

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.023

基于Kriging模型与NSGA-II算法的500 kV 复合横担均压屏蔽装置设计优化

杨 暘¹, 刘 鹏², 黄 力^{2,3}

(1. 国网四川省电力公司超高压分公司, 成都 610041; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学
湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 超高压输电线路复合横担的绝缘结构复杂, 部分重要区域电场畸变严重, 极易发生电晕放电和电蚀损坏, 合理且有效的配置均压屏蔽装置是保障复合横担杆塔安全稳定运行的重要环节。为确定均压屏蔽装置的外形结构和具体参数尺寸, 文中建立复合横担三维模型, 首先利用有限元仿真软件获得复合横担无均压屏蔽装置下的电场分布情况, 分析场强畸变严重部位电场分布特性并对均压屏蔽装置进行初步设计; 然后, 采用最优拉丁超立方设计方法在均压屏蔽装置结构参数变量空间中抽取试验样本点, 通过有限元仿真获得不同样本点下的复合横担和均压屏蔽装置表面电场分布; 其次, 通过构建Kriging模型, 搭建复合横担和均压屏蔽装置测点场强与均压屏蔽装置结构参数的响应关系近似模型, 并基于灵敏度分析技术获得各结构参数对复合横担和均压屏蔽装置表面最高场强的影响程度; 最后, 通过第二代非劣排序遗传算法, 获得最优均压屏蔽装置结构参数。结果表明, 加装文中设计优化后的均压屏蔽装置, 复合横担柱式绝缘子沿面场强峰值下降约63.5%, 悬式绝缘子沿面场强峰值下降约54.7%, 并且复合横担沿面场强和均压屏蔽装置表面场强均满足控制要求。优化方法为输电线路均压屏蔽装置优化设计提供重要的参考价值。

关键词: 复合横担; 均压屏蔽装置; 多目标遗传算法; Kriging模型

Design Optimization of Grading Shield Device for 500 kV Composite Cross-arms Based on Kriging Model and NSGA-II Algorithm

YANG Yang¹, LIU Peng², HUANG Li^{2,3}

(1. State Grid Sichuan Electric Company Extra High Voltage Company Branch, Chengdu 610041, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The insulation structure of composite cross arms of EHV transmission lines is complex, and the electrical field distortion is serious in some important areas, the reasonable and effective configuration of grading shield device is an important link for ensuring to the safe and stable operation of the composite cross-arm tower. In order to determine the appearance structure and specific parameters of the grading shield device, a three-dimensional model of composite cross-arm is set up in this paper. Firstly, the electrical field distribution of the compound cross-arm without grading shield device is obtained by using simulation software, the electrical field distribution characteristics of the seriously distorted position are analyzed and the grading shield device is preliminarily designed. Then, the optimal Latin hypercube design method is adopted to extract the test sample points in the variable space of structural parameters of grading shield device, and the electrical field distribution on the surface of the composite cross-arm and the grading shield device under different sample points is obtained by finite element simulation. After that, by construct-

收稿日期:2025-07-18; 修回日期:2025-10-01

基金项目:湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)(2019KXL05)。

Project Supported by Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line(China Three Gorges University)(2019KXL05).

ing the Kriging model, the approximate model of the relationship between the field strength measured by the composite cross-arm and the grading shield device as well as the structural parameters of the grading shield device is built and, based on the sensitivity analysis technique, the influence of the structural parameters on the maximum field strength of the surface of the composite cross-arm and the uniform pressure shielding device is obtained. Finally, the optimal structure parameters of the grading shield device are obtained by the NSGA - II. The results show that the field strength of composite cross-arm post insulator decreases by 63.5% and that of suspension insulator decreases by 54.7% when the grading shield device is installed, the surface field intensity of the composite cross-arm and the surface field intensity of the grading shield device can meet the control requirements. The optimization method can provide an important reference value for the optimal design of grading shield device of transmission lines.

Key words: composite cross-arms; grading shield devices; multi-objective genetic algorithm; Kriging mode

0 引言

随着新型复合材料技术的不断进步,复合材料在国内外输配电线路中得到了广泛的运用^[1-2]。其中,复合横担杆塔具有结构强度高、质量轻、绝缘性能好以及输电线路走廊小等优势,越来越受输电线路工程所重视。中国目前为止已有超过18个省网公司推进了复合横担塔的应用工作,电压等级覆盖110~750 kV。近年来,随着超高压、大电网的建设,应用电压等级的逐步提高,使得复合横担杆塔的结构越发复杂,受杆塔结构和材料影响,复合横担电位分布极不均匀,部分关键位置电场畸变严重。当电场强度超过控制范围,将会产生电晕放电,导致无线电干扰和能量损耗;并且,复合横担长期处于高分布电压和高场强环境中将加剧其电蚀损情况,致使复合绝缘材料加速老化,芯棒酥朽加剧,严重影响输电线路安全稳定运行^[3]。因此,深入研究复合横担电场分布,针对性的设计并优化均压屏蔽装置对于复合横担塔在超高压领域的应用和发展至关重要。

目前,国内外学者对于输变电设备的均压屏蔽装置已进行了不少研究。主要集中在:研究了不同材质绝缘子^[4-6]、不同串型、不同杆塔结构、不同电压等级以及不同气象环境下的绝缘子串电位电场分布,并对均压环、屏蔽环的安装位置和结构参数变化^[7-8]对均压屏蔽效果的影响进行了分析。也有不少学者对非输电线路均压屏蔽装置进行了优化设计研究^[9-13]。近年来随着复合横担的发展对其电场分布及优化也有了一些研究:刘闯^[14]等人通过有限元仿真对比分析了500 kV同塔四回输电线路全复合和半复合横担的均压特性并利用枚举法拉棒绝缘子均压环进行了参数优化;庞金龄^[15]、杨林^[16]等人应用三维有限元仿真软件,分别对500 kV猫头型和

750 kV酒杯型复合横担塔的横担电场进行计算,利用控制变量枚举法对均压环结构参数进行优化,给出了对应的配置建议;杨熙^[17]等人通过Ansys有限元仿真软件,考虑杆塔、大地、导线等因素,计算了750 kV复合横担塔在有无悬垂绝缘子以及不同横担长度设计方案下的电位电场分布,研究了中间法兰和配置屏蔽环、均压环对复合横担电场电位分布的影响。王青于^[18]等人基于人工鱼群多目标优化算法结合有限元子模型技术对750 kV复合横担均压屏蔽装置结构参数进行优化,得出了满足场强控制的均压屏蔽装置配置方案;朱轲^[19]等人通过Ansys有限元仿真软件,对220 kV复合横担塔横担附近电位电场进行计算,给出了在复合横担端部加装悬垂绝缘串并配置均压环来优化电场、电位分布的方案。

结合上述分析可知,虽然目前对于复合横担杆塔电场、电位分布情况和均压屏蔽装置配置方案及相关参数优化有了一定的研究,但是,目前对于复合横担塔的均压屏蔽装置配置均是采用迁移传统杆塔的均压环和屏蔽环来改善和优化横担电场分布,并未实际改变均压屏蔽装置结构。由于复合横担塔结构的复杂性,需要加装多组均压环和屏蔽环,这将增加施工和运维工程量及成本。而均压屏蔽装置的结构参数目前主要是采用控制变量枚举法来进行优化,该方法无法顾及各参数间的相互影响,且当变量参数出现多维度、宽范围时,该方法的工作量巨大、耗时极长,甚至无法完成。同时由于各参数优化变量与决策变量之间是一种多维复杂映射关系,难以用确定的显示关系表达。因此,该方法对于确定最优参数存在较大的局限性。近年来,随着各类优化算法的更新迭代,人工智能算法在诸多工程领域内得到了充分的运用实践,部分学者在复合横担电场均压特性优化方面已经引入一些智能算法,并取得了良好的效果。

文中结合实际投运的500 kV复合横担窄基塔实际结构参数,精细化构建复合横担三维有限元静电场模型,分析未加均压屏蔽装置下复合横担电场、电位分布特点。结合该特点对高场强区域设计均压屏蔽装置,通过最优拉丁超立方设计(optimal latin hypercube design, Opt LHD)与有限元仿真结合的方法,获取不同设计参数下的复合横担电场仿真结果。基于该结果,通过Kriging模型构建复合横担和均压屏蔽装置测点场强与均压屏蔽装置结构参数的响应关系近似模型,然后基于灵敏度分析技术分析均压屏蔽装置结构参数对复合横担和装置本身场强影响程度。最后通过第二代非劣排序遗传算法(NSGA-II),获得满足场强控制条件下的最优均压屏蔽装置结构参数。研究结果为超高压复合横担电场优化提供重要的参考价值。

1 复合横担组成结构及三维等效计算模型

1.1 基本组成结构及参数

中国于2019年建成投运首基500 kV复合横担杆塔^[20],横担结构见图1,该塔根开为2 913 mm×2 918 mm,呼高为36 m,导线为4分裂导线,型号为LGJ-400/35。与传统的全钢架塔相比,复合横担塔利用复合绝缘横担取代了传统塔的钢制横担。其横担主要由悬式复合绝缘子、柱式复合绝缘子、端部连接金具、金属悬垂串以及联板金具组成。



(a) 正视 (b) 侧视

图1 实际投运500 kV复合横担实物图

Fig. 1 Physical picture of actual operation of 500 kV composite cross-arms

悬式复合绝缘子主要由硅橡胶伞裙、环氧玻璃纤维芯棒以及金属端头构成。柱式复合绝缘子主要由环氧玻璃纤维芯棒、硅橡胶伞裙、环氧树脂硬质伞裙以及钢制端部法兰构成。具体结构参数见表1。

1.2 计算模型的建立

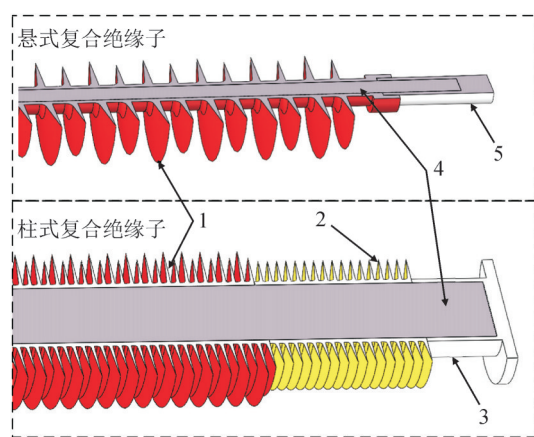
根据上述500 kV输电线路复合横担杆塔实际

表1 复合横担主要组成部件结构参数

Table 1 Main structural parameters of composite cross-arm

绝缘子类型	总长/mm	直径/mm		
		芯棒	硅橡胶伞裙	环氧树脂伞裙
悬式	5 200	60	220/192	—
柱式	5 320	160	336/300	280

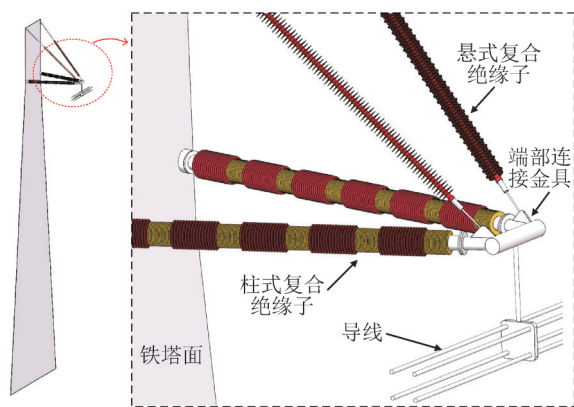
参数构建三维计算模型,由于文中研究内容重点关注复合横担部分的场强,在保证计算精度的同时做如下简化。铁塔以面模型替代,连接金具以圆柱替代,去除所有连接部位的螺栓螺孔,取其中1相进行研究,以此来提升网格剖分效率,提升计算速度。简化后的绝缘子等效模型见图2(局部),整体等效模型见图3。



1—硅橡胶伞裙; 2—环氧树脂伞裙; 3—法兰; 4—芯棒; 5—金属端头。

图2 绝缘子简化模型

Fig. 2 A simplified model of an insulator



(a) 整体结构 (b) 横担局部

图3 复合横担塔等效简化模型

Fig. 3 Equivalent simplified model of composite cross-arms tower

模型计算中,空气域设置为50 m×50 m×150 m;模型材料属性和介电常数见表2;施加电压为系统运行相电压峰值即 U_m 为: $525\ 000 \times \sqrt{2} \div \sqrt{3} \text{ V} = 428\ 660.705 \text{ V}$ 。

表2 模型材料属性参数

Table 2 Model material property parameters

材料	介电常数
空气	1.0
复合硅橡胶	3.5
芯棒	4.5
结构钢	1.7
环氧树脂	4.1
铝	1.6

2 无均压屏蔽装置电场仿真计算

基于构建的三维计算模型,结合材料属性参数配置仿真计算模型,设置导线侧电势为 U_m ,接地侧、铁塔、底部边界电势为0 V,并将模型置于三维空气中。

网格剖分的疏密程度,在很大程度上影响着电场仿真计算的准确性。为了兼顾计算的精度与速度,在网格剖分时采用自定义方式剖分,对于复合横担及端部金属等重点研究区域,网格剖分较密集;对于空气域则采用常规剖分。整体仿真计算模型及网格剖分结果见图4。

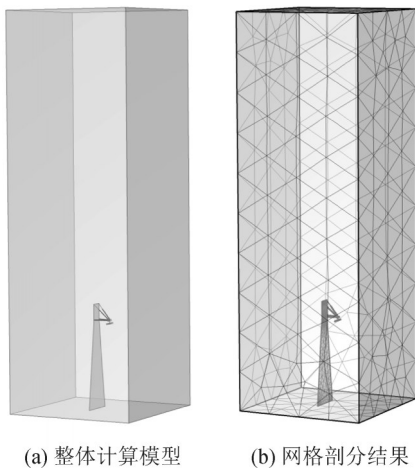


图4 整体仿真模型及网格剖分结果

Fig. 4 Whole simulation model and the result of mesh generation

通过计算获得无均压屏蔽装置下复合横担沿面电场、电位分布。复合横担柱式绝缘子和悬式绝缘子导线侧端部绝缘伞裙承受了较高的电位分布,部分位置电场畸变严重,见图5。复合横担轴线电场、电位分布曲线可以看出复合横担沿面最高电位和最大场强均是在高压端,见图6、7。根据前期输电线路电场相关研究和场强控制规定^[14,21],要求绝缘子伞裙表面场强控制在 4×10^5 V/m以下,为保障金具表面不发生点晕放电场强应控制在 2.2×10^6 V/m以下。由图6可以看出,复合横担带电端部电场畸

变严重;由图7可以看出,复合横担柱式和悬式绝缘子的导线端部场强都超出了场强控制值。

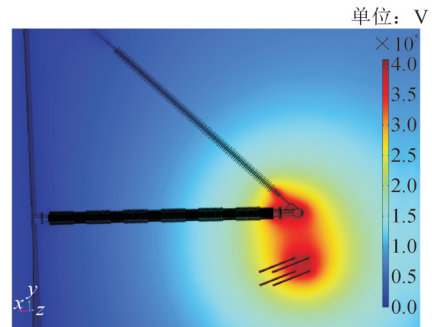


图5 复合横担电势分布图

Fig. 5 Potential distribution diagram of composite cross-arms

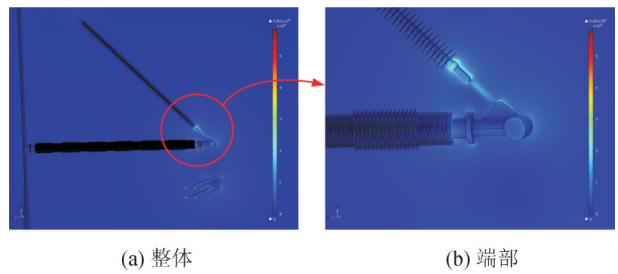
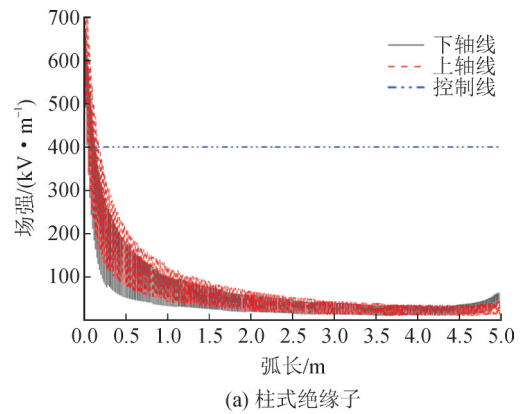
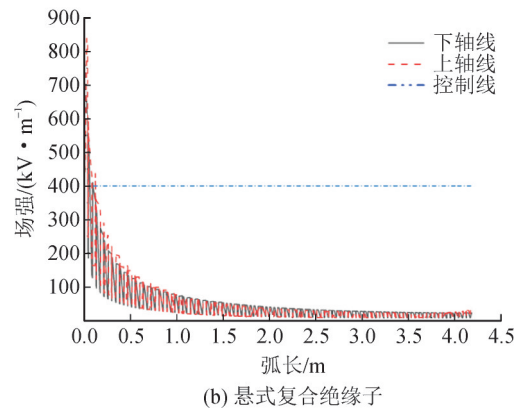


图6 复合横担电场分布云图

Fig. 6 Electric field distribution of composite cross-arms



(a) 柱式绝缘子



(b) 悬式复合绝缘子

图7 复合横担沿面电场分布

Fig. 7 Surface electric field distribution of composite cross-arms

3 均压屏蔽装置结构设计及参数优化

根据以上计算分析,复合横担在未加装均压屏蔽装置的情况下,局部区域场强畸变严重,超出限定范围。目前改善沿面电场分布的有效手段主要是加装均压环和屏蔽环,在满足场强控制要求兼顾施工运维成本的情况下,文中对传统均压屏蔽装置进行改进设计并对其结构参数进行优化。

3.1 结构设计

基于无屏蔽装置下的复合横担电场仿真结果,发现柱式和悬式绝缘子端部以及端部连接金具处电场畸变严重甚至超过控制值,需要采取屏蔽措施来改善电场环境。结合沿面电场分布,对加装均压屏蔽装置结构进行设计,其结构见图8。

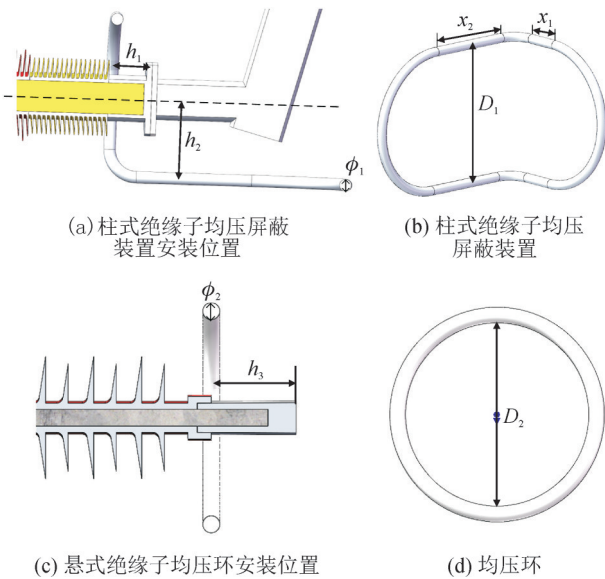


图8 复合横担均压屏蔽装置结构及参数示意

Fig. 8 Structure and parameters of grading and shielding devices for composite cross-arms

从图8中可以看出,复合横担的均压屏蔽装置主要由柱式绝缘子均压屏蔽装置和悬式绝缘子的均压环构成。均压屏蔽装置在复合横担端部的整体安装位置示意图9。

3.2 Opt LHD 试验设计及仿真计算

Opt LHD 采样是一种从多元分布参数中优化近似随机采样的方法。该方法具有非常好的空间填充性和均衡性,能够使所有的试验点尽量均匀的分布在设计空间。拉丁超立方设计具有较好的空间填充能力,与全因子设计相比,拉丁设计能够在满足空间填充的情况下大幅减少试验次数;与正交设计相比,拉丁超立方设计用同样的点数可以研究更多的组合,且拉丁设计对水平值分级宽松,试验次数可以人为控制。由于文中设计的均压屏蔽装置

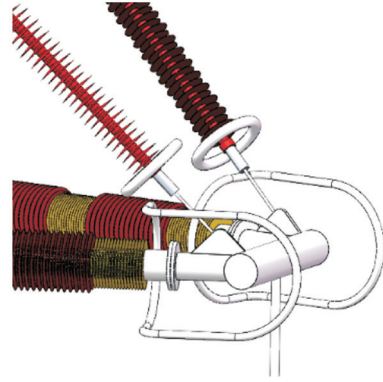


图9 复合横担均压屏蔽装置整体装配示意

Fig. 9 Assembly schematic diagram of grading and shielding devices for composite cross-arms

因子数为9个,在3水平下如果采用全因子设计,试验次数将达到19 683次,见图10。为了实现在少量的试验次数下获取更为精确的因子和响应间的关系,综合对比文中采用Opt LHD进行试验设计。

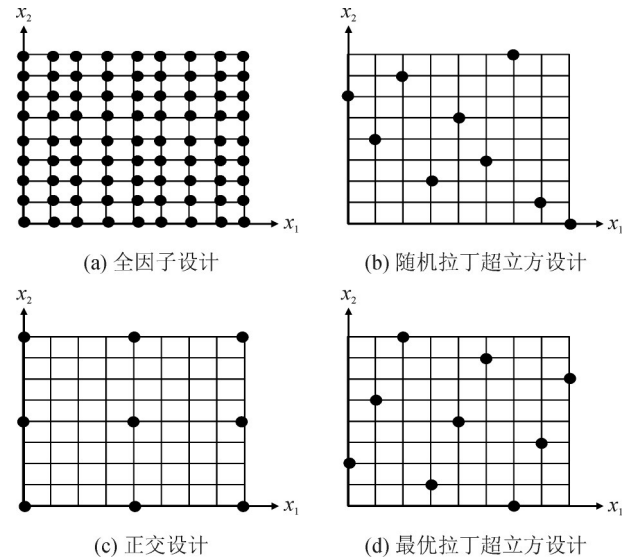


图10 4种试验设计方式对比示意

Fig. 10 Comparison diagram of four test design methods

试验设计采样变量为50组,考虑复合横担空间结构及均压屏蔽装置实际生产工艺,9个变量的设计变化范围限定见表3。50组采集样本点仿真结果见表4。

3.3 灵敏度分析

文中基于灵敏度分析技术,分析了各变量因子对电场响应的影响程度。灵敏度系数^[22]的计算表达式为:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad 1 \leq i \leq 9 \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^9 D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 9} (D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,9}) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: S_i 为灵敏度系数,表征单一输入变量因子对输出目标电场的影响, S_i 越大,则变量因子

表3 变量因子变化范围

Table 3 Variable factor variation range of structural parameters

因子	变化区间值/mm	
	min	max
x_1	100	300
x_2	300	700
D_1	420	720
D_2	300	500
h_1	0	400
h_2	200	300
h_3	0	400
φ_1	20	80
φ_2	20	60

对目标电场的影响越大; D 为目标函数的总方差, $D_i, D_{ij}, D_{1,2,\dots,9}$ 为目标函数各阶分解项的偏方差。

均压屏蔽装置的9个变量因子对复合横担柱式绝缘子沿面电场 E_1 和悬式绝缘子沿面电场 E_2 的影响程度见图11。

从图11中可以看出,9个因子对复合横担沿面电场 E_1 和 E_3 的影响以负相关为主。对于 E_1 ,优化 $\varphi_1, h_1, \varphi_2, D_2$ 对电场影响较大;对于 E_2 ,优化 h_3, D_2, φ_2 对电场影响较大。

变量因子对柱式绝缘子均压屏蔽装置和均压环表面电场最大值(E_3, E_4)的影响见图12。从图12中可以看出,对场强 E_3 和 E_4 影响最大的因子分别是 φ_1, φ_2 。

3.4 Kriging 模型构建

Kriging模型是以变异函数理论和结构为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。模型基于随机过程理论的空间插值技术对强非线性输入输出有较好的近似能力,且模型容易与自适应优化技术结合,大幅提高了方案设计和结构优化的质量和效率^[23],在多学科领域得到了广泛运用^[24-26]。

该模型将变化因子在设计区间内对应的电场函数值 $y(x)$ 视为随机函数 $Y(x)$ 可能的取值之一^[27],即为

$$y(x) = Y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x) + Z(x) \quad (3)$$

式(3)中: $f_i(x)$ 为回归模型的基函数; β_i 为待定回归系数; $Z(x)$ 为回归模型近似目标函数时的系统偏差; $\sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x)$ 为对函数 $y(x)$ 的全局近似。

预测值 $\hat{y}(x)$ 是 $Y(x)$ 的最优无偏估计,即为变量因子与电场响应的组合关系,且要求期望均方误差最小。

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^k c_i(x) \cdot y(x_i) \quad (4)$$

式(4)中, $c_i(x)$ 为权重系数,满足无偏性时 $\sum_{i=1}^k c_i(x) = 1$ 。为保证无偏估计最优,应使预测均方误差 e_{MSE} 最小,即为

$$\min e_{MSE}[\hat{y}(x)] = E[\hat{y}(x) - Y(x)]^2 \quad (5)$$

基于Kriging模型,结合表4数据,将数据归一化处理后通过输入/输出训练拟合回归系数,获得最优无偏估计,最终构建9个优化变量因子作为输入变量,沿面电场作为输出响应的映射关系代理模型。通过式(6)评估拟合代理模型精度,得到沿面电场 E_1 和 E_2 的代理模型拟合精度分别为0.938和0.929。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

式(6)中: n_i 为测试样本点数量; y_i 为电场真实响应值; \hat{y}_i 为代理模型预测值; \bar{y}_i 为响应样本均值。

沿面电场 E_1 与 h_1 和 φ_1 间的拟合响应面见图13,沿面电场 E_2 与 h_3 和 D_2 间的拟合响应面见图14。

从图13、14中可以看出,柱式绝缘子沿面电场 E_1 的变化与 φ_1, h_1 密切相关,有明显的峰谷出现, h_1 在区间0~300 mm范围内随着距离的逐渐增大,沿面电场呈现快速的下降趋势;悬式绝缘子沿面电场 E_2 ,随着距离 h_3, D_2 的增加也呈现出快速衰减的趋势,在区域内同样存在着明显的峰谷现象。

3.5 基于NSGA-II的参数优化结果

基于上述Kriging建立的代理模型,文中采用NSGA-II对复合横担均压屏蔽装置进行多目标结构参数优化。该算法采用了精英保留策略快速非支配排序,降低了非劣排序遗传算法的复杂性,具有运行速度快,解集的收敛性好等优点。

根据场强控制要求,确定电场优化目标及约束条件为:

$$\min G(E_1, E_2) = F(x_1, x_2, D_1, D_2, h_1, h_2, h_3, \varphi_1, \varphi_2) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} E_3, E_4 \leq 2.2 \times 10^6 \\ 100 \leq x_1 \leq 300 \\ 300 \leq x_2 \leq 700 \\ 420 \leq D_1 \leq 720 \\ 300 \leq D_2 \leq 500 \\ 0 \leq h_1 \leq 400 \\ 200 \leq h_2 \leq 300 \\ 0 \leq h_3 \leq 400 \\ 20 \leq \varphi_1 \leq 80 \\ 20 \leq \varphi_2 \leq 60 \end{cases} \quad (8)$$

表4 50组采集样本点仿真结果

Table 4 Simulation results of 50 groups of collected sample points

序号	x_1/mm	x_2/mm	D_1/mm	D_2/mm	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	φ_1/mm	φ_2/mm	$E_1/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	$E_2/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	$E_3/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	$E_4/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
1	157.14	422.45	671.02	377.55	114.29	297.96	187.76	43.27	60.00	3.45×10^5	4.99×10^5	1.30×10^6	1.30×10^6
2	148.98	651.02	475.10	414.29	171.43	293.88	8.16	51.84	45.31	3.82×10^5	6.51×10^5	1.29×10^6	1.30×10^6
3	238.78	357.14	499.59	418.37	342.86	281.63	65.31	23.67	48.57	3.27×10^5	6.09×10^5	2.39×10^6	1.34×10^6
4	177.55	406.12	536.33	344.90	310.20	202.04	261.22	80.00	36.33	3.20×10^5	4.86×10^5	9.88×10^5	1.80×10^6
5	202.04	479.59	579.18	385.71	391.84	212.24	269.39	22.45	25.71	2.87×10^5	4.40×10^5	2.23×10^6	2.44×10^6
6	112.24	308.16	677.14	336.73	138.78	232.65	236.73	38.37	32.24	3.68×10^5	5.20×10^5	1.30×10^6	1.94×10^6
7	144.90	487.76	420.00	442.86	155.10	246.94	318.37	71.43	57.55	3.45×10^5	4.13×10^5	9.69×10^5	1.41×10^6
8	287.76	430.61	720.00	475.51	236.73	261.22	253.06	29.80	46.94	2.79×10^5	3.92×10^5	1.66×10^6	1.46×10^6
9	234.69	561.22	683.27	361.22	16.33	269.39	351.02	32.24	28.16	4.28×10^5	4.57×10^5	1.68×10^6	2.32×10^6
10	173.47	618.37	634.29	300.00	156.94	220.41	48.98	54.29	24.90	3.62×10^5	6.67×10^5	1.26×10^6	1.88×10^6
11	185.71	365.31	432.24	373.47	89.80	244.90	383.67	45.71	22.45	4.04×10^5	4.34×10^5	1.23×10^6	2.79×10^6
12	116.33	528.57	548.57	463.27	212.24	283.67	359.18	24.90	37.14	2.97×10^5	3.79×10^5	2.09×10^6	1.87×10^6
13	295.92	553.06	609.80	381.63	163.27	300.00	155.10	72.65	30.61	3.00×10^5	5.46×10^5	1.02×10^6	1.78×10^6
14	181.63	471.43	615.92	495.92	57.14	200.00	285.71	40.82	29.80	3.70×10^5	3.66×10^5	1.28×10^6	2.19×10^6
15	136.73	438.78	658.78	459.18	81.63	271.43	132.65	62.86	24.08	3.55×10^5	5.64×10^5	1.10×10^6	2.25×10^6
16	140.82	397.96	426.12	426.53	187.76	216.33	40.82	37.14	33.06	4.05×10^5	6.66×10^5	1.42×10^6	1.75×10^6
17	197.96	340.82	517.96	402.04	130.61	222.45	326.53	20.00	56.73	3.46×10^5	4.52×10^5	2.09×10^6	1.43×10^6
18	259.18	373.47	646.53	397.96	40.82	238.78	334.69	73.88	49.39	3.62×10^5	4.40×10^5	9.26×10^5	1.42×10^6
19	193.88	691.84	652.65	491.84	48.98	267.35	244.90	59.18	47.76	3.30×10^5	3.86×10^5	1.14×10^6	1.40×10^6
20	120.41	495.92	628.16	406.12	65.31	206.12	81.63	66.53	54.29	3.77×10^5	6.09×10^5	1.04×10^6	1.28×10^6
21	108.16	512.24	487.35	312.24	359.18	253.06	204.08	39.59	51.02	3.70×10^5	5.60×10^5	1.58×10^6	1.44×10^6
22	255.10	634.69	530.20	487.76	212.24	263.27	130.61	31.02	21.63	3.18×10^5	5.59×10^5	1.67×10^6	2.46×10^6
23	128.57	585.71	713.88	434.69	228.57	242.86	57.14	21.22	41.22	3.21×10^5	6.11×10^5	2.34×10^6	1.47×10^6
24	104.08	659.18	554.69	467.35	326.53	224.49	171.43	64.08	31.43	3.27×10^5	4.73×10^5	1.15×10^6	1.89×10^6
25	124.49	324.49	622.04	479.59	367.35	236.73	212.24	50.61	50.20	2.96×10^5	4.00×10^5	1.33×10^6	1.44×10^6
26	242.86	381.63	664.90	332.65	293.88	214.29	73.47	44.49	55.92	2.80×10^5	6.11×10^5	1.60×10^6	1.34×10^6
27	275.51	577.55	438.37	389.80	106.12	287.76	310.20	35.92	51.84	3.47×10^5	4.52×10^5	1.47×10^6	1.54×10^6
28	206.12	700.00	481.22	353.06	285.71	257.14	375.51	56.73	26.53	3.26×10^5	4.47×10^5	1.16×10^6	2.77×10^6
29	300.00	536.73	524.08	308.16	122.45	204.08	277.55	42.04	37.96	3.57×10^5	5.57×10^5	1.27×10^6	1.88×10^6
30	100.00	544.90	579.18	340.82	73.47	277.55	302.04	75.10	34.69	3.74×10^5	4.91×10^5	1.02×10^6	1.85×10^6
31	214.29	610.20	573.06	451.02	400.00	291.84	293.88	60.41	55.10	2.97×10^5	3.87×10^5	1.22×10^6	1.33×10^6
32	230.61	675.51	566.94	316.33	179.59	248.98	179.59	76.33	58.37	3.07×10^5	5.52×10^5	1.03×10^6	1.26×10^6
33	222.45	642.86	511.84	455.10	261.22	210.20	122.45	34.69	59.18	3.23×10^5	5.30×10^5	1.48×10^6	1.26×10^6
34	283.67	300.00	603.67	406.12	204.08	234.69	116.12	51.84	20.00	3.08×10^5	6.09×10^5	1.30×10^6	2.76×10^6
35	165.31	602.04	689.39	369.39	253.06	218.37	400.00	46.94	52.65	2.57×10^5	4.63×10^5	1.26×10^6	1.55×10^6
36	246.94	414.29	560.82	471.43	244.90	253.06	26.33	78.78	53.47	3.13×10^5	5.92×10^5	1.13×10^6	1.24×10^6
37	291.84	446.94	468.98	483.67	302.04	226.53	342.86	55.51	39.59	3.23×10^5	3.64×10^5	1.10×10^6	1.72×10^6
38	251.02	348.98	591.43	320.41	334.69	279.59	367.35	49.39	41.22	2.84×10^5	5.10×10^5	1.33×10^6	1.78×10^6
39	267.35	569.39	444.49	357.14	375.51	240.82	24.49	57.96	33.88	3.93×10^5	6.38×10^5	1.44×10^6	1.62×10^6
40	271.43	512.24	597.55	393.88	0.00	251.02	0.00	33.47	44.49	4.47×10^5	6.74×10^5	1.66×10^6	1.31×10^6
41	226.53	593.88	456.73	422.45	24.49	228.57	146.94	77.55	28.98	3.88×10^5	5.63×10^5	1.01×10^6	1.94×10^6
42	169.39	463.27	542.45	324.49	195.92	295.92	114.29	27.35	20.82	3.42×10^5	6.68×10^5	2.01×10^6	2.56×10^6
43	153.06	504.08	707.76	348.98	383.67	275.51	89.80	70.20	38.78	2.77×10^5	5.56×10^5	1.24×10^6	1.34×10^6
44	189.80	455.10	695.51	446.94	277.55	259.18	391.84	67.76	23.27	2.60×10^5	3.74×10^5	9.82×10^5	2.57×10^6
45	279.59	626.53	701.63	438.78	269.39	218.16	118.78	65.31	35.51	2.69×10^5	5.28×10^5	1.26×10^6	1.55×10^6
46	206.12	332.65	462.86	304.08	97.96	265.31	97.96	61.63	46.12	4.00×10^5	6.78×10^5	1.16×10^6	1.48×10^6
47	161.22	389.80	450.61	430.61	351.02	289.80	195.92	68.98	27.35	3.96×10^5	4.58×10^5	1.24×10^6	2.17×10^6
48	263.27	683.67	640.41	328.57	318.37	273.47	163.27	26.12	43.67	2.77×10^5	5.53×10^5	2.30×10^6	1.59×10^6
49	132.65	667.35	493.47	365.31	8.16	230.61	228.57	28.57	42.86	4.46×10^5	4.98×10^5	2.04×10^6	1.67×10^6
50	218.37	316.33	505.71	500.00	32.65	285.71	212.24	48.16	40.41	3.54×10^5	4.13×10^5	1.15×10^6	1.63×10^6

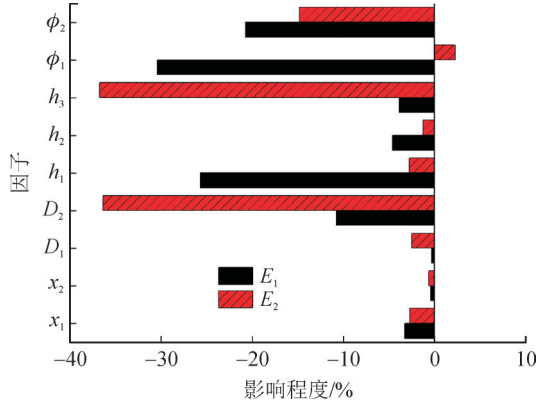


图11 优化参数对复合横担沿面电场的灵敏值

Fig. 11 Sensitive value of optimized parameters to surface electric field of composite crossarm

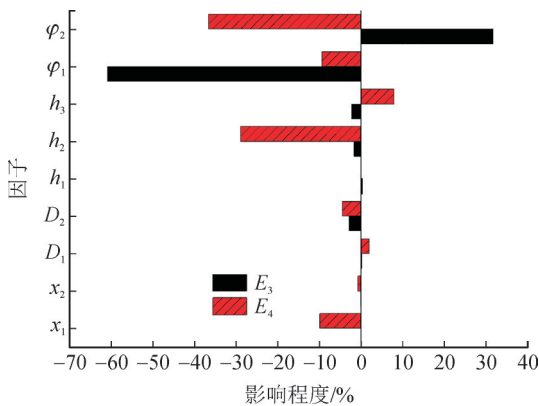


图12 优化参数对均压屏蔽装置表面电场的灵敏值

Fig. 12 Sensitive value of optimized parameters to surface electric field of equalizing shielding device

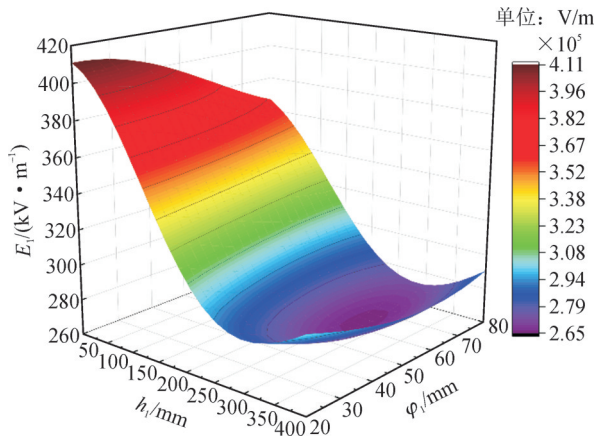


图13 沿面电场 E_1 与 h_1 和 ϕ_1 间的拟合响应面

Fig. 13 Fitting response surface between surface electric field E_1 and h_1 and ϕ_1

设置种群数为40, 遗传代数为50, 迭代次数为2 000次。整体优化过程见图15。

基于上述优化目标及优化流程, 获得了复合横担均压屏蔽装置的最优结构参数, 见表5。

根据表5中优化后的结构参数, 构建复合横担均压屏蔽装置, 保持其材料设置、电场及空间结构

设置不变, 通过仿真获得电场、电势结果。

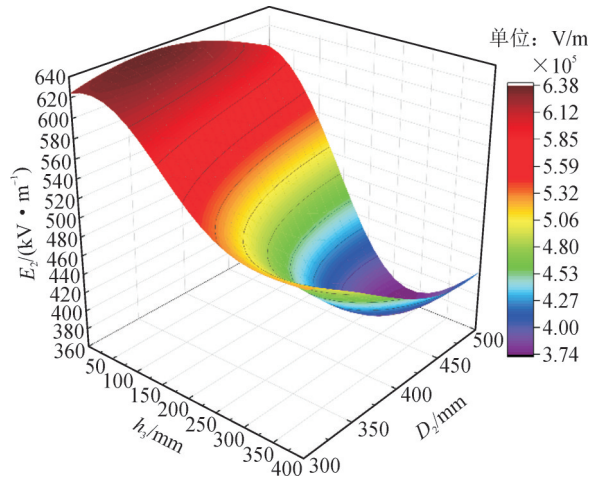


图14 沿面电场 E_2 与 h_3 和 D_2 间的拟合响应面

Fig. 14 Fitting response surface between surface electric field E_2 and h_3 and D_2

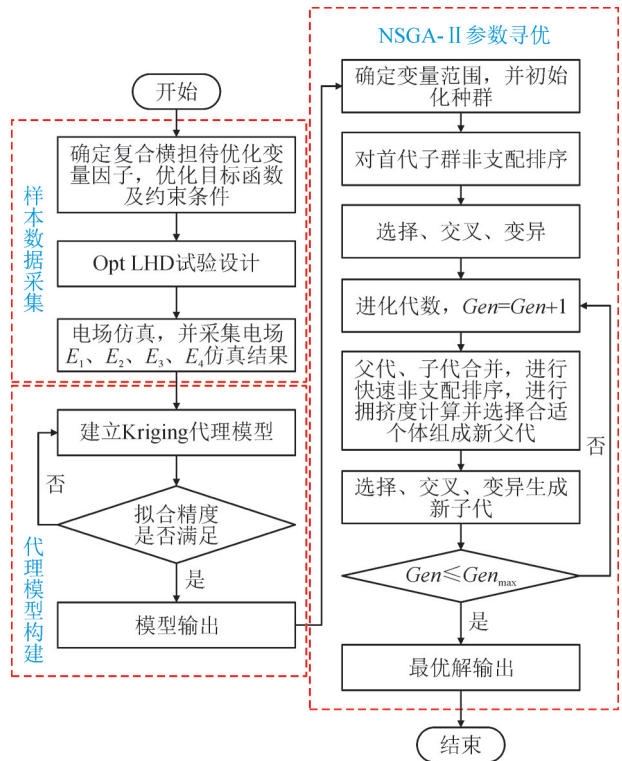


图15 变量因子参数寻优流程

Fig. 15 The flow chart of parameter optimization of variable factor

表5 均压屏蔽装置结构优化前后参数值

Table 5 Parameters before and after structure optimization of pressure equalization shield device mm

类别	x_1	x_2	D_1	D_2	h_1	h_2	h_3	ϕ_1	ϕ_2
原始	158	422	671	378	114	297	188	43	60
最优	208	519	649	467	277	263	309	50	40

加装最优均压屏蔽装置后复合横担导线端部仍是高压的承受主体, 但通过加装均压屏蔽装置使

得横担整体承受的电压分布更为均匀, 见图16、17。

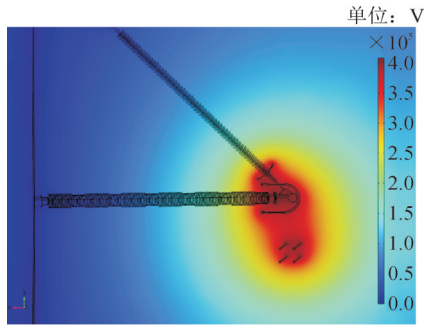
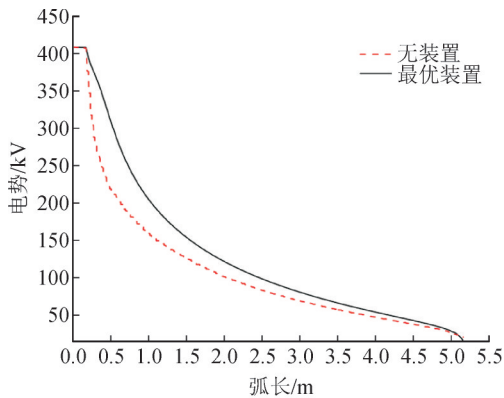
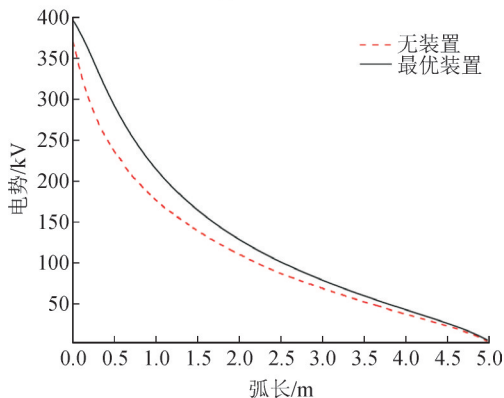


图 16 加装均压屏蔽装置后复合横担电势分布云图

Fig. 16 Potential distribution diagram of composite cross-arms with the grading and shielding devices



(a) 悬式绝缘子



(b) 柱式绝缘子

图 17 加装最优均压装置前后复合横担轴线电势分布

Fig. 17 Comparison of axial potential distribution of composite cross-arms with and without grading and shielding devices

加装最优均压屏蔽装置后复合横担沿面电场得到了有效控制, 均满足场强控制要求, 见图18、19。此时, 复合悬式绝缘子沿面场强峰值较未加装时下降了54.7%; 柱式绝缘子下降了63.5%。

复合横担沿面电场 E_1 、 E_2 与均压屏蔽装置表面电场 E_3 、 E_4 在最优结构参数下的Kriging代理模型预测值与仿真值见表6。从表6中可以看出不论是预

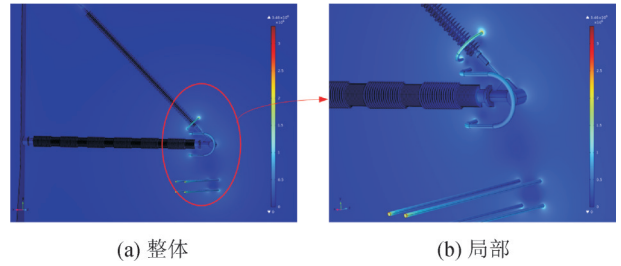
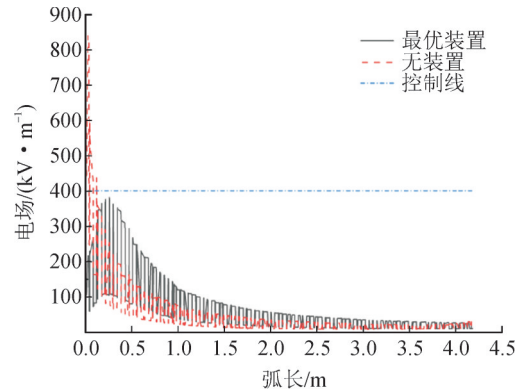
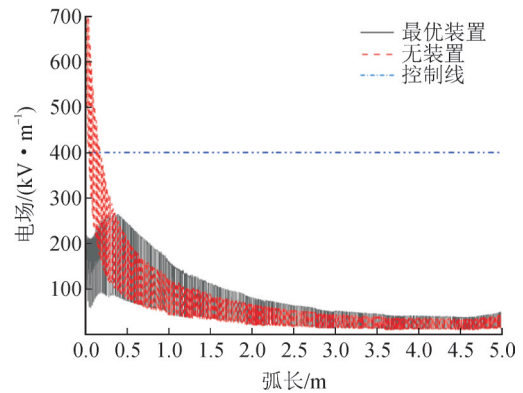


图 18 加装均压装置后复合横担电场分布云图

Fig. 18 Electric field distribution diagram of composite cross-arms with the grading and shielding devices



(a) 悬式绝缘子



(b) 柱式绝缘子

图 19 加装最优均压装置前后复合横担沿面电场分布

Fig. 19 Comparison of surface electric field distribution of composite cross-arms with and without grading and shielding devices

测值还是仿真值 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 均满足场强控制要求, 且预测值与仿真值最大偏差为7.12%, 最小偏差为3.48%, 验证了Kriging代理模型以及NSGA-II优化过程的可行性。

表 6 优化后沿面电场预测值与仿真值

		after optimization			V/m
参数	E_1	E_2	E_3	E_4	
预测值	2.54×10^5	3.52×10^5	1.19×10^6	1.66×10^6	
仿真值	2.68×10^5	3.79×10^5	1.15×10^6	1.60×10^6	

4 结论

文中通过构建500 kV复合横担静电场三维仿真模型,分析了未加均压屏蔽装置下的电场、电势分布特性,基于该特性设计了均压屏蔽装置,并通过OptLHD样本筛选、Kriging模型近似复杂真实模型以及NSGA-II优化算法相结合,对装置结构参数进行优化,得到以下结论:

1)设计了一种新结构的均压屏蔽装置,在现有安装方式上,可以减少一组均压环的安装,能够有效降低施工运维成本。

2)基于灵敏度分析技术获得了均压屏蔽装置结构参数对目标电场的影响程度,其中参数 φ_1 、 h_1 、 φ_2 、 D_2 和 h_3 、 D_2 、 φ_2 分别对复合横担沿面电场 E_1 和 E_2 影响显著,且均为负效应, φ_1 、 φ_2 对装置表面电场 E_3 和 E_4 影响较为显著。

3)复合横担加装优化后的均压屏蔽装置,柱式绝缘子沿面场强峰值下降至 2.68×10^5 V/m,相较于未加装屏蔽装置时降低了63.5%;悬式绝缘子下降至 3.79×10^5 V/m,相较于未加装屏蔽装置时降低了54.7%,均满足场强控制要求。

4)通过Kriging模型与NSGA-II相结合的多目标优化设计,可以避免大量重复的仿真过程,能够大幅提升优化效率,为复合横担均压屏蔽装置结构参数优化设计提供了重要的参考价值。

参考文献:

- 王傲玉,孙晋茹,柴钰鹏,等.雷电流注入下飞行器碳纤维复合材料结构电磁效应研究[J].电瓷避雷器,2025(4):17-24.
WANG Aoyu, SUN Jinru, CHAI Yupeng, et al. Electromagnetic effects on aerospace carbon fiber composite structures under lightning current injection[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025 (4):17-24.
- 朱洪业,王晓旭,吕吉祥,等.复合材料边缘效应对RTM成型浸润过程仿真研究及实验验证[J].西安工程大学学报,2025,39(4):9-16.
ZHU Hongye, WANG Xiaoxu, LYU Jixiang, et al. Simulation and experimental verification of the edge effect of composites on the infiltration process of RTM forming[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(4):9-16.
- 陈原,薛文祥,刘云鹏,等.伞套硅橡胶含量对复合绝缘子运行寿命的影响[J].高电压技术,2022,48(2):736-752.
CHEN Yuan, XUE Wenxiang, LIU Yunpeng, et al. Influence of silicone rubber content of shed and sheath on composite insulator lifespan[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2):736-752.
- 邱志斌,阮江军,黄道春,等.输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J].高电压技术,2016,42(4):1259-1267.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on aging modes and test of transmission line porcelain suspension insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1259-1267.
- 司马文霞,施健,袁涛,等.特高压复合绝缘子电场计算及基于神经网络遗传算法的均压环结构优化设计[J].高电压技术,2012,38(2):257-265.
SIMA Wenxia, SHI Jian, YUAN Tao, et al. Electric field calculation of ultra high voltage composite insulator and optimization design of corona ring structure based on neural network and genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):257-265.
- 胡建林,吴尧,肖代波,等.特高压直流复合支柱绝缘子均压环的优化设计[J].高电压技术,2014,40(1):46-54.
HU Jianlin, WU Yao, XIAO Daibo, et al. Optimization for grading rings of UHV DC composite post insulators[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):46-54.
- 吴伟,蒋正龙,王博闻,等.覆冰状态下防雷绝缘子电位分布与提高电场均匀性措施[J].电网技术,2019,43(11):4225-4230.
WU Wei, JIANG Zhenglong, WANG Bowen, et al. Study on potential distribution of lightning protection insulator and measures improving electric field uniformity under ice coating[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4225-4230.
- 黄道春,谢雄杰,黄正芳,等.1000 kV交流紧凑型线路均压环参数设计和电晕特性试验布置[J].高电压技术,2013,39(12):2933-2942.
HUANG Daochun, XIE Xiongjie, HUANG Zhengfang, et al. Grading ring parameter design and corona characteristic test arrangement of 1000 kV AC compact transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):2933-2942.
- HE Jingliang, HU Jun, GU Shanqiang, et al. Analysis and improvement of potential distribution of 1000 kV ultra-high-voltage metal-oxide arrester[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1225-1233.
- 马御棠,曹俊,屈路,等.考虑脉冲电流波形影响的避雷器氧化锌电阻片温升及破坏特性研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):306-314.
MA Yutang, CAO Jun, QU Lu, et al. Temperature rise and failure characteristics of zinc oxide resistor for arrester considering pulse current waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5):306-314.
- 李登云,朱凯,李智成,等.基于正交试验的1100 kV直流高压发生器均压环优化设计[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(7):637-643.
LI Dengyun, ZHU Kai, LI Zhicheng, et al. Optimization design of grading ring for a 1100 kV DC high voltage generator based on orthogonal experiment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(7):637-643.
- 刘鹏,吴泽华,程建伟,等.特高压多端柔直换流站直流场均压屏蔽金具电场分布仿真分析与差异化优化方法[J].电网技术,2021,45(6):2405-2412.
LIU Peng, WU Zehua, CHENG Jianwei, et al. Simulation analysis and differentiated optimization methods of electric field distribution for shielding devices in UHV multi-terminal flexible DC converter station[J]. Power System Technology, 2021, 45(6):

- 2405-2412.
- [13] 毛艳, 丁玉剑, 郭贤珊, 等. ± 1 100 kV PLC电抗器均压屏蔽装置的结构优化[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1436-1442.
MAO Yan, DING Yujian, GUO Xianshan, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for ± 1 100 kV PLC reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1436-1442.
- [14] 刘闯, 张欣宜, 刘鹏, 等. 同塔四回500 kV输电线路全复合横担与半复合横担均压特性[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4131-4139.
LIU Chuang, ZHANG Xinyi, LIU Peng, et al. Study on voltage sharing characteristics of full composite cross arm and semi composite cross arm of 500 kV four-circuit transmission lines[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4131-4139
- [15] 庞金龄, 杨熙, 梁经龙. 基于子模型技术的500 kV复合杆塔横担电场分析及均压环结构参数优化[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 74-80.
PANG Jinling, YANG Xi, LIANG Jinglong. Electric field analysis of 500 kV composite cross-arm and structure parameters optimization of its grading rings based on submodeling technology[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 74-80.
- [16] 杨林, 谭浩文, 王加龙, 等. 750 kV酒杯型复合横担杆塔电场仿真计算及电晕试验[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 2009-2015.
YANG Lin, TAN Haowen, WANG Jialong, et al. Electric field computation and corona test for composite cross-arms in 750 kV cup type tower[J]. Power System technology, 2018, 42(6): 2009-2015.
- [17] 杨熙, 喻新强, 尚勇, 等. 750 kV输电线路复合横担均压特性[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1625-1631.
YANG Xi, YU Xinqiang, SHANG Yong, et al. Voltage-sharing characteristics of composite cross-arm in 750 kV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1625-1631.
- [18] 杨熙, 王青于, 刘鹏, 等. 采用多目标优化方法和人工鱼群算法的750 kV复合横担均压屏蔽装置结构优化[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3666-3675.
YANG Xi, WANG Qingyu, LIU Peng, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for 750 kV composite cross-arms with multi-objective optimization method and artificial fish swarm algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3666-3675.
- [19] 司马文霞, 杨庆, 孙才新, 等. 基于有限元和神经网络方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115-120.
SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin, et al. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(17): 115-120.
- [20] 李俊游, 周志文, 侯子龙, 等. 复合绝缘横担技术在500 kV架空输电线路上的应用[J]. 浙江电力, 2020, 39(10): 74-79.
LI Junyou, ZHOU Zhiwen, HOU Zilong, et al. Application of the composite insulation cross-arm technology in 500 kV overhead transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(10): 74-79.
- [21] 架空输电线路复合横担杆塔设计规程: DL/T 5579—2020[S]. 2020.
Specification for design of composite cross arm towers of overhead transmission line: DL/T 5579—2020[S]. 2020.
- [22] 白金, 周秀, 杨鑫, 等. 光伏接入与系统短路叠加引起的复杂工况对配网避雷器运行的影响[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(5): 315-324.
BAI Jin, ZHOU Xiu, YANG Xin, et al. Impact of complex operating conditions caused by superposition of photovoltaic access and system short-circuit on distribution network lightning arrester operation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 315-324.
- [23] JACK P C, KLEIJNEN. Regression and kriging metamodels with their experimental designs in simulation: A review[J]. European Journal of Operational Research, 2017.
- [24] 柳强, 丁宇. 基于SVM和Kriging模型的变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 274-280.
LIU Qiang, DING Yu. Fault diagnosis method of power transformers based on support vector machine and kriging model[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 274-280.
- [25] 叶爽怡, 扈晓翔, 司小胜, 等. 采用滑动窗口与克里金插值算法的复杂系统可靠性评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 171-179.
YE Shuangyi, HU Xiaoxiang, SI Xiaosheng, et al. Reliability assessment method for complex systems using sliding window and kriging interpolation algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 171-179.
- [26] HU Yingshi, LU Zhenzhou, WEI Ning, et al. Safety lifetime analysis method for multi-mode time-dependent structural system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(11): 294-308.
- [27] 张建侠. 基于Kriging模型的全局代理优化算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHANG Jianxia. Researches on surrogate-based global optimization algorithm based on Kriging model[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018.
- 杨暘(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压输电线路智能运维及电磁环境方面研究工作(E-mail: 369293246@qq.com)。
刘鹏(1993—), 男, 硕士, 主要从事超特高压输电线路雷电防护方面的研究工作(通信作者)(E-mail: liupeng@ctgu.edu.cn)。