

郭凤仪,郭宏运,王敏,等. 横向磁场对弓网系统滑动电接触表面摩擦磨损特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025,44(5):614-620.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240370  
GUO Fengyi, GUO Hongyun, WANG Min, et al. Influence of transverse magnetic field on friction and wear characteristics of sliding electrical contact surface in pantograph-catenary system[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025,44(5): 614-620.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240370

## 横向磁场对弓网系统滑动电接触表面 摩擦磨损特性的影响

郭凤仪<sup>1,2</sup>, 郭宏运<sup>1</sup>, 王敏<sup>3</sup>, 赵奇<sup>4</sup>, 王智勇<sup>5\*</sup>

(1. 温州大学 电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 温州大学 乐清工业研究院, 浙江 温州 325600; 3. 国网山东省电力公司荣成市供电公司, 山东 威海 264300; 4. 国能北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026000; 5. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 针对弓网系统滑板材料受摩擦磨损作用导致使用寿命缩短和电接触性能下降的问题, 通过滑动电接触实验研究外加横向磁场对滑板摩擦磨损特性的影响规律, 并建立基于鹈鹕优化算法改进的BP神经网络预测模型。研究表明: 摩擦系数随磁场强度增大先升高后降低。滑动速度增大时, 滑板磨损率随磁场强度增大先增加后减小。回路电流或接触压力增大时, 磨损率随磁场强度增大而减小。合适的磁场强度可减少滑板碳层的剥落, 降低表面粗糙度值, 起到减磨效果。研究结论为弓网系统滑板材料的性能优化和寿命预测提供有效方法。

**关键词:** 滑动电接触; 摩擦磨损; 横向磁场; 磨损量预测; BP神经网络; 磁场强度

中图分类号: U225.6

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0614-07

### Influence of transverse magnetic field on friction and wear characteristics of sliding electrical contact surface in pantograph-catenary system

GUO Fengyi<sup>1,2</sup>, GUO Hongyun<sup>1</sup>, WANG Min<sup>3</sup>, ZHAO Qi<sup>4</sup>, WANG Zhiyong<sup>5\*</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. Technology Institute of Wenzhou University in Yueqing, Yueqing 325600, China; 3. State Grid Rongcheng Power Supply Company of Shandong Electric Power Company, Rongcheng 264300, China; 4. Guoneng Nortel Shengli Energy Company Limited, Xilingol 026000, China; 5. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the service life of pantograph-catenary system slide plate material is shortened and the electrical contact performance is reduced due to friction and wear, the influence of external transverse magnetic field on the friction and wear characteristics of slide plate is studied through sliding electrical contact experiments, and the BP neural network prediction model based on Pelican optimization algorithm is established. The results show that the friction coefficient first increases and then decreases with the increase of magnetic field strength; when the sliding speed increases, the wear rate of the sliding plate increases first and then decreases with the magnetic field strength; when the contact current or contact pressure increases, the wear rate decreases with the increase of magnetic field strength. Appropriate magnetic field strength can reduce the spalling of carbon layer on the sliding plate, reduce the surface roughness and reduce the wear. The research results can provide an effective method for the performance optimization and life prediction of the pantograph catenary-system slide plate material.

**Keywords:** sliding electrical contact; friction and wear; transverse magnetic field; wear amount prediction; BP neural network; magnetic field strength

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2024-12-23 接受日期: 2025-03-21 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477153); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJ242410147030); 温州市创新联合体专项项目(ZG2022002)

作者简介: 郭凤仪(1964-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 主要从事电器基础理论方面的研究。E-mail: fgyuo64@126.com

通信作者: 王智勇(1982-), 男, 辽宁葫芦岛人, 博士, 副教授, 主要从事电器基础理论方面的研究。E-mail: wangzhiyong\_office@163.com

0 引言

电力列车通过弓网系统的滑动电接触获取电能, 电气因素使滑板与接触网导线接触界面的摩擦磨损行为变得更为复杂。在不同外部环境及运行工况下, 滑板的摩擦磨损行为表现出不同特性。滑板表面损伤不仅影响弓网系统的导电性能, 同时异常磨损还会缩短滑板使用寿命, 威胁列车运行安全。

近年来, 学者通过自行设计的滑动电接触实验机对滑动电接触表面摩擦磨损特性开展了大量研究。GUO 等<sup>[1]</sup>分析表面粗糙度对弓网系统接触电阻、载流效率、受流稳定性和摩擦系数等性能的影响, 揭示了粗糙度对受流性能的作用机制。高国强等<sup>[2]</sup>研究界面氧化对电接触性能的影响, 发现薄氧化膜可降低接触电阻, 但过厚的氧化膜会导致接触性能下降。黄仕银<sup>[3]</sup>研究表明, 复合材料的摩擦因数和磨损率会随电流密度增加而上升, 其接触电压在磨损初期较小, 随后增大并趋于稳定。此外, 秦红玲等<sup>[4]</sup>认为回路电流会使摩擦副温度升高, 滑动速度会影响表面膜的生成, 高温是导致膜破坏的原因之一。HE 等<sup>[5]</sup>发现纵向磁场能有效降低摩擦系数及其波动性, 且摩擦系数随磁感应强度增加呈先下降后上升的趋势。回立川等<sup>[6]</sup>研究表明, 电流增大会导致滑板表面的凹坑增多, 而接触压力增大时, 凹坑面积减小, 凹坑数量则呈现先减小后增多的变化。WU 等<sup>[7]</sup>发现, 当湿度升高时, 载流摩擦系数和接触电阻均先增加后减少, 二者在相对湿度为 30% 时达到最大值。由于滑板的摩擦磨损特性受多种因素影响, 其中外加横向磁场的影响机制尚不明确, 因此, 研究载流条件下外加横向磁场对滑板摩擦磨损特性的影响具有重要意义。

基于此, 本文采用高性能滑动电接触实验机, 在恒定横向磁场环境下进行浸金属碳滑板与铜接触线的载流摩擦磨损实验。通过改变磁场强度、滑动速度、接触压力和接触电流等参数, 获得滑板摩擦系数、磨损率随磁场强度变化的规律, 研究横向磁场对滑板摩擦磨损行为的影响, 并利用经参数优化的 BP 神经网络对滑板磨损量进行预测。

1 实验设备与方案

1.1 实验设备

滑动电接触实验系统见图 1。其中数据采集卡可实现电流信号、电压信号的采集并传输到上位机, 采样频率为 10 kHz。实验前后分别使用精度为 0.001 g 的 BSM-520.3 型电子精密天平称量滑板

的质量, 并利用 JSM-7100F 型扫描电子显微镜观察实验后滑板的表面形貌。

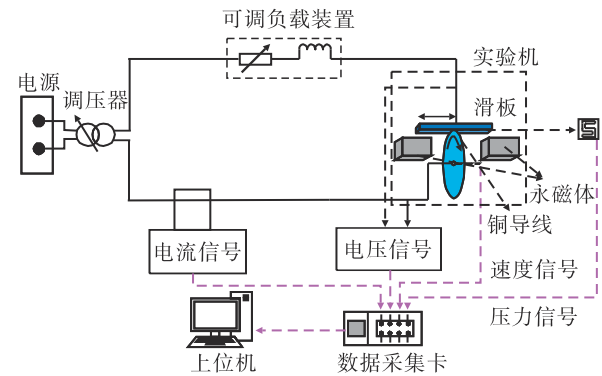


图 1 滑动电接触实验系统

Fig.1 sliding electrical contact experimental system

1.2 实验材料和参数

在温度为 25 ℃、相对湿度为 42% 的环境下, 开展不同接触压力、滑动速度和回路电流条件对弓网系统载流摩擦磨损试验。实验所用铜接触线截面积为 120 mm<sup>2</sup>, 浸金属碳滑板尺寸为 250 mm×36 mm×25 mm, 铜接触线和浸金属碳滑板的材料属性见表 1。将尺寸为 3 cm×4 cm×5 cm 的永磁体通过支架固定于滑板与接触线接触区域的正上方, 通过调节支架高度以改变施加的磁场强度。

表 1 浸金属碳滑板与接触线的材料属性  
Tab.1 material properties of metal impregnated carbon slide and contact wire

| 参数                                        | 滑板                  | 接触线                   |
|-------------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| 杨氏模量/(10 <sup>10</sup> ·Pa)               | 1.26                | 11.00                 |
| 泊松比                                       | 0.425               | 0.350                 |
| 电导率/(S·m <sup>-1</sup> )                  | 7.8×10 <sup>3</sup> | 5.56×10 <sup>7</sup>  |
| 导热系数(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 260                 | 380                   |
| 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )                  | 2 400               | 8 700                 |
| 电阻率/(Ω·m)                                 | 8×10 <sup>-6</sup>  | 1.72×10 <sup>-8</sup> |

实验采用单变量法设计。实验前使用相同型号的砂纸处理滑板表面并测量表面粗糙度, 以保证初始表面粗糙度一致。每组实验的滑动距离为 6 km, 具体实验方案见表 2。

表 2 实验方案  
Tab.2 experimental scheme

| 工况 | 横向磁场<br>Φ/mT | 接触压力 F/N       | 回路电流 I/A       | 滑动速度 V/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| 1  | 0、25、50      | 50             | 30、40、50、60、70 | 70                               |
| 2  | 0、25、50      | 50             | 50             | 30、40、50、60、70                   |
| 3  | 0、25、50      | 30、40、50、60、70 | 50             | 70                               |

2 实验结果与分析

2.1 回路电流对摩擦磨损特性的影响

在工况 1 条件下, 不同回路电流下的摩擦系数

和磨损率见图2。

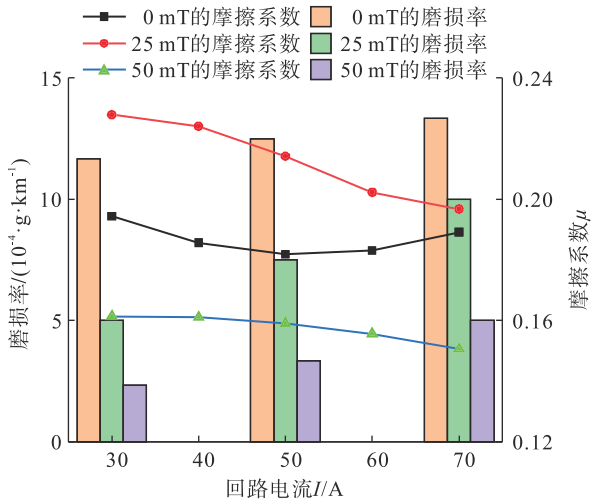


图2 不同回路电流对摩擦磨损特性的影响(工况1)

Fig.2 influence of contact current on friction and wear characteristics (working condition 1)

由图2可知,在横向磁感应强度为50 mT下,摩擦系数较无磁场条件降低;而在磁感应强度为25 mT时,摩擦系数则高于无磁场条件<sup>[8]</sup>。无磁场时,摩擦副温升促使铜与空气发生氧化反应<sup>[9]</sup>,生成具有润滑作用的氧化膜<sup>[10]</sup>,导致摩擦系数随接触电流增大而下降。施加磁场后,顺磁性氧气加速铜氧化,同时带电金属粒子在洛伦兹力作用下沿摩擦界面回旋,随磁场强度增大,粒子回旋半径减小,回旋频率升高。在低磁场强度下,粒子运动范围扩大,加剧磨粒磨损与表面粗糙化<sup>[11]</sup>,推升摩擦系数。在高磁场强度下,粒子运动受限,铜转移量减少,磨粒磨损减轻,摩擦系数下降。当回路电流达到70 A时,摩擦系数显著降低。强电流诱发材料软化<sup>[12]</sup>、黏着磨损及电弧烧蚀加剧<sup>[13]</sup>,使滑板表面粗糙化且磨损量增加,但磁场促使铜屑富集于铜块区域,抑制碳层剥落,从而整体降低滑板磨损。带电金属粒子在磁场中运动时所受洛伦兹力 $F$ 及其回旋半径 $r$ 、回旋频率 $\omega$ 的表达式为

$$F = q(E + vB), \quad (1)$$

$$r = mv_{\perp}/qB, \quad (2)$$

$$\omega = qB/m, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $q$ 为粒子的电荷,C; $E$ 为电场强度,N/C; $v$ 为带电粒子的速度,m/s; $B$ 为磁感应强度, $\mu$ T; $v_{\perp}$ 为垂直于磁场方向的速度分量,m/s; $m$ 为带电金属粒子质量,mg。

工况1下浸金属碳滑板磨损后表面形貌见图3。

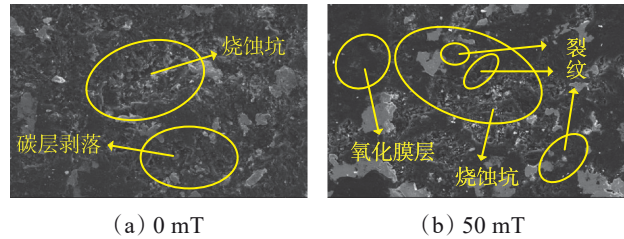


图3 工况1下浸金属碳滑板磨损后表面形貌

Fig.3 surface morphology of the metal impregnated carbon slide after wear under working condition 1

由图3可见,滑板表面出现大面积烧蚀现象。电流的持续作用诱发热应力裂纹并形成烧蚀通道。无磁场时,烧蚀面积<sup>[14]</sup>和磨损深度均较大<sup>[15]</sup>。施加横向磁场后,碳层剥落现象不明显。这是因为磁场促使硬质磨粒加速排出摩擦区域,减少了磨粒磨损;同时,强电流产生的焦耳热导致温升加剧,材料表面软化形成润滑膜,有效缓解界面材料的犁削与黏着问题。

## 2.2 滑动速度对摩擦磨损特性的影响

工况2下,不同滑动速度下的摩擦系数和磨损率见图4。

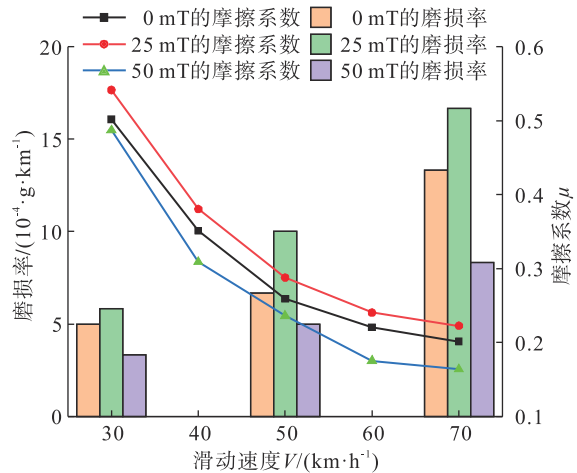


图4 不同滑动速度对摩擦磨损参数的影响(工况2)

Fig.4 influence of different sliding speed on friction and wear characteristics (working condition 2)

由图4可见,无磁场时,随着滑动速度增加,摩擦副的摩擦系数呈逐渐下降趋势。其原因是:滑动速度增加虽加剧了机械摩擦<sup>[16]</sup>,但摩擦热在接触表面的快速积聚使材料软化<sup>[17]</sup>,接触界面微凸体<sup>[18]</sup>被磨平,从而导致摩擦系数减小。在25 mT磁场下,机械摩擦和电流的共同作用使铜在接触界面富集,引发微裂纹甚至导致材料块状剥落,破坏润滑膜完整性并显著增加粗糙度<sup>[19]</sup>,致使摩擦系数升高。而在50 mT磁场下,磁场促进了磨屑排出,维持了润滑膜完整性,因此摩擦系数下降,

且在滑动速度达到 60 km/h 后趋于稳定。在 25 mT 磁场下, 磁场导致铜粒子偏移转移, 加剧磨粒磨损并阻碍氧化膜形成, 故磨损量增加。在 50 mT 磁场下, 铜的氧化速率加快, 形成的表面膜使磨损量减少。

在工况 2 下, 浸金属碳滑板磨损后表面形貌见图 5。

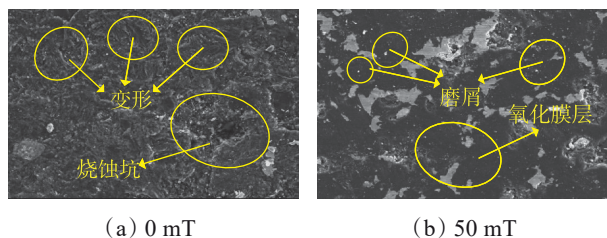


图 5 工况 2 下浸金属碳滑板磨损后表面形貌

Fig.5 surface morphology of the metal impregnated carbon slide after wear under working condition 2

由图 5 可见, 无磁场条件下, 随着滑动速度增加, 滑板表面发生大量铜材料转移, 磨粒磨损加剧; 同时, 高温诱发的黏着磨损使磨损界面碳材料软化变形<sup>[20]</sup>。高速滑动进一步加剧摩擦热积累, 导致蚀坑面积与深度增大<sup>[21]</sup>。在有磁场条件下, 滑板表面的铜转移现象显著受抑, 且少量转移铜层的氧化程度更高。铜氧化速率加快促进了氧化膜形成, 进而减少碳层剥落。

### 2.3 接触压力对摩擦磨损特性的影响

工况 3 下, 不同接触压力下的摩擦系数、磨损率见图 6。

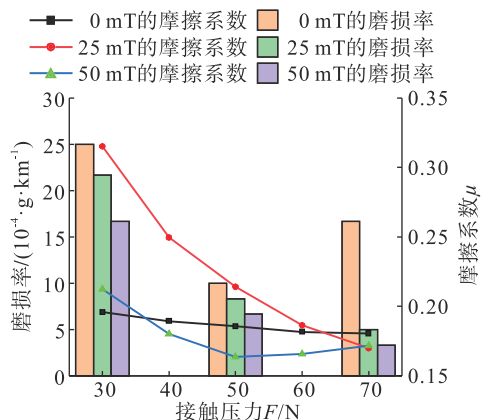


图 6 不同接触压力对摩擦磨损参数的影响(工况 3)

Fig.6 influence of contact pressure on friction and wear characteristics (working condition 3)

由图 6 可见, 随着接触压力增大, 摩擦系数逐渐减小, 这是由于接触压力增加, 微凸体塑性变形<sup>[22]</sup>, 微凸体被磨平, 实际接触面积扩大, 接触面趋于光滑<sup>[23]</sup>, 从而降低摩擦系数。在低接触压力

区, 25 mT 磁场下铜粒子活动性增强, 表面微凸体密度相对上升推高摩擦系数, 同时铜扩散范围扩大加剧磨粒磨损, 进一步增大摩擦系数。在 50 mT 磁场下, 接触压力为 50 N 时摩擦系数出现拐点。其原因在于压力增加虽加剧机械摩擦, 但显著提升接触稳定性<sup>[24]</sup>。而降低离线率和减轻电弧烧蚀, 二者竞争作用形成转折。在无磁场条件下, 磨损率呈现一直减小的趋势。而 50 mT 磁场条件下, 随着接触压力的增加, 滑板的磨损率先减小后增大。这是由于在无磁条件下, 接触压力较大时机械磨损加剧, 磨损率上升。

当接触压力增大时, 机械磨损加剧, 温度迅速上升。高温使铜局部熔融形成熔融颗粒; 氧化作用则促进表面氧化膜生成, 此时表面出现明显的犁沟状形貌 (见图 7)。然而, 更大的接触压力亦抑制铜材料转移并降低表面粗糙度<sup>[25]</sup>, 同时削弱电弧热效应。此外, 磁场促使硬质磨粒加速排出摩擦区域, 一方面减缓磨粒磨损, 另一方面减少对润滑膜的破坏。上述作用共同抑制界面温升, 减轻摩擦磨损。

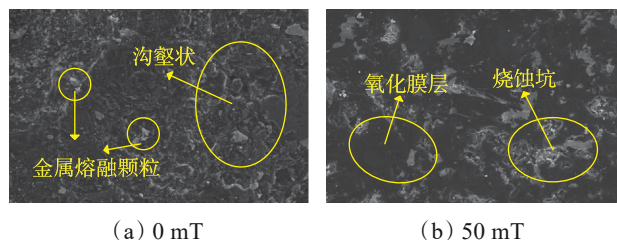


图 7 工况 3 下浸金属碳滑板磨损后表面形貌

Fig.7 surface morphology of the metal impregnated carbon slide after wear under working condition 3

## 3 磨损量预测模型

### 3.1 磨损量预测模型建立

基于第 2 节的研究成果, 以弓网摩擦副的横向磁场强度、接触压力、滑动速度和回路电流为自变量, 滑板的磨损量为因变量, 建立磨损量预测模型。

BP 神经网络因其出色的非线性建模能力, 在解决复杂预测问题方面相比传统方法优势显著<sup>[26]</sup>。因此, 本文采用 BP 神经网络构建滑板磨损量预测模型。模型输入层设置 4 个神经元, 对应横向磁场强度、接触压力、滑动速度、回路电流, 输出层设置 1 个神经元, 对应滑板磨损量。模型训练过程中, 误差通过反向传播算法从输出层传递至输入层, 并通过调整网络权重和阈值进行优化。

然而, BP 神经网络训练常出现过拟合现象,

导致模型泛化能力下降和预测误差增大。为提升模型性能,引入鹈鹕优化算法(pelican optimization algorithm, POA)<sup>[27]</sup>优化BP神经网络的权重和阈值参数。POA是一种模拟鹈鹕捕食行为的新颖仿生优化算法。

POA将鹈鹕捕食过程抽象为2个阶段:①勘探阶段(逼近猎物),鹈鹕识别猎物位置并向它移动,该过程可进行数学建模;②开发阶段(水面捕食),鹈鹕到达水面后展开翅膀捕猎,并将猎物转移至喉囊。此策略旨在最大化目标区域捕获猎物,可通过数学模型描述为

$$\mathbf{x}_{i,j}^{p_1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{i,j} + r_{\text{and}}(P_j - I\mathbf{x}_{i,j}) & F_p < F_i \\ \mathbf{x}_{i,j} + r_{\text{and}}(I\mathbf{x}_{i,j} - P_j) & F_p \geq F_i \end{cases}, \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_{i,j}^{p_2} = \mathbf{x}_{i,j} + R \left(1 - \frac{t}{T}\right) (2r_{\text{and}} - 1) \mathbf{x}_{i,j}, \quad (5)$$

式(4)、式(5)中: $\mathbf{x}_{i,j}^{p_1}$ 、 $\mathbf{x}_{i,j}^{p_2}$ 分别为第1、2阶段更新之后第*i*个鹈鹕个体的第*j*维位置; $\mathbf{x}_{i,j}$ 为第1、2阶段更新之前第*i*个鹈鹕个体的第*j*维位置; $r_{\text{and}}$ 为[0,1]内的随机数; $P_j$ 为猎物的第*j*维位置; $F_p$ 为猎物的适应度函数值; $F_i$ 第*i*个鹈鹕个体的适应度值; $I$ 为取值1的系数; $R$ 为开发阶段搜索半径系数; $T$ 为最大迭代次数。

若适应度函数值在第1或第2阶段的第*j*维位置得到了改善,应更新鹈鹕的位置,数学描述为

$$\mathbf{x}_i = \begin{cases} \mathbf{x}_i^{p_\sigma} & F_i^{p_\sigma} < F_i \\ \mathbf{x}_i & F_i^{p_\sigma} \geq F_i \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}_i^{p_\sigma}$ 为第*i*只鹈鹕个体在阶段σ的新位置; $F_i^{p_\sigma}$ 为更新后对应的适应度函数值;σ为捕食过程的2个阶段,取1或2。

在种群演化的每一代中,先计算鹈鹕个体新位置的适应度值以评估该位置的优势。随后,根据适应度值选取种群当前最优解,并以该最优解为引导更新其余个体的位置。若个体在局部搜索阶段未获得改进(适应度值未提升),则触发其全局搜索行为以增强探索能力。基于POA优化BP神经网络的预测模型计算流程见图8。

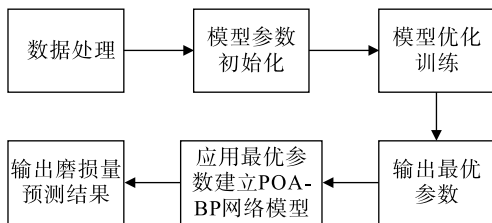


图8 基于POA-BP的磨损量预测模型计算流程

Fig.8 calculation flow of wear amount prediction model based on POA-BP

### 3.2 模型参数设置

POA算法的参数设置如下。鹈鹕种群规模为20,最大迭代次数为100,位置参数搜索范围设定为[0.01,100]。实验样本总数为81,随机选取65组作为训练集,其余16组作为测试集。BP神经网络结构参数为:输入层神经元数4,输出层神经元数为1,隐藏层神经元数在[3,12]内优化确定;最大训练次数为1000,学习率为0.01,训练目标误差为 $1 \times 10^{-6}$ 。

为确定POA-BP预测模型的最优结构,分析不同隐藏层神经元数量的影响,并计算训练集的均方误差(RMSE),结果见图9。可知当隐藏层神经元个数为10时,POA-BP预测模型的误差最小为 $1.1095 \times 10^{-2}$ 。因此,最终将BP神经网络的结构设为4-10-2-1,见图10。

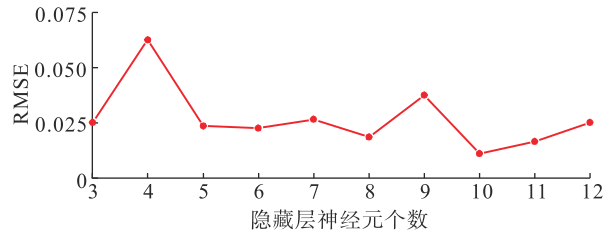


图9 POA-BP参数预测模型的均方误差

Fig.9 mean square errors of the POA-BP's model parameters

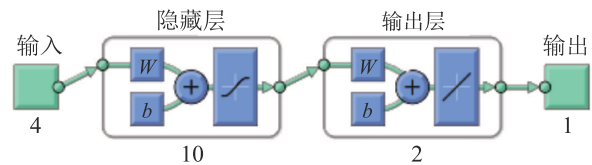


图10 BP神经网络结构

Fig.10 structure of BP neural network

### 3.3 模型验证

分别将BP预测模型与POA-BP预测模型用于滑板磨损量的预测,所得磨损量预测结果见图11。

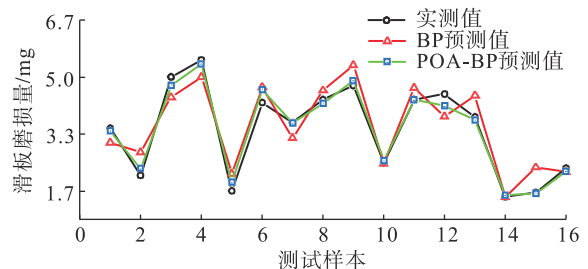


图11 2种模型对滑板磨损量预测值和实测值对比

Fig.11 comparison of predicted and actual wear amount of the slide by the two models

由图 11 可见, POA-BP 模型的预测值更接近实测值。采用均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 作为评价指标评估模型性能, 引入决定系数  $R^2$  反映模型对目标变量变异的解释能力。计算结果见表 3。由表 3 可知, POA-BP 模型的 RMSE 和 MAE 值均显著低于 BP 模型。POA-BP 模型的  $R^2$  值更高。上述误差指标与解释能力评估, 说明 POA-BP 模型的预测性能优于 BP 模型。

表 3 模型评估参数

Tab.3 model evaluation parameters

| 模型     | RMSE  | MAE   | $R^2$ |
|--------|-------|-------|-------|
| BP     | 1.957 | 1.702 | 0.905 |
| POA-BP | 1.391 | 1.005 | 0.967 |

4 结论

(1) 在相同工况下, 摩擦系数和磨损率随磁场强度增加呈先升高后降低的趋势, 摩擦系数在 25 mT 时达到最大值。磁场强度增加时, 磨损率随滑动速度先增加后减少; 当回路电流或接触压力增大时, 磨损率则随磁场强度增加逐渐降低。

(2) 在横向磁场下, 浸金属滑板的微观形貌与无磁场状态时的差异显著。无磁场时, 表面以碳层片状剥落和电弧烧蚀为主, 黏着磨损严重; 在横向磁场条件下, 电弧烧蚀集中于铜区域, 氧化速率加快, 形成的氧化膜隔离了碳与铜的直接接触, 减少了黏着和犁削磨损。

(3) 通过鸚鵡算法优化 BP 神经网络, 建立了横向磁场、接触压力、滑动速度和回路电流对磨损量的预测模型, 该模型能够比较准确地预测滑板的磨损量。

参考文献(References):

[1] GUO F Y, WANG X K, KOU J B, et al. Impact of surface roughness on pantograph-catenary current collection quality[J]. IEEE Access, 2022, 10: 93951-93959.

[2] 高国强, 王青松, 何志江, 等. 界面氧化对碳-铜接触副电接触性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8502-8511.

GAO Guoqiang, WANG Qingsong, HE Zhijiang, et al. Influence of interface oxidation on the electrical contact properties of C-Cu contact pairs[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8502-8511.

[3] 黄仕银. 电流密度对铜基自润滑材料电摩擦性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(2): 77-80.

HUANG Shiyin. Influence of current density on electrical friction property of Cu-based self-lubricating materials[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(2): 77-80.

[4] 秦红玲, 王锦涛, 李洪波, 等. 运行工况对碳刷/集电环摩擦副表面膜形成的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 178-188.

QIN Hongling, WANG Jintao, LI Hongbo, et al. Effect of operating conditions on friction surface film formation of carbon brush/slip ring assemblies[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 178-188.

[5] HE Z J, NI Z R, WANG H, et al. Effect of magnetic field on the current-carrying friction and wear performance of C/Cu contact pairs[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. April 11-15, 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021: 1-4.

[6] 回立川, 王紫陶. 弓网系统波动接触压力下接触电阻波动性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 484-490.

HUI Lichuan, WANG Zitao. Fluctuation of the contact resistance of pantograph-catenary under fluctuating contact pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(4): 484-490.

[7] WU R X, SONG C F, WU H H, et al. Effect of relative humidity on the current-carrying tribological properties of Cu-C sliding contact pairs[J]. Wear, 2022, 492: 204219.

[8] YU X Y, SONG M J, WANG Z. Simulation study on surface temperature distribution of collector strip material under pantograph-catenary arc of urban rail[J]. IEEE Access, 2023, 11: 68358-68365.

[9] 于淼, 回立川, 陈忠华. 采用随机森林算法的弓网滑动电接触失效预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 462-469.

YU Miao, HUI Lichuan, CHEN Zhonghua. Sliding contact failure forecasting of pantograph catenary system based on random forests model[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2022, 41(5): 462-469.

[10] LIU Z G, SONG Y, GAO S B, et al. Review of perspectives on pantograph-catenary interaction research for high-speed railways operating at 400 km/h and above[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 7236-7257.

[11] 冯一桐, 王智勇, 郭凤仪, 等. 弓网系统滑动电接触表面磨损特征研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(6): 53-60.

FENG Yitong, WANG Zhiyong, GUO Fengyi, et al. Research on wear characteristics of sliding electrical contact surface in pantograph-catenary system[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(6): 53-60.

[12] GUO F Y, GU X, LI L, et al. Effect of surface microparameters on contact temperature of sliding electrical contact[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 5972-5981.

[13] JIN M Z, WANG S Q, LIU S H, et al. Statistical study on the time characteristics of the transient EMD excitation current from the pantograph-catenary arcing discharge[J]. Electronics, 2023, 12(5): 1262.

[14] 刘新龙, 周朝伟, 王冬云, 等. 不同电流下的电弧侵蚀对浸铜碳滑板/铬锆铜接触线磨损机理的影响[J]. 摩擦学报(中英文), 2024, 44(2): 189-199.

LIU Xinlong, ZHOU Chaowei, WANG Dongyun, et al. Effect of arc erosion under different currents on wear mechanism of impregnated copper carbon skateboard/Cr-Zr-Cu contact wire[J].

- Tribology, 2024, 44(2): 189-199.
- [15] 石红信, 张永振, 孙超, 等. 中碳钢/不锈钢磁场摩擦中磨屑的行为和作用[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 188-196.
- SHI Hongxin, ZHANG Yongzhen, SUN Chao, et al. Behaviors and effect of the wear debris during friction between medium-carbon steel and stainless steel with the magnetic field[J]. Tribology, 2019, 39(2): 188-196.
- [16] 刘达毅, 范杰, 董丙杰, 等. 刚性接触网中浸金属碳滑板在不同法向载荷下的载流摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2023, 48(2): 89-94.
- LIU Dayi, FAN Jie, DONG Bingjie, et al. Friction and wear performance of metal-impregnated carbon strips against a rigid catenary under different normal force[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(2): 89-94.
- [17] 陈忠华, 李纪臻, 邢植良, 等. 强电流下弓网滑动电接触磨损特性分析和建模[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 740-747.
- CHEN Zhonghua, LI Jizhen, XING Zhiliang, et al. Analysis and modeling of wear characteristics of pantograph-catenary sliding electrical contact under high current[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(6): 740-747.
- [18] WANG Y, HUANG Q, CHEN X Q, et al. Dynamic characteristics analysis of double pantograph catenary of AC rigid catenary system[J]. IEEE Access, 2023, 11: 70396-70407.
- [19] 支兴帅, 周宁, 张欣, 等. 基于磨屑分析的城市轨道交通弓网系统磨损机制研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 46-50.
- ZHI Xingshuai, ZHOU Ning, ZHANG Xin, et al. Study on wear mechanism of pantograph-catenary system in urban rail transit based on wear debris analysis[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(5): 46-50.
- [20] 李侯辰, 王智勇, 郭凤仪, 等. 滑动电接触表面微观形貌影响因素分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 265-269.
- LI Yuchen, WANG Zhiyong, GUO Fengyi, et al. Analysis of influence factors of the surface micro-topography of sliding electrical contact[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(3): 265-269.
- [21] 曾子毅, 何泉鑫, 陈光雄, 等. 环境湿度对浸金属碳滑板磨损及温升的影响[J]. 润滑与密封, 2024, 49(2): 98-105.
- ZENG Ziyi, HE Quanxin, CHEN Guangxiong, et al. Influence of environment humidity on wear and temperature rise of metal-impregnated carbon strip[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(2): 98-105.
- [22] 陈忠华, 李兵红, 陈明阳, 等. 弓网滑动电接触电磁热力耦合效应研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2777-2793.
- CHEN Zhonghua, LI Binghong, CHEN Mingyang, et al. Research advances in electrical-magnetic-thermal-mechanical coupling effects of electric contact between pantograph and catenary[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2777-2793.
- [23] 陈忠华, 高浩宁, 陈明阳, 等. 载流摩擦振动对受电弓滑板摩擦特性的影响与磨损率建模[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(9): 55-64.
- CHEN Zhonghua, GAO Haoning, CHEN Mingyang, et al. Influence of current carrying friction vibration on friction characteristics of pantograph sliding plate and modeling of wear rate[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(9): 55-64.
- [24] 占栋, 高仕斌, 于龙. 刚性接触网磨耗动态检测系统视觉标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 99-109.
- ZHAN Dong, GAO Shibin, YU Long. Research on wear dynamic inspection for rigid catenary and corresponding vision modeling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 99-109.
- [25] 邹栋, 钟舜聪, 耿妍, 等. 城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 152-178.
- ZOU Dong, ZHONG Shuncong, GENG Yan, et al. Status analysis and prevention-treatment technology study of abnormal wear of pantograph catenary system in urban rail transit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 152-178.
- [26] 田家怡, 彭祥玉, 张帅, 等. 基于BP神经网络的白云母超细磨工艺参数优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 273-278.
- TIAN Jiayi, PENG Xiangyu, ZHANG Shuai, et al. Optimization of muscovite ultrafine grinding process parameters based on BP neural network[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(3): 273-278.
- [27] 高洁, 伊雨, 赵雯宇, 等. 基于POA-ELM的含煤地层异常构造分类[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4135-4144.
- GAO Jie, YI Yu, ZHAO Wenyu, et al. Classification of coal-bearing strata abnormal structure based on POA-ELM[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4135-4144.