

# 电磁炮发射原理数值建模与分析

杨玉东<sup>1,2</sup>, 王建新<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 光电学院, 江苏 南京 210094; 2. 淮阴工学院 电信系, 江苏 淮安 223001)

**摘 要:** 为探寻电磁炮运动参数的变化规律, 对等离子电枢运动过程进行了理论分析, 建立了电枢速度和电流之间的数学模型。模型中考虑了电枢运动中所受的主要阻力, 包括等离子体的粘滞阻力和惯性阻力。另外, 通过多次的仿真数据与实验结果比较, 选取了能够较好地符合实际电枢运动过程的弧压数据。建立的仿真模型应用于实际系统进行预测, 预测结果与试验结果相吻合。

**关键词:** 电磁学; 电磁炮; 等离子电枢; 数学模型; 仿真

**中图分类号:** TM153.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-6524 (2008) 04-0009-04

## Numerical Modeling and Analysis on EM Gun Firing Principle

YANG Yu-dong<sup>1,2</sup>, WANG Jian-xin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Dep. of Telecommunication, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to explore variable law of EM gun movement parameters, the motion process of plasma armature was analyzed in theory, and the mathematic model between armature speed and current was established. Main resistances in armature motion were considered in model, they were plasma viscous drag and inertial drag. In addition, compared simulation data with experimental results in many times, the arc voltage data that can fairly reflect the armature motion status were selected, and the established model was applied in actual system to predict parameters. The result showed that the predicted results were coincide with the tested results.

**Key words:** electromagnetics; EM gun; plasma armature; mathematic model; simulation

电磁炮技术的研究重点包括: 抗烧蚀技术; 轨道和弹丸的材料研究; 脉冲功率技术; 电力调节控制技术等方面。对电磁炮技术的研究包括实验、理论仿真和数值模拟。在实验方面, 美国占据着领先的地位, 其次是英国、法国和德国, 都取得了显著的进展<sup>[1]</sup>。在实验中选择最佳实验参数是研究电磁炮的重要方法, 但由于电磁炮参数很多, 不可能也不需要每一种参数组合都进行实验, 因此数值模型的建立和数据仿真就对轨道炮的设计和系统研究起着重要的作用。目前已经出现了大量建模和仿真的文章, 涉及到电磁炮研究的各个领域<sup>[1-3]</sup>。对于弹丸的速度建模问题, Parker 认为电磁炮的效

率和速度与膛壁烧蚀和等离子体质量增加有关, Ray 从运动阻力角度引入与速度有关的阻力项, 通过调整阻力系数等方法。笔者综合了 Parker 和 Ray 的上述方法, 提出一个电枢运动的受力和速度模型, 运用仿真技术得出了与实验结果符合较好的结果, 并在此模型基础上, 对一定结构参数的电磁炮系统的最大速度和所需的轨道长度进行了预测。

### 1 电枢受力分析和数据模型的建立

电枢的作用是在电磁力的作用下, 推动发射体

收稿日期: 2008-03-10; 修回日期: 2008-05-23

作者简介: 杨玉东 (1966—), 男, 博士研究生, 主要从事通信信号处理和脉冲功率技术研究。E-mail: yyudong@163.com

高速运行,因此电枢的选择是电磁炮系统中重要的环节。目前用于电磁轨道炮的电枢主要有3种形式,固体电枢,等离子体电枢和复合电枢。固体电枢设计简单,具有很小的烧蚀粘滞力,电阻低,欧姆热的消耗主要集中在电枢内部。缺点是电枢质量较大,驱动发射体的运动速度低;等离子电枢质量较小,而且在较高的速度下与轨道的接触性能良好,因此能够获得较高的速度。缺点是电阻高,受等离子体的不稳定性影响,电弧阻抗波动会限制发射体的性能,而且容易受粘滞力的作用,出现二次电弧,会严重侵蚀轨道;复合型电枢采用上述的两种电枢的结合,等离子体存在于固体电枢和轨道之间,提高了固体电枢与轨道的接触性能<sup>[4-6]</sup>,缺点是结构较复杂,速度有限。本文主要讨论等离子电枢在轨道上的运动情况。

### 1.1 电枢运动模型的建立

电枢(通常为金属薄片)在大电流通过时,在极短时间内迅速熔化并汽化爆炸,形成等离子体。等离子体电枢在轨道上运行时受到电磁力的作用;随着电枢中电流的增大和时间的延续,等离子体的温度随之升高,导致轨道内壁和发射体材料局部融化、蒸发,与等离子区混合,形成所谓粘滞性阻力 $F_v$ 。部分材料迁移到电枢上,增加了等离子体电枢的质量,形成惰性阻力<sup>[7-10]</sup>。这几种力分别定义如下:

1)电磁力 $F_L$ 为:

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

式中: $L'$ 为电感增量,反映了单位长度导轨的电感。

电磁力是电枢在轨道上受到的向前驱动力。

2)粘滞阻力 $F_v$ 为:

$$F_v = \frac{B v^2 m_a (w+h)}{w h} \quad (2)$$

式中: $B$ 为粘滞因数,与电枢与轨道的加工精度和光滑度有关,在精度和光滑度较高情况下, $B=0.0125$ ;  $m_a$ 为电枢质量; $w$ 为导轨宽度; $h$ 为导轨高度。

3)惰性阻力<sup>[11-12]</sup> $F_d$ 为:

$$F_d = v \frac{dm_a}{dt} \quad (3)$$

电枢质量 $m_a$ 按以下公式求出<sup>[7-8]</sup>:

$$\frac{dm_a}{dt} = \alpha i V_a \quad (4)$$

$$m_a = \alpha V_a \int_0^t i dt \quad (5)$$

式中: $\alpha$ 是烧蚀系数,与速度、电枢与轨道的材料有

关,通常看作为一个常量,当采用铜材料时, $\alpha \approx 4.7 \times 10^{-8} \text{ kg/J}$ ;  $V_a$ 是弧压,如果等离子体平稳时,弧压范围在150~200 V内<sup>[7-9]</sup>,弧压可以通过测量轨道出口处两端电压近似得到。

弧压与电枢电阻满足欧姆定律,即:

$$V_a = i R_a \quad (6)$$

其中: $R_a$ 为电枢电阻。

等离子体电枢总的受力为:

$$F = (m_p + m_a) a = F_L - F_v - F_d \quad (7)$$

式中: $m_p$ 为发射体质量; $m_a$ 为电枢质量; $a$ 为电枢的加速度。

电枢的质量运行速度、加速度和运动位移公式为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{(m_p + m_a)} \left[ \frac{1}{2} L' i^2 - \frac{B m_a (w+h)}{w h} v^2 - v \frac{dm_a}{dt} \right] \\ m_a = \alpha V_a \int_0^t i dt + m_a(0) \quad \frac{dm_a}{dt} = \alpha i V_a \end{cases} \quad (8)$$

式中: $v$ 和 $x$ 分别为电枢运动的即时速度和电枢的在轨位移。

### 1.2 电枢运动仿真模型

从等离子体电枢工作的内部微观机理来看,它是一个具有空间分布的气体柱,其等效模型严格来讲必须用磁流体力学模型考虑,且等离子体电枢固有的烧蚀、电导率变化规律等主要物理问题也需要考虑到。另外,电枢的运动过程也是相当复杂的,有许许多多的影响因素,如驱动电流的频率趋肤效应、电枢运动的速度趋肤效应、空气阻力和摩擦力等。这些因素大都具有不确定性,如摩擦力取决于接触面的加工精度和装配工艺,就是同样结构的炮,每次发射的结果也很难一致。因此建立一个完整的、包含所有因素的数学模型是不可能的,事实表明也是不必要的。忽略次要因素,只考虑主要因素是建模过程常用的方法。常用的分析模型有多种,如理想模型、考虑空气阻力和摩擦力的模型<sup>[11]</sup>、仅考虑惰性阻力的模型<sup>[12]</sup>、仅考虑粘滞阻力的模型<sup>[13]</sup>等等,均是通过调整系数取得与试验数据的吻合。本文建立的数学模型假设轨道平滑度良好及炮膛抽真空,即忽略了空气阻力和摩擦力,仅考虑了对等离子电枢运动影响较大的几种力,即电磁力、粘滞阻力和由于等离子质量变化而产生的惰性阻力。由于粘滞阻力和惰性阻力都与电枢的质量变化有关,因此,模型中必须考虑等离子体电枢运动过程的质量变化这一关键因素。又由于电枢质

量变化直接与等离子体的弧压有关,故通过调整弧压参数,建立了电枢的运动参数与电流、弧压之间的关系模型,模型的数学表达式见式(8)。

式(8)是关于电枢运动速度和电流的方程,可以求得电枢运动速度与电流之间的关系,可是由于式(8)是高阶微分、积分混合方程,以常规的数学手

段难以确定其解析解。故本文采用 Matlab 提供的 Simulink 动态仿真工具仿真出电枢的出轨速度和电流的关系。

根据式(8)建立的速度、电流和弧压的仿真模型如图 1 所示。

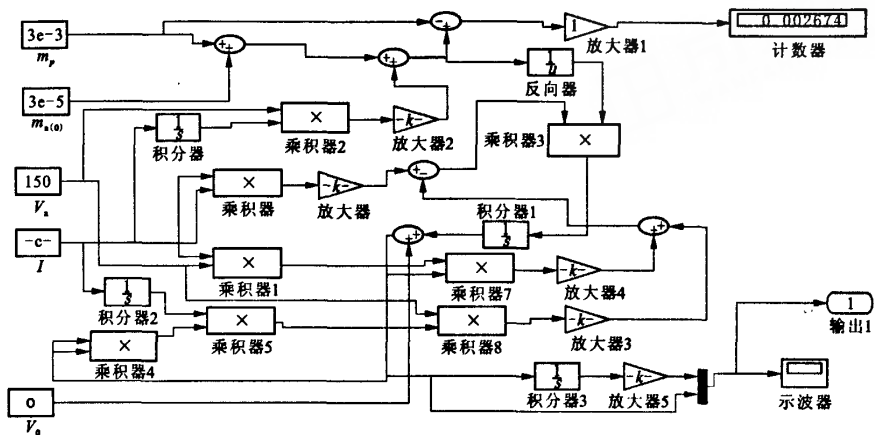


图1 速度参数仿真模型  
Fig.1 Simulation model of speed parameter

2 实例仿真

轨道炮参数如下:轨道长 5 m,轨道间距 12.7 mm,宽 12.7 mm,电枢采用厚 0.05 mm 的紫铜箔,质量为 30 mg,通电爆炸后成为等离子体。弹丸为聚碳酸酯材料,质量为 3 g<sup>[14]</sup>。

把上述参数带入式(8),电流采用恒定电流模式,电流幅度为 250 kA。用图 1 模型进行速度和位移的仿真,弧压大小选择为  $V_a=150$  V,仿真结果见图 2,在  $t=1.5$  ms 时,电枢速度接近  $6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,运动位移为 5 m。

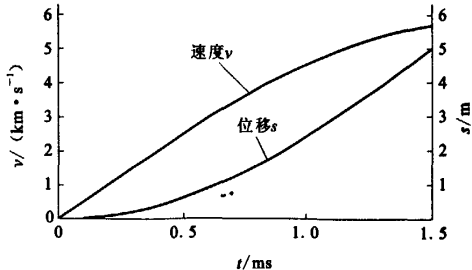


图2 恒定电流下仿真结果 ( $V_a=150\text{V}$ )  
Fig.2 Simulation result under constant current ( $V_a=150\text{V}$ )

本例的轨道参数和电路参数与 Marshall 实验

小组的实验参数一致,仿真结果与实验结果<sup>[14]</sup>相当吻合,说明建立的上述仿真模型能够反映真实情况。

仿真实例结果表明,用此仿真模型来描述等离子体电枢运动是比较合理的。其中,弧压的大小是模型合理的关键参数。澳大利亚 Canberra 实验室的科学家在实验中发现,对一个特定结构的电磁炮,炮口电压基本上与电枢电流无关<sup>[15]</sup>。他们的试验中,电枢电流从 300 kA 变化到几十千安,炮口电压基本上保持在 200 V 左右。后来其他实验室也观察到类似现象<sup>[15]</sup>。基于此,实例仿真中假设弧压为常数,通过调整弧压的值与试验结果吻合来认定,仿真结果表明,当  $V_a=150$  V 时,仿真与试验结果吻合较好。为了检验弧压数值的精确度,作者在上述模拟仿真之外,又通过对文献[12-14]提供的轨道参数进行模拟仿真验证,结果表明,弧压分别为 145 V、150 V 和 150 V 下,仿真数据与他们的试验或仿真结果吻合较好。因此本文选定的弧压大小对电枢受力分析是合理的,基于受力分析建立的仿真模型也是合理的,可以用来对给定参数的电磁炮的发射参数进行理论分析和预测。

3 模型的实际应用

基于上述模型的建立,在实际中可以用于对给

定参数的电磁炮发射过程进行预测和分析。这在工程研究中是非常重要的,这是因为在众多参数的电磁炮系统中,如果对每项参数都采取实验的手段去确定,显然是不可能的,也是不必要的;而采取仿真手段显得快捷、高效。以下利用上述模型对一个实例进行电磁炮参数的预测并通过试验结果进一步验证上述模型的可靠性和适用性。

实际应用中轨道参数为:电容量为 4.067 mF,充电电压为 4.6 kV,储能电感为 2.51  $\mu$ H,实测轨道和电缆分布电感分别为 0.66  $\mu$ H 和 0.1  $\mu$ H;分布电阻(包括轨道和电枢)为:8.6 m $\Omega$ ,由截面积为 1 cm<sup>2</sup>的紫铜条构造,炮口截面积 0.48 cm<sup>2</sup>,轨道间距为 0.8 cm,电枢采用铜箔,质量为 30 mg,弹丸由滑动良好的聚碳酸酯制成,体积为 0.288 cm<sup>3</sup>,质量为 340 mg。电路参数为:电流采用单脉冲模式,电流峰值为 140 kA,弧压  $V_a=150$  V。

按照以上的分析,把上述轨道参数代入式(8),仿真结果如表 1 所示,电枢速度为  $v=1\ 632$  m $\cdot$ s<sup>-1</sup>。预测的结果与实验得到的结果<sup>[15]</sup>是一致的。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Results of simulation

$t/\text{ms}$	$I/\text{kA}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$s/\text{m}$
2	140	980	0.96
3	128	1 400	1.98
3.5	114	1 436	2.86
4	100	1 600	3.92
4.5	90	1 628	4.23
5	80	1 632	5.28

#### 4 结束语

通过对等离子电枢运动过程的分析,建立了电枢速度和驱动电流之间的数学模型,并通过 Simulink 进行了仿真,通过与实验数据相比较,验证了该数学模型的合理性。仿真模型可以用于轨道炮的结构设计和性能分析,能在较为合理的程度上预测轨道炮的主要性能指标,如轨道电流、加速时间、弹丸出膛速度,也能估计弹丸质量、电源回路参数的变化对系统性能的影响。当然,这种模型仅仅是一种近似的、宏观上的模型。如果想建立一个精确的仿真模型,那么对等离子体内部微观的性质还需要深入细致的研究以及大量的甚至艰难的模拟试验

等工作,如等离子体的温度、对轨壁的烧蚀量、弧压的变化情况等,这在作者的后续工作中有所体现。

#### 参考文献:

- [1] 古刚,向阳,张建革. 国际电磁发射技术研究现状[J]. 舰船科学技术(增刊),2007(29):157.
- [2] OLEG V FAT'YANOV. Electromagnetic processes and launch efficiency of railgun systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1997,33(1):532-533.
- [3] ZHANG J,KIM K. Study of a new railgun configuration with perforated sidewalls[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1993,29(1):535.
- [4] MANKOWSKI J DICKENS J. A bench top railgun with distributed energy sources[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(1):167.
- [5] 卢新培,潘恒. 分散储能法的局限性[J]. 兵工学报,2001,5(2):149-151.
- [6] ANTONINO MUSOLINO, MARCO RAUGI. The multi-stage railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2001,37(1):445-447.
- [7] DWIGHT S WARNOCK. The design and optimization of a 600 kJ rail-gun power supply[D]. California:Naval Postgraduate School Monterey 2003;20-22.
- [8] ROLF DETHLFSEN. Pulse power applications of silicon diodes in EML capacitive pulsers[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1993,29(1):934-938.
- [9] TIAN Yang-meng,MIAO Miao,WANG Ying. Use of a fast shock tube as an injector for EM railgun[J]. EML IEEE,2004,41(2):331.
- [10] DAMON A WEEKS. Plasma-armature railgun launcher simulations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1989,17(3):404-405.
- [11] JOHAN. GALLANT. Experiments with brush projectiles in a parallel augmented railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,4(1):188-189.
- [12] 陶孟仙,任兆杏. 503 轨道炮等离子体电枢发射的仿真计算[J]. 火炮发射与控制学报,1999(4):61-64.
- [13] 周之奎,陈秋华. 电磁轨道炮性能的数值模拟[J]. 高压物理学报,1989,12(4):311-312.
- [14] 龚兴根,孙承伟. 原理性电磁炮实验研究[J]. 爆炸与冲击,1987,4(2):165-166.
- [15] LEHMANN P RECK B. Acceleration of a suborbital payload using an electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(1):480-481.

# 电磁炮发射原理数值建模与分析

作者: 杨玉东, 王建新, YANG Yu-dong, WANG Jian-xin  
作者单位: 杨玉东, YANG Yu-dong (淮阴工学院, 电信系, 江苏, 淮安223001; 南京理工大学, 电光学院, 江苏, 南京210094), 王建新, WANG Jian-xin (淮阴工学院, 电信系, 江苏, 淮安223001)  
刊名: 火炮发射与控制学报   
英文刊名: JOURNAL OF GUN LAUNCH & CONTROL  
年, 卷(期): 2008, (4)  
引用次数: 0次

## 参考文献(15条)

1. 古刚, 向阳, 张建革 国际电磁发射技术研究现状 2007(29)
2. OLEG V FAT'YANOV Electromagnetic processes and launch efficiency of railgun systems 1997(1)
3. ZHANG J, KIM K Study of a new railgun configuration with perforated sidewalls 1993(1)
4. MANKOWSKI J, DICKENS J A bench top railgun with distributed energy sources 2007(1)
5. 卢新培, 潘垣 分散储能法的局限性[期刊论文]-兵工学报 2001(2)
6. ANTONINO MUSOLINO, MARCO RAUGI The multi-stage railgun 2001(1)
7. DWIGHT S WARNOCK The design and optimization of a 600 kJ rail-gun power supply 2003
8. ROLF DETHLFSSEN Pulse power applications of silicon diodes in EML capacitive pulsed 1993(1)
9. TIAN Yang-meng, MIAO Miao, WANG Ying Use of a fast shock tube as an injector for EM railgun 2004(2)
10. DAMON A WEEKS Plasma-armature railgun launcher simulations 1989(3)
11. JOHAN, GALLANT Experiments with brush projectiles in a parallel augmented railgun 2005(1)
12. 陶孟仙, 任兆杏 503轨道炮等离子体电极发射的仿真计算 1999(4)
13. 周之奎, 陈秋华 电磁轨道炮性能的数值模拟[期刊论文]-高压物理学报 1989(4)
14. 龚兴根, 孙承伟 原理性电磁炮实验研究 1987(2)
15. LEHMANN P, RECK B Acceleration of a suborbital payload using an electromagnetic railgun 2007(1)

## 相似文献(1条)

1. 会议论文 王喆, 闫海青, 钟鼎, 王克起 多功能电磁炮演示仪的研究 2007  
笔者研制了一种多功能电磁炮演示仪, 它能演示线圈电磁炮原理、斜抛体射程与发射角关系、“炮打落猴”(验证抛体运动是水平运动和自由落体运动的合成、也验证了抛体运动矢量方程的正确性)、安培力(验证左手定则)、通电线圈的收缩(验证通电导线间具有电磁力相互作用)、炮弹在线圈中位置与射程的关系、线圈匝数与射程关系、弹体类型(如管形弹体、钢珠弹体等)与射程关系、电容器的充电与放电等电磁学和力学演示内容。

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hpfsykb200804003.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hpfsykb200804003.aspx)

下载时间: 2010年3月20日