

1 100 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用 三支柱绝缘子电气性能优化

贾云飞¹, 高璐¹, 汲胜昌¹, 李心一², 李志兵³, 刘焱³

(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. 西安西电开关
电气有限公司, 710077, 西安; 3. 中国电力科学研究院, 100192, 北京)

摘要: 为优化交流 1 100 kV 气体绝缘输电线路中三支柱绝缘子的电气性能,提出了一种基于遗传算法的结构参数优化方法。建立三支柱绝缘子电场和应力场仿真模型,对绝缘子电气性能和机械性能进行校验,发现最大表面场强位于支柱和中心圆柱的连接处,为 $12.13 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,大于 $12 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的许用值,可能引发闪络,有必要进行电气性能优化。建立三支柱绝缘子参数化模型,仿真研究各结构参数对三支柱绝缘子电气性能的影响,发现各结构参数的增大对绝缘子电气性能有不同程度的优化,但也会造成绝缘子体积的增加。在满足机械性能需求和绝缘子体积保持不变的条件下,以提高电气性能为目标,提出基于遗传算法的三支柱绝缘子结构参数优化方案,并且为减小计算量,提出该方案的简化方法。结果表明:在相同电压下,优化后的三支柱绝缘子的最大表面场强降低为 $11.36 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,绝缘裕度提高了 6.3%,优化效果较好。所提方法兼顾了机械性能和绝缘子体积,具有较高的实用性和计算效率。

关键词: 气体绝缘输电线路;三支柱绝缘子;电气性能优化;机械性能校核;遗传算法

中图分类号: TM216 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202007020 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0168-12



OSID 码

Electrical Performance Optimization for Tri-Post Insulator on 1 100 kV Gas-Insulated Metal-Enclosed Transmission Line

JIA Yunfei¹, GAO Lu¹, JI Shengchang¹, LI Xinyi², LI Zhibing³, LIU Yan³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Xi'an Xidian Switch Electric Co. Ltd., Xi'an 710077, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: For optimizing electrical performance of tri-post insulator on AC 1 100 kV GIL, structural parameter optimization with genetic algorithm is carried out. Electric field and stress field simulation models of tri-post insulator are established. Checking the electrical and mechanical performances of the insulator, it is found that the maximum surface electrical field intensity is $12.13 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ at the connection between the pillar and the central cylinder, which is higher than the allowable value of $12 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$. It is thus necessary to optimize the electrical performance. A parametric model of tri-post insulator is constructed and used to analyze the influence of structural parameters on electrical performance. It is found that the increase of each structure parameter can optimize the electrical performance, but this also leads to the increase of insulator volume. To improve the electrical performance, a genetic algorithm-based optimization

收稿日期: 2019-11-29。 作者简介: 贾云飞(1998—),男,硕士生;汲胜昌(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902500)。

网络出版时间: 2020-03-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200318.1111.002.html>

scheme for the structure parameters is proposed under the condition that the mechanical performance is satisfied and the insulator volume remains unchanged. A corresponding simplified method of the scheme is also introduced to reduce the computation task. The results show that after optimization, the maximum surface electrical field strength of the tri-post insulator is weakened to $11.36 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ under the same voltage, and the insulation margin is increased by 6.3%. The proposed scheme takes mechanical performance and insulator volume into account and has stronger practicability and higher computation efficiency.

Keywords: gas-insulated metal-enclosed transmission line; tri-post insulator; electrical performance optimization; mechanical performance check; genetic algorithm

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)采用 SF_6 或其他气体实现绝缘,是一种外壳与导体同轴布置的高电压、大电流、长距离电力传输设备,具有输送容量大、线路损耗小、运行成本低、安全性能高、占地面积小等显著优点,是高海拔、大落差等特殊环境中取代架空线或电缆的首选方案,目前国内外已有大量工程应用^[1-2]。

由于 GIL 相比于气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)具有标准单元长、气室长度大、结构简单等特点,除盆式绝缘子外,GIL 还会使用三支柱绝缘子对导体起支撑作用。目前,国内外对气体绝缘设备中绝缘子的研究主要集中在盆式绝缘子:文献[3-6]对盆式绝缘子的表面电荷积聚和消散特性进行了仿真和试验;文献[7-8]基于盆式绝缘子的电场分布开展了绝缘结构优化设计。有关三支柱绝缘子的研究相对较少:文献[9]通过磁-热-流体耦合仿真,获得了环保型交流 1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子的电场和热场分布;文献[10]对特高压 GIL 三支柱绝缘子关键压接工艺参数进行了研究,确定了最优的工艺参数;文献[11]认为采用分段固化工艺和硅烷处理金属嵌件的三支柱绝缘子破坏弯矩更大,组织均匀性和运行可靠性更佳。

目前,对于三支柱绝缘子的研究主要集中在制造工艺和多物理场仿真中,有关三支柱绝缘子的结构优化研究不多。文献[12]提出了一种三支柱绝缘子结构参数化方法,创新性地提出了哑铃式结构,使绝缘子金属嵌件处场强得到了较大幅度的优化,但在实际运行时,绝缘子表面场强同样需要优化,以便大幅度提高绝缘子闪络电压。同时,文献[12]使用枚举法对三支柱绝缘子结构参数进行了优化,虽然有效,但很有可能陷入局部最优解,计算速度较慢。文献[13]通过不同的筛选策略,发现沿面场强与闪络电压具有强相关性。文献[14]主要针对三支柱绝缘子金属嵌件的表面场强进行了优化,但缺少对绝

缘子沿面场强、绝缘子体积和机械性能的考虑。近些年来,一些学者将人工智能算法应用于绝缘子的优化中,在多决策变量优化问题中取得了较好的结果:文献[15]利用粒子群算法对高压复合绝缘子均压环进行了优化;文献[7]使用遗传算法对盆式绝缘子屏蔽罩的结构进行了优化;文献[16]利用遗传算法对盆式绝缘子进行了多目标优化。

本文对三支柱绝缘子结构尺寸进行参数化,探究各结构参数对绝缘子表面场强的影响,分析三支柱绝缘子的电场优化与体积控制的内在关系,进而研究三支柱绝缘子的结构参数优化方法,并利用遗传算法进行实现,给出简化的优化算法及优化结果,为 1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子的结构设计提供了参考。

1 三支柱绝缘子基本结构

三支柱绝缘子通常用于单相封闭式 GIL 中,使用 3 个环氧树脂支柱将中心导杆固定于管道中,其与外壳的连接方式可分为固定式与滑动式。与固定式连接相比,滑动式连接通过在绝缘子和外壳的连接处安装滚轮和滑轨来减小移动阻力,有效地补偿了运行过程中的热膨胀和机械应变。采用滑动式连接的三支柱绝缘子典型结构如图 1 所示,其主要组成部分有绝缘子、连接筒、中心导杆、外壳、嵌件、滚轮和微粒收集器。三支柱绝缘子在外壳和中心导杆之间起到了支撑作用。绝缘子的 3 个支柱均有金属

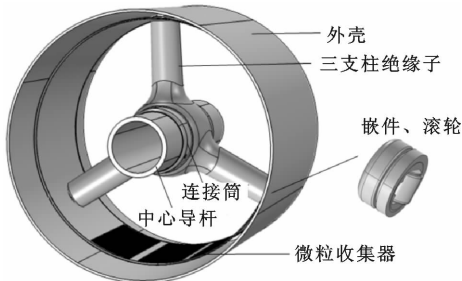


图 1 三支柱绝缘子典型结构

嵌件,与微粒收集器、外壳都有良好接触并可靠接地。微粒收集器底部有一系列长条形孔,在孔中构成低电场区,从而收集运动到此处的导电微粒,提高设备的运行稳定性。

为了提高计算效率,在不影响计算结果准确性的基础上对模型进行了简化。在进行有限元仿真时,认为嵌件、滚轮和微粒收集器之间均具有良好接触且稳定接地,将其视为等位体。同理,认为连接筒和中心导杆之间也具有良好接触,具有相同的高电位。由于微粒收集器的条形孔距离绝缘子较远,对绝缘子附近的电场影响较小,可认为微粒收集器表面是光滑的。此外,微粒收集器的轴向宽度比绝缘子的略大,且其内径和外壳十分接近,因此可将外壳和微粒收集器视为一个金属圆筒,其内径和微粒收集器的相同。最终建立的三支柱绝缘子简化模型如图2所示。

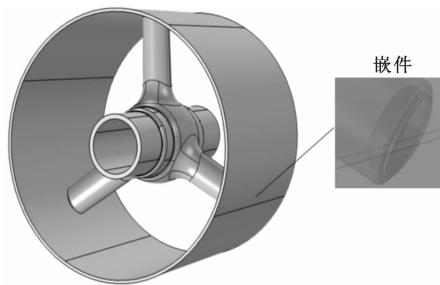


图2 三支柱绝缘子仿真模型

2 三支柱绝缘子电场许用值和应力场许用值

在三支柱绝缘子设计过程中,电场许用值和应力场许用值是优化所需的关键参数和优化目标。本节根据相关标准、设计经验和相关文献,给出设计时应注意的许用值,为之后的三支柱绝缘子优化和优化方案的提出提供参考和标准。

2.1 电场许用值

GIL的电场许用值和所采用的绝缘气体以及气压密切相关。对于替代 SF_6 的环保型气体 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$,其击穿特性和物化参数为目前研究的热点,但适用于环保型GIL的场强许用值尚不明确,且缺乏经验参考。在电场计算时,主要考虑绝缘气体的介电常数, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体的相对介电常数接近于1,与 SF_6 相差不大。因此,绝缘气体和气压的不同仅对场强许用值有影响,改变了优化结果是否满足要求的判断,但对电场仿真和结构优化设计并没有明显的影响。本文以表压0.4 MPa下 SF_6 绝缘的场强许用值作

为标准进行三支柱绝缘子的结构优化。

文献[17-18]指出,对于GIS,雷电冲击耐受电压与额定短时工频耐受电压峰值之比为1.53~1.60,而 SF_6 在雷电冲击下的冲击系数约为1.2~1.3,因此在设计时应以额定雷电冲击耐受电压为准。对于交流1100 kV三支柱绝缘子,其雷电冲击耐受电压为2400 kV。根据文献[19],GIL设备的导体直径通常为40~150 mm,表面粗糙度为6.3~12.5 μm ,此时在雷电冲击负极性电压下闪络概率为0.16%的场强的基础上,许用值通常留有0.85的裕度。当表压为0.4 MPa、采用 SF_6 绝缘时,间隙许用场强 E_0 为24 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

1100 kV三支柱绝缘子不同部位的场强许用值不同,具体如下^[19-20]。

(1)金属表面场强许用值 E_1 。雷电冲击下,场强不应超过间隙许用场强 E_0 (24 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

(2)三支柱绝缘子沿面场强许用值 E_2 。根据设计经验,在雷电冲击下,绝缘子沿面场强不应超过 $E_0/2$ (12 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

(3)三支柱绝缘子内部场强许用值 E_3 。为了减小在工作电压下绝缘子内部放电量,提高长期运行的可靠性,通常绝缘子内部场强有效值在工作电压下不应超过3~4 $\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2.2 应力场许用值

相比于盆式绝缘子,三支柱绝缘子不需要承担分割气室的作用,而且在正常运行的情况下,三支柱绝缘子处于均匀的气压之下,受力是均匀的。因此,对于三支柱绝缘子,仅需考虑在运输、安装和运行过程中所受到的导杆压力和自身重力作用。根据厂家提供的数据:在运输过程中,加速度不超过3g,每段GIL长约18 m,使用3个三支柱绝缘子进行固定,均采用滑动式连接;在工作状态下,GIL通常是水平放置,仅当遇到地势落差较大的地方,采用垂直安装,此时对于三支柱绝缘子,固定式连接和滑动式连接混合使用。

考虑最严酷的受力情况,在进行机械性能校核时主要考核运输状态下和垂直安装时的三支柱绝缘子受力情况。此时,有3个方面需要重点考核:①绝缘子内部应力不应超过环氧树脂的破坏应力 σ_1 ;②绝缘子和连接筒粘接处应力不应超过粘接强度 σ_2 ;③金属件(连接筒、中心导杆以及嵌件等)的应力不应超过拉伸强度 σ_3 。

本文取环氧树脂破坏应力 σ_1 、粘接强度 σ_2 和金属件拉伸强度 σ_3 分别为70、20、200 MPa ^[19]。

3 优化前绝缘子的电气和机械性能

本节对优化前三支柱绝缘子的电气和机械性能开展有限元仿真计算,对绝缘子电气及机械性能进行初步校核,寻找绝缘子场强或应力较高的部位,从而找到急需优化的部位,为优化后结果提供对照。

3.1 电场仿真

根据 2.1 节可知,应校核三支柱绝缘子在雷电冲击电压下的电气性能。由于雷电冲击电压波长远大于绝缘子尺寸,故可忽略时间效应。由于雷电冲击电压作用时间较短,且工作电压是交流的,故可忽略积聚电荷对电场的影响。利用 COMSOL 有限元仿真软件中的静电模块,对图 2 的简化模型进行有限元仿真。

仿真时认为各金属件之间具有良好接触,在中心导杆处施加 2 400 kV 电压,外壳处施加 0 电位,取环氧树脂、绝缘气体和金属件的相对介电常数分别为 4.65、1.002 和 1×10^7 ,得到三支柱绝缘子电位和场强分布的仿真结果,分别如图 3 和图 4 所示。

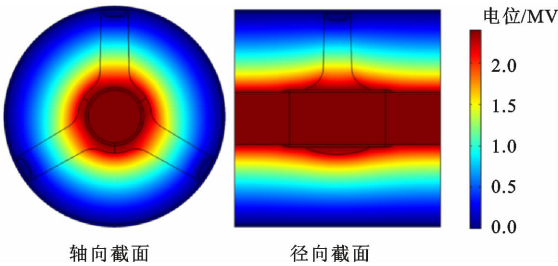
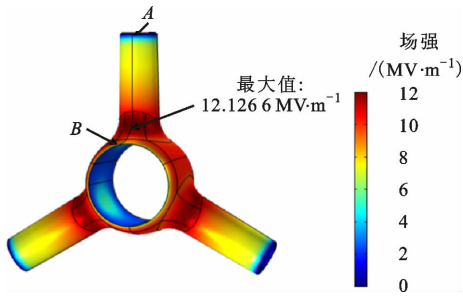


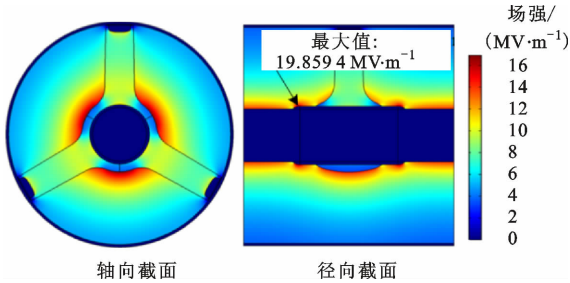
图 3 三支柱绝缘子电位分布

从图 3 可以看出,在雷电冲击电压 2 400 kV 的作用下,中心导体、连接筒、绝缘子中心圆柱以及各支柱嵌件处电位下降较快,结合图 4 可知,这些区域的场强也较高。

从图 4a 可以看出,三支柱绝缘子最大表面场强位于各支柱和中心圆柱的连接圆角处,场强最大值约为 $12.13\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,略高于场强许用值 E_2 ($12\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$),这是在之后优化过程中需要重点关注的部位。从图 4b 可以看出,连接筒表面具有较大的场强,最大表面场强位于连接筒圆角处,场强最大值约为 $19.86\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,小于金属表面许用值 E_1 ($24\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$)。此外,从图 4b 还可以明显看出,除了绝缘子中心圆柱的表面,各支柱嵌件处场强也较高。虽然嵌件表面位于绝缘子内部,但在长时间工作过程中,若此处场强持续较高,极易引起绝缘子内部缺陷的进一步发展,引发放电量的增加。为此,在中心导杆上施加额定有效值为 635.085 kV 的工频相电



(a) 表面场强



(b) 周围场强

图 4 三支柱绝缘子场强分布

压,校验运行过程中绝缘子嵌件处的场强有效值,此值不应超过许用值 E_3 ($3\sim 4\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$)。额定运行电压下,对支柱嵌件处的场强分布进行仿真,结果如图 5 所示,可以看出,嵌件处场强最大值位于嵌件的圆角处,约为 $3.28\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,在许用值 E_3 之内。

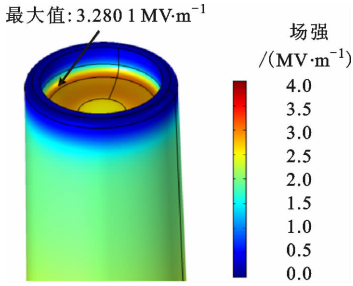


图 5 额定运行电压下支柱嵌件处的场强分布

在交流 GIL 中,还需要重点关注绝缘子表面场强的切向分量^[21]。对图 4a 中的路径 AB 进行分析,该路径上的表面场强、切向场强和法向场强与距中心轴距离的关系如图 6 所示。可以看出,除距离中心较近的位置具有一定的法向场强,支柱表面场强主要由切向场强构成,但各支柱圆角处(距离中心轴 150~200 mm)的切向场强比支柱表面处(距离中心轴 200~400 mm)的要大许多,切向场强分布不均匀。

以表压 0.4 MPa 下 SF₆ 气体绝缘 GIL 中绝缘子场强许用值为标准,将仿真的场强最大值与场强许用值进行对比,结果如表 1 所示。

从表 1 可看出,三支柱绝缘子连接筒表面和各支

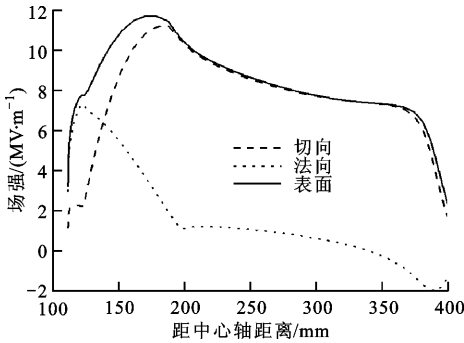


图 6 支柱表面场强

表 1 三支柱绝缘子关键部位场强最大值与许用值对比

部位	场强最大值 /(MV·m ⁻¹)	场强许用值 /(MV·m ⁻¹)
连接筒表面	19.86	24
绝缘子表面	12.13	12
工作电压下的嵌件表面	3.28	3~4

柱嵌件处场强均满足许用值的要求,但绝缘子表面场强比许用值略高,应在之后的优化中重点考虑。

3.2 应力场仿真

在对三支柱绝缘子进行电气性能优化时,势必会改变绝缘子的形状,机械性能也将受到影响。因此,在进行电气性能优化时,需要对三支柱绝缘子进行机械性能校核。根据 2.2 节可知,应重点校核运输状态下和垂直安装时的三支柱绝缘子受力情况。

使用 COMSOL 有限元仿真软件中的固体力学模块对应力场进行仿真,并认为绝缘子、嵌件和金属件之间粘接良好。

设嵌件、中心导杆和连接筒的材料是铝,弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.33,绝缘子的材料是环氧树脂,弹性模量为 7 GPa,泊松比为 0.24。

在运输状态下,GIL 管道分段且水平放置,运输过程中加速度不超过 3g。在对单个绝缘子进行受力仿真时,可取中心导杆长 6 m,在垂直方向上施加 6g 加速度。在重力方向侧的两个嵌件上施加固定约束,仿真结果如图 7a 所示(图中隐藏了部分中心导杆)。

当绝缘子垂直安装时,三支柱绝缘子的连接采用固定式和滑动式混合的方式,其中采用固定式连接的绝缘子受力更为严峻,对其进行仿真校核时可按照出厂试验加压的方式进行校核:取 3 个支柱嵌件处固定,对中心导体轴向施加 30 kN 的压力,仿真结果如图 7b 所示(图中隐藏了部分导杆)。

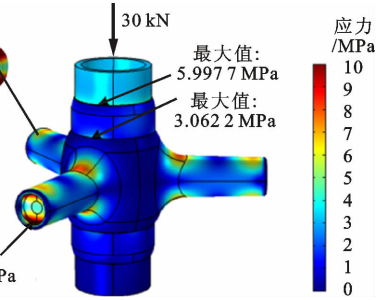
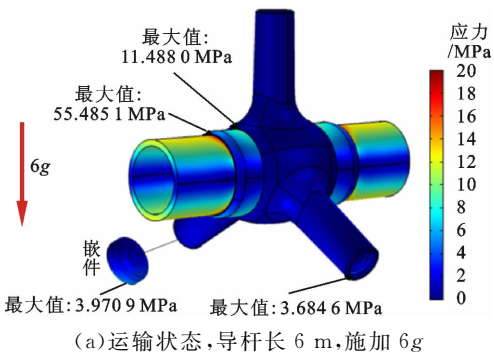


图 7 三支柱绝缘子应力分布

从图 7a 可以看出:在运输状态下,连接筒首先对中心导杆起到支撑作用,连接筒应力最大值位于边缘处,约为 55.48 MPa,小于许用值 σ_3 (200 MPa);之后绝缘子对连接筒起支撑作用,绝缘子和连接筒粘接处应力约为 11.49 MPa,小于许用值 σ_2 (20 MPa),该应力位于绝缘子的边缘处,同时绝缘子内部应力最大值处也是此处。由此可知,若没有连接筒,仅绝缘子直接对中心导杆起支撑作用,绝缘子边缘应力将大幅增加。连接筒对运输状态下的绝缘子应力起到了大幅改善的作用,将原本绝缘子边缘处较大应力引至自身体边缘。若在校验时发现连接筒边缘应力较大,可适当增长连接筒长度或增加连接筒厚度。从图 7b 可以看出,进行轴向加压时,绝缘子和嵌件的粘接处应力较大,需重点关注。

将两种状态下的应力仿真值与许用值进行对比,结果如表 2 所示。可以看出,绝缘子各处应力仿真值均小于许用值,且有较大裕度。

表 2 三支柱绝缘子关键部位应力仿真值与许用值对比

部位	应力仿真值/MPa		应力许用值/MPa
	运输状态	垂直安装	
绝缘子	11.49	15.41	70
嵌件和绝缘子粘接处	3.68	15.41	20
连接筒和绝缘子粘接处	11.49	3.06	20
连接筒和嵌件的金属件	55.48	61.31	200

4 局部结构参数改变对绝缘子表面场强的影响

本节对三支柱绝缘子进行参数化,并探究局部参数的变化对绝缘子表面场强的影响规律,为之后的优化方案提供参考。

4.1 结构参数化

对图 2 所示的绝缘子结构参数化,参数化示意如图 8 所示。

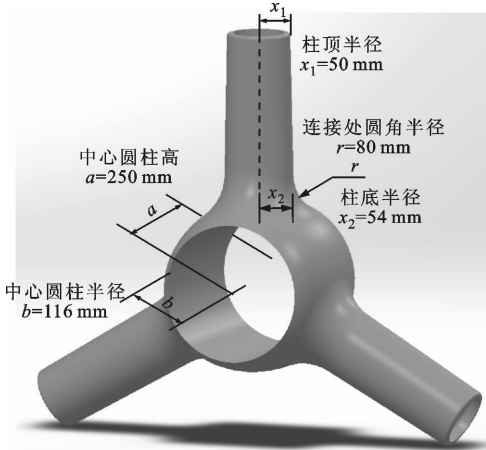


图 8 三支柱绝缘子参数化示意

三支柱绝缘子由 3 个支柱和中心圆柱连接而成。在图 8 中,共使用了 5 个参数表征三支柱绝缘子的特征: x_1 、 x_2 是各支柱结构参数,分别是支柱的柱顶半径和柱底半径,且支柱嵌件的半径由 x_1 决定,其值为 $x_1 - 10$; a 、 b 是绝缘子中心圆柱的结构参数,分别是中心圆柱的高和半径; r 是连接方式的结构参数,是 3 个支柱与中心圆柱连接处的圆角半径。

4.2 连接处圆角半径的影响

当连接处圆角半径 r 由 70 mm 增至 250 mm 时,对连接处圆角半径 r 对最大表面场强的影响进行仿真,结果如图 9 所示。

图 9 的仿真使用了三维模型,如果网格剖分较

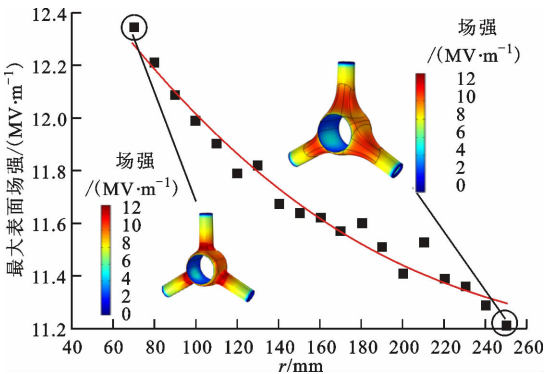


图 9 连接处圆角半径 r 对最大表面场强的影响

细,则仿真所需时间较长。因此,本文的剖分略粗,这导致仿真结果存在一定误差。为方便看出结构参数对绝缘子最大表面场强的影响,对仿真结果进行了二次多项式拟合。

从图 9 可以看出,当连接处圆角半径 r 由 70 mm 增大至 250 mm 时,此处表面变得更平缓,而绝缘子最大表面场强也位于此处,因此最大表面场强逐渐由 $12.34 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 变为 $11.21 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,降低约 9.2%,效果明显。

4.3 支柱半径的影响

当支柱的柱顶半径 x_1 和柱底半径 x_2 均增大时,三支柱绝缘子各支柱均变粗,使得连接处的表面更为平缓。

在本小节中,将柱顶半径 x_1 和柱底半径 x_2 同时增大或减小相同的长度,观察绝缘子最大表面场强的变化趋势。当支柱半径 x (柱顶半径与柱底半径的平均值)由 46 mm 增加至 60 mm 时,对支柱半径 x 对最大表面场强的影响进行仿真,结果如图 10 所示。

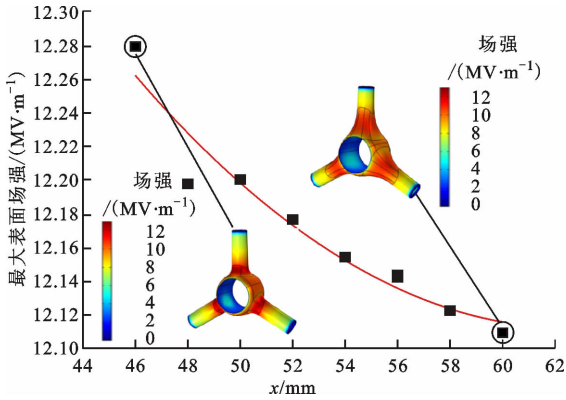


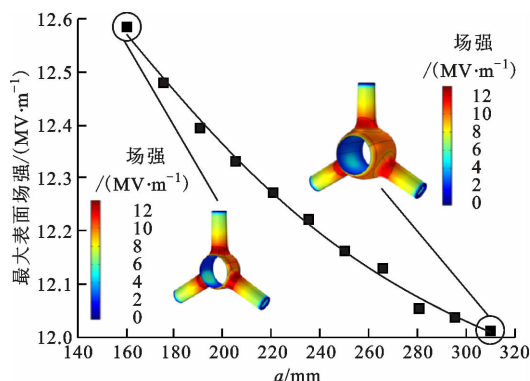
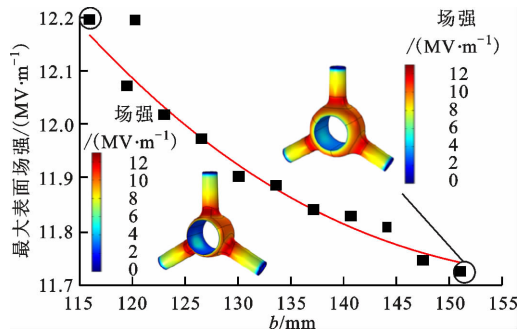
图 10 支柱半径 x 对最大表面场强的影响

从图 10 可以看出,当支柱半径由 46 mm 增加至 60 mm 时,3 个支柱明显增粗,三支柱连接处表面略有平缓,绝缘子表面最大场强由 $12.28 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 变为 $12.11 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,降低约 1.4%,没有很明显的降低,即支柱半径对绝缘子最大表面场强影响不大。

4.4 中心圆柱的影响

中心圆柱的形状主要由中心圆柱高 a 和中心圆柱半径 b 所决定,分别对这两个参数单独改变时对最大表面场强的影响进行仿真,结果如图 11 和图 12 所示。

从图 11 可以看出,当中心圆柱高 a 由 160 mm 增至 310 mm 时,绝缘子中间部位明显增厚,连接处更为平缓,绝缘子最大表面场强由 $12.59 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$

图 11 中心圆柱高 a 对最大表面场强的影响图 12 中心圆柱半径 b 对最大表面场强的影响

变为 $12.01 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 降低约 4.6%。

从图 12 可以看出, 当中心圆柱半径 b 由 116 mm 增至 151 mm 时, 绝缘子中心部位明显变粗, 连接处更加平缓, 绝缘子表面最大场强由 $12.19 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 变为 $11.73 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 降低约 3.8%。

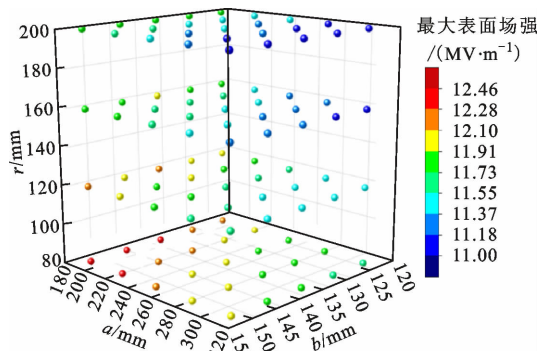
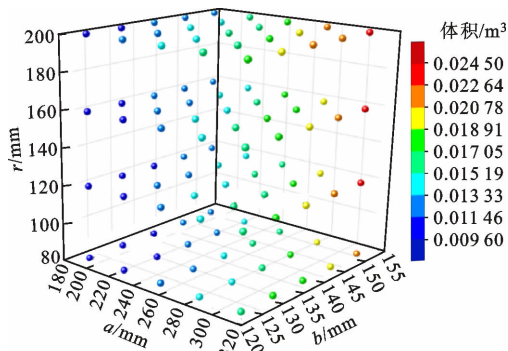
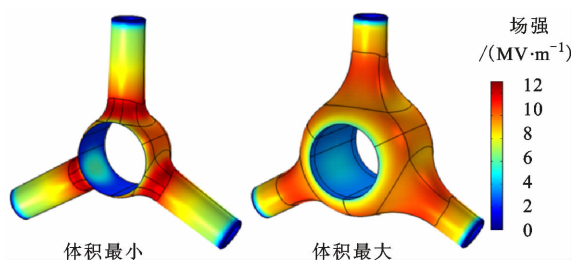
4.5 连接处圆角半径和中心圆柱的影响

根据 4.2~4.4 小节的仿真可知, 当图 8 中所示的 5 个结构参数均单独增大时, 三支柱绝缘子各支柱和中心圆柱的连接处都变得更为平缓, 绝缘子最大表面场强均有不同程度的降低。其中, 连接处圆角半径 r 的作用最为明显。因此, 为降低绝缘子表面的电场强度, 显然需要增加各结构参数的尺寸, 但这就会带来绝缘子体积大幅增加的问题。在 5 个结构参数中, 连接处圆角半径 r 、中心圆柱高 a 和中心圆柱半径 b 对于绝缘子形状的影响最为明显, 基本上决定了支柱连接处的形状。因此, 本小节主要探究这 3 个结构参数的改变对绝缘子体积以及最大表面场强的影响。

当结构参数 a 、 b 和 r 在一定范围内以一定步长改变时, 使用枚举法对最大表面场强和绝缘子体积进行仿真计算, 结果如图 13 所示。

在图 13a 和 13b 中: 最左下方数据点对应的场强分布如图 13c 的左图所示, 此点既是枚举范围内

最大表面场强最大的点, 对应的最大表面场强为 $12.39 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 又是体积最小的点, 对应的体积为 0.0096 m^3 ; 最右上方数据点对应的场强分布如图 13c 的右图所示, 此点既是枚举范围内最大表面场强最小的点, 对应的最大表面场强为 $11.00 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 又是体积最大的点, 对应的体积为 0.0245 m^3 。

(a) 结构参数 r 、 a 、 b 对最大表面场强的影响(b) 结构参数 r 、 a 、 b 对体积的影响

(c) 体积最小和最大时的表面场强分布

图 13 结构参数 r 、 a 、 b 对表面场强和体积的影响

在图 13 所设的范围内, 当体积由 0.0096 m^3 增加至 0.0245 m^3 时 (增加约 155.2%), 绝缘子最大表面场强由 $12.39 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 变为 $11.00 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 降低约 11.2%。因此, 对于三支柱绝缘子, 当最大表面场强降低时, 势必带来体积增大的问题。体积的增大不仅会带来环氧树脂使用量的增加, 提高了成本, 也会使得绝缘子的浇注和固化更为困难, 对工艺有了更高的要求。所以, 在之后优化中必须

设定体积上限,并探究体积增加至何处可使最大表面场强得到最大程度降低。

从图 13a 可以看出,当中心圆柱高 a 和中心圆柱半径 b 固定,仅连接处圆角半径 r 增大时,最大表面场强有明显的降低。根据图 13b 所示,此时体积的变化不明显。所以,在体积确定的情况下,增大连接处圆角半径 r 是降低表面场强最为有效的方式。

5 三支柱绝缘子电气性能优化方法

本节依据第 4 节探究的局部结构参数对绝缘子表面场强的影响规律,提出三支柱绝缘子结构参数的优化方法,并根据所得的计算结果,对优化方法进行改进和完善,最终给出并分析优化结果。

5.1 基于遗传算法的三支柱绝缘子优化方法

根据 3.2 小节的分析可知:三支柱绝缘子的连接筒对绝缘子起到应力转移的作用,极大地降低了运输过程中绝缘子可能受到的应力;在连接筒的圆角处存在场强集中的区域,由于此处距离三支柱绝缘子表面较远,连接筒结构参数的改变对绝缘子周围场强分布影响较小。因此,可根据应力场和电场仿真结果,对连接筒进行优化,如增加连接筒边缘圆角半径、连接筒长度和连接筒厚度,使三支柱绝缘子连接筒在雷电冲击下的场强不超过金属表面场强许用值 E_1 ($24 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

由于三支柱绝缘子的结构参数优化以降低表面场强为目标,势必带来绝缘子体积的增加。因此,应首先设定绝缘子最大体积,然后对绝缘子进行参数化,寻找在最大体积内使最大表面场强达到最低的结构参数组合。

在绝缘子结构优化常用的几种人工智能算法中,遗传算法具有潜在的并行性和随机性,在收敛速度上虽可能不如梯度下降法,但具有得到全局最优解和并行计算的功能,因此本文使用遗传算法对结构参数进行优化,具体步骤如下。

(1)确定决策变量和优化目标。种群的个体由各决策变量构成,决策变量为三支柱绝缘子结构参数。优化目标是降低三支柱绝缘子最大表面场强,约束条件是绝缘子体积不超过所设定的最大值。

(2)确定参数范围。根据实际模型选取合适的参数范围,防止产生不合理的结构,导致无法对电场进行仿真。

(3)产生初始种群。根据优化前的结构参数设定合适的初值,在初值附近产生随机个体,形成一个具有合适个体数量的种群,从而加速收敛过程。

(4)计算个体适应度。对种群中每个个体进行电场仿真,根据仿真结果,取绝缘子最大表面场强作为个体适应度,抛弃体积超过所设上限的个体,从而使个体适应度可以反映电场优化情况。

(5)产生新种群。采用 3 种方法产生新的种群个体:按照原种群个体适应度排序,保留具有较好适应度的个体;随机选取原种群的两个个体,采用异或编码进行交叉繁殖;随机选取原种群的一个个体进行变异。然后,产生两个随机数构成比例因子,使 3 种方法生成的新种群个体数量达到一定比例,并且保证种群个体总数不变。

(6)设定结束条件。结束条件设定为达到最大迭代次数或多次迭代后的最优个体基本不变(收敛),否则返回继续执行第 4 步和第 5 步。

本文使用的遗传算法优化流程如图 14 所示。

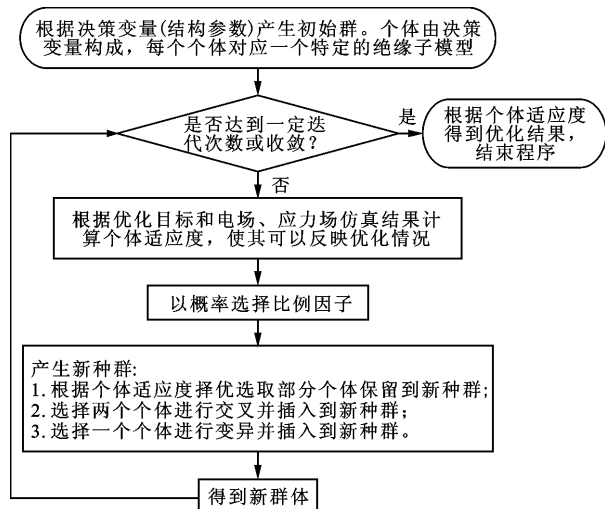


图 14 遗传算法优化流程

在利用遗传算法获得优化的绝缘子结构参数后,再对支柱嵌件处的结构进行优化,使在额定工频电压下,嵌件处的最大场强有效值小于许用值 E_3 ($3 \sim 4 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

综上,三支柱绝缘子优化方法分为 3 步。

(1)连接筒优化。使绝缘子各处应力不超过各材料的许用值,且在雷电冲击下,连接筒圆角处的场强不超过许用值 E_1 ($24 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

(2)使用遗传算法优化结构参数。事先设定绝缘子最大体积,在不超过最大体积的情况下,采用遗传算法寻找使得绝缘子表面场强达到最小的参数组合,绝缘子最大表面场强不应超过许用值 E_2 ($12 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

(3)嵌件优化。在工频电压下,使嵌件最大场强有效值不超过许用值 E_3 ($3 \sim 4 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$)。

从图 4 和图 7 可以看出,原始尺寸下三支柱绝缘子连接筒圆角处的场强仅为 $19.86\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,远小于许用值 $E_1(24\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1})$,同时绝缘子各处应力均在许用范围内,因此对连接筒不再优化。本文利用遗传算法直接进行第 2 步的优化,事先设定的绝缘子最大体积为 0.012 m^3 ,即保持绝缘子体积不变,优化前后的结构参数和场强仿真结果如表 3 和图 15 所示。

阶段	绝缘子表	连接筒表	工频下嵌	体积 / m^3
	面场强/ ($\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$)	面场强/ ($\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$)	件场强/ ($\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$)	
优化前	12.13	19.86	3.28	0.012
优化后	11.21	19.16	3.73	0.012
许用值	12	24	3~4	

从表 3 和图 15 可以看出:优化后,连接处圆角半径 r 有了明显的增大,印证了 4.5 小节的结论——增大连接处圆角半径 r 是降低表面场强最有效的方式;最大表面场强由 $12.13\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$ 降为 $11.21\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,降低约 7.6%,效果非常明显,且连接筒表面场强和体积基本不变,但工频下嵌件场强有明显提高,这是由于优化后的柱顶半径 x_1 有所减小,导致嵌件处半径也减小,引起嵌件处的曲率增大,嵌件表面场强提高。

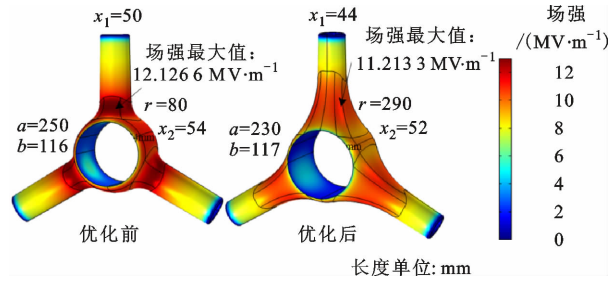


图 15 遗传算法优化前后场强分布对比

5.2 三支柱绝缘子优化方案的简化方法

在使用遗传算法进行优化时发现,由于连接处圆角半径 r 对于最大表面场强的降低具有明显作用且体积增加量较小,优化后的连接处圆角半径总接近预设范围内的最大值,此时由于连接处圆角半径较大,柱底半径 x_2 对于绝缘子的形状几乎没有影响。由于设定了体积上限,且优化目标为降低绝缘子最大表面场强,所以柱顶半径 x_1 总会有所减小,其“节约”所得的体积会堆积在连接处,使中心圆柱高 a 、中心圆柱半径 b 和连接处圆角半径 r 增大。

但是,连接处圆角半径 r 并不能无限增大,这是因为:①连接处圆角半径对绝缘子形状的改变还会受到支柱的柱顶半径和中心圆柱形状的限制;②如果 r 过大,连接处会堆积较多的环氧树脂,使得绝缘子在浇注和固化过程中温度分布不均匀,造成绝缘子的缺陷。

因此,在图 8 所示的 5 个结构参数中,取适当较大的圆角半径 r ,此时柱底半径 x_2 的改变对绝缘子形状影响不大。柱顶半径 x_1 对工频下嵌件处场强影响较大,宜事先确定,此时只剩下中心圆柱高 a 和中心圆柱半径 b 需要确定。所以,5.1 小节提出的三支柱绝缘子结构参数优化方法可以简化为如下。

(1)连接筒优化。绝缘子各处应力应小于各材料的许用值,同时在雷电冲击下,连接筒的最大表面场强应小于许用值 $E_1(24\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1})$ 。

(2)嵌件处优化。事先确定柱顶半径 x_1 ,使在工频电压下,嵌件的最大场强有效值不超过许用值 $E_3(3\sim4\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1})$,且留有一定裕度。

(3)中心圆柱优化。设定绝缘子最大体积,令连接处圆角半径为一较大值,并固定柱底半径 x_2 不变,对中心圆柱高 a 和中心圆柱半径 b ,使用枚举法寻找使得绝缘子体积不超过设定值且最大表面场强最小的参数组合,最大表面场强应小于许用值 $E_2(12\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1})$ 。

5.3 基于简化方法的优化结果及分析

使用简化后的方法进行结构优化。给定绝缘子最大体积为 0.012 m^3 ,即绝缘子体积不变,令连接处圆角半径 r 为 380 mm ,柱顶半径 x_1 为 52 mm ,对中心圆柱高 a 和半径 b 使用枚举法,对最大表面场强进行仿真,结果如图 16 所示。

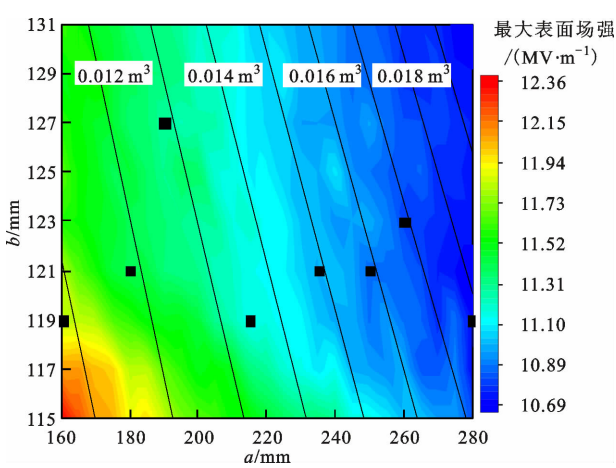


图 16 中心圆柱结构参数枚举法仿真结果

图 16 中的线是绝缘子的体积等高线,黑点是体

积等高线上最大表面场强最小的点。若使体积保持 0.012 m^3 不变,可得到优化前后的电场和应力场仿真结果,如图 17、图 18、表 4、表 5 所示。

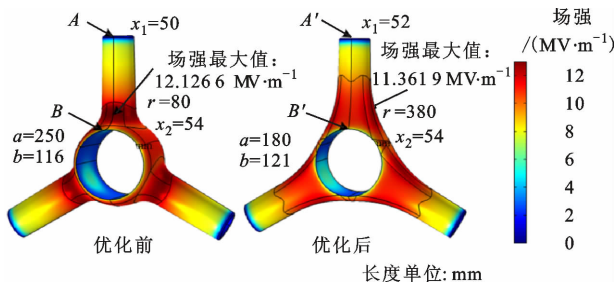


图 17 简化方法优化前后电场分布对比

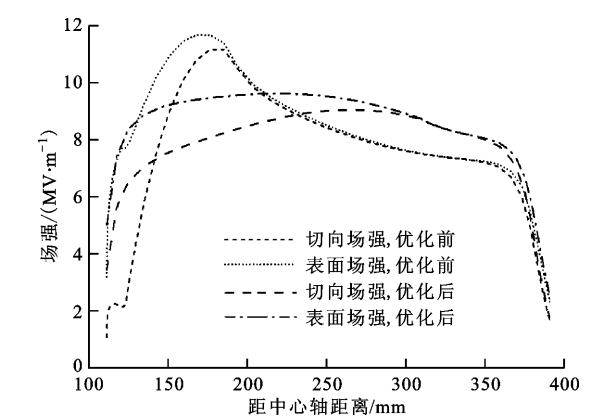


图 18 简化方法优化前后支柱表面场强

表 4 简化方法优化前后关键部位场强对比				
阶段	绝缘子表面场强/ (MV · m ⁻¹)	连接筒表面场强/ (MV · m ⁻¹)	工频下嵌件场强/ (MV · m ⁻¹)	体积 /m ³
优化前	12.13	19.86	3.28	0.012
优化后	11.36	21.62	3.37	0.012
许用值	12	24	3~4	

表 5 简化方法优化前后关键部位应力对比				
状态	部位	应力/MPa		
		优化前	优化后	许用值
运输状态	绝缘子	11.49	12.29	70
	嵌件和绝缘子粘接处	3.68	3.47	20
	连接筒和绝缘子粘接处	11.49	12.29	20
	连接筒和嵌件的金属件	55.49	57.64	200
垂直安装	绝缘子	15.41	14.44	70
	嵌件和绝缘子粘接处	15.41	14.44	20
	连接筒和绝缘子粘接处	3.06	8.22	20
	连接筒和嵌件的金属件	61.31	69.31	200

从图 17 和表 4 可以看出:绝缘子优化后,体积

保持 0.012 m^3 不变;最大表面场强由 $12.13\text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 降低至 $11.36\text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,绝缘裕度提高约 6.3%;连接筒表面和嵌件处场强均在场强许用值之内,且有较大裕度。图 18 给出了优化前后相同路径(图 17 中路径 AB 和 A'B')的表面场强变化,可以看出:优化后的表面场强和切向场强均有很大程度的降低,且分布更为均匀。从表 5 可以看出,优化前后绝缘子在运输状态和垂直安装时各关键部位的最大应力均变化不大,仍有较大裕度。

6 结 论

本文首先给出了三支柱绝缘子设计时应注意的电场和应力场许用值,然后对三支柱绝缘子进行参数化,并探究各参数对三支柱绝缘子最大表面场强的影响,之后基于遗传算法给出了三支柱绝缘子的优化方案和该优化方案的简化方法。本文得到的主要结论如下。

(1)各结构参数的增大对三支柱绝缘子的电气性能均有不同程度的优化,但也会造成绝缘子体积的增加。

(2)增大三支柱绝缘子各支柱与中心圆柱连接处的圆角半径对绝缘子最大表面场强有较大的优化作用,同时体积增量相对较少。

(3)利用本文提出的参数化方法和简化优化方法对 1 100 kV 交流三支柱绝缘子进行电气性能优化,结果表明:绝缘子的绝缘裕度提高了 6.3%,且体积不变;在金属表面和绝缘子内部场强小于许用值且满足机械性能需求的情况下,绝缘子表面场强得到了明显的优化,提高了理论上的闪络电压。

参考文献:

[1] 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.
[2] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 187-188.
[3] 王涵,薛建议,陈俊鸿,等. SF₆/N₂ 混合气体中金属微粒对 GIL 盆式绝缘子表面电荷积聚特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4663-4671.
WANG Han, XUE Jianyi, CHEN Junhong, et al. Influence of metal particles on surface charge accumula-

- tion characteristics of GIL spacer in SF_6/N_2 mixture [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4663-4671.
- [4] 唐炬, 潘成, 王邸博, 等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 10-21.
TANG Ju, PAN Cheng, WANG Dibo, et al. Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 10-21.
- [5] 周宏扬, 马国明, 刘姝嫔, 等. 基于电-热多物理场耦合模型的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1251-1260.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shupin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC-GIL with electro-thermal coupling model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251-1260.
- [6] MA G M, ZHOU H Y, LI C R, et al. Designing epoxy insulators in SF_6 -filled DC-GIL with simulations of ionic conduction and surface charging [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3312-3320.
- [7] 杜进桥, 张施令, 李乃一, 等. 特高压交流盆式绝缘子电场分布计算及屏蔽罩结构优化 [J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3037-3043.
DU Jinqiao, ZHANG Shiling, LI Naiyi, et al. Electric field distribution calculation and shielding electrode structure optimization of UHVAC basin-type insulator [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3037-3043.
- [8] 陈允, 崔博源, 王宁华, 等. 1 100 kV 气体绝缘开关设备用盆式绝缘子中心嵌件结构设计 [J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 564-570.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin-type insulator used for 1 100 kV GIS [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.
- [9] 高璐, 贾云飞, 汲胜昌, 等. 环保型 1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核 [J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 987-996.
GAO Lu, JIA Yunfei, JI Shengchang, et al. Multi-physical field analysis and verification of tri-post insulator on environment-friendly 1 100 kV GIL [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 987-996.
- [10] 李凯, 苗晓军, 徐仲勋, 等. 特高压 GIL 三支柱绝缘子压接工艺研究 [J]. 电工技术, 2018(15): 136-138.
LI Kai, MIAO Xiaojun, XU Zhongxun, et al. Research on crimping technology of UHV GIL three-pillar insulator [J]. Electric Engineering, 2018(15): 136-138.
- [11] 田浩, 林生军, 张鹏飞, 等. 不同工艺对特高压 GIL 三支柱绝缘子组织均匀性的影响 [J]. 绝缘材料, 2018, 51(12): 67-73, 78.
TIAN Hao, LIN Shengjun, ZHANG Pengfei, et al. Effect of different processes on structure uniformity of UHV GIL three post insulator [J]. Insulating Materials, 2018, 51(12): 67-73, 78.
- [12] 吴泽华, 王浩然, 田汇冬, 等. 特高压 GIL 三支柱绝缘子结构参数分析与优化 [J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3165-3173.
WU Zehua, WANG Haoran, TIAN Huidong, et al. Structural parameter analysis and optimization of tri-post insulator on UHVAC GIL [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3165-3173.
- [13] 刘琳, 李晓昂, 张锐, 等. 影响 GIS 支柱绝缘子沿面电压的沿面电场特征参数 [J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2740-2747.
LIU Lin, LI Xiao'ang, ZHANG Rui, et al. Characteristic parameters of electric field along the surface affecting the flashover voltage of GIS pillar insulators [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2740-2747.
- [14] 吴泽华, 王浩然, 田汇冬, 等. 特高压 GIL 哑铃型三支柱绝缘子优化设计方法 [J/OL]. 电网技术. [2019-10-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0935>.
WU Zehua, WANG Haoran, TIAN Huidong, et al. Optimization design method for 1 100 kV UHVAC GIL dumbbell type tri-post insulators [J/OL]. Power System Technology. [2019-10-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0935>.
- [15] M'HAMDI B, TEGUAR M, MEKHALDI A. Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1048-1057.
- [16] 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.

[17] 全国高压开关设备标准化委员会. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 20-21.

[18] 全国高压开关设备标准化委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 5-6.

[19] 黎斌. SF₆ 高压电器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 55-56.

[20] 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.

[21] 汤浩, 吴广宁, 范建斌, 等. 直流气体绝缘输电线路的绝缘设计 [J]. 电网技术, 2008, 32(6): 65-70.

TANG Hao, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Insulation design of gas insulated HVDC transmission line [J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 65-70.

(编辑 陶晴 亢列梅)

实行代表作制 鼓励发“三高”论文

2020 年 2 月 23 日,科技部正式印发《关于破除科技评价中“唯论文”不良导向的若干措施(试行)》通知。通知明确要求破除“唯论文”论不良导向,打造中国高质量科技期刊。论文评价实行代表作制度,提高高质量论文考核评价权重。

文件明确了新的评价考核标准,如基础研究类论文评价实行代表作制度,其中,发表国内科技期刊论文原则上不少于 1/3。文件首次提出鼓励发表“三类高质量论文”,高质量成果的考核评价权重最高可增加到 50%。

“三类高质量论文”具体包括:
具有国际影响力的国内科技期刊的论文;
业界公认国际顶级或重要科技期刊的论文;
在国内外顶级学术会议上进行报告的论文。

上述期刊、学术会议的具体范围由本单位学术委员会本着少而精的原则确定。其中,具有国际影响力的国内科技期刊参照中国科技期刊卓越行动计划入选期刊目录确定。对于发表“三类高质量论文”的研究成果,可按高质量成果进行考核评价。

文件还指出,加强论文发表费的支出管理。建立与破除“唯论文”导向相适应的资金管理措施,从严控制论文资助范围,从紧管理论文发表费支出。对于国家科技计划项目产生的代表作和“三类高质量论文”,发表费可在国家科技计划项目专项资金中按规定据实列支,其它论文发表费均不允许列支。

通知中明确,在文件试行 1 年后将开展实施效果评估,对有关措施进一步调整完善,对效果好的措施商有关部门在更大范围复制推广。

科技部通知链接:
http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2020/202002/t20200223_151781.htm