

低压电器数智化设计关键技术研究及应用进展

李兴文¹, 尹健宁², 陈思磊², 石桓通¹, 汪倩³, 何胜⁴, 白晓康⁴

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安理工大学电气工程学院, 710048, 西安; 3. 西安理工大学理学院, 710048, 西安; 4. 浙江正泰电器股份有限公司, 325603, 浙江温州)

摘要: 低压电器是构建新型电力系统的重要组成部分,随着新能源发电、直流工厂、数据中心等领域的快速发展,对其性能提出了更高要求。从数字化设计、先进测试技术、故障智能感知、直流断路器新产品研发等层面出发,综述了正泰集团-西安交通大学联合创新中心在低压电器数智化设计领域的合作研究与应用进展。在数字化设计方面,重点总结了空气开关电弧的磁流体动力学建模方法及其在灭弧系统优化设计中的应用。在先进测试技术方面,归纳分析了栅片电压测试、X射线成像诊断、电弧温度光谱测试等先进测试技术。在故障智能感知方面,总结了交、直流故障电弧和漏电的高精度智能检测方法,并介绍了交流故障电弧选线方法研究进展和用电安全故障检测方法的断路器集成技术。最后,介绍了低压直流断路器新产品的研发进展,并探讨了低压直流开断技术的发展趋势。工程示范应用结果表明,低压电器数智化设计已探索和实践出了一种新型高性能低压电器产品的高效研发模式。

关键词: 低压电器; 电弧; 测试; 数字化; 检测

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604003 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0029-13

Research and Application of Key Technologies for Digital and Intelligent Design of Low-Voltage Electrical Apparatus

LI Xingwen¹, YIN Jianning², CHEN Silei², SHI Huantong¹,
WANG Qian³, HE Sheng⁴, BAI Xiaokang⁴

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Zhejiang Chint Electrics Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325603, China)

Abstract: Low-voltage electrical apparatus serves as a crucial component in the construction of new power systems. With the rapid development of fields such as renewable energy generation, DC factories, and data centers, higher performance requirements are being imposed on these apparatuses. This paper reviews the collaborative research and application progress in the digital and intelligent design of low-voltage electrical apparatus conducted by the Chint group-Xi'an Jiaotong University joint innovation center, with a focus on four aspects: digital design, advanced testing technologies, intelligent fault perception, and the development of new DC circuit breaker products. In terms of digital design, emphasis is placed on the magnetohydrodynamic modeling

method for arc behavior in air circuit breakers and its application in the optimized design of arc-extinguishing systems. Regarding advanced testing technologies, techniques including grid voltage measurement, X-ray imaging diagnostics, and arc temperature spectroscopy are summarized and analyzed. In the area of intelligent fault perception, high-precision intelligent detection methods for AC/DC arc faults and leakage currents are outlined, and research progress on AC arc fault line selection methods as well as the integration technology of electrical safety fault detection into circuit breakers is introduced. Finally, the progress in the development of new low-voltage DC circuit breaker products is described, and the development trends of low-voltage DC interruption technology are discussed. Results from engineering demonstration applications indicate that the digital and intelligent design of low-voltage electrical apparatus has explored and established an efficient research and development model for new high-performance products.

Keywords: low-voltage apparatus; electrical arc; test; digitization; detection

低压电器作为低压电力系统中实现电能分配、电路控制和保护功能的核心基础元件,其性能可靠性直接关系到电网安全、工业生产和日常生活。随着“双碳”目标推进和新型电力系统建设,新能源发电、直流配用电、数据中心等场景对低压电器的开断能力、安全性和智能化水平提出了更高要求^[1],断路器开断向着更高电压、更大电流、更小体积发展。故障的智能感知是保证低压系统安全可靠运行的关键,系统故障频发在严重阻碍直流系统发展的同时,也威胁着用电者的生命财产安全,影响我国推进可再生能源的发展,阻碍低碳环保能源架构的推进^[2-3]。

在断路器开断方面,电弧能否开断直接决定了断路器能否成功开断,因此其开断方面的研究主要是围绕电弧特性开展。电弧的数字化仿真和断路器数字化设计已成为研究电弧现象、优化开关设计的现代化高效手段^[4]。同时,先进的电弧特性诊断手段也是诊断电弧特性、研发高性能灭弧策略的必要技术。开展直流系统故障精准检测的研究,不仅是解决故障智能感知难题的迫切需要,更是支撑“双碳”目标实现、推动能源革命的重要举措^[5]。随着电力电子技术的发展,大容量开断也成为目前低压直流断路器面临的一个挑战和难题。

基于此,依托正泰集团-西安交通大学联合创新中心,团队在低压电器数字化设计、开关电弧先进测试技术、故障智能感知、大容量开断等方面做了大量原创性工作,为新型电力系统高性能低压断路器新产品的研发做出了突出贡献,为我国完全自主知识产权的高性能断路器提供了核心竞争力。

1 数字化设计方法

1.1 磁流体动力学建模方法

空气开关在分断电流时产生的电弧是一种高

温、高速的等离子体,其行为受到气体力学和电磁学的复杂调控。磁流体动力学模型是研究这种电弧现象的有效方法,通过该模型,能够耦合求解流体力学中的质量、动量、能量守恒方程与电磁学中的麦克斯韦方程组,从而精确描述电弧在电磁力、气体压力和黏性力共同作用下的动态行为,例如电弧的运动、变形、能量传递以及与周围介质的相互作用等。

低压断路器电弧仿真分析的具体计算流程如图 1 所示^[6]。首先,借助建模软件对低压断路器的实际几何模型进行简化,简化过程中保留关键部件的几何特征,以确保仿真结果能够准确反映实际工况。然后,采用 Ansys Mesh 或 Fluent Meshing 软件对简化后的几何模型进行网格划分。考虑到触头部分的旋转运动特性,故采用动网格模型,使其能够适应固体域的移动以及流体域的重构需求。在网格类型上,选用三角形与四边形相结合的方式,这一组合既满足了触头运动的特殊需求,又减少了网格数,提高了运算速率。接着,在 Ansys Fluent 软件中通过编

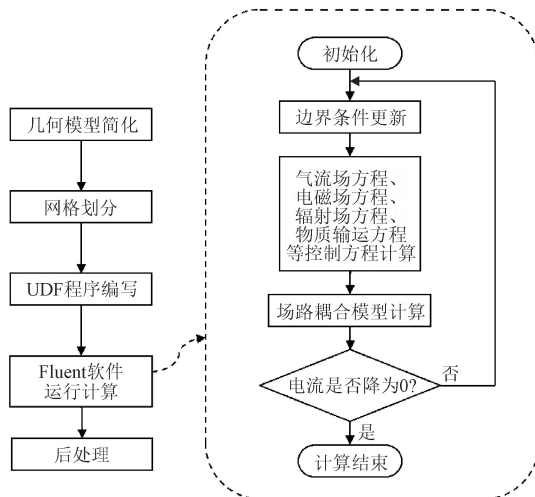


图 1 电弧仿真计算流程

Fig. 1 Flowchart of arc simulation process

写相关的用户自定义函数(UDF)程序对 Fluent 软件的功能进行二次开发,并依据研究需求设置相应的边界条件。同时,将动触头简化为匀速圆周运动,以降低计算复杂度。最后,通过合理设置仿真时间和步长,开展燃弧过程的磁流体动力学仿真。仿真完成后,借助 Tecplot 等后处理软件对结果进行分析和可视化处理,从而为后续的深入研究提供直观且可靠的分析依据。

在采用 Fluent 软件仿真计算过程中,通过严格的时序控制流程实现电弧动态过程的精确模拟^[7]。首先,进行初始化设置,建立包含速度场、温度场和电磁场的多物理场初始条件。然后,在边界条件完备的前提下,依次求解 Navier-Stokes 方程组(含质量、动量和能量守恒方程)和 Maxwell 电磁场方程组。最后,当每个时间步内各物理量残差达到收敛标准后,通过双向场路耦合接口将电弧电压反馈至外部电路模型,进而更新回路电流参数。若电流幅值不低于预设阈值,则基于当前解重新设定边界条件并进入下一轮迭代;反之,当电流衰减至截止条件时终止计算,完整记录从起弧到熄弧的全过程演化数据。

1.2 产气材料智能设计方法

产气材料是加速空气电弧熄灭的关键部件,过去依赖于阻燃剂和增强剂体系的尼龙(PA)6/66 体系已无法满足直流电压超过 1 500 V 的新能源用断路器的灭弧需求。在高电压和大容量需求下,新型产气材料设计迫在眉睫。

有机添加剂改性产气材料是增强材料产气的重要手段:一方面,有机添加剂自身的热解能够产生大量气体,增加灭弧室的气压,且产生的大量气体中含有加速灭弧的关键气体,如 H_2 、 N_2 等;另一方面,加入基体中的酸性物质能进一步促进聚合物基体的分解,从而使基体产生更多的气体。

在面向众多潜在有机添加剂时,如何挑选出性能最佳的添加剂成为关键。为了应对这些挑战,建立一个系统的研究框架如图 2 所示,将机器学习与实验验证相结合,以加速发现用于高性能产气材料的新型有机添加剂。首先,开发新的分子描述符软件,以构建能够预测关键性能指标的多维构效关系模型。然后,采用多维构效关系模型对大规模化合物库进行高通量虚拟筛选,以确定有前景的候选者。最后,将这些候选物掺入 PA66 基质中,并通过实验测试严格验证了它们的性能增强效果。该研究工作不仅为先进产气材料提供了特定的候选添加剂,还开创了一种新的材料科学研究范式,即将计算智能与实验验证协同结合。

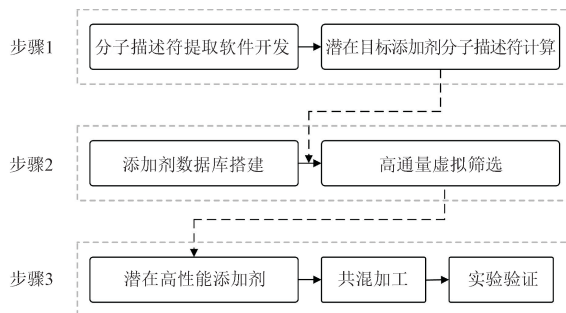
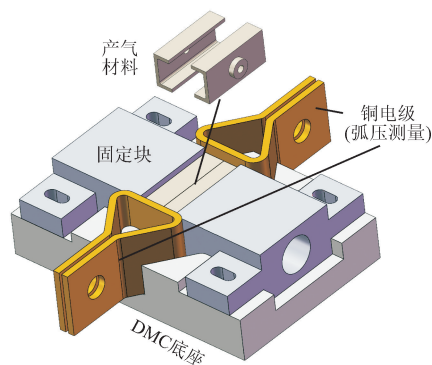


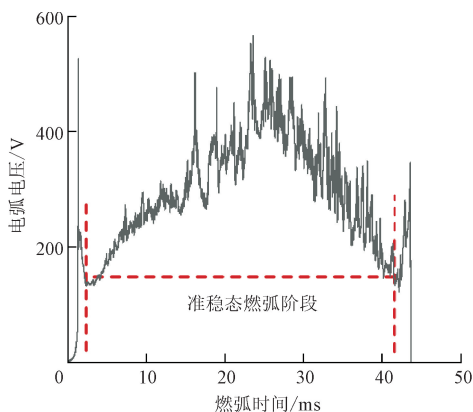
图2 产气材料改性方法

Fig. 2 Modification methods for gassing materials

为准确评估并定量对比不同产气材料对电弧特性的影响,搭建了一套标准化的燃弧实验平台。实验中采用的标准化灭弧室测试模型结构如图 3(a)所示,不同种类产气材料被机加工为相同形状,并安装在模型相同位置^[8]。采用合成回路来模拟长时短路电流的分断过程,其回路频率和充电电压在所有实验中均保持恒定。在分断过程中,采用高压差分探头和高压示波器实时记录整个燃弧过程的电弧电压波形,如图 3(b)所示。截取电弧进入准稳态燃弧阶段的电压数据并计算其弧压平均值,作为评价该材料灭弧性能的主要指标。



(a) 标准化灭弧室测试模型



(b) 电弧电压-燃弧时间曲线

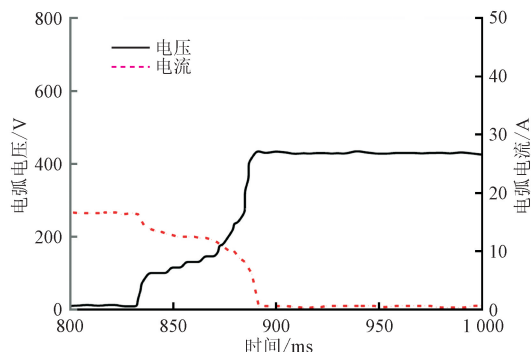
图3 标准化灭弧室模型与电弧电压随时间的变化曲线

Fig. 3 Standardized arc extinguishing chamber model and curve of arc voltage variation over time

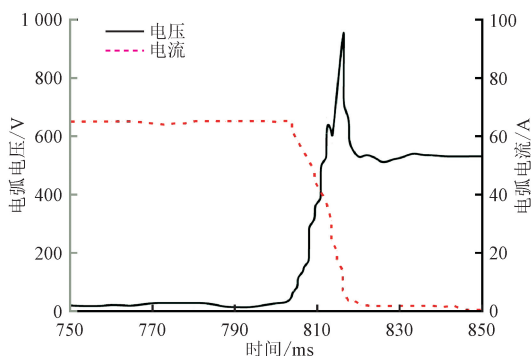
1.3 典型应用案例

基于电弧磁流体动力学建模方法和产气材料智能化设计,对现有微型断路器的灭弧室结构及产气材料进行优化设计并制造了样机。图4为改进后样机的临界电流负载和电寿命试验结果。临界电流为16 A时,对改进后的样机进行100次带电开断操作,试验波形如图4(a)所示。由图结果表明,100次试验下的峰值电压为440.2 V,燃弧时间为57.0 ms,电弧放电时间均远小于1 s,符合测试合格标准^[9]。

在断路器可靠性方面,根据GB/T 14048.2—2020,在直流额定电流为63 A下对样机进行了电寿命试验,要求在保证试样不损坏的前提下,能够承受的开断操作次数应大于1 500。其中,操作频率为120次/h,通电时间为60~80 ms。电寿命试验的部分波形如图4(b)所示。可以看出,样机在1 500次电寿命试验下的燃弧时间为14.4 ms,峰值电压为964.2 V,符合产品合格标准。



(a) 临界电流为16 A时的开断曲线



(b) 额定电流为63 A时的电寿命试验曲线

图4 断路器开断能力和寿命提升的典型应用

Fig. 4 Typical applications of improving the breaking capacity and lifetime of circuit breakers

2 先进测试技术

2.1 栅片电压测试系统

电弧在灭弧室内的动态演变过程,特别是其运

动速度与栅片的相互作用,是决定断路器开断能力的关键因素。为实现这一过程的精确观测与诊断,栅片电压测试是一种至关重要的实验手段。其通过实时监测灭弧室内栅片上的电压,分析栅片上电压信号的变化情况,来判断电弧的运动状态以及栅片是否对电弧形成有效切割,从而反映电弧的运动特性。图5为栅片电压测量结构示意图^[10]。

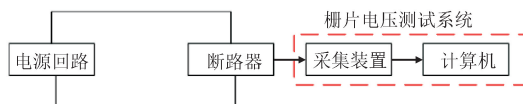


图5 栅片电压结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grid voltage structure

开发的栅片电压测试系统采用多个多通道多功能采集模块并行采集方案,以实现多路信号的一次性检测,满足断路器开断过程中的灭弧室栅片电压、电弧电压、电弧电流等参数的综合检测要求。图6给出了整个测试流程的示意图^[11]。栅片电压测试系统采用超细、高绝缘、耐高温镀银软导线连接测量栅片,适用于不同壳架尺寸的塑壳断路器和框架断路器灭弧室栅片电压测量,绝缘耐压水平满足不同型号塑壳和框架断路器栅片电压的需求。高温镀银软线能有效防止断路器开断实验过程中灭弧室高温气体对导线的烧蚀和损坏(已通过实验测试),保证测量数据的准确性。测试细导线与灭弧室栅片侧前方预先开设的小孔连接,从出气口侧面引出,操作方便、连接可靠、易于实现。一般而言,数据采样精度与采集时间、通道数负相关,即采集时间越长、通道数越多,数据采样精度就相应降低。为保证多通道、多参数测量精度要求,系统采用多个多通道多功能采集模块并行采集,可保证采集数据的准确性和完整性。为避免测试系统对电源的影响,该系统电流检测采用罗氏线圈的非接触式方案,栅片电压和电弧电压只与测试断路器连接,避免与实验回路连接,检测设备安装、调试方便,无安全隐患。

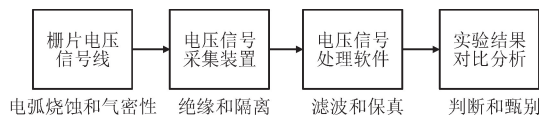


图6 栅片电压测试流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of grid voltage testing process

图7为栅片电压测量示意图, $U_1 \sim U_9$ 分别表示9个栅片上的电位信号。信号线将各栅片上的电压信号传输到采集装置,通过测量栅片电压,可得到:

①各栅片上电位随时间的变化情况,进而知晓电弧何时到达该栅片;②对相邻两片栅片的电位求差,判断电弧是否形成有效切割以及确定切割的时间;③根据过零后的电压分布求得电场强度分布,判断灭弧室薄弱区域。

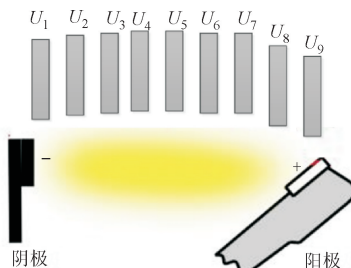


图7 栅片电压测量示意图

Fig. 7 Schematic diagram of grid voltage measurement

该系列装置包括1路电流测量通道和20路电压测量通道,其核心技术参数如表1所示。其高采样率、宽测量范围和优异的抗干扰性能,确保了在短路开断等瞬态过程中对电弧电压信号的精准捕捉。

表1 栅片电压测试系统技术参数

Table 1 Technical parameters of grid voltage testing system

参数	数值
测量线缆间绝缘强度/($V \cdot m^{-1}$)	≥ 300
测量电压最大值/V	1 500(长时) 2 500(瞬时)
电压测量误差/%	< 0.5
电流测量范围/kA	≤ 100
电流测量误差/%	< 5
正常工作温度范围/ $^{\circ}C$	$-40 \sim 50$
系统供电电压/V	220
系统供电频率/Hz	50
检测时间范围/ms	< 40

2.2 X射线成像诊断

低压开关在开断过程中的内部机电耦合行为,如触头系统的瞬态运动、机械部件的响应特性等,是决定其灭弧性能与操作可靠性的关键因素。然而,这些过程发生于不透明壳体内部,且时间尺度仅为毫秒级,传统诊断手段难以实现非侵入式的高时空分辨观测。为此,引入低能硬X射线闪光照相技术,旨在建立一套能够精确捕捉开关内部动态过程的可视化诊断平台^[12]。

本团队所采用的诊断系统核心为一台可移动式闪光X射线源WRPD-1,其实物照片如图8所示。该源采用4个并联的快脉冲直线变压器(FLTD)驱动一个低阻抗、由钨丝短接的杆箍缩二极管负载,可

在 ± 60 kV充电电压下,产生脉宽约25 ns、源尺寸为 $0 \sim 0.5$ mm、等效光子能量为 $10 \sim 15$ keV的X射线脉冲^[13]。在成像放大倍率小于1.56的条件下,系统的空间分辨率优于10 lp/mm(lp为线对数,1 lp/mm表示成像平面1 mm间距内能分辨出的黑白线条对数),足以分辨开关内部的关键结构细节。



图8 WRPD-1闪光照相源实物照片

Fig. 8 Physical photo of WRPD-1 flash photography source

实验布局遵循图9所示的透视成像原理。低压开关样品被精确置于距X射线源为85 cm、距数字成像板为10 cm处,构成1.12倍的放大成像光路。为实现对动态过程的同步捕捉,系统通过一台高精度脉冲发生器(DG535,延时精度小于1 ns)监测开关两端的电压。当开关触头分离产生阶跃电压信号时,DG535脉冲发生器被触发,经预设的精确延时后,进而触发X射线源产生单次脉冲。由于X射线脉宽为25 ns,远小于开关约1.5 ms的机械动作时间,因此所获取的单帧图像可被视为该瞬态过程的一个高清晰度准静态快照。通过逐次调节触发延时,即可重构出整个开断过程的动态序列图像。

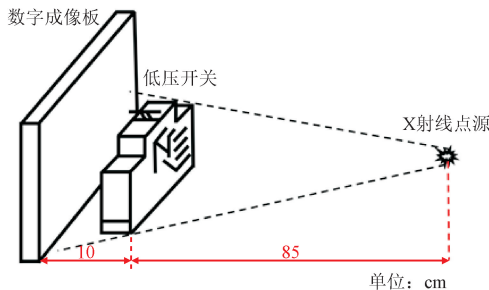


图9 闪光照相诊断实验原理示意图

Fig. 9 Principle schematic diagram of flash photography diagnostic experiment

2.3 电弧温度光谱测试

光谱诊断法是一种非接触式测量电弧核心温度的有效技术,其理论基础建立在电弧等离子体满足局部热力学平衡的假设之上^[14]。使用该方法时,特征

谱线的选取至关重要。考虑到实验电弧在燃弧过程中会强烈烧蚀铜钨触头,则等离子体中必然存在丰富的铜原子,使得谱线信号清晰且易于捕捉。因此,选取 3 条强度较为明显且分离良好的 Cu I(中性铜原子)谱线进行分析,其相关原子特征参数^[15]如表 2 所示。

表 2 Cu 原子特征谱线参数^[15]

Table 2 Cu atoms characteristic spectral line parameters^[15]

谱线波长 λ/nm	跃迁几率 $A/(10^8 \text{ s}^{-1})$	权重 g	位能 E/eV
521.82	0.75	6	6.19
515.32	0.60	4	6.19
510.55	0.02	4	3.82

由于电弧光谱的精确采集是温度计算的基础,因此搭建了高分辨率光谱测量系统平台。其工作流程如下:首先,通过光纤和透镜组成的采集系统,将开关内部产生的弧光聚焦并精确传输至光谱仪。该系统的核心设备为一台 Andor SR750 型 Czerny-Turner 反射式光栅光谱仪,可将复合光分解为按波长分布的单色光谱。随后,利用高性能的增强型电荷耦合器件(ICCD)光电探测器,将光信号转化为电信号并送入计算机进行处理。该套测量平台可采集的波长范围为 270~810 nm,ICCD 的门控脉冲宽度精度可达 2 ns,能够实现对电弧生灭过程中任意时刻的瞬态光谱捕捉。采集到的原始数据经过专业的信号处理软件进行去噪、基线校正后,最终通过谱线拟合和数据分析,提取出计算温度所需的各谱线强度,为后续温度计算提供可靠的数据支持。

采用该系统,可比较 SF_6 、空气、 C_4F_7 、 CO_2 等不同气体在不同摩尔分数下电弧的温度特性^[16]。实验通过采集到的光谱验证了测温方法的可行性。如图 10 所示,在空气介质电弧光谱中,能够清晰地分辨出 3 条独立的铜原子(Cu I)的特征谱线,为后续

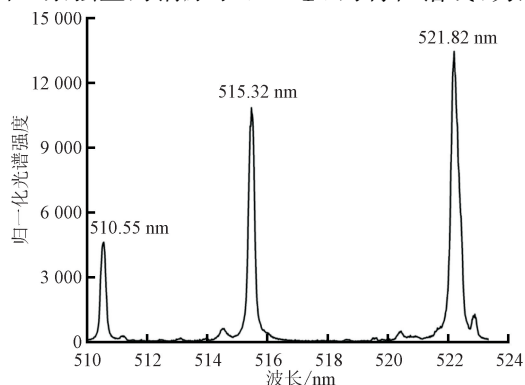


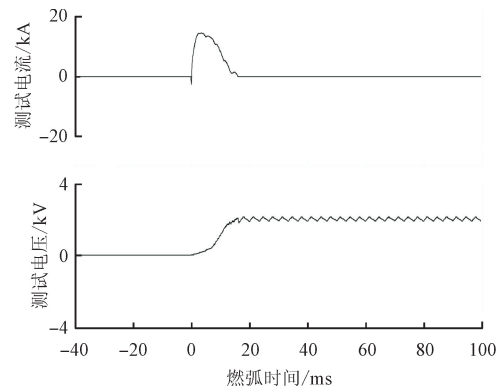
图 10 电弧弧芯位置铜原子 Cu I 的谱线分布

Fig. 10 Distribution of copper atom Cu I spectral line at the position of arc core

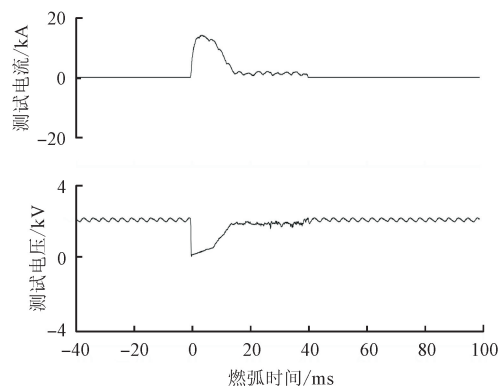
采用玻尔兹曼斜率法计算温度提供了高质量的原始数据。

2.4 典型应用案例

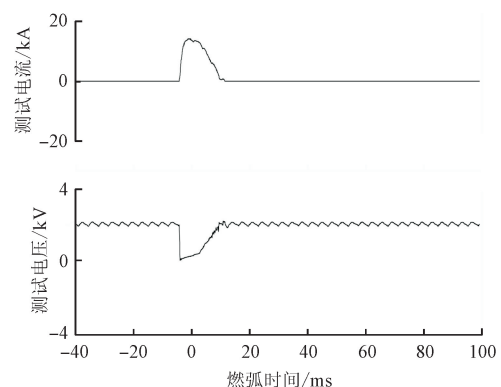
采用上述先进测试技术,某型号塑壳断路器通过了 DC1 500 V/15 kA 的严苛开断试验,如图 11 所示,充分验证了本文所提先进测试技术的有效性。在此过程中,上述先进测试技术为深入解析样机在极限工况下的内部瞬态灭弧过程提供了不可或缺的定量实验依据。



(a) 第 1 次试验开断波形



(b) 第 2 次试验开断波形



(c) 第 3 次试验开断波形

图 11 塑壳断路器 DC1 500 V/15 kA 开断试验结果

Fig. 11 Results of DC1 500 V/15 kA plastic case circuit breaker breaking test

3 故障智能感知与保护设备研发

3.1 交、直流故障电弧精准感知方法

光伏、储能、数据中心等直流元件和典型应用场景发展迅猛,但系统的电弧现象易引发严重的火灾事故。此外,在家庭用电的复杂负载运行场景下,故障电弧已成为电气火灾事故的主要诱因之一。为此,本研究团队攻克了面向多直流应用场景的直流故障电弧特征增强和自适应检测难题,实现了多直流负载、多电流等级条件下的精准识别。同时,面向交流系统的复杂性,构建了融合一维时序与二维轨迹图像的多模态选线模型,显著提升了识别精度。

为模拟多场景下低压交、直流系统中产生的故障电弧,以支持交、直流故障电弧波形分析、检测关键技术研究、故障电弧检测设备研制和故障电弧检测设备的功能测试,搭建可满足以上需求的实验平台,如图12和图13所示。图中,AFG为生弧装置, QF1~QF7为断路器, PT1~PT3为电压互感器, CT1~CT2为电流互感器, S1~S6为开关。

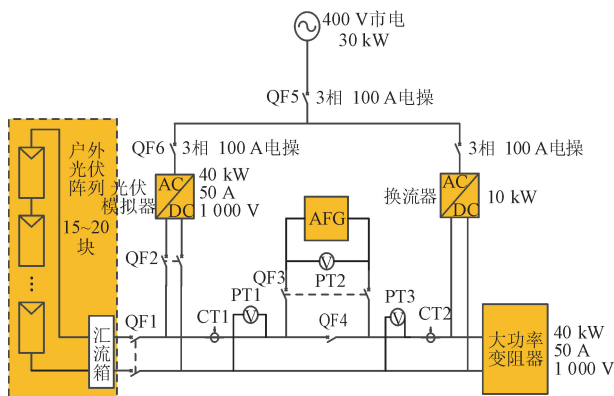


图12 直流故障电弧实验原理示意图

Fig. 12 Principle schematic diagram of DC fault arc experiment

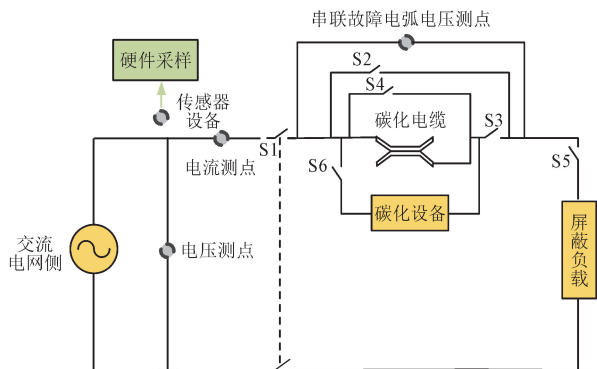


图13 交流故障电弧实验原理示意图

Fig. 13 Principle schematic diagram of AC fault arc experiment

由于实际采样信号为离散信号,且信号长度在小波变换中每层仅保留原先的1/2,而为减少信息损失^[17],需使信号长度为2的幂次方,因此采用以下方法提高数据可靠性:在100 kHz采样频率下,每次采集1 024个点的电流数据作指数平滑滤波处理;再经小波变换得到各频段重构分量;随后采用3点对称差分能量算子(DEO3S)运算得到增强后的特征量,输入长短期记忆网络与注意力机制相结合的分类模型(LSTM-Attention)进行预测,输出预测结果;当故障输出个数达到一定阈值时,认为确实发生故障电弧,进而发出动作信号警示。经过优化选择,当LSTM-Attention故障电弧分类检测模型在连续10个时间窗的故障输出超过5个时,认为故障电弧确实发生,发出警报指令,否则继续循环采样计算。具体的算法流程如图14所示。

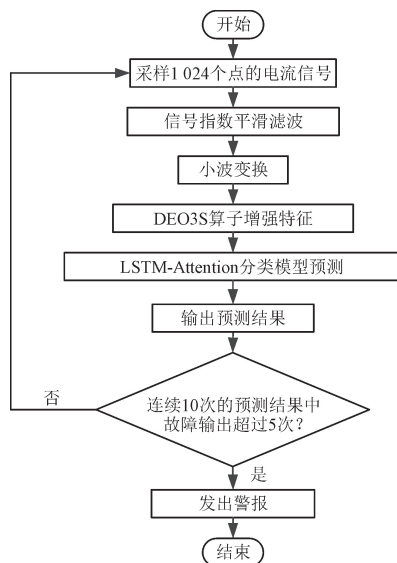


图14 直流故障电弧检测算法流程^[18]

Fig. 14 Flowchart of DC fault arc detection algorithm^[18]

对设计的6类(编号为#01~#06)电流等级直流电弧检测装置进行在线功能验证,记录得到故障电弧的检测时间,如表3所示。

表3 样品测试结果

Table 3 Test results of samples

电流/A	故障电弧检测时间/s					
	#01	#02	#03	#04	#05	#06
6	0.50	0.48	0.46	0.47	0.48	0.49
8		0.52	0.45	0.48	0.49	0.47
10		0.47	0.54	0.50	0.46	0.45
16			0.63	0.53	0.56	0.57
20				0.64	0.58	0.53
25					0.59	0.61
32						0.43

由表 3 可知,该检测装置可有效获得电弧特征,检测效果良好,能有效配合设计好的故障电弧检测算法实现稳定的检测功能,检测准确率和动作时间均满足 UL1699B^[19]标准要求。

然而,在开展交流故障电弧检测时发现,单一的小波频段特征已无法满足低压交流系统下,家庭用电负载等种类更复杂的工况,需要结合电流时域特征加以分析。基于此,如图 15 所示,结合更为有效的双树复小波时频特征和多种电流时域特征,构建结合粒子群优化算法(PSO)^[20]优化双向门控循环单元(BiGRU)模型参数的交流故障电弧检测模型。在获得包含多种单负载、多负载的 63 组电流数据样本后,所搭建的电弧检测模型测试结果如图 16 所示。由图可见,模型对正常、故障等多状态的检测准确率均在 98% 以上。

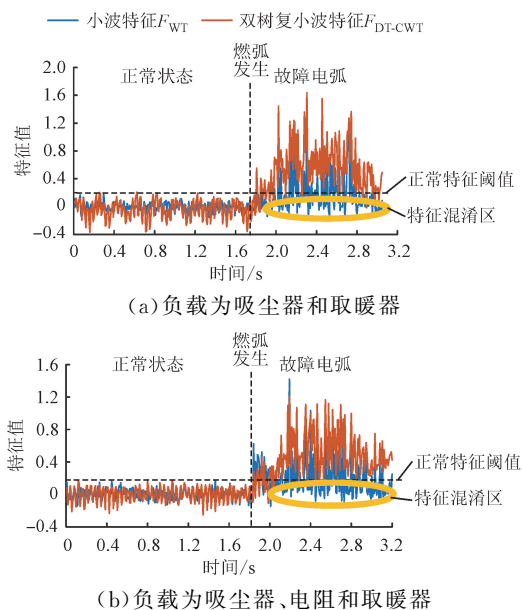


图 15 多负载工况下双树复小波特征和小波特征的对比
Fig. 15 Comparison of dual-tree complex wavelet and wavelet features under multiple load conditions

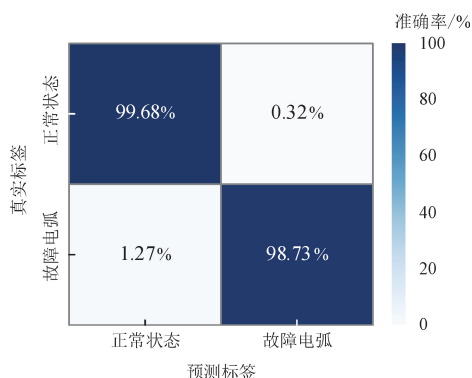


图 16 粒子群优化算法优化双向门控循环单元模型检测结果
Fig. 16 Detection results of PSO-BiGRU model

为进一步确定电弧发生所在的支路,在同步采集回路电压和电流信号的基础上,结合电流分离得到的故障电弧效应电流,构建基于回路电压-故障电弧效应电流轨迹的故障电弧二维选线特征,如图 17 所示。此后,输出构建的 VI 轨迹二值图像,采用 LSTM-Attention 分类模型进行训练,以区分运行负载。通过结合双树复小波的时频特征和多种电流时域特征作为一维特征,故障电弧 VI 轨迹二值图作为二维特征,构建多模态特征融合的故障电弧选线模型,如图 18 所示。采用自适应加权融合策略,对多模态特征一维特征量和二维特征量所提取的时空特征进行融合,即采用高斯误差线性单元激活函数(GELU)进行处理。多模态特征融合后的特征量的具体表达式如下

$$\mathbf{F} = \mathbf{W}_{1D} \text{GELU}(\mathbf{F}_{1D}) + \mathbf{W}_{2D} \text{GELU}(\mathbf{F}_{2D}) + \mathbf{b} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_{1D}$ 为时序特征量; $\mathbf{F}_{2D}$ 为空间特征量; $\mathbf{W}_{1D}$ 为时序权重矩阵; $\mathbf{W}_{2D}$ 为空间权重矩阵; $\mathbf{b}$ 为偏置矩阵。

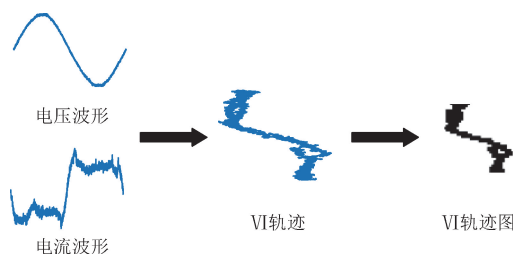


图 17 故障电弧 VI 轨迹生成过程示意图

Fig. 17 Schematic of fault arc VI trajectory generation process

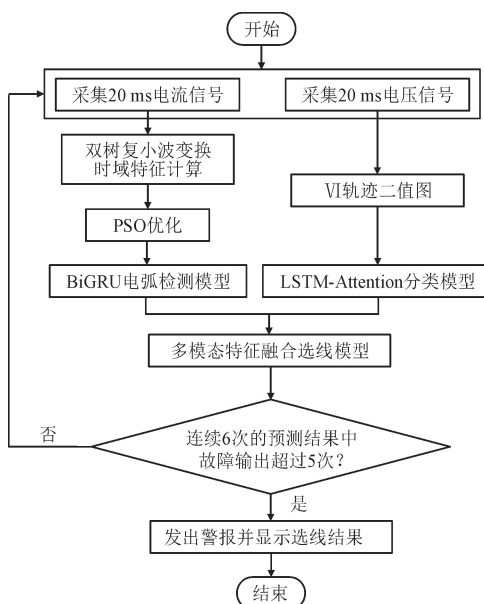


图 18 交流故障电弧选线算法流程

Fig. 18 Flowchart of AC fault arc route selection algorithm

表4展示了故障电弧的选线结果。由表可知,所提方法在单一及二、三、四负载情况下均能对故障电弧进行有效识别,并辨识所发生电弧的支路负载。误判情况多出现于含开关电源的负载组合中,主要是由于开关电源间歇通断运行的独特性,会对线路故障电弧电流产生强烈的影响,这种明显的特性叠加在总线上容易淹没其他负载对故障电弧的影响。

表4 故障电弧选线结果

Table 4 Phase selection results of fault arc

负载类型	准确率	召回率	F1 分数	样本数
荧光灯	1.00	1.00	1.00	60
吸尘器	1.00	0.98	0.99	60
电钻	0.98	1.00	0.99	60
开关电源	1.00	1.00	1.00	60
二负载组合	0.95	0.96	0.96	360
三负载组合	0.96	0.94	0.95	240
四负载组合	0.93	0.96	0.96	60
加权平均值	0.97	0.96	0.96	

3.2 交、直流漏电检测方法

在低压直流系统中,漏电不仅会导致设备损坏、系统效率下降,还可能引发火灾、触电等严重安全事故,直接影响直流系统的安全可靠运行。磁调制漏电互感器的工作原理基于法拉第电磁感应定律,核心组件包括磁芯、线圈和调制电路^[21],其性能优劣直接影响电力系统的安全性、电气设备的保护效能及故障应急响应的及时性^[22]。单磁芯磁调制技术兼具宽频检测能力,是一种高效、精确的漏电检测方法,具有结构简单、成本低廉和检测范围广等优势。

如图19所示,采用MATLAB/Simulink软件搭建单磁芯磁调制漏电仿真模型,以验证磁调制技术在漏电互感器中的应用效果。其中,励磁电压采用方波,可为互感器提供高频调制信号,其工作模式为

$$U_{\text{out}} = \begin{cases} U_e, & U_{R_2} \geq U_{R_s} \cap \frac{dU_{R_s}}{dt} < 0 \\ -U_e, & U_{R_2} \leq U_{R_s} \cap \frac{dU_{R_s}}{dt} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_e 为方波电压; U_{R_s} 为采样电阻 R_s 两端的电压; U_{R_2} 为分压电阻 R_2 两端的电压; t 为时间。

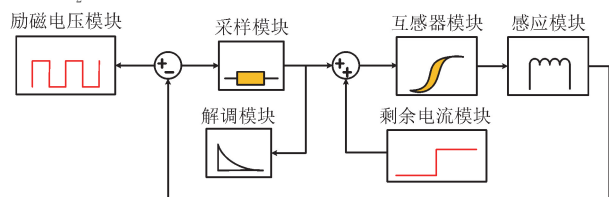
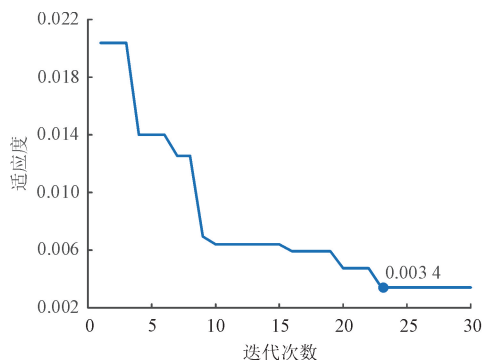


图19 单磁芯磁调制式漏电互感器仿真原理示意图

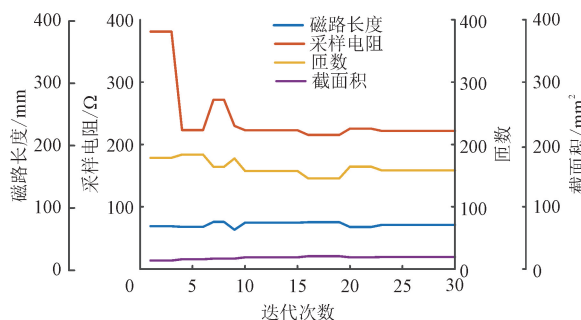
Fig. 19 Simulation principle diagram of single-core magnetically modulated residual current transformer

剩余电流信号通过自定义的信号发生模块模拟生成,互感器磁场的变化会在二次绕组中感应出电流,再由采样电阻以电压信号的形式输出,采样模块的核心元件为采样电阻 R_s 。互感器工作过程中,当磁芯中的磁通量发生变化时,根据法拉第电磁感应定律,二次绕组会感应出电动势。当励磁电流达到设定的峰值时,通过采样电阻反馈电压至励磁电压源,导致励磁电压方向发生改变^[23]。此时,磁芯开始从正向励磁过程转入负向励磁过程,直到磁芯进入饱和阶段。如此循环往复,模拟互感器的动态工作过程。解调模块采用巴特沃斯滤波器^[24]进行四阶低通滤波,以有效提取输入漏电信号中小于1 200 Hz的频率分量。

针对高频微弱漏电下检测精度不足的问题,采用模拟退火粒子群优化算法,对单磁芯磁调制仿真模型的磁路长度、采样电阻、匝数和截面积参数进行寻优,使其能在高频漏电电流为0~1 000 mA范围内获得更高的检测准确率、灵敏度和线性度。相关参数的寻优过程及结果如图20所示。由图可知,优化后的参数组合为磁路长度 $l=70.8507$ mm,采样电阻 $R_s=221.8584 \Omega$,匝数 $N=159$,截面积 $S=19.2482$ mm²。仿真结果表明,优化后的单磁芯磁调制漏电检测模型在不同频率下均有着出色的检测能力。在上述参数组合下,所设计的检测模型能够准确地检测交、直流漏电,且对微弱漏电的灵敏度和精确度均达到了理想水平。后续基于优化后的仿真参数,设计并实现了单磁芯磁调制漏电互感器,并通过实验对其交、直流检测性能进行了全面测试。

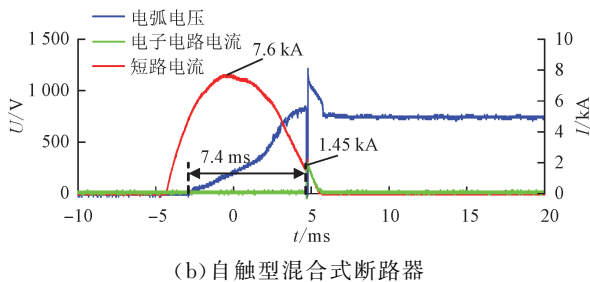


(a) 适应度随迭代次数的变化



(b) 不同参数随迭代次数的变化

Fig. 20 Parameter optimization processes and results



(b) 自触型混合式断路器

图 23 DC750 V/10 kA 下不同类型断路器的短路开断波形^[26]Fig. 23 Short-circuit breaking waveform of different types of circuit breakers under DC750 V/10 kA^[26]

5 结 论

围绕新型电力系统建设对低压电器提出的新要求,本文综述了正泰集团-西安交通大学联合创新中心在数智化设计领域的研究与应用进展,以期对产品性能持续提升提供理论基础和技术参考。

(1)空气电弧磁流体动力学仿真已成为现代灭弧室数智化设计的核心技术,通过对电弧动态行为的准确分析,实现了灭弧室结构的有效优化。

(2)先进诊断技术的应用,实现了对开关内部关键物理量的原位、高精度测量。栅片电压系统揭示了电弧在栅片阵列中的电压分布特性;X射线闪光照相技术捕捉了触头系统的瞬态机械运动;发射光谱法则量化了空气电弧的具体温度。上述先进测试技术为深入揭示电弧动态过程中的机-电-热多场耦合机制提供了直接实验证据。

(3)故障智能感知与保护设备研发,解决了低压电器在新型电力系统背景下面临的多形态故障精准感知和快速切断的关键难题。集直流故障电弧-直流剩余电流检测于一体的智能断路器样机,为复杂配电场景提供了高可靠性的安全保护一体化解决方案。

(4)为应对直流开断挑战,从材料和器件层面开展创新。在材料层面,提出了功能性有机添加剂改性产气材料的新思路,通过优化烧蚀产物的气体组分和产率,有效提升了材料的固有灭弧性能。在器件层面,研制了一种新型自驱式低压混合式直流断路器,利用短路电流自身产生的电磁力驱动机械触头,实现了开关的无源、快速响应,简化了控制复杂度。

6 发展趋势与展望

面向新型电力系统的建设,伴随着新型电工材料、宽禁带半导体器件和人工智能技术的快速发展,低压电器的数智化设计仍需围绕以下几个方面开展深入研究。

(1)自主开发低压电器数字化设计专用软件。进一步完善电弧与壁面材料、电极和栅片的相互作用物理模型,建立更精准的宽参数范围、多组分混合空气电弧的物性参数和辐射模型,研发电磁场与气流场耦合模型的高效数值求解算法,开发具有完全自主知识产权的专用设计软件,为推动低压电器设计技术的持续创新提供重要工具。

(2)应用场景驱动下的低压电器与系统相互作用机理。如何保障不断发展的多元源荷低压系统安全可靠运行是低压电器面临的重大问题,其中的核心是理解低压电器与系统相互作用引起的材料加速老化、局部放电、过电压等现象,需要从低压电器设计、系统保护配置等多方面开展研究。

(3)高电压紧凑化直流开断技术创新。聚焦DC2 000 V及以上电压等级需求,攻关多参量集成匹配、直流电弧调控关键技术,结合功能性产气材料改性与宽禁带半导体器件应用,研发新一代高性能混合式和固态直流断路器。

(4)数智化与AI决策深度赋能。构建“多源感知-模型驱动-智能运维”一体化体系,研发微型化、低功耗多参量传感终端,突破数据压缩传输技术;开发适配低压电器场景的轻量化AI大模型,实现故障实时诊断、寿命预测与主动控制,推动设备从“被动保护”向“主动运维”转型。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [2] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-26)[2025-05-24]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/26/content_5645001.htm.
- [3] XIE Zhimin, LI Xingwen, WANG Jing, et al. Study of measurement and detection algorithm of LVDC residual current [C]//2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 20-27.
- [4] 李兴文,贾申利,张博雅. 气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 757-771.
LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya. Research and application on physical parameters calculation and behavior simulation of gas switching arc [J]. High Volt-

- age Engineering, 2020, 46(3): 757-771.
- [5] 贺之渊, 杨杰, 吴亚楠, 等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 99-113.
- HE Zhiyuan, YANG Jie, WU Yanan, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 99-113.
- [6] YIN Jianning, WANG Qian, LI Xingwen. Simulation analysis of arc evolution process in multiple parallel contact systems [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 2788-2793.
- [7] YIN Jianning, WANG Qian, ZHANG Baoliang, et al. Effect of frequency on arc motion in multiple parallel contacts' system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 1957-1963.
- [8] CAO Weidong, LUO Chaojie, WANG Qian, et al. Evaluation and analysis of gassing material performance used in low-voltage circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(2): 728-738.
- [9] LI Xingwen. Gaseous switching arc and extension to pulsed plasma [C]//2022 IEEE 67th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-12.
- [10] 邓晓峰, 屈建宇, 侯国斌, 等. 万能式断路器短时耐受性能研究综述 [J]. 电器与能效管理技术, 2017(12): 1-7.
- DENG Xiaofeng, QU Jianyu, HOU Guobin, et al. Overview of research about short-time withstand performance for air circuit breaker [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(12): 1-7.
- [11] 刘志伟, 李兴文, 屈建宇. 万能式断路器桥型触头短时耐受性能三维有限元分析 [J]. 电器与能效管理技术, 2016(15): 1-6.
- LIU Zhiwei, LI Xingwen, QU Jianyu. 3-D finite-element analysis on short-time withstand performance for bridge-type contacts of air circuit breaker [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(15): 1-6.
- [12] 李兴文. 低压断路器研发新技术综述 [J]. 电器与能效管理技术, 2015(9): 1-7.
- LI Xingwen. Review of the new research and development technologies for low voltage circuit breakers [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(9): 1-7.
- [13] WANG Tongquan, SHI Huantong, ZHANG Peizhou, et al. Compact hard X-ray flash radiography device based on wire-shortened low-impedance rod pinch diode [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(7): 073511.
- [14] DENG Junwei, ZHANG Boya, ZHAO Dongxu, et al. Spatiotemporal measurement of non-equilibrium density in switching arcs using two-color quadri-wave lateral shearing interferometric wavefront sensor [J]. Journal of Applied Physics, 2025, 138(9): 093301.
- [15] DENG Junwei, ZHANG Boya, CAO Minchuan, et al. Radiation properties of $[C_4F_7N-CO_2-O_2]$ -PTFE-Cu mixtures at high temperatures and pressures for high-voltage circuit breakers [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2025, 58(1): 015206.
- [16] WANG Ke, ZHAO Dongxu, DENG Junwei, et al. Diagnostics of post-arc electron number density in a model circuit breaker [C]//2024 7th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 653-656.
- [17] 孟羽, 陈思磊, 吴子豪, 等. 基于随机共振方法增强光伏直流故障电弧检测特征的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2396-2406.
- MENG Yu, CHEN Silei, WU Zihao, et al. Research on feature enhancement of DC arc fault detection in photovoltaic systems based on stochastic resonance [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2396-2406.
- [18] 杨洪, 孟羽, 陈思磊, 等. 基于注意力机制的光伏系统故障电弧检测与定位研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7840-7851.
- YANG Qi, MENG Yu, CHEN Silei, et al. Research on arc fault detection and location in photovoltaic systems based on attention mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7840-7851.
- [19] 钱广远. UL 1699B《光伏直流电弧故障保护电器》标准解析 [J]. 电器与能效管理技术, 2019(9): 71-75.
- QIAN Guangyuan. Standard analysis of UL 1699B "photovoltaic DC arc-fault detection devices" [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(9): 71-75.
- [20] ZHANG Yefei, ZHAO Zhidong, DENG Yanjun, et al. ECGID: a human identification method based on adaptive particle swarm optimization and the bidirectional LSTM model [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(12): 1641-1654.
- [21] 胡才鑫. 大电流磁调制传感器优化设计及其测量方法 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [22] 袁尧鑫, 陈威. 面向配用电的集成化自激磁通门直流电流传感器设计 [J]. 电器与能效管理技术, 2022(7): 41-49.
- YUAN Yaixin, CHEN Wei. Design of integrated self-excited fluxgate DC current sensor for power distribution [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(7): 41-49.
- [23] 孟佳彬, 李智华, 吴春华, 等. 基于高频信号注入法的光伏系统接地故障检测与定位方法 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 47-54.

- MENG Jiabin, LI Zhihua, WU Chunhua, et al. Ground fault detection and location method in PV system based on high frequency signal injection [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(12): 47-54.
- [24] 杨钰伟, 迟长春, 卢志军. 基于 Multisim 的磁通门式电流互感器解调电路的仿真研究 [J]. 上海电机学院学报, 2023, 26(4): 220-225.
- YANG Yuwei, CHI Changchun, LU Zhijun. Simulation research of demodulation circuit of fluxgate current transformer based on Multisim [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2023, 26(4): 220-225.
- [25] 张照资, 高偲智, 汪倩, 等. 自触型低压混合式直流断路器系统设计与开断特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4544-4555.
- ZHANG Zhaozi, GAO Sizhi, WANG Qian, et al. System design and breaking characteristics research of self-triggered low voltage hybrid DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4544-4555.
- [26] 张照资, 高偲智, 刘玉龙, 等. 自触型低压混合式直流断路器尾部电流转移策略 [J/OL]. 中国电机工程学报. (2025-07-08)[2025-07-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241959>.
- ZHANG Zhaozi, GAO Sizhi, LIU Yulong, et al. Tail current transfer strategy for self-triggered low-voltage hybrid DC circuit breakers [J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2025-07-08)[2025-07-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241959>.

(编辑 李慧敏)

团队介绍:

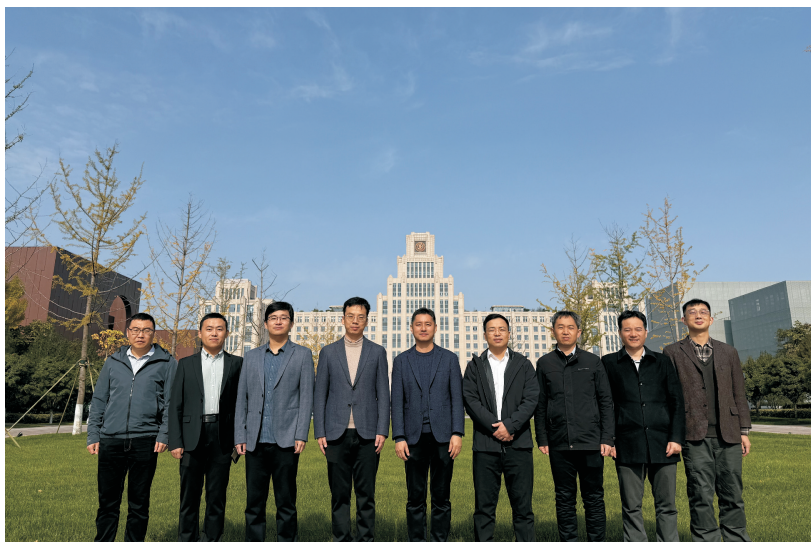
西安交通大学李兴文教授课题组长期致力于高电压与大电流、脉冲功率与放电等离子体的研究及工程应用。课题组现有包括教授、副教授及青年骨干教师在内的核心成员 8 人,以及硕、博士研究生 100 余人。

李兴文教授现任电工材料电气绝缘全国重点实验室常务副主任,担任《中国电机工程学报》《高电压技术》等期刊编委、中国电工技术学会电接触及电弧专委会委员和秘书长、中国电机工程学会供用电安全技术专委会委员、International Conference on Gas Discharges and Their Applications 国际科学委员会委员、International Conference on Electrical Contacts 国际顾问委员会委员等,并获国际电接触领域的学术奖励 IEEE Ragnar Holm Scientific Achievement Award。

团队主持和参与了智能电网国家科技重大专项 4 项,国家重点研发计划项目 6 项,国家自然科学基金重大研究计划集成项目、重大和重点项目等 20 余项。曾获国家科技进步二等奖 2 项、省部级一等奖 9 项,国家教学成果二等奖 1 项和陕西省教学成果特等奖 2 项。



团队负责人:李兴文教授



团队合影