

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.023

弓网滑动电接触多目标条件下最优压力载荷决策研究

陈忠华¹, 李 铎¹, 陈明阳², 平 宇², 王喜利¹

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网冀北电力有限公司唐山市丰南区供电分公司, 河北 唐山 063300)

摘要: 在电气化铁路的弓网系统滑动电接触中, 受压力载荷影响的载流效率、载流相对稳定系数、磨损率、接触电阻是反映弓网摩擦和受流效果的重要参数。利用实验数据, 通过蛇算法优化极限学习机得到四个参数的预测模型, 以此为基础建立最优压力载荷目标函数; 针对压力载荷寻优问题提出一种参考点生成方式对非支配排序遗传算法—III进行改进, 并对压力载荷进行寻优得到均匀广泛的pareto前沿解集; 采用CRITIC法计算pareto前沿解集的客观权重, 考虑机车运行速度的影响引入自适应因子, 得到自适应权重, 最终通过虚拟最劣解TOPSIS法决策确定最优压力载荷, 为弓网压力载荷的主动控制提供理论基础。

关键词: 弓网; 最优压力载荷; 多目标寻优; 多目标决策

Study on Optimal Pressure Load Decision of Sliding Contact in the Pantograph-catenary System Under Multi-objective Condition

CHEN Zhonghua¹, LI Duo¹, CHEN Mingyang², PING Yu², WANG Xili¹

(1. Institute of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China; 2. Tangshan Fengnan District Power Supply Branch of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Hebei Tangshan 063300, China)

Abstract: In the sliding electrical contact of pantograph-catenary system of railway electrification system, the current carrying efficiency, current carrying relative stability coefficient, wear rate and the contact resistance affected by pressure load are important parameters reflecting the pantograph catenary friction and current collection effect. Firstly, the experimental data is used, the prediction model of four parameters is obtained by optimizing the extreme learning machine with snake algorithm. On this basis, the optimal pressure load objective function is set up. As for the pressure load optimization, a reference point generation method is proposed to improve the non-dominated sorting genetic algorithm-III. The pressure load is optimized to obtain a uniform and wide pareto solution set. The CRITIC method is used to calculate the objective weight of pareto solution set. Considering the influence of speed of train, an adaptive factor is introduced to obtain the adaptive weight. Finally, the optimal pressure load is determined by TOPSIS method of virtual worst solution so to provide theoretical basis for active control of pressure load of pantograph-catenary system.

Key words: pantograph-catenary; optimal pressure load; multi-objective optimization; multi-objective decision-making

0 引言

在电气化铁路弓网系统滑动电接触中, 选择合适的压力载荷是保障弓网系统稳定受流的关键因

素之一。过大的压力载荷会增大弓网系统的摩擦损耗, 较小的压力载荷又会增加弓网离线率, 增大接触电阻, 影响弓网系统的受流质量^[1-2]。

受到压力载荷影响的磨损率、载流效率、载流

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-09-27

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划资助项目(2019-ZD-0034)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Province(2019-ZD-0034).

相对稳定系数、接触电阻都是反应弓网摩擦和受流状态的重要参数。磨损率的大小体现了受电弓滑板的使用寿命,为了延长受电弓滑板寿命,在机车运行过程中要尽量降低磨损^[3];载流效率反映了弓网系统中载流质量,载流效率越高,说明弓网系统中电弧离线现象越少,接触稳定性越好^[4];载流相对稳定系数反映流偏离载流平均值,载流相对稳定系数越小则代表弓网保持良好的载流稳定性^[5];接触电阻小说明接触部分的温升小,弓网的受流质量高^[6]。确定最优压力载荷即是使以上4种参数达到相对理想状态。

近年来,基于支配的多目标进化算法,如NSGA-III^[7],在多目标优化中被大量的改进和应用,如文[8]通过改进NSGA-III算法以用户节点电压平均不平衡度、台区线路损耗和换相次数为目标对用户节点的相序进行优化减小线路损耗。NSGA-III算法基于参考点进行选择操作,可以高效的求解高维多目标优化问题,但根据文[9-10]中对算法测试结果可得原算法参考点集具有局限性,应根据不同的问题采用不同的参考点生成方式。多目标决策主要为主客观组合赋权并应用各种决策方法进行决策^[11-13],由于主观赋权法的使用条件严苛,不适合在弓网压力载荷的主动控制的实时决策控制中应用,故应采用客观赋权结合决策方法进行最优压力载荷决策。

在文[14-16]对压力载荷寻优的研究中,所考虑的目标参数不够全面;多目标寻优所得的压力载荷pareto前沿均匀性较差;在最优压力载荷决策中依赖于决策人的主观判断,缺少对pareto解集数据指标内在的信息和指标之间的关联性的考虑。

因此,文中利用实验数据对蛇算法优化的极限学习机神经网络(SO-ELM)进行训练得到弓网运行参数预测模型,并基于预测模型建立四目标最优压力载荷目标函数;在多目标寻优中,提出一种针对弓网压力载荷寻优问题的参考点生成方式改进非支配排序遗传算法—Ⅲ(NSGA-III),使用改进后的算法对目标函数进行寻优获得压力载荷pareto前沿解集;在多目标决策中,使用CRITIC法计算寻优所得前沿解集中各指标的客观权重,并考虑机车速度的特殊影响引入自适应因子对客观权重进行调整,得到更加适合当前速度的自适应权重,最终通过自适应权重结合虚拟最劣解TOPSIS法对弓网最优压力载荷进行决策。

1 滑动电接触实验和预测模型

1.1 滑动电接触实验

实验使用自制滑动电接触实验机进行见图1。

该实验机可以通过电机带动浸金属碳滑板左右运动来模仿机车运行中受电弓与接触导线之间的“之”字形运动。实验方案见表1。

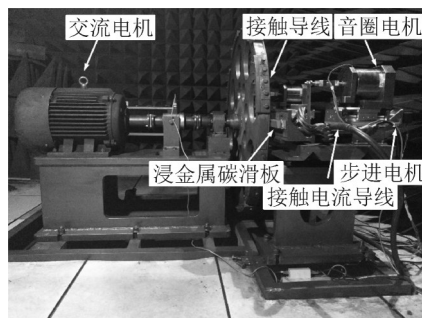


图1 滑动电接触实验机

Fig. 1 Sliding electrical contact experimental machine

表1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

压力载荷 F/N	接触电流 I/A	运行速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	实验时间 t/min
40 50 60 70	100 150 200	50 100	15
80 100 120	250 300	150 200	

在实验中对接触电压、接触电流和浸金属碳滑板磨损量进行记录,载流效率 η 由式(1)进行计算;载流相对稳定系数 ε 由式(2)进行计算;接触电阻 R 为实验时间内接触电压有效值的平均值与接触电流有效值的平均值之比;磨损率 M 为滑板与接触导线相对滑动摩擦10 000 km的滑板质量损耗。

$$\eta = \frac{I_{rms}}{I} \quad (1)$$

式(1)中: I_{rms} 为实验中记录的接触电流有效值的平均值; I 为实验条件初始给定的接触电流有效值。

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{S_1}{\bar{I}} \times 100\% \\ S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式(2)中: S_1 为实验中记录的接触电流的标准差; $\bar{I}$ 为接触电流平均值; I_i 为接触电流的实时有效值。

实验共获取140组数据,其中131组作为预测模型的训练集,9组作为预测模型的测试集。

1.2 弓网滑动电接触预测模型

弓网磨损率、载流效率、载流相对稳定系数、接触电阻与压力载荷、接触电流、运行速度为非线性关系,适于建立基于数据驱动模型,特别是神经网络模型。极限学习机(ELM)神经网络^[17]结构简单、学习效率高、泛化能力强,但由于ELM随机生成输入层连接隐含层的权值和隐含层的阈值,在使用过程中会出现隐含层节点失效的问题无法保障神经

网络的预测性能^[18]。蛇算法(SO)是由 Hashim F A 等^[19]提出的模拟蛇觅食、交配、战斗行为的智能优化算法,解决问题快速高效,通过蛇算法对权值和阈值进行寻优可以有效的提高极限学习机的准确性和稳定性。

SO优化ELM神经网络预测模型流程见图2。

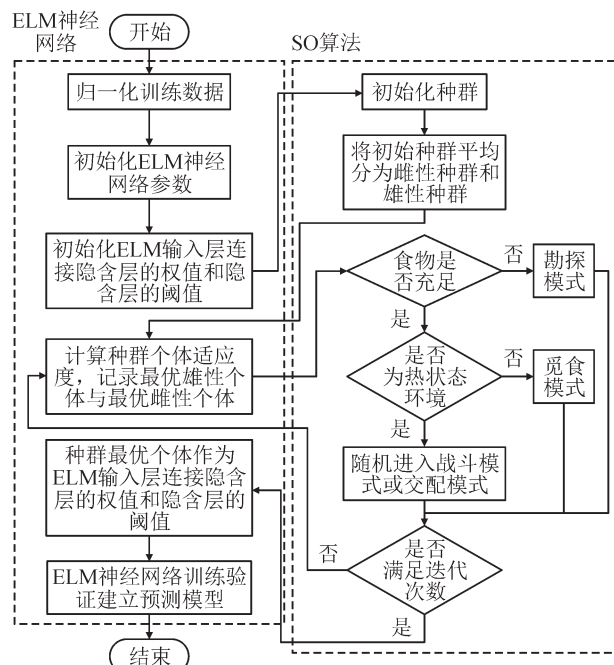


图2 SO-ELM神经网络预测模型流程图

Fig. 2 SO-ELM neural network prediction model flowchart

SO-ELM神经网络为三输入四输出的预测模型,输入为:压力载荷、接触电流、运行速度。输出为:载流效率、载流相对稳定系数、磨损率和接触电

阻。ELM的输入层神经元个数设置为3,隐含层神经元个数设置为140。在SO中,个体下边界设置为-1,上边界设置为1。种群大小 $N=100$,迭代次数为200。种群个体的适应度值 val 为训练集的实验值与ELM预测值的均方差

$$val = MSE(y - y_i) \quad (3)$$

式(3)中: y 为神经网络预测数据; y_i 为训练数据。 val 迭代图见图3。

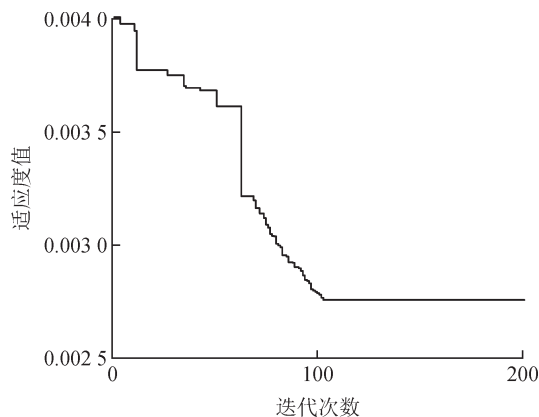


图3 val迭代图

Fig. 3 val iteration diagram

由图3可知,SO-ELM神经网络误差下降速度很快,在100代后达到了稳定。测试集的实验值与预测模型预测值对比见表2。最大相对误差为8.3%,最小相对误差为0.079%,平均相对误差为2.7%,建立的弓网滑动电接触SO-ELM神经网络预测模型预测值与实验数据基本吻合,可以反映实际中弓网运行的参数关系。

表2 预测模型数据对比

Table 2 Comparison of predictive model data

F/N	I/A	$v/(km \cdot h^{-1})$	η		ε		$M/[g \cdot (10^4 km)^{-1}]$		R/Ω	
			实验	预测	实验	预测	实验	预测	实验	预测
40	250	100	0.374	0.378	0.498	0.504	92	87.1	0.058 4	0.059 9
50	150	50	0.505	0.517	0.289	0.296	280	303.2	0.049 7	0.051 3
60	200	100	0.455	0.441	0.404	0.425	88	86.6	0.055 2	0.056 9
70	250	100	0.448	0.443	0.395	0.404	120	124.2	0.047 3	0.043 6
70	300	200	0.388	0.381	0.471	0.460	24	23.2	0.053 7	0.051 0
80	200	50	0.559	0.556	0.289	0.290	540	552.6	0.032 5	0.032 6
80	150	100	0.496	0.506	0.358	0.354	130	129.2	0.052 0	0.054 1
100	100	50	0.670	0.660	0.115	0.109	490	492.0	0.031 9	0.033 7
120	200	150	0.521	0.530	0.363	0.373	60	60.4	0.045 1	0.045 1

2 压力载荷的多目标寻优与决策

2.1 最优压力载荷的目标函数

在弓网滑动电接触中载流效率是越大越优,载

流相对稳定系数、磨损率、接触电阻3个目标是越小越优。压力载荷为优化变量,接触电流与运行速度由机车运行工况决定。根据以上要求,基于SO-ELM神经网络预测模型可建立压力载荷的目标函数为

$$\begin{cases} \min(-\eta) = -ELM_{\eta}(F, I, v) \\ \min \varepsilon = ELM_{\varepsilon}(F, I, v) \\ \min M = ELM_M(F, I, v) \\ \min R = ELM_R(F, I, v) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: η 为载流效率; ε 为载流相对稳定系数; M 为磨损率; R 为接触电阻; F 为压力载荷; I 为接触电流; v 为运行速度。

以运行工况1接触电流为200 A、运行速度为100 km/h;运行工况2接触电流为150 A,运行速度为150 km/h为例,对压力载荷的寻优与决策进行研究。

2.2 压力载荷的寻优算法

磨损率随着压力载荷的变大会先减小再增大,存在使磨损率达到最低点的压力载荷^[14]。并且随着压力载荷变大,载流相对稳定系数和接触电阻会随着逐渐的减小,载流效率会随着逐渐增大^[15-16]。由于4个目标随着压力载荷的变化有着互相冲突的变化趋势,所以在压力载荷寻优中无法找到一个最优解,需要通过寻优得到pareto前沿解集。

在多目标压力载荷寻优问题中,所得的pareto前沿应是一条曲线^[20]。NSGA-III^[7]算法虽然在求解高维多目标优化问题时具有优秀的效果,但是该算法的原参考点生成方式在求解pareto前沿为曲线的问题时,所得前沿均匀广泛性有明显的下降^[9]。因此,针对压力载荷寻优问题提出一种参考点生成方式改进NSGA-III算法,保证pareto前沿解集的均匀性和广泛性。

2.2.1 NSGA-III算法参考点生成方式改进

算法中的参考点可以针对压力载荷问题本身的特点生成。文中的参考点生成方式是使参考点集坐标变化规律与经过非支配排序得到的待选择最高等级非支配解集中个体适应度值各目标的坐标变化规律保持一致,将每一维坐标在[0,1]区间平均分为 p 份最后共生成 $p+1$ 个参考点,在空间中为一条均匀分布的直线。在待选择最高等级非支配解集个体适应度值进行归一化映射在区间[0,1]后,可以在归一化值中找到前沿曲线的两个端点与参考点集中直线的两个端点对应,从而对待选择最高等级非支配解集前沿曲线进行网格划分,计算各解的拥挤度,选择拥挤度较小的解来保证种群的均匀广泛。

2.2.2 压力载荷pareto前沿解集

使用改进NSGA-III算法对4目标最优压力载荷目标函数进行寻优,具体步骤有:①随机生成规模为 N 的种群 F ;②使用改进的参考点生成方式生成参考点集;③SO-ELM神经网络预测模型计算个体适应度值;④将种群 F 平分两份,一份进行交叉操

作,一份进行变异操作,生成规模为 N 的种群 S 并计算个体适应度值;⑤种群 F 与种群 S 合并为规模为 $2N$ 的种群 T ;⑥对种群 T 进行非支配排序,通过参考点选择出进入下一代的规模为 N 的新种群 F ;⑦重复步骤④~⑥,达到迭代次数后停止,输出pareto前沿解集。

在改进NSGA-III算法中,种群大小和参考点个数设置为120。在实际中压力载荷不能为负值,也不可以无限变大,并且静态压力载荷通常设置为70 N,故设定种群界限为[40, 120],迭代次数为500,迭代结束后得到压力载荷pareto前沿解集。两种运行工况下的压力载荷pareto前沿见图4。

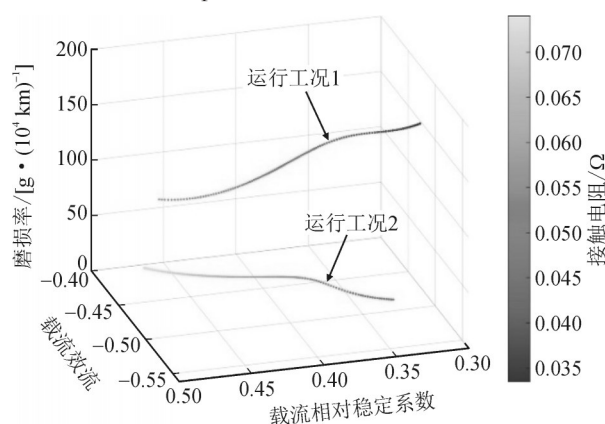


图4 改进NSGA-III算法压力载荷pareto前沿

Fig. 4 The pressure load pareto front of improved NSGA-III algorithm

使用常规NSGA-III算法时寻优流程和参数设置与改进NSGA-III算法保持一致。在经过500次迭代后结束,两种运行工况下的压力载荷pareto前沿见图5。通过图4、5对比可得,改进NSGA-III算法所得压力载荷pareto前沿可以保持良好的均匀性和广泛性。

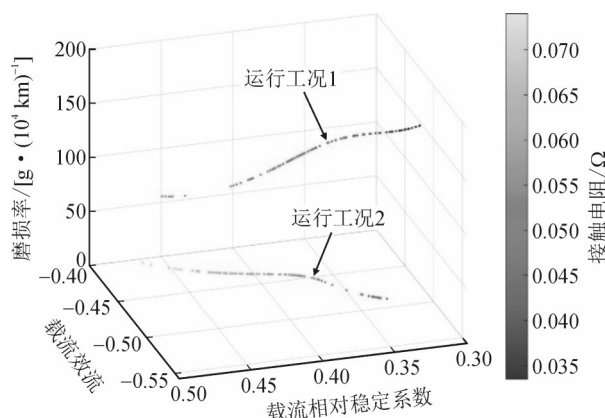


图5 常规NSGA-III算法压力载荷pareto前沿

Fig. 5 The pressure load pareto front of conventional NSGA-III algorithm

3 最优压力载荷决策

3.1 pareto 前沿解集客观权重计算

在弓网实际运行中,每个指标的重要性在不同的运行工况下是不同的,主观赋权对决策者的经验知识要求较高并且不同的决策者对各指标有着不同的需求,造成决策出的结果差距很大。CRITIC法通过计算各指标的标准差和各指标之间的相关系数衡量指标所含信息量的大小和各指标间的冲突性,所得权重更加客观合理^[21-23]。经计算可得两种工况下 pareto 前沿解集的客观权重 ω 见表3。

表3 pareto 前沿解集客观权重

Table 3 The objective weights of pareto solution set

指标	客观权重 ω	
	运行工况 1	运行工况 2
载流效率	0.158	0.157
载流相对稳定系数	0.156	0.155
磨损率/[g·(10 ⁴ km) ⁻¹]	0.526	0.532
接触电阻/ Ω	0.159	0.157

3.2 根据机车速度调整的自适应权重

在机车实际运行中,机车速度的上升严重影响弓网系统的受流稳定,此时应该加大压力载荷以保证机车的稳定运行;而在机车速度下降时,弓网离线率会降低,这时不需要很大的压力载荷也可以保证弓网的稳定受流,因此可以降低压力载荷来保证弓网的寿命。通过自适应因子实现根据机车速度的大小自适应的调整客观权重。当机车速度较高时,在决策时应更加注重弓网受流减小磨损率权重,决策出较大的压力载荷;当机车速度较低时,应更加注重弓网寿命增大磨损率权重,决策出较小的压力载荷。自适应权重计算方式如下。

1) 自适应因子

$$\alpha = \frac{v - v^*}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (5)$$

式(5)中: α 为自适应因子; v 为当前机车速度; $v_{\max}$ 为进行预测的最大速度, $v_{\min}$ 为进行预测的最小速度; v^* 为基准速度,即在此基准上控制当前机车速度下滑板磨损率权重的增大或减小。

2) 自适应权重计算

$$\begin{cases} \omega_3 = \omega_3 - \alpha \omega_3 \\ \omega_j^* = \frac{\omega_j}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4} \quad j=1, \dots, 4 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, ω_j^* 为第 j 维指标的自适应权重值。

根据相关研究^[24],弓网受流稳定性指标可以为载流相对稳定系数 $\varepsilon \leq 0.3$,载流相对稳定系数随压

力载荷变化特性曲线(电流为 150 A)见图6。由图6可知,当速度小于 100 km/h 时, ε 仍能处于理想的大小,而当速度大于 100 km/h 时, ε 大幅的增加;当列车运行速度达到 100 km/h 以上时,接触网导线受到受电弓产生的垂直方向加速度影响会引起振动,破坏弓网系统良好的接触状态,甚至造成离线^[25-27];并且随着接触电流的增大,载流相对稳定系数变化较小^[20]。综上所述,取基准速度 v^* 为 100 km/h。根据运行速度实验条件,设定 $v_{\max}$ 为 200 km/h、 $v_{\min}$ 为 50 km/h。将上述取值和两种工况下的速度 v 代入式(5)可得运行工况 1 自适应因子: $\alpha=0$,运行工况 2 自适应因子: $\alpha=0.333$ 。将求得的客观权重和自适应因子 α 代入式(6)计算可得自适应权重 ω^* 见表4。

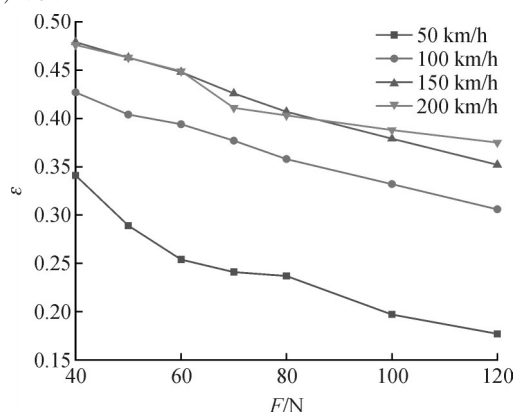


图6 载流相对稳定系数随压力载荷变化特性曲线 (电流为 150 A)

Fig. 6 Characteristic curve of the current carrying efficiency changing with pressure load (The current is 150 A)

表4 pareto 前沿解集自适应权重

Table 4 The adaptive weights of pareto solution set

指标	自适应权重 ω^*	
	运行工况 1	运行工况 2
载流效率	0.158	0.190
载流相对稳定系数	0.156	0.188
磨损率/[g·(10 ⁴ km) ⁻¹]	0.526	0.431
接触电阻/ Ω	0.159	0.191

3.3 最优压力载荷决策

弓网最优压力载荷决策属于确定型决策。传统TOPSIS法是通过计算数据个体与最优解、最劣解的贴近程度来衡量数据个体的优劣,常被应用于多目标决策分析问题。虚拟最劣解TOPSIS法提出虚拟最劣解替代最劣解计算相对贴近度,解决了传统TOPSIS法进行综合评价时出现的排序不合理的问题^[28-29]。将自适应权重代入虚拟最劣解TOPSIS法,经计算,两种工况下 pareto 前沿解集各解的相对贴近程度前5名见表5,最终确定运行工况 1 的最优压

力载荷为 $F=67.527$ N、运行工况 2 的最优压力载荷为 $F=73.179$ N。

表 5 pareto 前沿解集相对贴近度

Table 5 The relative proximity of pareto solution set

排名	运行工况 1		运行工况 2	
	压力	相对贴	压力	相对贴
	载荷/N	近程度	载荷/N	近程度
1	67.527	0.753 811	73.179	0.730 872
2	67.112	0.753 776	72.745	0.730 870
3	67.942	0.753 767	73.616	0.730 820
4	66.697	0.753 664	72.313	0.730 813
5	68.356	0.753 647	74.055	0.730 714

4 结论

1)使用弓网滑动摩擦实验数据对 SO-ELM 神经网络进行训练验证,建立了以压力载荷、接触电流、运行速度为输入,以载流效率、载流相对稳定系数、磨损率、接触电阻为输出的预测模型。

2)基于 SO-ELM 神经网络预测模型建立四目标最优压力载荷目标函数,使用改进 NSGA-III 算法对目标函数进行寻优,得到了均匀广泛的 pareto 前沿并与常规 NSGA-III 算法所得 pareto 前沿进行对比,验证了改进算法的有效性。

3)使用 CRITIC 法衡量 pareto 前沿解集数据指标的波动性和各指标之间冲突性计算客观权重,并引入自适应因子,根据机车运行速度调整客观权重得到自适应权重,最终通过虚拟最劣解 TOPSIS 法决策即可确定机车各种运行工况下弓网最优压力载荷。

参考文献:

- [1] 王万岗,吴广宁,高国强,等. 弓网系统接触电阻特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):3857-3864.
WANG Wangang, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. Characterization of contact resistance between pantograph and catenary system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(10): 3857-3864.
- [2] 刘伊宁,李相强,王庆峰,等. 动车组弓网离线过电压特性研究[J]. 电瓷避雷器,2023(2):55-61.
LIU Yining, LI Xiangqiang, WANG Qingfeng, et al. Pantograph catenary off-line overvoltage characteristics of emu[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 55-61.
- [3] BUCCA G, COLLINA A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph - catenary system[J]. Wear, 2009, 266(1/2): 46-59.
- [4] 武云龙,黄 海,付文明,等. 弓网载流效率及其对碳滑板磨损性能影响的试验研究[J]. 表面技术,2017,46(6): 21-26.
- [5] WU Yunlong, HUANG Hai, FU Wenming, et al. Experimental study on pantograph - catenary current - carrying efficiency and its influence on wear resistance of carbon strip[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 21-26.
- [6] 张继华,张海洲,陈忠华,等. 波动载荷作用下弓网滑动电接触接触失效研究[J]. 电工电能新技术,2019,38(10): 53-60.
ZHANG Jihua, ZHANG Haizhou, CHEN Zhonghua, et al. Study on contact failure of pantograph's sliding electrical contact under fluctuant loading[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2019, 38(10): 53-60.
- [7] 陈忠华,王一帆,杨彩红,等. 波动载荷下弓网动态接触电阻特性研究[J]. 高压电器,2019,55(10):148-155.
CHEN Zhonghua, WANG Yifan, YANG Caihong, et al. Study on dynamic contact resistance of pantograph catenary under fluctuating load[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 148-155.
- [8] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 18(4): 577-601.
- [9] 丁石川,崔 康,杭 俊,等. 基于改进 NSGA-3 和不平衡潮流的配电网相序优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 46-55.
DING Shichuan, CUI Kang, HANG Jun, et al. Phase sequence optimization of a distribution network based on improved NSGA-3 and unbalanced power flow[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 46-55.
- [10] 钟沛龙,黎 明,何 超,等. 基于 SOM 聚类 and 自适应算子选择的高维多目标进化算法[J]. 电子学报, 2022, 50(8): 1959-1974.
ZHONG Peilong, LI Ming, HE Chao, et al. Many-objective evolutionary algorithm based on SOM clustering and adaptive operator selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(8): 1959-1974.
- [11] 朱卫涛,邹文文,贾 钦,等. 基于 DWT-SOM-HFS 的配电台区短期负荷预测研究与应用[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 78-85.
ZHU Weitao, ZOU Wenwen, JIA Qin, et al. Research and application of short term load forecasting in distribution station area based on DWT-SOM-HFS[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 78-85.
- [12] 孔 琳,王黎明,吕晓腾,等. 基于多层级约束满足问题的产品全生命周期设计方案决策研究[J]. 机械工程学报, 2023(11): 276-289.
KONG Lin, WANG Liming, LYU Xiaoteng, et al. Decision-making for product life cycle design solution based on multilayer constraints satisfaction problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023(11): 276-289.
- [13] 王清波,董 伟,代正元,等. 一起基于全生命周期管理的 500 千伏 MOA 局部发热缺陷状态检修案例分析与研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 169-176.
WANG Qingbo, DONG Wei, DAI Zhengyuan, et al. Case of

- condition based maintenance of local heating defects of 500 kV MOA based on life-cycle management[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 169-176.
- [13] LIAN Xiaozhen, HOU Liang, ZHANG Wenbo, et al. An integrated approach for failure mode and effects analysis based on weight of risk factors and fuzzy PROMETHEE II [J]. Symmetry, 2022, 14(6): 1196.
- [14] 回立川, 陈忠华, 郭凤仪. 多目标下滑动电接触最优载荷确定[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 196-201.
HUI Lichuan, CHEN Zhonghua, GUO Fengyi. Best load in sliding electric contact system under multi-objective condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 196-201.
- [15] 陈忠华, 王铁军, 回立川, 等. 弓网系统滑动电接触最优压力载荷的确定[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 86-92.
CHEN Zhonghua, WANG Tiejun, HUI Lichuan, et al. Determination of the optimal contact load in pantograph-catenary system[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 86-92.
- [16] 陈忠华, 唐 博, 时 光, 等. 弓网多目标滑动电接触下最优压力载荷[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 154-160.
CHEN Zhonghua, TANG Bo, SHI Guang, et al. Optimal pressure load under multi-objective sliding electric contact in the pantograph-catenary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 154-160.
- [17] HUANG Guangbin, ZHU Qinyu, SIEW C K. Extreme learning machine: Theory and applications[J]. Neurocomputing, 2005, 70(1-3): 489-501.
- [18] 郑茂辉, 刘少非. GA优化ELM神经网络的排水管道缺陷诊断[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 59-64.
ZHENG Maohui, LIU Shaofei. Defect diagnosis of urban drainage pipelines based on GA optimized ELM neural network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 59-64.
- [19] HASHIM F A, HUSSIEN A G. Snake optimizer: A novel metaheuristic optimization algorithm[J]. Knowledge - Based Systems, 2022(242): 108320.
- [20] 时 光, 陈忠华, 郭凤仪. 强电流滑动电接触下最佳法向载荷[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 23-30.
SHI Guang, CHEN Zhonghua, GUO Fengyi. Optimal normal load of sliding electrical contacts under high current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 23-30.
- [21] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148.
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148.
- [22] 王 敏, 邹 婕, 王惠琳, 等. 基于改进的AHP-CRITIC-MARCOS配电网设备风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 164-172.
WANG Min, ZOU Jie, WANG Huilin, et al. Improved AHP-CRITIC - MARCOS - based risk assessment method for distribution network equipment[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 164-172.
- [23] 孙佳航, 黄景光, 冯忠楠, 等. 基于G1-CRITIC-云物元法的风电集群有功控制策略综合评价[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 56-61.
SUN Jiahang, HUANG Jingguang, FENG Zhongnan, et al. Comprehensive evaluation of wind power cluster active control strategy based on G1-CRITIC-Cloud matter element method[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 56-61.
- [24] 陈忠华, 康立乾, 石英龙, 等. 弓网滑动电接触电流稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 127-133.
CHEN Zhonghua, KANG Liqian, SHI Yinglong, et al. Study of current stability in pantograph - catenary sliding electric contact[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 127-133.
- [25] 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.
- [26] 罗 龙, 李 岩, 石 岩, 等. 基于雾计算和随机森林算法的变压器温度监测及故障预测方法研究[J]. 变压器, 2023, 60(5): 15-22.
LUO Long, LI Yan, SHI Yan, et al. Research on transformer temperature monitoring and fault prediction method based on fog calculation and random forest algorithm[J]. Transformer, 2023, 60(5): 15-22.
- [27] 张 旭, 张 颖. 基于随机森林算法的玻璃绝缘子泄漏电流预测模型研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 173-180.
ZHANG Xu, ZHANG Ying. Prediction model of insulator leakage current based on random forest algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 173-180.
- [28] 徐林明, 李美娟, 欧忠辉, 等. 基于虚拟最劣解TOPSIS和灰关联度的动态评价方法[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(3): 365-377.
XU Linming, LI Meijuan, OU Zhonghui, et al. Dynamic evaluation method based on virtual worst solution TOPSIS and grey correlation degree[J]. Journal of Systems Science and Mathematical, 2019, 39(3): 365-377.
- [29] 王雅倩, 周东国, 胡文山. 一种基于融合决策TOPSIS模型的NILM算法评价[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 84-93.
WANG Yaqian, ZHOU Dongguo, HU Wenshan. Non-intrusive algorithm evaluation based on fusion decision and TOPSIS model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 84-93.

陈忠华(1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电机与电器、电接触理论及其应用。

李 铎(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电接触理论及其应用(通信作者)(E-mail: 525580871@qq.com)。