

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.008

550 kV GIL 弹簧触指结构的多物理场耦合分析与优化设计

吴芊姘¹, 杨昊¹, 周福升², 高超², 丁瑞芳¹, 赵杨震¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 西安 710600; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 弹簧触指作为高压电气设备中的关键电连接部件,其性能直接影响设备安全性和可靠性。文中探究了簧丝直径、弹簧圈数和触头座尖角槽角度对弹簧触指性能的影响,发现簧丝直径和尖角沟槽角度对触指电接触性能影响显著。增大簧丝直径可降低接触电阻和电流密度,但可能导致局部过热;增大尖角沟槽角度可降低接触电阻和接触温升,但可能导致电流密度过高。为获得最佳性能,文中采用NSGA-II遗传算法进行优化,以最小化接触温升为目标,优化结果表明,簧丝直径1.5 mm,弹簧圈数135圈,尖角沟槽角度135°时,触指性能最优。文中揭示了弹簧触指结构参数对电接触性能的影响规律,并提出了基于多目标遗传算法的优化方法,为GIL触指结构设计及热故障分析提供了理论依据。

关键词: 弹簧触指; 多物理场耦合; 接触温升; 结构优化; 遗传算法

Multi-physics Field Coupling Analysis and Optimal Design of Spring Finger Structure in 550 kV GIL

WU Qianhua¹, YANG Hao¹, ZHOU Fusheng², GAO Chao², DING Ruifang¹, ZHAO Yangzhen¹

(1. School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China; 2. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Spring contact finger is critical electrical connecting element in high-voltage electrical equipment, and its performance directly affects the safety and reliability of the equipment. In this paper, the effects of wire diameter, number of spring coils, and the groove angle of the contact base on the performance of the spring contact finger are investigated, finding that the wire diameter and the groove angle have a significant influence on the electrical contact performance of the contact finger. Increasing the wire diameter can reduce the contact resistance and current density, but may lead to localized overheating. Increasing the groove angle can reduce the contact resistance and contact temperature rise, but may result in excessively high current density. To achieve optimal performance, in this paper the NSGA-II multi-objective genetic algorithm is employed for optimization, with the minimal contact temperature rise as the objective. The optimization results show that the optimal performance of the contact finger is achieved when the wire diameter is 1.5 mm, the number of spring coil is 135 and the groove angle is 135°. This study reveals the influence of structural parameters of the spring contact finger on the electrical contact performance and proposes an optimization method based on a multi-objective genetic algorithm, providing a theoretical basis for GIL contact finger structural design and thermal fault analysis.

Key words: spring-loaded contact fingers; multi-physics field coupling; contact temperature rise; structural optimisation; genetic algorithm

收稿日期:2026-03-21; 修回日期:2026-05-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52007138)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52007138).

0 引言

气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)作为高压、特高压输电系统的关键设备,其运行可靠性至关重要^[1-3]。弹簧触指作为 GIL 中实现电连接的核心元件,是保障设备安全稳定运行的关键^[4-6]。然而,在长期运行中,弹簧触指需承受复杂的多物理场耦合作用,并面临因摩擦、机械振动及热膨胀导致材料性能劣化与结构变形等问题,极易引发局部过热甚至烧熔等严重故障,对电网安全构成重大威胁^[7-10],因此,深入探究弹簧触指的性能优化方法,具有重要的工程应用价值。

针对弹簧触指的过热故障问题,国内外学者已开展了一系列研究。在电接触性能研究方面,Ben J^[11]发现触指的最高温升区域主要集中于弹簧触点与导体的接触界面;纽春萍等人^[12]建立了电热耦合模型,发现触指最高温升与导电杆温升相近;马金财等人^[13]基于电-热-力三维多物理场耦合模型,指出重力作用会导致触指上半周接触压力增加,温升偏高。在结构参数影响方面,范文博^[14]建立了温升模型,分析了结构参数与通电电流对接触温升的影响。上述研究为弹簧触指的温升特性研究奠定了基础,但现有研究多集中于单一因素或物理场的影响分析,缺乏对关键结构参数综合、系统的研究,这导致当前弹簧触指的设计缺少完整、明确的优化思路,难以从根本上解决产品性能差异大、局部过热风险高等问题。

为弥补上述研究不足,文中以 550 kV GIL 弹簧触指为研究对象,建立了精细化的多物理场耦合模型,系统探究弹簧触指的不同结构参数对电接触性能的综合影响规律。并在此基础上引入第二代非支配排序遗传算法^[15](non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),以优化电接触性能为目标,得到结构参数最优设计。文中旨在揭示弹簧触指结构参数与电接触性能之间的内在关联,并提出一套科学的优化设计方法,为 GIL 弹簧触指的结构设计及热故障预防提供理论依据与工程参考。

1 弹簧触指电-热-力耦合仿真模型

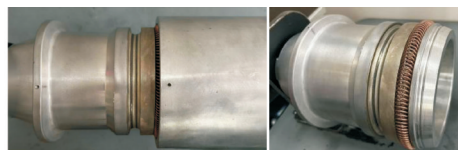
本节围绕弹簧触指开展多物理场耦合精细化建模,依据工程实物,按 1:1 比例构建三维模型,准确还原触头座、外壳与斜圈弹簧的真实结构。基于弹簧驱动方程完成斜圈弹簧的参数化建模,给出关键尺寸并定义电-热-力三场耦合机制、控制方程及边界条件,为后续仿真计算提供高精度模型支撑。

1.1 弹簧触指多物理场模型构建

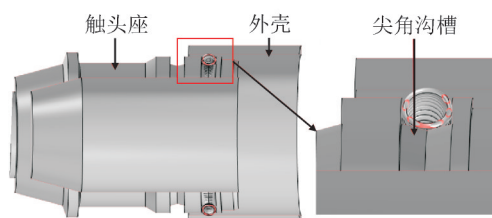
弹簧触指结构由触头座、外壳和斜圈弹簧 3 部分组成,其中斜圈弹簧为弹簧触指结构的核心部件,弹簧触指实物见图 1(a),弹簧触指的精细化模型见图 1(b)-(d)。弹簧触指结构主要尺寸参数见表 1。建立的弹簧触指模型斜圈弹簧的 x 、 y 、 z 坐标关于参数 t 的方程表示为^[16-17]

$$\begin{cases} x(t) = \frac{(2l-d)}{2} \cdot \sin(2\pi t) \\ y(t) = -\frac{(2l-d)}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos(2\pi t) \cdot \cos \theta_1 + \\ \quad \left[\frac{(2b-d)}{2} \cdot \cos(2\pi t) + R \right] \cdot \sin \theta_1 \\ z(t) = \frac{(2l-d)}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos(2\pi t) \cdot \sin \theta_1 + \\ \quad \left[\frac{(2b-d)}{2} \cdot \cos(2\pi t) + R \right] \cdot \cos \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

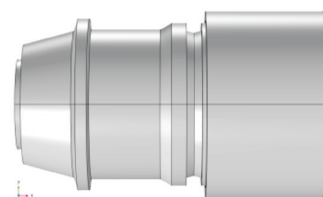
式(1)中: R 为弹簧触指基圆半径,mm; l 为椭圆长半轴长; b 为椭圆短半轴长; d 为弹簧簧丝直径; α 为单圈弹簧倾斜角度; θ_1 为斜圈弹簧截面方程旋转角度, $\theta_1 = (2\pi t)/n$, n 为弹簧圈数。



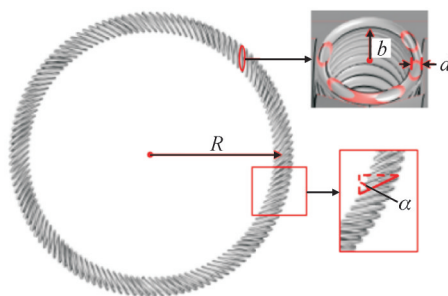
(a) 弹簧触指实物图



(b) 弹簧触指模型剖面图



(c) 弹簧触指结构模型



(d) 斜圈弹簧模型

图 1 弹簧触指结构模型

Fig. 1 Structural model of spring contact finger

表 1 弹簧触指结构尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of the spring contact finger structure

中径 ϕ /mm	l /mm	b /mm	d /mm	α (°)	n	尖角沟槽角/(°)
66.75	6.35	5.25	1.50	45	127	150

弹簧触指模型的电—热—力场耦合仿真流程见图2。文中构建了弹簧触指结构的多物理场耦合仿真模型,系统阐述了电—热—力场相互作用机制。在电场分析中考虑材料的电阻率、集肤效应以及接触界面压力对接触电阻的影响机制;热场分析以焦耳热作为主导热源,引入压力依赖型接触热阻模型,忽略磁场引起的涡流损耗;力场分析中考虑弹簧触指结构间的接触应力作用。电场通过焦耳热效应驱动热场温升,热场通过电阻率温度系数反向调制电场分布,力场通过接触压力影响接触热阻和接触电阻^[12]。

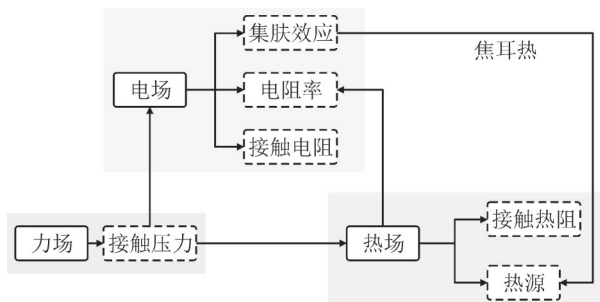


图 2 耦合仿真流程

Fig. 2 Coupled simulation flow

本节研究以装配后弹簧触指稳定状态为分析前提,系统研究弹簧触指结构的电热性能理论参数。基于有限元仿真软件的电学与固体传热模块耦合功能,结合力学分析,对触指结构进行电—热—力场耦合仿真,计算其接触电阻、电流密度、接触压力、接触温升等关键参数。

触指结构正常运行时,接触电阻主要存在于接触点处,根据 Holm 接触电阻理论,单个接触斑点接触电阻公式为

$$R_{ji} = \frac{\rho}{2a} \quad (2)$$

式(2)中: R_{ji} 为单个导电斑点接触电阻, Ω ; ρ 为弹簧触指结构材料电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}$; a 为接触斑点半径。

壳体和导体的温度随电流波动变化,弹簧触指结构内部热传导控制方程为

$$\rho_T C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \nabla^2 T + Q \quad (3)$$

式(3)中: ρ_T 为温度 T 时导体(壳体)材料密度, kg/m^3 ; C_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Q 为热损耗, W/m^3 ;

λ_T 为 T 温度时的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; t 为时间, s 。

在 GIL 管道中,流体中热对流与热传导同时发生,热对流的对流换热边界用牛顿冷却公式作为基础进行迭代计算,其表达式为

$$q = h \Delta T \quad (4)$$

式(4)中: q 为单位面积的热流密度, W/m^2 ; h 为表面的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ΔT 为流体温度与表面温度之差, K 。

导体热辐射是 GIL 内部导体及触指与外壳间的辐射换热,其表达式为

$$J_e = \varepsilon \sigma T \quad (5)$$

式(5)中: σ 为 Stefan - Boltzmann 常数,取 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为 GIL 的实体表面发射率; T 为温度。

在力学模块中,将触指的触头座固定,对触指外壳设置一定的位移量,模拟弹簧触指完全插入的稳定状态,计算弹簧触指结构的稳态接触压力,接触压力的计算方程为

$$\begin{cases} \lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-v)} \\ e = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ F = (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial i} + G \nabla^2 u_i \end{cases} \quad (6)$$

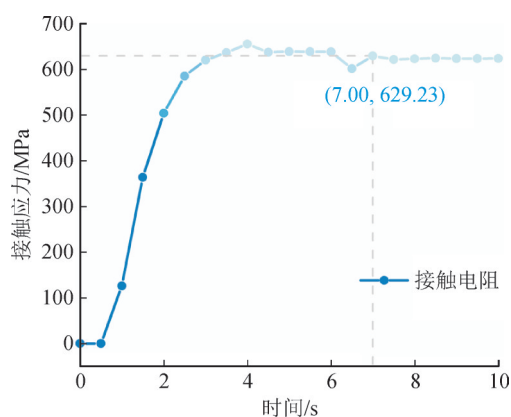
式(6)中: E 为材料弹性模量; v 为材料泊松比; G 为材料切线模量; u_i 为弹簧触指结构接触面上沿笛卡尔坐标系 ($i = x, y, z$) 分量的方向形变, mm 。

1.2 弹簧触指模型整体电接触性能研究

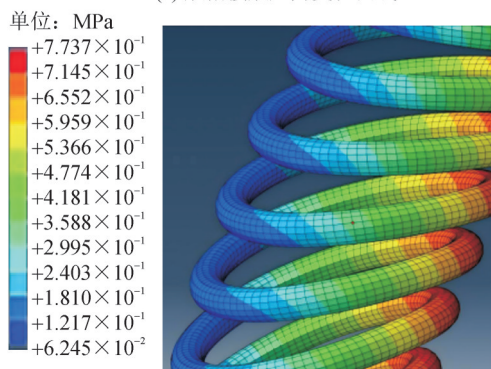
本节围绕弹簧触指接触应力与电接触性能展开研究,明确接触应力是影响电接触性能的核心参数,基于 Holm 理论计算其分布,定位簧丝与外壳接触处为高应力区;将该应力作为初始载荷,施加额定工况开展电热仿真,发现电流密度分布与应力高度一致,温升符合限值要求,为触指性能评估奠定基础。

接触应力是决定弹簧触指电接触性能的核心力学参数,直接影响接触电阻与焦耳热生成,是电—热—力多物理场耦合分析的关键环节。根据 Holm 理论,接触电阻与实际接触面积及接触压力密切相关,而后者由装配应力决定。因此,精确计算接触应力分布是确保后续电热仿真结果准确性的前提。弹簧触指的应力分布情况和触指插入过程中的接触应力变化情况见图3,取应力最大值 629.23 MPa 出现的时段,分析簧丝应力分布云图,由图3可知接触应力最大值在簧丝与外壳接触处,该高应力区对

电热性能起决定性作用。



(a) 触指接触应力变化曲线



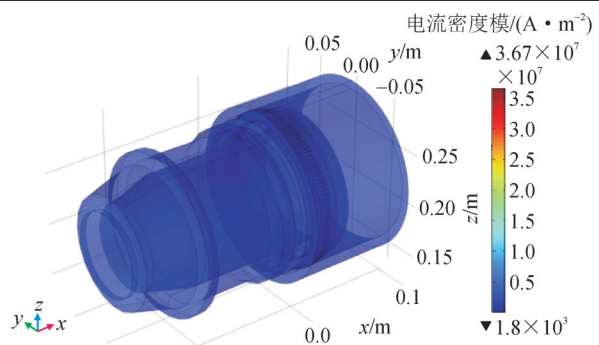
(b) 触指接触应力分布云图

图3 弹簧触指的接触应力计算结果

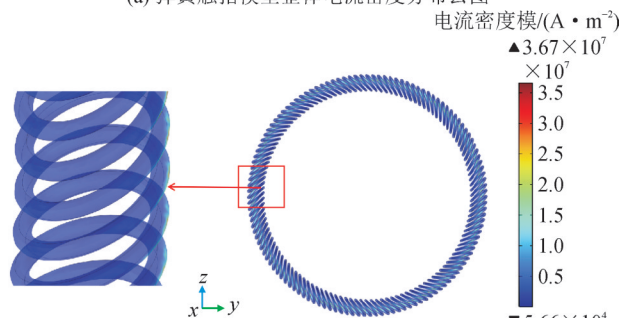
Fig. 3 Calculation results for contact stress of spring-loaded contact fingers

将力学分析计算得到的弹簧触指接触应力,作为初始载荷施加于电-热耦合模型中,以对其电接触性能进行全面评估。在室温条件下,对弹簧触指模型施加 5 500 A 的电流载荷、弹簧施加 629.23 MPa 压力载荷,基于初始参数设置,对其电场与热场分布特性进行仿真分析。结果表明,初始参数下弹簧触指的接触电阻为 $2.12 \mu\Omega$ 。弹簧触指的电流密度分布云图见图4,电流密度最大值出现斜圈弹簧与外壳的接触区域,结合弹簧触指应力分布结果,电流密度的分布特征与接触应力的分布表现出高度一致性。

弹簧触指结构的接触表面温度分布云图见图5。导体顶部温度高于导体底端,弹簧触头座底部温度较高,这是由于导体表面具有略大的散热面积,其整体温度分布较为均匀。整体结构最高温度与最低温度相差 0.98°C ,相较于环境温度,温升达到 46.80°C ,该温升分布符合 550 kV GIL 温度试验测试变化规律及触指温升限值^[2]。



(a) 弹簧触指模型整体电流密度分布云图



(b) 斜圈弹簧的电流密度分布云图

图4 弹簧触指的电流密度计算结果
Fig. 4 Calculation results for current density in spring contacts

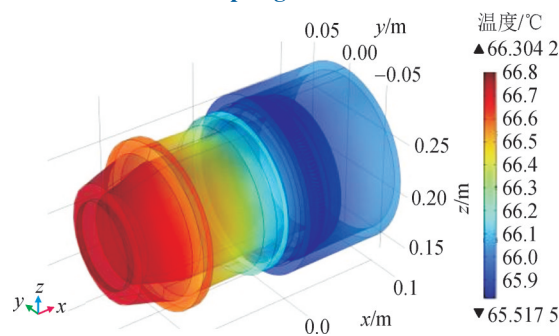


图5 弹簧触指整体温度计算结果

Fig. 5 Calculation results for the overall temperature of the spring contact finger

2 不同弹簧触指参数下性能分析

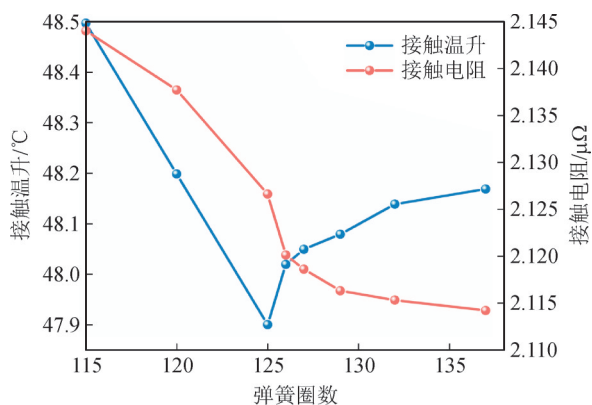
为研究不同结构尺寸对弹簧触指内部电场、温度分布的影响规律,文中以弹簧簧丝直径、弹簧圈数与弹簧触头座尖角沟槽角度为目标变量,计算并统计每种情况下弹簧触指结构的接触电阻、接触温升、电流密度最大值模的分布情况。

2.1 弹簧圈数对弹簧触指性能的影响

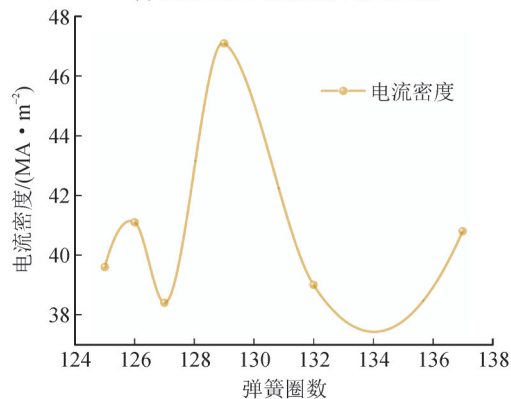
弹簧圈数作为决定弹簧触指整体尺寸与弹性的关键结构参数,其变化直接影响触指的接触面积分布,进而对电接触性能产生复杂影响。

依据 1.1 中初始参数的尺寸,仅改变弹簧圈数,计算结果见图6。触指温升随圈数增加虽呈微弱下降趋势,但因电流密度分布的波动,其整体分布呈

现出非单调特性。由于整体接触温升变化微弱,因此在实验参数范围内,圈数调整对弹簧触指热平衡的影响较小。接触电阻的降低与温升的微弱下降呈现一定正相关性,这是由于触指圈数增加增大了接触面积,降低了接触电阻,但电流密度的局部增加又轻微加剧了焦耳热生成。



(a) 接触电阻、接触温升变化曲线



(b) 接触电阻、接触温升变化曲线

图6 不同圈数对弹簧触指模型电接触特性的影响

Fig. 6 Influence of different coil turns on the electrical contact characteristics of spring finger models

2.2 弹簧簧丝直径对弹簧触指性能的影响

弹簧簧丝直径是决定弹簧触指机械强度的核心几何参数,簧丝直径增大提升接触面积与导电截面,使电阻与电流密度下降;但直径过大可能导致接触压力分布不均,局部过热加剧,其对电接触性能的影响具有双重性,不同簧丝直径下弹簧与触头座的接触面积对比见图7。

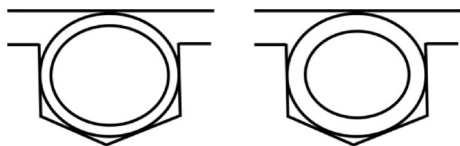
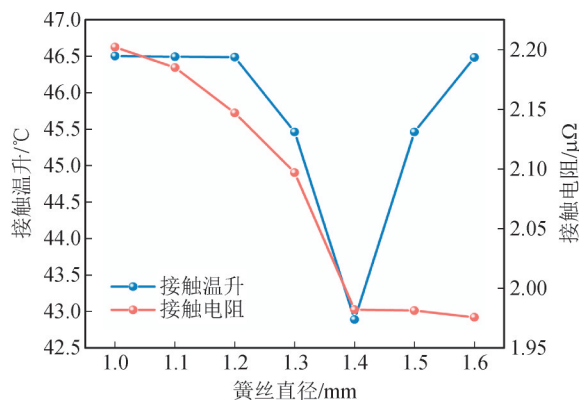


图7 改变簧丝直径对接触面的影响

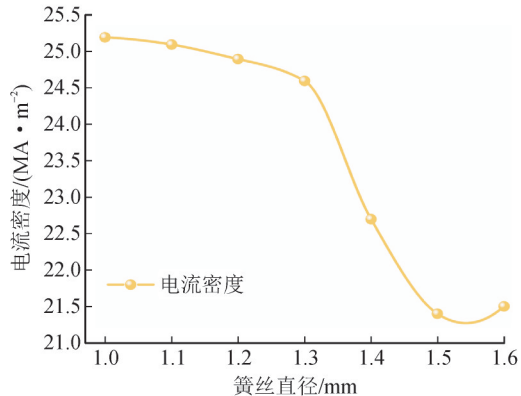
Fig. 7 The effect of changing spring wire diameter on the contact surface

弹簧触指接触电阻、接触温升随簧丝直径的变化情况见图8。簧丝直径对触指电接触性能具有显

著影响。随簧丝直径增大,接触电阻与电流密度整体降低,接触温升呈先降后升趋势。直径由1.0 mm增至1.5 mm时,接触电阻由2.20 μΩ降至1.98 μΩ,降幅10%;电流密度由25.24 MA/m²降至21.5 MA/m²,降幅14.8%。直径小于1.4 mm时,有效接触面积与导热路径增大,散热条件改善,温升持续降低;超过1.5 mm后,弹簧形变能力下降,接触压力分布不均,局部接触电阻回升,温升由降转升。



(a) 接触电阻、接触温升变化曲线



(b) 接触电阻、接触温升变化曲线

图8 不同簧丝直径对弹簧触指模型电接触特性的影响

Fig. 8 Influence of different spring wire diameters on electrical contact characteristics of spring finger models

2.3 触头座尖角沟槽角度对弹簧触指性能的影响

触头座尖角沟槽角度是影响弹簧触指装配形态的关键结构参数,适度增大尖角沟槽角度可以提升接触面积与导电截面,使电阻与电流密度下降;但角度过大或过小可能导致接触不良或过度配合,影响触指的电接触特性,斜圈弹簧在不同沟槽角度的装配程度对比见图9。

沟槽角度通过改变弹簧弯曲半径与嵌入深度影响接触长度与压力,结合不同沟槽角度下弹簧与触指接触情况示意图10和弹簧触指受力分析图11,动触头载荷经弹簧分解为沟槽双侧支撑分力,随沟槽角度逐步增大,弹簧弯曲程度趋于平缓,有效接触长度持续增加,接触压力的分布均匀性得到改

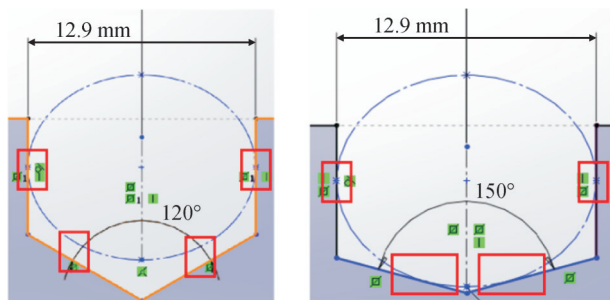


图9 斜圈弹簧在不同沟槽角度的装配程度

Fig. 9 The assembly degree of helical springs in grooves with different angles

善,有效接触面积随之提升。斜圈弹簧与沟槽侧壁的接触分力 F_1 可依托结构几何约束,由动触头施加的径向压紧载荷 F_2 间接推导求解。在假定弹簧、动触头与沟槽形成的3处接触点位共面、沟槽左右侧壁受力均衡的前提条件下,沟槽角度、触指有效接触面积和接触压力的关系式为

$$L = k(\phi \cdot \sin \theta - d) \quad (7)$$

式(7)中: L 为有效接触长度; k 为比例系数; ϕ 为弹簧中径; θ 为沟槽角度; d 为弹簧丝直径。

$$F_2 = F_1 \cdot 2 \sin(\theta/2) \quad (8)$$

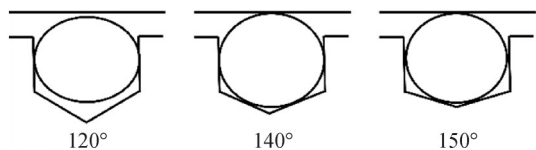


图10 不同沟槽角度下弹簧与触指接触情况

Fig. 10 Contact situation between the spring and the contact finger under different groove angles

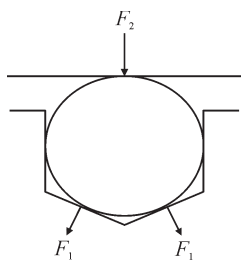
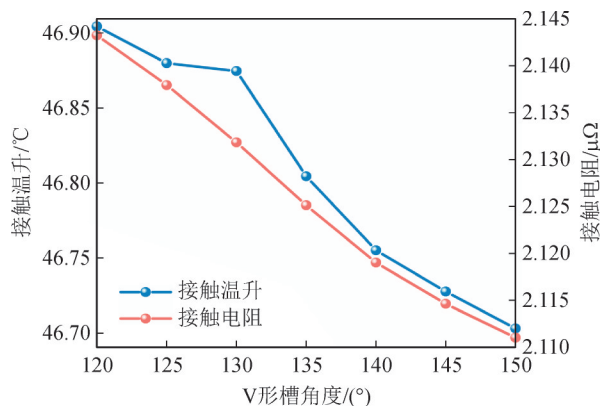


图11 弹簧与动触头、触头座接触部位受力分析

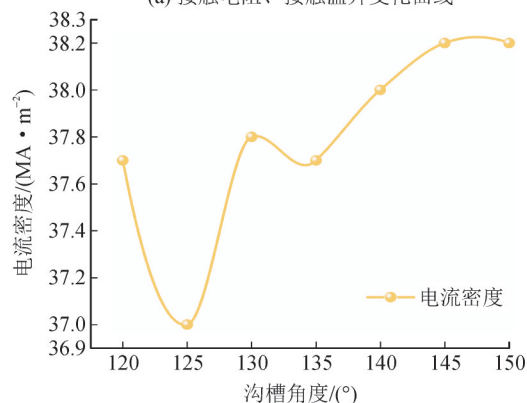
Fig. 11 Force analysis of the contact area between the spring and the moving contact and the contact plate

依据1.1中初始参数尺寸设置,仅改变弹簧触指触头座沟槽角度,结合上述公式,计算触指结构电场和温度分布。计算结果见图12。随着沟槽角度的增大,接触电阻呈现显著的单调递减趋势,这一现象归因于沟槽角度的增大扩大了有效接触面积并优化了接触压力分布,降低了接触界面的收缩电导与电阻。接触温升响应与接触电阻变化表现出同步性,从46.90℃递减至46.70℃,降幅约0.3%,反映出接触电阻降低导致的焦耳热生成减少。电

流密度呈现先降后升的非线性变化特征,在125°时达到最低值37 MA/m²,随后因沟槽角度增大导致弹簧受压减小、有效接触面积下降,电流密度逐步回升至150°时的38.2 MA/m²。



(a) 接触电阻、接触温升变化曲线



(b) 接触电阻、接触温升变化曲线

图12 触头座尖角沟槽角度对触指性能影响

Fig. 12 Influence of contact seat angle and groove angle on contact finger performance

2.4 触指模型准确性的实验验证

在文中针对550 kV GIL弹簧触指的电热特性分析中,因550 kV特高压需SF₆气体绝缘环境、额定5 500 A大电流需大功率供电与散热系统,实验室条件难以满足,因此采用接触电阻实验与相关文对标的双维度验证方式:搭建接触电阻测试平台,采用RK2516精密测试仪测得117~137圈弹簧触指的接触电阻,搭建的接触电阻测算平台见图13,实验利用RK2516精密电阻测试仪测得117~137圈弹簧触指的接触电阻与仿真值趋势基本一致见图14;同时将文中仿真计算得到的温升、电流密度与已有文献对比^[12],计算结果与其他文献相符,从电接触核心特性与热特性两方面共同验证了多物理场耦合模型的合理性与可靠性。

分析图14可知,实验测量结果与仿真结果变化规律高度一致,且在圈数增至137圈时数据贴合度显著提升,这为模型验证提供了关键前提。当弹簧

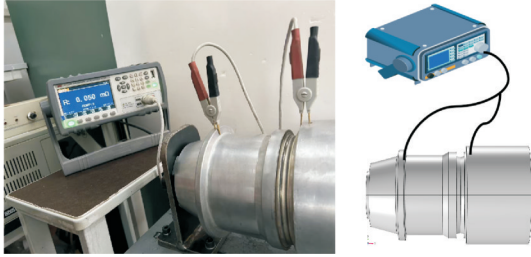


图 13 实验测试平台

Fig. 13 Experimental testing platform

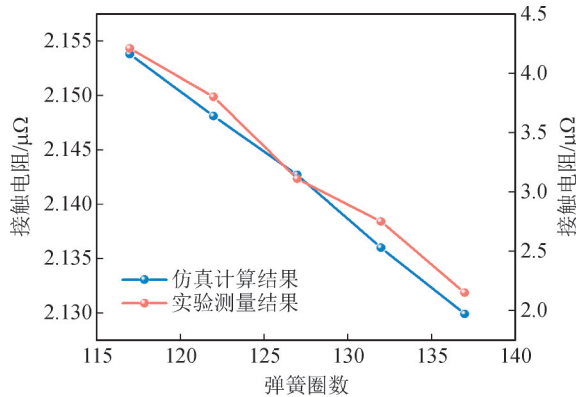


图 14 实验结果与仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of experimental results with simulation results

圈数较小时,实验值与仿真值存在一定偏差,这是由于:圈数较小时触指整体刚度偏低,装配中易因同轴度偏差、夹具压力不均导致接触点分布偏离仿真计算情况,且少圈数下接触点数量少,单个接触点的磨损、氧化或测量端间隙对整体电阻的放大效应更突出;触指合金成分的实际制备有一定偏差,但仿真设定的材料为理想组分状态,导致实际合金电阻率略高于仿真设定值。结合二者一致的变化规律与圈数增大后的仿真结果与计算结果的一致性,实验结果可有效验证仿真模型的正确性。

3 基于NSGA-II遗传算法的触指结构参数优化

本节围绕弹簧触指结构参数的多目标优化展开研究,采用NSGA-II遗传算法,阐述其基于Pareto最优的寻优原理与流程,以簧丝直径、圈数及尖角沟槽角度为参数,经训练与迭代获最优解集,验证表明最优参数显著改善电接触性能,为工程设计提供支撑。

3.1 基于多目标遗传算法的优化方法

遗传算法是一种模拟生物进化、基于选择、交叉与变异的并行随机寻优方法^[18-19]。多目标非支配遗传算法NSGA-II是其重要改进,它依据Pareto最优概念,通过分层选择机制,最终获得一组Pareto最优解集^[20-21]。NSGA-II的基本思想及流程图见图15。其核心思想在于通过引入快速非支配排序与拥挤

度计算机制^[22-23],实现对Pareto最优解集的高效逼近,其中拥挤度计算公式为

$$Id(i) = \sum_{m=1}^M \frac{f_m(i+1) - f_m(i-1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (9)$$

式(9)中: M 为目标函数数量; $f_m(i)$ 为个体 i 在第 m 个目标上的值; $f_m^{\max}$ 和 $f_m^{\min}$ 分别为当前非支配层中第 m 个目标的最大值与最小值。拥挤度越大,个体分布越稀疏。多样性越好^[24]。

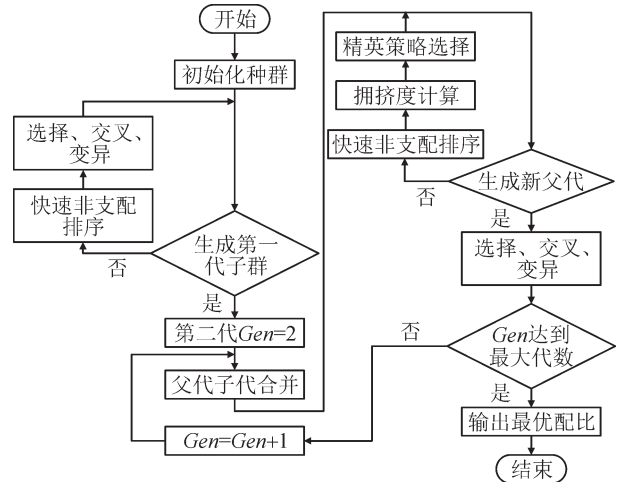


图 15 NSGA-II 的基本思想及流程图

Fig. 15 Basic concepts and flowchart of NSGA-II

NSGA-II 算法直接优化多个目标函数 $F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)]$ 。该算法首先随机生成规模为 N 的初始种群 P_t , 经过非支配排序、选择、交叉、变异等遗传操作, 生成子代种群 Q_t , 并将二者合并为规模为 $2N$ 的联合种群 R_t ; 随后, 对 R_t 进行快速非支配排序, 并计算每个非支配层中个体的拥挤度, 依据非支配层级与拥挤度筛选出适应度较优的个体组成新一代父代种群 P_{t+1} , 再次通过遗传操作产生子代种群 Q_{t+1} , 与 P_{t+1} 合并形成新的种群 R_t , 重复上述过程直至满足终止条件^[25-26]。

3.2 弹簧触指结构优化结果

将可变区间内的弹簧触指结构参数组合输入NSGA-II算法中,分别建立弹簧圈数、簧丝直径、尖角沟槽角度3个数据源,整合数据集,并利用feedforwardnet函数训练神经网络,设置种群大小为100,迭代次数为50次,文中选取接触温升、接触电阻和电流密度作为优化指标,且以接触温升最低、接触电阻较小、电流密度较大为优化方向。接触电阻直接决定界面导电能力,是表征电接触性能的关键指标;接触温升反映焦耳热生成与散热的平衡状态,决定设备长期运行的安全性与可靠性;电流密度用于表征电流集中程度,与局部过热及烧蚀失效风险直接相关。对神经网络的性能评估结果见

图 16, Pareto 最优解集见图 17。

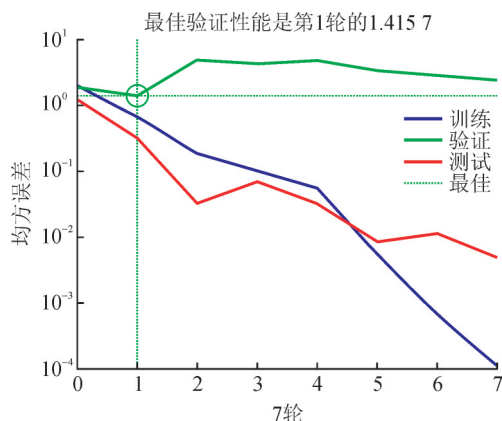


图 16 神经网络评估结果

Fig. 16 Neural network evaluation results

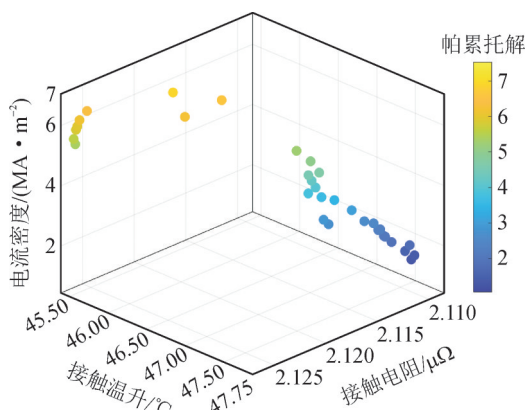


图 17 Pareto 最优解集

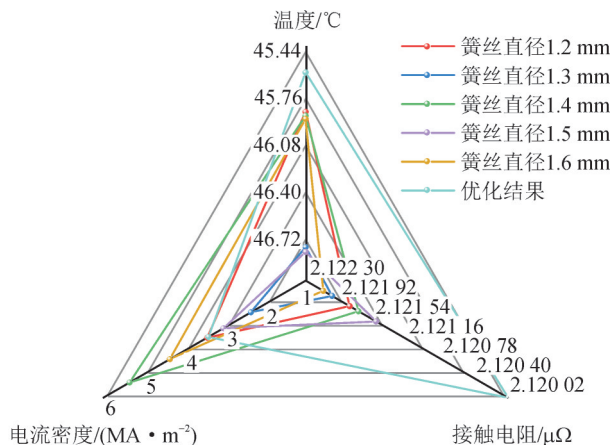
Fig. 17 Pareto optimal solution set

根据 NSGA-II 算法计算得到:在簧丝直径 $d=1.5$ mm, 弹簧圈数 $n=135$ 圈, 触头座尖角沟槽角度 $=135^\circ$ 时, 弹簧触指的电接触性能最优, 代入仿真模型验证得到该参数下接触温升为 45.58°C , 接触电阻为 $2.12\ \mu\Omega$, 本优化结果与不同参数的设计方案进行电接触性能对比见图 18, 结果表明, 该优化设计在保证结构科学性的前提下, 显著降低了弹簧触指的接触电阻与接触温升。该算法能够高效、准确地筛选出综合性能最优的弹簧触指结构参数, 为相关工程实践提供了可靠的优化路径和重要的应用价值。

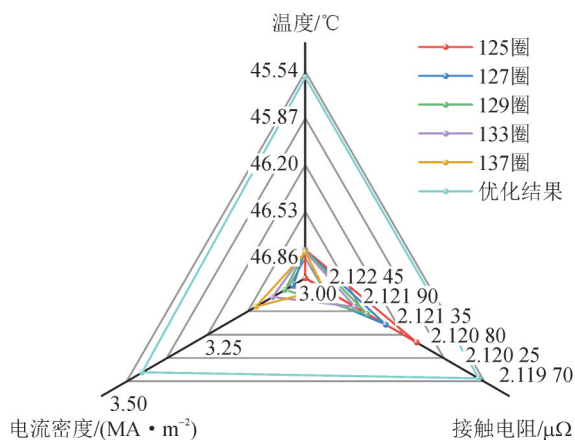
4 结论

文中建立了精细化 550 kV GIL 弹簧触指多物理场耦合模型, 分析了结构参数对触指性能的影响, 并基于 NSGA-II 算法进行了结构优化。主要结论如下:

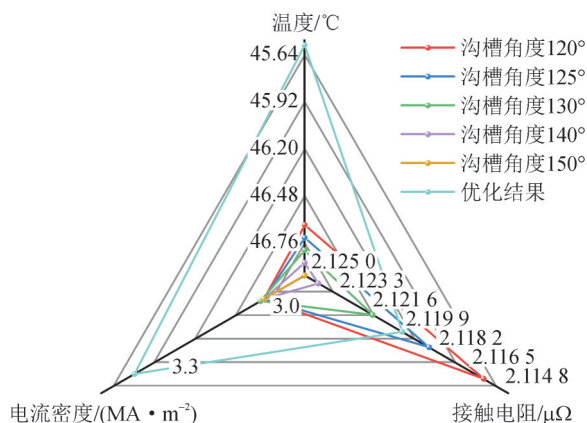
1) 有限元仿真结果表明, 弹簧触指结构的电流密度与接触应力分布呈一致性, 触指最高温升符合工程标准, 验证了所建模型的有效性与准确性。



(a) 优化结果与不同簧丝直径对比



(b) 优化结果与不同弹簧圈数对比



(c) 优化结果与不同沟槽角度对比

图 18 优化结果与其他设计方案对比

Fig. 18 Comparison of optimization results with alternative design proposals

2) 弹簧触指簧丝直径和触头座尖角沟槽角度对初值电接触性能影响显著, 弹簧圈数影响较小。增大簧丝直径可降低接触电阻和电流密度, 但过大的簧丝直径会导致局部过热。增大触头座尖角沟槽角度可有效降低接触电阻和接触温升, 但过大的角度会导致电流密度回升。

3) 基于 NSGA-II 算法的优化结果表明, 簧丝直径为 1.5 mm, 弹簧圈数为 135 圈, 触头座尖角沟槽角

度为135°时,弹簧触指的电接触性能最优。

参考文献:

- [1] Chen Miaomiao, Yang Hao, Cong Meng, et al. Optimization of 550 kV GIL spring contact finger structure based on electro-thermal coupling analysis[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2025, 20(4): 2833-2844.
- [2] 梁 晓. 弹簧触指结构的机械与电接触特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Liang Xiao. Study on the mechanical and electrical contact characteristics of the spring contact[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [3] 王 坤, 李 岩, 于建成, 等. 电-热-一体化综合能源系统容量配置与运行策略双层优化模型[J]. 供用电, 2024, 41(6): 55-63.
Wang Kun, Li Yan, Yu Jiancheng, et al. Double layer optimization model for capacity configuration and operation strategy of electric-thermal integrated energy system[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 55-63.
- [4] 李 源. GIS开关触头的接触电阻与温升特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
Li Yuan. Study of contact resistance and temperature rise characteristics of GIS switch contacts[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [5] 湛珉灏, 张 旭, 鲁 杰, 等. 220 kV 共箱式 GIL 壳体电位升高抑制策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 1-12.
Shen Minhao, Zhang Xu, Lu Jie, et al. Study on the suppression strategy of shell potential rise in gas-insulated transmission lines of 220 kV three-phase common box-type[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 1-12.
- [6] 李 彬, 贺富龙, 王枫桥, 等. 针对电热协同系统的多分支动态联合故障诊断方法[J]. 供用电, 2025, 42(7): 78-85.
Li Bin, He Fulong, Wang Fengqiao, et al. Multi-branch dynamic joint fault diagnosis method for electric-thermal collaborative system[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(7): 78-85.
- [7] Shao Qianqiu. Optimization method for geometric shape of DC GIL insulators based on electric thermal multi-physics field coupling model[J]. Electrical Engineering, 2025, 107(3): 3425-3434.
- [8] 何 龙, 朱咏明, 马金财. 基于改进峭度图和 GoogLeNet 的 GIS 内置互感器铁磁谐振辨识[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 50-58.
He Long, Zhu Yongming, Ma Jincai. Ferromagnetic resonance identification of built-in instrument transformer for GIS based on improved kurtosis graph and GoogLeNet[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 50-58.
- [9] 丛 猛, 宫瑞磊, 张紫晨, 等. 放电等离子体烧结技术下 550 kV GIL 弹簧触指 Ag-SnO₂ 复合涂层性能研究[J]. 西安工程大学学报, 2025, 39(4): 73-81.
Cong Meng, Gong Ruilei, Zhang Zichen, et al. Properties of 550 kV GIL spring contact finger Ag-SnO₂ composite coating based on spark plasma sintering technology[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(4): 73-81.
- [10] 喻劲松, 史 英, 赵 波, 等. 特高压分级式可控高抗的集约化设计与应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 54-62.
Yu Jinsong, Shi Ying, Zhao Bo, et al. Intensive design and application of UHV hierarchical controllable shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 54-62.
- [11] Ben Jemaa N. Theoretical and experimental investigation of contact resistance under low and medium force indentation for common and for new coated materials[C]//ICEC Melbourne 2002: 3rd World Congress on Cost Engineering, Project Management and Quantity Surveying, Incorporating the 6th Pacific Association of Quantity Surveyors Congress (PAQS), 2002: 212-216.
- [12] 马金财, 刘 刚, 何 龙. 基于电-热-力耦合的螺旋弹簧触指稳态温升分布仿真研究[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 223-231.
Ma Jincai, Liu Gang, He Long. Simulation study on steady-state temperature rise distribution of helical spring contact finger based on electrical-thermal-mechanical coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 223-231.
- [13] 纽春萍, 强若辰, 荣命哲, 等. 弹簧触指的稳态温升仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 8-14.
Niu Chunping, Qiang Ruochen, Rong Mingzhe, et al. Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 8-14.
- [14] 范文博. 弹簧触指结构电接触性能分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Fan Wenbo. Study on analyzing method of electrical contact performance for spring touch finger structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 刘 鹏, 谢 韬, 靳守锋, 等. GIS/GIL 滑动触头电连接部件过热故障机制仿真分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2090-2100.
Liu Peng, Xie Tao, Jin Shoufeng, et al. Simulation analysis of overheating fault mechanism of electrical connection components used in GIS/GIL sliding contact[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2090-2100.
- [16] 贾德文, 郭岩琦, 雷基林, 等. 基于 NSGA-II 与 RBF 神经网络的 DPF 结构参数优化[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(1): 1-6.
Jia Dewen, Guo Yanqi, Lei Jilin, et al. Structural parameter optimization of DPF based on NSGA-II and RBF neural network[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2024, 22(1): 1-6.
- [17] 赵晨阳, 艾 芊, 李晓露, 等. 基于分布鲁棒模型的冷热电联供虚拟电厂日前一日内协同优化调度策略[J]. 供用电, 2025, 42(10): 3-15.
Zhao Chenyang, Ai Qian, Li Xiaolu, et al. Day-ahead-intraday cooperative optimal scheduling strategy for a virtual power plant for combined heat and cold based on a distributional robust model[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(10): 3-15.
- [18] 王子瑶. 绿电制氢系统容量配置与能量管理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.
Wang Ziyao. Research on capacity configuration and energy management of green power-to-hydrogen system[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2025.
- [19] 苏俊天, 淡淑恒. 基于有限元和神经网络方法的弹簧触指结构优化设计[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 176-183.
Su Juntian, Dan Shuheng. Optimization design on spring contact

- finger structure based on finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 176-183.
- [20] 任 岩. 人工心脏泵用无刷直流电机的设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- Ren Yan. Study on design of brushless DC motor for artificial heart pump[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [21] 魏依宁, 邵一兵, 季晓芬. 基于改进非支配排序遗传算法的服装吊挂生产线平衡优化[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 246-253.
- Wei Yining, Shao Yibing, Ji Xiaofen, et al. Balance optimization of garment hanging assembly line based on improved non-dominated sorting genetic algorithm II[J]. Journal of Zhejiang Sci - tech University(Natural Sciences Edition), 2025, 53(2): 246-253.
- [22] 谢翔宇. 面向高铁转向架设计的Kriging模型优化方法[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- Xie Xiangyu. Optimization method based on Kriging model for high-speed rail bogie design[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
- [23] 欧 朝, 梁海龙, 龙垚松, 等. 基于代理模型的高超飞行器头部构型多目标智能优化研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(7): 200-208.
- Ou Chao, Liang Hailong, Long Yaosong, et al. Research on multi-objective intelligent optimization of hypersonic vehicle head configuration based on agent model[J]. Journal of Ordnance
- Equipment Engineering, 2025, 46(7): 200-208.
- [24] 冯龙祥, 汤旭晶, 李 昕, 等. 计及电池全寿命周期的船舶复合储能多目标容量配置研究[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 30-38.
- Feng Longxiang, Tang Xuqing, Li Xin, et al. Configuring ship duplex energy storage when capacity life cycle of cell is taken into account[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 30-38.
- [25] 郭来欣, 李 志, 谢 磊, 等. 双极直流微电网单一储能系统的电压平衡方法[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(1): 218-232.
- Guo Laixin, Li Zhi, Xie Lei, et al. Voltage balancing method for single energy storage system in bipolar DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 218-232.
- [26] 董朋林, 陈久朋, 王 森, 等. 复杂背景下基于YOLO-insulator模型的绝缘子小目标缺陷检测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(1): 262-276.
- Dong Penglin, Chen Jiupeng, Wang Sen, et al. Small object defect detection of insulators based on YOLO-insulator model in complex background[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 262-276.
- 吴芊娅(2001—), 女, 硕士, 主要研究方向为高电压绝缘技术(E-mail: 3137536179@qq.com).
- 杨 昊(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高电压绝缘技术(通信作者)(E-mail: yanghao@xpu.edu.cn).

(上接第68页)

- Materials in Design, 2024, 20(3): 445-462.
- [51] Jeong Y, Jo J, Lee T, et al. Combined analysis of thermofluids and electromagnetism using physics - informed neural networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024(133): 108216.
- [52] Wang Xi, Yin Zhenyu, Wu Wei, et al. Neural network-augmented differentiable finite element method for boundary value problems [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025(285): 109783.
- [53] Zhou Liang, Sun Hai, Fan Dongyan, et al. Flow prediction of heterogeneous nanoporous media based on physical information neural network[J]. Gas Science and Engineering, 2024(125): 205307.
- [54] Tang Peng, Zhao Zhiguo, Li Haodi. Transient temperature field short-term prediction of electric drive gearbox based on thermal network static and dynamic graph construction[J]. Applied Thermal Engineering, 2024(248): 123323.
- [55] Tang P, Zhang Z, Tong J, et al. Predicting transformer temperature field based on physics-informed neural networks[J]. High Voltage, 2024, 9(4): 839-852.
- [56] Li Yuhang, Lyu Yuhui, Yan Yingjie, et al. Physics-informed neural networks for robust equivalent damping parameter inversion and fault diagnosis in gas-insulated switchgear vibration systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 24521.
- [57] 徐方维, 唐佳飞, 郭 凯, 等. 基于机理模型和数据驱动融合的电电压暂降响应特性分析[J]. 电力工程技术, 2026, 45(5): 3-14.
- Xu Fangwei, Tang Jiafei, Guo Kai, et al. Analysis for voltage sag response characteristics based on the fusion of mechanism models and data - driven approaches[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(5): 3-14.
- [58] 毛雅婷, 权 浩, 孙新宇. 机理—数据双驱的变压器改进热路模型和热点温度计算[J]. 电力工程技术, 2026, 45(4): 112-122.
- Mao Yating, Quan Hao, Sun Xinyu. Improved thermal circuit model and hot spot temperature calculation of oil-immersed transformer based on mechanism - data - driven approaches[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(4): 112-122.
- [59] 刘昱轩, 徐志钊, 胡伟涛, 等. 基于多特征量的GIS触头温度预测方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 212-219.
- Liu Yuxuan, Xu Zhiniu, Hu Weitao, et al. GIS contact temperature prediction method based on multiple parameters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 212-219.
- [60] Hao Z, Wang Z, Su H, et al. GNOT: a general neural operator transformer for operator learning[C]//Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning, 2023: 12556-12569.
- [61] Guo Zhengke, Gu X D, Chen Shikui. Accelerating electric-magnetic machine simulation using the fourier neural operator (FNO)[C]//Proceedings of the ASME 2025 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2025: 1-13.
- 黄 镭(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力开关数字化(E-mail: radiumh@foxmail.com).
- 耿英三(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电器智能化理论与技术、真空电弧理论及真空电器等(通信作者)(E-mail: ysgeng@mail.xjtu.edu.cn).