

252 kV 紧凑型气体绝缘金属封闭输电线路 三相盆式绝缘子结构综合优化

吴泽华¹, 田汇冬¹, 靳守锋¹, 毛航银², 徐家忠³, 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 国家电网浙江省电力公司
电力科学研究院, 310014, 杭州; 3. 山东电工电气集团有限公司, 250022, 济南)

摘要: 为均匀 252 kV 紧凑型 GIL 三相盆式绝缘子表面电场和应力场分布, 采用智能优化算法对其开展了综合优化研究。建立了三维有限元仿真计算模型, 对 3 种结构三相盆式绝缘子的电场和应力场分布特性进行了比较, 择优分析了典型结构参数对电场和应力场分布的影响规律。在此基础上, 构建 Bernstein 方程描述绝缘子表面轮廓, 讨论了相应的约束条件和简化方法, 应用粒子群算法联合调用 COMSOL 及 MATLAB 实现了三相盆式绝缘子的智能结构优化。结果表明: 与原始结构相比, 优化后绝缘子表面合成场强、切向场强和第一主应力最大值分别下降了 13.5%、16.0%、8.5%, 均能满足控制值要求; 不规则复杂轮廓优化方法能够有效改善 252 kV 紧凑型 GIL 电场和应力场分布。研究结果可为 252 kV 三相盆式绝缘子的结构设计与改进提供指导和参考。

关键词: 气体绝缘金属封闭输电线路; 三相盆式绝缘子; Bernstein 方程; 智能算法

中图分类号: TM216 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202012017 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0138-09



OSID 码

Comprehensive Optimization for the Structure of Three-Phase Spacer in 252 kV Compact Gas Insulated Metal Enclosed Transmission Line

WU Zehua¹, TIAN Huidong¹, JIN Shoufeng¹, MAO Hangyin², XU Jiazhong³, PENG Zongren¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

3. Shandong Electrical Engineering & Equipment Group Co. Ltd., Jinan 250022, China)

Abstract: A comprehensive optimization study is carried out by an intelligent algorithm to uniformize the electric and stress field distributions of three-phase spacer in 252 kV compact gas insulated metal enclosed transmission line. 3-D finite element simulation models of the three-phase spacer are established. Distributions of electric and stress fields for three structures are compared and the influences of structural parameters on electric and stress fields are studied. Then, a Bernstein equation is established to describe the profile of insulator surface, and the corresponding constraints and simplification methods are also discussed. The intelligent optimization of the three-phase spacer is realized by combining COMSOL and MATLAB and using a particle swarm algorithm. Results and a comparison with the original structure show that the maximum values of total field, tangential field and stress of the optimized spacer decrease by 13.5%, 16.0% and 8.5%, respectively, and all of them meet control values. The proposed optimization method for complex profile efficiently improves the distributions of the electric and

收稿日期: 2020-05-05。 作者简介: 吴泽华(1995—),男,博士生;彭宗仁(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51521065);国家电网公司科技项目(SGZJ0000KXJS1900410)。

网络出版时间: 2020-06-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200622.0853.002.html>

stress fields. The results provides guidance and reference for the structural design of 252 kV compact gas insulated metal enclosed transmission line.

Keywords: gas insulated metal enclosed transmission line; three-phase spacer; Bernstein equation; intelligent algorithm

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)具有输送容量大、不受环境影响等特点^[1-4]。当电缆满足不了要求、架空线大跨越覆冰舞动得不到较处理好时^[5], GIL 可以作为高电压、大电流输电方式的补充。紧凑型 GIL 将三相母线封闭在同一金属壳体内,具有较高的自然功率,能有效降低占地面积并节约成本,其设计与应用正逐步受到重视^[6]。

然而,紧凑型设计使 GIL 内部结构变得复杂,可能发生的故障形式也将更为多样。作为紧凑型 GIL 中的重要绝缘部件,三相盆式绝缘子表面电场分布与应力场分布将变得更不均匀,有必要对其结构进行精细化设计,以保障其运行的安全性与可靠性。目前,国内外对三相盆式绝缘子的研究主要集中在仿真分析与水压试验上。文献[7-8]对三相盆式绝缘子的水压试验及其强度的影响因素进行了研究,在此基础上改善了应力场分布;文献[9-10]对三相共箱式 GIS 盆式绝缘子进行了电场的仿真计算,获得了三相盆式绝缘子的电场分布特性,简略地提出了结构改进的方案。进一步均匀绝缘子表面电场和应力场分布能够有效提高其在系统运行时的可靠性,并降低维护成本。但三相盆式绝缘子的形态各异,没有统一的设计标准,以往的研究大多仅进行单一场的仿真与分析,没有比较不同设计方案并进行全面优化。三相盆式绝缘子电气性能与力学性能综合优化亟待开展。

现代科技的进步使计算高电压工程学得到快速发展,数学与计算机科学逐步融入到绝缘结构设计领域,形成对传统高电压工程的有效补充^[11]。应用遗传算法等现代智能优化方法,可以优化不同类型的电力设备^[12-14]。复杂轮廓表达方法是对曲面应用智能优化算法进行精细化优化的基础。文献[15]提出了非均匀有理 B 样条曲线重构三支柱绝缘子支腿形状的思路,通过改变拟合点坐标实现优化算法在复杂轮廓下的应用。然而该方法需要一定数量的拟合点作为基础,计算成本较高,拟合点的坐标也应慎重选择。三相盆式绝缘子的盆面也是一类复杂的轮廓曲面,探索简单可行的表达方法是对其快速准确优化的关键。

本文以 252 kV 三相盆式绝缘子为研究对象,

对比分析了 3 种类型的三相盆式绝缘子电场、应力场分布特性。择优选取一种绝缘子进行参数分析,确定了智能优化算法下绝缘子的初始形态。通过 Bernstein 方程描绘三相盆式绝缘子的关键结构,给出了三相盆式绝缘子表面形态的解析表达式。以绝缘子表面电场强度和主应力最大值为决策变量,联合调用 MATLAB 和 COMSOL,应用改进粒子群算法对绝缘子进行了优化。研究结果可为 252 kV 三相盆式绝缘子的选型、设计和优化提供参考。

1 典型结构与电场、应力场分布

1.1 三相盆式绝缘子仿真计算模型与设计指标

三相盆式绝缘子在 252 kV 紧凑型 GIL 中主要起支撑导体、密封气室和电气绝缘的作用。目前, 252 kV 紧凑型 GIL 使用的三相盆式绝缘子共有 3 种结构,其仿真计算模型如图 1 所示。I 型绝缘子延续了单相盆式绝缘子的特点,具有明显的盆面形态。II 型绝缘子和 III 型绝缘子将盆面结构进一步退化,形成板式结构,其差异在于中心导体周围所包覆环氧的形态不同: II 型绝缘子仍有凸面与凹面的区别, III 型绝缘子两侧均为凸面且对称。电场分布及应力场分布均应采用图 1 所示模型进行计算。

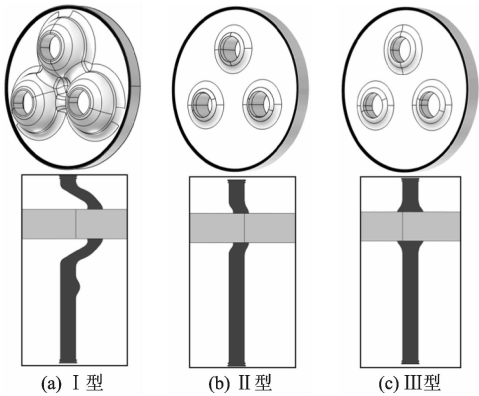


图 1 3 种类型三相盆式绝缘子仿真计算模型

绝缘件的电气性能设计指标包括:①表面最大电场强度 E_1 ,由于绝缘件暴露在 SF_6 中,因此需要考虑其在雷电冲击电压下表面最大电场强度 E_1 ,以确保 E_1 不发生间隙放电。为方便文中表述,同时与绝缘子沿面切向场强加以区分,后文均将 E_1 称为绝缘子表面合成场强;②绝缘件表面切向场强

E_2, E_2 是雷电冲击电压下沿面放电的重要影响因素;③绝缘件与金属界面的电场强度 E_3 , 应关注其长期运行下的可靠性, 以满足控制局部放电的需要^[16]。目前, 在 0.4 MPa SF₆ 中, 国内工程普遍采用表 1 所列数值对各设计指标进行控制。

表 1 0.4 MPa SF₆ 下各设计指标控制值

控制指标	数值
$E_1 / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	24.0
$E_2 / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	12.0
$E_3 / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	3.0~4.0

三相盆式绝缘子在紧凑型 GIL 中起到了分隔气室的作用。水压试验是检验盆式绝缘子力学性能的主要手段, 盆式绝缘子受水压作用时主应力的计算是其设计的要点之一。根据文献[17], 在盆式绝缘子的应力场设计时, 可应用第一强度理论, 以第一主应力大小判断绝缘子材料的破坏问题。在现有工程中, 一般要求绝缘子用的环氧-氧化铝材料的破坏强度应大于 70 MPa。因此, 绝缘子强度的控制指标应在该值基础上加一定裕度, 其第一主应力设计许用值 σ_s 应为 50 MPa^[16]。

1.2 不同类型三相盆式绝缘子的电场分布

根据 252 kV 气体绝缘金属封闭输电设备雷电冲击试验的标准, 在进行雷电冲击试验的计算时应取最恶劣工况: 一相导体加载 1 050 kV 雷电冲击试验电压峰值, 其余导体、金属外壳及低压端屏蔽环接地。在进行额定运行工况的计算时, 一相导体加载额定运行相电压峰值 U_p , 其余导体加载 $-1/2U_p$, 金属外壳及低压端屏蔽环接地。由于三相导体在紧凑型 GIL 中呈等腰三角形排布, 因此定义位于三角形顶角的导体为中间相, 位于三角形底角的导体为边相, 计算时取边相导体加载最高试验电压。紧凑型 GIL 三相盆式绝缘子用环氧-氧化铝复合材料, 其相对介电常数取 5.8, SF₆ 的相对介电常数取 1.0。

图 2 给出了雷电冲击电压下 3 种类型三相盆式绝缘子表面的电场分布。图 3 给出了雷电冲击电压下 3 种类型三相盆式绝缘子沿面的电场分布情况。由于Ⅲ型绝缘子两面对称, 没有凹面和凸面的区别, 因此仅取其表面一侧的电场分布进行分析。图 3b 显示, Ⅱ型三相盆式绝缘子电场分布在凸面沿面和凹面沿面均与Ⅰ型绝缘子的相似, 这是两者的基本结构相同造成的。Ⅱ型三相盆式绝缘子表面切向场强和合成场强的最大值均超过了 20 kV/mm, 其电场分布有一定程度的畸变。从图 3c 中可以看出, Ⅲ

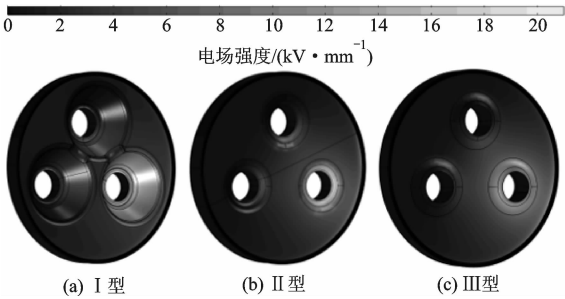


图 2 雷电冲击电压下三相盆式绝缘子表面的电场分布

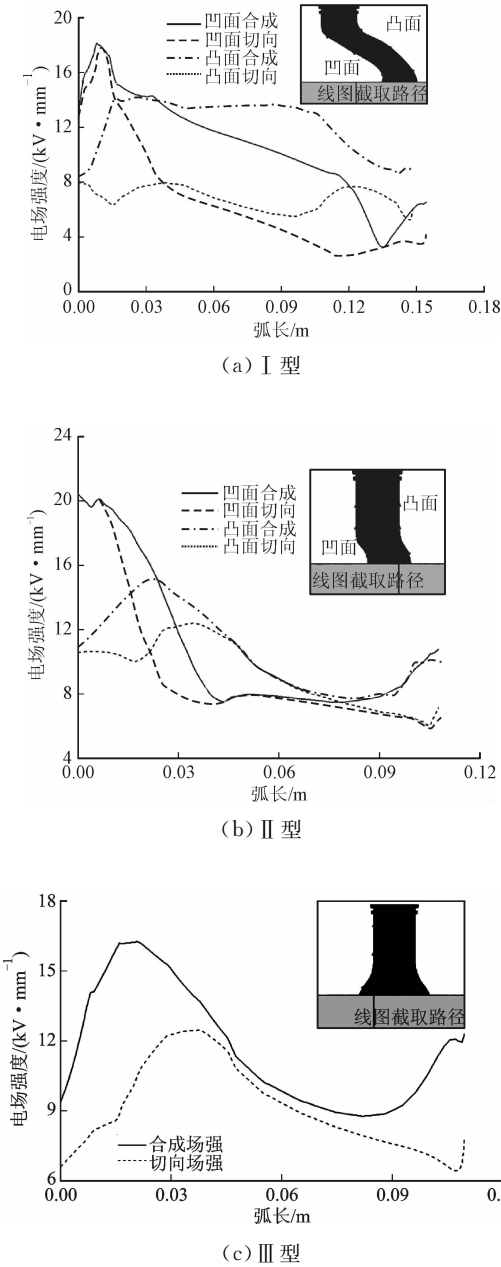


图 3 雷电冲击电压下三相盆式绝缘子沿面的电场分布

型三相盆式绝缘子沿面电场随径向距离的增加先增大后减小再增大, 合成场强最大值为 16.3 kV/mm, 切向场强最大值仅为 12.5 kV/mm。比较 3 种类型

三相盆式绝缘子沿面的电场分布,可以看出Ⅲ型三相盆式绝缘子分布较为均匀,其电气性能更优。

图 4 给出了额定运行工况下 3 种类型三相盆式绝缘子中心导体金属-环氧黏接界面电场分布情况。从图中可以看出,Ⅰ型、Ⅲ型三相盆式绝缘子在中心导体金属-环氧黏接界面电场强度最大值相当,均未超过 3 kV/mm,Ⅱ型绝缘子界面处电场强度最大值为 3.6 kV/mm。Ⅰ型、Ⅱ型绝缘子中心导体金属-环氧黏接界面处电场强度最大值均分布在绝缘子的凹面,而Ⅲ型绝缘子的最大值则分布在其对称轴上。

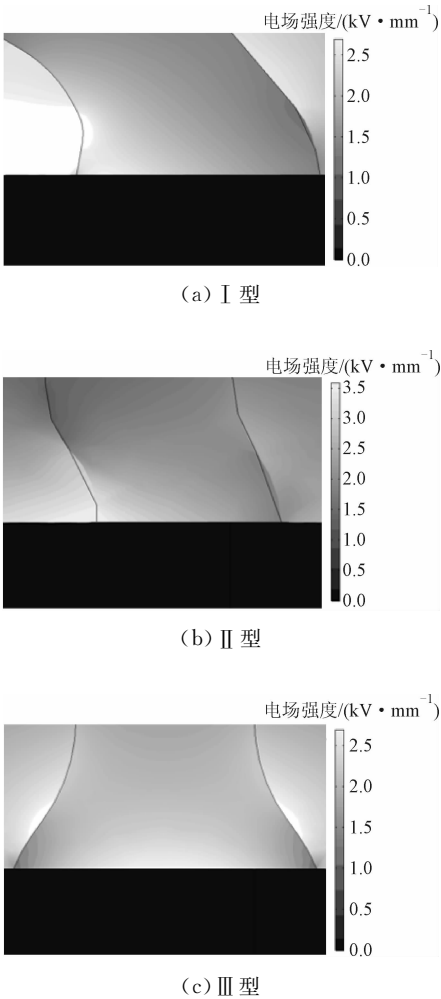


图 4 额定运行工况下三相盆式绝缘子中心导体电场分布

1.3 不同类型三相盆式绝缘子的应力场分布

水压试验是评价绝缘子性能的重要环节,在对 3 种类型三相盆式绝缘子进行对比时,主要关注其在相同水压下绝缘子表面第一主应力最大值 $\sigma_{\max}$ 。计算时,三相盆式绝缘子的凹面加载 1 MPa 压力,与水压工装接触的位置设置为固定约束。三相盆式绝缘子应力场分布计算所需的各材料参数见表 2,参数值由试验测得。

表 2 应力场分布计算的材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
环氧/氧化铝	13.00	0.36	2.30
铝	69.00	0.33	2.70

图 5 给出了 3 种类型三相盆式绝缘子在 1 MPa 水压下其表面的应力场分布。从图 5 可以看出,Ⅰ型三相盆式绝缘子表面第一主应力最大值为 87.6 MPa,分布在中间相与边相凸起盆面的交界处,各凸起盆面的边缘第一主应力值也较大,超过了 30 MPa;Ⅱ型三相盆式绝缘子第一主应力最大值为 35.2 MPa,分布在盆面凸起与板式结构的交界处,中心导体上也有较大的第一主应力值,这是由盆面结构与材料共同作用引起的;Ⅲ型三相盆式绝缘子第一主应力最大值为 27.5 MPa,其较为均匀地分布在盆面靠近中心的区域内。可以看出Ⅲ型三相盆式绝缘子表面第一主应力最大值较小,分布均匀,其结构较优。

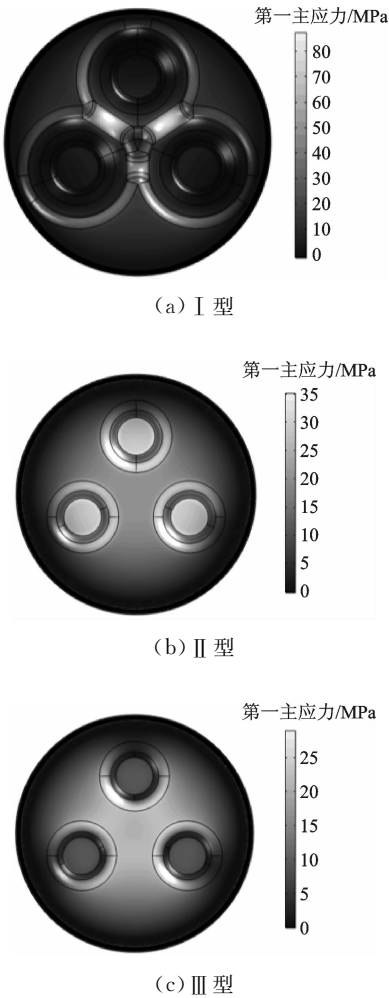


图 5 1 MPa 水压下三相盆式绝缘子表面应力场分布

2 关键结构参数对绝缘子性能的影响

由第1节可知,3种类型紧凑型 GIL 使用的三相盆式绝缘子中,Ⅲ型绝缘子具有较好的电场与应力场分布。因此,本节针对Ⅲ型绝缘子,研究其关键结构参数对电场和应力场性能关键指标的影响,为其智能优化算法下的综合优化提供初始值。需要指出的是,盆式绝缘子的三结合点通常采用屏蔽罩和中心导体配合对其进行屏蔽。针对传统盆式绝缘子的结构(如Ⅰ型或Ⅱ型),屏蔽罩的配置主要畸变绝缘子凹面场强,而不会对凸面场强造成显著的不利影响。Ⅲ型绝缘子由于其结构在中心导体附近区域两侧凸起,屏蔽罩与绝缘子中心导体配合能够有效屏蔽中心导体附近的三结合点,但对绝缘子盆面的电场分布基本不会有影响,因此,为高效地优化盆面结构,减少计算节点数量,本文后续研究暂不考虑中心导体和屏蔽罩。

图6给出了Ⅲ型三相盆式绝缘子盆面的弧面区域范围 a 对电场与应力场分布的影响,图7给出了Ⅲ型三相盆式绝缘子盆面凸出程度 b 对电场与应力场分布的影响。参数 a 、 b 的示意分别在图6和图7中给出。

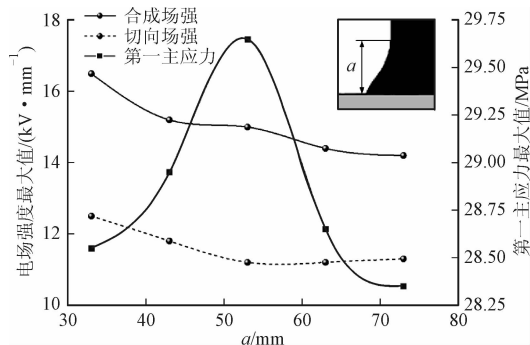


图6 盆面凸起范围 a 对电场与应力场分布的影响

从图6可以看出,随着参数 a 的增大,三相盆式绝缘子表面合成场强显著下降,当参数 a 由 33.0 mm 增大至 73.0 mm 时,合成场强下降了约 2 kV/mm;表面切向场强随参数 a 的增大也有一定程度的下降。绝缘子表面最大第一主应力与参数 a 呈现近似开口向下的二次函数关系,在 $a \approx 53.0$ mm 时有最大值。在对其结构参数进行设计时,应避免第一主应力最大值出现的区间。

从图7可知,合成场强和切向场强受到参数 b 的影响,但影响程度相对较小,随着参数 b 的增大,合成场强和切向场强均增大后减小。绝缘子表面最大第一主应力呈相反趋势,随着参数 b 的增大其最

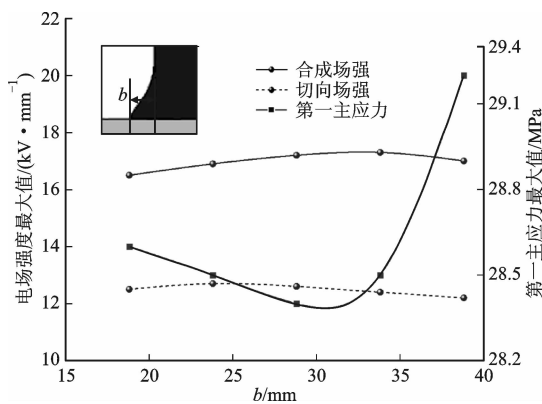


图7 盆面凸出程度 b 对电场与应力场分布的影响

大值先减小后增大,在 $b \approx 32.0$ mm 时存在最小值。

图8给出了绝缘子表面合成场强、切向场强及第一主应力最大值随绝缘子弧面起始位置倾角 θ 的变化规律。从图8可以看出,随着 θ 的增大,合成场强、切向场强及第一主应力最大值的变化不尽相同。绝缘子表面合成场强最大值先减小后增大再减小,而切向场强先减小后增大并保持,第一主应力最大值与切向场强具有相似的变化规律。

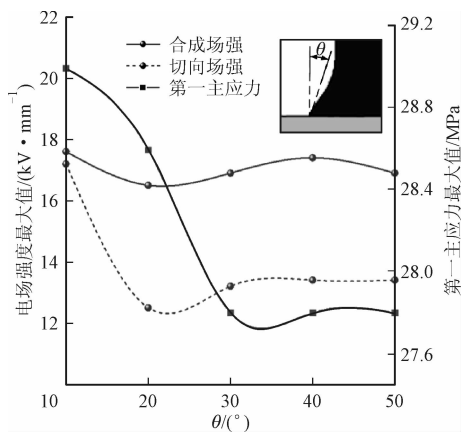


图8 弧面起始位置的倾角 θ 对电场与应力场分布的影响

实际上, a 、 b 、 θ 仅是描述绝缘子表面轮廓形状的众多参数中的3个,场强与应力随这3个参数变化的规律可作为优化三相盆式绝缘子的参考,但采用这3个参数描述绝缘子轮廓形状是远不够的。为对绝缘子表面轮廓进行精细化优化,需要更简洁、合适的方法对绝缘子表面轮廓进行充分表达。

3 复杂轮廓表达与综合性能优化

从Ⅲ型三相盆式绝缘子的电场分布与结构特点可以看出,绝缘子表面电场强度的最大值主要集中在中心导体至绝缘子表面的凸起区域。该区域轮廓复杂,由不同尺寸参数的圆弧段拼接而成,且圆弧段

之间还需要相切。不同位置弧长、曲率选取不同的值,可组成的轮廓形状诸多。此时,若直接使用算法对该区域各圆弧段的几何参数进行优化,不仅会造成数量庞大的待优化变量,还会带来大量的约束条件,使结果难以收敛。同时,改变一个或几个圆弧段的参数,有可能使圆弧段之间的约束关系得不到满足,使优化无法进行。这种情况下,采用智能优化算法开展三相盆式绝缘子的优化有很大困难。

为此,本节提出中心导体至绝缘子板面的凸起区域复杂轮廓表达方法,结合三相盆式绝缘子结构参数与现代智能优化算法,对盆面形状进行改进与优化。

3.1 Bernstein 方程及其约束条件

在二维尺度下,盆面的形状轮廓可以看作是 xoy 坐标系内的一个函数。根据 Weierstrass 定理可知,在函数 $f(x)$ 的可行域内,可以存在一个代数多项式 $p(x)$,对于任意的有理数 ϵ ,使得 $\|f(x) - p(x)\|_{\infty} < \epsilon$ 成立。Bernstein 方程给出了这一函数构造^[18-19]

$$B_n(t) = \sum_{k=0}^n \beta_k C_n^k t^n (1-t)^k \quad (1)$$

式中: β_k 为 Bernstein 系数; C_n^k 为二项式系数; t 为方程中的变量,区间为 $[0,1]$ 。

Bernstein 方程给出了一个具体的函数,解决了在特定区间,用简单函数对已知复杂函数的逼近问题。从另一方面来说,对于一个指定的连续函数,可以通过 Bernstein 方程对其进行近似描述。根据计算机图形学的思路,Bernstein 方程为复杂曲线的构造与优化带来一个思路,即应用函数对复杂曲线进行描述,将函数的各项系数作为决策变量,通过优化函数的系数,以此改进曲线形状,从而实现目标的优化。图 9 给出了Ⅲ型三相盆式绝缘子结构与轮廓曲线,图中虚线①和虚线②表示盆面的形状。从前文可知,绝缘子表面电场强度最大值出现在虚线①和虚线②所构造的轮廓表面,因此对盆面形状进行优化时,应重点关注该部位。

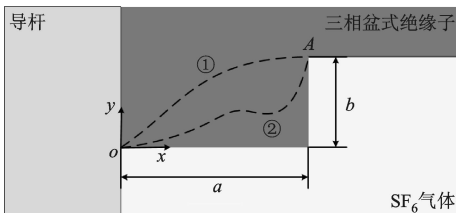


图 9 Ⅲ型三相盆式绝缘子结构与轮廓曲线

建立如图 9 所示 xoy 坐标系,根据Ⅲ型绝缘子

的结构,设 A 点为包覆区与板式区域的切点, a 、 b 表示待优化区域的长、宽,选取四阶 Bernstein 方程为构造函数。四阶 Bernstein 方程展开式为

$$B_4(t) = P_0(1-t)^4 + P_1t(1-t)^3 + P_2t^2(1-t)^2 + P_3t^3(1-t) + P_4t^4 \quad (2)$$

从式(2)可以看出, $B_4(t)$ 为一个四次多项式方程。为方便程序编写,完整地对应图 9 中所示轮廓进行表达,将式(2)改写为图中坐标系表示的形式并进行化简

$$B'_4(x) = b[C_4x'^4 + C_3x'^3 + C_2x'^2 + C_1x' + C_0] = C_4'x'^4 + C_3'x'^3 + C_2'x'^2 + C_1'x' + C_0' \quad (3)$$

式中: $x' = x/a$ 。

从图 9 可以看出,优化区域的轮廓线函数经过 $(0,0)$ 点,则 $B'_4(0) = 0$,可以求出

$$C'_0 = 0 \quad (4)$$

此时 $B'_4(x)$ 的待求解参数减少了一个,这也是原点选取在该位置的原因。

针对 A 点,存在两个约束,一方面轮廓曲线函数需要经过 A 点,另一方面,轮廓曲线函数要和函数 $y=b$ 在 A 点处相切。由此得到如下约束条件

$$\left. \begin{aligned} B'_4(a) &= b \\ \frac{dB'_4(x)}{dx} \Big|_{x=a} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

此外,为保证曲线平滑不造成电场畸变,避免出现如图 9 虚线②的怪异形状,需要限制优化区域轮廓线函数的趋势,保证轮廓曲线函数单调变化,则

$$\frac{dB'_4(x)}{dx} > 0, \quad x \in [0, a) \quad (6)$$

第 2 节已分析了局部结构参数对绝缘子性能的影响,获得了相同条件下 a 、 b 的取值对绝缘子表面电场和应力场最大值的影响。为进一步减小优化的决策变量,增强收敛性并加快计算速度,在第 2 节的基础上,选取使场分布较为均匀的 a 、 b 值作为本节优化的基础, $a=73.4 \text{ mm}$, $b=23.9 \text{ mm}$ 。

3.2 基于粒子群算法的三相盆式绝缘子优化

根据 3.1 小节分析,三相盆式绝缘子多目标优化问题可以通过式(7)描述,即

$$\left. \begin{aligned} \min F(C') \\ \text{s. t. } A_{\text{eq}} C' &= b_{\text{eq}} \\ AC' &> b \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $F(C')$ 为目标函数; C' 为待优化的变量,包含式(3)中的各项系数; $A_{\text{eq}} C' = b_{\text{eq}}$ 为变量的等式约束,由式(4)(5)决定; $AC' = b$ 为变量的不等式约束,由式(6)决定。

为构造 $F(C')$, 将各待优化目标予以归一化, 有

$$\left. \begin{aligned} f_1(C') &= E_1(C')/E_{1\max} \\ f_2(C') &= E_2(C')/E_{2\max} \\ f_3(C') &= \sigma(C')/\sigma_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $E_1(C')$ 、 $E_2(C')$ 、 $\sigma(C')$ 分别表示待优化的盆面合成场强、切向场强和第一主应力最大值; $E_{1\max}$ 、 $E_{2\max}$ 、 $\sigma_{\max}$ 表示优化前绝缘子的各指标。

由此, 通过判断矩阵确定 3 个归一化待优化目标的权重系数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 , 可构造优化目标函数

$$F(C') = \omega_1 f_1(C') + \omega_2 f_2(C') + \omega_3 f_3(C') \quad (9)$$

粒子群算法(PSO)在迭代过程中通过跟踪粒子个体最优值和全局最优值来更新粒子的速度和位置^[20], 求解优化问题时具有很强大的搜索能力, 尤其是在优化参数数量不多的情况下, 能够通过较快的迭代计算找到合适的解集。同时, 为避免粒子群算法的缺点, 保障求解精度, 本文应用增加收缩因子后的改进粒子群算法, 控制并约束粒子速度, 避免局部最优解的发生。

图 10 给出了基于粒子群算法的三相盆式绝缘子优化流程图, 优化算法利用 COMSOL 中 livelink for MATLAB 模块实现, 该模块搭建 MATLAB 命令流与 COMSOL 的连接接口, 可通过命令流的方式调用电场和应力场仿真来完成三相盆式绝缘子表面电场和应力场最大值的计算。

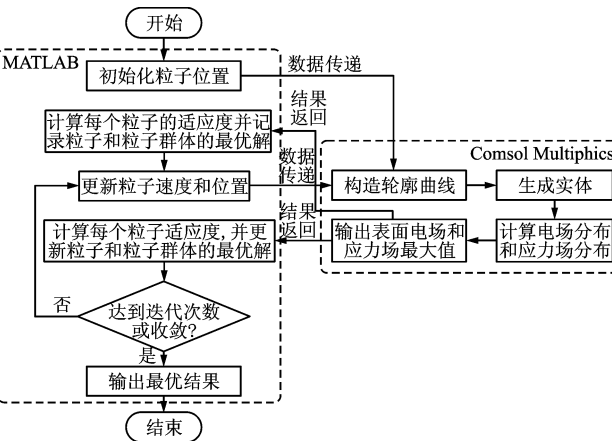


图 10 基于改进粒子群算法的三相盆式绝缘子优化流程图

粒子位置的初始化、位置的更新、适应度的计算均在 MATLAB 中完成。粒子的位置对应于三相盆式绝缘子优化时的决策变量, 即化简后 $B'_4(x)$ 的各项系数 C'_1 、 C'_2 、 C'_3 、 C'_4 (C'_0 已通过原点的选择消去); 粒子的适应度通过优化目标函数 $F(C')$ 计算。粒子速度用于改变粒子的位置, 即用来修正系数

C'_1 、 C'_2 、 C'_3 、 C'_4 的值。该算法生成粒子的位置后, 将参数传递给 COMSOL, COMSOL 应用这些参数信息, 通过构建参数化曲线, 表达三相盆式绝缘子的表面轮廓。经几何处理后生成三相盆式绝缘子实体, 从而计算电场与应力场分布, 并获得表面最大值, 返回给 MATLAB 用于计算粒子适应度。

3.3 优化结果

优化后, 式(3)中各项系数取值如表 2 所示, 结果保留 4 位有效数字。图 11 和表 3 分别给出了优化后三相盆式绝缘子电场、应力场分布云图及优化前后各关键指标值。

表 2 三相盆式绝缘子盆面结构参数优化结果

参数	数值
C'_4	7.502×10^{-7}
C'_3	-1.501×10^{-4}
C'_2	5.467×10^{-3}
C'_1	4.361×10^{-1}

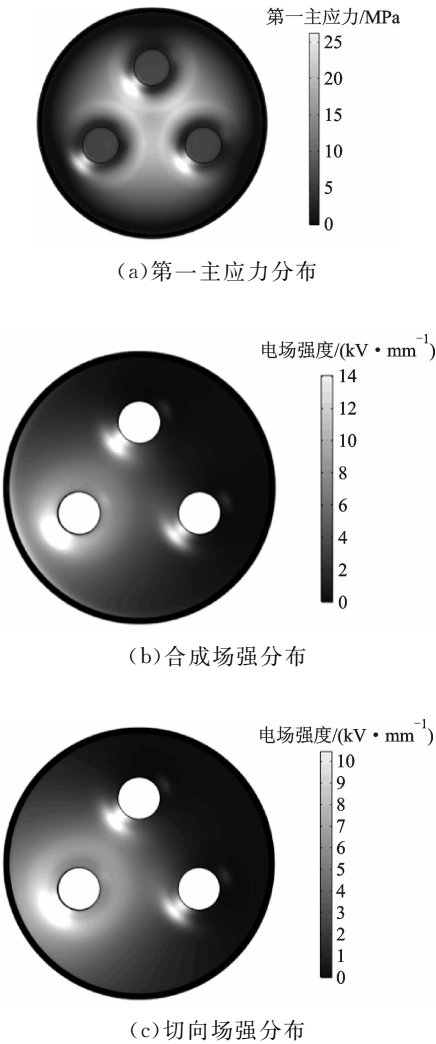


图 11 优化后三相盆式绝缘子电场和应力场分布

表 3 优化前后各关键指标对比

项目	$E_1/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	$E_2/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	$E_3/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	第一主应力最大值/MPa
控制值 (0.4 MPa)	24.0	12.0	3.0~4.0	50.0
I 型	18.1	18.1	2.7	87.6
II 型	18.2	17.8	3.6	35.2
III 型	16.3	12.5	2.6	28.1
III 型优化	14.1	10.5	2.6	26.3

从图 11 和表 3 中可以看出,优化后 252 kV 紧凑型 GIL 三相盆式绝缘子表面合成场强、切向场强和第一主应力最大值均有不同程度的下降,优化结果显著优于原模型。优化结构使绝缘子表面合成场强分布均匀化,其最大值仅为 14.1 kV/mm;绝缘子表面切向场强最大值已低于控制值,最大值降低至 10.5 kV/mm;绝缘子表面最大第一主应力降低至 26.3 MPa。优化后,绝缘子表面合成场强、切向场强和第一主应力最大值相对原始结构分别下降了 13.5%、16.0%、8.5%。同时,在运行工况下,中心导体界面场强最大值并未发生改变。

4 结 论

(1)通过有限元仿真计算获得了 3 种结构三相盆式绝缘子表面的电场和应力场分布,3 种结构绝缘子表面切向场强最大值均超过了 12.0 kV/mm 的控制值。经比较,盆面两侧对称凸起(III 型)的三相盆式绝缘子结构较优。

(2)选取盆面两侧对称凸起(III 型)绝缘子为优化对象,对其进行参数规律分析后发现,合成场强与切向场强最大值受盆面凸起范围、弧面起始位置倾角影响明显;各参数均能影响第一主应力最大值,但其影响程度相对较小。

(3)应用 Bernstein 方程对盆面轮廓进行表达,给出了相应的约束条件和简化方法,并开展了优化研究。优化后绝缘子表面切向场强最大值相对原始结构下降了 16.0%,降低至 10.5 kV/mm,低于控制值;合成场强及第一主应力最大值也分别下降了 13.5%和 8.5%。

参考文献:

[1] 李鹏,颜湘莲,王浩,等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-

3167.
LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
[2] 高克利,颜湘莲,王浩,等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展 [J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3105-3113.
GAO Keli, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL) [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3105-3113.
[3] 李鹏,李志兵,孙倩,等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计 [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3305-3312.
LI Peng, LI Zhibing, SUN Qian, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal enclosed transmission line [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3305-3312.
[4] KHAN D, RAFIQ M, RAFIQUE S F, et al. Comparison of transmission losses and voltage drops of GIL (Gas Insulated transmission line) and overhead transmission lines [C]//Power Electronics & Motion Control Conference & Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1151-1153.
[5] 黎斌,张烈,张微. 江河隧道/城市管廊 GIL 的可靠性与适用性设计 [J]. 高压电器, 2019, 55(6): 1-14.
LI Bin, ZHANG Lie, ZHANG Wei. Reliability and applicability design of GIL in river tunnel and urban pipe corridor [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 1-14.
[6] 费龙菲,龚晓燕,陈维. GIS/GCB 用三相盆式绝缘子水压强度的影响因素分析 [J]. 高压电器, 2014, 50(4): 125-130.
FEI Longfei, GONG Xiaoyan, CHEN Wei. Factors influencing the water pressure of insulating spacer in GIS/GCB [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 125-130.
[7] 吴泽华,田汇冬,靳守锋,等. 252 kV 紧凑型 GIL 三相支柱绝缘子绝缘结构设计与优化 [J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2030-2039.
WU Zehua, TIAN Huidong, JIN Shoufeng, et al. Design and optimization of insulation structure of three-phase tri-post insulator in 252 kV compact GIL [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2030-2039.
[8] 武胜斌,姜旭,辛昭昭,等. 基于 252 kV 三相盆式绝缘子水压试验的仿真分析及结构优化 [J]. 高压电器, 2018, 54(5): 133-137.

- WU Shengbin, JIANG Xu, XIN Zhaozhao, et al. Simulation analysis and structure optimization based on the hydrostatic test of 252 kV three-phase basin type insulator [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 133-137.
- [9] MASHIKIAN M S, WHITNEY B F, FREEMAN J J. Optimal design and laboratory testing of post-type spacers for three-phase, SF₆ insulated cables: part one Optimization philosophy, design and test results [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978, 91(3): 914-918.
- [10] 徐建源, 汪枫, 肖凤良. 三相共箱 GIS 盆式绝缘子三维电场的计算分析 [J]. 高电压技术, 2000(1): 11-13, 21.
- XU Jianyuan, WANG Feng, XIAO Fengliang. Three dimensional electric field calculation of the disk type insulator inside of three phase in on tank type of GIS [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 11-13, 21.
- [11] 李立涅, 饶宏, 董旭柱, 等. 计算高电压工程学的思考与发展 [J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3441-3453.
- LI Licheng, RAO Hong, DONG Xuzhu, et al. Prospect of computational high voltage engineering [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453.
- [12] 贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等. 基于有限元仿真和遗传算法的 1 100 kV 盆式绝缘子电气、机械性能综合优化 [J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3844-3853.
- JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Comprehensive optimization of electrical and mechanical performance of 1 100 kV basin-type insulator based on genetic algorithm and finite element simulation [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3844-3853.
- [13] 张施令, 彭宗仁, 杜进桥, 等. RBF 神经网络与 NSGA-II 混合算法用于 $\pm 1 100$ kV 穿墙套管 3 维电场模拟及内屏蔽结构优化 [J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1847-1857.
- ZHANG Shiling, PENG Zongren, DU Jinqiao, et al. Three-dimensional electric field simulation and inner shielding structure optimization of $\pm 1 100$ kV wall bushing with RBF neural network and NSGA-II algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1847-1857.
- [14] 黄玲, 文习山, 蓝磊, 等. 基于改进遗传算法的特高压绝缘子均压环优化 [J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 218-224.
- HUANG Ling, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Optimization of grading rings for UHV composite insulator by the improved GA [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 218-224.
- [15] 吴泽华, 田汇冬, 王浩然, 等. 特高压 GIL 哑铃型三支柱绝缘子优化设计方法 [J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2754-2761.
- WU Zehua, TIAN Huidong, WANG Haoran, et al. Optimization design method for UHVAC GIL dumb-bell type tri-post insulators [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2754-2761.
- [16] 黎斌. SF₆ 高压电器设计 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2019: 54-83.
- [17] 郭子豪, 王浩然, 李禾, 等. 特高压盆式绝缘子水压试验中应力应变分布的仿真计算与光纤测量 [J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 993-1002.
- GUO Zihao, WANG Haoran, LI He, et al. Calculation and experimental study on strain and stress distribution of UHV GIS spacer during hydrostatic test. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 993-1002.
- [18] 卫颜俊, 冯博琴, 伍卫国. 基于多项式一致逼近的多阈值图像分割算法 [J]. 通信学报, 2016, 37(10): 56-64.
- WEI Yanjun, PENG Boqin, WU Weigou. Multi-threshold algorithm about image segmentation based on polynomial uniform approximation [J]. Journal on Communications, 2016, 37(10): 56-64.
- [19] 肖炜茗, 王贵君. 基于 Bernstein 多项式的 SISO 三层前向神经网络的设计与逼近 [J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(9): 55-61.
- XIAO Weiming, WANG Guijun. Design and approximation of SISO three layers feedforward neural network based on Bernstein polynomials [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2018, 53(9): 55-61.
- [20] 王珊, 刘明, 严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热负荷分配优化 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 159-166.
- WANG Shan, LIU Ming, YAN Junjie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 159-166.

(编辑 亢列梅)