

考虑区间不确定性的真空灭弧室磁吹特性及耐击穿性能分析

刘晓明^{1*} 毕振江¹ 陈海¹ 李培源¹ 刘易雄²

(1. 河北工业大学 电气工程学院省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401;

2. 天津工业大学 机械工程学院 天津 300387)

Analysis of Magnetic Blowing Characteristics and Breakdown Resistance Performance of Vacuum Interrupter Considering Interval Uncertainty

LIU Xiaoming^{1*}, BI Zhenjiang¹, CHEN Hai¹, LI Peiyuan¹, LIU Yixiong²

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Mechanical Engineering, TIANGONG University, Tianjin 300387, China)

Abstract As the safety guardian of modern railway systems, vacuum circuit breakers used in electrified railways have the advantages of being environmentally friendly and maintenance-free. However, during the long-term service, they are inevitably affected by extreme environment and operating conditions. To ensure the rapid removal of large current short-circuit faults, this paper takes 27.5 kV/2500 A/31.5 kA railway specific longitudinal magnetic vacuum circuit breaker as the research object. Based on relevant GB/TB standards, a combination of three-dimensional electromagnetic field numerical simulation analysis of vacuum interrupter and prototype experiment is adopted, considering the combined effects of structural uncertainty and operating condition uncertainty. The magnetic blowing characteristics before current zero are quantitatively analyzed, and the influence mechanism of voltage dispersion of the power supply for spring operated mechanism opening operation on the post zero breakdown performance is explored to provide a theoretical basis in the design of vacuum circuit breakers for electrified railways.

Keywords Vacuum interrupter, Interval uncertainty, Magnetic blowing characteristics, Breakdown resistance performance

摘要 作为现代化铁路系统的安全卫士,电气化铁道用真空断路器具有环境友好和免维护的优势,但其长期服役过程中,不可避免受到极端环境以及运行工况的影响。为确保大电流短路故障的快速切除,文章以27.5 kV/2500 A/31.5 kA铁路专用纵磁真空断路器为研究对象,依据相关GB/TB标准,采用真空灭弧室三维电磁场数值模拟分析与样机实验相结合的手段,考虑结构不确定性和运行工况不确定性的共同影响,定量分析电弧电流过零前磁吹特性,进而探究弹簧操动机构分闸操作电源电压分散性对零后耐击穿性能的影响机理,为电气化铁道用真空灭弧室结构设计提供理论依据。

关键词 真空灭弧室 区间不确定性 磁吹特性 耐击穿性能

中图分类号: TM561.2

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202409013

真空断路器因其具有环境友好、免维护、体积小且无火灾隐患等优点,已成为电网可靠与稳定运行的重要保护装备^[1-2]。其中,铁路专用真空断路器担负着所在线路正常运行条件以及大电流短路等

故障冲击作用下可靠服役的安全保障任务;真空灭弧室作为其关键结构部件,既要保障故障能量在毫秒级时间尺度内快速磁吹泄能,也要提供故障切除后毫米级空间尺度下可靠耐击穿能力。

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177139)

* 联系人: E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn

在真空灭弧室结构设计方面, 可通过改变灭弧室电场分布, 研究绝缘耐击穿水平, 以避免过电压击穿^[3-4]。Luo Y 等^[5] 针对具有含多级悬浮屏蔽电极真空灭弧室电场不均匀问题进行电场优化, 以改善绝缘性能。程显等^[6] 针对多断口真空断路器紧凑型均压需求, 提出了串联均压真空灭弧室结构方案。本研究团队提出了神经网络和遗传算法相结合的电场优化设计方法, 分析 12 kV 真空灭弧室电场影响因素, 从而实现匀场设计^[7]。

在真空灭弧室磁场吹弧过程中^[8-9], 可通过触头型面结构参数化设计, 实现磁场对极间电弧快速逸散。Li X 等^[10] 和 Zhong J 等^[11] 分别以 126 kV 真空灭弧室为研究对象, 通过改变其触头结构参数, 使灭弧室在峰值电流条件下极间中心平面磁场达到最大且分布均匀。董华军等采用单因素及正交仿真实验方法, 对电流峰值时触头间隙中心平面纵向磁感应强度、电流过零时磁场滞后时间以及导体电阻进行优化设计, 以得到最优磁场特性^[12]。

近年来, 区间不确定性方法被广泛应用于航空航天、新能源电力装备等研究领域中, 以降低设计成本、提高结构可靠性^[13-17]。不确定性优化方法主要包括: 随机规划方法、模糊规划方法以及非概率不确定性优化方法。其中, 非概率不确定性优化方法在使用中, 仅需获取参数可能的取值范围, 所需样本量大大减少^[18]; 该方法主要包括凸模型优化方法和区间优化方法。其中, 凸模型优化仅考虑不确定状态下的最不利情况, 决策空间较小; 而区间优化方法则基于“可能性”方式, 给出不确定性条件下的约束范围, 具有选择灵活性^[19]。

为实现电气化铁道用真空断路器高技术参数化和高可靠性, 有必要从多物理场参数化建模出发, 探究磁吹电弧特性和耐击穿性能的影响机理。为此, 依据相关 GB/TB 标准, 以 27.5 kV/2500 A/31.5 kA 铁路专用真空断路器为研究对象, 为描述其服役过程的参数变化, 建立三维电磁场参数化物理数学模型, 将区间不确定性方法引入磁吹特性和耐击穿性能分析中, 考虑真空灭弧室结构不确定性和工况不确定性, 以满足电气化铁道用真空灭弧室的实际需求。

1 真空灭弧室参数化建模及计算条件分析

1.1 纵磁真空灭弧室三维电磁场参数化建模

针对铁路专用真空断路器可靠性要求, 提出

27.5 kV/2500 A/31.5 kA 纵磁真空灭弧室结构设计方案, 给出主要参数如表 1 和表 2 所示。建立 27.5 kV 纵磁真空灭弧室结构模型, 如图 1 所示。

表 1 27.5 kV 真空灭弧室主要技术参数

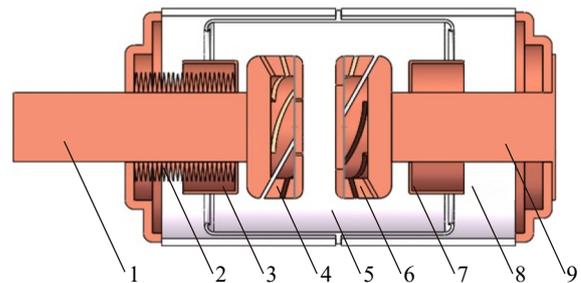
Tab. 1 Main technical parameters of 27.5 kV vacuum interrupter

| 主要技术参数 | 参数取值 |
|----------|---------|
| 额定电压 | 27.5 kV |
| 额定电流 | 2.5 kA |
| 额定短时耐受电流 | 31.5 kA |
| 开距 | 18±1 mm |

表 2 27.5 kV 真空灭弧室主要结构参数

Tab. 2 Main structural parameters of 27.5 kV vacuum interrupter

| 主要结构参数 | 参数取值/mm |
|----------|-------------|
| 导电杆直径 | 38.0 |
| 触头直径 | 79.0 |
| 屏蔽罩厚度 | 1.5 |
| 陶瓷外壳厚度 | 4.0 |
| 灭弧室外径/高度 | 130.0/236.0 |



1-动导电杆 2-波纹管 3-动端屏蔽罩 4-动触头 5-悬浮电极 6-静触头 7-静端屏蔽罩 8-陶瓷绝缘外壳 9-静导电杆

1-Moving conductive pole 2-Bellow 3-Movable shielding cover 4-Movable contact 5-Floating electrode 6-Static contact 7-Static end shielding cover 8-Ceramic insulation body 9-Static conductive pole

图1 27.5 kV 纵磁真空灭弧室结构示意图

Fig. 1 27.5 kV axial magnetic field vacuum interrupter

1.2 计算条件

依据 TB/T 2803-2003《电气化铁道用断路器技术条件》, 规定电气化铁道用断路器额定操作顺序为 O-0.3 s-CO-180 s-CO。在短路开断、关合能力试验方式 4 条件下样机实验结果表明, 在分闸过程中, 燃弧时间 9.6 ms, 弧后暂态恢复电压(Transient Recovery Voltage, TRV)变化如图 2 所示。

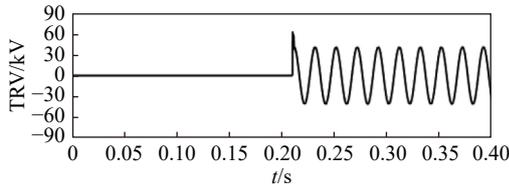


图2 开断过程中真空断路器暂态恢复电压变化

Fig. 2 TRV of vacuum circuit breaker during the interrupting process

2 纵磁真空灭弧室磁吹特性与影响因素分析

2.1 真空灭弧室磁吹特性分析

基于麦克斯韦方程组,建立灭弧室磁场分析模型,其微分形式可表示为:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, \vec{H} 为磁场强度, \vec{J} 为电流密度, \vec{D} 为电位移矢量, \vec{E} 为电场强度, \vec{B} 为磁感应强度, ρ 为电荷体密度。

补充介质特性方程:

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{J} = \gamma \vec{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中, ϵ 、 μ 和 γ 分别表示介电常数、磁导率和电导率。

分析可得电磁场偏微分方程:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \\ \nabla^2 \varphi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \end{cases} \quad (3)$$

式中, \vec{A} 为磁矢位, φ 为标量电位。

采用有限元数值模拟方法,仿真求得短路故障开断过程灭弧室内部磁场分布。在典型条件下(Condition1:极间距离 10.1 mm,短时耐受电流 77.3 kA)断口中心截面磁场分布如图3所示,其中纵磁最大值为 325.16 mT。

2.2 考虑结构不确定性的磁场影响因素分析

触头系统作为真空灭弧室核心部件,决定了断路器短路开断能力。为实现电弧快速逸散,考虑触头系统结构参数的不确定性,以极间中心截面纵向磁感应强度最大值 B_{\max} 和有效磁吹面积占比 α 为优

化目标,对触头结构参数进行单因素分析,研究真空灭弧室纵向磁场分布影响机理。

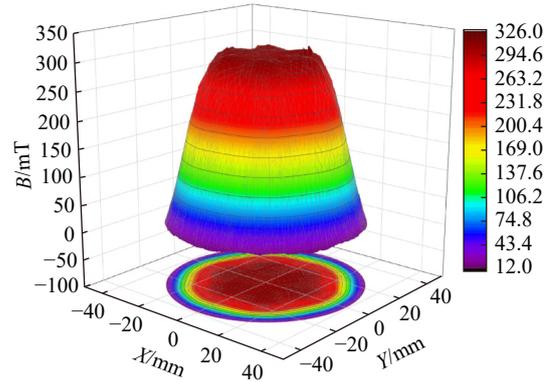


图3 断口中心截面纵向磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of break in the center section

为使真空电弧保持扩散态^[20],所需纵向磁场强度应满足以下条件:

$$B_c \geq \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \quad (4)$$

式中, μ_0 为真空中磁导率, I 为电弧电流, r 为触头半径。

针对 27.5 kV/2500 A/31.5 kA 灭弧室结构,为使电弧保持扩散态,求得临界纵向磁感应强度值 B_c 为 112.8 mT。为减少开断过程触头表面烧蚀程度,应尽可能增加扩散型电弧有效磁吹面积比^[13],定义如下:

$$\alpha = \frac{S_{B_c}}{S_m} \quad (5)$$

式中, α 为有效磁吹面积占比, S_{B_c} 为大于或等于临界值 B_c 的面积, S_m 为触头电极表面积。

针对触头系统的结构不确定性,在触头结构参数对极间磁感应强度与有效磁吹面积占比 α 影响机理分析中,选取对极间磁场影响较大的4个结构设计参数(如图4所示)进行单因素对比分析。其中,触头结构参数包括触头片开槽长度 x 、触头斜槽开槽深度 h 、触头杯座厚度 d 和触头片开槽偏转角 β ,相关参数取值范围如表3所示。

在 Condition 1 情况下,比对分析单因素参数变化对真空灭弧室纵向磁场分布的影响,如图5所示。比对分析可知:

(1)随着触头片开槽长度增加,断口中心截面纵向磁感应强度最大值 B_{\max} 呈上升趋势,其中 B_{\max} 范围为 254~330 mT;有效磁吹面积占比 α 随着触头片开槽长度的增加在 0.48 范围上下波动,其中 α 范围为 0.41~0.54。

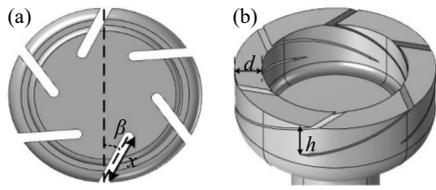


图4 触头结构参数示意图。(a) 触头片开槽长度 x 和开槽偏转角 β , (b) 触头杯座厚度 d 和斜槽开槽深度 h

Fig. 4 Schematic diagram of contact structure parameters. (a) The slot length x and deflection angle β of the contact piece, (b) thickness d of contact cup holder and depth h of inclined groove

表 3 触头结构各设计参数取值范围

Tab. 3 Range of design parameters for contact structure

| 结构参数 | 取值范围 |
|------------------|-------------|
| 触头片开槽长度 x | 5.0~30.0 mm |
| 触头斜槽开槽深度 h | 5.0~30.0 mm |
| 触头杯座厚度 d | 3.0~13.0 mm |
| 触头片开槽偏转角 β | 0~25.0° |

(2) 随着触头斜槽开槽深度增加, 断口中心截面纵向磁感应强度最大值 B_{\max} 呈上升趋势, 其中

B_{\max} 范围为 25~334 mT; 有效磁吹面积占比 α 随着触头斜槽开槽深度的增加呈上升趋势, 其中 α 范围为 0~0.55。

(3) 随着触头杯座厚度增加, 断口中心截面纵向磁感应强度最大值整体 B_{\max} 呈上升趋势, 其中 B_{\max} 范围为 300~328 mT; 有效磁吹面积占比 α 随着触头杯座厚度的增加整体呈下降趋势, 其中 α 范围为 0.46~0.69。

(4) 随着触头片开槽偏转角增加, 断口中心截面纵向磁感应强度最大值 B_{\max} 整体呈下降趋势, 其中 B_{\max} 范围为 226~353 mT; 有效磁吹面积占比 α 随着触头片开槽偏转角的增加在 0.48 范围波动, 其中 α 范围为 0.44~0.53。

比对分析后, 确定纵磁真空灭弧室结构参数设计方案。其中触头片开槽长度为 25 mm, 触头斜槽开槽深度为 22.5 mm, 触头杯座厚度为 6 mm 和触头片开槽偏转角为 10°。在 Condition1 情况下, 求得纵向磁感应强度最大值 313.66 mT, 有效磁吹面积占比 0.669; 为后续在此参数化设计方案基础上进行弧

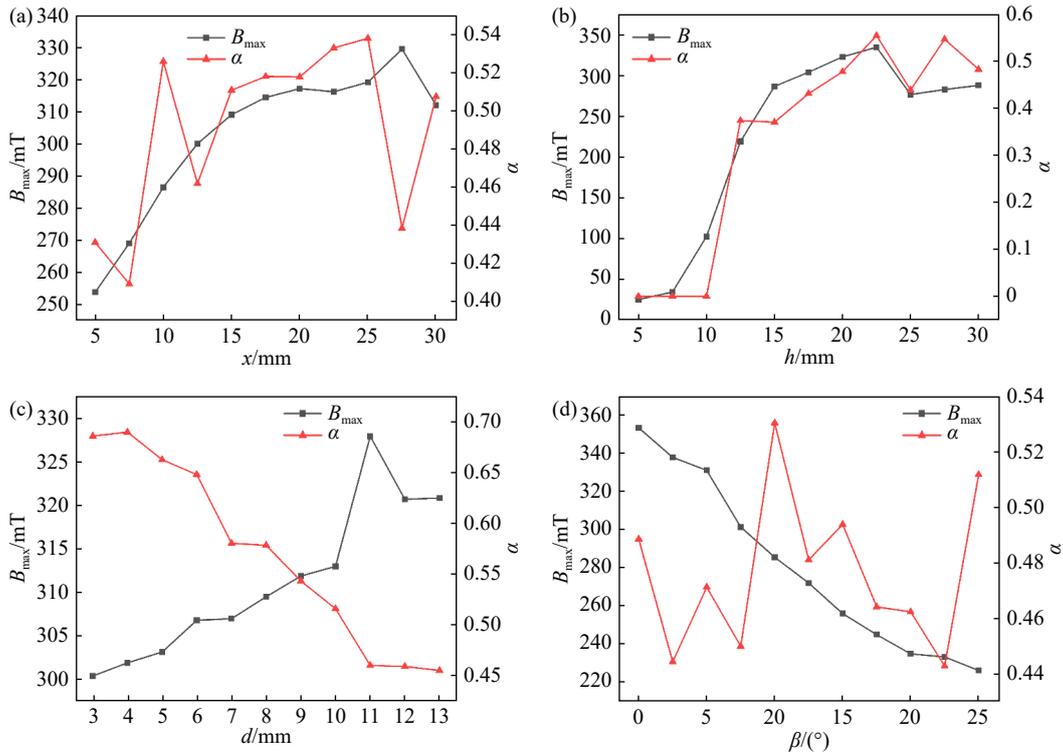


图5 单因素参数变化对真空灭弧室磁场分布影响。(a) 触头片开槽长度的影响, (b) 触头斜槽开槽深度的影响, (c) 触头杯座厚度的影响, (d) 触头片开槽偏转角的影响

Fig. 5 Effect of single factor parameter on the magnetic field distribution of vacuum interrupter. (a) Influence of contact piece slot length on the magnetic field, (b) influence of contact inclined depth on the magnetic field, (c) influence of contact cup thickness on the magnetic field, (d) influence of contact plate slotting angle on the magnetic field

后耐击穿性能分析提供灭弧室绝缘结构参数。

3 基于电场数值模拟的弧后耐击穿性能分析

3.1 电场数学模型

真空灭弧室电场数值模拟满足麦克斯韦方程组,采用有限元法进行电场求解,边界条件如下:

$$\begin{cases} \tau_1: \varphi = \varphi_0 \\ \tau_2: \frac{d\varphi}{dn} = q_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, τ_1 为满足狄利克里条件的表面, τ_2 为满足诺伊曼条件的表面, φ_0 为边界条件 τ_1 的电位, q_0 为边界条件 τ_2 的电荷量。

3.2 考虑工况不确定性的弧后耐击穿性能分析

为研究断路器工况不确定性对弧后耐击穿性能的影响,结合 2*27.5(Z)/T2500-31.5 真空断路器试验结果(短路开断、关合能力试验方式 4),在不同分闸操作电源电压下 TRV 峰值对应触头极间距离如表 4 所示,比对分析弹簧操动机构在不同分闸操作电源电压下机械特性分散性对弧后耐击穿性能的影响。

表 4 不同分闸操作电源电压下 TRV 峰值所对应极间距离

Tab.4 The distance between contacts corresponding to the peak TRV under different power supply voltages in opening process

| 分闸操作电源电压/V | 分闸时间/ms | 极间距离/mm |
|------------|---------|---------|
| 电压最小值(143) | 21 | 11.59 |
| 额定电压值(220) | 23 | 11.65 |
| 电压最大值(242) | 34 | 12.48 |

注: 试验环境温度 13.6℃

比对分析发现,在不同分闸操作电源电压的情况下,随着分闸操作电源电压的增加,分闸时间随之上升,TRV 峰值所对应的极间距离也逐渐增大;当分闸操作电源最小值电压(143 V)时,TRV 峰值所对应极间距离最小,为 11.59 mm;即此工况下,断路器承受最苛刻的弧后耐击穿考验。

为分析灭弧室弧后耐击穿性能,建立真空灭弧室三维电场有限元分析模型,确定计算条件:灭弧室内介质为真空;动静触头选用铜基合金材料;绝缘外壳材料为陶瓷(相对介电常数取 5.0)。典型条件下(Condition2:极间距离 11.59 mm,TRV 峰值 63.5 kV,动侧电极施加高电位,静侧电极设置地电位)动触头表面电场强度三维分布如图 6 所示,动触头表面最大电场强度为 6.45×10^6 V/m,灭弧室动态绝缘性能薄弱点集中在动触头外端部区域。

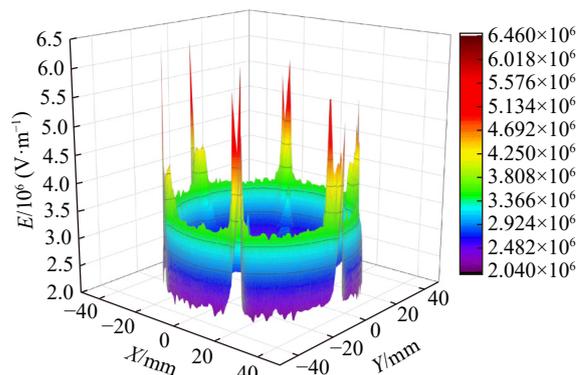


图6 动触头表面电场三维分布

Fig. 6 Three dimensional distribution of electric field on the surface of the moving contact

4 结论

以 27.5 kV/2500 A/31.5 kA 铁路专用真空断路器为研究对象,采用三维电磁场数值模拟分析与样机实验相结合手段,将区间不确定性引入真空断路器故障开断过程磁吹特性以及弧后耐击穿性能影响因素分析中,分别采用结构不确定性和工况不确定性方法分析电弧电流过零前磁吹特性和零后耐击穿性能。

研究表明,零前电流峰值 77.3 kA 时,真空灭弧系统断口中心截面纵向磁感应强度最大值为 325.16 mT;在分闸操作电源电压为最小值(143 V)情况下,零后暂态恢复电压峰值 63.5 kV 时刻对应极间距离为 11.59 mm,此时动触头沿面最大电场强度为 6.45×10^6 V/m,且动触头外端部区域是灭弧室动态绝缘薄弱点。

参考文献

- [1] Wang Z Q, He J S, Zou J Y, et al. Power switching technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003 (王章启,何俊生,邹积岩,等. 电力开关技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003 (in Chinese))
- [2] Zou J Y, Chen J P, Liu X M, et al. Vacuum switch technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2021 (邹积岩,陈军平,刘晓明,等. 真空开关技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021 (in Chinese))
- [3] Wang J M, Qian Y G. Discussion on the product development of high voltage vacuum interrupters and vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 65-67 (王季梅,钱予圭. 论高压真空灭弧室和真空断路器的产品开发[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 65-67 (in Chinese))

- [4] Wang W C, Zhang P, Li X F, et al. The influence of 12 kV vacuum interrupter structure on electric field distribution: a simulation study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(11): 1031–1038 (王文成, 张朋, 李秀峰, 等. 12 kV 真空断路器灭弧室结构对电场分布影响的仿真研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(11): 1031–1038 (in Chinese))
- [5] Luo Y J, Jia S L, Zhao L H, et al. Electric field optimization method of multi-stage floating shield vacuum interrupter[C]//Proceedings of 2023 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Okinawa, Japan: IEEE, 2023, 334–337
- [6] Cheng X, Li X, Ge G W, et al. Insulation configuration and optimization of integrated voltage self-sharing interrupter for series connection[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 820–828 (程显, 李鑫, 葛国伟, 等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 820–828 (in Chinese))
- [7] Liu X M, Liu W, Li L N, et al. Optimal design of vacuum interrupter based on improved neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(4): 359–364 (刘晓明, 刘威, 李龙女, 等. 基于改进神经网络和遗传算法的真空灭弧室优化设计 [J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(4): 359–364 (in Chinese))
- [8] Bhat R, Kulkarni S V. Influence of contact plate parameters and eddy currents on residual flux decay in AMF-Type vacuum interrupters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 2812–2821
- [9] Liu Z Y, Zheng Y S, Wang Z Y, et al. Analysis and optimization of axial magnetic field characteristics of 252 kV vacuum interrupter contacts[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(15): 123–129 (刘志远, 郑跃胜, 王仲奕, 等. 252kV 真空灭弧室纵磁触头磁场分析及优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(15): 123–129 (in Chinese))
- [10] Li X Z, Zhang Y, Wang Y H, et al. Magnetic field simulation analysis of new type coil-type axial magnetic[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China: IEEE, 2020: 337–340
- [11] Zhong J Y, Bi Y H, Li Q M, et al. Optimization of axial magnetic field characteristics of slotted horseshoe type contacts for 126 kV Vacuum Interrupters[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China: IEEE, 2020: 1–4
- [12] Dong H J, Wen C Y, Sun P, et al. Simulation and optimization of the contact magnetic field of a new type of vacuum interrupter based on orthogonal experiment[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5598–5606 (董华军, 温超阳, 孙鹏, 等. 基于正交实验新型真空灭弧室触头磁场仿真与参数优化设计 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5598–5606 (in Chinese))
- [13] Cao L, Liu X M, Chen H, et al. Optimal design considering uncertainty in tolerances of magnetic field in vacuum interrupters[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(11): 1025–1030 (曹亮, 刘晓明, 陈海, 等. 考虑公差的真空灭弧室磁场不确定性优化设计 [J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(11): 1025–1030 (in Chinese))
- [14] Zou Q. Multi-step prediction of wind direction and optimization of yaw angle taking into account interval uncertainty[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024 (邹强. 计及区间不确定性的风向多步预测及偏航角优化研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2024 (in Chinese))
- [15] Jiang Y Y, Tian J Y, Ji Z X, et al. Dynamic and static weighted searching prediction model for PV outputs with combined interval uncertainty analysis[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2469–2479 (蒋莹莹, 田建艳, 姬政雄, 等. 计及组合区间不确定性分析的光伏出力动静态赋权搜索预测模型 [J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2469–2479 (in Chinese))
- [16] Chen Y L, Ma W M. Uncertainty quantification for trace simulation of fix-II no. 5052 test[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 143: 107490
- [17] Chang Q, Zhou C C, Liu F C, et al. Reliability analysis of aircraft door lock mechanism with interval joint clearance uncertainties[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(8): 264–272 (常琦, 周长聪, 刘付超, 等. 考虑铰接间隙区间不确定性的飞机舱门锁机构可靠性分析 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(8): 264–272 (in Chinese))
- [18] Shariatmadar K, Versteyhe M. Numerical linear programming under non-probabilistic uncertainty models-interval and fuzzy sets[J]. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2020, 28(3): 469–495
- [19] Jiang C. Theories and algorithms of uncertain optimization based on interval[D]. Changsha: Hunan University, 2008 (姜潮. 基于区间的确定性优化理论与算法 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008 (in Chinese))
- [20] Xiu S X, Wang J M. Study on interaction of axial magnetic field on vacuum arc[J]. *Vacuum Electronic Technology*, 1999(5): 1–3 (修士新, 王季梅. 纵向磁场对真空电弧作用的研究 [J]. *真空电子技术*, 1999(5): 1–3 (in Chinese))