸出膛前均处在电流恒定期内, 出膛速度为 1.399 km/s, 根据出膛速度及系统总储能可以计算效率为 23.524%。

采用炮尾集中式电磁轨道炮系统作效率对比, 即总数量相同的 PFU 放置在炮尾, 仍然采用相同的触发策略, 得到出膛速度与位移曲线与图 9 所示。炮尾集中式电磁轨道炮的弹丸出膛速度为 1.303 km/s, 效率为 20.4%, 相较于分布储能式电磁轨道炮, 发射效率降低约 3%, 这是因为导轨的电阻损失占据了电磁炮能量损失的绝大部分, 而分布储能式电磁轨道炮在减少电阻损失方面更具优势, 这也同时确认了导轨动态电阻三维建模、精确计算的重要性。

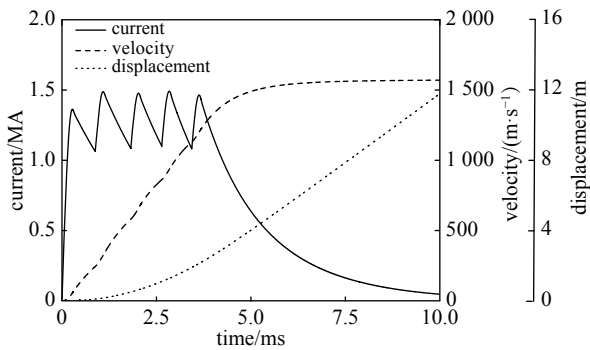


Fig. 8 Current, velocity and displacement curves of DES
图 8 DES 轨道炮的电流波形及电枢的速度和位移曲线

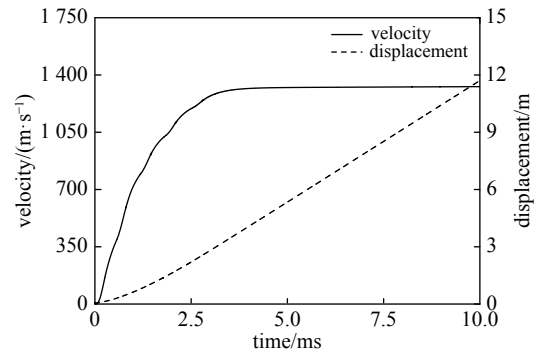


Fig. 9 Velocity and displacement curves of breech-fed railgun
图 9 炮尾集中式轨道炮电枢的速度和位移曲线

4 结 论

通过对发射器简化模型三维瞬态电磁场的数值模拟, 得到了不同时刻下导轨的电流密度分布情况, 结果表明, 发射初期电流趋肤效应明显, 电阻梯度大, 发射过程中的电流分布呈现向内扩散的趋势, 电流趋肤效应减小, 电阻梯度减小。针对导轨长为 3 m, 矩形口径为 60 mm×80 mm 的电磁轨道炮, 分别设计了 5 级分布储能型脉冲功率电源和炮尾集中式脉冲功率电源, 分析了电磁炮发射过程中的动态负载特性及弹丸运动控制方程, 基于 SIMULINK 仿真计算了两种轨道炮的出膛速度, 实现了效率对比。结果表明, 在相同的导轨模型参数下, 相较于炮尾集中式电磁轨道炮, 应用分布储能型电源系统的矩形轨道炮的发射效率可提高约 3%。

参考文献:

- [1] Marshall, R A. Distributed energy store railgun: the limiting case[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1991, 27(1): 136-138.
- [2] Matyac M J, Christopher F, Jamison K A, et al. Railgun performance enhancement from distribution of energy feeds[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1995, 31(1): 332-337.
- [3] Hundertmark S, Simicic D, Vincent G. Acceleration of aluminum booster projectiles with PEGASUS[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2015, 43(5): 1147-1151.
- [4] Lehmann P, Peter H, Wey J. First experimental results with the ISL 10 MJ DES railgun PEGASUS[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2001, 37(1): 435-439.
- [5] 贾义政. 圆膛四轨电磁轨道炮的动力学建模与仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2015. (Jia Yizheng. Dynamics modeling and simulation of four round rails electromagnetic railgun. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015)
- [6] 关永超, 邹文康, 何勇, 等. 串联型双轨增强电磁轨道炮电路模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(11): 226-230. (Guan Yongchao, Zou Wenkang, He Yong, et al. Circuit simulation of the electromagnetic railgun system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(11): 226-230)
- [7] Zhou Yuan, Yan Ping, Sun Yaohong, et al. Design of a distributed-energy-store railgun[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2011, 39(1): 230-234.
- [8] Zhou Yuan, Yan Ping, Sun Yaohong, et al. Analysis on efficiency improvement with a distributed energy store railgun[C]//IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2010.
- [9] Deadrick F, Hawke R, Scudder J. MAGRAC—A railgun simulation program[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2003, 18(1): 94-104.
- [10] Smith A N, Ellis R L, Bernardes J S, et al. Thermal management and resistive rail heating of a large-scale naval electromagnetic launcher[C]//IEEE 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology. 2005.
- [11] Weeks D A, Weldon W F, Zowarka R C. Plasma armature railgun launcher simulations at the University of Texas at austin[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1989, 25(1): 580-586.
- [12] Aigner S, Igenbergs E. Friction and ablation measurements in a round bore railgun[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1989, 25(1): 33-39.