

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.001

电磁轨道炮电枢的运动特性研究

靳智, 沈培辉, 刘凯

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 为了快速有效地实现电磁轨道炮的反导, 对其固体电枢电磁阻力与空气阻力角度等运动进行研究。在基于麦克斯韦理论的基础上, 分析了电枢在炮管内的力学特性。通过理论仿真计算分别对电枢的电磁阻力及空气阻力进行了分析, 比较了截面及摩擦因素对出口动能的影响, 得到了最优方案, 并提出了改进电枢发射的措施。研究结果表明: 低速段摩擦力大于空气阻力, 而高速段空气阻力对发射影响较大。

关键词: 固体电枢; 电磁阻力; 空气阻力; 动能

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Research on Kinetic Characteristic of Armature of Electromagnetic Rail Gun

Jin Zhi, Shen Peihui, Liu Kai

(National Key Laboratory of Smart Ammunition Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to quickly and efficiently realize the anti-missile of electromagnetic rail gun, the air resistance and magnetic resistance of solid armature were studied. Based on the Maxwell's theory, the mechanics properties of the armature in the gun tube are analyzed. By theoretical and simulation respectively to the armature resistance and electromagnetic air resistance are analyzed, the cross section and the influence of friction factors on the export of kinetic energy are compared, the optimal solution is got, and the measures of improving the armature launch are put forward. The results showed that low speed friction is greater than the air resistance, while the high speed period of air resistance has a greater impact to the mission.

Key words: solid armature; electromagnetic resistance; air resistance; kinetic energy

0 前言

随着巡航导弹、战略战术武器、激光武器等高技术武器在现代化战争中的应用, 如何快速有效地实现反导, 是各国亟需解决的问题。相比于传统火炮的极限速度, 电磁轨道炮作为新概念武器家族成员之一, 因弹丸发射速度快、时间短、威力大等优势, 可显著提高弹丸对飞行目标的命中率和毁伤性能, 固体电枢作为系统的组件及弹丸发射的载体, 其在轨道内的滑行状态及力学特性, 对弹丸发射起着举足轻重的作用, 因此也成为国内外专家学者研究的热点课题之一, 研究领域涉及速度趋肤效应、材料、涡流损耗、结构及动态响应等^[1-3]。

对于固体电枢的研究, 有学者将导轨简化为弹性的地基梁, 分析了电枢发射状态下导轨的动态响应^[4-5], 杨玉东等将电枢简化为非线性的电阻、电感, 分析了电枢的负载特性^[6], 也有用有限元仿真的方法分析了电枢的电磁场分布规律^[7-8]。虽然目前对电枢的力学性能研究已取得一定成果, 但对运动电枢在轨道内的电磁力与电磁阻力、空气阻力的分析与仿真的资料略显不足; 因此, 笔者将结合电磁阻力与空气阻力角度探讨其对电枢运动的影响。

1 基本理论分析

1.1 电磁力分析

电磁轨道炮的基础原理可用麦克斯韦电磁理论解释, 变化磁场与载导体相互作用, 一方面工作的脉冲电流随时间变化, 另一方面电枢运动引起通过导轨与电枢组成曲面的磁通量变化, 由法拉第电磁感应定律知, 变化的磁场会产生涡旋电场, 安培力做功实际上是涡旋电场力做功, 电枢上的载流子所受洛伦兹力的宏观平均力(安培力)做功, 其体密度为 $f=j_0 \times B$, 功率为 f 和电枢速度 v 的标积。电枢受到的电磁力可由能量守恒求得^[9-10]:

$$F(t) = \frac{L'}{2} I^2(t) \quad (1)$$

L' 为轨道电感梯度, $I(t)$ 为脉冲电流。

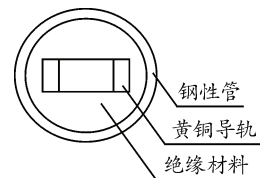


图1 轨道系统示意图

为直观了解导轨与电枢间的相互关系, 图1给

收稿日期: 2013-07-17; 修回日期: 2013-08-30

作者简介: 靳智(1988—), 男, 江苏人, 硕士, 从事电磁轨道炮固体电枢的效能研究。

出了轨道炮结构简图，绝缘材料不但用来隔离导轨与刚性管，而且起到固定滑动导轨的作用。

1.2 阻力分析

运动电枢阻力主要来源于以下几个方面：其一，结构两侧方向不同的电流产生的磁压力；其二，封闭轨道内电枢前进压缩空气产生的压力及空气阻力；其三，导轨与电枢接触面因电爆炸造成的等离子体粘滞阻力，电枢的正压力^[11]为：

$$F_1 = F_0 + \frac{\mu}{1-\mu} \frac{F_p}{2A} S_c$$

$$F_2 = \frac{\mu}{1-\mu} \frac{F_p}{2A} S_c$$
(2)

则电枢受到的摩擦力为：

$$F_f = \mu_f (F_1 + F_2)$$
(3)

其中 μ_f 为滑动摩擦因素， F_0 为初始压力， F_1 为电磁力引起的正压力， F_2 为空气对电枢引起的正压力， μ 为电枢材料的泊松比， A 为电枢的横截面积， S_c 为电枢与导轨接触的面积，空气阻力表达式^[12]为：

$$F_p = \frac{(r+1)}{r} \rho_0 \left[Av^2 + Axa + \frac{c_{f1} P v^2 x}{2} \right]$$
(4)

r 为气体比热比， ρ_0 为电枢前初始空气密度， v 为电枢速度， a 为加速度， P 为电枢的横截面周长， c_{f1} 为等离子体与导轨的粘滞摩擦系数。

电枢受到的合力为：

$$F_{\text{合}} = F(t) - F_f - F_p = ma$$
(5)

m 为电枢质量。

2 数值模拟

2.1 有限元仿真参数

分析电枢的受力特性，首先需要了解电磁力的瞬态分布状况，笔者用有限元软件 ANSYS 分析了电枢的瞬时电磁力分布规律，工作电流采用峰值为 300 kA 的脉冲电流，加载时间 4.5 ms，空气域足够大，磁场的边界条件为磁力线平行边界条件，导轨与电枢的材料分别为黄铜和铝合金，仿真参数见 1。

表 1 系统仿真参数

材料	质量/g	电阻率/($\Omega \cdot m$)	相对磁导率
黄铜	—	6.7×10^{-8}	0.99
7075	25	3.2×10^{-8}	0.99

2.2 瞬态电磁力分布规律

图 2 中 X 方向为电枢的前进方向，图中给出了电磁力矢量图的俯视图，由图可知，电枢受力大部分集中在喉部，前端力小，原因在于该处磁场极弱，

涡流效应使得电流密度集中在靠近喉部区域，臂端受力相对较弱，主要是由于结构的限制，则 X 方向的电磁力合力为驱动力，Y 方向的压力有利于保持接触，同时也产生了运动阻力。

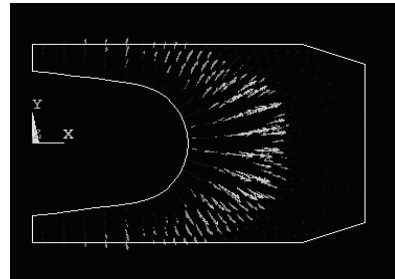


图 2 电磁力分布规律

2.3 理论计算

下面将对电枢在电磁力作用过程中压力及空气阻力进行分析，激励电流分为上升、持平、下降 3 个阶段，波形见式 (6)：

$$I = \begin{cases} I_1 = \frac{I_0}{t_1} t & 0 < t \leq t_1 \\ I_2 = I_0 & t_1 < t \leq t_2 \\ I_3 = \frac{I_0}{t_3 - t_2} (t_3 - t) & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $t_1=0.5$ ms, $t_2=2$ ms, $t_3=4.5$ ms 导轨电感梯度 $L'=0.46$ $\mu\text{H/m}$, $m=25$ g, 泊松比 $\mu=0.3$, $\mu_f=0.1$ 电枢横截面积 $A=40$ mm^2 , 接触面积 $S_c=60$ mm^2 , 比热比 $r=1.4$, 初始空气密度 $\rho_0=1.29$ kg/m^3 假设运动中未产生等离子体，故式 (4) 中的第 3 项未计。

运动电枢的压力特性如图 3，据图可知，磁压力曲线与电流曲线一致，最大正压力为 6 653 N。空气附加正压力因电枢压缩空气而增加，2.5 ms 之后压力平缓过渡，变化幅度较小，其最大值为 921 N，约为最大磁压力的 1/7。可以看出，在这种情况下电枢受到的压力主要为磁压力。

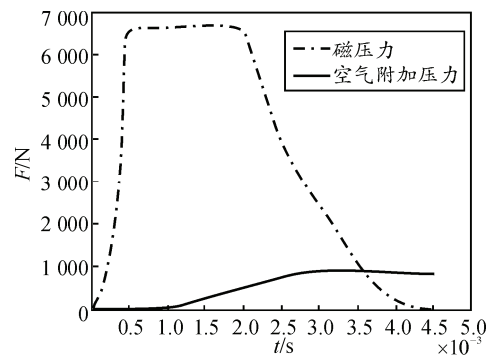


图 3 压力曲线

图 4 中分别为正压力引起的摩擦阻力及空气阻力，摩擦力正相关于图 3 中的压力曲线，其峰值为

721 N。空气阻力随电枢的快速推进不断增加, 3.5 ms 阻力达到峰值 2 868 N, 之后 (3.5~4.5 ms) 阻力有缓慢变小趋势, 这是因为此段时间电枢向出轨道口运动, 电枢电流下降, 压力降低, 从而引起阻力稍降。图 4 中 2 条曲线在 1.4 ms 时相交, 以该点为分界点, 在 1.4 ms 之前, 摩擦力大于空气阻力, 之后摩擦力小于空气阻力, 这说明在低速阶段, 摩擦力占主导作用, 高速段, 空气阻力远大于摩擦力。

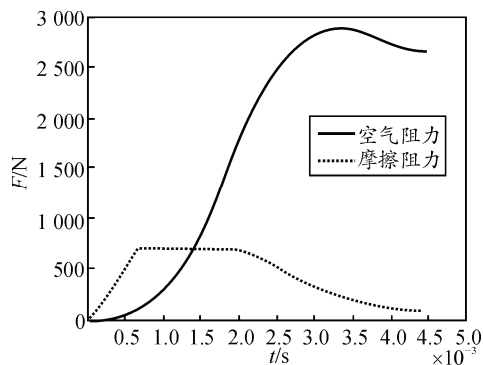


图 4 阻力时程曲线

当考虑了各项阻力之后, 电枢的有效推力与理想推力的区别可以由图 5 分析, 显然实际低于理想情形, 对应推力峰值分别为 18 599, 20 700 N, 起始阶段 (0~0.5 ms), 理论与实际的差距小于其他阶段, 主要在于该段各项阻力均较小, 然后在电流下降沿 (3.5~4.5 ms), 合力出现负值, 电枢加速度的方向与运动方向相反, 表明电枢的速度减缓, 原因在于放电结束段电流小致使电磁力变弱, 因而在电流的下降阶段应保证电流值不能过低, 若加速轨道相对较长, 这种情况应引起足够的重视。

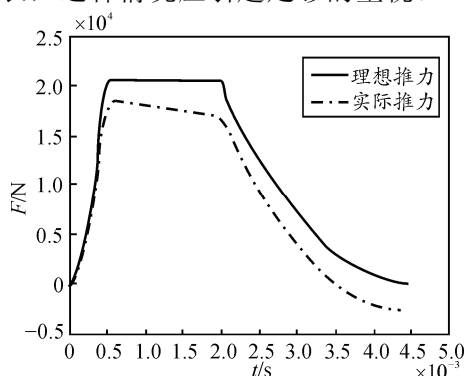


图 5 理想和实际推力曲线

表 2 比较了横截面积为 40 mm^2 下摩擦系数对电枢运动的影响, 分析表中数据可知, 随着摩擦系数的减少, 出口速度 V 增加。与不计阻力炮口速度 (1 800 m/s) 相比, 动能比分别为 75.3%, 88.25%, 92.27%, 相比动摩擦为 0.27, 动能分别增加了 12.95%, 21.97%。通过分析可得, 电枢阻力对速度

的影响与导轨与电枢接触面的粗糙程度密切相关。

表 2 不同摩擦系数的动能比

项目	μ_f	A/mm^2	$V/(\text{m/s})$	$(E(i)/E)/\%$
1	0.27	40	1 562	75.30
2	0.10	40	1 691	88.26
3	0.05	40	1 729	92.27

在保持摩擦因素为 0.05 的前提下, 为分析电枢截面积 A 对阻力及动能的影响, 给定了 3 个不同的截面尺寸。由表 3 中仿真数据可知, 空气阻力随电枢截面 A (迎风面积) 的减小而降低, 电枢受到的摩擦阻力却相应变大, 结果与式 (2)、式 (3) 相符。同时出口速度也提高了, 同比 $A=40$, 动能分别增加了 3.55%, 6.95%。在 $A=30$ 时, 速度达到 1 793 m/s, 与理想状态下 (1 800 m/s) 比较, 出口动能比达到 99.22%, 分析表明有效降低空气阻力及摩擦阻力, 对于改善发射环境具有十分重要的意义。

表 3 不同截面积的动能比

项目	μ_f	A/mm^2	F_p/N	F_f/N	$V/(\text{m/s})$	$(E(i)/E)/\%$
1	0.05	40	2 868	360	1 729	92.27%
2	0.05	35	2 509	408	1 762	95.82%
3	0.05	30	2 151	472	1 793	99.22%

综合分析可知, 可通过以下措施来提高发射的有效推力:

- 1) 通过改变压缩空气的作用面积来降低空阻的影响。例如, 电枢作为抛体不携带弹丸时, 可将电枢设计成锥形或卵形头部。
- 2) 提高加工精度, 降低接触面的粗糙度, 以避免因摩擦力过大引起过度磨削、电枢变形, 从而保证发射的稳定性及连续性。

3 结束语

笔者从电磁场理论入手, 结合有限元仿真得到电枢的力学分布特点, 磁场力推动电枢前进, 同时对电枢施加压力, 并通过理论计算了电枢的摩擦阻力及空气阻力, 进行了定性分析, 结果表明, 在不同时段各阻力具有不同特性。在对比实际与理想情况下的推力曲线中发现, 在电流的下降沿应将电流值适当升高以避免推力不足的情况。最后比较分析了电枢截面及动摩擦系数对出口速度及动能比的影响, 并给出了提高发射效率的一些建议。在研究工作中, 未考虑变形及温升的影响, 会存在误差。在以后的工作中, 还应考虑耦合场, 以提高计算精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 范长增, 王文魁. 发展中的电磁轨道炮[J]. 燕山大学学报 2007, 31(5): 37-386.