

# 轨道炮枢轨初始接触特性研究

冯建源<sup>1</sup>, 安韵竹<sup>1</sup>, 赵文龙<sup>2</sup>, 胡元潮<sup>1</sup>, 李文琦<sup>1</sup>, 井 栋<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 空军研究院, 北京 100000)

**摘要:**为优化电枢结构参数设计,利用有限元分析软件 ANSYS 进行电枢与轨道二维模型过盈装配仿真计算,并采用  $L_{16}(4^5)$  的正交试验法,以电枢与轨道间的总接触压力为考察指标,通过分析得到电枢结构参数对枢轨接触压力的影响规律。针对不同幅值的脉冲电流,通过“1 g/1 A 法则”确定枢轨间所需要的接触压力,并选取结构参数最优的电枢为例,说明电枢与轨道间的接触特性。

**关键词:**轨道炮;枢轨界面;过盈装配;正交试验;接触特性

**本文引用格式:**冯建源,安韵竹,赵文龙,等. 轨道炮枢轨初始接触特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(10):54-58.

**Citation format:**FENG Jianyuan, AN Yunzhu, ZHAO Wenlong, et al. Research on Armature and Rail's Initial Contact Characteristics of Railguns[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(10):54-58.

中图分类号:TJ01;TJ03

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)10-0054-05

## Research on Armature and Rail's Initial Contact Characteristics of Railguns

FENG Jianyuan<sup>1</sup>, AN Yunzhu<sup>1</sup>, ZHAO Wenlong<sup>2</sup>, HU Yuanchao<sup>1</sup>,  
LI Wenqi<sup>1</sup>, JING Dong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
2. Air Force Academy of PLA, Beijing 100000, China)

**Abstract:** In order to analyze and optimize the structural parameter design of the armature, the finite element analysis software ANSYS was used to simulate the interference assembly of the armature and the orbital three-dimensional model, and the orthogonal test method of  $L_{16}(4^5)$  was adopted to take the total contact pressure between the pivots. The index was investigated and the influence law of the armature structure parameters on the contact pressure of the pivot rail was obtained through analysis. For the pulse currents of different amplitudes, the required contact pressure between the pivot rails was determined by “1 g/1 A rule”, and the armature with the best structural parameters was selected as an example to illustrate the contact characteristics between the armature and the track.

**Key words:** railgun; armature track interface; assembly; orthogonal test; contact characteristics

近年来,电磁发射技术受到越来越多的关注,尤其是用于发射固体电枢的电磁轨道炮,因其优异的性能而得到迅速

的发展<sup>[1-3]</sup>。然而,在发射过程中,电枢-轨道界面接触压力不足导致转换和轨道烧蚀现象时有发生,为确保电枢-轨

收稿日期:2019-03-11;修回日期:2019-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51807113);山东省自然科学基金项目(ZR2016EL17)

作者简介:冯建源(1993—),男,硕士研究生,主要从事电力系统防雷与接地技术、电磁发射及应用技术研究。

通讯作者:安韵竹(1988—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要从事电力系统过电压及防护、电力系统防雷接地技术等研究,E-mail: anyunzhu2006@163.com。

道界面的良好接触,接触面需要保持足够的压力大小和均匀的压力分布,而枢轨接触压力及分布同电枢的形状和结构参数相关<sup>[4-6]</sup>,因此研究枢轨界面的接触问题对于提高电磁发射效率、延长轨道使用寿命、电枢形状设计及结构参数优化等方面具有重大意义<sup>[7-9]</sup>。C形电枢是一种常用的固体电枢结构类型<sup>[10-11]</sup>,在发射初期,通过合理的设计固体电枢的过盈量,在与轨道装配后产生机械压力,使电枢与轨道之间保持足够的接触压力,并且可以增大枢轨间接触面积,此时机械压力占主导地位。在发射过程中,由于脉冲电流使C形电枢上产生向外的电磁力,使枢轨接触压力急速增大,电磁力占主导<sup>[12-14]</sup>。通过使用Marshall提出的“1 g/1 A法则”<sup>[15]</sup>,可以确定枢轨间因过盈配合产生的机械压力,这表明为避免电流起弧,枢轨接触面每通过1 kA的电流至少需要9.8 N的接触压力。实际上,为了更有效的消除在轨道发射时的起弧现象,来自过盈配合的接触力要大于法则的规定值。通过调整电枢的结构参数,可以增加接触压力,允许通过的电流也相应增加,但也会使电枢产生不当的形变,导致枢轨间实际接触面积缩减,电流密度相应增加,这将会增大转捩现象的发生率,因此对电枢结构参数的设计尤为重要<sup>[16]</sup>。

基于以上问题,本文使用ANSYS有限元分析软件,模拟电磁发射初期枢轨界面的初始接触状态,针对C形电枢的不同结构参数,运用正交试验法对枢轨过盈装配进行了二维仿真计算,分析了电枢各参数对枢轨界面接触特性的影响,结果可供实际电枢结构参数设计参考。

## 1 仿真模型搭建及验证

### 1.1 仿真模型搭建

为验证ANSYS仿真模型计算结果的有效性,现运用文

献[7]中的C形电枢结构进行初步的仿真计算,电枢结构及其参数大小如图1所示,

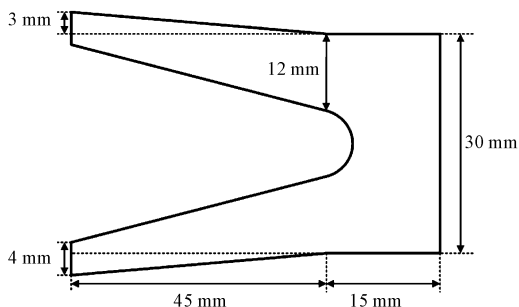
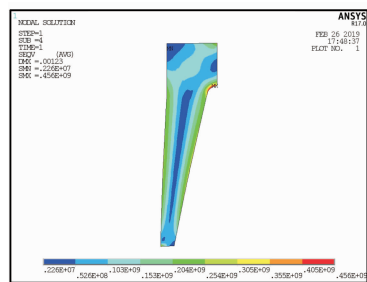


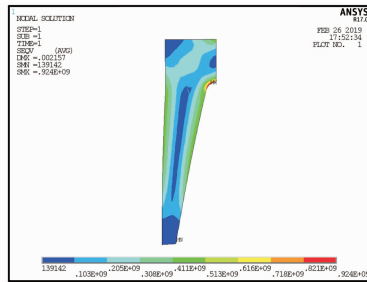
图1 电枢结构参数示意图

由于轨道和电枢具有对称性,为提高计算效率,采用1/2模型对其进行建模。电枢与轨道通常采用紧固式或填塞式进行装配,紧固式即将电枢先放入炮膛中,通过压缩两侧轨道将电枢固定于两轨道间;填塞式即先固定好轨道,将电枢推入至炮膛内。为与文献[7]中的计算结果进行对比,本文选择紧固式过盈装配,电枢材料为铝,轨道视为刚体。

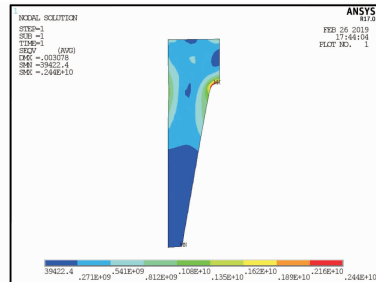
当轨道分别移动1.2 mm、2.1 mm和3 mm时电枢所受范式应力分布云图如图2所示,从整体上看,随着轨道向电枢不断压缩,电枢上所受的范式应力不断增大,材料更容易发生形变,且电枢与轨道接触面所受的接触压强增大;从局部上看,电枢与轨道的接触开始出现在翼尖部分,如图2(a)所示,枢轨间接触面积较小,此时翼尖部分材料受到较大的屈服力,当轨道移动2.1 mm时,接触面积随之增大,接触区域逐渐趋近于尾翼的中部,翼尖部分范式应力很小,此时翼尖所受接触压强较小,甚至会形成接触分离;当轨道移动至3 mm时,翼尖处范式应力很小的部分面积进一步扩大,表明电枢与轨道间出现接触分离的现象逐渐向电枢尾翼的中部转移。



(a) 轨道移动1.2 mm时



(b) 轨道移动2.1 mm时



(c) 轨道移动3 mm时

图2 轨道移动时电枢范式应力分布云图

### 1.2 仿真模型搭建

通常,研究人员采用试验平台验证仿真模型的有效性。然而,由于搭建试验平台所需成本较高且调试周期过长,故本文采用与文献[7]对比的方法对上节所建有限元模型进行验证。为此,利用所建有限元模型计算了当轨道移动至3 mm时电枢与轨道间的接触压强分布,并与该文献中的计算

结果进行对比,如图3所示。

其中横轴代表电枢尾翼长度,横坐标表示尾翼面上各点到翼尖的距离,纵坐标为电枢尾翼所受接触压强大小。由图3中可以看出,本文仿真结果与文献[7]结果大致相同,且随着与翼尖距离的增大,电枢与轨道开始接触后的压强曲线较文献中更加平滑,其计算结果更加精确。经数学积分运算,

得到电枢表面受到总接触压力为 50.97 kN, 与该文献中计算所得的 48.76 kN 相差不到 5%。可见, 与 ABAQUS 计算结果的对比表明了本文采用 ANSYS 软件所搭建的数值仿真模型具有一定的有效性和准确性, 能够用于电磁发射枢轨过盈配合初始特性接触研究。

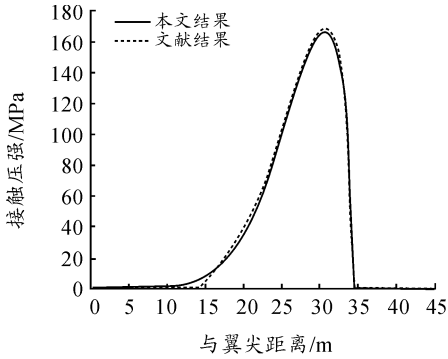


图3 轨道移动 3 mm 枢轨界面接触压强

## 2 基于正交试验的电枢过盈装配分析

### 2.1 试验因素及水平的选取

针对矩形炮膛 30 mm × 30 mm 的电磁轨道炮, 设计了口径大小同轨道相匹配的 C 形电枢, 结构参数如图 4 所示, 肩部宽度为 30 mm, 即轨道炮内膛宽度, 头部宽度为 15 mm, 头部高度为 5 mm, 结构参数  $A$  为电枢尾翼过盈量大小,  $B$  为电枢的翼尖宽度,  $C$  为电枢的尾翼长度,  $D$  为电枢的翼根宽度,  $E$  为电枢的肩部高度。

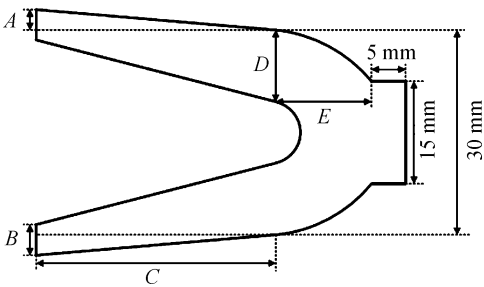


图4 C形电枢结构参数示意图

在对电枢结构参数初步选择后, 选定了过盈量、翼尖宽度、尾翼长度、翼根宽度和肩部高度作为对枢轨界面初始接触影响的 5 个考察因素, 选取四组水平参量, 如表 1 所示。

结合表 1 中不同结构参数, 按照单一变量原则, C 形电枢总计有 1 024 种不同的组合方式。针对参数变化的多样性, 本文采用  $L_{16}(4^5)$  正交表, 运用有限元分析软件 ANSYS 进行二维过盈装配仿真的正交试验。由于铜的导电性较好, 实际中轨道大多采用铜材料, 为了更加切合实际, 仿真中轨道材料选择铜, 电枢选择铝, 其材料参数值如表 2 所示。轨道的接触属性为目标面, 电枢的接触属性为接触面。

表1 试验因素水平

水平	因素				
	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm
1	1	1.5	30	7.5	12
2	2	3	35	9	14
3	3	4.5	40	10.5	16
4	4	6	45	12	18

表2 枢轨材料参数值

组件	杨氏模量/GPa	泊松比	摩擦因数
轨道	119	0.325	0.25
电枢	70	0.330	

### 2.2 正交试验结果及分析

根据表 1 所表示的电枢结构参数, 进行了 16 种不同结构参数的电枢同轨道的过盈配合仿真, 并经过相应积分计算得到了各试验枢轨界面的接触压力, 其中正交试验方案及数据如表 3 所示。

表3 正交试验方案及数据

试验 号码	影响因素					接触压 力/kN
	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	
1	1	1.5	30	7.5	12	5.04
2	1	3	35	9	14	7.83
3	1	4.5	40	10.5	16	11.60
4	1	6	45	12	18	16.09
5	2	1.5	35	10.5	18	32.45
6	2	3	30	12	16	53.49
7	2	4.5	45	7.5	14	5.82
8	2	6	40	9	12	9.37
9	3	1.5	40	12	14	53.17
10	3	3	45	10.5	12	24.58
11	3	4.5	30	9	18	33.20
12	3	6	35	7.5	16	12.15
13	4	1.5	45	9	16	27.11
14	4	3	40	7.5	18	19.48
15	4	4.5	35	12	12	67.07
16	4	6	30	10.5	14	55.93
$k_{1j}$	10.14	29.44	36.91	10.62	26.51	
$k_{2j}$	25.28	26.35	29.88	19.38	30.69	
$k_{3j}$	30.77	29.42	23.40	31.14	26.09	
$k_{4j}$	42.40	23.38	18.40	47.45	25.31	
$R_j$	32.26	6.06	18.51	36.83	5.38	

在表3中运用极差分析法对正交试验结果进行计算分析,  $k_{ij}$  为第  $j$  列因素  $i$  水平所对应的试验指标和的平均值, 其大小可以判断各因素的优水平和各因素的水平组合, 例如  $k_{11}$  表示1水平A因素下所受接触压力总和的平均值, 即  $(5.04 + 7.83 + 11.60 + 16.09)/4 = 10.14 \text{ kN}$ 。  $R_j$  为各因素的极差, 即第  $j$  列因素各水平下  $k_{ij}$  数值的最大值与最小值之差:

$$R_j = \max(k_{1j}, \dots, k_{4j}) - \min(k_{1j}, \dots, k_{4j}) \quad (2)$$

$R_j$  代表电枢各结构参数对接触压力的影响程度,  $R_j$  越大说明影响越大, 从计算结果可以看出, 电枢各结构参数对接触压力的影响程度依次为  $D > A > C > B > E$ 。其中电枢过盈量  $A$  和翼根宽度  $D$  对接触压力大小具有显著性影响, 其次是尾翼长度  $C$ , 而参数翼尖宽度  $B$  和肩部高度  $E$  在考察范围内影响很小。为了能更直观的分析各水平参数对枢轨接触界面接触压力的影响, 根据表3作出正交效应曲线如图5, 图中电枢过盈量  $A$  从1 mm至4 mm区间内不断增加, 电枢与轨道接触面所受的接触压力呈线性增加, 且增长速度较快, 在4 mm时接触压力达到最大; 随着翼尖宽度  $B$  在固定区间内变化, 其相应的接触压力分别在  $B_1$  和  $B_3$  处具有极大值, 且二者相差不大, 与最小值相差6.06 kN, 相对于结构参数  $ACD$  而言变化幅度较小, 整体上看, 随着结构参数  $B$  的增加, 接触压力变化幅度较小, 且具有递减的趋势; 接触压力随着尾翼长度  $C$  在35 mm到45 mm的增加呈线性减小, 在其他结构参数不变的情况下, 尾翼长度越长, 相应的接触压力越小; 翼根宽度  $D$  对接触压力具有极其显著的影响, 在规定区间内, 翼根宽度数值越大, 接触压力就越大, 且增长速度很快; 随着肩部高度  $E$  的增加, 枢轨面接触压力在  $E_2$  处达到最大值, 但总体上并无显著变化, 说明参数  $E$  对电枢的接触压力几乎没有影响。

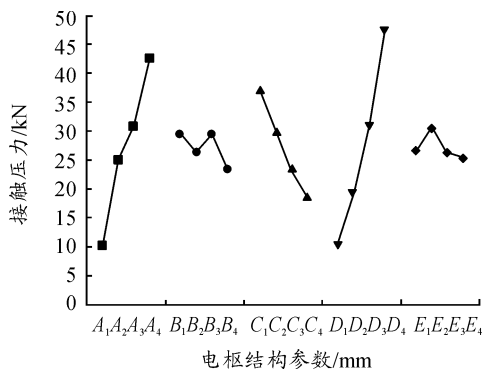


图5 正交效应曲线

### 2.3 电枢结构参数优化

在电磁发射的过程中, 电枢与轨道接触面所受接触压力越大, 一般认为接触越好, 接触面的接触电阻越小, 允许通过的电流就越大。此外, 接触磨损可以使电枢产生形变, 且接触压力越大, 磨损量越大, 温度越高, 此时材料机械强度降低, 电枢在受向前的电磁推力的同时还受电枢尾翼和轨道间摩擦力的影响, 电枢尾翼部分容易断裂, 从而影响实验的展开。因此在设计电枢结构参数时, 关键是根据脉冲电流数值大小, 通过“1 g/1 A 法则”计算并合理选择枢轨界面的初始接触压力, 最

终根据计算得到的初始接触压力在电枢结构参数合理的情况下进行电枢的结构参数设计。

假设轨道上加载的脉冲电流峰值大小为 800 kA, 根据“1 g/1 A 法则”可以看出所需要的接触压力与电流之间的关系为:

$$F = I \times 10^{-2} \text{ N} \quad (1)$$

通过公式(1)计算得到接触压力为 8 kN, 从接触安全方面考虑, 要保证实际电磁发射中电枢与轨道间不起弧, 从而避免转矩现象的发生, 接触压力的选择不宜过小; 从发射效率方面考虑, 接触压力越大导致发射时的阻力过大, 导致发射效率降低, 严重时会出现电枢尾翼断裂的现象。文献<sup>[7]</sup>中实验结果发射性能良好, 实验中脉冲电流为 634 kA, 通过公式(1)换算得到不起弧的接触压力为 6.34 kN, 本文在使用文献中的电枢参数进行仿真后得到电枢与轨道间接触压力为 18.33 kN, 为公式换算后接触压力的 2.89 倍, 因此为确保轨道炮发射性能及其安全性, 本文接触压力取电流换算后接触压力的 2.89 倍, 即取 23.12 kN。通过比较, 试验 10 仿真的接触压力最为接近设计值, 仿真结果如图6和图7所示。图6为电枢过盈装配范式应力分布云图, 其应力最大值主要分布在电枢内侧翼根处, 表明翼根处最容易发生形变, 此值若远大于电枢材料本身的屈服强度, 在发射的过程中很可能引起尾翼断裂的情况, 因此在实际的电枢结构参数设计中不同的范式应力分布应结合电枢材料屈服强度合理的进行电枢设计。

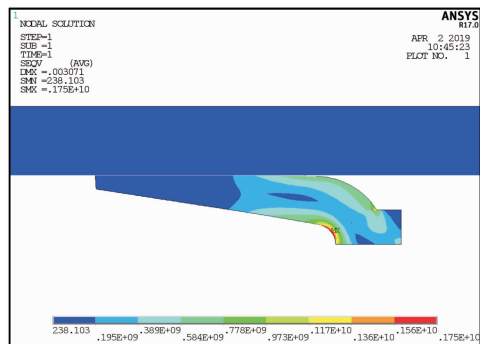


图6 电枢过盈装配范式应力分布云图

图7为电枢过盈装配接触面上的压强分布云图, 可以看出, 接触压强大多分布在电枢接触面的中部区域, 接触压强最大值处于尾翼中部偏头部的位。

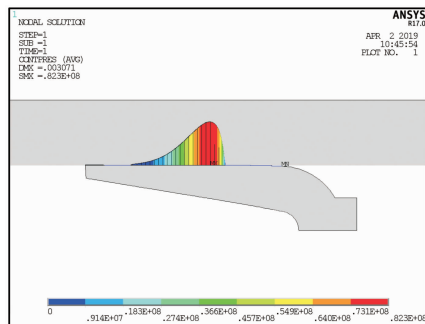


图7 电枢过盈装配接触压强分布云图

为了更准确的得到电枢与轨道的接触状况,现将数据进行处理后得到电枢过盈装配接触特性曲线,如图8,电枢与轨道在距离翼尖处 10.46 mm 开始接触,在 32.2 mm 处接触分离,接触长度为 21.74 mm,其中接触压强在 28.68 mm 处达到最大值 82.25 MPa,最终计算接触压力为 24.58 kN,总体上看接触压强分布较为均匀,不会使电流集中于一点,且接触压力达到实验安全标准,基本符合电磁发射的要求。

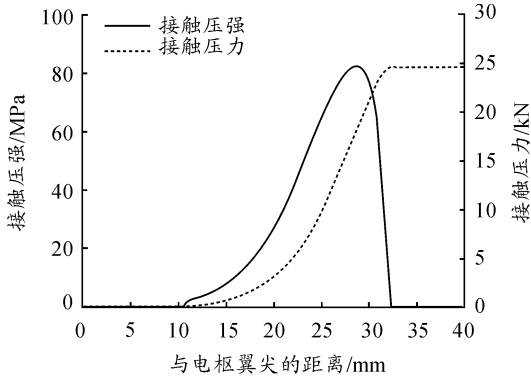


图8 电枢过盈装配接触特性曲线

### 3 结论

- 1) 电枢各结构参数对接触压力的影响程度依次为翼根宽度 > 过盈量 > 尾翼长度 > 翼尖宽度 > 肩部高度;
- 2) 在指定范围内,电枢与轨道间接触压力随翼根宽度和过盈量的增加而增加,随尾翼长度的增加而减小;
- 3) 随着翼尖宽度的增加,接触压力变化幅度较小,且具有递减的趋势;
- 4) 肩部高度的变化对接触压力的影响很小,说明肩部高度对电枢的接触压力几乎没有影响;
- 5) 在正交试验分析的基础上,采用“1 g/1 A 法则”计算接触压力,选取电枢结构参数,对于提高发射性能、延长轨道寿命具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] HARRY D. Progress in electromagnetic launch science and technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 43(1): 93-98.
- [2] 吕庆教,雷彬,李治源,等. 电磁轨道炮军事应用综述[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(1): 92-96.
- [3] MCNAB I R, STEFANI F, CRAWFORD M, et al. Development of a naval railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 206-210.
- [4] SATAPATHY S, WATT T, PERSAD C. Effect of Geometry Change on Armature Behavior[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 408-412.
- [5] FENG D, HE J, CHEN L, et al. Study on the Curve Shape of C-Shaped Armature's Trailing Arms in Rectangular Bore Railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1460-1466.
- [6] HSIEH K T, SATAPATHY S, HSIEH M T. Effects of Pressure-Dependent Contact Resistivity on Contact Interfacial Conditions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 313-318.
- [7] 冯登,夏胜国,陈立学,等. 基于过盈配合的 C 形电枢轨道初始接触特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1077-1083.
- [8] 张祎,杨春霞,李贞晓,等. 电磁轨道炮 C 型固体电枢组合装填下接触特性的分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(4): 1-4.
- [9] HSIEH K T, KIM B K. 3D modeling of sliding electrical contact[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 237-239.
- [10] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1994: 5-16.
- [11] 一种小口径电磁轨道发射用电枢设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 26045040.
- [12] XIA S, HE J, CHEN L, et al. Studies on Interference Fit Between Armature and Rails in Railguns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 186-191.
- [13] 雷彬,陈少辉,吕庆教,等. 被动电磁装甲对金属射流横向电磁力的计算及验证[J]. 高电压技术, 2011, 37(10).
- [14] 刘贵民,朱硕,闫涛,等. 电磁轨道炮膛内热效应研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017(7): 15-19.
- [15] MARSHALL R A, WANG Y. Railguns: their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 3-24.
- [16] 肖铮,陈立学,夏胜国,等. 电磁发射用一体化 C 形电枢的结构设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(7).

(责任编辑 周江川)