

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.09.017

一种电磁轨道炮系统的仿真模型

胡玉伟, 马萍, 杨明, 焦松, 王子才

(哈尔滨工业大学控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对传统方法建模工作量大等问题, 提出一种电磁轨道炮系统的模块化分解方法。对轨道炮系统的工作原理、结构特点和工作方式进行研究, 将组成系统的物理部件划分为电源、轨道、电枢和弹丸 4 个主要的实体模块, 通过替换系统模块或者改变模型内的参数, 灵活方便地研究使用不同类型电源、电枢的电磁轨道炮, 并建立了轨道炮系统比较实用的仿真模型。仿真结果表明: 适当增大电源电压、合理设计轨道结构及使用轨道修复技术可以提高轨道炮的性能, 为今后电磁轨道炮系统的建模与仿真研究提供了思路。

关键词: 电磁轨道炮; 仿真模型; 模块化; 等离子体电枢

中图分类号: TJ305 **文献标志码:** A

A Simulation Model of Electromagnetic Rail Gun System

Hu Yuwei, Ma Ping, Yang Ming, Jiao Song, Wang Zicai

(Control & Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the large amount of work based on traditional modeling method, a modular decomposition method for electromagnetic rail gun system is proposed. According to the rail gun characteristics, constructional trait and working mode, an applied simulation model is established, which consists of four typical components including power, rail, armature and projectile. It is convenient to analyze performance of rail gun with different power or armature by use of adjusting parameter or replacing module model. The simulation results show that increasing appropriate power supply voltage, designing proper structure of rail and the application of repairing technology of rail can improve the performance of rail gun. These analyses can provide new idea of model and simulation for electromagnetic rail gun in future work.

Key words: electromagnetic rail gun; simulation model; modular; plasma armature

0 引言

随着巡航导弹、战术弹道导弹等制导兵器的迅速发展, 世界各国都面临着严峻的反导压力。与传统反导武器相比, 电磁轨道炮发射弹丸的速度突破了普通火炮的性能极限, 弹丸具有巨大的动能, 大大增强了对目标的毁伤能力, 同时减小了弹丸到达目标的飞行时间, 增加了对付快速目标的有效性和命中率。其次, 弹丸的初速和射程通过调节电流的大小控制, 提高了操作的安全性和便捷性^[1-2]。电磁轨道炮被视为未来防空作战中的重要备选武器之一。电磁轨道炮仿真模型在电磁轨道炮研究领域具有非常重要的地位, 不仅广泛应用于轨道炮的总体设计与性能分析, 而且还是未来作战平台分析和设计的基础, 因此轨道炮仿真模型一直是人们研究的重要课题之一。

B. A. Zerboni 研究了单极发电机在轨道炮中的应用, 分析了电流和磁场的分布, 建立了系统的模型^[3]; D. E. Johnson 分析了轨道炮中的电流分布, 对轨道炮系统性能的影响^[4]; B. J. Long 在确定影响

转捩速度的因素基础上, 分析了转捩现象的发生对炮口电压和电枢烧蚀的影响^[5]。这些学者对不同类型的轨道炮进行建模研究时, 采用的是微分方程组或偏微分方程的形式。然而, 对于电磁轨道炮这样复杂的动力学系统, 采用传统方法建模的工作量极大, 常常妨碍了利用数学模型和计算机仿真技术对电磁轨道炮系统进行深入的分析 and 研究, 在新型号轨道炮的设计和研制中, 这一影响尤其突出。因此, 笔者采用模块化方法建模和仿真, 先建立轨道炮中的主要部件的模型, 再通过一定的方式组合在一起, 同种类型部件的模型可以重复使用, 大大提高了建模的效率, 加快了系统研制的步伐。

1 电磁轨道炮系统模块划分

1.1 电磁轨道炮系统的工作原理

电磁轨道炮的原理图如图 1, 整个系统由电源、开关、传输线和炮体组成。炮体是由一对平行固定的金属导轨和隔离导轨的绝缘材料组成。电枢位于导轨之间且与其保持良好的接触, 弹丸位于电枢的

收稿日期: 2012-03-20; 修回日期: 2012-05-02

作者简介: 胡玉伟(1980—), 男, 内蒙古人, 博士研究生, 从事武器系统建模、仿真和优化研究。

前面, 在其推动下向前运动。当开关闭合时, 电源向一条导轨输入强大的电流, 电流经电枢和另一条导轨后, 流回电源。导轨与电枢中的电流产生强磁场, 该磁场与流经电枢的电流相互作用, 产生强大的洛仑兹力, 推动弹丸和电枢向前高速运动, 最后以很高的速度将弹丸射出炮膛。

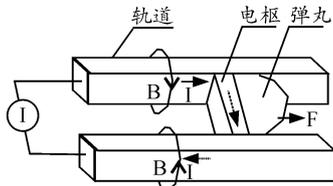


图1 电磁轨道炮原理图

1.2 系统模块划分

对电磁轨道炮系统进行合理的模块分解是模块化建模的关键。模块划分的形式决定了模型的连接方式, 模块划分的结果支配着模型聚合的复杂程度。

模块划分遵循的基本原则: 模块具备独立的物理功能; 模块内部与外部边界的数据交换有明确一致的边界和接口; 模块的划分按物理设备进行, 模块的边界为实际的物理边界。根据模块划分的原则, 结合轨道炮的工作原理和结构特点, 将整个电磁轨道炮系统划分为电源、轨道、电枢和弹丸 4 个模块。

道炮系统划分为电源、轨道、电枢和弹丸 4 个模块。每个模块与实际系统的部件相对应, 根据部件间的影响关系, 确立整个系统的仿真模型。

2 电磁轨道炮系统模型建立

电磁轨道炮系统模型的结构如图 2。

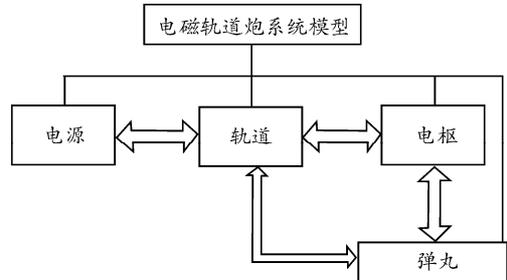


图2 电磁轨道炮系统模型结构图

2.1 电源模型

电源是电磁轨道炮系统的能量来源, 依据储能特点的不同有电容器组、脉冲发电机、电感-电池等多种类型, 笔者采用的电源系统是以电容器为基本脉冲电源模块, 利用模块组装的结构形式, 通过程序控制, 向轨道炮系统提供脉宽为几毫秒的脉冲电流。电源系统的电路原理图如图 3^[6]。

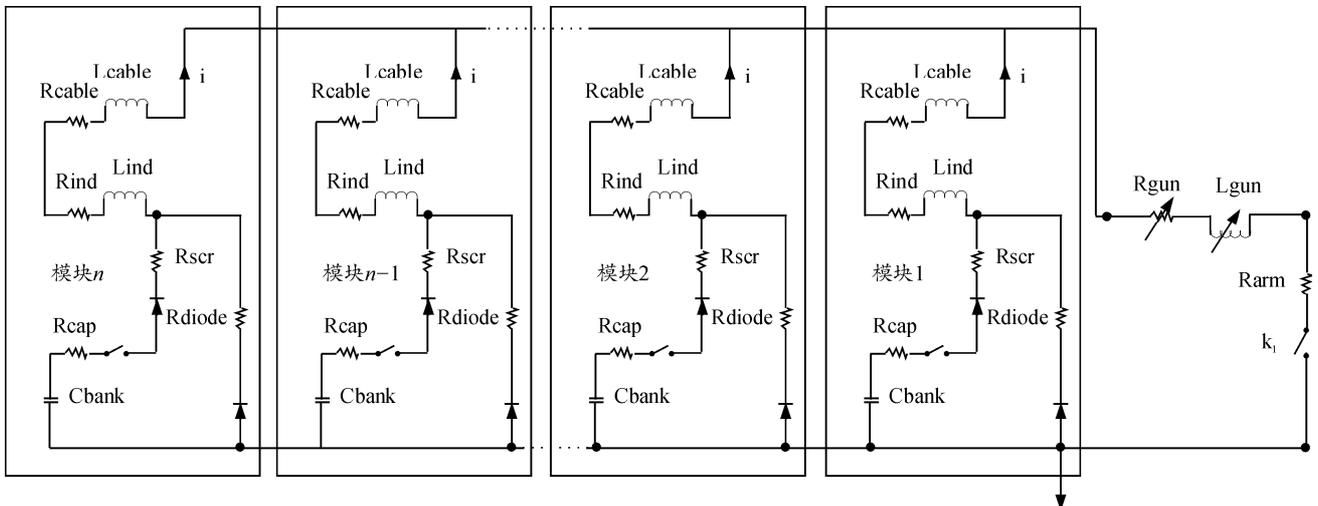


图3 脉冲形成网络电路图

每个脉冲电源模块由电容器组、晶闸管、波形调整阻抗、钳位二极管和连接电缆组成。通过控制每个脉冲电源模块接入发射回路的时间, 来调整电流大小和形状。

第 n 个脉冲电源模块的放电电流为:

$$\begin{cases} (L_{\text{indn}} + L_{\text{cabn}}) \frac{di_n}{dt} + (R_{\text{capn}} + R_{\text{scrn}}) i_n + (R_{\text{indn}} + R_{\text{cabn}}) i_n + \int \frac{1}{C_n} i_n dt \cdot \mathcal{E}(t - t_n) = -U_{\text{ao}} \cdot \mathcal{E}(t - t_n) & (U_{\text{cn}} > 0) \\ (L_{\text{indn}} + L_{\text{cabn}}) \frac{di_n}{dt} + (R_{\text{indn}} + R_{\text{cabn}}) i_n + R_{\text{dion}} i_n = -U_{\text{ao}} \cdot \mathcal{E}(t - t_n) & (U_{\text{cn}} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中： L_{indn} ， R_{indn} 为波形调整电感器的电感值和电阻值； L_{cabn} ， R_{cabn} 为连接电缆的电感值和电阻值； C_n ， R_{capn} 为电容器组的电容值和电阻值； R_{scen} 为晶闸管的电阻值， R_{dion} 为钳位二极管的电阻值； U_{cn} 为电容器组两端的电压； U_{ao} 为轨道两端的电压； $\varepsilon(t-t_n)$ 为单位阶跃函数，描述了电流调节机制。

2.2 轨道模型

轨道是电磁轨道炮系统中的核心部件，一方面起到传导电流的作用，另一方面起到导向弹丸和电枢运动的作用。轨道是由导电的金属构成的，具有一定的阻抗。当弹丸不断向前运动时，接入到发射回路中的轨道长度不断变化，轨道阻抗也将不断地变化^[7]。

发射回路中的轨道电阻为

$$R_r = R_{r0} + R'_r x \quad (2)$$

其中： R_{r0} 为轨道的初始电阻； x 是接入到发射回路的轨道长度。

电源放电时间极短，电流在轨道内的分布并不均匀，主要集中在金属表层。考虑电流趋肤效应和热聚效应对轨道材料特性产生的影响，轨道电阻梯度^[8]即为

$$R'_r = \frac{8}{3h} \frac{\sqrt{\pi \rho_r \mu_0}}{\sqrt{2t}} \quad (3)$$

其中： μ_0 为轨道金属的磁导率； h 为轨道厚度； ρ_r 为轨道金属瞬时电阻率； t 为电流在轨道内的持续时间。

轨道炮发射时，轨道中不仅产生了大量的焦耳热，而且还储存了一定的磁场能，轨道相当于一个可变的电感线圈，轨道的等效电感为

$$L_r = L_{r0} + L'_r x \quad (4)$$

其中： L_{r0} 为轨道的初始电感； L'_r 为轨道的电感梯度，与轨道的形状和尺寸有关，发射过程中一般认为是常值。

2.3 电枢模型

采用等离子体电枢作为推进介质。等离子体是由弹丸底部的金属箔片在通入大电流后瞬间爆炸产生^[9]。电枢在弹丸加速过程中起着滑动开关和传递力的作用，当通过的电流为 i 时，电枢受到电磁力

$$F_L = \frac{1}{2} L'_r i^2 \quad (5)$$

随着电流的增大和时间的持续，等离子体内蕴含了大量的热量，这些热量使周围的轨道材料烧蚀、电离，剥离下的材料增加了电枢的质量，与粗糙的轨道表面形成了粘滞力，即

$$F_d = \frac{2c_{f1} m_a}{d} v^2 \quad (6)$$

其中： c_{f1} 为等离子体与轨道间的粘滞摩擦系数，与轨道表面的粗糙程度有关； m_a 为电枢的瞬时质量； v 是电枢的运动速度； d 为轨道间距。

烧蚀下来的材料增加了电枢的质量，减小了发射效率，相当于引入了附加阻力，即

$$F_{fd} = v \frac{dm_a}{dt} \quad (7)$$

电枢向轨道辐射的热量来自于自身的焦耳热，与电枢的电功率有关，电枢向外辐射大量热量后，其质量变化率^[10]为

$$\frac{dm_a}{dt} = \alpha u_a i \quad (8)$$

其中： α 为烧蚀系数，与电枢的速度和轨道的材料有关； u_a 为电枢两端的电压，对于某种结构固定的轨道炮，其幅值变化不大^[11]。

2.4 弹丸模型

弹丸在运动过程中，由于不断地压缩空气而形成冲击波。冲击波形成后，对弹丸的运动将产生一种阻力，称为弹前空气阻力。由于弹丸所受空气阻力远小于电磁力，忽略弹丸形状对空气阻力的影响，弹丸受到的空气阻力^[12]为

$$F_p = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \rho_0 [Av^2 + Axa + (1/2)c_{f2}Pv^2x] \quad (9)$$

其中： γ 为空气比热率； ρ_0 为弹前空气的初始密度； A 为弹丸的横截面积； c_{f2} 为空气与炮管壁的粘滞摩擦系数； P 为弹丸的截面周长。

为了防止等离子体泄漏到炮管外，弹丸必须与炮管紧密接触，运动时受到炮管的摩擦作用，弹丸受到的摩擦力为

$$F_f = \mu_f F_n \quad (10)$$

其中： μ_f 为滑动摩擦系数，与弹丸的运动速度有关，当弹丸低速运动时，几乎保持不变^[13]； F_n 为弹丸对轨道的正压力。

弹丸在炮管内加速时，电磁力和弹前空气阻力

会对弹丸的轴向产生挤压, 使弹丸的径向产生微变, 对轨道产生挤压, 弹丸对轨道的正压力^[14]为

$$F_n = F_{nv} + \frac{k_1 S_c}{2A} (F_t + F_p) \quad (11)$$

其中: F_{nv} 为弹丸对轨道的初始正压力; F_t 为电枢对弹丸的推力; k_1 为弹丸径向力与轴向力的比率; S_c 为弹丸与轨道接触的表面积。

2.5 系统的发射效率

电磁轨道炮作为一种动能武器, 其对目标的打击效果是由弹丸具备的动能决定的, 轨道炮使用的作战平台的空间有限, 存储的电能有有限, 因此, 系统的发射效率将决定着轨道炮系统作战效能的发挥。

弹丸的炮口动能由电源释放的电转化而来, 系统的发射效率模型为

$$\eta = \frac{E_k}{E_c} \quad (12)$$

其中: E_k 弹丸的动能; E_c 电容器组释放的能量。

3 仿真模型应用

选用等离子体电枢, 使用 3 台脉冲电源供电, 对轨道炮系统进行仿真实验。轨道炮的基本参数如下: 各脉冲电源模块的参数相同, 其中电容器组初始电压为 7.6 kV, 电容值为 8.1 mF, 轨道长度 4 m, 轨道金属磁导率 1.256×10^{-6} H/m, 电阻率 1.69×10^{-8} $\Omega \cdot m$, 轨道间距 30 mm, 电感梯度 4.03×10^{-5} H/m, 电枢质量 20 mg, 弹丸质量为 30 g。以发射效率和出口速度为系统性能指标, 分析电源和电枢不同条件下对系统性能的影响。

3.1 系统性能分析

3.1.1 电源电压对系统性能的影响

发射电源的电压直接影响着轨道炮输入的能量。电源电压的变化, 会对轨道中流入的电流产生变化, 使轨道炮加速过程产生的焦耳热也产生变化, 进而影响弹丸的发射效率。

表 1 显示出增加脉冲电源电压有助于提高轨道炮系统的性能。这是因为增加电源电压后, 轨道中的电流增大, 推动弹丸加速的电磁力呈幂函数规律增大; 因此, 弹丸的出口速度增大。电流增大引起附加阻力增大, 但是相对于电磁力的幅值而言, 其增幅是较小的, 所以系统的发射效率不断增大。因而, 在允许的范围内应尽可能地提高脉冲电源电压。

表 1 不同电源电压下的系统性能变化

电源电压 u/kV	出口速度 $v/(m/s)$	发射效率 $\eta/\%$
7.6	2 295	8.44
8.1	2 546	9.14
8.6	2 809	9.88
9.1	3 075	10.57
9.6	3 342	11.21

3.1.2 电枢的粘滞系数对系统性能的影响

电枢与弹丸向前运动时, 受到轨道与电枢间粘滞力和轨道与压缩空气间粘滞力作用的影响。不同的轨道材料及表面粗糙程度、空气状态和电枢状态会对粘滞摩擦力有不同的影响, 从而影响弹丸的出口速度和发射效率。

由表 2 和 3 可知, 粘滞摩擦系数的增加阻碍了弹丸出口速度和系统发射效率的提高。粘滞摩擦系数增大后, 粘滞阻力不断增大, 克服阻力消耗的能量增多, 弹丸的加速过程减缓, 出口速度减小, 发射效率降低。

表 2 不同轨道电枢间粘滞系数下的系统性能变化

粘滞系数 ζ	出口速度 $v/(m/s)$	发射效率 $\eta/\%$
1.5×10^{-3}	2 458	7.74
2.3×10^{-3}	2 436	7.62
3.1×10^{-3}	2 419	7.52
3.9×10^{-3}	2 405	7.43
4.7×10^{-3}	2 391	7.35

表 3 不同轨道压缩空气间粘滞系数下的系统性能变化

粘滞系数 ζ	出口速度 $v/(m/s)$	发射效率 $\eta/\%$
1.5×10^{-3}	2 246	8.09
2.3×10^{-3}	2 237	8.02
3.1×10^{-3}	2 286	7.96
3.9×10^{-3}	2 220	7.90
4.7×10^{-3}	2 211	7.84

比较 2 种粘滞力的作用效果会发现, 电枢与轨道间的粘滞摩擦力对系统性能的影响大于空气与轨道间的粘滞力的影响。随着发射过程中电枢辐射能量的增加, 轨道材料不断烧蚀、电离, 电枢质量不断增加, 大于空气的质量, 因此受到的粘滞阻力也较大。所以, 轨道炮设计时需选用熔点高的合金材料, 提高轨道的抗烧蚀能力。轨道炮多次发射时, 应采取轨道修复技术, 提高轨道表面的光滑程度。

3.1.3 电枢电压对系统性能的影响

通过对电枢的模型分析可知, 电枢电压对发射回路中的电流有影响, 而电流的变化必然会使电磁力发生变化, 从而影响弹丸的出口速度。此外, 电枢电压又对电枢辐射热有影响, 从而对轨道产生不同的烧蚀影响, 烧蚀下的材料增加了电枢的质量, 引起了附加阻力的增大, 又会影响到系统的能量转换效率。因此, 电枢电压的变化将引起电磁轨道炮

系统内复杂的变化。

表 4 为不同电枢电压下系统性能的变化。电枢电压越高，电枢吸收的焦耳热越多，转化给弹丸的动能就越少，发射效率越低。同时，电枢吸热越多，向外辐射给轨道和弹丸的热量就越多，烧蚀越严重，对轨道破坏越突出。这说明合理设计轨道结构、控制电枢电压对提高轨道炮系统性能影响至关重要。

表 4 不同电枢电压下的系统性能变化

电枢电压 u/V	烧蚀质量 m_a/g	发射效率 $\eta/\%$
100	0.61	9.51
130	0.76	8.98
160	0.93	8.49
190	1.08	8.04
220	1.22	7.61

3.2 发射过程演示

电磁轨道炮工作时包括电源充电及多个电容器组放电的过程，涉及的物理现象较为复杂，为了对电磁轨道炮的发射过程有直观的理解，对电磁轨道炮的工作过程进行可视化仿真。根据电磁轨道炮的组成，运用面向对象的思想，在 Visual C++ 平台上开发了电磁轨道炮可视化仿真系统。由于电磁轨道炮发射时间极短，只有几毫秒，因此采用欠实时仿真，根据模型解算的数据动态显示电磁轨道炮各组件的运行状态。图 4 为使用 4 个电容器组模块的电磁轨道炮工作过程演示图。

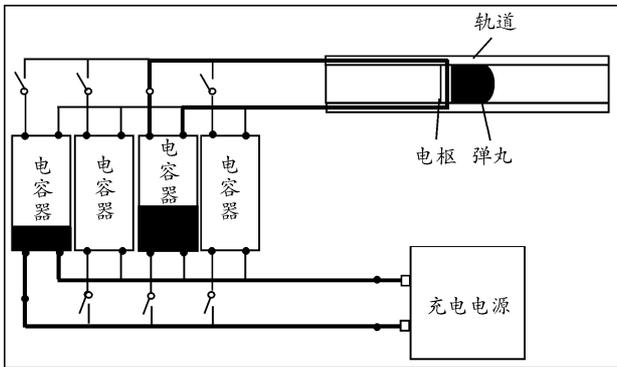


图 4 电磁轨道炮工作过程演示图

4 结论

笔者根据电磁轨道炮系统的工作原理和结构特点，利用模块化思想，建立了系统的模型。分析了电源、电枢特性对轨道炮性能的影响，认为适当增大电源电压，合理设计轨道结构和使用轨道修复技术等措施可以提高轨道炮的系统性能，通过对电磁轨道炮发射过程的可视化仿真，增强了对电磁轨道

过程的直观理解，为电磁轨道炮的研究提供了新手段，有助于对实际系统的设计。

参考文献:

- [1] Fair H D. Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2009, 45(1): 225-230.
- [2] Marshall R A. Railgunnery: Where have we been? where are we going?[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2001, 37(1): 440-444.
- [3] Azzerboni B, Cardelli E, Tellint A. Analysis of the magnetic field distribution in an homopolar generator as a pulse power of electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1988, 24(1): 495-499.
- [4] Johnson D E, Bauer D P. The effect of rail resistance on railgun efficiency[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1989, 25(1): 271-276.
- [5] Hildenbrand D J, Rapka J R, Long B J. Computer modeling prediction of solid armature contact wear and transition in electromagnetic guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1997, 33(1): 74-79.
- [6] Bernardes J S, Stumborg M F, Jean T E. Analysis of a capacitor-based pulsed-power system for driving long-range electromagnetic guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2003, 39(1): 486-490.
- [7] Rolader G E, Thornhill L D, Batteh J H, et al. Electromagnetic gun circuit analysis code[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 499-504.
- [8] Smith A N, Ellis R L, Bernardes J S. Thermal management and resistive rail heating of a large-scale naval electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2005, 41(1): 235-240.
- [9] Parker J V, Parsons W M, Cummings C E, et al. Performance loss due to wall ablation in plasma armature railguns[C]//Proceedings of the 18th fluid dynamics and plasmadynamics and lasers conference. Cincinnati: AIAA, 1985: 281-290.
- [10] Nornoo K B, King T L. Ablation measurement on eml insulator using free-arcs[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1999, 35(1): 294-299.
- [11] Rashleigh S. C, Marshall R. A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities[J]. Journal of Applied Physics, 49(4): 2540-2542.
- [12] Rolader G E, Batteh J H. Effect of in-bore gas on railgun performance[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1991, 27(1): 120-125.
- [13] Weeks D A, Weldon W F, Zowaeka R C. Plasma armature railgun launcher simulations at the university of Texas at Austin[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1989, 25(1): 580-586.
- [14] Aigner S, Igenbergs E. Friction and ablation measurement in a round bore railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1989, 25(1): 33-39.