

高速电磁能推进装置枢轨接触特性分析及实验研究

祝丽花, 刘平, 谷雨茜, 郝建英, 田子豪, 杨庆新

(天津理工大学新能源电力变换传输与智能控制天津市重点实验室, 300384, 天津)

摘要: 为准确分析高速增强型电磁能推进装置枢轨接触特性,提出了一种数值计算与实验测量相结合的方法,对推进装置枢轨接触特性进行动态分析。首先,建立接触电阻与膛口电压、轨道电流、磁场等物理量之间的数学模型,并设计实验对膛口电压、轨道电流、电枢速度以及空间磁场等装置参数进行测量;其次,通过膛口电压与轨道电流等实验测量数据和有限元数值计算结果,对增强型电磁能推进装置枢轨接触电阻进行计算;进一步根据接触电阻计算结果与电枢速度特性曲线,对不同阶段下推进装置枢轨接触特性进行分析;最后,将服役后的导轨进行拆解和形貌扫描,通过样貌图侧面验证了不同阶段接触特性分析的可靠性。研究结果表明:初始阶段枢轨接触电阻最大可达 $8.5\text{ m}\Omega$,且轨道在此阶段损伤较为严重;在加速至中高速阶段,接触电阻基本平稳在 $0.78\text{ m}\Omega$ 左右,枢轨接触状态较为稳定;在高速运动至出口阶段,接触电阻波动幅度较大,电接触稳定性差。研究内容可为轨道磨损以及提高系统性能等提供基础数据和新的可靠参考。

关键词: 电磁能推进装置;高速状态;接触电阻;轨道形貌;枢轨接触

中图分类号: TM359.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501003 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0028-09

Analysis and Experimental Research on the Armature-Rail Contact Characteristics of High-Speed Electromagnetic Propulsion Devices

ZHU Lihua, LIU Ping, GU Yuxi, HAO Jianying, TIAN Zihao, YANG Qingxin

(Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion Transmission and Intelligent Control,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: To accurately analyze the armature-rail contact characteristics of high-speed enhanced electromagnetic energy propulsion devices, a method that combines numerical calculations with experimental measurements is proposed for dynamic analysis. Firstly, a mathematical model is established between contact resistance and physical quantities such as muzzle voltage, rail current, and magnetic field. Experiments are designed to measure parameters like muzzle voltage, rail current, armature speed, and spatial magnetic field. Subsequently, the armature-rail contact resistance of the enhanced electromagnetic energy propulsion device is calculated using experimental data on muzzle voltage and rail current as well as finite element numerical simulation results. Further analysis of the armature-rail contact characteristics at different stages is conducted based on the calculated contact resistance and armature speed characteristic curve. Finally, the serviced rails are disassembled and morphologically scanned to provide validation of

the reliability of the contact characteristic analysis at different stages through the scan images. The research results reveal that the armature-rail contact resistance peak at 8.5 mΩ during the initial stage, leading to severe rail damage. As the acceleration progresses to medium and high speeds, the contact resistance stabilizes around 0.78 mΩ, indicating a consistent and stable armature-rail contact state. However, at the high-speed exit stage, the contact resistance exhibits significant fluctuations, resulting in poor electrical contact stability. This research offers fundamental data and a reliable reference for further research on rail wear and system performance enhancement in high-speed electromagnetic propulsion devices.

Keywords: electromagnetic propulsion devices; high-speed conditions; contact resistance; rail morphology; armature-rail contact

电磁能推进装置作为一种初速高、射程远、循环周期短、隐蔽性好且节能安全的新概念装备,具有很好的国防应用前景,得到了国内外的广泛研究^[1-3]。增强型电磁能推进装置是一种内外轨道串联的新型电磁推进装置^[4-5],该装置结构较为复杂,但能够以较低的驱动电流峰值获得更大的出口动能,以此成为电磁推进领域的研究热点,并取得了较大进展^[6-8]。在瞬时大电流、高电压、强电磁环境以及与电枢高速摩擦的情况下,导轨不可避免地会受到损坏。这种现象会影响电枢-导轨接触性能,进而影响系统的状态^[9-11]。因此,有必要对枢轨接触特性进行准确分析。

接触电阻是反映接触特性的重要指标,通常通过求解接触电阻随时间的变化曲线来分析滑动电接触特性。非增强型电磁能推进装置可以通过膛口电压直接反映枢轨间的电接触特性^[12-13]。对于增强型电磁能推进装置而言,电枢前端内轨未通过电流,其余轨道均有电流通过。当电流变化幅度较大时,通电轨道会在电枢前端、内轨道和膛口/膛尾处所围成的区域内产生急速变化的磁场,从而使得膛口/膛尾两端存在一个极大的反向电动势,因此不能通过膛口或膛尾电压直接观测或评估其电接触特性。文献^[14-16]从接触电阻理论公式角度,考虑了接触压力、接触形式和其他附加接触电阻等因素对驱动过程中枢轨接触状态进行了分析,但理论公式中的相关变量大多都是经验值与定值,因此不能准确反映接触状态。文献^[17]针对增强型驱动装置,通过求解电枢未经过的内轨与已经过的内轨和外轨间的互感,利用实测膛口电压,综合得到枢轨接触电阻,文献^[18-19]基于此方法对枢轨接触状态进行了相关分析,与理论公式相比较为准确,但由于未考虑电流趋肤效应与速度趋肤效应且忽略了电枢电阻,导致接触电阻与实际有所差异。文献^[20-21]通过膛尾

电压与互感结合的方式,求解了接触电阻,以此分析接触状态。另外,还有其他学者对此也进行了比较深入的研究^[22-25],但大都未考虑相关电流效应且忽略了枢轨电阻,不利于高速滑动电接触特性的准确分析。

本文通过动态接触电阻对高速(出口速度不低于 1 800 m/s)下^[26]增强型电磁能推进装置的接触特性进行动态分析。首先,通过实验研究和数值计算结果,建立了接触电阻与膛口电压、轨道电流、磁场等物理量之间的数学模型,计算了实际工况下膛内随电枢运动的枢轨间动态接触电阻。其次,利用接触电阻和速度-位移曲线,分阶段对电枢在膛内运动过程中枢轨接触特性进行了动态分析。最后,结合服役后轨道的表面形貌图,对分析的可靠性进行了验证。此研究工作可为轨道磨损以及提高系统性能等提供基础数据和新的可靠参考。

1 理论分析与控制方程

1.1 动态接触电阻理论分析

对于增强型电磁能推进装置结构而言,其膛口电压不能直接反应枢轨间的接触特性,需通过间接求解接触电阻,从而反映增强型电磁能推进装置枢轨间的接触特性。

装置具体结构如图 1 所示。整套系统由 6 个脉冲电源供电,内外双轨采用串联形式,为增加其使用寿命,内轨道表面覆盖一层耐磨钢。电枢采用马鞍-C 型形状,其内外轨阻隔层和外围均由环氧树脂材

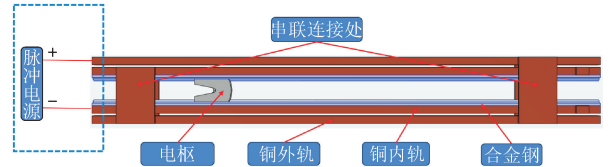


图 1 电磁能推进装置结构

Fig. 1 Electromagnetic propulsion device structural diagram

料填充。

首先从电路理论出发,可以将电磁能推进装置简化成如图2所示的电路模型。其中: I_r 为轨道电流; L_0 、 L_r 是线路和轨道的等效电感; R_0 、 R_r 为线路和轨道的等效电阻; R_c 为系统的枢轨接触电阻; R_a 为电枢体电阻; U_m 为电磁驱动装置的膛口电压,由电枢前端区域感应电压 U_L 和负载电阻电压组成。

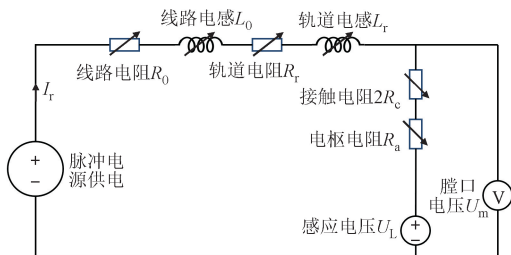


图2 电磁能推进装置等效电路

Fig.2 Electromagnetic propulsion device equivalent circuit diagram

负载电阻主要由枢轨间接触电阻和电枢电阻组成,膛口电压主要由膛口感应电压和负载电压组成。本文基于有限元数值计算,考虑电流趋肤效应和速度趋肤效应,较为准确地求解了电枢高速运动下的磁场,从而得到了理想枢轨接触下的膛口电压 U_m^* 。再根据实际实验中测量的膛口电压 U_m ,最终求解出电枢运动过程中接触电阻的变化情况如下

$$U_m = (2R_c + R_a)I_r + \frac{d(BS)}{dt} \quad (1)$$

$$U_m^* = R_a I_r + \frac{d(BS)}{dt} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{U_m - U_m^*}{2I_r} \quad (3)$$

式中: S 为膛口电压测量路径所围成的面积, B 为垂直于 S 内部的磁感应强度,均可由实验直接测量。

1.2 电磁场控制方程

在本文所建立的增强型电磁能推进装置电磁场数值计算模型中,由于电磁能推进装置的相关尺寸远小于电磁场的波长,故忽略位移电流,将电磁能推进装置作为准静态系统进行计算分析,其中麦克斯韦方程的微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度。结合欧姆定律和 $\mathbf{A}$ - φ 位函数

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

可推导得到三维瞬态电磁场控制方程

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \mu \sigma \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right] = 0 \\ \nabla \cdot \left\{ -\sigma \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right] \right\} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

电枢运动所受电磁推力表示为

$$\mathbf{F}_{EM} = \iiint_{\Omega} \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (7)$$

式中: σ 为电导率; μ 为磁导率; $\mathbf{A}$ 为磁矢位; φ 为电势; $\mathbf{v}$ 为电枢速度; Ω 为电枢区域; V 为电枢单位体积。

2 系统参数测量

为了准确测量推进装置的相关参数,课题组研制了装置参数测量系统。系统主要由高斯计、高压差分探头、电流采集装置、B探针测速装置、光幕靶、钢管和沙箱组成,分别用于采集磁场、膛口电压、轨道电流和速度等参数,钢管保证安全性,沙箱用来回收电枢,整体系统如图3所示。同时,进行了5000V电压等级的实验,直接或间接的获得了电流、速度和膛口电压以及动态磁场等参数。

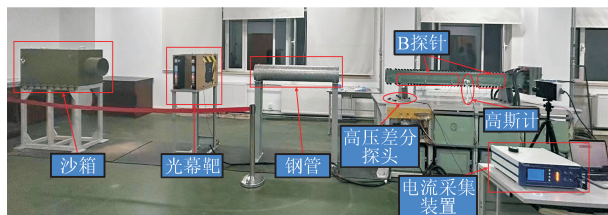


图3 推进装置及测量装置图

Fig.3 Diagram of propulsion and measurement device

2.1 轨道电流及电枢实际速度测量

利用罗氏线圈测试原理的电流采集系统测量轨道脉冲电流,并实时显示。由于电枢在膛内不可见,且运动过程中膛内伴有电弧及烟尘,故采用简单易行且不受限于电枢速度及膛内恶劣环境的B探针测速法,图4为8个测量位置示意图(包括电枢出口信号共9个信号点)。

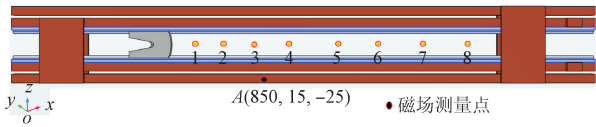
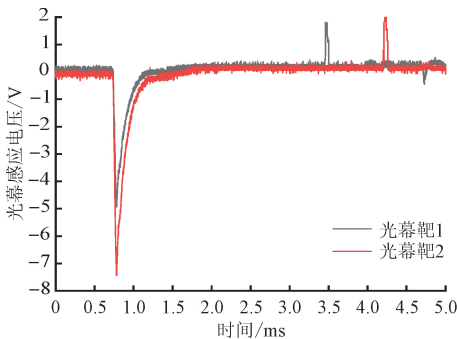


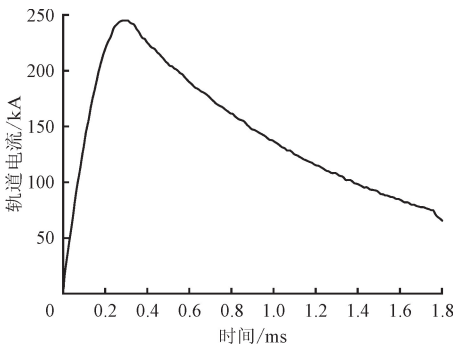
图 4 探针测量位置
Fig. 4 Probe measurement location

为了验证测速准确性,本实验加入了光幕靶测速装置,测量了电枢出口后经过两光幕靶时的平均速度,结果如图 5 所示。其中,电枢经过光幕靶的平均速度为 1 840.3 m/s;轨道电流最大值为 249.3 kA,在 1.745 ms 处电流发生骤降拐点,此时电枢出口速度为 1 848.9 m/s。

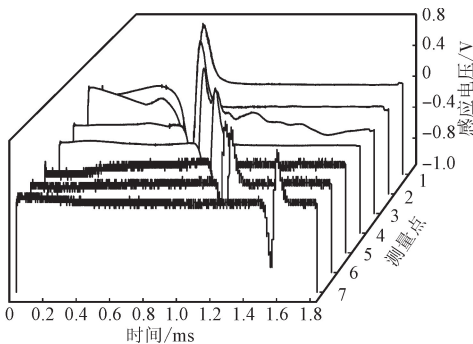
由于电枢出口时空气阻力影响较大,故 5(d)比 5(a)中测量结果偏大,侧面反映出 B 探针测速的有效性和准确性。



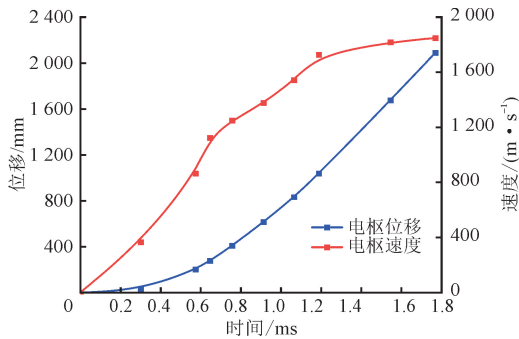
(a)光幕靶电压信号



(b)轨道电流



(c)B 探针信号



(d)位移与速度拟合曲线

图 5 系统各参数测量结果

Fig. 5 System parameter measurement

2.2 内轨间膛口电压测量

对于膛口电压的测量,实验设备选用量程为 $\pm 1\,500\text{ V}$ 、采集频率为 100 MHz 的高压差分探头。为防止采集时受强磁场干扰产生额外感应电压,故将导线缠绕至测量点,避免不必要误差。测量结果如图 6 所示,其中①号区域由于初始时刻电流上升幅度较高,电流变化率大,此时外轨道在电枢前端、内轨道和出口处所围成的区域内产生急速变化的磁场,从而使得膛口两端存在一个极大的反向电动势。随着电流上升幅度降低,电流变化率逐渐变小,膛口两端反向电动势的绝对值逐渐变小。②号区域电流处于下降沿,此阶段感应电动势为正向且数值相对①号区域较小。当电枢即将出口时,由于枢轨接触面存在高速高温铝液,如图 5 所示,会使枢轨接触状态恶化,膛口电压此时变化较大;当电枢出口时,枢轨间发生拉弧现象,使得膛口电压急剧上升。③号区域为电枢即将出口至出口阶段的膛口电压测量结果。

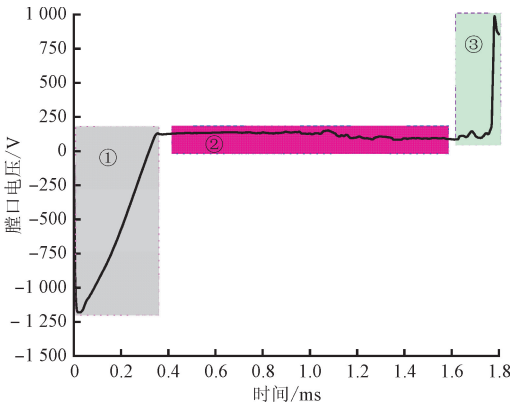


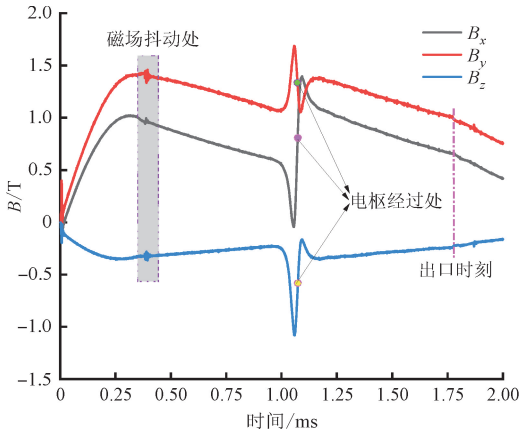
图 6 内轨间膛口电压测量结果

Fig. 6 Measurement results of muzzle voltage between innerrails

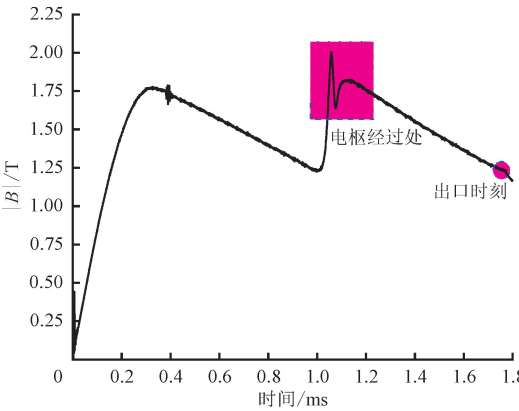
2.3 动态磁场测量

为了对磁场进行动态描述以验证数值计算的准

确性,在 A 点处选用高斯计测量,图 4 中的 A 点位置为(850,15,-25) mm,实测数据经后处理后结果如图 7 所示。当脉冲电流上升至最大值时段内,电枢距离测量点较远,故磁场先增大后减小;在 0.31 ms 时,磁场出现轻微抖动,此时电流正处于下降沿,可能是固固接触转变为固液固接触,导致电流不稳定,从而磁场出现抖动;当电枢靠近直至经过测量点时,此刻电枢中电流对测量点影响较大,故磁场第二次增大后减小;当电枢逐渐远离测量点且电流也逐渐下降时,磁场一直减小直至电枢出口。



(a)3 个方向磁感应强度



(b)磁感应强度模

图 7 A 点磁场测量曲线

Fig. 7 Magnetic field measurement curve at point A

3 接触电阻计算及电接触特性分析

3.1 动态接触电阻计算

通过三维电磁场数值计算,得出了出口处内轨膛压并与测量的膛压结果进行了对比,由于只考虑电枢在膛内运动过程,故对出口时枢轨间拉弧导致的膛压陡增部分不予分析,如图 8 所示。

由图 8 可知,数值计算结果在实验时间内均位于实测膛口电压结果上方。这是由于:在电流上升

沿期间,负载电阻产生的电动势与外轨道产生的感应电动势方向相反,且感应电动势绝对值较大;在电流下降沿期间,负载电阻产生的电动势与外轨道产生的感应电动势方向相同,且数值计算模型为理想接触;实际工况中,枢轨间存在接触电阻,故计算结果绝对值小于实测结果。通过数值计算膛压与实际工况下测量膛压结果,可由式(3)计算出枢轨间动态接触电阻,如图 9 所示。

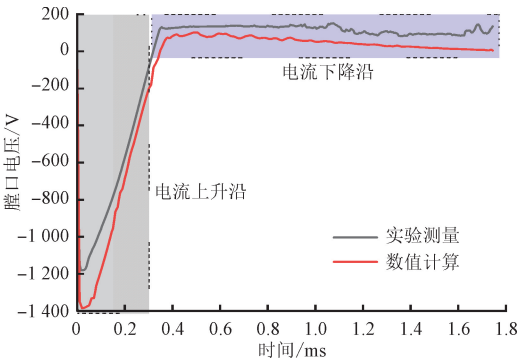


图 8 膛口电压测量结果与计算结果的对比

Fig. 8 Comparison of measurement and calculation results of muzzle voltage comparison

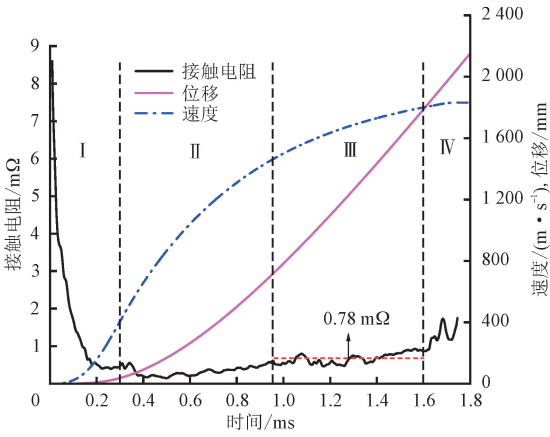


图 9 接触电阻、电枢速度和位移的计算结果

Fig. 9 Calculation results of contact resistance, armature velocity and displacement

3.2 滑动电接触特性分析

为更好分析其枢轨接触特性,根据接触电阻和位移-速度变化情况分为Ⅰ(启动阶段)、Ⅱ(低速阶段)、Ⅲ(中高速阶段)、Ⅳ(高速阶段)4个阶段进行分析,如图 9 所示。

结合动态接触电阻和位移、速度变化情况可以看出:在Ⅰ阶段(0~0.4 ms)时,接触电阻峰值可达 8 mΩ 及以上,数值较大,是因为此阶段时间较短且电流较小,枢轨初始接触由多个细小的接触点组成;

当电流逐渐增大至最大值,电枢与轨道之间的多个细小接触点将被逐渐烧蚀融化,枢轨接触较为充分,因此,接触电阻在此阶段内由较大的值迅速减小。

在Ⅱ阶段(0.4~1.0 ms),电流处于下降沿,电枢两侧的电磁力减小且速度不低于 500 m/s,此时由于大量的焦耳热及摩擦热,电枢与轨道间由固固接触转变为固液接触导致的接触状态恶化,使此阶段接触电阻有轻微上升趋势。

在Ⅲ阶段(1.0~1.6 ms),电枢已经加速至中高速状态,接触电阻有小幅上升,但整体稳定在 0.78 mΩ 左右。这是由于,在高速且高温状态下枢轨接触面已变成高速和高温铝液接触,状态较为稳定。

在Ⅳ阶段(1.6~1.76 ms),由于电枢此时已达到高速状态,而此阶段枢轨间接触力几乎均由电磁力贡献,但电流较小电磁力较低,导致枢轨间固-液-固接触不够充分,且电枢尾部存在磨损使得接触状态不稳定,故接触电阻轻微上升且不断波动至出口。

4 数值计算与实验对比验证

为了验证接触电阻的正确性,将 5 000 V 电压等级实验中 B 探针测量的位移和速度点与数值计算结果进行了对比,结果如图 10 所示,

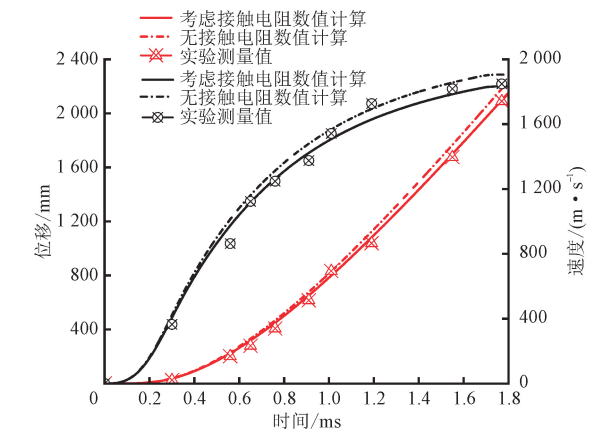


图 10 电枢位移和速度测量结果与计算结果的对比
Fig. 10 Comparison of measurement and calculation results of armature velocity and armature displacement

由图 10 分析可知,未加入接触电阻的数值计算出口速度为 1 906.3 m/s,加入接触电阻的数值计算出口速度为 1 830.6 m/s,实测出口速度为 1 848.9 m/s,前者相对误差为 3.1%,后者为 0.98%。两者相比,加入接触电阻后的计算准确性明显提高,且其他速度测量点与位移测量点也与后者较为贴合,验证了此方法的正确性。

将 A 点处测得的磁感应强度模与数值计算结果进行了对比,两种数据结果均为驼峰状,如图 11 所示。当脉冲电流在峰值左右时误差最大,相对误差约为 4.8%,可能是由于此阶段导轨急剧升温使得电导率降低,而模型中未考虑此变化导致误差。但是,模型计算参数结果与实际测量结果的相对误差均不超过 4.8%,准确性较好。

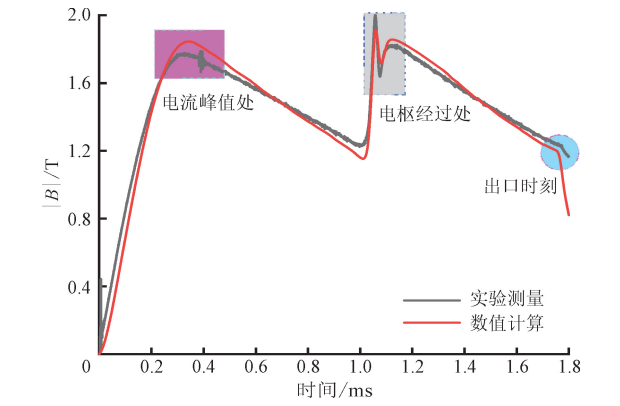


图 11 A 点磁感应强度模测量结果与计算结果的对比
Fig. 11 Comparison of measurement and calculation results of magnetic flux density modulus at point A

由于高速下电枢回收困难,但为了验证枢轨接触特性分析的正确性,故将服役后的轨道进行拆解和表面形貌扫描。根据枢轨接触特性的不同,在各阶段电枢所在轨道区域内选取特征扫描图,共计 8 个区域如图 12 所示,并结合服役轨道形貌扫描图片进行具体分析。

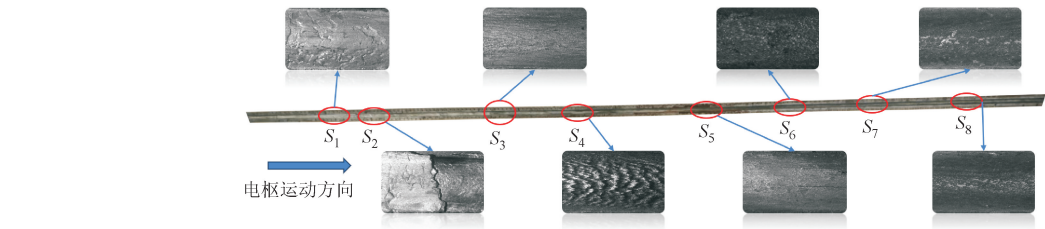


图 12 轨道表面不同位置形貌扫描图
Fig. 12 Surface morphology scanning images at different positions of the track

在 S_1 和 S_2 处可以看出,轨道表面附着一层灰色的沉积层,并且 S_1 到 S_2 方向 Al 沉积层面积与厚度逐渐增大后减小。由于此处接触电阻和机械应力较大且电流上升至最大值附近,导致焦耳热在此阶段过于集中,使得电枢在此处磨损较大,且由于重复发射过程中较大的剪切应力,导轨表面出现较多疲劳裂纹。

随着电枢逐渐加速,电流也在急剧上升,枢轨接触面间的焦耳热与摩擦热快速增加,电枢接触面表面合金 Al 材料转移至轨道表面。此时电磁力和机械应力均处于较大值附近,从而导致电枢接触面粗糙度变大,枢轨相对滑动会使轨道表面留下犁沟状损伤,如 S_3 所示。在 S_4 处,因电枢材料熔融后在摩擦力作用下凝固形成流水状组织,使得轨道表面形貌较为复杂。这也为上述 II 阶段接触电阻有轻微上升提供了验证。

当电枢到达 S_5 和 S_6 附近后,由于此时电枢速度已经加速至较高,且电枢表面温度较高,导致熔融后的铝液来不及附着在轨道表面,故此阶段沉积层厚度较小,且轨道表面出现由于烧蚀导致的较小孔洞形貌。

由 S_7 和 S_8 可见,在轨道的后段位置磨损表面有少量流水状组织及磨屑。此阶段主要是由于电枢表面温度较高,导致此区域铝液沉积层的凝固速度较低,又因高温铝液随电枢高速运动,枢轨接触不够充分,且因电枢尾部发生材料缺失导致该阶段接触电阻略有上升且波动幅度较大,接触状态不稳定。

总体上,数值计算的误差在合理范围之内。其次根据服役后的轨道表面形貌对枢轨接触的 4 个阶段进行了分析论证,以此间接验证了本文接触电阻计算和枢轨接触特性分析的准确性和可靠性。

5 结 论

本文基于实验数据与数值计算相结合的分析方法,通过计算增强型电磁能推进装置的枢轨接触电阻,对高速下电磁能推进装置的枢轨接触特性进行分析,得到结论如下。

(1)在电枢启动阶段,接触电阻高达 $8.5 \text{ m}\Omega$ 。随着重复工作,此阶段因摩擦热与焦耳热过于集中且具有较大的剪切应力,导致轨道发生疲劳裂纹。

(2)随着电枢速度逐渐提高,接触状态不断恶化,接触电阻轻微上升至 $0.75 \text{ m}\Omega$,轨道表面因颗粒磨损和铝液侵蚀留下轻微坑洞和犁沟,且现象随着工作次数增加而逐渐明显。

(3)当电枢加速至高速时,枢轨接触面间铝液已变成高温状态。随电枢高速运动,沉积层基本覆盖整个轨道表面,使得电枢与轨道接触良好,接触电阻整体稳定在 $0.78 \text{ m}\Omega$ 左右,接触状态较为稳定。

(4)当电枢运动至即将出口时,接触电阻上升至 $1.8 \text{ m}\Omega$ 后波动。此阶段主要是由于电枢熔化飞溅形成的沉积层导致枢轨接触不够充分,从而接触状态不稳定。

参考文献:

- [1] 鲁军勇,马伟明. 电磁轨道发射理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] 王莹,肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
MA Weiming, LU Junyong. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [4] 徐伟东,叶文怡,王昊,等. 增强型电磁轨道发射技术现状及发展趋势 [J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 871-884.
XU Weidong, YE Wenyi, WANG Jiong, et al. Current situation and development trend of augmented electromagnetic launching technology [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 871-884.
- [5] ENGEL T G, VERACKA M J, NERI J M, et al. Design of low-current high-efficiency augmented railguns [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(12): 2385-2389.
- [6] 乔志明,雷彬,向红军,等. 增强型电磁轨道炮发展现状及技术特点 [J]. 飞航导弹, 2016(10): 28-31.
QIAO Zhiming, LEI Bin, XIANG Hongjun, et al. Current status and technical characteristics of the development of augmented electromagnetic railgun [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(10): 28-31.
- [7] 徐蓉,袁伟群,成文凭,等. 增强型电磁轨道发射器的电磁场仿真分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1065-1070.
XU Rong, YUAN Weiqun, CHENG Wenping, et al. Simulation and analysis of electromagnetic field for augmented railgun [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1065-1070.
- [8] CRAWFORD M, SUBRAMANIAN R, WATT T, et al. The design and testing of a large-caliber railgun [C]// 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch

- Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [9] 李白, 鲁军勇, 谭赛, 等. 高速滑动电接触电枢表面动态磨损过程研究 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 131-139.
- LI Bai, LU Junyong, TAN Sai, et al. Research on dynamic wear process of armature surface in high-speed sliding electric contact [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 131-139.
- [10] 姚金明, 孙建东, 鲍建波, 等. 滑动电接触界面沉积层对电枢熔化的抑制效应研究 [J/OL]. 电工技术学报 (2024-01-09) [2024-07-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231395>.
- YAO Jinming, SUN Jiandong, BAO Jianbo, et al. Study on suppressing effect of deposited layer on armature melting at sliding electrical contact interfaces [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society (2024-01-09) [2024-07-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231395>.
- [11] 邹昕阳, 陈立学, 王增基, 等. 滑动电接触梯度电枢材料熔化磨损特性仿真研究 [J/OL]. 电工技术学报 (2024-01-11) [2024-07-10]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231406>.
- ZOU Xinyang, CHEN Lixue, WANG Zengji, et al. Study on melting and wear characteristics of sliding electric contact gradient armature [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society (2024-01-11) [2024-07-10]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231406>.
- [12] 李鹤, 雷彬, 李治源, 等. 电磁轨道炮试验过程中枢轨界面的接触电阻特性 [J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 911-915.
- LI He, LEI Bin, LI Zhiyuan, et al. Contact resistance characteristics of the interface between armature and rail in electromagnetic railgun launching tests [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 911-915.
- [13] 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 contacts between aluminum armature and different material rails in railgun [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942.
- [14] 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.
- [15] 刘畅, 刘峰, 刘新民. 接触电阻对电磁轨道炮电磁场影响分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(1): 23-28.
- LIU Chang, LIU Feng, LIU Xinmin. Effect analysis of contact resistance on electromagnetic field of electromagnetic railgun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(1): 23-28.
- [16] 王雪军, 顾金良, 罗红娥, 等. 电磁轨道炮内弹道接触电阻分析 [J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(3): 306-311.
- WANG Xuejun, GU Jinliang, LUO Hong'e, et al. Analysis of internal ballistic contact resistance of electromagnetic railgun [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(3): 306-311.
- [17] 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. Quantitative expression of sliding contact resistance between armature and rail in railgun [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 81-84.
- [18] 王振春, 鲍志勇, 曹海要, 等. 增强型电磁轨道炮电枢轨道接触特性研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(3): 451-456.
- WANG Zhenchun, BAO Zhiyong, CAO Haiyao, et al. Research on contact characteristics of armature and rail in augmented electromagnetic railgun [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(3): 451-456.
- [19] YAN Jie, LI Juxiang, REN Ren, et al. System noise suppression of muzzle voltage in augmented electromagnetic railgun based on VMD and the application in armature-rail contact characteristics [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(2): 502-509.
- [20] 朱春燕, 王军, 马富强, 等. 基于炮尾电压的串联增强型电磁轨道炮滑动电接触特性分析 [J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1280-1287.
- ZHU Chunyan, WANG Jun, MA Fuqiang, et al. Analysis of sliding electric contact characteristics of series-augmented railgun based on breech voltage [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(7): 1280-1287.
- [21] ZHU Chunyan, LI Baoming. Analysis of sliding electric contact characteristics in augmented railgun based on the combination of contact resistance and sliding friction coefficient [J]. Defence Technology, 2020, 16(4): 747-752.
- [22] 王增基, 陈立学, 尤彭昊, 等. 考虑速度趋肤效应与接触电阻影响的枢轨界面电流分布特性 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5003-5010.
- WANG Zengji, CHEN Lixue, YOU Penghao, et al. Current distribution characteristics of armature-rail interface

under velocity skin effect and contact resistance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 5003-5010.

[23] 闫荣格, 王学谦, 赵浩凯, 等. 考虑动态接触电阻的电磁能推进装置运动和温度特性研究 [J/OL]. 高电压技术 (2024-06-06) [2024-07-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240037>.

YAN Rongge, WANG Xueqian, ZHAO Haokai, et al. Study on the motion and temperature characteristics of electromagnetic propulsion devices considering dynamic contact resistance [J/OL]. High Voltage Engineering (2024-06-06) [2024-07-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240037>.

[24] 闫荣格, 姜金波, 杨庆新. 考虑动态接触电阻的电磁能装备直线推进模型 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 37-44.

YAN Rongge, JIANG Jinbo, YANG Qingxin. Linear

propulsion of electromagnetic energy equipment considering the dynamic contact resistance [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2024, 52(7): 37-44.

[25] 杨玉东, 王建新, 薛文. 轨道炮动态负载特性的分析与仿真 [J]. 兵工学报, 2010, 31(8): 1026-1031.

YANG Yudong, WANG Jianxin, XUE Wen. Simulation and analysis for dynamic load characteristic of railgun [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(8): 1026-1031.

[26] 马伟明, 鲁军勇, 李湘平. 电磁发射超高速一体化弹丸 [J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 1-10.

MA Weiming, LU Junyong, LI Xiangping. Electromagnetic launch hypervelocity integrated projectile [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 1-10.

(编辑 杜秀杰)