

doi: 10.7690/bgzd.2016.11.003

## 基于炮口分流的电枢熔化抑制方法

王志恒<sup>1</sup>, 万敏<sup>1</sup>, 李小将<sup>2</sup>, 黄勇<sup>3</sup>

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院航天装备系, 北京 101416;  
3. 中国人民解放军 95910 部队, 甘肃 酒泉 735018)

**摘要:** 为有效解决轨道炮电枢熔化问题, 提出一种基于炮口分流降低接触电阻焦耳热功率的电枢熔化抑制方法。分析了电枢熔化形成机理, 设计了电阻器、电感器和电容器炮口分流 3 种降低接触电阻焦耳热方案, 仿真计算了 3 种炮口分流方案接触电阻焦耳热功率和产生量, 分析了 3 种方案对电枢熔化的抑制效果。结果表明: 电阻器和电感器炮口分流方案可使接触电阻焦耳热产生量显著降低, 能够抑制电枢熔化, 但是需要增加输入电流补偿炮口分流对电枢电磁力的影响; 电容器炮口分流效果十分有限, 起不到抑制电枢熔化的作用。

**关键词:** 轨道炮; 电枢熔化; 炮口分流; 脉冲电源; 炮口速度

**中图分类号:** TJ303 **文献标志码:** A

## Suppress Method for Armature Melting Based on Muzzle Shunt

Wang Zhiheng<sup>1</sup>, Wan Min<sup>1</sup>, Li Xiaojiang<sup>2</sup>, Huang Yong<sup>3</sup>

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*  
2. *Department of Spaceflight Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*  
3. *No. 95910 Unit of PLA, Jiuquan 735018, China*)

**Abstract:** For effectively solving the problem of the armature melting, this paper proposed suppress method of armature melting based on muzzle shunt for reducing contact resistance Joule heat. The mechanism of armature melting is analyzed, design three reducing contact resistance Joule heat schemes: resistor muzzle shunt, inductance muzzle shunt, and capacitor muzzle shunt. The heat power and output of 3 schemes are simulated and calculated, and analyzed suppress effect of 3 schemes on armature melting. The results show that the resistor muzzle shunt scheme and inductance muzzle shunt scheme can significantly reduce the contact resistance of Joule heat, thereby suppressing the armature melting, while, these two schemes have to increase the input current to compensate the effect of muzzle shunt on armature electromagnetic force. The effect of capacity muzzle shunt scheme is very limited. Thus, the capacity muzzle shunt scheme cannot suppress armature melting.

**Keywords:** rail gun; armature melting; muzzle shunt; pulse power; muzzle velocity

### 0 引言

轨道炮是一种依靠电磁力加速弹丸的发射装置, 能将几克到几千克的弹丸加速到 2 000 m/s 以上, 这使其在超高速撞击试验、微小航天器发射等军事领域具有巨大的应用潜力。轨道炮的电枢起到承载电流和产生推力的作用, 是轨道炮的重要组成部分。轨道炮的电枢主要有 3 种形式: 固体电枢、混合电枢和等离子体电枢, 固体电枢相对其他 2 种电枢对轨道烧蚀较轻, 是目前常用电枢形式<sup>[1]</sup>。然而, 电枢与轨道滑动电接触产生焦耳热和摩擦热容易导致电枢接触面熔化, 甚至电枢转捩, 影响发射参数和发射可靠性; 因此, 电枢熔化是电枢发射时需要尽力避免的现象。

为抑制电枢熔化, 文献[2]进行了电枢构型的优化设计, 可在一定程度上避免焦耳热过度集中, 但是对电枢熔化的抑制效果有限; 文献[3]采用了降低

峰值电流延长脉冲电源放电时间的方法, 需要增加轨道长度, 且不利于系统效率提升; 文献[4]和文献[5]采用了外场增强磁场降低驱动电流幅值的方法, 可提高轨道区域的磁感应强度, 降低通过电枢电流的需求, 缺点是需要额外的励磁电路, 且结构复杂。

针对电枢熔化问题, 笔者分析了电枢熔化形成机理, 提出了基于炮口分流降低接触电阻焦耳热功率的电枢熔化抑制方法, 给出了电阻器炮口分流、电感器炮口分流和电容器炮口分流 3 种方案<sup>[6]</sup>, 并对 3 种方案的抑制效果进行了建模与仿真分析。研究结果可以为轨道炮的设计和应用提供参考。

### 1 电枢熔化形成机理和抑制思路

电枢在轨道内运动时, 电枢与轨道的接触面经常发生熔化甚至汽化。电枢熔化的本质是电枢接触点温度超过材料熔点时材料由固态变为液态的过程。电枢在轨道内加速过程中, 能够产生热量的物

收稿日期: 2016-06-28; 修回日期: 2016-09-02

作者简介: 王志恒(1988—), 男, 吉林人, 满族, 在读博士, 从事轨道式电磁发射理论与技术研究。

理效应主要包括电流焦耳热效应、电枢克服接触面摩擦力做功和压缩空气阻力做功，而电枢熔化现象主要发生在电枢与轨道接触面，能够在该处产生热量的主要是接触电阻焦耳热和摩擦生热，图 1 为电枢发射过程中接触面熔化示意图。接触面附近熔化现象发生的重要前提是接触面热源功率要大于传递和辐射的功率，这样热量才能在电枢接触面附近积累，并引起材料温升；因此，若能降低接触面热源功率，则可以抑制电枢熔化。

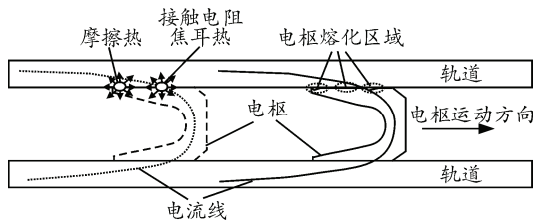


图 1 电枢发射过程中接触面熔化示意图

文献[7]对电枢发射过程中的接触电阻焦耳热和摩擦热进行了理论分析和实验测定，结果表明：接触电阻焦耳热产生量远大于摩擦热产生量，这说明接触电阻焦耳热对电枢熔化的影响要远大于摩擦热；因此，若能降低接触电阻焦耳热功率则能抑制电枢熔化。由焦耳定律可知：接触电阻焦耳热功率与接触电阻及电枢电流强度的平方成正比，电枢与轨道的接触电阻主要受到接触副材料特性、电枢构型和接触压力等因素影响，在接触电阻不能得到显著改善的情况下，考虑通过降低电枢电流来降低接触电阻焦耳热功率。然而电枢电流也决定了电枢受到的电磁力，若单纯降低电枢电流则会导致电枢出口速度降低，因此不能简单降低电枢电流[8]。

由洛伦兹力公式可知：电枢受到的电磁力还与电枢区域的磁感应强度有关，可以通过提高电枢区域的磁感应强度，弥补电枢电流降低对电枢电磁力的影响，实现电枢出口速度不降低的前提下降低焦耳热功率，从而抑制电枢熔化。

## 2 炮口分流降低接触电阻焦耳热方案

在电枢出口速度一定的前提下，降低通过电枢电流需要提升电枢附近区域的磁感应强度，考虑采用炮口分流方法实现这一目标。

图 2(a)为普通轨道炮示意图，图 2(b)为炮口分流轨道炮示意图，炮口分流降低焦耳热方案中较传统轨道炮增加了炮口分流装置，电枢发射时，通过轨道电流  $I_{rail1}$  中的一部分分流到炮口分流装置，形成电流  $I_{shunt}$ ， $I_{shunt}$  会在电枢附近激发出磁场， $I_{rail1}$

产生的磁场和  $I_{shunt}$  产生的磁场在电枢区域叠加，起到增加电枢附近区域磁感应强度的作用。

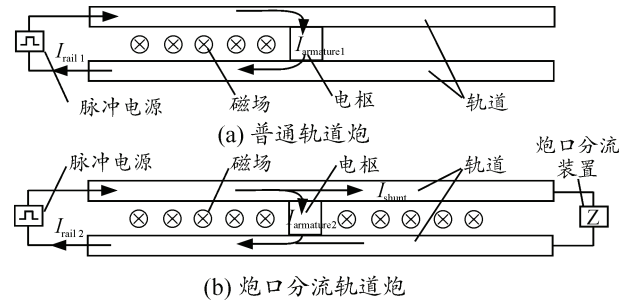


图 2 普通轨道炮与炮口分流轨道炮示意图

轨道炮炮口安装分流装置最初被应用于抑制电枢出膛时的炮口电弧[9-10]，若只为了炮口消弧，电枢发射时炮口分流比例不会很大[11-12]，笔者研究电枢熔化的抑制方法，为了降低接触电阻焦耳热产生量，在分流比例上要适当提升。设计了电阻器炮口分流、电感器炮口分流和电容器炮口分流 3 种降低接触电阻焦耳热抑制电枢熔化的方案。

## 3 3 种电枢熔化抑制方案效果仿真分析

### 3.1 电阻器炮口分流方案

首先建立相同出口速度条件下，电阻器炮口分流方案的接触电阻焦耳热计算模型，然后对接触电阻焦耳热产生量进行计算。

普通轨道炮电枢受到的电磁力和电阻器炮口分流方案下电枢受到的电磁力，可分别由式(1)[11]和式(2)[13]计算：

$$F_T = \frac{1}{2} I_{rail1}^2 l'; \quad (1)$$

$$F_M = \frac{1}{2} (1 - \alpha^2) I_{rail2}^2 l'. \quad (2)$$

式中： $F_T$  和  $F_M$  分别为普通轨道炮电枢受到的电磁力和电阻器炮口分流方案下电枢受到的电磁力； $I_{rail1}$  和  $I_{rail2}$  分别为普通轨道炮和电阻器炮口分流轨道炮中通过电枢的电流； $\alpha$  为分流系数，即图 2 中  $I_{shunt}$  与  $I_{rail2}$  的比值， $I_{shunt}$  为通过炮口分流电阻的电流，忽略接触电阻的变化和炮口分流电阻的寄生电感，可以认为  $\alpha$  与接触电阻和分流电阻成反比； $l'$  为轨道电感梯度。抑制电枢熔化要以尽量不降低电枢出口速度为前提，令电阻器炮口分流方案下，电枢受到的电磁力与普通轨道炮电枢受到的电磁力相等，可由式(1)和(2)得到  $I_{rail1}$  与  $I_{rail2}$  关系为：

$$\frac{I_{rail2}}{I_{rail1}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}}. \quad (3)$$

采用电阻器炮口分流方案前后接触电阻焦耳热功率，可分别用式(4)和式(5)计算：

$$P_1 = I_{armature1}^2 R_c = I_{rail1}^2 R_c \quad (4)$$

$$P_2 = I_{armature2}^2 R_c = I_{rail2}^2 (1-\alpha)^2 R_c \quad (5)$$

式中： $I_{armature1}$  和  $I_{armature2}$  分别为采用电阻器炮口分流方案前后通过电枢的电流，将式(3)、式(4)和式(5)联立，可得抑制前后接触电阻焦耳热功率的比为：

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(1-\alpha)^2}{1-\alpha^2} \quad (6)$$

根据式(3)和式(6)给出了相同电磁力前提下，电阻器炮口分流方案接触电阻焦耳热产生量、输入电流随分流系数的变化曲线，如图 3 所示。

从图 3 可以看出：接触电阻焦耳热功率随分流比例的增大而显著降低，但是为了不降低电枢电磁力，需要增大输入电流，分流比例较小时，输入电流增加得并不是很大。分流比例为 0.3 时，接触电

阻焦耳热产生量比抑制前下降了 46%，将有效抑制电枢熔化，输入电流只需比抑制前增加 10%。

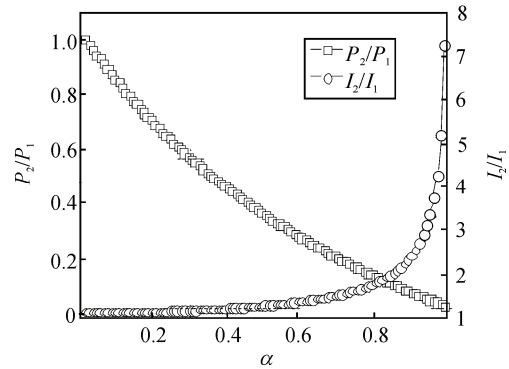
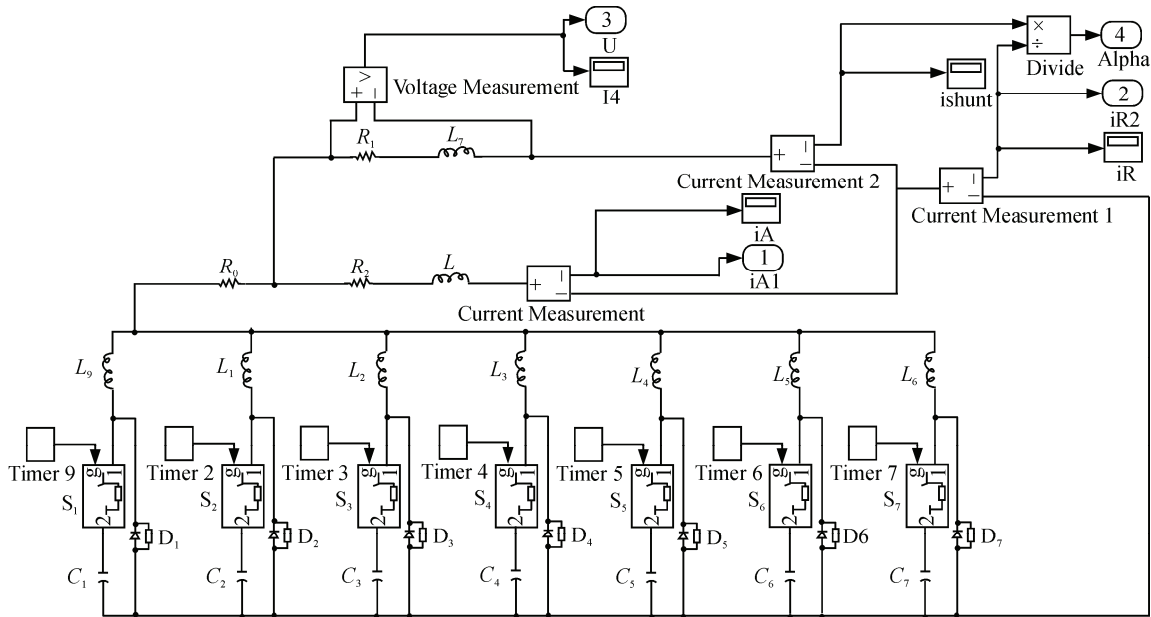
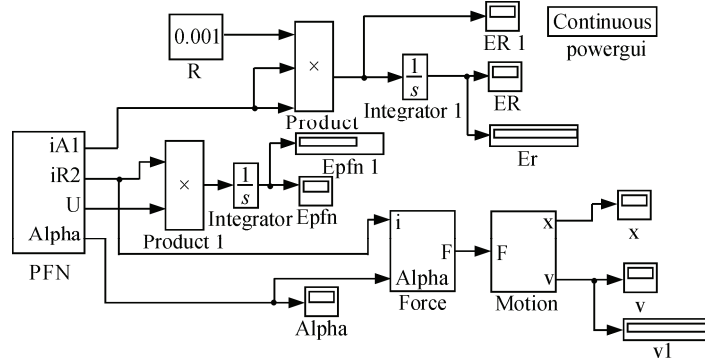


图 3 接触电阻焦耳热功率、需要的输入电流随炮口分流比例变化曲线

阻器炮口分流的分流比例可以近似为恒定，易于设计，但是分流比例不能太大。分流比例较大时，需要额外增加非常大的电流输入，以弥补分流对电磁力的影响。



(a) 脉冲电源仿真模型



(b) 电枢动力学模型

图 4 电感器炮口分流方案接触电阻焦耳热 Simulink 仿真模型

### 3.2 电感器炮口分流方案

采用电阻器炮口分流时，分流电阻器支路寄生电感一般较小，分流电阻对分流比例起到了决定性作用，可以忽略寄生电感对分流比例的影响。若采用电感器炮口分流，分流电感器支路的寄生电阻可能较大，其对分流比例的影响不可忽略，此时分流比例不再恒定，很难用数学模型来对比抑制前后各时刻接触电阻焦耳热功率；因此，这里采用 Simulink 数值模拟的方法，研究给定参数下电感器炮口分流方案抑制电枢熔化的效果。

建立的系统电路仿真模型如图 4(a)所示，轨道炮的驱动电源为 7 模块的脉冲成形网络，各模块时序放电以获得近似平顶波形，当电枢运动 2.5 m 时仿真结束，电枢质量 20 g。电枢动力学模型如图 4(b)所示，动力学模型中未考虑电枢摩擦力对电枢运动的影响，电枢受到的电磁力分别采用式(1)和式(2)计算。电路相关参数如下：

电容容量： $8 \times 7$  mF；

充电电压：5 000 V；

放电时序： $t_1=0.1$  ms,  $t_2=0.1$  ms,  $t_3=0.1$  ms,  $t_4=0.9$  ms,  $t_5=1.45$  ms,  $t_6=1.95$  ms,  $t_7=2.33$  ms；

脉冲成形电感：20  $\mu$ H；

线路电阻：2 m $\Omega$ 。

炮口分流电感较小时，电感对分流系数的影响较弱，炮口电感器分流效果将类似于电阻器炮口分流，轨道炮轨道的电感梯度一般为 0.5  $\mu$ H 左右，电枢在膛内运动时电枢支路的等效电感为微亨量级，这里研究分流支路电感相对于电枢支路电感较大的情况，将炮口分流电感取为 5  $\mu$ H。电枢支路电感相对于分流支路电感以及脉冲成形电感要小得多，仿真时忽略其变化，假设其电感值保持 0.5  $\mu$ H 不变。接触电阻设为 1 m $\Omega$ ，分流电感寄生电阻设为 2 m $\Omega$ 。图 5 给出了脉冲电源参数相同条件下，抑制前轨道(电枢)电流  $I_{rail1}(I_{armature1})$ 、抑制后各支路电流曲线  $I_{rail2}$ 、 $I_{armature2}$ 、 $I_{shunt}$ 。

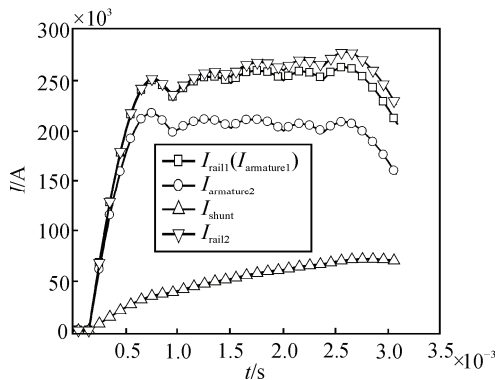


图 5 抑制前轨道电流、抑制后各支路电流曲线

从图 5 可以看出：电感器炮口分流方案炮口分流电感器的电流  $I_{shunt}$  随时间逐渐上升，计算得到分流比例  $I_{shunt}/I_{rail2}$  也随着时间逐渐上升(限于篇幅，这里未给出曲线图)，相对于电阻器炮口分流其分流能力要略微下降。采用电感器炮口分流后，脉冲电源的输出电流上升(图 5 中  $I_{rail2} > I_{rail1}(I_{armature1})$ )。图 6 给出了抑制前后各时刻接触电阻焦耳热功率  $P_1$ 、 $P_2$  和各时刻电枢速度  $v_1$ 、 $v_2$ 。

从图 6 可看出：电感器炮口分流方案显著降低了接触电阻焦耳热功率(图 6 中  $P_2 < P_1$ )，计算得到抑制前接触电阻焦耳热产生量为 164.57 kJ，抑制后接触电阻焦耳热产生量为 109.91 kJ，电感器炮口分流方案接触电阻焦耳热产生量下降了 33.21%，也说明了电感器炮口分流降低接触电阻焦耳热功率的效果。仿真得到未采用电感器炮口分流时电枢出口速度为 1 892.57 m/s，采用电感器炮口分流时电枢出口速度 1 923.21 m/s，在上述模型参数设置条件下，炮口分流不仅降低了接触电阻焦耳热功率，还略微提升了电枢出口速度，这主要是因为分流电感的加入降低了负载阻抗，脉冲电源输出的总能量提升。

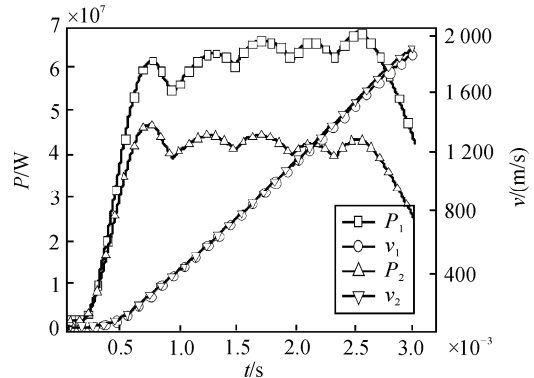


图 6 抑制前后接触电阻焦耳热功率曲线和电枢速度曲线

分流电感值的选取有一定难度，电感值过小时，电感分流退化为电阻分流，存在系统效率不高的问题；电感值较大时，则寄生电阻较大，分流比例较小，降低接触电阻焦耳热效果有限。

### 3.3 电容器炮口分流方案

同样采用数值模拟的方法，研究电容器炮口分流方案抑制电枢熔化的效果。脉冲电源参数设置与电感器炮口分流时相同，仍为 7 个脉冲成形单元时序放电，电枢运动 2.5 m 时结束仿真，炮口分流电容器容量为 10 mF，仿真计算模型与电感器炮口分流情况基本相同，这里不再给出。图 7 给出了抑制前轨道电流  $I_{rail1}(I_{armature1})$ 、抑制后各支路电流曲线  $I_{rail2}$ 、 $I_{armature2}$ 、 $I_{shunt}$ 。

从图 7 可以看出：电容器炮口分流方案炮口分

流电容器的电流  $I_{shunt}$  一直为振荡状态，导致电枢电流  $I_{armature2}$  也存在振荡；但是电枢电流  $I_{armature2}$  未被明显降低，脉冲电源输出总电流  $I_{rail2}$  也未有明显变化，几乎与无分流时的输出电流曲线  $I_{rail1}(I_{armature1})$  重合。图 8 给出了抑制前后各时刻接触电阻焦耳热功率  $P_1$ 、 $P_2$  和各时刻电枢速度  $v_1$ 、 $v_2$ 。

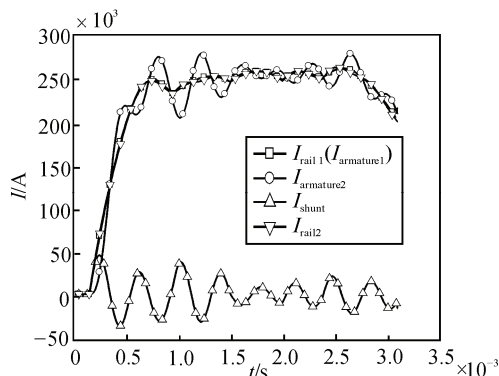


图 7 电枢电流曲线、轨道电流曲线、分流电容器电流随时间变化曲线

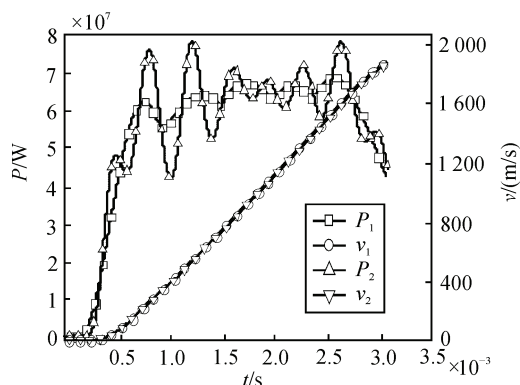


图 8 抑制前后接触电阻焦耳热功率曲线和电枢速度曲线

从图 8 可以看出：接触电阻焦耳热功率  $P_2$  也存在振荡，振荡中心基本为未采用电容器炮口分流时的接触电阻焦耳热功率曲线  $P_1$ ，未明显降低。抑制后接触电阻焦耳热产生量为 166.60 kJ，反而略多于抑制前，电枢出膛速度为 1 880.14 m/s，略低于抑制前。因为电容器炮口分流后电枢电流曲线和接触电阻焦耳热功率曲线振荡加剧，并不是抑制后所有时刻接触电阻焦耳热产生量和电枢速度都低于抑制前。总体趋势上，电容器炮口分流未起到降低接触电阻焦耳热功率抑制电枢熔化的作用。

#### 4 结束语

笔者对轨道炮电枢熔化形成机理进行了分析，从提高电枢区域的磁感应强度，降低通过电枢电流的思路出发，提出了基于炮口分流的电枢熔化抑制方法，给出了电阻器、电感器和电容器 3 种炮口分流方案，对 3 种方案降低接触电阻焦耳热功率及抑

制电枢熔化的效果进行了计算和分析<sup>[14]</sup>。结果表明：电阻器和电感器炮口分流能够降低接触电阻焦耳热功率，从而抑制电枢熔化，但是需要的驱动电流增大。电容器炮口分流不能降低接触电阻焦耳热功率，起不到抑制电枢熔化的作用。

笔者仅从降低接触电阻焦耳功率的角度，研究了炮口分流对电枢熔化的抑制作用，仿真中未考虑摩擦力对出口速度的影响以及发射过程中接触电阻变化对分流比例的影响，这方面还需要继续研究。此外，炮口分流实际应用中还要考虑分流器的体积、散热等问题。

#### 参考文献：

- [1] Marshall R A, Wang Ying. Railguns: Their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 99-100.
- [2] Liebfried O, Schneider M, Balevius S. Current distribution and contact mechanisms in static railgun experiments with brush armatures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1426-1430.
- [3] 马萍, 胡玉伟, 杨明, 等. 基于改进遗传算法的电磁轨道炮电源时序优化[J]. 弹道学报, 2014, 36(3): 104-110.
- [4] Shvetsov G A, Stankevich S V. Ultimate kinematic characteristics of rail electromagnetic launchers with an external magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(3): 849-852.
- [5] 秦实宏, 刘克富, 潘垣, 等. 减轻轨道炮膛烧蚀的研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(2): 74-78.
- [6] 岳明凯, 刘欣宁. 炮口制退器现状及其发展趋势[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 1-6.
- [7] Motes D, Keena J, Womack K, et al. Thermal analysis of high-energy railgun tests[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(1): 124-131.
- [8] 龚晨, 于歆杰, 初祥祥, 等. 电容储能型轨道炮能量回收方案及仿真验证[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1134-1143.
- [9] 汤平安, 徐强, 王军, 等. 某火箭炮定向器模态测试方案[J]. 兵工自动化, 2015, 34(1): 21-24.
- [10] Parker J V, Levinson S J. Muzzle arc control using an inductive shunt[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 594-598.
- [11] Jamison K A, Littrell D M. Performance characteristics of a high velocity, 25mm railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 168-173.
- [12] Bernardes J S, LaCava G P, Schrader M J. Analysis of a railgun capacitor-muzzle-shunt energy recovery scheme[C]. IEEE Conference Record of Power Modular Symposium, 2002: 347-350.
- [13] Parker J V. Muzzle shunt augmentation of conventional railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 80-84.
- [14] 武昊然, 王志恒, 李小将. 一种新的电磁轨道炮电感梯度计算方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(9): 38-41.