DOI：10.13245/j.hust.250128

考虑轨道动态电导率的电磁推进装置运动特性

闫荣格 苏晨豪 谢云松 赵文月
(河北工业大学智能配用电装备与系统全国重点实验室，天津 300401)

摘要 针对现有方法中对电磁推进装置轨道参数采用静态电导率而无法准确体现电枢运动特性的问题，提出考虑轨道动态电导率的运动特性研究方法．首先，建立轨道动态电导率解析计算模型并对轨道电流和动态电导率进行解析计算；然后，将解析计算与实验测量轨道电流进行对比验证输入数据的精度；最后，建立电磁推进装置有限元模型，对比动态电导率和静态电导率两种情况对电枢运动特性的影响．计算结果显示：考虑动态电导率情况下计算得到的电枢出膛速度为1 051.62 m/s，与实际测量误差为1.3%；静态电导率条件下计算得到的电枢速度为1 066.47 m/s，误差为2.73%，验证了本文方法的有效性．

关键词 电磁推进装置；分段建模；动态电导率；运动特性；数值计算
中图分类号 TM359.4 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0030-07

Kinematic characteristics of electromagnetic propulsion devices considering rail dynamic conductivity

YAN Rongge SU Chenhao XIE Yunsong ZHAO Wenyue
(State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System，Hebei University of Technology，Tianjin 300401，China)

Abstract Aiming at the problem that the existing method adopted static conductivity for the rail parameters and cannot accurately represent the armature kinematic characteristics，the research method on the motion characteristics considering the dynamic conductivity of the rail was proposed．First，an analytical calculation model of the rail dynamic conductivity was established，and the analytical calculations of the rail current and the dynamic conductivity were carried out．Then，the accuracy of the input data was verified by comparing the analytical calculation with the experimentally measured rail currents．Finally，a finite element model of the linear electromagnetic energy propulsion device was established to compare the effects of both dynamic and static conductivity on the armature kinematic characteristics．Calculation results show that the armature exit velocity calculated under dynamic conductivity conditions is 1 051.62 m/s，with a measurement error of 1.3%，whereas the armature velocity calculated under static conductivity conditions is 1 066.47 m/s，with an error of 2.73%，which verifies the validity of the proposed method．

Key words electromagnetic propulsion devices； segmental modeling； dynamic conductivity； kinematic characteristics； numerical calculations

电磁推进装置是利用电磁能推动电枢高速运动的新型发射装置[1-3]，相较于传统火药推进具备更高的出口速度[4-5]．电导率是电磁推进装置的重要参数之一[6]，其大小直接影响电枢运动特性，并对电磁推进装置发射效率及性能有关键性影响[7]，因此考虑轨道动态电导率的运动特性研究对电磁推进装置可靠性预测和优化设计具有重要意义[8]．

现有对电枢运动特性的研究为理解和优化电磁推进装置的性能提供了重要的理论基础．文献[9]研究了动态接触电阻对运动和温度特性的影响；文

收稿日期 2025-03-30．
作者简介 闫荣格(1969—)，女，教授，E-mail：yanrg@hebut.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(92066206)．

献[10]对固体电枢进行动态仿真分析得出电枢速度曲线；文献[11]从电磁推力角度，对电枢出口速度进行仿真计算；文献[12]研究了不同电感梯度和磁场强度下的电枢运动特性；文献[13]研究了不同电枢起始位置对运动特性的影响规律；文献[14]对脉冲电源模块进行全电路模拟，研究了前级驱动电路对运动特性的影响；文献[15]从轨道电磁场扩散角度，研究了电感梯度动态变换对电枢运动特性的影响；文献[16]从枢轨预紧力出发对电枢运动特性进行了研究．然而，尽管现有研究在一定程度上探讨了电枢运动特性的影响因素，但现有方法对轨道参数采用静态电导率，这样无法准确体现电枢在实际工况下的运动特性．

为此，本研究提出考虑轨道动态电导率的电磁推进装置运动特性研究方法．首先，构建轨道动态电导率的解析模型，对轨道电流和动态电导率进行计算；然后，设计实验方案测量相关数据，通过对比解析计算与实验测量电流数据来验证输入数据的准确性；最后，建立电磁推进装置有限元模型，对比动态和静态电导率两种情况对电枢运动特性的影响，并与实验数据进行对比，验证仿真模型精确性．

1　动态电导率理论分析与计算

1.1　动态电导率解析模型

增强型电磁推进装置是一种新型结构的电磁推进装置，它利用多对轨道通电时叠加的磁场，使电枢能够获得更大的推动力，相比普通电磁推进装置具有更高的出口速度．增强型电磁推进装置示意图如图1所示，图中：I为轨道电流；v为电枢速度．

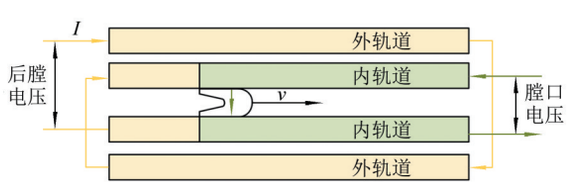


图1　增强型电磁能推进装置示意图

轨道电导率的解析计算过程中，后膛电压为储能电容电压在电源内部压降后，施加在轨道、电枢及接触电阻等上的电压，由轨道电压、感应电动势、电枢体电阻电压、接触电阻电压及反电动势组成．其中电枢体电阻电压、接触电阻电压和反电动势的和即为膛口电压．膛口电压

$$U_{\mathrm{k}}(t)=U_{\mathrm{d}}(t)+U_{\mathrm{b}}(t)+U_{\mathrm{a}}(t),$$

式中：U_{d}为枢轨接触面间接触电阻产生的电阻压降；U_{b}为反电动势；U_{a}为电枢体电阻产生的压降；t为装置运行时间．

对于增强型电磁能推进装置，其后膛电压

$$U_{\mathrm{w}}(t)=U_{\mathrm{k}}(t)+U_{\mathrm{g}}(t)+U_{\mathrm{E}}(t),$$

式中：U_{g}为轨道电压；U_{E}为感应电动势．

其中感应电动势可以表示为

$$U_{\mathrm{E}}(t)=L\mathrm{d}I(t)/\mathrm{d}t+I(t)L'v(t), \tag{1}$$

式中：L'为等效电感梯度；L为轨道电感；I为轨道电流；$L\mathrm{d}I(t)/\mathrm{d}t$为感生电动势；$I(t)L'v(t)$为动生电动势．

由于后膛电压测量存在绝缘安全问题，因此在本研究中通过解析法对电磁推进装置的后膛电压进行计算．电磁推进装置由6个并联电容储能型脉冲单元供电，其等效电路如图2所示，图中：C_1～C_3为储能电容；L_{c}为电容支路杂散电感；R_{c}为杂散电阻；L_{d}为续流二极管支路杂散电感；R_{d}为续流二极管支路杂散内阻；R_{i}为调波支路杂散电阻．

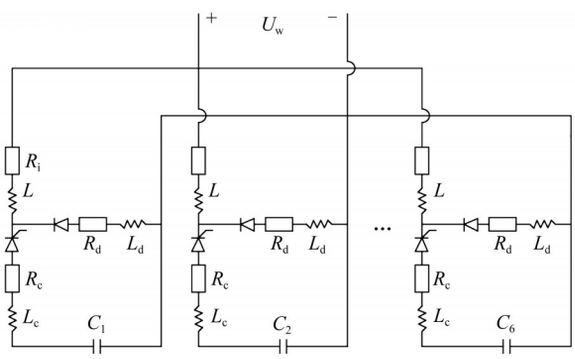


图2　增强型电磁能推进装置电源等效电路

后膛电压在数值上等于供电单元的输出电压，对于电容储能型脉冲电源放电单元，当电容器两端电压大于零时电容放电，为RLC二阶放电过程，电容器向负载放电，晶闸管开关导通[17]，此时电容电压和电容电流为

$$U_1(t)=U_0\frac{\omega_0}{\omega'}\mathrm{e}^{-\beta t}\sin\left(\omega' t+\arctan\frac{\omega'}{\beta}\right);$$
$$I_1(t)=C\mathrm{d}U_1(t)/\mathrm{d}t, \tag{2}$$

式中：C为放电电容；β为衰减系数；ω_0为谐振角频率；ω'为振荡频率；U_0为放电电容初始电压．

此时后膛电压表示为

$$U_{\mathrm{w}}(t)=-(L_{\mathrm{i}}+L_{\mathrm{c}})\mathrm{d}I/\mathrm{d}t-(R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{i}})I-U_1, \tag{3}$$

式中：L_{i}为调波电感值；R_{s}为晶闸管通态电阻．

当电容器两端电压为零时晶闸管开关关断，为一阶放电过程，调波电感向负载提供能量[17]，续流二极管导通，此时电感电流为

$$I_L=-\frac{U_0}{\omega'(L_{\mathrm{i}}+L_{\mathrm{d}})}\mathrm{e}^{-\beta t}\sin\omega' t. \tag{4}$$

此时后膛电压表示为

$$U_{\mathrm{w}}=-(L_{\mathrm{i}}+L_{\mathrm{d}})\mathrm{d}I/\mathrm{d}t-(R_{\mathrm{i}}+R_{\mathrm{d}}+R_{\mathrm{D}})I,\tag{5}$$

式中R_{D}为二极管通态电阻．基于已获取的后膛电压与膛口电压，轨道电阻可以表示为

$$R_{\mathrm{g}}=[U_{\mathrm{w}}(t)-U_{\mathrm{k}}(t)-U_{\mathrm{E}}(t)]/I(t).\tag{6}$$

轨道电导率的计算基于如下公式

$$\sigma=l/(R_{\mathrm{g}}S),\tag{7}$$

式中：l为轨道长度；S为轨道电流截面积．

由于电流扩散、邻近效应及速度趋肤效应，因此轨道电流在矩形导轨截面近似呈回形分布．在电枢运动初期电流变化率较大，电流分布主要受电流趋肤效应影响，趋肤深度不断增加；在电枢速度v大于临界速度v_1后，电流分布主要受速度趋肤效应影响，趋肤深度不断减小，趋肤深度计算公式为

$$\delta=\begin{cases}\sqrt{1/(\pi\mu\sigma f)} & (v\leqslant v_1);\\ \sqrt{k\lambda/(\pi\mu\sigma v)} & (v>v_1),\end{cases}$$

式中：δ为电磁轨道的趋肤深度；μ为电磁轨道材料的磁导率；f为电流频率；λ为枢轨接触电流有效长度；k为比例因子．

构建电流回型分布模型如图3所示，图中：w为轨道宽度；h为轨道高度；δ_1~δ_4为电流回型分布趋肤深度．轨道中心区域的电流密度远小于轨道表面，可近似认为轨道中心区域无电流通过且电流在导轨表面均匀分布．有

$$\delta_1=a_1\delta;\ \delta_2=a_2\delta;$$
$$\delta_3=a_3\delta;\ \delta_4=a_1\delta,$$

式中a_1~a_3为趋肤深度折算因子．

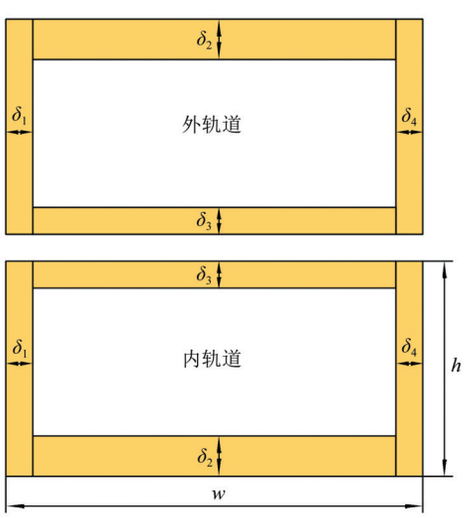


图3　轨道电流回型分布模型

通过轨道电流趋肤深度计算轨道电流截面积

$$S=(a_1w+a_2w+2a_3h)\delta-2(a_1+a_2)a_3\delta^2,$$

式中$2(a_1+a_2)a_3\delta^2$为导轨边角的重叠面积，对于整体面积可忽略不计．为了方便计算，电流截面积近似表示为

$$S=(a_1w+a_2w+2a_3h)\delta.\tag{8}$$

将式(6)和(8)代入式(7)式可得轨道动态电导率的分段解析式

$$\sigma=\begin{cases}\dfrac{l^2\pi\mu f}{(a_1w+a_2w+2a_3h)^2R_{\mathrm{g}}{}^2} & (v\leqslant v_1);\\ \dfrac{l^2\mu v}{(a_1w+a_2w+2a_3h)^2\pi\lambda R_{\mathrm{g}}{}^2} & (v>v_1).\end{cases}\tag{9}$$

根据式(1)~(9)即可构建电磁推进装置轨道动态电导率和后膛电压、膛口电压、感应电动势、轨道电流、电枢速度的解析模型$\sigma=f(t,\ v,\ U_{\mathrm{w}},\ U_{\mathrm{k}},\ U_{\mathrm{E}},\ I)$．将实验与计算数据代入解析模型得到轨道电导率$\sigma$随时间变化的曲线．

1.2　可观测实验数据测量方案

设计实验方案并测量动态电导率解析计算中所需的数据，增强型电磁能推进装置实验平台示意图如图4所示．

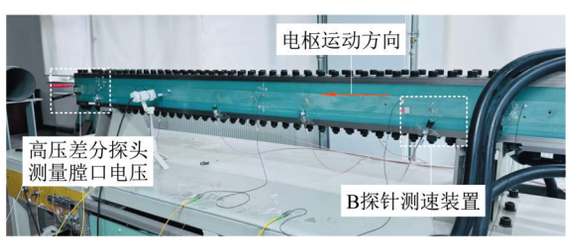


图4　增强型电磁能推进装置实验平台

电枢速度测量采用B探针与光幕靶，可以得到电枢的速度、位移关于时间变化的曲线，如图5所示，电枢在出膛过程中速度呈上升趋势，且在0.9 ms之后加速度不断减小．

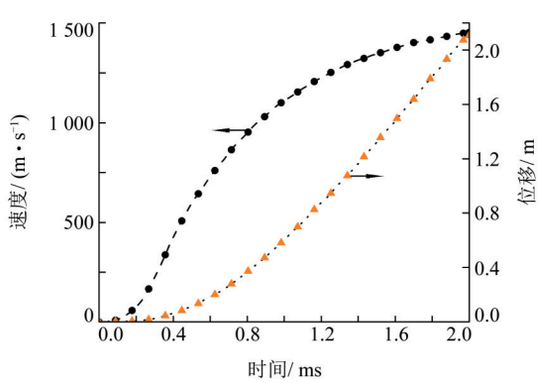


图5　电枢速度和位移随时间变化曲线

膛口电压的测量采用轨道前端的高压差分探头，轨道电流和膛口电压关于时间变化的曲线如图6所示，轨道电流为在0.3 ms处呈现峰值的单峰波形；膛口电压在出现一个较大的反向峰值后维持在一个相对稳定的值．

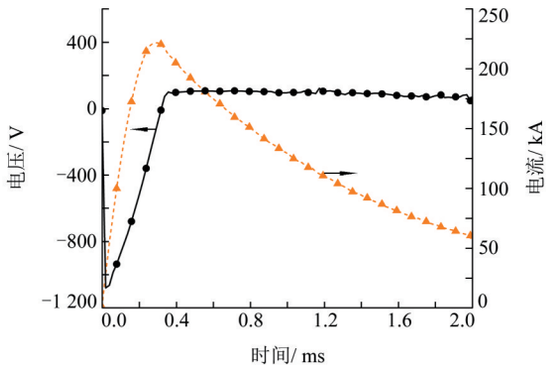


图6　膛口电压和轨道电流随时间变化曲线

1.3　测量数据滑动平均-离散小波阈值降噪处理

为提升数据的可靠性和有效性，采用滑动平均-离散小波阈值(MA-DWT)联合去噪方法消除数据误差波动．对膛口电压原始信号进行滑动平均滤波，属于有限脉冲响应(FIR)滤波，其输出是输入信号在固定窗口内的算术平均值，表达式为

$$Y(n)=\frac{1}{M}\sum_{k=0}^{M-1}X(n-k_n),$$

式中：n为当前数据点的位置；k_n为窗口内的偏移量；M为滑动窗口的长度；X为原始输入信号．

对MA预处理后的信号进行离散小波变换，信号逐层分解近似系数τ_j与细节系数d_j表示为

$$\begin{cases}\tau_{j+1}(k_n)=\sum_n X(n)\cdot\dot{h}(2k_n-n);\\ d_{j+1}(k_n)=\sum_n X(n)\cdot\dot{g}(2k_n-n),\end{cases}$$

式中：$\dot{h}$为低通滤波器信号；$\dot{g}$为高通滤波器信号．

利用τ_j，d_j和$\dot{h}(n)$，$\dot{g}(n)$的重构过程表示为

$$X(n)=\sum_{k_n}\tau_{j+1}(k_n)\cdot\dot{h}(n-2k)+\sum_{k_n}d_{j+1}(k_n)\cdot\dot{g}(n-2k_n).$$

将处理后的各层小波信号通过逆小波变换重构，得到降噪后的信号，实验测量与降噪处理后的膛口电压对比如图7所示．实验测量数据经过降噪处理后，能显著提升后续解析计算的精度，降低计算复杂度．

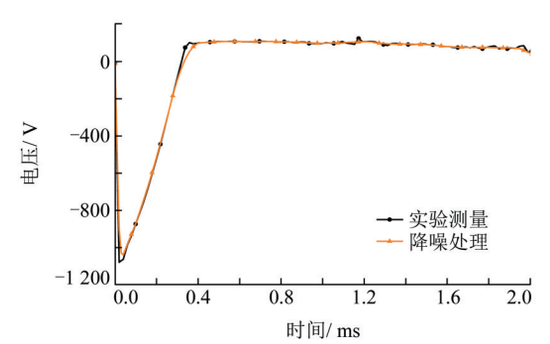


图7　实验测量与降噪处理膛口电压对比

1.4　解析结果分析

在获取降噪处理的实验可观测数据后，运用式(1)、(3)和(5)对后膛电压和感应电动势进行求解，计算得到的后膛电压和感应电动势如图8所示．后膛电压在电流上升阶段具有较高初始值，电源内部电容器在0.3 ms之前两端电压大于零，晶闸管开关导通，电容器进行RLC(电阻-电感-电容)电路二阶放电，后膛电压急剧下降；在电流线性下降阶段，0.3 ms之后电容电压小于零，晶闸管关断，续流二极管导通，由调波电感进行一阶续流放电，后膛电压维持相对较小的幅值．

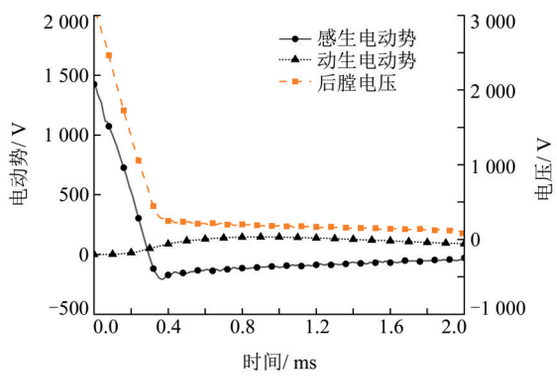


图8　后膛电压和轨道感应电压随时间变化曲线

运用式(2)、(4)和(6)、(9)分别对对电源电流和轨道动态电导率进行解析计算，通过对比实验实际测量电流数据与电流解析计算结果来验证后膛电压的准确性，轨道电流对比和动态电导率如图9所示．计算电流曲线与实测电流曲线基本符合，表明后膛电压的解析计算具备较高的准确性．

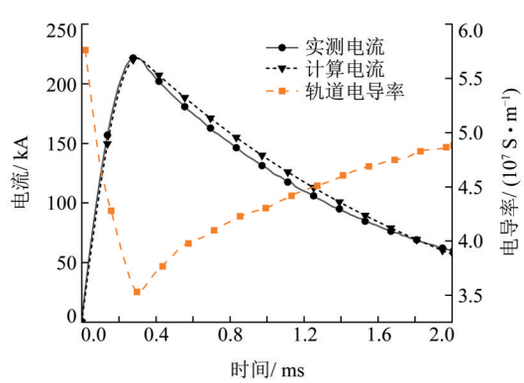


图9　轨道电流和轨道动态电导率随时间变化曲线

由计算结果可知：轨道动态电导率呈现先下降后上升的趋势，且整体值明显小于静态情况下的电导率．两种条件下电导率的不同分布情况将直接使电枢运动特性产生差异，并对电磁推进装置发射效率及电流密度产生关键性影响．

2　考虑轨道动态电导率电磁推进装置运动特性

2.1　考虑轨道动态电导率的多物理场耦合模型

电磁推进装置电枢所受电磁力直接取决于L'.对于轨道的电感梯度是单位轨道长度的电感量，电枢受到的电磁力为

$$F_{\mathrm{em}}=0.5L'I^2.$$

电枢在加速过程中的动态行为受到电磁力和摩擦力的共同影响．其运动方程表示为

$$m\alpha=F_{\mathrm{em}}-F_{\mathrm{f}},$$

式中：m和α分别为电枢的质量和加速度；F_{em}和F_{f}分别为电枢所受的电磁力和摩擦力．又有

$$\begin{cases}F_{\mathrm{em}}=\iiint_{\Omega}J\times B\mathrm{d}V;\\F_{\mathrm{f}}=\mu_{\mathrm{f}}(F_1+F_2),\end{cases}$$

式中：J为电流密度；B为磁通密度；μ_{f}为摩擦系数；F_1为电磁接触压力；F_2为预紧力．

建立电磁推进装置的数值计算模型．在考虑电枢运动影响的基础上，通过磁扩散方程对电磁场进行建模．使用磁矢势A和电标量势ϕ作为未知量可以得到由麦克斯韦方程推导而来的磁扩散方程

$$\begin{cases}\nabla\cdot(-\sigma\nabla-\sigma\partial A/\partial t+\sigma v\times\nabla\times A)=0;\\\nabla\times(\nabla/\mu_{\mathrm{c}}\times A)+\sigma\nabla\phi+\sigma v\times\nabla\times A=0,\end{cases}$$

式中：∇为哈密顿算子；μ_{c}为导体的磁导率．

轨道传热方程为

$$\rho C_{\mathrm{p}}\partial T/\partial t=\nabla(k_T\cdot\nabla T)+Q_{\mathrm{j1}}+Q_{\mathrm{j2}}+Q_{\mathrm{f}},$$

式中：T为温度；ρ为质量密度；C_{p}为比热容；k_T为热导率；Q_{j1}为电磁-温度耦合得到的电流焦耳热；Q_{j2}为枢轨接触面间产生的接触电阻热；Q_{f}为滑动摩擦过程中产生的摩擦热．

结构场控制方程为

$$\rho J_{\mathrm{a}}=\rho_0;\quad\sigma_{\mathrm{o,i}}+\rho p_{\mathrm{i}}=\rho\alpha_{\mathrm{i}};$$
$$\rho w^{\mathrm{int}}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{o}}\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{o}},$$

式中：ρ_0为材料初始密度；J_{a}为变形梯度张量的行列式；$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{o}}$为柯西应力张量；$\sigma_{\mathrm{o,i}}$为柯西应力张量对$x_{\mathrm{i}}$的偏异数；$p_{\mathrm{i}}$为体积力密度(单位质量上的力)；$\alpha_{\mathrm{i}}$为加速度；$w^{\mathrm{int}}$为单位质量的内能；$\boldsymbol{D}_{\mathrm{o}}$为应变率张量．

建立增强型电磁能推进装置几何模型，如图10所示．考虑到电枢运行加速度在0.9 ms后逐渐减小，速度变化减缓，运动特性趋于稳定，故本研究对轨道长度设定为500 mm来研究轨道动态电导率对电枢运动特性的影响．C型电枢质量为10 g，采用7075合金铝材质，电枢尺寸如图11所示．

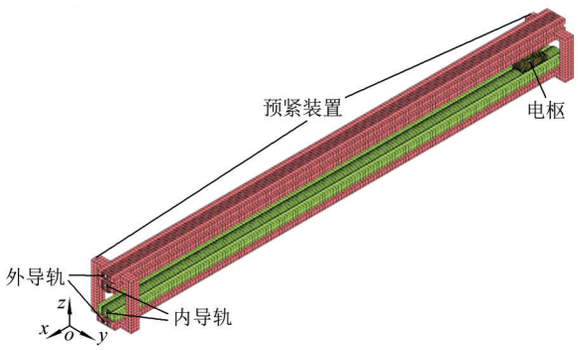


图10　增强型电磁能推进装置几何模型

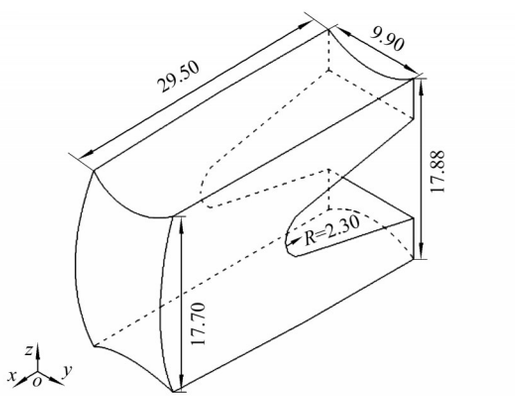


图11　电枢尺寸图(mm)

2.2　仿真结果分析

对考虑轨道动态电导率的电磁能推进装置进行有限元求解．轨道截面电流密度分布如图12所示，增强型电磁能推进装置的轨道中心电流密度远小于边缘处电流密度，符合电流回型分布近似模型．

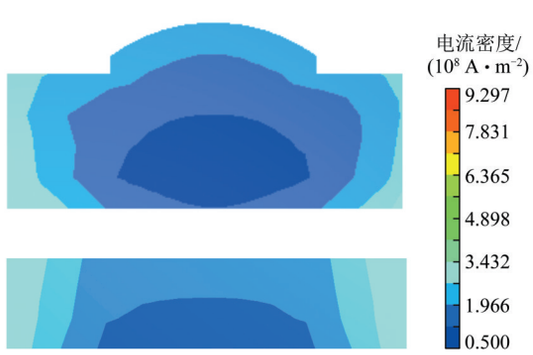
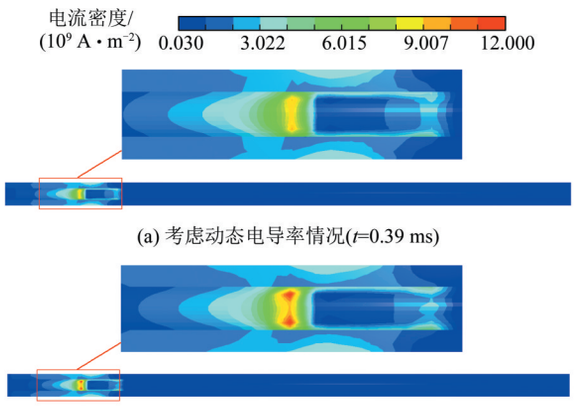


图12　轨道截面电流密度分布图

考虑与不考虑轨道动态电导率情况下轨道电流密度分布如图13所示．通过对比两种条件下的电流密度分布，可知动态电导率条件下电流密度低于静态条件下，因为动态情况下的轨道电导率明显小于静态情况下，致使趋肤深度增大、电流密度减小．在电流峰值处，两种情况下电流密度差异最大，这是因为在此时轨道动态电导率较静态值下降最为明显．伴随着电枢出膛，电导率呈现回升的趋势，两者差距逐渐减小．



(a) 考虑动态电导率情况(t=0.39 ms)

(b) 不考虑动态电导率情况(t=0.39 ms)

图 13　考虑与不考虑轨道动态电导率情况下电流密度分布

轨道电导率受多种因素影响，其中温度是影响电导率的重要因素．电枢出膛时刻轨道沿电枢运动方向的温度分布如图 14 所示，可知轨道温度分布沿电枢运动方向呈现先上升后下降的趋势，这是因为由电枢运动产生的焦耳热和摩擦热来不及散出，会在轨道上形成累积导致温度升高．在电枢发射初始阶段，电枢初始位置温度最高，呈现出两个峰值．第一次温度峰值主要因为电流的快速上升导致焦耳热急剧变大；第二次温度峰值主要因为在电枢速度提高和纵向洛伦兹力增大的过程中摩擦热的累积影响．伴随着电枢运动至出膛，电流逐渐减小，电枢所在位置的轨道温度逐渐趋于稳定值．

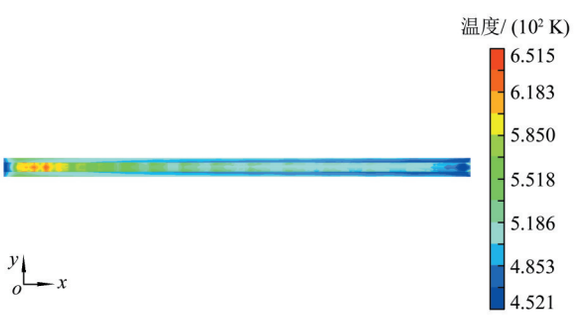


图 14　电枢出膛时刻轨道温度分布图

不同情况下的速度-时间曲线如图 15 所示．通过对比不同情况下速度随时间的变化发现：考虑动态电导率的电枢速度小于不考虑条件下的，在 0.4 ms 之前两者速度差距不明显，因为电枢在起步阶段耗费时间较长，电导率对电枢速度的影响较小；在 0.4 ms 之后，二者速度开始产生差距，表明随着电枢速度的提升，轨道电导率会对电枢的运动特性产生明显影响，较小的电导率会造成轨道导电性能变差从而导致电枢速度减小．在 0.9 ms 处，实验测量的电枢速度为 1 038.12 m/s．在不考虑动态电导率的情况下，电枢速度为 1 066.47 m/s，误差为 2.73 %．在考虑动态电导率的情况下得到的电枢速度为 1 051.62 m/s，误差为 1.3 %．与不考虑动态电导率的条件相比，本文方法的误差更小，表明通过该方法获得的轨道动态电导率能够提高数值计算模型的精度，验证其有效性．

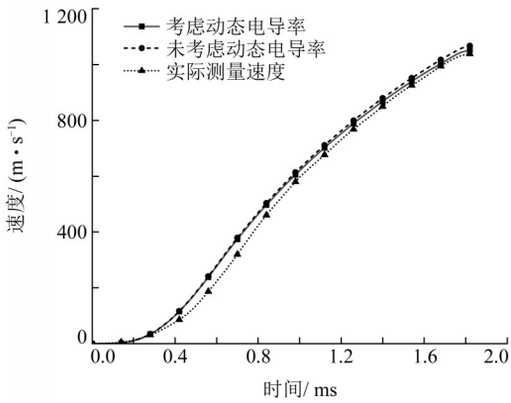


图 15　不同情况下电枢速度对比图

3　结论

a．通过分段建模的方法，构建电磁推进装置轨道动态电导率和后膛电压、膛口电压、感应电动势、轨道电流、电枢速度的解析模型 $\sigma = f(t, v, U_w, U_k, U_E, I)$．

b．轨道电导率整体分布不均，受到轨道温升等因素的影响．由于轨道温度在电枢初始位置较高，随后下降，因此轨道电导率呈现先下降后上升的趋势，且整体小于常温下的轨道电导率．

c．轨道动态电导率会对电枢的运动特性产生明显影响，较小的轨道电导率会造成轨道导电性能变差，从而导致动态轨道电导率条件下电枢速度减小，且随着电枢位移的增大，速度减小量越大．

参　考　文　献

[1] 鲁军勇，胡鑫凯，谭赛，等．电磁轨道发射装置绝缘支撑体研究现状及展望[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2023，51(10)：84-93．

[2] CHEN L X，HE J J，XIA S G，et al．Study on the tail structure of a C-type armature in the nonequal-cross-section cantilever model[J]．IEEE Transactions on Plasma Science，2013，41(5)：1498-1502．

[3] 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．

[4] MA W M，LU J Y，LIU Y Q．Research progress of electromagnetic launch technology[J]．IEEE Transactions on Plasma Science，2019，47(5)：2197-2205．

[5] MA W M，LU J Y．Thinking and study of electromag-

netic launch technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2017，45(7)：1071-1077.

[6] JIN L，GONG D X，YAN Y G，et al. Armature electromagnetic force extrapolation prediction method for electromagnetic railgun at high speed[J]. Applied Sciences，2023，13(6)：3819.

[7] KESHTKAR A，GHARIB L，BAYATI M S，et al. Simulation of a two-turn railgun and comparison between a conventional railgun and a two-turn railgun by 3-D FEM [J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2013，41 (5)：1392-1397.

[8] LI C X，CHEN L X，XIA S G，et al. Simulations on saddle armature with concave arc surface in small caliber railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2019，47(5)：2347-2353.

[9] 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]. 高电压技术，2024，50(10)：4749-4759.

[10] 靳智，沈培辉，刘凯. 电磁轨道炮固体电枢的运动特性分析[J]. 弹箭与制导学报，2014，34(1)：115-117.

[11] 金亮，巩德鑫. 电磁轨道炮电枢电磁推力特性分析与验证[J]. 火炮发射与控制学报，2023，44(6)：1-7.

[12] 贺景瑞，李小将. 增强型电磁轨道发射器电磁场和电感梯度仿真分析[J]. 兵工自动化，2018，37(8)：78-82.

[13] 吴金国，李海元，程年凯，等. 电磁轨道炮电枢馈电位置研究[J]. 兵工学报，2017，38(6)：1052-1058.

[14] 关永超，邹文康，何勇，等. 串联型双轨增强电磁轨道炮电路模拟[J]. 强激光与粒子束，2014，26(11)：115001.

[15] 王志增，袁伟群，严萍. 瞬态情况下电磁轨道发射器的电感梯度[J]. 高电压技术，2017，43(12)：4039-4044.

[16] 李世立，杜文斌，曹志元，等. 电磁轨道炮轨道扩张力测试方法研究[J]. 火炮发射与控制学报，2026，47 (3)：40-45.

[17] 李贞晓，张亚舟，倪琰杰，等. 晶闸管关断特性在增强型轨道发射系统中的影响分析[J]. 兵工学报，2016，37(9)：1599-1605.