

基于工业CT检测和有限元仿真的盆式绝缘子放电击穿故障原因分析

马笛琴, 陈田, 李阳林, 胡睿智, 连汝慧

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:盆式绝缘子作为组合电器的关键绝缘构件,其内部缺陷引发局部电场畸变,最终诱发放电击穿,严重影响组合电器的可靠运行。文中采用工业用计算机断层成像(industrial computerized tomography,工业CT)检测500 kV中心嵌件带屏蔽环的盆式绝缘子内部缺陷分布,检测发现在屏蔽环、螺栓附近以及环氧树脂和中心嵌件界面均存在多处缺陷;解体发现故障盆式绝缘子放电起始位置位于屏蔽环附近。基于盆式绝缘子内部缺陷分布及放电起始位置,采用有限元仿真软件分析4个位于屏蔽环附近气泡缺陷对盆式绝缘子内部电场的分布影响。研究发现,当气泡位于屏蔽环拐角附近,电场强度达到畸变最大。结果表明:该盆式绝缘子中心屏蔽环拐角为起始放电点,放电路径由中心嵌件屏蔽环根部至法兰处,贯穿盆式绝缘子内层,形成电弧放电击穿通道。

关键词:盆式绝缘子;工业CT检测;有限元仿真;放电击穿

中图分类号:TM 216 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)01-0046-05

0 引言

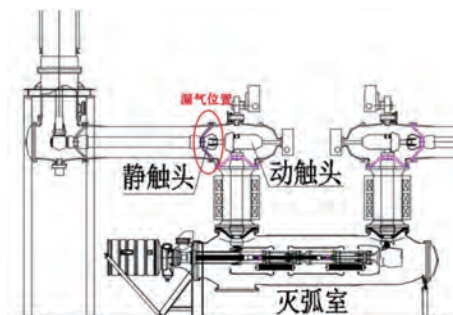
盆式绝缘子作为气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)关键绝缘构件,其可靠性关系到整个电力系统的安全运行^[1-4]。内部缺陷导致盆式绝缘子放电击穿的故障时有发生,严重威胁组合电器运行的可靠性。带电运行过程中,盆式绝缘子内部缺陷引发局部电场畸变,局部放电逐渐发展,造成绝缘材料劣化失效,最终导致放电击穿^[5-7]。缺陷引发的故障通常具有隐蔽性和累积性,采用常规的无损检测方法受限于分辨率和穿透深度,难以实现对微小缺陷的有效识别和定位^[8]。在长期机械力及电场作用下,盆式绝缘子微小缺陷会逐渐扩展,最终导致盆式绝缘子绝缘性能下降或结构失效。工业用计算机断层成像(industrial computerized tomography,工业CT)凭借高能量、强穿透的特点,能够精准检测亚毫米级别的缺陷,为盆式绝缘子的微小缺陷检测提供了高效可靠的技术手段。

文中针对一起500 kV GIS盆式绝缘子放电击穿故障,采用工业CT检测该盆式绝缘子内部缺陷分布。

基于盆式绝缘子内部检测到的缺陷分布及故障发生部位,采用有限元仿真模拟该盆式绝缘子静电场分布,评估内部缺陷对盆式绝缘子内部电场畸变的影响程度。

1 故障概况

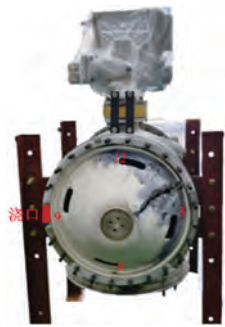
某500 kV变电站5012-1隔离开关A相盆式绝缘子放电击穿,造成500 kV I母跳闸。故障发生后,运维人员现场检查发现A相气室漏气,气室气压持续下降至“零”,靠近可闻到刺激性气味。5012-1隔离开关A相气室位置示意图及实物图如图1所示,故障的盆式绝缘子与静触头相连。



a) 隔离开关气室位置示意图

收稿日期:2025-09-22

作者简介:马笛琴(1998),女,硕士,助理工程师,从事复合绝缘材料检测及绝缘件多物理场仿真研究。



b) 隔离开关气室外观

图1 5012-1隔离开关A相气室示意图及实物图

拆除并解体5012-1隔离开关A相,发现该隔离开关气室内壁存在大量白色粉尘和黑色颗粒,盆式绝缘子凸面有严重放电烧蚀痕迹。盆式绝缘子表面及内外壁之间崩裂出贯穿裂缝,其长度达25 cm,最大宽度为2 cm,从屏蔽罩基座贯穿至密封圈及金属法兰,如图2所示。裂缝旁边存在两道小裂纹,从基座贯穿至盆式绝缘子气孔处。



a) 凸面



b) 凹面

图2 5012-1隔离开关A相盆式绝缘子烧灼痕迹

2 盆式绝缘子工业CT检测情况

为进一步判断该盆式绝缘子击穿放电原因,对故障静触头盆式绝缘子和同气室完好的动触头盆式绝缘子开展工业CT无损检测,判断其内部是否存在缺陷。

2.1 盆式绝缘子结构

盆式绝缘子静触头基座中心嵌件由导电杆和屏蔽环组成,如图3所示,屏蔽环有4个沉降台、24个排

胶通孔,4个沉降台分别拧入螺栓进行固定。

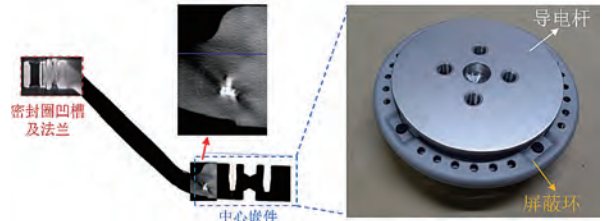


图3 盆式绝缘子几何结构

2.2 故障静触头盆式绝缘子

根据该盆式绝缘子实际工作情况,以朝上方向为12点,作为基准面朝凸面,沿顺时针方向操作,如图1所示。

对故障静触头盆式绝缘子进行工业CT检测,发现故障静触头盆式绝缘子9点半方向(即放电击穿痕迹对侧),距离凸面表面深度约12.19 mm处存在2处缺陷,如图4所示。缺陷1在屏蔽罩内壁,为长径2.30 mm的气泡缺陷;缺陷2在屏蔽罩固定螺栓区域,绝缘料与螺帽交界处。

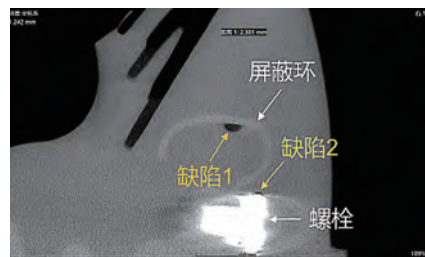


图4 故障静触头盆式绝缘子CT扫描图

2.3 完好动触头盆式绝缘子

完好动触头盆式绝缘子结构如图5所示。以面向浇注口为12点方向,面朝凹面,逆时针方向进行检测。对完好的动触头盆式绝缘子中心金属导体嵌件附近区域进行工业CT检测,发现其中中心金属导体嵌件与盆体粘接面附近区域存在2处裂纹缺陷、1处气泡缺陷,且内部所设置的屏蔽罩定位螺栓附近存在气隙或密度不均的情况。

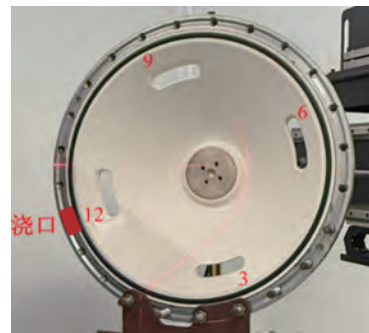
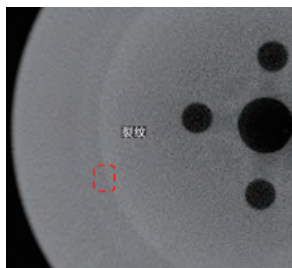


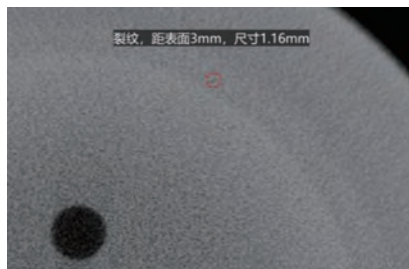
图5 完好动触头盆式绝缘子

故障分析 FAULT ANALYSIS

在距盆体凸面表面深度约4.27 mm,中心金属导体嵌件与环氧树脂界面处,位于11点钟方向,存在1处长约2.03 mm的裂纹缺陷。在距盆体凸面表面深度约3.41 mm,中心金属导体嵌件与环氧树脂界面处,位于6点钟方向,存在1处长约1.16 mm的裂纹缺陷,如图6所示。



a) 裂纹缺陷1



b) 裂纹缺陷2

图6 完好的动触头盆式绝缘子CT扫描图1

在距盆体凸面表面深度约7.50 mm,中心金属导体与环氧树脂界面处,位于10点钟方向,存在1处长约0.71 mm的气泡缺陷。如图7所示。

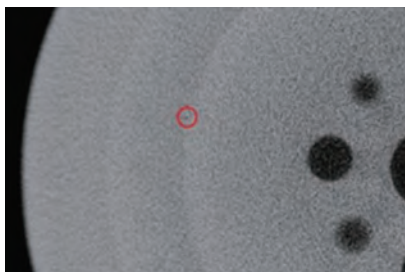


图7 完好的动触头盆式绝缘子CT扫描图2

在中心金属导体嵌件屏蔽环的4个定位螺栓附近,均存在毫米级气隙缺陷或密度不均情况,如图8所示。

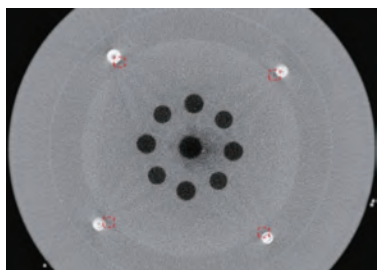


图8 完好的动触头盆式绝缘子CT扫描图3

3 盆式绝缘子电场强度仿真分布

3.1 盆式绝缘子仿真几何模型构建及参数设置

根据工业CT检测图谱,构建了盆式绝缘子内部结构,如图9所示。工业CT检测结果表明,故障静触头盆式绝缘子在屏蔽环附近存在气泡缺陷,完好动触头盆式绝缘子在中心嵌件屏蔽环的4个定位螺栓附近均存在毫米级气隙缺陷或密度不均情况。基于此,构建该盆式绝缘子三维几何结构时,重点构建屏蔽环4个沉降台及拧入的螺栓,忽略排胶孔。该盆式绝缘子具有对称性,故构建了1/4几何结构。

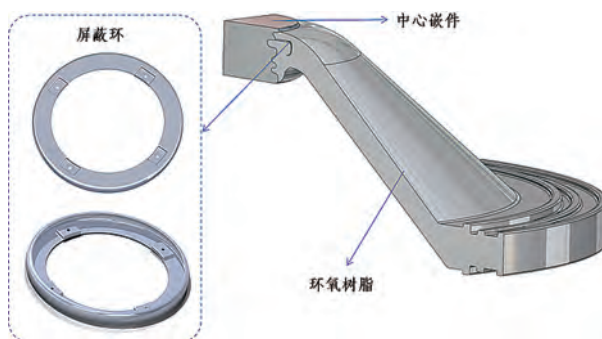


图9 盆式绝缘子几何结构

材料相对介电常数设置如表1,施加电压为相电压有效值,即 $550/(\sqrt{3} \times \sqrt{2})$ kV。盆式绝缘子实际工作时,高电压不仅来源于中心嵌件,也来源于母线,接地部位不仅包含金属法兰,也包含GIS罐体。基于此,在中心嵌件及法兰处,各设置了一个长0.8 m圆柱薄壳,并分别施加高电压和进行接地,中间充入SF₆气体。

表1 材料相对介电常数

材料类型	相对介电常数
环氧复合材料	3
金属	∞
SF ₆	1

对故障盆式绝缘子进行解体,如图10所示。在屏蔽环附近出现放射状烧灼痕迹,为放电起始位置。结合盆式绝缘子工业CT检测出的缺陷分布,可以判定在屏蔽环周围存在多个缺陷。基于此,在屏蔽环周围4个位置分别设置直径为1 mm的气泡缺陷,并进行盆式绝缘子静电场仿真分析,判断气泡缺陷对盆式绝缘子内部电场强度影响。



图10 盆式绝缘子放电起始位置

3.2 无屏蔽环盆式绝缘子电场强度分布

该型号盆式绝缘子结构比较特殊,内部设置屏蔽环。如图11所示,当该盆式绝缘子中心嵌件无屏蔽环,电场最大值位于中心嵌件与环氧树脂交界面处,最大场强为4.4 kV/mm,超过绝缘件内部及嵌件允许工作场强3~4 kV/mm^[9]。基于此,该结构盆式绝缘子在中心嵌件处增设屏蔽环,均匀界面附近电场。

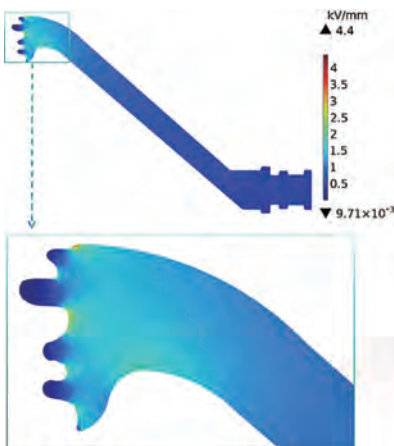


图11 无屏蔽环盆式绝缘子电场强度分布

3.3 带屏蔽环盆式绝缘子电场分布

3.3.1 正常状态下盆式绝缘子电场分布

分析正常运行时盆式绝缘子内部场强分布。如图12所示,在中心嵌件与屏蔽环之间环氧树脂电场值低,但中心嵌件屏蔽环外侧,尤其是拐角处电场强度增大,下拐角处电场强度最大,达到3.55 kV/mm。

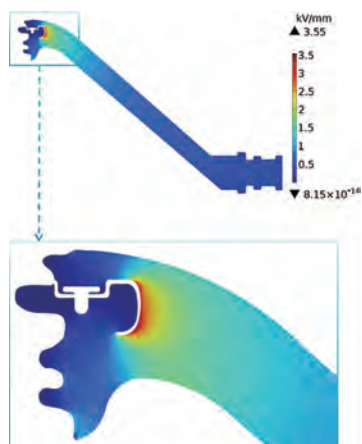


图12 正常状态下带屏蔽环盆式绝缘子电场强度分布

3.3.2 有气泡缺陷盆式绝缘子电场强度分布

工业CT检测结果显示,中心嵌件均压屏蔽环处存在毫米级气孔。因此,需要仿真分析在均压环区气泡缺陷对电场畸变的影响程度。

如图13所示,当直径为1 mm的气泡1缺陷位于中心嵌件屏蔽环内部时,电场强度分布基本不变,最大电场强度还是3.55 kV/mm。

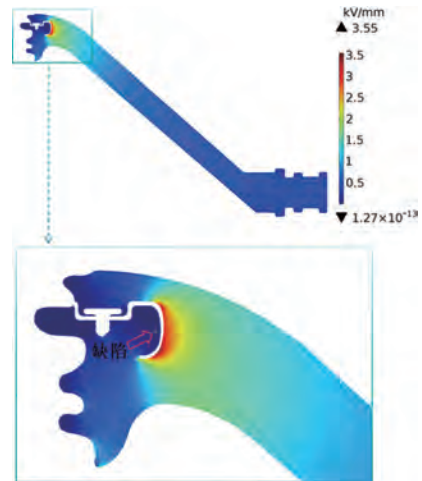


图13 气泡1缺陷在中心嵌件屏蔽环内部盆式绝缘子电场强度分布

如图14所示,当气泡2缺陷位于屏蔽环末端附近时,即缺陷处在中心嵌件屏蔽环内部但即将离开其保护范围,缺陷附近电场强度增大,但最大电场强度仍位于下拐角处,为3.55 kV/mm。

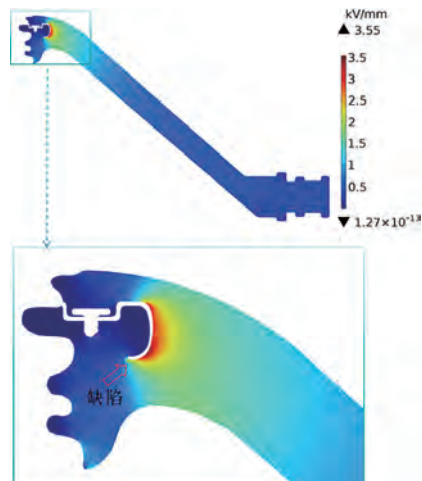


图14 气泡2缺陷在中心嵌件屏蔽环末端附近盆式绝缘子电场强度分布

如图15所示,当气泡3缺陷位于屏蔽环上拐角处,最大电场强度为3.68 kV/mm,对比无缺陷盆式绝缘子,电场强度增大0.13 kV/mm。

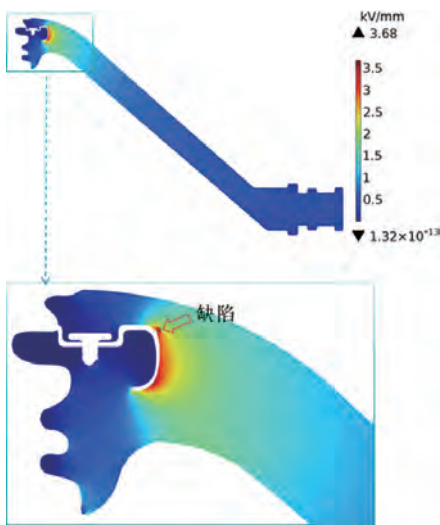


图15 气泡3缺陷在中心嵌件屏蔽环上拐角盆式绝缘子电场强度分布

如图16所示,当气泡4缺陷位于屏蔽环下拐角处,最大电场强度为4.12 kV/mm。对比无缺陷盆式绝缘子,电场强度增大0.57 kV/mm,是无缺陷盆式绝缘子最大场强的1.16倍。

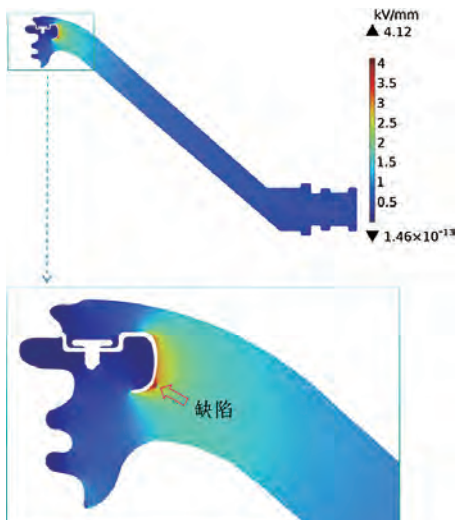


图16 气泡4缺陷在中心嵌件屏蔽环下拐角盆式绝缘子电场强度分布

盆式绝缘子静电场仿真结果如表2所示。综上所述,对于该结构盆式绝缘子,增设屏蔽环可以降低其内部电场强度,当气泡处于屏蔽环保护范围内,缺陷对电场强度分布影响可忽略,最大电场强度仍位于屏蔽环外侧下拐角;当气泡处在屏蔽环外侧,气泡造成局部电场畸变,大于盆式绝缘子正常结构的最大电场强度3.55 kV/mm;当缺陷位于屏蔽环下拐角,畸变的电场值达到最大4.12 kV/mm。

表2 不同结构及缺陷盆式绝缘子内部最大场强

结构	内部电场强度 kV/mm
典型结构(嵌件无屏蔽环)	4.40
带均压屏蔽环结构(正常状态)	3.55
带均压屏蔽环结构(气泡1缺陷)	3.55
带均压屏蔽环结构(气泡2缺陷)	3.55
带均压屏蔽环结构(气泡3缺陷)	3.68
带均压屏蔽环结构(气泡4缺陷)	4.12

4 结语

1) 采用工业CT检测500 kV中心嵌件带屏蔽环的盆式绝缘子内部缺陷分布,结果表明故障盆式绝缘子中心嵌件屏蔽环内壁有一个长径2.30 mm的气泡缺陷;屏蔽环固定用螺帽区域均存在毫米级气隙。同气室的完好盆式绝缘子导体嵌件与树脂界面处,有2条微裂纹缺陷,长度分别为2.03 mm、1.17 mm。对故障盆式绝缘子进行解体,发现放电起始点分布在屏蔽环附近。

2) 在屏蔽环周围设置4个1 mm直径气泡缺陷,对盆式绝缘子进行静电场仿真。正常无缺陷盆式绝缘子内部电场强度最大值位于屏蔽环下拐角,为3.55 kV/mm;当气泡位于屏蔽环内部,气泡对盆式绝缘子内部电场强度分布影响不大;当气泡位于屏蔽环外侧,造成局部电场畸变;当气泡处在屏蔽环下拐角处,电场强度达到4.12 kV/mm。

3) 在长期交变电场作用下,气泡缺陷处局部场强发生畸变,周围区域环氧绝缘逐渐劣化,随着盆式绝缘子运行年限增加,绝缘劣化加速,逐渐从中心嵌件附近形成贯穿通道,并发生放电击穿。

4) 根据本次盆式绝缘子解体、检测情况及仿真分析,该5012-1隔离开关A相静触头盆式绝缘子中心屏蔽环拐角为起始放电点,放电路径由中心嵌件屏蔽环根部至法兰处,贯穿盆式绝缘子内层形成电弧放电击穿通道。

参考文献:

- [1] 何柏娜,孔杰,宁家兴,等.存在气泡缺陷的盆式绝缘子电场仿真分析[J].绝缘材料,2019,52(05):86-92.
- [2] 何柏娜,孔杰,姜仁卓,等.盆式绝缘子金属丝缺陷下电场分布仿真研究[J].绝缘材料,2021,54(01):39-44. (下转第70页)

元接地刀闸紧固螺栓松动,导致接地刀闸在正常运行情况下发生接地。

2) 设备厂家应采用具有防松动措施的刀闸结构,在制造过程中应使用相应力矩扳手紧固螺栓。

3) 运维单位应对相应产品重点关注,结合停电取油进行油中溶解气体测试。若发现气体超标,及时进行分析处理。检修过程中,可转动刀闸操作杆,正常情况下,操作杆行程应在“运行-试验”位置之间,若发现行程超出,应及时进行处置。

4) 加强电压互感器二次电压运行监测,发现电压异常时,应及时查明原因,必要时停电开展诊断性试验。

参考文献:

- [1] 张帅,肖兰,梁博,等.500 kV 变电站不同电压等级线路 PT 断线的原理分析及研究[J].电气技术与经济,2023(01):31-35,44.
- [2] 柯新,叶翰靖,魏艺君.一起 500 kV 变电站保护装置 PT 断线的故障分析与查找[J].江西电力,2023,47(01):43-45.
- [3] 刘妮娜.电压二次回路异常引起的过电压保护误动作分析与反措[J].工程建设与设计,2017(02):52-53.
- [4] 孙其寿.变电站二次系统运行维护实用技术[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [5] 孙艳军,谢蓓敏,唐延明.500 kV 线路 PT 二次电压不平衡的原因分析[J].电力安全技术,2015,17(03):38-43.
- [6] 左亚芳.变电站二次系统典型异常级故障 100 例[M].北京:中国电力出版社,2017.

(上接第 33 页)

- [10] 邱刚,陈杰,张迺龙,等.基于 YOLOv3 和 HSV 颜色空间的绝缘子低/零值故障诊断研究[J].高压电器,2023,59(01):148-153.
- [11] 武涵聪,陈思磊,孟羽,等.基于 Chirplet 稀疏表示的大电流光伏系统微弱故障电弧检测方法[J].中国电机工程学报,2025,45(03):1148-1160.
- [12] 王琼苑,褚继峰,李秋霖,等.基于微型气体传感阵列的空气绝缘设备放电故障识别[J].电工技术学报,2023,38(23):6494-6502.

- [13] 杨正盛,刘芳.基于 LSTM 和多头注意力的气体绝缘开关柜局部放电检测框架[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(02):108-115.
- [14] 张廷荣,段承成,胡延文,等.一种用于接触网腕臂绝缘子破损大小检测的 YOLOv7-OpenCV 算法[J].铁道科学与工程学报,2025,22(04):1870-1882.
- [15] 孙新娟,杨天宇.融合注意力机制的改进型 YOLOv5 绝缘子缺陷故障检测方法[J].科学技术与工程,2024,24(17):7221-7230.

(上接第 50 页)

- [3] 王永强,胡芳芳,谢军,等.GIS 盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J].绝缘材料,2016,49(01):40-45.
- [4] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等.缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2018,44(03):982-992.
- [5] 常文治,毕建刚,刘姝嫔,等.GIS 盆式绝缘子典型缺陷的电场仿真[J].高压电器,2018,54(05):138-143.
- [6] 孟庆红.不同绝缘缺陷局部放电下 SF₆分解特性与特征组

分检测研究[D].重庆:重庆大学,2010.

- [7] 刘东阳,王瑶,佟维妍,等.一种降低 GIS 盆式绝缘子局部放电的方法及应用[J].绝缘材料,2025,58(01):137-144.
- [8] 刘惠龙.典型缺陷对盆式绝缘子的影响及相关检测方法研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [9] 黎斌.SF₆高压电器设计(第 5 版)[M].北京:机械工业出版社,2019.