

1-2-2019

## Formation Mechanism and Simulation Analysis of Railgun Armature Electromagnetic Transition

Zhiheng Wang

*1.University of Space Engineering Graduate School, Beijing 101416, China; ;2.Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China;*

Wan Mei

*1.University of Space Engineering Graduate School, Beijing 101416, China; ;*

Xiaojiang Li

*1.University of Space Engineering Graduate School, Beijing 101416, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Formation Mechanism and Simulation Analysis of Railgun Armature Electromagnetic Transition

### Abstract

**Abstract:** Armature transition of railgun causes rails erosion and change of launching parameters, which is one of the key problems restricting the performance of railgun. The formation mechanism of armature transition at the down-slope of driving current is analyzed. *The armature transition estimation model and electromagnetic parameters calculation model are given. The formation process of armature transition at the down-slope of driving current is simulated by AYSYS Workbench. The current and magnetic field distribution are simulated, so as the armature deformation caused by the armature electromagnetic force. The effect of current dropping rate on armature transition is analyzed.* The simulation and analysis result show that, the eddy current at current down-slope may lead to change the direction of electromagnetic force in armature tail, even the deformation of armature tail, which leads to the armature transition. The reverse electromagnetic force in armature tail increases with the increasing of the driving current dropping rate. As a result, the armature transition occurs more easily.

### Keywords

railgun, armature transition, current down-slope, arc contact, sliding electric contact

### Recommended Citation

Wang Zhiheng, Wan Mei, Li Xiaojiang. Formation Mechanism and Simulation Analysis of Railgun Armature Electromagnetic Transition[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1090-1095.

## 轨道炮电枢电动力转换形成机理与仿真分析

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

(1.航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2.中国人民解放军 91550 部队, 大连 116023)

**摘要:** 轨道炮电枢转换引起轨道烧蚀和发射参数变化, 是制约轨道炮性能提升的关键问题之一。分析了电流下降段轨道炮电枢电动力转换形成机理, 给出了电枢转换判断模型和电磁场参数计算模型, 采用有限元软件 ANSYS Workbench 对电枢转换形成过程进行了仿真分析, 仿真了该过程中的电流、电磁力分布以及电磁力引起的电枢形变情况, 分析了电流下降率对电枢转换的影响。仿真分析结果表明: 电流下降段电枢内部会感应出涡流, 涡流可能引起电枢尾部区域电磁力改变方向, 甚至电枢尾部形变, 进而导致电枢转换发生; 电流下降率越大则电枢受到的反向电磁力越大, 电枢转换越容易发生。

**关键词:** 电磁轨道炮; 电枢转换; 电流下降; 电弧接触; 滑动电接触

中图分类号: TM89

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1090-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803040

### Formation Mechanism and Simulation Analysis of Railgun Armature Electromagnetic Transition

Wang Zhiheng<sup>1,2</sup>, Wan Mei<sup>1</sup>, Li Xiaojiang<sup>1</sup>

(1. University of Space Engineering Graduate School, Beijing 101416, China; 2. Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Armature transition of railgun causes rails erosion and change of launching parameters, which is one of the key problems restricting the performance of railgun. The formation mechanism of armature transition at the down-slope of driving current is analyzed. The armature transition estimation model and electromagnetic parameters calculation model are given. The formation process of armature transition at the down-slope of driving current is simulated by ANSYS Workbench. The current and magnetic field distribution are simulated, so as the armature deformation caused by the armature electromagnetic force. The effect of current dropping rate on armature transition is analyzed. The simulation and analysis result show that, the eddy current at current down-slope may lead to change the direction of electromagnetic force in armature tail, even the deformation of armature tail, which leads to the armature transition. The reverse electromagnetic force in armature tail increases with the increasing of the driving current dropping rate. As a result, the armature transition occurs more easily.

**Keywords:** railgun; armature transition; current down-slope; arc contact; sliding electric contact

## 引言

电枢转换是指电枢与轨道间由固体-固体的

低压降(小于 50 V)滑动电接触状态到等离子体电弧接触的高压降( $10^2$  V 量级)接触状态的突然转变<sup>[1]</sup>。电枢转换时, 接触面消耗的电功率显著上升, 系统效率降低, 并对轨道接触面产生烧蚀, 严重影响轨道炮发射精度和轨道使用寿命, 因此电枢转换是轨道炮发射时需尽力避免的现象。目前研究认为, 电枢转换是由于电枢与轨道间失接触或接触压力



收稿日期: 2016-03-10 修回日期: 2016-05-03;  
作者简介: 王志恒(1988-), 男, 满族, 吉林四平, 博士生, 研究方向为电磁轨道发射理论与技术; 万敏(1988-), 男, 江苏常州, 硕士生, 研究方向为电磁轨道发射理论与技术; 李小将(1973-), 男, 江西南昌, 博士, 教授, 研究方向为武器系统运用于分析。

<http://www.china-simulation.com>

• 1090 •

不足引起的<sup>[2]</sup>。多种因素可能导致电枢与轨道接触压力下降, 进而引起电枢转捩。电枢接触面在发射过程中的滑动磨损导致电枢过盈压力下降, 当电枢过盈压力和电磁压紧力的合力下降到 10 N/kA 直线以下时, 容易发生电枢转捩<sup>[3-4]</sup>。文献[5]认为电枢和轨道接触面材料热应力可能导致电枢形变进而引起电枢转捩; 文献[6-7]研究了熔化波 (Melt-Wave, MW) 烧蚀引起的电枢转捩的过程, 熔化波模型认为, 发射中的电枢在速度趋肤效应影响下, 电流过度集中于电枢尾部, 产生的焦耳热会使电枢接触区域熔化并不断向前发展, 当电枢接触面材料因熔化损失超过某个阈值时, 电枢转捩发生。

对电枢发射实验中转捩现象的出现时刻的统计表明, 电枢转捩多发生在电流下降段<sup>[8]</sup>。针对电流下降段的电枢转捩, 有文献提出了“电动力转捩 (Electrodynamic Transition)”理论<sup>[9]</sup>, 认为驱动电流下降段负的电流变化率引起电枢尾部受力转向炮膛中央, 可能导致电枢和轨道接触力不足, 进而引起电枢转捩的发生。Satapathy 采用 IAT 开发的三维有限元编码 EMAP3D 对电动力转捩过程进行了仿真<sup>[1]</sup>, 但是仍未见到有采用其他方法进行电动力转捩仿真分析的报道。本文分析了电流下降段电枢电动力转捩形成机理, 给出了电枢转捩判断模型与电磁场计算模型, 采用有限元软件 ANSYS-Workbench 对电流下降段电枢转捩形成过程进行了数值模拟, 分析了电流下降率对电枢转捩的影响, 为抑制电枢转捩、提高轨道炮性能提供了参考。

## 1 电流下降段电枢电动力转捩形成机理

轨道炮发射电枢过程中, 驱动电流一般经过上升-平顶-下降的过程, 轨道内的电流在电枢位置附近产生磁场, 载流电枢在安培力的作用下加速前进, 实现物体的发射。电流下降段, 炮膛内磁感应强度下降, 磁通量减小, 轨道和电枢内的磁通量开始向炮膛扩散, 电枢内的磁感应强度下降。由楞次定律可知, 电枢区域磁通量变化会在电枢内部会感应出

涡流, 涡流产生的磁场方向总是阻碍磁通量的变化, 涡流的强度与磁通量变化率成正比, 即与驱动电流的下降速率成正比, 如果驱动电流下降的足够迅速, 电枢两臂内可能产生强度非常大的涡流, 电枢两臂涡流使电枢内侧表层表现出与驱动电流方向相反的电流, 如图 1 所示。

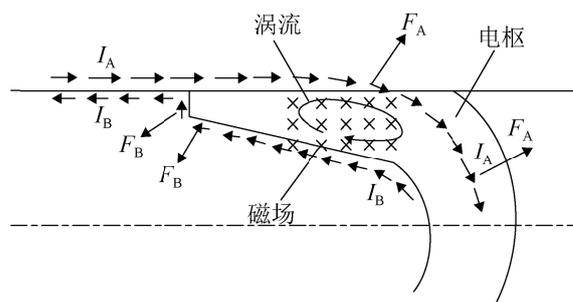


图 1 电流下降段电枢内部和表面的电流分布  
Fig. 1 The current distribution of inner and surface of armature at the down-slope of driving current

图 1 中,  $I_A$  为驱动电流,  $I_R$  为感应涡流,  $I_B$  为涡流在电枢和轨道形成的反向电流。

由安培左手定则可知, 电枢内侧表面的电流  $I_B$  产生的安培力方向指向炮膛内方向, 即图 1 中  $F_B$  所指方向。尽管电枢头部电磁力  $F_A$  仍然指向电枢运动方向, 但是电枢尾部内侧表面的电磁力却发生了反转, 不再将电枢尾部压向轨道表面, 其结果是电枢和轨道间的接触压力下降, 甚至可能使电枢尾部弯向炮膛内部。此外, 电枢尾部电磁力反转也会使接触层附近的液态导电金属更容易脱离接触区域。上述两种效应的结果很可能就是电枢与轨道间电弧放电, 进而电枢转捩发生。

## 2 电枢转捩判断模型与电磁场参数计算模型

电枢发射实验中, 可以通过测量炮口电压是否发生突变性升高来监测转捩是否发生, 但是在理论上目前仍没有较好的模型预测电枢转捩<sup>[10]</sup>。电枢发射时, 电枢与轨道处于高速滑动电接触状态, 若电枢与轨道因为磨损或熔化等因素发生接触分离, 一般可认为电枢与轨道转为电弧接触, 电枢转捩发

生；若电枢与轨道仍处于固体-固体接触状态，也可能发生微小电弧的转捩，对于处于固体-固体接触状态的转捩判断采用较多的是 Marshall 的“1g/A 经验法则”，即

$$\begin{cases} \text{良好接触} & F > \alpha I_A \\ \text{临界状态} & F = \alpha I_A \\ \text{电枢转捩} & F < \alpha I_A \end{cases} \quad (1)$$

式中： $F$  为电枢与轨道接触力； $\alpha$  为 Marshall 经验系数，为 10 N/kA； $I_A$  为驱动电流强度。 $F$  由过盈压力  $F_0$  和电枢两臂受到的电磁力  $F_M$  的  $y$  方向(垂直于轨道面方向)分量提供，可认为是两者的合力，即

$$F = F_0 + F_{My} \quad (2)$$

式中： $F_{My}$  为  $F_M$  的  $y$  方向分量。在电枢运动初始阶段，驱动电流较小，电枢与轨道接触力主要由过盈压力提供；电流平顶段和下降段，由于电枢磨损，电枢过盈量下降，过盈压力减小，电枢与轨道接触力主要由电枢电磁力  $y$  方向分量提供。

要获得电枢受到的电磁力需要得到电枢内部的电流和磁场分布，本文通过有限元软件解算电流下降段电枢和轨道内部的电流和磁场分布。求解轨道和电枢电磁场参数的理论基础是 Maxwell 方程组，涡流场的磁场强度方程可写为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \nabla \times \left( \frac{1}{\sigma + jw\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \right) + jw\mu\mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot (\mu\nabla\varphi) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{H}$  为磁场强度； $w$  为电流角频率； $\mu$  为磁导系数； $\sigma$  为电导率； $\varphi$  为标量电势。对场域微分方程进行数值求解获得磁场强度和电势后，可由 Maxwell 方程组获得电磁场各参数。

获得电枢区域的电流和磁场后，可根据式(2)求得电枢与轨道接触压力，进而通过式(1)判断电枢的转捩情况。

### 3 电枢转捩形成过程数值模拟

#### 3.1 数值模拟方法

在多物理场仿真环境 ANSYS Workbench 下对

电枢转捩的形成过程进行数值模拟，其中，采用 Maxwell 3D 模块仿真电枢与轨道的电磁场分布和电磁力，采用 Transient Structural 模块仿真电枢形变情况。

电枢与轨道接触状态主要受到电磁力  $y$  方向分量的影响，因此我们主要关注电磁力  $y$  方向分量对电枢的作用效果，因为 Maxwell 3D 模块与 Transient Structural 模块联合仿真时无法实现单独导入电磁力某一方向分量，若将 Maxwell 3D 模块计算得到的电磁力直接导入 Transient Structural 模块，电枢在  $x$  方向(电枢运动方向)存在较大的位移，经常导致计算失败；若限制电枢在  $x$  方向的运动，同样会因为电磁力在  $x$  方向和  $y$  方向的耦合而导致较大的形变误差。因此，本文在仿真电枢电磁力对电枢接触状态的影响时并未将 Maxwell 3D 计算得到的电磁力直接导入 Transient Structural 模块，而是在 Maxwell 3D 下获得电枢两臂电磁力  $y$  方向分量，再将该分量加载到电枢接触面，进而仿真电枢的形变。数值模拟的主要步骤为：

Step1: 建立轨道和电枢实体模型；

Step2: 将实体模型导入 Maxwell 3D 模块、设置材料、设置求解器类型、加载驱动电流、划分网格、求解和查看结果；

Step3: 将实体模型导入 Transient Structural 模块，设置材料、设置接触类型、划分网格、施加轨道固定约束、加载电枢两臂  $y$  方向电磁力、设置结果选项、求解和查看结果。

#### 3.2 模型参数

考虑数值模拟的精度及计算机计算能力，建立了如图 2 所示的轨道炮电枢及轨道实体模型。电枢实体模型长、宽、高分别为 3.04 cm, 2.8 cm, 3 cm，轨道实体模型长、宽、高分别为 26.5 cm, 0.8 cm, 4 cm，电枢为铝合金材料，轨道为铜合金材料。为了方便分析电枢各部分的电磁力特性，建模时将电枢进行了分块，分别为图 2 中的“Head”、“Middle”和“Tail”。

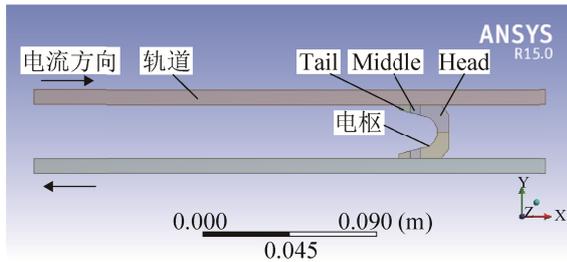


图2 轨道和电枢实体模型

Fig. 2 The entity model of rail and armature

划分有限元网格时,轨道单元最大长度限制为10 mm;与轨道相比,电枢的形状较不规则,且电枢区域的电流和磁场是我们关注的重点,为了提高数值模拟精度,在划分网格时,电枢区域进行了加密处理,单元最大长度限制为1.5 mm。电磁边界为由y方向和z方向由有限元网格向外扩展40%、x正方向延展20%形成,边界条件为自然边界,即解区域边界磁感应强度为0,采用Maxwell 3D的默认设置。

研究电流下降段轨道和电枢内的电磁场行为,因此在轨道上加载了电流下降段的驱动电流,0时刻电流为1 MA,1 ms时电流下降到0,电流下降率为1 MA/ms。

### 3.3 数值模拟结果与分析

在上述模型、参数设置条件下,采用Maxwell 3D对驱动电流下降段电枢和轨道内部的电磁场进行了数值模拟,并采用Transient Structural模块模拟电枢的形变情况。数值模拟结果如图3~5所示。

图3为0.8 ms时刻轨道和电枢内电流线分布,图4为该时刻电枢表面的电流矢量图。

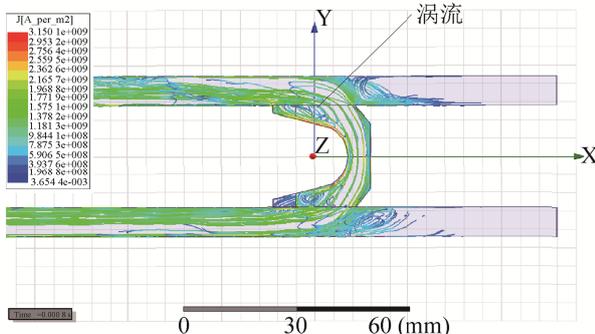


图3 0.8 ms时轨道和电枢内的电流线

Fig. 3 The current line of rail and armature at 0.8 ms

从图4可以看出,0.8 ms时电流线在电枢两臂内部形成了涡流。电枢涡流并不是在驱动电流开始下降就出现,在上面的模型和参数设置条件下,0.6 ms时电枢内部出现较明显的涡流,这与文献[1]中驱动电流下降到峰值电流80%时刻电枢内表面出现反向电流有一定的差异,这可能是由仿真中采用的电枢构型和尺寸的差异引起的。图4中,电枢内表面电流方向与驱动电流方向相反,其原因就是图3中的涡流,与前文机理分析的结果一致。

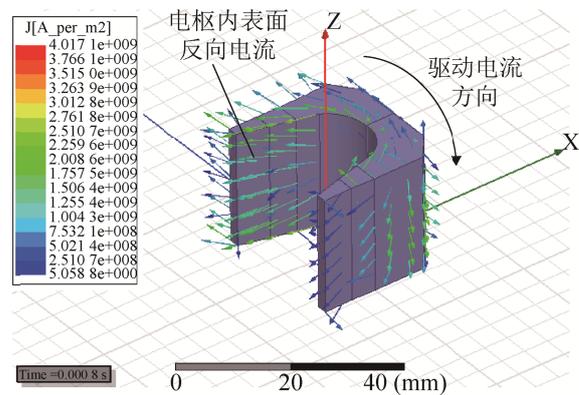


图4 0.8 ms时电枢表面的电流矢量分布图

Fig. 4 The vector distribution diagram of the current on the armature surface at 0.8ms

图5给出0.9 ms时刻电枢表面的电磁力分布情况。

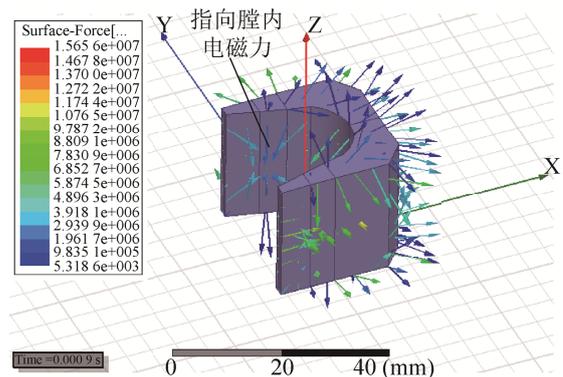


图5 电枢表面电磁力矢量分布图

Fig. 5 The vector distribution diagram of the electromagnetic force on the armature surface

从图5可以看出0.9 ms电枢内侧表面存在指向膛内的电磁力,这是图4中电枢内表面电流方向与驱动电流方向相反带来的结果。这部分电磁力

可能引起电枢两臂接触力下降,甚至引起电枢与轨道接触状态的改变。

在 Maxwell 3D 模块下获得的电枢各部分 (“Head”、“Middle”、“Tail”)电磁力 y 方向分量随时间变化曲线,限于篇幅这里不再给出,其特征是电枢两臂各部分在电流下降段受到的电磁力均不断减小,并最终出现反转,其中电枢尾部区域在 0.6 ms 的时刻电磁力 y 方向分量改变方向,将电枢尾部压向炮膛中央。图 6 给出了电枢三分部电磁力 y 分量的合力和 Marshall 提出的 10 N/kA 直线。

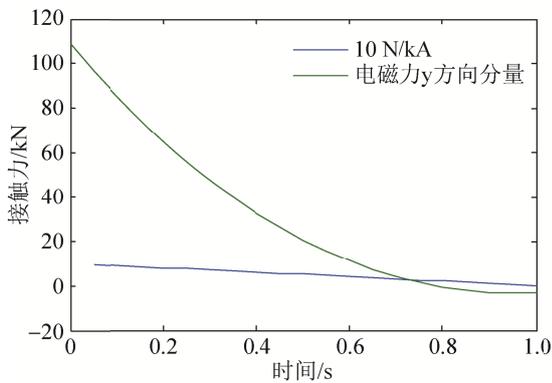


图 6 电枢电磁力 y 方向分量与 10 N/kA 直线  
Fig. 6 The y direction component of armature electromagnetic force and the 10N/kA line

从图 6 可以看出电磁力 y 方向分量在 0.7 ms 附近下降到 Marshall 提出的 10 N/kA 以下,电流下降段电枢的接触力主要由电磁力 y 方向分量提供,说明该时刻可能发生电枢转换。

将电枢各部分受到的电磁力 y 方向分量分别加载到电枢两臂与轨道的接触面,仿真电枢两臂的形变情况。图 7 给出了电枢 0.89 ms 时电枢的形变情况。

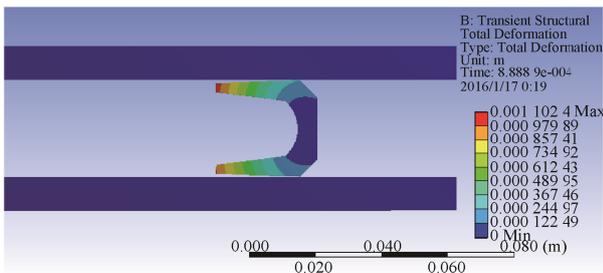


图 7 0.89 ms 电枢形变情况  
Fig. 7 The armature deformation at 0.89 ms

从图 7 可以看出,在上述的模型和参数设置条件下,该时刻的电磁力 y 方向分量已经使电枢尾部向膛内形变,造成接触分离,可以认为该时刻电枢转换发生。

#### 4 电流下降率对电枢转换的影响

驱动电流的减小导致了电枢内部磁场的减小,进而引起了涡流和反向电磁力,因此研究电流下降率对电枢转换的影响。图 8~9 分别给出了 4 种驱动电流下降率情况下电枢电磁力 y 方向分量曲线(一半电枢)和电枢“tail”部分电磁力 x 方向分量曲线。

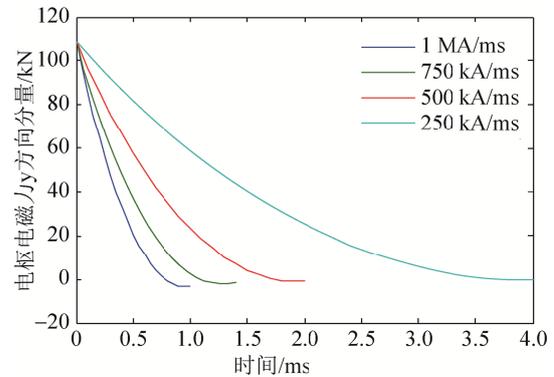


图 8 不同电流下降率电枢电磁力 y 方向分量  
Fig. 8 The y direction component of the armature electromagnetic force at different driving current dropping rate

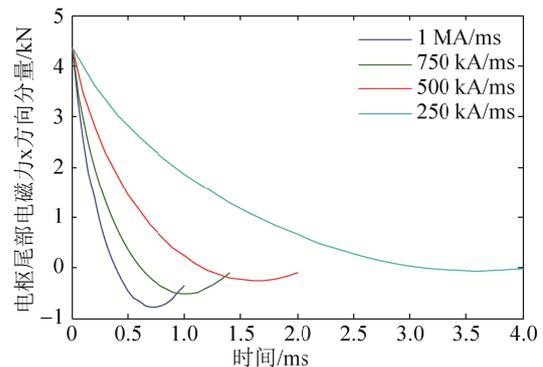


图 9 不同电流下降率电枢“tail”部分电磁力 x 方向分量  
Fig. 9 The x direction component of tail electromagnetic force at different driving current dropping rate

图 8 中,电流下降段电枢电磁力 y 方向分量随着电流下降而下降,电流下降率越大电枢两臂电磁力 y 方向分量下降的越快。电流下降率为 1 MA/ms、750 kA/ms 和 500 kA/ms 时,电枢两臂电磁力 y 方

向分量下降到 0 N 以下, 即力的方向发生反转, 此时, 该电磁力不是将电枢两臂压向轨道, 而是将电枢两臂压向膛内, 同时, 电流下降率越大电枢两臂电磁力 y 方向分量出现的反向极值越大, 电枢形变量越大, 越容易发生转换。图 9 中, 电枢“tail”部分电磁力 x 方向分量在驱动电流末段均出现方向改变, 由与电枢运动方向相同变为与电枢运动方向相反, 该部分电磁力将使电枢与轨道接触区域的液态金属层更易脱离电枢, 导致接触状态恶化加剧。

## 5 结论

分析了电流下降段电枢转换的形成机理, 采用 ANSYS-Workbench 实现了对电流下降段轨道炮电枢电动力转换形成过程的仿真, 分析了电流、电磁力分布和电枢形变情况, 得出了以下结论:

1) 电流下降段电枢两臂内部磁扩散效应在电枢两臂内部感应出涡流, 涡流使电枢尾部区域电磁力发生反转, 并使接触力下降到 10 N/kA 直线以下, 甚至引起电枢尾部形变, 导致电枢转换。

2) 电流下降率是电枢两臂内部是否产生涡流的决定因素, 电流下降率越大电枢两臂受到垂直于接触面的反向电磁力越大, 越容易引起电枢转换。因此, 若仅考虑避免电枢转换, 应减小电枢运动末段电流下降率, 或使电枢在电流下降初始阶段出膛。

仿真分析过程中, 忽略了电枢运动对电流分布的影响, 下一步研究拟引入电枢运动, 从而更精确地仿真电流下降段轨道和电枢内的电磁场行为。

## 参考文献:

- [1] Sikhanda Satapathy, Harold Vanicek. Down-Slop contact transition in railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2007, 43(1): 402-407.
- [2] 冯登, 夏胜国, 陈立学, 等. 基于过盈配合的 C 形电枢轨道初始特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1077-1083.  
Feng Deng, Xia Shengguo, Chen Lixue, et al. Characteristics analysis of the initial contact between C-Shaped armature and rail based on interference fit [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1077-1083.
- [3] 关晓存, 鲁军勇. 脉冲电流作用下枢轨接触面瞬态磨损量计算[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 225-230.  
Guan Xiaocun, Lu Junyong. Transient wear capacity calculation of armature-rail interface in pulse current [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 225-230.
- [4] 朱仁贵, 张倩, 李治源, 等. 高功率脉冲电流作用下滑动界面初始熔蚀的试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1879-1884.  
Zhu Rengui, Zhang Qian, Li Zhiyuan, et al. Experiment research on initial melt erosion at the sliding surface under high power pulse current [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1879-1884.
- [5] Li M T, Yan P, Yuan W Q, et al. Electrodynamic force analysis of armature-rail tight contact in electromagnetic launcher[C]//Pulsed Power Conference, 2009. PPC '09. IEEE. IEEE, 2009: 1285-1289.
- [6] 巩飞, 翁春生. 电磁轨道炮固体电枢熔化波烧蚀过程的三维数值模拟研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2245-2250.  
Gong Fei, Weng Chunsheng. 3-D numerical study of Melt wave erosion in solid armature railgun [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2245-2250.
- [7] Gong Fei, Weng Chunsheng. The effects of rail coatings on melt-wave erosion in block armatures [J]. International Journal of Applied Electromagnetics (S1383-5416), 2012, 40(4): 323-331.
- [8] 陈允, 徐伟东, 袁伟群, 等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 937-942.  
Chen Yun, Xu Weidong, Yuan Weiqun, et al. Sliding electrical contact between aluminum armature and different material rails in railgun [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942.
- [9] Stefani F, Levinson S, Satapathy S, et al. Electrodynamic Transition in solid armature railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2001, 31(1): 101-105.
- [10] 何勇, 宋盛义, 关永超, 等. 电磁轨道炮高速滑动接触电阻的定量表征[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 81-84.  
He Yong, Song Shengyi, Guan Yongchao, et al. Quantative expression of sliding contact resistance between armature and rail in railgun [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 81-84.
- [11] 杨玉东, 薛文. 电磁发射装置电-磁-热场分布的分析与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(6): 145-147.  
Yang Yudong, Xue Wen. Analysis and simulation of electric field and thermal field distribution for electromagnetic Launch [J]. Fire Control and Command Control, 2015, 40(6): 145-147.