

基于自适应几何优化的 35 kV 欧式电缆接头电场优化设计

谯春林¹, 晋楚雄², 陈东¹, 刘建铭¹

(1. 航大电气有限公司, 浙江 温州 325600;

2. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对 35 kV 欧式电缆接头在高压运行条件下可能出现的局部电场畸变与绝缘薄弱问题, 提出了一种基于自适应几何优化的 35 kV 欧式电缆接头结构设计方法。该方法结合电场仿真与遗传算法, 通过调整几何结构参数, 实现对电场分布的优化, 避免电场集中和击穿风险。不同于传统的结构参数调整方法, 该方法通过设计合理的适应度函数, 引入电场强度均匀性和最大电场强度两个主要目标进行多目标优化, 再结合介电常数、温度和电场集中效应对临界击穿电场强度进行修正, 通过电场仿真与临界击穿电场强度进行比较, 得到最优个体。仿真结果表明, 所提方法相比传统方法, 最大电场强度降低了约 10%, 从 15.55 kV/mm 减少至 14.60 kV/mm; 实验验证也证明, 所提方法相较传统方法合格率提升了 5%, 满足 GB 50168—2018 要求。所提方法为高压电气设备的设计提供了一种高效的优化方案, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 35 kV 欧式电缆接头; 电场仿真; 自适应几何优化; 遗传算法

中图分类号: TM81 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26784

Design of the Connector Structure for 35 kV European Cable Based on Adaptive Geometric Optimization

QIAO Chunlin¹, JIN Chuxiong², CHEN Dong¹, LIU Jianming¹

(1. Hangda Electric Co., Ltd., Wenzhou 325600, Zhejiang, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In response to the potential local electric field distortion and insulation weaknesses that may occur under high-voltage operating conditions in 35 kV European cable connectors, a 35 kV European cable connectors structural design method based on adaptive geometric optimization was proposed. The method integrated electric field simulation with genetic algorithms to optimize the electric field distribution by adjusting geometric structural parameters, thereby mitigating the risks of electric field concentration and breakdown. Unlike traditional structural parameter adjustment methods, the approach designed a reasonable fitness function that incorporates two primary optimization objectives: electric field uniformity and maximum electric field intensity. Additionally, dielectric constants, temperature effects, and the electric field concentration effect were integrated to refine the critical breakdown electric field strength. By comparing the electric field simulation results with the modified critical breakdown electric field strength, the optimal solution was identified. Simulation results indicate that, compared to conventional methods, the proposed approach reduces the maximum electric field intensity by approximately 10%, from 15.55 kV/mm to 14.60 kV/mm. Experimental validation further demonstrates a 5% improvement in pass rate, meeting the requirements of GB 50168—2018. The method proposed provides an efficient optimization solution for the design of high-voltage electrical equipment and holds significant engineering application value.

Key words: 35 kV European cable connector; electric field simulation; adaptive geometric optimization; genetic algorithm

作者简介: 谯春林(1975—), 男, 大专, 工程师, 主要研究方向为高低压成套开关柜的结构及电气性能, Email: hangdajishu@hangda.com.cn

通讯作者: 晋楚雄(2002—), 男, 硕士, 主要研究方向为高低压成套开关柜的结构及电气性能, Email: 13753937393@163.com

电缆接头是电缆之间连接的关键部分,同时也是电缆系统中的最薄弱环节,容易发生故障,其可靠性直接影响整个线路运行的稳定性。在高压运行条件下,电缆接头容易出现局部电场畸变,导致绝缘老化或击穿,从而影响电力设备的安全运行^[1]。电缆接头结构复杂,接头内部电场分布不均匀,而电缆绝缘的短时耐压性能和长期稳定性都受到电场分布的影响,因此电场分布不均匀也可能导致电介质的击穿和接头的损坏。为此,提升电缆接头的设计,能够有效防止这些电场集中问题,增强电气设备的安全性^[2-3]。

传统结构设计方法主要依赖工程经验和试验反馈,缺乏对电场分布的精确量化,难以满足现代电网对设备高可靠性和长寿命的要求^[4]。在这些方法中,设计人员通过手动调整结构参数,依赖静态几何调整来优化电场分布,通常基于先前的经验或简单的理论公式。然而,这些静态调整方法无法动态地反映电场分布在实际运行中可能发生的变化,也无法处理电场分布的复杂性^[5-6]。随着电网系统的复杂性和负荷波动的增加,传统方法往往难以有效应对电场分布的不均匀性和电场集中现象。因此,传统设计方法在面对现代电网对设备精度和可靠性要求不断提升的背景下,暴露出明显的局限性,亟需借助更先进的电场仿真与优化技术以提高设计效率和电气性能的可预测性^[7]。

对于传统结构设计方法所存在的问题,目前的许多研究尝试采用新的优化策略来弥补其缺陷。文献[8]提出的功能梯度材料(FGM)策略虽然改善了电场分布,但其静态特性无法应对电场的动态变化,限制了实际应用效果;文献[9]采用ANSYS Maxwell电磁场有限元分析软件,对不同策略下电极分布进行静电场仿真,分析土壤电场的分布情况,但在处理复杂结构时计算负担过重,限制了优化和快速迭代;文献[10]采用人为增大厚度以及增加弯角处的曲率半径,来减小场强和均匀化场强,但此过程依赖人工经验,并且有试错成本;文献[11]对3种不同几何形状:杆状电极、正方形电极及圆形电极进行电场仿真;文献[12]对不同传感器尺寸下的被测电场空间尺度进行仿真分析,但都缺乏仿真前的统一优化;文献[13-15]表明,遗传算法在多目标优化中的应用虽增加了灵活性,但仍面临效率和精度的平衡问题,以及面对不同工况的适应性问题。

针对上述不足,本文提出了一种基于自适应几何优化的电场分布优化方法。该方法结合电场仿真与遗传算法,通过调整结构几何参数,优化电场分布,从而有效抑制电场集中现象,并改善电场的均匀性。仿真结果表明,优化后的设计有效提升了电场分布的均匀性,降低了电气设备发生击穿的风险,进一步增强了其绝缘性能和安全性。

1 35 kV 欧式电缆接头电场仿真系统构建

1.1 电缆接头仿真模型结构组成

基于35 kV欧式电缆接头实物,为了更好地分析其高压运行条件下可能出现的局部电场畸变与绝缘薄弱问题,本文基于ANSYS Maxwell软件构建了如图1所示的35 kV欧式电缆接头仿真模型,其主要由户外冷缩终端、YJV电缆和欧式接头3部分组成。



图1 35 kV 欧式电缆接头仿真模型图

Fig.1 Simulation model diagram of 35 kV European cable connector

1.2 二维仿真优势

在35 kV欧式电缆接头等轴对称结构中,二维建模能够更有效地反映电场主梯度方向,清晰捕捉电场集中和突变区域,便于定位潜在风险点。相比三维模型,二维仿真避免了空间耦合干扰,结构响应更直观,尤其适用于分析应力锥、电极边缘等关键部位的电场分布。同时,二维模型对电场极值和边界层变化更敏感,有助于评估尖端放电和局部击穿风险。在保持较高仿真精度的同时,二维建模大幅提升了计算效率和参数迭代速度,适合前期结构优化与快速验证^[16]。

在电场仿真中,电势分布通常遵循泊松方程:

$$\nabla^2 \phi = -\rho/\varepsilon \quad (1)$$

式中: ϕ 为电势; ρ 为自由电荷密度; ε 为材料介电常数。

当考虑理想绝缘结构或无自由电荷区域(如电缆内部绝缘体),泊松方程进一步简化为拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

在三维坐标系下,该公式展开为

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = \partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial y^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 \quad (3)$$

对于结构在 y 轴方向具有旋转对称性或几何变化不显著的情况,可将该问题简化为二维形式,即忽略 z 方向上的变化:

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = \partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 \quad (4)$$

进而,电场 E 可通过电势梯度得到:

$$E = -\nabla \phi = -(\partial \phi / \partial x, \partial \phi / \partial z) \quad (5)$$

这种二维建模方法在保持主电场方向物理真实性的同时,显著降低了计算复杂度。特别是在电场集中区域(如尖角、电极边界、应力锥根部等),二维模型在数值上更易实现高密度网格划分,捕捉电场极值;在物理上也避免了 y 轴方向耦合带来的非对称误差。因此,本文对于接头仿真模型图在 y 轴反向进行切割,得到如图2所示的35 kV欧式电缆接头二维仿真模型图。

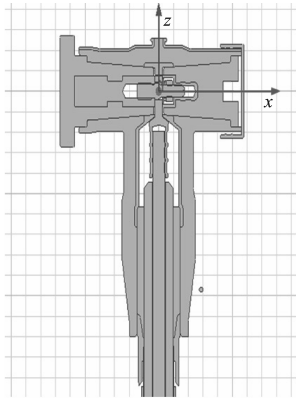


图2 35 kV欧式电缆接头二维仿真模型图

Fig.2 Two-dimensional simulation model diagram of 35 kV European cable connector

2 传统结构参数调整方法

传统的电缆接头设计方法主要依赖工程经验和公式计算,通常不涉及电场仿真分析。在这种方法中,设计人员通过调整电缆接头的几何参数(如半径、厚度、形状等)来优化电场分布,避免局部电场过度集中和击穿现象。设计过程中,需对半径 R 、绝缘材料厚度 d 和电场均匀性 ΔE 进行计算,如下式所示:

$$R = \left(\frac{V}{\varepsilon \cdot E} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$d = \sqrt{E_{\max} \cdot k / (\sigma \cdot \varepsilon)} \quad (7)$$

$$\Delta E = V / \int_0^L \varepsilon(x) dx \quad (8)$$

式中: V 为材料两端的电压差; n 为指数因子; k 为

材料的修正系数; σ 为材料的电导率; L 为电场沿结构的总长度。

虽然这些公式在一定程度上能够为电缆接头的设计提供基础,但它们存在明显的局限性。首先,传统方法依赖静态的几何参数和简化假设,未能充分考虑电场分布的动态特性和复杂性。由于没有电场仿真工具支持,设计过程中难以优化电场分布,也无法准确预测电场在复杂结构中的变化。其次,传统方法通过手动调整设计参数来优化电场分布,设计人员通常依赖经验进行结构调整,难以实现多目标优化和全局最优解的寻找。因此,设计完成后,需要通过实验验证是否发生击穿,这一过程不仅时间长,而且无法在设计阶段发现潜在的电场集中问题^[17-18]。传统结构参数调整方法流程图如图3所示。

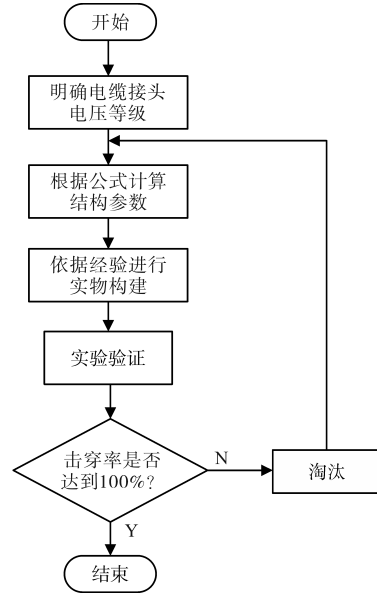


图3 传统结构参数调整方法流程图

Fig.3 Flowchart of the traditional structural parameter adjustment method

3 基于自适应几何优化的结构参数优化方法

3.1 自适应几何优化方法原理

自适应几何优化方法结合了电场仿真与遗传算法,通过调整结构几何参数优化电场分布。与传统调整方法不同,该方法利用遗传算法的全局搜索能力和反馈机制,实现对设计参数的优化,避免电场集中区域的形成,从而提高设备的绝缘性能和安全性。遗传算法的操作算子包括选择、交叉和变异3种基本形式,构成了遗传算法强大搜索能力的核心,是模拟自然选择和遗传过

程中发生的繁殖、杂交和突变现象的主要载体。

传统设计方法通常依赖于静态几何调整,难以应对电场分布的动态变化。自适应几何优化方法通过遗传算法的迭代优化,动态调整几何结构,实现电场分布的均匀性,并优化电气设备的其他性能。在每一代中,个体会依据其适应度接受选择,其中表现优异的个体将获得更高的存活和繁殖几率。变异和交叉引入了种群的多样性,从而有助于探索解空间中的潜在解。通过这种逐代进化的过程,遗传算法使种群向着最优解方向移动,最终收敛于最优解或次优解。

该方法能够处理多目标优化问题,不仅优化电场分布,还兼顾结构强度、绝缘性能等多个设计要求。通过自适应调整,优化过程更加高效、灵活,适用于复杂电场分布的电气设备设计。自适应几何优化方法原理图如图4所示。

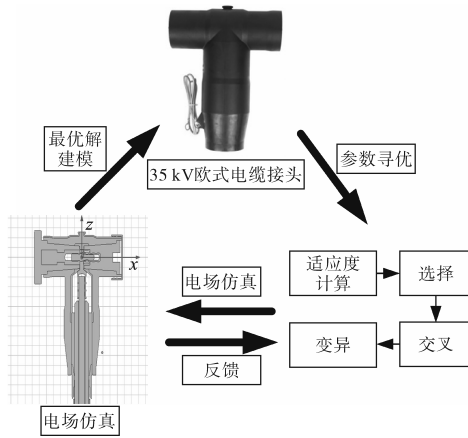


图4 自适应几何优化方法原理图

Fig.4 Principle diagram of adaptive geometric optimization method

3.2 适应度函数设计

在自适应几何优化方法中,适应度函数是评估设计方案优劣的核心指标。遗传算法在搜索过程中,主要依赖内部机制而非外部信息进行探索。它依据所设定的适应度函数,并利用种群中每个个体的适应度来指导搜索方向,且遗传算法的复杂度往往与适应度函数的复杂程度密切相关。因此,适应度函数的复杂程度会直接影响算法的运行时间。此外,由于遗传算法遵循优胜劣汰的原则,其解的质量也直接取决于解的适应度值。

对于35 kV欧式电缆接头的电场优化,适应度函数需要综合考虑电场分布的均匀性、最大电场强度及其与材料临界击穿电场强度的关系。

传统的适应度函数通常依据单一的优化目

标进行设计,但在复杂的电气设备设计中,多个目标往往同时存在,因此适应度函数的设计必须具备多目标优化能力^[19]。本文采用的适应度函数包含了电场强度的均匀性和最大电场强度控制两个主要目标。首先,电场均匀性可以通过电场强度的标准差来衡量。设定电场强度为 $E(x)$,则均匀性的度量可以通过以下公式计算:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \quad (9)$$

式中: E_i 为第 i 个单元的电场强度; $\bar{E}$ 为电场的均值; N 为仿真区域内的总单元数。

电场均匀性越好,标准差值越小。

适应度函数还需要约束最大电场强度 $E_{\max}$ 不能超过材料的临界击穿电场强度 E_{crit} ,否则设计不可行。为此,最大电场强度的约束条件可以引入适应度函数中,确保优化结果符合安全设计要求。适应度函数的形式为

$$F = \omega_1 \cdot \sigma_E + \omega_2 \cdot \max(0, E_{\max} - E_{\text{crit}}) \quad (10)$$

式中: ω_1, ω_2 为电场均匀性和电场强度约束的权重系数; $\max(0, E_{\max} - E_{\text{crit}})$ 为最大电场强度超出临界值时的惩罚项。

通过调整权重系数 ω_1 和 ω_2 ,可以确保优化过程中电场均匀性与设备安全性的平衡。每代优化中,遗传算法根据该适应度函数评估个体的优劣,并逐步优化电场分布^[20]。

3.3 临界击穿电场强度计算

在临界击穿电场强度 E_{crit} 的求解过程中,考虑了多个因素对电场强度的影响。首先,电场强度与电势之间的关系通过梯度公式表示:

$$E = -\partial\phi/\partial r \quad (11)$$

式中: r 为电势的径向梯度。

电场强度 E 与介电常数 ε 相关,在电介质中,电场强度可以表示为

$$E = 1/\varepsilon \cdot \partial\phi/\partial r \quad (12)$$

介电常数 ε 随温度 T 变化,温度对介电常数有修正作用,因此:

$$\varepsilon(T) = \varepsilon_0 \cdot \alpha(T) \quad (13)$$

$$E(T) = \frac{1}{\varepsilon(T)} \frac{\partial\phi}{\partial r} \quad (14)$$

式中: ε_0 为标准温度下的介电常数; $\alpha(T)$ 为温度修正因子。

同时,在电场集中区域,电场强度会因几何形状的变化而增强,电场集中因子 k 用来表示电场在局部区域的增强:

$$E = k \cdot E(T) \tag{15}$$

因此,综合考虑介电常数、温度和电场集中效应,得到了最终的临界击穿电场强度:

$$E_{\text{crit}} = k \cdot \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \alpha(T)} \frac{\partial \phi}{\partial r} \tag{16}$$

3.4 结构参数寻优

在自适应几何优化过程中,首先生成一个初始设计种群,涉及电缆接头的几何参数。通过遗传算法的全局搜索能力,设计空间中的多个候选方案得以生成并优化。每个设计方案的电场分布通过仿真计算评估,仿真结果为优化过程提供反馈,进而调整设计参数。

优化过程中,通过遗传算法的选择、交叉和变异操作,设计逐步优化,力求达到电场均匀性和设备安全性的最优平衡。在选择操作中,依据适应度函数来评估个体的质量,并据此决定其淘汰与否。适应度较高的个体更有可能被选中保留,而适应度较低的个体则面临较小的选择几率。通过这种方式,模拟自然界的物种进化过程,并逐步优化种群,最终找到问题的最优解。交叉与变异是产生新个体的途径,交叉使得个体的基因片段在合理范围内发生变化,产生新的个体,变异模拟生物界中的基因突变过程,有助于增强该代种群的多样性。每代优化后,电场分布和适应度评估结果决定了下一代设计参数的调整方向。结构参数寻优流程图如图 5 所示。

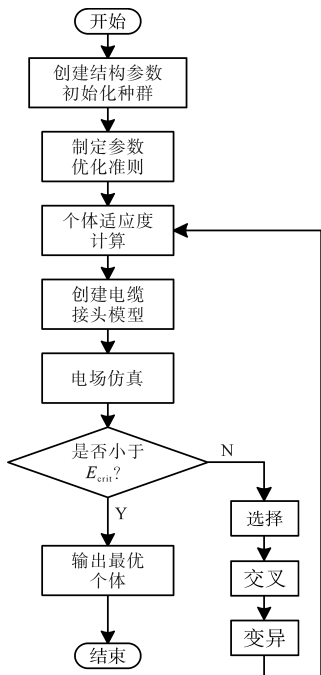


图 5 结构参数寻优流程图

Fig.5 Flowchart of structural parameter optimization process

4 仿真与实验结果分析

4.1 仿真建模

在基于 ANSYS Maxwell 的电场仿真中,需对模型中各组成部分分配对应的材料属性。对于软件材料库中已包含的常见材料,可直接调用并赋予相应部件;而对于材料库中未包含的专用材料,则需根据材料质检报告手动创建。具体操作包括依据检测数据输入介电常数、密度、体积电阻率等关键参数,完成新材料的定义与保存。模型材料分配图如图 6 所示,材料对应名称和信息如表 1 所示。材料中,EP865-10 为三元乙丙导电胶,SUS304 为奥氏体不锈钢,EP755-35 为三元乙丙绝缘胶。

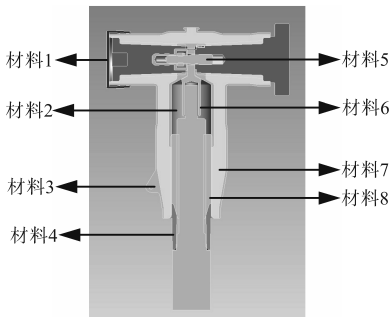


图 6 模型材料分配图

Fig.6 Material allocation diagram for the model

表 1 材料信息对应表

Tab.1 Correspondence table of material information

	结构名称	材料编号
材料 1	防尘帽	EP865-10
材料 2	内屏蔽层	EP865-10
材料 3	外屏蔽层	EP865-10
材料 4	应力锥	EP865-10
材料 5	双头螺柱	SUS304
材料 6	欧式端子	紫铜 T2
材料 7	外套绝缘层	EP755-35
材料 8	应力锥绝缘层	EP755-35

在完成材料参数设置后,需要对模型施加电压激励条件。根据 35 kV 欧式电缆接头的试验要求,需要进行 117 kV 交流耐压工况下的电场仿真。因此,在仿真中高压端施加 117 kV 交流电压,低压端设定为 0 V,以模拟实际试验条件下的电势差分布。117 kV 高压激励设置结果如图 7 所示。

对搭建完成的仿真模型进行网格划分设置。网格划分是电场仿真的关键环节,其目的是将连续几何结构离散为有限数量的单元,以便数值求

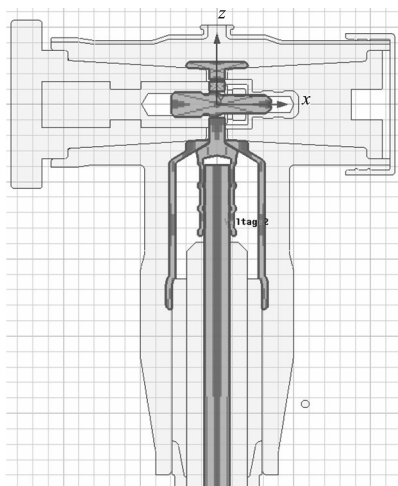


图7 高压激励设置图

Fig.7 High voltage excitation settings diagram

解器能在各节点上计算电势与电场分布。在电场变化剧烈的区域,如电极边缘、尖角部位及异种材料交界面,需采用加密网格策略,以提高局部计算精度,捕捉细微的电场突变特征。合理的网格划分不仅能提升仿真结果的准确性,还能显著增强求解过程的收敛性与稳定性,避免数值震荡或解不收敛等问题。因此,本文针对关键电场集中区域进行了局部网格加密,以确保仿真结果能够真实反映结构电场特性。网格划分结果如图8所示。

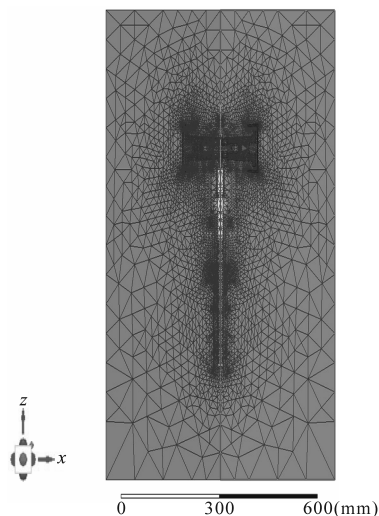


图8 模型网格设置结果图

Fig.8 Result diagram of model grid settings

4.2 结构参数寻优结果

为确保寻优的有效性和精确性,本节首先对初始参数范围进行筛选,内屏蔽层 R_1 选(0,3)和(3,6),应力锥 R_{21} 选(0,5)和(5,9), R_{22} 选(4,7)。利用合适的适应度函数,采用遗传算法对各区内参数组合进行搜索与精炼,得到最优解,集中

筛选出10组具有代表性的候选参数组。进一步通过仿真观察模型低于临界击穿电场强度的合格率,筛选出对参数进行寻优的最佳初始范围。各组参数的合格率具体对比结果如图9所示。

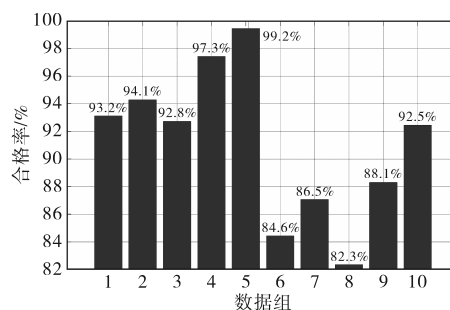


图9 各组参数的合格率具体对比图

Fig.9 Specific comparison chart of the pass rates of parameters in each group

从图9可以看出,数据组5的合格率最高,合格率达99.2%,具体参数及其合格率如表2所示。综上分析,最优参数的寻优范围分别为:内屏蔽层 R_1 选(0,2),应力锥 R_{21} 选(0,3), R_{22} 选(4,6)。

表2 初始参数范围筛选及其合格率对照表

Tab.2 Initial parameter range screening and its qualified rate comparison table

数据组	内屏蔽层 R_1/mm	应力锥 R_{21}/mm	应力锥 R_{22}/mm	合格率/%
1	2.9	4.86	5.84	93.2
2	2.85	4.85	4.42	94.1
3	2.2	4.16	4.88	92.8
4	1.8	1.06	5.1	97.3
5	1.22	2.43	4.13	99.2
6	3.47	5.73	6.36	84.6
7	3.17	6.22	4.6	86.5
8	5.6	7.1	5.54	82.3
9	4.8	6.73	5.78	88.1
10	5.12	6.16	4.14	92.5

根据上面筛选出的参数范围,进一步进行遗传算法寻优。选取的种群个数为10,遗传算法的迭代次数设定为5次,交叉概率为0.9,变异概率为0.4。此过程确保了设计空间的充分探索,并在多代迭代中不断优化电场分布,寻找出最适合的结构参数组合。10组参数的具体信息如表3所示。

根据优化结果,种群3的电场强度为14.60 kV/mm,电场均匀性较好。与其他种群相比,种群3在保证电场安全性的同时,表现出更优的均匀性。因此,综上所述,选择种群3作为最终的优化结果。遗传算法寻优参数对应电场均匀性与电场强度三维柱状对比图如图10所示。

4.4 实验验证

为了进一步验证所提方法对于模型电场的有效性,我们将传统方法得到的模型参数和所提方法得到的模型参数进行实物建模,进行了相应的实验验证,实验现场图如图14所示。



图14 35 kV欧式电缆接头实验图

Fig.14 Experimental diagram of 35 kV European cable connector

从实验结果可以看出,传统方法下的模型发生了击穿,且合格率达到95%,不满足GB 50168—2018所提到的,合格率必须达到100%的要求,模型击穿如图15所示。而所提方法没有发生击穿,且合格率达到100%,满足GB 50168—2018的要求,验证了本文所提方法的有效性。



图15 传统方法下模型击穿图

Fig.15 Model breakdown diagram under traditional method

5 结论

本文针对35 kV欧式电缆接头在高压运行条件下可能出现的局部电场畸变与绝缘薄弱问题,进行电场分布优化与结构设计研究,研究结论如下:1)提出了基于电场仿真与遗传算法相结合的自适应几何优化方法,通过调整结构参数,有效优化了电场分布,避免了电场集中问题和击穿风险,相比传统方法,最大电场强度降低了约10%,提高了设备的绝缘性能和安全性;2)通过仿真和实验验证,所提方法在实际运行条件下能够有效防止传统方法易出现的击穿现象,且合格率达到100%,为高压电气设备的优化设计提供了高效的解决方案,具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] ZHAO X, YANG X, HU J, et al. Grading of electric field distribution of AC polymeric outdoor insulators using field grading material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1253–1260.
- [2] LI Z, YANG Z, XING Y, et al. Improving the electric field distribution in stress cone of HTS DC cable terminals by nonlinear conductive epoxy/ZnO composites[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1–5.
- [3] ZHANG H C, HE P H, GAO X, et al. Loss analysis of plasmonic metasurfaces using field-network-joint method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 3521–3526.
- [4] CHI L, LU S, YAO Y. Optimized electrode distributions of embedded four-electrode resistivity measurement in cement-based materials[J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(7): 1–4.
- [5] 邵志敏,张海洋,渠振利,等.基于ANSYS Maxwell建模的超高压输电线路工频电磁场分布研究[J].深圳职业技术大学学报, 2024, 23(6): 72–80.
SHAO Zhimin, ZHANG Haiyang, QU Zhenli, et al. Research on power frequency electromagnetic field distribution of UHV transmission lines based on ANSYS Maxwell modeling[J]. Journal of Shenzhen Polytechnic, 2024, 23(6): 72–80.
- [6] ZHAO Y, TANG Z. A symmetric field-circuit coupled formulation for 3-D transient full-wave Maxwell problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1–4.
- [7] CORAMIK M, CITAK H, EGE Y, et al. Determining the effect of velocity on sensor selection and position in non-destructive testing with magnetic flux leakage method: a pipe inspection gauge design study with ANSYS Maxwell[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1–12.
- [8] HAYAKAWA N, ISHIGURO J, KOJIMA H, et al. Fabrication and simulation of permittivity graded materials for electric field grading of gas insulated power apparatus[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 547–554.
- [9] 张萃.基于ANSYS Maxwell的高压脉冲电场仿真研究[J].南方农机, 2021, 52(15): 34–36.
ZHANG Cui. Simulation research on high-voltage pulsed electric field based on ANSYS Maxwell[J]. Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(15): 34–36.
- [10] 刘建忠.基于ANSYS的真空开关柜电场及温度场仿真研究[D].大连:大连交通大学, 2021.
LIU Jianzhong. Simulation research on electric field and temperature field of vacuum switchgear based on ANSYS[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2021.
- [11] 康秋亮,汪志成,岳万兴,等.基于ANSYS Maxwell的静电雾化多喷嘴电极仿真分析[J].机电工程技术, 2025, 54(8): 119–124.
KANG Qiuliang, WANG Zhicheng, YUE Wanxing, et al. Simulation analysis of electrostatic atomization multi-needle elec-

- trode based on ANSYS Maxwell[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(8): 119–124.
- [12] 耿明昕, 吴健, 韩文, 等. 基于 ANSYS 的传感器尺寸适用电场最小空间关系仿真研究[J]. 武汉大学学报, 2024, 57(12): 1820–1826.
- GNEG Mingxin, WU Jian, HAN Wen, et al. Simulation of the relationship between sensor size and minimum space of applicable electric field based on ANSYS[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(12): 1820–1826.
- [13] HUANG Lei, MA Hui, WANG Zihan, et al. Design optimization of an iron core for cup-type AMF contacts using genetic aggregation response surface and multi-objective genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(8): 1–5.
- [14] 郭伟飞, 杨云帆, 文笑雨, 等. 基于解码逆向反馈调整机制的复杂产品批综合调度算法[J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1714–1722.
- GUO Weifei, YANG Yunfan, WEN Xiaoyu, et al. Batch integrated scheduling algorithm of complex product based on decoding reverse feedback adjustment mechanism[J]. Control and Decision, 2025, 40(5): 1714–1722.
- [15] 钱春龙, 黄波. 基于自适应遗传算法的变电所巡检机器人自主抓线伺服视觉控制方法[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(8): 81–85.
- QIAN Chunlong, HUANG Bo. A servo visual control method based on adaptive genetic algorithm for cable grasping of substation inspection robot[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2024, 53(8): 81–85.
- [16] WAN Jianfen, YIN Hongrun, LIU Kai, et al. A hybrid genetic expression programming and genetic algorithm (GEP-GA) of auto-modeling electrical equivalent circuit for particle structure measurement with electrochemical impedance spectroscopy (EIS)[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 4344–4351.
- [17] 程起有, 李春华, 江嘉伟, 等. 基于自适应遗传算法响应面优化模型的MDOE方法研究[J/OL]. 航空动力学报, (2025–07–08) [2025–07–29]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240844>.
- CHENG Qiyu, LI Chunhua, JIANG Jiawei, et al. Research on MDOE methods based on response surface optimization model with adaptive genetic algorithm[J/OL]. Journal of Aerospace Power, (2025–07–08) [2025–07–29]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240844>.
- [18] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201–1210.
- MA Yongjie, YUN Wenxia. Research progress of genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1201–1210.
- [19] ZHOU Yunhong, CHEN Zenan, HUANG Yinfan, et al. Modeling and analysis of breaking arc for AC air circuit breakers in high-altitude environment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(8): 3257–3268.
- [20] LIN Jingyi, WU Jianwen, XIA Shangwen, et al. Multiobjective optimization of key parameters for the chamber of low-voltage DC circuit breakers based on MHD[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2025, 53(1): 88–98.

收稿日期: 2025–07–29

修改稿日期: 2025–08–18