

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.016

GIS隔离开关用绝缘拉杆含异物及缺陷时的电场分析

卫昕卓¹, 邓宏伟¹, 陈燕南¹, 晏年平², 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: GIS隔离开关中的绝缘拉杆作为连接高压带电部分与零电位部分的绝缘件, 承受着很大的电压降。同时, 由于在机构转动过程中, 可能造成绝缘拉杆表面或内部损伤或出现因金属摩擦而产生的导电颗粒附着现象。这都将对绝缘拉杆的绝缘性能产生影响。因此, 探索GIS隔离开关用绝缘拉杆的电场分布特点及异物缺陷的影响规律, 将为GIS隔离开关的结构设计、生产检验等环节提供参考。文中结合550 kV隔离开关的设计方案和运行环境, 采用三维有限元方法, 对隔离开关结构进行了电场仿真计算。比较了绝缘拉杆上的不同缺陷或异物对电场分布的影响, 并系统总结了不同因素对电场分布作用的相关性和规律。计算结果表明, 表面附着金属颗粒所产生的电场畸变效果最为严重, 而表面缺陷在接近低压端时有更高的放电风险。基于对计算结果的分析, 文中对绝缘拉杆的制造与检验标准提出了合理的建议。

关键词: GIS隔离开关; 电场仿真计算; 绝缘拉杆; 缺陷及异物

Electric Field Analysis of Insulated Pull Rod with Different Particles and Defects in GIS Disconnect Switch

WEI Xinzhuo¹, DENG Hongwei¹, CHEN Yannan¹, YAN Nianping², PENG Zongren¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: In GIS disconnect, insulated pull rod is the connection between high voltage parts and grounding potential parts, so it suffers a significant voltage drop. And due to the mechanical movement, it's possible to produce some particles, or mechanical damage on insulated pull rod, which may impact on electric field distribution. This paper mainly focuses on the impacts of foreign materials and defects with diverse factors on the insulated pull rod, to provide references and guidance for structural design, manufacturing, etc. First, with a common 550 kV GIS disconnect structure and its operating condition, 3D finite element method is performed and the distribution of potential and electric field have been calculated. Then, comparisons and analysis have been done, including surface defects and foreign material with different size, and locations. At last, the correlation between defects and the electric field distribution have been systematically analyzed. According to the results, adhering metal particles on insulated pull rod are the most dangerous for field distortion. And surface defects close to the low voltage parts are more likely to cause flashover. Based on the research achievements, practical advices for the manufacturing and quality criteria of insulated pull rod are proposed.

Key words: GIS disconnect; electric field simulation; insulated pull rod; foreign material and defect

0 引言

特高压电网建设中, GIS 是其中的关键设备, 而

隔离开关又是 GIS 中的一个重要部件^[1]。隔离开关是一种没有专门灭弧装置的开关设备, 在合闸状态能可靠地通过正常工作电流和短路故障电流; 在分闸后均应建立可靠的绝缘间隙, 将被检修线路和设备与电源隔离。在线路中, 主要起检修与分段隔离、倒换母线、

收稿日期: 2015-11-19; 修回日期: 2015-12-23

基金项目: 国网公司科学技术项目(GYB 17201300112)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation(GYB 17201300112).

分合空载电路和自动快速隔离等作用^[2-3]。

在设计时,除确保断口间足够的绝缘距离外,还应使隔离断口中的电场分布均匀,而断口间的电场分布特性主要是由屏蔽罩的外形结构及表面情况决定的^[4-6]。GIS 隔离开关中包含动静电极,绝缘拉杆,盆式绝缘子等诸多部件。其中,绝缘拉杆作为连接高压带电部分与零电位部分的连接件,承受着很大的电压降,并且因其在机构转动过程中,可能出现损伤或附着异物等现象,给绝缘拉杆的绝缘性能产生影响^[7-8]。因此,随着电力系统电压等级的提高,隔离开关的电场分布特性,绝缘结构特点,绝缘拉杆的缺陷与杂质^[9]等问题都成为影响设备安全运行的重要因素,也受到越来越多的关注。

文中利用有限元分析软件,建立了三维 GIS 隔离开关计算模型。计算了典型结构电场分布情况,并分析了内部缺陷及异物对电场分布的影响。文中结论可为今后 GIS 隔离开关在结构设计、生产制造、现场装配等环节提供指导,有助于提高设备的长期稳定安全运行。

1 计算模型建立

文中建立了一个三维 550 kV GIS 隔离开关三维模型,其具体结构见图 1。

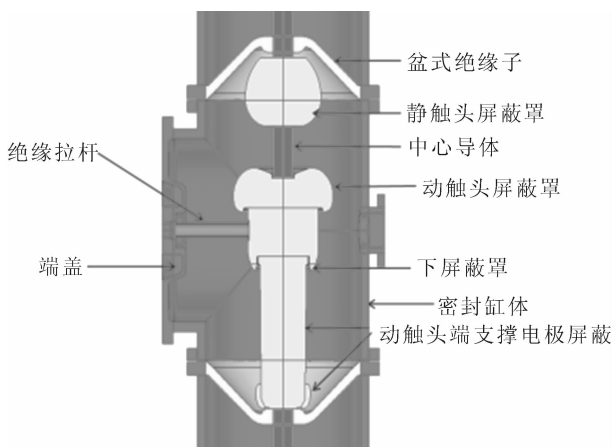


图 1 GIS 隔离开关结构示意图

Fig. 1 Structure of GIS disconnector

对隔离开关模块内部电场分布有较大影响的结构包括:中心导杆、动触头屏蔽罩、静触头屏蔽罩、支撑屏蔽罩、盆式绝缘子及其屏蔽罩和绝缘拉杆。

作为 550 kV 交流系统用 GIS 隔离开关,在确定其加载条件时,考虑到为了研究单相设备的均压特性,要计算和分析单相设备一个正弦波周期内的最高场强^[10-11],此时需施加交流 550 kV 系统最高运行相电压的峰值,即 $550\,000/\sqrt{3} \times \sqrt{2} = 450\,000\text{ V}$,其作用在中心导体及其相连金属屏蔽上。缸体电位为零。

计算时取绝缘拉杆材料与 SF₆ 气体的相对介电常数分别为 3.5、1。盆式绝缘子介电常数 6.5。各绝缘材料的相对介电常数取值见表 1。

表 1 各部件材料相对介电常数取值

Table 1 Parameters of calculation

材料名称	相对介电常数
SF ₆ 气体	1.0
金属	1.0×10 ¹⁰
绝缘拉杆	3.5
盆式绝缘子	6.5
非金属电颗粒	7.0

2 典型电场分布计算

通过有限元仿真计算,得到了典型隔离开关间隔内的电位和电场分布情况。整体电位和电场分布云图见图 2。在表 2 中列出了间隔中关键部位的最大电场强度值。

为使电场分布比较均匀,其关键部位的最大场强值需控制在许用值以下,即限制在设计基准以内。根据实际运行经验得出的控制值,在雷电冲击电压下,GIS 缸体内的金属屏蔽罩表面的电场强度应不高于 24 kV/mm,而绝缘材料表面不应高于 12 kV/mm^[12],经过计算转换到 550 kV 交流电压系统情况,绝缘材料表面的控制场强为 2.4 kV/mm。

通过图 2 可以看出,高场强主要出现在动静触头屏蔽罩上。而绝缘拉杆表面的电场强度为 2 681.32 V/mm,高于控制场强值。

绝缘杆表面电位电场分布曲线见图 3。由图 3 可见,绝缘拉杆表面电位电场分布情况,所选路径方向为从高压侧到低压侧。绝缘拉杆表面前 104.588 mm 的长度承担了 50%的压降。而最大场强值出线在靠近中心导杆侧约全长 1/4 处,达到 2 361.87 V/mm。之后场强在 209.18 mm 处开始出现迅速下降。

绝缘拉杆表面的电位电场分布都很不均匀。绝缘拉杆作为连接高压带电部分与零电压罐体间的绝缘件,它承受着很大的电压降,其他部分的互相影响也使绝缘拉杆上的电场分布极不均匀。同时它承担着机械驱动的任务,在机构转动过程中,它将受到很大的扭矩作用。在此过程中可能造成其表面或内部裂痕及附着于其上的因金属摩擦而产生的导电颗粒,这些都可能对绝缘拉杆的绝缘性能产生影响。

从结构设计也可看出,动触头屏蔽罩与绝缘拉杆在距中心 139~173 mm 处很接近。在上述条件作用下,动触头屏蔽罩与绝缘拉杆及端盖之间可能形成放电通道。在实际运行中,很多事故都起于原因^[13-14]。

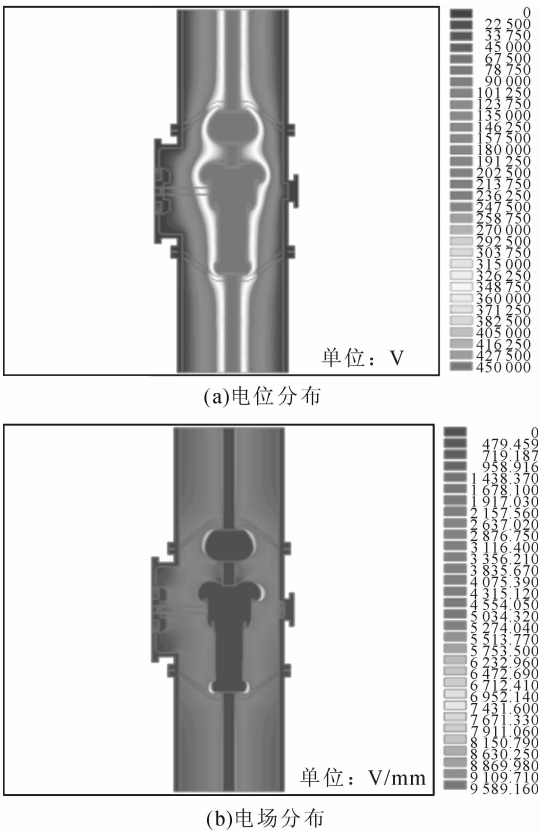


图 2 隔离开关电场电位分布云图
Fig. 2 Shaded plots of the potential and the electric field

表 2 关键部位表面最大电场强度值
Table 2 Maximum electric field in GIS disconnector

各关键部位	电场强度/(V·mm ⁻¹)
动触头屏蔽罩	8 085.41
静触头屏蔽罩	7 017.60
中心导体	3 387.64
下屏蔽罩	6 401.71
动触头支撑屏蔽罩	4 591.19
绝缘拉杆表面	2 361.87

下屏蔽罩, 由于屏蔽罩表面形状尖锐突出, 所以此处电场较高。但由于其伸出方向向内凹使得外表面平整光滑, 而又远离绝缘拉杆和动触头屏蔽罩互相作用所在区域, 所以其与绝缘拉杆之间形成放电通道的可能性不大。

3 典型事故分析

当故障发生时, 500 kV 变电站母线差动保护动作, 继而母线上所有断路器跳闸现象, 造成停电事故。

故障录波仪检测到故障电流与故障时间等相关参数。对母线各段气室内 SF₆ 气体分解物进行检验, 可以发现故障隔离开关气室内 H₂S 与 SO₂ 超标, 并辅以气室微水测量, 发现超过正常值, 从而确定

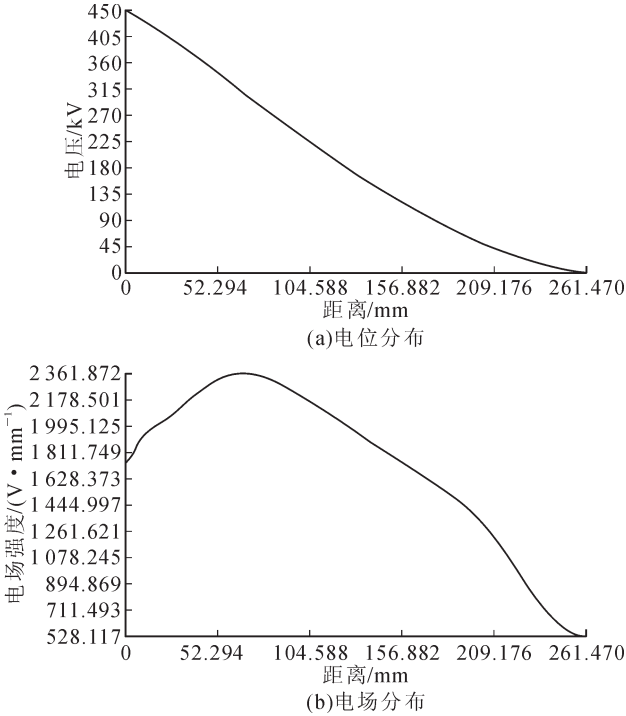


图 3 绝缘杆表面电位电场分布曲线
Fig. 3 Potential and electric field distribution along insulated pull rod surface

了故障位置。

在确认故障隔离开关气室压力正常后, 实施拆解目视检查。发现隔离开关动触头屏蔽罩、绝缘拉杆与端盖有严重灼蚀, 见图 4。动屏蔽罩上烧蚀出了直径为 30 mm 的孔洞, 而端盖上 4 颗螺栓头部也已出现融化迹象。这说明在动触头屏蔽罩与端盖之间, 有沿绝缘拉杆表面出现电弧放电的可能性。此外, 为探明事故发生原因, 对故障模块进行全方位检查, 但在生产记录文件、关键零件尺寸、表面喷漆检查及相邻模块检查等环节中均未发现异常情况。

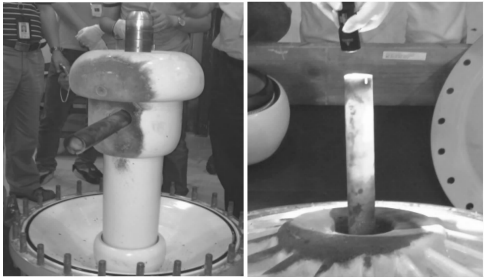


图 4 隔离开关闪络事故现场图
Fig. 4 Accident scene drawing for GIS disconnector

由此, 关注重点集中到绝缘拉杆的绝缘性能方面。表面无明显机械损伤, 但由电弧热量引起的碳化颜色变化分布并不均, 且在低压端更集中。

装配或现场安装过程中引入的异物或本身存在缺陷可能是重要的事故原因。随着设备运行时间增长, 异物的附着力减弱, 并在电场的作用下移动

至屏蔽罩和绝缘杆附近区域,引发局部电场畸变,进而导致动触头屏蔽罩与绝缘拉杆间隙的闪络现象。电弧在放电过程中产生巨大的热量,它将对包括动触头屏蔽罩,绝缘拉杆及端盖造成损伤。对于金属,当屏蔽罩等融化时,在高温下的金属液体或蒸汽可能会喷溅到其他部位,使其表面电场分布不均,进一步影响设备的整体绝缘性能。对于绝缘材料,其玻璃化温度为 129°C ,电弧可能造成热损伤。浅层颗粒可能暴露,或引发区域电场激增,从而诱发连续放电通道的形成。

下文将对绝缘拉杆可能存在的异物与缺陷情况做进一步的研究。闪络后的绝缘拉杆见图5。

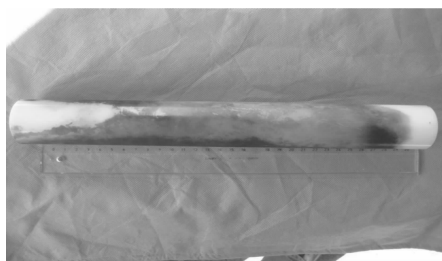


图5 闪络后的绝缘拉杆

Fig. 5 Insulated pull rod after flashover

4 缺陷情况下电场分析

基于以上分析,文中重点关注隔离开关内绝缘拉杆的表面和内部存在缺陷的情况下的电场分布。所谓缺陷,包括表面凸起,表面凹陷,表面导电颗粒附着与内部气隙等4种情况^[15-18]。在接下来的计算中,对电场分布产生影响的因素包括缺陷尺寸与所处位置。

为方便之后的比较与分析,电场增强系数 f 定义为将由缺陷所引起畸变电场的最大场强值,与无缺陷时相应位置的场强值之比。

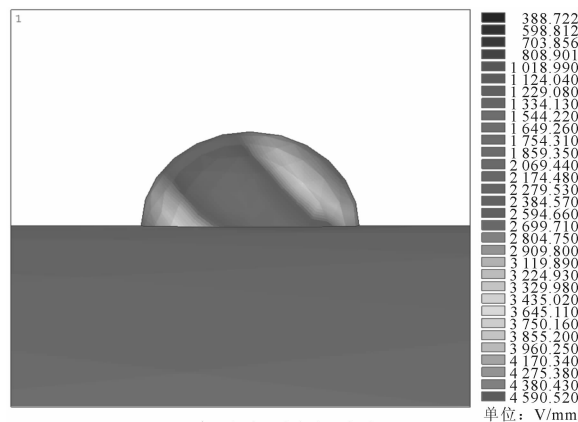
在之后的计算中,若无特别声明,所研究的缺陷距中心导杆相距 50 mm ,直径为 1 mm 。

对于小尺寸结构的处理方式,采用20-node三角形六面体单元自由剖分方式,但外表面需要提前根据需要设定网格边界条件。这样的网格剖分方法有助于改善网格质量,提高计算的准确性。

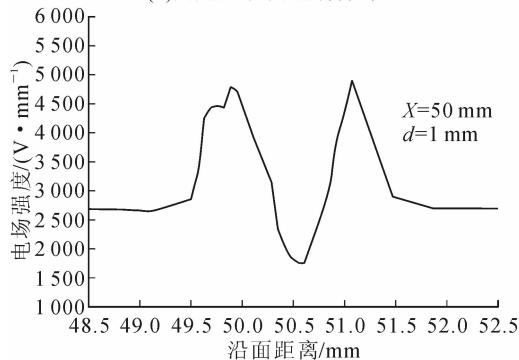
4.1 绝缘拉杆表面凸起

表面凸起影响下的绝缘拉杆表面电场分布见图6。由图6可见,绝缘拉杆上表面电场分布曲线在凸起处发生了明显的变化,并出现了最大和最小电场强度值。场强曲线是沿穿过凸起对称轴的路径得到的场强值,在经凸起边缘不远处达到峰值,随后急剧降至最小值,之后又在过凸起轮廓线最高点后达到峰值。其他部分表面电场分布未受影响。可以

看到凸起表面场强近 5 kV/mm ,且电场分布极不均匀。



(a)凸起处表面电场分布



(b)凸起表面电场分布曲线

图6 绝缘拉杆表面凸起时的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution on surface bulges of insulated pull rod

距中心导体 100 mm 处的表面凸起的尺寸对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图7(a)。可见,凸起尺寸在 $0.5\sim 2\text{ mm}$ 范围内变化时,由凸起所引起的绝缘拉杆表面最大场强值与最小场强值均基本相等,电场分布也基本一致。由此可见,凸起尺寸变化时,表面电场的增强或减弱程度基本不变。只是沿径向场强曲线变化的范围正比于随凸起尺寸的变化,其畸变范围约为凸起尺寸的3倍。

凸起中心径向位置的变化对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图7(b)。可见,位于不同径向位置的凸起,虽然凸起处最大场强值及最小场强值各不相同,但电场增强系数 f 值不大,这说明即便凸起处于绝缘拉杆表面不同位置,其对表面电场的增强程度基本一致。电场增强系数 f 与表面凸起中心径向位置 X 的关系见表3。

4.2 绝缘拉杆表面凹陷

表面凹陷影响下的绝缘拉杆表面电场分布见图8。由图8可见,绝缘拉杆上表面电场分布曲线在凹陷处发生明显变化,并出现最大与最小电场强度值。沿凸起对称轴的路径得到的电场分布曲线在凹陷附近发生变化:电场强度在凹陷边缘处降到最小

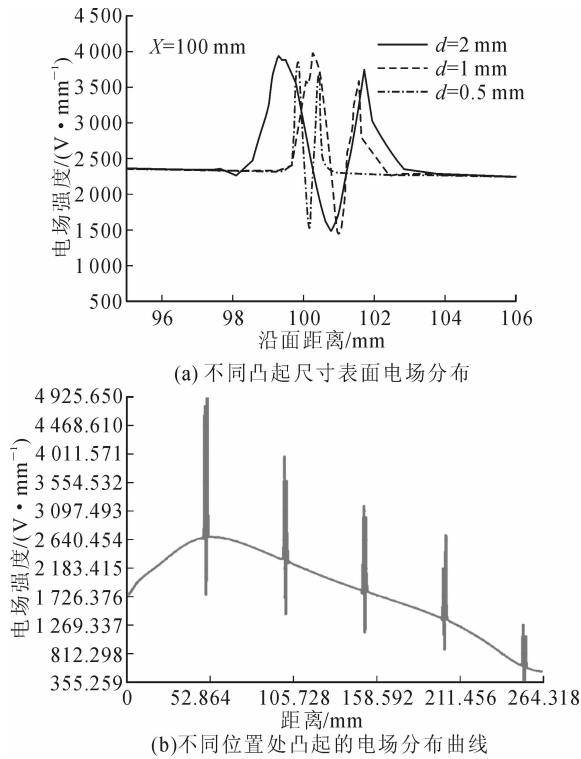


图7 绝缘拉杆表面凸起时的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution on surface bulges with different factors

表3 电场增强系数 f 与表面凸起中心径向位置 X 的关系Table 3 Relation between the distortion coefficient f and radial positions X of defects on insulated pull rod

X/mm	50	100	150	200	250
f	1.799	1.712	1.730	1.627	2.017

值,而后在整个凹陷部分逐渐增大,至凹陷另一端边缘附近达到峰值。其他部分表面电场分布未受影响。可以看到凹陷所引起的最大表面场强约 3 kV/mm 。

距中心导体 100 mm 处的表面凹陷的尺寸对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图 9(a)。由图 9(a) 可见,凹陷尺寸在 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 范围内变化时,由凹陷所引起的绝缘拉杆表面最大场强值与最小场强值均变化不大,电场分布基本一致。由此可见,凹陷尺寸变化时,表面电场的增强或减弱程度基本不变。只是沿径向场强曲线变化的范围正比于随凹陷尺寸的变化,其畸变范围约为凹陷尺寸的 4 倍。凹陷中心径向位置的变化对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图 9(b)。位于不同径向位置的凹陷,虽然凹陷处最大场强值及最小场强值各不相同,但 f 值相差较小,这表明即便凹陷处于绝缘拉杆表面不同位置,其对表面电场的增强程度基本不变。电场增强系数 f 与表面凸起中心径向位置 X 的关系见表 4。

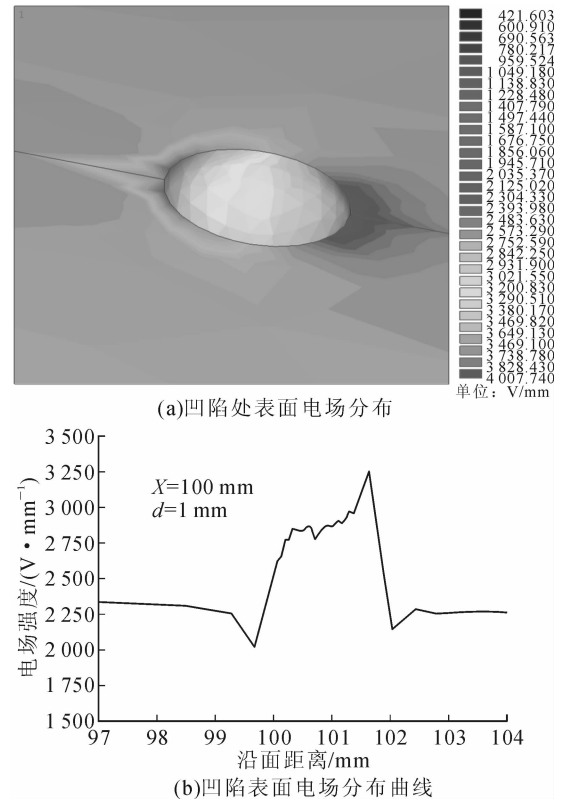


图8 绝缘拉杆表面凹陷时的电场分布

Fig. 8 Electric field distribution on surface depressions of insulated pull rod

4.3 绝缘拉杆表面附着金属颗粒

表面附着导电颗粒的绝缘拉杆表面电场分布见图 10。由图 10 可见,绝缘拉杆表面电场分布曲线在附着颗粒处发生明显变化,并出现最大与最小电场强度值。沿附着颗粒对称轴的路径得到的电场分布曲线在颗粒附近发生变化:电场强度在颗粒近中心导体边缘处剧增至最大电场值,随后急剧减小,之后又在过凸起轮廓线最高点后达到峰值。其他部分表面电场分布未受影响。最大表面场强约为 9 kV/mm 。

距中心导体 100 mm 处的表面附着颗粒的尺寸对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图 11(a)。由图 11(a) 可见,尺寸在 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 范围内变化时,由凹陷所引起的绝缘拉杆表面最大场强值随尺寸的增大而增大,电场最小值变化不大,电场分布也基本一致。由此可见,颗粒尺寸变化时,表面电场的增强或减弱程度作非线性变化。沿径向场强曲线变化的范围正比于随颗粒尺寸的变化,其畸变范围约为颗粒尺寸的 5 倍。附着颗粒中心径向位置的变化对绝缘拉杆表面电场分布的影响情况见图 11(b)。位于不同径向位置的颗粒,虽然最大与最小场强值各不相同,但 f 值相差较小,这表明即便颗粒处于绝缘拉杆

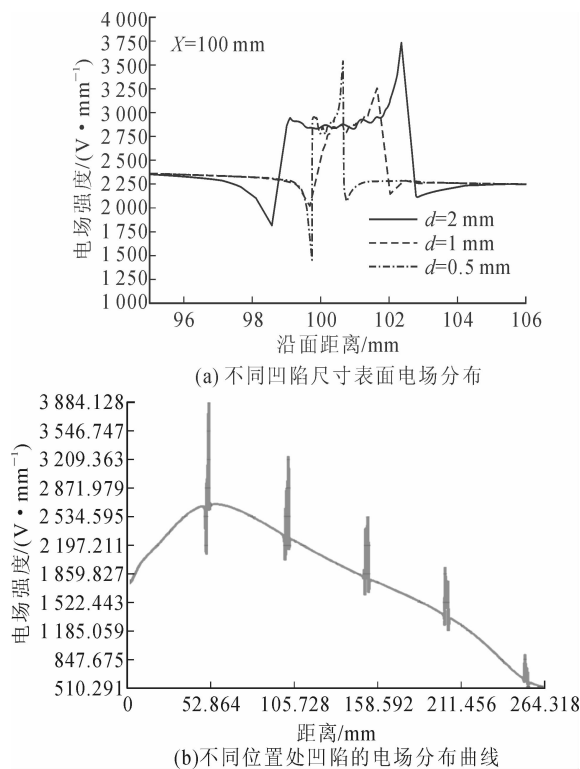


图 9 绝缘拉杆表面凸起时的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution on surface bulges with different factors

表 4 电场增强系数 f 与表面凸起中心径向位置 X 的关系
Table 4 Relation between the distortion coefficient f and radial positions X of defects on insulated pull rod

X/mm	50	100	150	200	250
f	1.795	1.714	1.736	1.727	2.054

表面不同位置, 其对表面电场的增强程度基本不变。电场增强系数 f 与附着颗粒中心径向位置 X 的关系见表 5。

4.4 绝缘拉杆内部缺陷对沿面电场分布的影响

用量最大的 550 kV GIS 绝缘拉杆生产厂家为瑞士 AXICOM 公司, 后被 TYCO 公司收购。此种绝缘拉杆由环氧浸渍工艺制成。为提高机械强度与电气性能, 在拉杆内部添加玻璃丝。而当表面因缺陷或异物引起闪络后, 高温电弧会把浅层玻璃丝部分融化, 产生内部气隙。下文将对此种情况对电场的影响做以研究。

绝缘拉杆内部气隙定义为一个长 15 mm、宽 1 mm、高 0.5 mm 的长方体。距绝缘拉杆上表面深度 1 mm, 距拉杆低压端 1/3 拉杆总长处(约 78.5 mm), 见图 12。

图 12(b)中, 所选路径上的最大场强值出现在气隙与绝缘材料的交界面上, 出现明显的场强突增情况, 约为 1.9 kV/mm。而作为绝缘材料内部的场强控制值为 2.1 kV/mm, 安全裕量很小。可见在绝缘拉杆

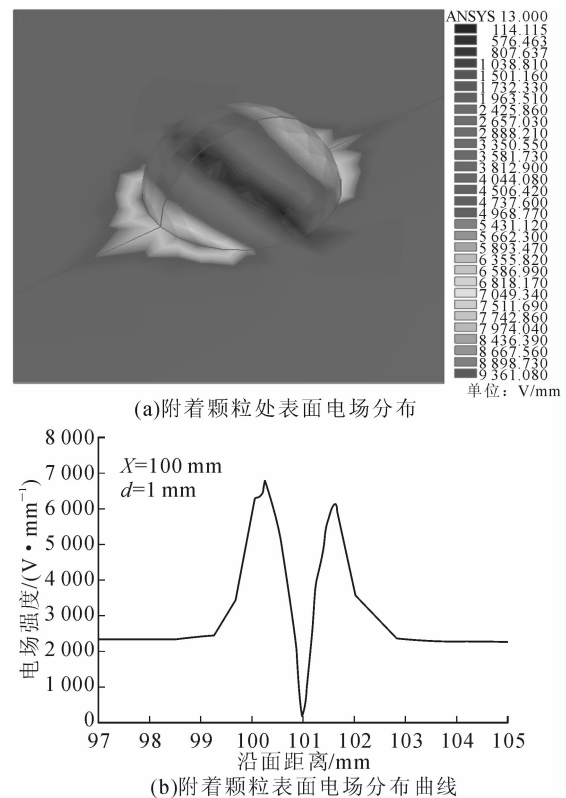


图 10 绝缘拉杆表面附着颗粒时的电场分布

Fig. 10 Electric field distribution on adhering nonmetal particles on insulated pull rod

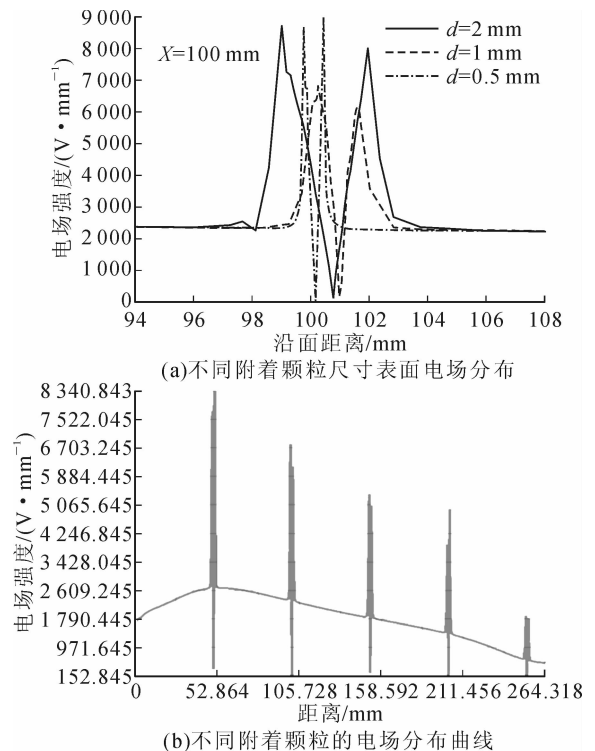


图 11 绝缘拉杆表面附着颗粒的电场分布

Fig. 11 Electric field distribution on surface bulges with different factors

内部的气隙或裂痕, 会在工况下, 造成明显的电场激增现象, 从而成为绝缘薄弱区域和电树枝优先发

表 5 电场增强系数 f 与附着颗粒中心径向位置 X 的关系
Table 5 Relation between the distortion coefficient f and radial positions X of defects on insulated pull rod

X/mm	50	100	150	200	250
f	2.879	2.908	2.891	2.803	2.854

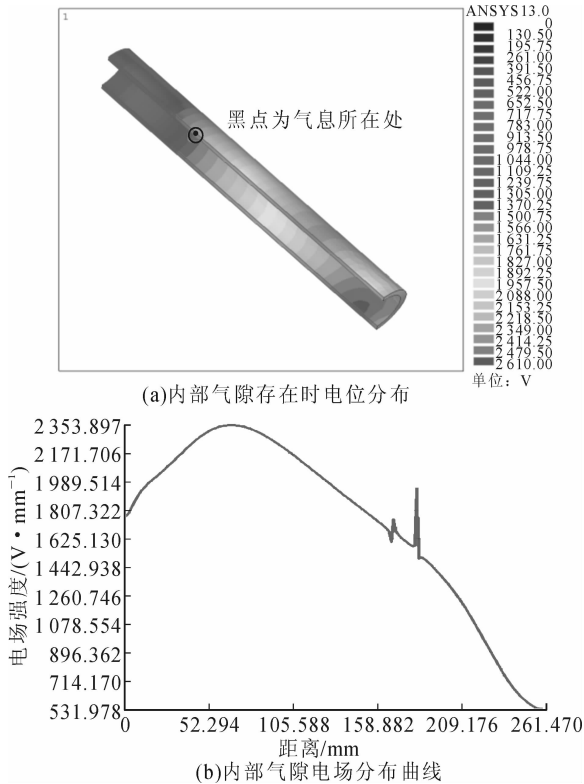


图 12 绝缘拉杆内部气隙存在时的表面电位电场分布
Fig. 12 Electric field distribution on insulated pull rod with internal air gap

展的方向。长期来看,可能会造成材料内部的绝缘老化现象^[19-20],甚至引起表面放电事故,导致材料受损。建议加强绝缘件安全质量管理和预防检查措施。但应注意须避免在检查过程中引入异物,造成异物闪络风险。

事故绝缘拉杆横截面见图 13。

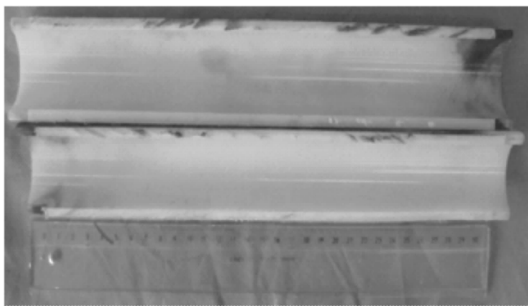


图 13 事故绝缘拉杆横截面
Fig. 13 Transverse section of insulated pull rod

除因内部玻璃丝被电弧烧灼而产生气隙外,通过对工厂工艺文件的查阅和实地观看隔离开关绝

缘拉杆装配过程,发现可能引起的隔离开关绝缘拉杆的机械损伤有两个方面的原因:

一是豁口在车铣过程中造成的震动损伤,产生细小裂纹,造成局部放电。二是安装与运行过程中,当绝缘拉杆豁口对正,可靠插入联接件凸筋,然后合上端盖。并由于金属与绝缘拉杆的不均匀接触使得部分薄弱部位或裂纹成为电树枝发展的优先通道。初期不一定暴露,但随之局放的不断发展,可能最终导致绝缘闪络击穿。

所以为保持绝缘拉杆良好的绝缘性能和 GIS 设备的安全稳定运行,需要对拉杆的质量进行严格控制,并对安装过程中可能引入杂质的环节进行实施多重管理。如下为几点改善措施:

对所有隔离开关绝缘拉杆在装配前进行工频耐压试验、雷电冲击电压试验和局部放电检测,剔除绝缘性能不合格产品;增加绝缘拉杆检测手段,建议采用专用仪器(如 X 关探伤)进行材料致密性和裂纹检查;增加机械试验中的磨合次数,之后打开模块进行充分清洁。双人交叉检查清洁结果。量化现场安装的环境要求,如粉尘含量、颗粒度,温湿度。

对在运行的同型设备隔离开关气室进行超声局放带电检测,并同时进行 SF₆ 气体组份检查,若出现局放异常且 SO₂ 体积分数超过 2 μL/L 的气室需进行开仓检查,提前排除故障。

4.5 绝缘拉杆多种缺陷对电场分布影响的比较分析

根据之前计算可以看到,绝缘拉杆表面附着导电颗粒的情况有着最大的表面电场畸变范围,可以达到其颗粒直径的 5 倍左右。而表面凸起的电场畸变范围最小,为凸起直径的 3 倍左右。表面凹陷的电场畸变范围居中,为凹陷直径的 4 倍左右。

图 14 显示了 3 种不同缺陷在绝缘拉杆表面不同位置处的电场增强系数。可以看到表面附着金属颗粒是最危险的,其电场增强系数远远大于另外两只情况。最大电场强度达到 9 kV/mm, 极容易引起表面闪络放电。而表面附着的金属颗粒在绝缘拉杆的各个位置有着近乎相同的电场增大系数,可以说轴向位置与附着金属颗粒的电场增强系数弱关联。

而对于表面凸起与表面凹陷两种缺陷而言,表面凸起的情况下的最大电场强度约为 5 kV/mm,而对于表面凹陷为 3 kV/mm。总的来说,它们的电场增强系数接近,在靠近低压端区域,表面凹陷有着更大的电场增强系数。还可以看出,这两种缺陷对轴向位置的选择是有不同电场增强表现的。两者都在靠近低压端的区域内有着比之前位置更大的电场增强系数,这说明,表面凸起及凹陷在接近端盖

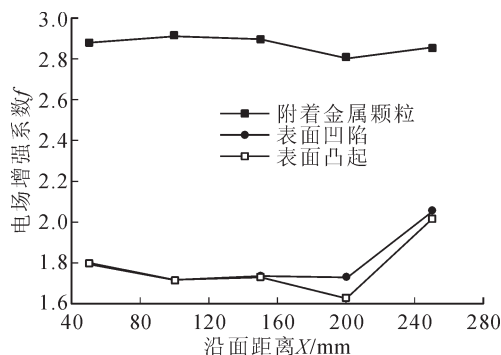


图14 绝缘拉杆多种缺陷的电场畸变比较

Fig. 14 The comparison of defects on insulated pull rod

等低电压部件时有更高的放电风险。

据此可得出实用结论,即当绝缘拉杆制造过程中不可避免地引入或产生某些异物或缺陷时,为保证设备安全稳定运行并提高生产效率,其产品的生产、检验标准并不必在全场域内保持完全一致。根据之前计算可得,位于绝缘拉杆靠近低压端区域内的缺陷将造成更大的影响。所以拉杆低压端区域须有更严格的制造、检验标准,而近高压端区域的容缺标准可以相对放宽。

5 结论

1)在典型模型计算中,高场强区主要集中于外形突出的屏蔽罩上,场强最大值达到8 085.41 V/mm。此外,在绝缘拉杆表面的电场强度达到2 361.87 V/mm,且分布不均匀。并由于两者较接近,在缺陷或异物的作用下可能使动触头屏蔽罩与绝缘拉杆及端盖之间形成放电通道成为可能。

2)绝缘拉杆表面附着金属颗粒是最危险的缺陷,其电场增强系数达到了正常运行时的323%,最大表面场强达到约9 kV/mm,极易引起表面闪络。场强增强系数对金属颗粒尺寸反应敏感,尺寸越大,影响范围及增强系数越大。而轴向位置与附着金属颗粒的电场增强系数关系很小,并且它的电场畸变范围在3种缺陷中最大的。

3)绝缘拉杆表面凸起与凹陷的电场增强系数相近,明显小于表面附着金属颗粒时的情况,并且不随缺陷尺寸的变化而发生较大改变。而轴向位置与电场增强系数关系较大,两者都在靠近低压端的区域内有着比之前位置更大的电场增强系数,因此有更高的放电风险。

4)在绝缘拉杆内部的机械损伤如气隙,会造成一个明显的电场激增,电场增强系数 f 达到了1.273,表面最大场强达到1.9 kV/mm,所留安全裕度很小,这在长期可能导致绝缘材料老化与绝缘内

部损坏。

参考文献:

- [1] 李心一. 特高压开关设备的发展[J]. 电器工业, 2009(8): 48-55.
LI Xinyi. Development of switching equipment for UHV[J]. China Electrical Equipment Industry, 2009(8): 48-55.
- [2] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] LEWIS J, PRYOR B M, JONES C J, et al. Disconnecter operations in gas insulated substations, overvoltage studies and tests associated with a 420 kV installation[C]//CEGRE. [S.L.]: IEEE, 1988: 1-8.
- [4] 徐建源, 路璐, 林莘. 1 100 kV GIS 隔离开关的电场数值计算与分析[J]. 高压电技术, 2008, 34(10): 2102-2106.
XU Jianyuan, LU Lu, LIN Xin. Numerical analysis of electric field of 1 100 kV disconnector in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2102-2106.
- [5] 林莘, 司秉娥, 徐建源, 等. 1 100 kV GIS 中隔离开关及故障接地开关电场数值分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(5): 524-528.
LIN Xin, SI Bing'e, XU Jianyuan, et al. Electric field numerical analysis of extra-high voltage disconnector and fault earthing switch in 1 100 kV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(5): 524-528.
- [6] 宫瑞磊, 肖风良, 王峰, 等. 基于响应表面法的550 kV GIS 隔离开关中的结构优化设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 100-103.
GONG Ruilei, XIAO Fengliang, WANG Feng, et al. The optimization of structure parameters in 550 kV disconnectors based on response surface method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 100-103.
- [7] 霍凤鸣, 周新伟, 甄利, 等. 500 kV GIS 隔离开关绝缘拉杆放电故障原因分析[J]. 河北电力技术, 2009, 28(4): 7-8.
HUO Fengming, ZHOU Xinwei, ZHEN Li, et al. Cause analysis on 500 kV GIS switchgear insulation pulling lever fault[J]. Hebei Electric Power, 2009, 28(4): 7-8.
- [8] 李秀卫, 王庆玉, 毛惠卿, 等. 一起组合电器内部绝缘故障综合分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 99-102.
LI Xiuwei, WANG Qingyu, MAO Huiqing, et al. Comprehensive analysis of an insulation fault in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 99-102.
- [9] 卢启付, 李兴旺, 徐晓刚, 等. 基于ANSYS的GIS隔离开关短路事故分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 76-79.
LU Qifu, LI Xingwang, XU Xiaogang, et al. Analysis of short circuit accident about GIS disconnecting switch based on ANSYS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 76-79.
- [10] 林莘, 蔡强, 徐建源, 等. 基于区域分解法的1 100 kV

(下转第116页)

- 例分析[J]. 高压电器, 2013, 51(1): 145-149.
- LI Chao, TAO Rong. Fault detection example of 126 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 145-149.
- [12] OKABE S, KOTO M, ENDO F, et al. Insulation characteristics of GIS spacer for very fast transient overvoltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 210-218.
- [13] 张乔根. 陡波前冲击电压下 SF₆ 气体间隙及绝缘子沿面放电特性[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [14] 陈庆国, 张乔根, 邱毓昌, 等. 表面电荷对 SF₆ 中绝缘子沿面放电的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 24-25.
- CHEN Qingguo, ZHANG Qiaogen, QIU Yuchang, et al. Effect of surface charge accumulation on flashover voltages of insulator in SF₆[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 24-25.
- [15] 王中方, 张乔根, 陈庆国, 等. SF₆ 中绝缘子在快速振荡与非振荡冲击电压下闪络特性[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 4-6.
- WANG Zhongfang, ZHANG Qiaogen, CHEN Qingguo, et al. The flashover characteristic of spacer in SF₆ under fast-oscillating and nonoscillating impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 4-6.
- [16] COOKSON A H, FARISH O. Particle-initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF₆[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(3): 871-876.
- [17] TENBOHLEN S, SCHRODER G. The influence of surface-charge on lightning impulse breakdown of spacers in SF₆[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 241-246.
- [18] QI B, LI C R, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 792-800.
- [19] 张 璐. 特快速暂态过电压下 GIS 典型绝缘结构放电特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- 黄荣辉(1976—), 男, 高级工程师, 长期从事输变电设备状态监测及技术监督管理工作。
- 秦逸帆(1992—), 男, 西安交通大学电气工程学院硕士研究生在读, 主要从事高电压绝缘技术研究工作。

(上接第 110 页)

- 隔离开关大规模电场计算问题[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 1-6.
- LIN Xin, CAI Qiang, XU Jianyuan, et al. Large scale of electric field calculation of 1 100 kV disconnector based on domain decomposition method[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 1-6.
- [11] HAZANADAR Z, CARSIMAMOVIE S. More accurate modeling of GAS insulated substation components in digital simulations of very fast electro magnetic transients[J]. IEEE Transactions on PD, 1992, 7(1): 8-11.
- [12] 路 璐. 特高压 GIS 隔离开关的电场特性及绝缘性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [13] 王静君, 黄瑜珑. 一起 500 kV GIS 隔离开关绝缘闪络的事故分析[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 119-123.
- WANG Jingjun, HUANG Yulong. Analysis on an insulation breakdown accident of 500 kV GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 119-123.
- [14] 陈 仓, 张 杰, 赵满江, 等. GIS 典型绝缘故障案例及原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 7-14.
- CHEN Cang, ZHANG Jie, ZHAO Manjiang, et al. Analysis of typical insulation fault cases of GIS[J]. Insulator and Surge Arresters, 2013(6): 7-14.
- [15] 陈 隽, 卢 军, 阮 羚, 等. 宜都蔡家冲换流站 550 kV GIS 缺陷分析[J]. 电力建设, 2007, 28(11): 22-24.
- CHEN Jun, LU Jun, RUAN Ling, et al. Defect analysis of 550 kV GIS of Yidu Caijiachong converter station[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(11): 22-24.
- [16] 王朗珠, 王浩宇. 550 kV GIS 隔离开关绝缘拉杆质量问题探讨[J]. 绝缘材料, 2013, 46(1): 63-65.
- WANG Langzhu, WANG Haoyu. Discussion of quality problems in 550 kV GIS disconnector insulating pull rod[J]. Insulation Material, 2013, 46(1): 63-65.
- [17] MEIJER S, SMIT J. UHF defect evaluation in gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 285-296.
- [18] TAKUMA T, KAWAMOTO T. Numerical calculation of electric fields with a floating conductor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(2): 77-188.
- [19] MITCHELL R R. Theoretical analysis of dielectric recovery in SF₆ gas blast arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1986, 14(4): 384-389.
- [20] 郑记玲. 252 kV GIS 中隔离开关电弧模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- 卫昕卓(1990—), 男, 西安交通大学硕士生, 主要从事电力设备绝缘结构优化研究。
- 彭宗仁(1953—), 男, 西安交通大学电气工程学院教授, 博士生导师, 国家自然科学基金与科技进步一等奖获得者。主要从事电力设备绝缘结构优化设计及复杂场仿真计算分析, 超、特高压变电站、线路外绝缘与均压特性, 电介质中空间电荷的形成机理及测量技术, 复合绝缘系统中的界面效应与微观机理, 高压线路绝缘子在线监测技术及高压直流套管的材料、结构及电气特性方面的教学研究工作。