

基于遗传算法和神经网络的真空灭弧室电场优化方法研究

董华军¹, 李东恒¹, 李金金², 赵一鉴¹, 张传龙³

(1. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116028;
3. 大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司, 辽宁 大连 116000)

摘要:合理布置灭弧室内部结构以实现场强均匀分布是避免其产生绝缘击穿破坏的有效途径。针对于此,本文提出了一种基于神经网络和遗传算法的灭弧室结构参数优化方法;建立12 kV真空灭弧室电场模型,分析了主屏蔽罩不同参数下的电场分布。通过正交回归方法和BP神经网络构建主屏蔽罩结构参数与灭弧室最大场强、场强均匀度的映射模型;以最大场强、场强均匀度为评价指标,引入遗传算法对主屏蔽罩结构进行迭代优化,最后分析屏蔽罩材料对灭弧室绝缘性能的影响。结果表明,灭弧室场强数值随着屏蔽罩直径的增加而减小,随着屏蔽罩厚度的增加而增长,随着外卷裙边角度的增加而减小;选择不锈钢作为主屏蔽罩材料可使灭弧室兼具成本低廉以及绝缘性能优异等优势;相较于未优化的灭弧室初始结构,经本文方法优化后的灭弧室电场最大值降低了 2.07×10^6 V/m,屏蔽罩端部及触头间隙处电场综合均匀度提高了 1.4×10^4 V/m。本文所提优化设计方法可合理改进灭弧室结构参数,达到有效调控灭弧室电场分布的效果。

关键词:真空灭弧室;电场;正交实验;神经网络;结构优化

DOI:10.15938/j.emc.2025.09.014

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)09-0147-12

Research on electric field optimization of vacuum interrupter based on genetic algorithm and neural network

DONG Huajun¹, LI Dongheng¹, LI Jinjin², ZHAO Yijian¹, ZHANG Chuanlong³

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

3. Dalian Boiler and Pressure Vessel Inspection and Testing Institute Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: Reasonable arrangement of the structure of the interrupter is an effective way to avoid insulation damage. A structural optimization method based on neural network and genetic algorithm was proposed to optimize the insulation performance of vacuum interrupter. The electric field model of 12 kV vacuum interrupter was built. The electric field distribution of the main shield with different parameters was calculated. The orthogonal regression method and BP neural network were combined to construct the mapping model of the structural parameters of the main shield and the maximum field strength and field strength uniformity of the vacuum interrupter. The genetic algorithm was introduced to optimize the structure of the

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51477023); 辽宁省教育厅项目(LJKMZ20220835)

作者简介: 董华军(1978—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为真空开关电弧基础理论、图像处理及识别;

李东恒(1996—),男,博士研究生,研究方向为真空开关电弧基础理论;

李金金(1993—),男,博士,讲师,研究方向为液态金属限流器与智能电气;

赵一鉴(1996—),男,博士研究生,研究方向为真空开关电弧基础理论;

张传龙(1987—),男,博士研究生,高级工程师,研究方向为机电类特种设备新技术。

通信作者: 董华军

main shield. The influence of shielding material on the insulation performance of vacuum interrupter was analyzed. The results show that the electric field of the vacuum interrupter decreases with the increase of the diameter of the shield, and increases with the increase of the thickness of the shield, and decreases with the increase of the angle. Stainless steel as the main shield material can make the vacuum interrupter have the advantages of low cost and excellent insulation performance. The maximum electric field of vacuum interrupter is reduced by 2.07×10^6 V/m, and the uniformity of electric field at shield and contact is increased by 1.4×10^4 V/m after optimization. The optimization design method can reasonably improve the structural of vacuum interrupter and effectively control the electric field distribution of vacuum interrupter.

Keywords: vacuum interrupter; electric field; orthogonal experiment; neural network; structural optimization

0 引言

随着社会不断进步,我国对电力设备的需求与日俱增。真空断路器作为控制和保护设备,因其优异的绝缘和开断性能而广泛应用于中压配电系统中^[1-4],在其中扮演着关键角色,因此真空断路器的设计与开发工作越来越被广大从业人员所重视。随着《京都议定书》对 SF₆的限制和真空熄弧技术的发展,真空开关也在不断向着更高开断等级迈进,其中灭弧室的绝缘问题也成为了真空开关行业人员研究的重点^[5]。真空灭弧室绝缘水平对其工作性能有着重要影响,而影响灭弧室绝缘水平最重要的因素是其内部电场的分布情况^[6]。灭弧室电场分布是否均匀与其内部各个零件之间的布置情况及零件结构是否合理有着重要关系。因此主屏蔽罩作为灭弧室内部的重要部件,合理设计及优化其结构参数对提高灭弧室的绝缘水平有着重要现实意义。

电场解析在真空灭弧室结构设计与优化工作中扮演着至关重要的角色。通过电场精确计算,可以直观地揭示灭弧室内的电场分布特性,从而指导灭弧室结构优化工作。长期以来国内外学者围绕灭弧室电场解析工作开展了大量研究,由于真空灭弧室内部是密闭的真空腔体,其内部电场数值难以利用传统的传感器来直接测量,因此在相关文献中大多学者通过理论方法来解析灭弧室内部电场特性。目前电场解析的基本理论方法主要包括等效源法和场域分割法^[7],等效源法是指通过引入等效源来替代实际的电荷或电流分布,从而简化求解电场问题。等效源法具体包括积分方程法、边界积分法、边界元法、表面电荷法及模拟电荷法等。刘晓明等^[8]采用模拟电荷法针对真空灭弧室结构进行了无界场域电

场数值求解,结果表明模拟电荷法可有效求解含有多重介质复杂结构的电场问题。模拟电荷法在求解电场问题时具有简洁直观、计算速度快等优势,但其对模拟电荷的选取位置要求较高,若人为布置模拟电荷不合理,则电场计算的结果难以满足精度要求。边界积分法、边界元法以及表面电荷法的核心思路是通过电场边界上的电荷分布来求解区域内的电场分布,该类方法计算效率一般较高,但不适用于处理边界没有明确限定的电场问题。场域分割法可细分为有限差分法和有限元法。有限差分法虽简单直观,易于实现,但难以处理复杂边界条件或不规则区域的电场问题。近年来随着计算机技术的快速发展,有限元法在灭弧室电场计算方面开始得到了广泛应用。在电场计算中,有限元法通过将整体电场区域划分为有限数量的相互连接的单元,然后在每个单元内建立并求解电场满足的方程组,最后通过组合各子单元的解可近似得到整个区域电场分布特性。相较于以上方法,有限元法不仅能够处理复杂的几何形状和边界条件,且具有较高的计算精度。因此考虑到真空灭弧室内部边界复杂的特点,本文采用有限元方法解析其内部电场分布特性,在此基础上探究主屏蔽罩结构变化对灭弧室电场分布的影响规律。

真空灭弧室电场解析与结构优化布置之间存在相互作用关系。通过电场计算可以预测不同结构下灭弧室内的电场分布情况,进而评估其绝缘性能;反过来,灭弧室结构的优化工作也可以基于电场计算的结果进行,如此可使灭弧室具备更高效、更可靠的绝缘性能。目前的真空灭弧室结构优化方面的研究主要集中在多断口和单断口两方面。其中多断口与单断口灭弧室相比,由于其采用串联多个真空间隙

的形式,其击穿电压得到了显著提高,因而多断口灭弧室在高压开断领域具有更为广阔的应用前景^[9-11]。然而多断口串联灭弧室结构在实际工程应用中存在着断口电压分布不均、操动机构动作同步性差等问题。目前有学者采用并联均压电容的方式来改善多断口间电压分布特性^[12],但过大的均压电容将会对真空间隙释放更多能量,从而放大暂态电流,不利于电弧熄灭。为解决均压电容的负面问题,葛国伟等^[13-14]在此基础上开展了多断口自均压真空灭弧室研究工作,提出了两间隙异步联动的一体化高压真空灭弧室结构;该结构采用辅间隙与主间隙串联异步联动,辅间隙协助主间隙绝缘和灭弧,并通过改进内部屏蔽罩结构实现断口间电压的均匀分布。上述学者研究工作对提高多断口灭弧室绝缘特性有着重要参考意义,但是多断口灭弧室各断口间电压动态分布特性同样高度依赖操动机构的同步操作技术,若灭弧室各断口开断动作存在毫秒级的不同步,就会导致断口间燃弧时间出现显著差异,使得电压在断口间分布不均。永磁机构断路器动作精度能够达到微秒级,故可满足多断口灭弧室动作同步性的要求,然而受自身老化及环境温度变化等因素的影响,永磁机构动作时间依然会发生变化。因此为保证多断口灭弧室同步控制精度,仍需要开展操动机构控制策略研究以补偿动作时间的分散性。因此,目前实现多断口灭弧室技术在高压领域的实际工程应用仍具有一定的难度,因此提高单断口灭弧室绝缘特性就成了提高真空开关开断等级的关键^[15]。目前学者针对单断口真空灭弧室绝缘特性方面研究大多集中在灭弧室自身结构对其电场分布影响方面。KUEHN B、FENG Weigang 等^[16-17]通过静电场模拟方法分析了陶瓷外壳处的金属蒸汽沉积层对灭弧室内部电场分布特性的影响,指出外壳上的金属沉积层会使主屏蔽罩与端屏蔽罩间更易产生击穿现象,对灭弧室的绝缘性能有着不利影响。SHEMSHADI Asaad、CAO Yundong 等^[18-19]利用 COMSOL 软件搭建了真空灭弧室有限元模型进行电场计算,进一步指出了灭弧室中动、静触头圆角及台阶倒角等区域电场强度也较高,也有可能发生绝缘击穿,并在此基础上通过改进台阶倒角和触头圆角结构来优化灭弧室电场分布。董华军等^[20-21]指出影响灭弧室电场分布的不单是触头结构方面的因素,该学者分析了外卷和内卷类型主屏蔽罩对触头表面有效面积和灭弧室电场分布的影响。结果表明:相较于内卷类型主屏蔽罩,外卷类型主屏蔽罩可

更加有效降低灭弧室最大电场强度并改善电势分布,但在主屏蔽罩结构参数变化对灭弧室电场特性影响方面仍有待深入研究。姚灿江等^[22]则指出同一类型主屏蔽罩的结构参数不同时,灭弧室电场分布也会有显著差异,该学者仿真计算了不同主屏蔽罩长度、主屏蔽罩喉部直径下的灭弧室电场分布特性,在此基础上总结归纳出灭弧室主屏蔽罩优化设计规律。以上学者研究成果对单断口灭弧室绝缘性能优化工作有着较好指导意义。但在研究真空灭弧室电场特性时,大多改变其中一个部件结构参数,其他设计参数保持不变,以获得单个结构参数对灭弧室电场特性的影响规律。王文成等^[23]综合考虑了触头圆倒角、触头开距、主屏蔽罩半径等多个参数对电场分布的影响,并进行正交回归分析,获得了真空灭弧室多个结构参数与其电场特性间的回归方程。但上述正交回归方法虽然可以描述灭弧室结构参数与场强间的影响规律,但却忽略了灭弧室结构参数中非线性因素对电场的影响,因此在灭弧室结构多参量优化方面仍有待深入研究。此外,目前国内外学者针对灭弧室电场特性进行的研究工作多侧重于灭弧室结构因素如主屏蔽罩尺寸参数等对电场分布的影响^[24],而实际上灭弧室材料因素对其电场分布也有着显著影响,而目前对此方面的研究文献较少,仍需进一步研究。

基于此,本文首先搭建 12 kV 真空灭弧室电场模型,通过改变触头开距计算得到不同触头位置下灭弧室电场易击穿点的分布规律。然后通过单一改变主屏蔽罩厚度、直径以及裙边角度等结构参数分析灭弧室内部电场变化情况。在此基础上将主屏蔽罩结构优化问题转化为数学模型在多目标多约束下的寻优问题,选择主屏蔽罩厚度、直径以及裙边角度等结构参数为设计变量,以灭弧室最大场强、场强均匀度为评价指标,通过 BP 神经网络构建二者的映射模型;并通过遗传算法进行迭代求解,得到主屏蔽罩最优结构参数。最后分析屏蔽罩材料因素对灭弧室电场分布的影响。论文研究可为灭弧室结构设计工作提供理论参考。

1 真空灭弧室电场模型建立

真空灭弧室具体结构参数一般根据其开断电压、额定电流等参数规格而定。本文针对 12 kV 真空灭弧室电场进行研究,为确保灭弧室电场模拟结

果符合实际情况,在电场模型建立时参考实际真空灭弧室产品,其结构如图1所示。



图1 真空灭弧室实际样机

Fig. 1 Prototype of vacuum interrupter

根据图1中实际样机结构设定电场模型参数如表1所示。

表1 真空灭弧室结构参数

Table 1 Structural parameters of vacuum interrupter (单位:mm)

结构参数	尺寸	结构参数	尺寸
屏蔽罩直径	106	触头直径	78
屏蔽罩长度	120	触头高度	30
外壳长度	210	触头开距	10

真空灭弧室整体基本为轴对称结构,故其内部电场也可视为呈现轴对称分布,因此通过二维对称模型即可计算灭弧室内部电场分布。根据表1中参数建立灭弧室二维电场仿真模型如图2所示。为方便后续有限元计算,图2所建模型相较实际样机得到了一定程度的简化,忽略了触头杯座螺旋槽、端盖定位孔、屏蔽罩固定连接等细微结构。

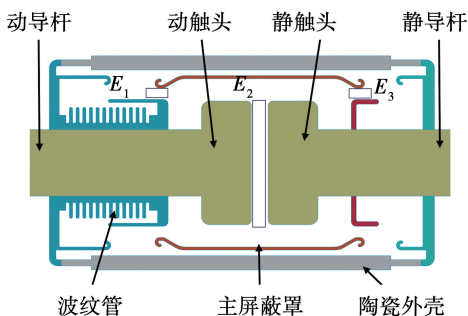


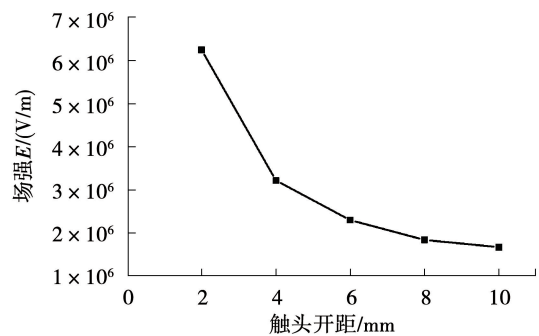
图2 灭弧室电场仿真模型

Fig. 2 Electric field model of vacuum interrupter

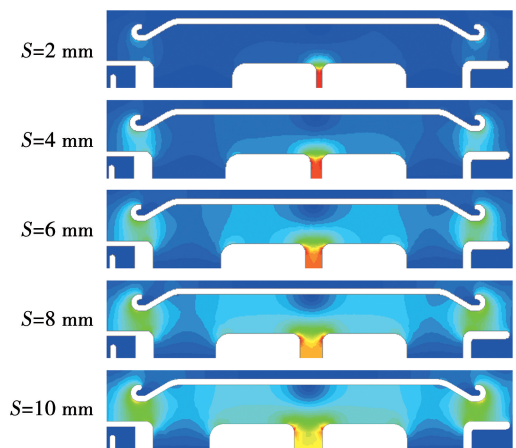
Maxwell 软件中触头、导杆材料可简化设置为铜,波纹管及主屏蔽罩材料可简化设置为不锈钢,外壳则设置为高氧化铝陶瓷。电场仿真边界条件采用无穷远边界。静端设置为 12 kV 的高电位,动端设置零电位。灭弧室内部真空区域的电位可经软件仿真计算得到。

2 灭弧室结构对电场影响分析

灭弧室开断过程中形成的真空电弧主要依靠触头材料不断向真空间隙释放金属蒸汽来维持,因此动静触头间隙对灭弧室电场分布特性有着重要影响。为探究不同触头位置下灭弧室电场易击穿区域的分布规律,本文通过改变触头开距 S 得到灭弧室场强最大值以及电场分布如图3所示。



(a) 触头开距对灭弧室场强影响



(b) 不同开距下灭弧室电场分布

图3 触头不同开距对灭弧室电场影响

Fig. 3 Influence of opening distance on electric field of vacuum interrupter

从图3中可知,灭弧室强电压区域主要集中在触头间隙处,尤其是靠近触头圆角处。随着触头开距的增大,触头间隙的强电场范围会不断缩小,灭弧室整体的电场分布也更加均匀;同时灭弧室内部场

强最大数值也在不断降低,但场强降低的幅度会随着开距的增大而显著减小,尤其是在6 mm以后阶段。这一现象表明了真空开关的绝缘性能会随着其开距的增加而呈现饱和性,仅通过增加触头开距的方式无法达到大幅提高灭弧室绝缘性能的目的。因此需要开展主屏蔽罩结构优化工作来进一步提高灭弧室的绝缘性能,

本文通过调整优化主屏蔽罩结构参数来均匀灭弧室电场分布,以减少局部放电现象,提高灭弧室绝缘强度,确保真空灭弧室高压工况下的稳定性和可靠性。具体研究思路如图4所示。

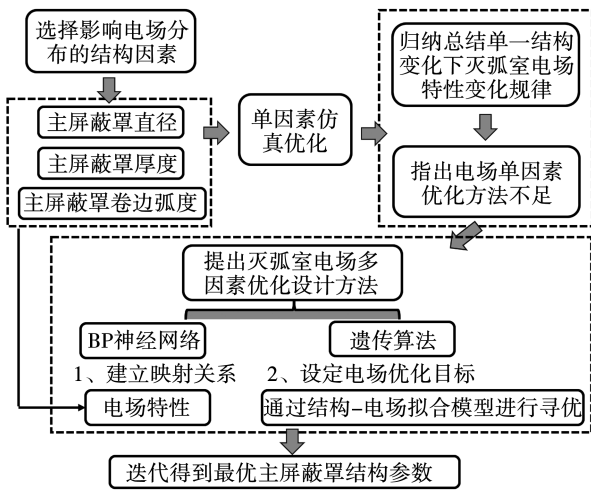
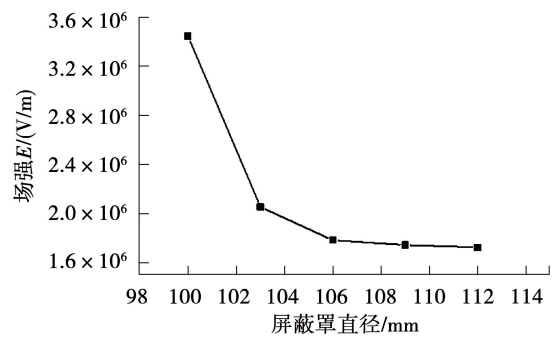


图4 主屏蔽罩优化流程

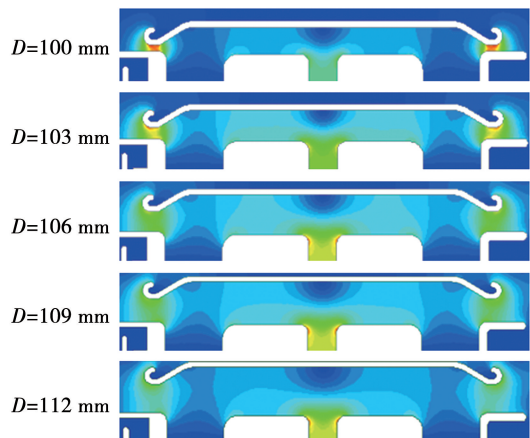
Fig. 4 Optimization process of main shield

开展灭弧室绝缘性能优化工作首先需要深入了解内部电场特性与屏蔽罩各结构参数间的影响机制。为探究主屏蔽罩结构对灭弧室电场特性的影响,本文通过单一改变屏蔽罩直径 D 、主屏蔽罩厚度 H 、外卷边角度 A 等参量得到灭弧室内部场强最大值及电场分布情况如图5、图6、图7所示。

图5(a)、图5(b)中随着主屏蔽罩直径的增大,主屏蔽罩两端与波纹管屏蔽罩及均压屏蔽罩之间的距离也相应增加,这就导致二者间强电场区域逐渐缩小;并且灭弧室内部场强最大值也会随着主屏蔽罩直径的增加而不断降低,且降低的速率逐渐放缓,直至趋于稳定。此外当屏蔽罩直径增大时,场强最大值的位置从原先的主屏蔽罩端部将逐渐转移至触头圆角处,这有效防止了主屏蔽罩与波纹管屏蔽罩及均压屏蔽罩间产生绝缘击穿现象。



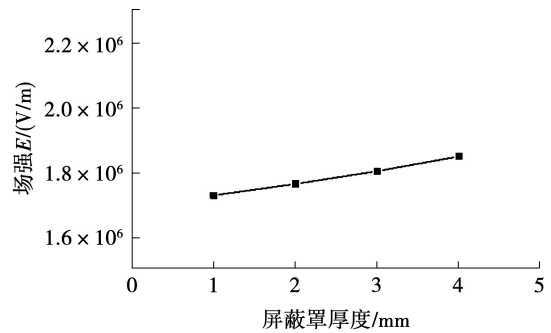
(a) 屏蔽罩厚度对灭弧室场强影响



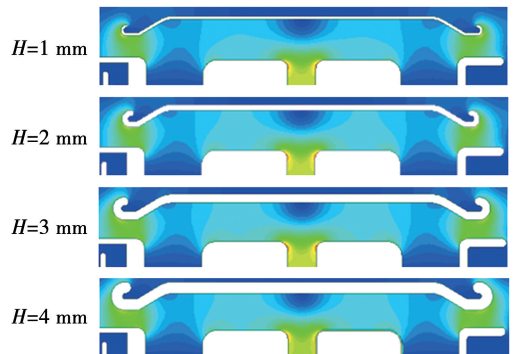
(b) 不同屏蔽罩厚度下灭弧室电场分布

图5 屏蔽罩直径参数对灭弧室电场影响

Fig. 5 Influence of shield diameter on electric field of vacuum interrupter



(a) 屏蔽罩厚度对灭弧室场强影响

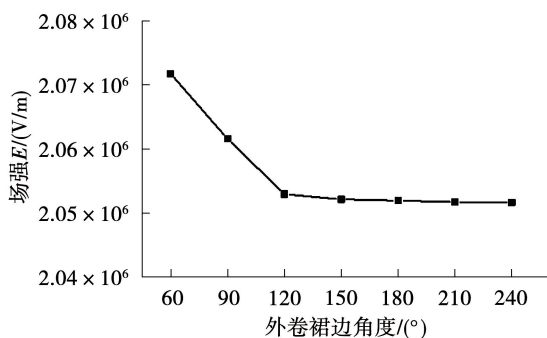


(b) 不同屏蔽罩厚度下灭弧室电场分布

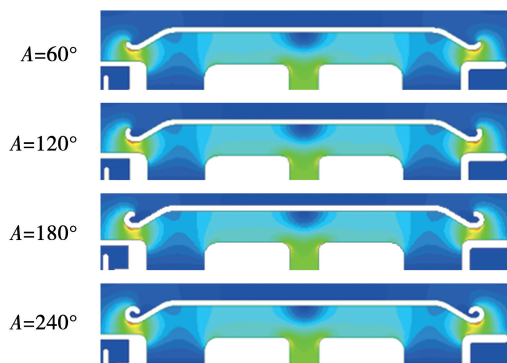
图6 屏蔽罩厚度参数对灭弧室电场影响

Fig. 6 Influence of shield thickness on electric field of vacuum interrupter

图6(a)、图6(b)中屏蔽罩的厚度变化对灭弧室电场分布的影响不大,静触头处的场强最大值会随着厚度的增加而略有提升。这是因为实际情况下主屏蔽罩外侧与灭弧室外壳内表面是固定安装的,因此文中屏蔽罩外侧直径保持不变。这就导致在屏蔽罩厚度增加时,其内侧直径会变小,屏蔽罩与触头间的距离也将减小,最终导致电场分布发生变化。适度减小主屏蔽罩的厚度有助于提升灭弧室的绝缘性能,但是主屏蔽罩厚度也不能太小,过薄的主屏蔽罩不仅会增加加工难度,同时还会削弱其吸收电弧能量的能力,进而增加其在开断电流过程中被击穿的风险。



(a) 屏蔽罩卷边角度对灭弧室场强影响



(b) 不同屏蔽罩卷边角度下灭弧室电场分布

图7 屏蔽罩卷边角度参数对灭弧室电场影响

Fig. 7 Influence of shield edge angle on electric field of vacuum interrupter

当主屏蔽罩与触头距离较近时,其两端裙边位置往往是灭弧室内部场强数值较高的区域,故主屏蔽罩裙边结构对灭弧室电场分布有着显著影响。图7(a)、图7(b)中随着主屏蔽罩裙边角度的增大,主屏蔽罩两端处电场分布会更加均匀,场强最大数值也会降低。但场强降低的幅度会随着卷边角度的增大而显著减小,特别是在超过120°后,继续增加角度对场强数值的影响几乎可以忽略。这是因为外卷边角度超过120°后,触头与屏蔽罩端部将是类似板一球面结构,此后屏蔽罩裙边角度虽继续增大,但

其正对触头的那一面仍是球型结构,并不会发生明显变化,因此后续角度变化对场强数值影响较为有限。从提高灭弧室绝缘水平的角度来说,主屏蔽罩外卷边角度越大越好。但是在实际生产过程中,主屏蔽罩外卷边角度过大时,会显著提高产品加工的难度,因此主屏蔽罩外卷边角度不能过大。

3 基于 GA-BP 灭弧室结构优化设计

上述单因素计算结果揭示了屏蔽罩直径 D 、主屏蔽罩厚度 H 、外卷边角度 A 对灭弧室内部电场分布的影响规律,对灭弧室电场优化设计工作虽有着一定参考意义,但通过改变单一结构参数的方法不能够体现多个结构参数对电场的共同影响机理。同时上述单因素计算结果中灭弧室内部电场特性虽然会随着主屏蔽罩各参数的改变而呈现规律性变化,但二者间的影响关系极为复杂,非线性程度较高,故难以通过数学模型来精确描述。对此,本文引入神经网络和遗传算法来组建真空灭弧室电场多因素优化设计方法,旨在考虑多个结构因素变化对灭弧室电场分布共同影响的前提下,寻找出灭弧室最优结构参数,从而为改善内部电场分布提供一种有效可行的方法。

3.1 BP 神经网络构建

本文引入 BP 神经网络来构建灭弧室结构参数与内部电场特性的非线性映射关系,网络结构如图8所示。

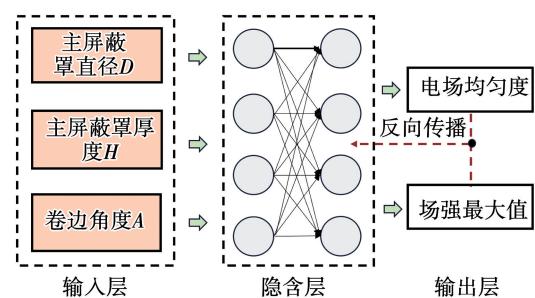


图8 BP神经网络模型

Fig. 8 Model of BP neural network

BP 网络将主屏蔽罩直径、厚度、裙边角度等参数作为输入,将场强最大值,电场均匀度作为输出。BP 神经网络的训练过程主要通过数据正向传播与反向传播两阶段来实现。首先输入数据会经隐含层正向传递至输出层,并计算实际输出与网络预测输出的误差;然后误差数据会反向传播,并优化调整隐含层权值和阈值。经上述两个阶段逐步迭代,网络

表征灭弧室结构参数与电场特性间非线性关系的误差将不断减小。

此外待训练数据样本是否具有代表性、规模是否合适对 BP 神经网络的训练精度及时长均有着重要影响,为此本文引入正交试验设计方法来选择出少数代表性强的训练样本。采用正交试验设计时首先需要对主屏蔽罩各参数进行归一化处理,各参数对应的水平编码如表 2 所示。

表 2 因素水平编码表

Table 2 Coding table of factor level

水平	直径 D/mm	厚度 H/mm	卷边角度 $A/(\circ)$
1	100	1	60
1/2	103	2	90
0	106	3	120
-1/2	109	4	150
-1	112	5	180

从各结构参数全水平排列组合中选出特定水平组合组成正交表,如表 3 所示。

表 3 正交样本表

Table 3 Table of orthogonal sample

编号	D/mm	H/mm	$A/(\circ)$	$E/(\text{V}/\text{m})$	$Y/(\text{V}/\text{m})$
1	100	1	60	2 999 400	367 962
2	100	2	120	2 845 900	326 123
3	100	3	180	3 439 800	254 845
4	100	4	90	4 319 400	197 617
5	100	5	150	6 298 300	222 031
6	103	1	180	1 995 200	363 854
7	103	2	90	1 992 100	314 176
8	103	3	150	2 131 900	275 301
9	103	4	60	2 357 900	259 046
10	103	5	120	2 700 100	249 095
11	106	1	150	1 629 100	368 943
12	106	2	60	1 953 600	375 568
13	106	3	90	1 668 500	281 788
14	106	4	180	1 793 100	337 940
15	106	5	90	1 855 400	258 862
16	109	1	120	1 461 100	319 644
17	109	2	180	1 461 500	269 836
18	109	3	90	1 464 600	258 552
19	109	4	150	1 475 500	287 415
20	109	5	60	1 481 600	255 100
21	112	1	90	1 622 700	315 903
22	112	2	150	1 462 700	278 321
23	112	3	60	1 467 200	272 772
24	112	4	120	1 459 400	265 138
25	112	5	180	1 461 400	238 184

正交样本表为 3 因素 5 水平,共 25 组实验数据。根据每组样本水平要求,建立对应参数下灭弧室电场模型进行仿真计算,并输出场强最大值 E 及电场均匀度 Y ,以此构建样本集用于后续 BP 神经网络训练工作。其中电场均匀度 Y 是衡量灭弧室内部电场分布差异的指标,本文定义如下:

$$Y = k_1(E_{1\text{max}} - E_{1\text{min}}) + k_2(E_{2\text{max}} - E_{2\text{min}}) + k_3(E_{3\text{max}} - E_{3\text{min}}) \quad (1)$$

式(1)主要考虑主屏蔽罩两端以及触头间隙处电场分布差异, E_1 、 E_2 、 E_3 代表的子区域如图 2 所示: E_1 为屏蔽罩左端部与触头间的区域、 E_2 为屏蔽罩右端部与触头间的区域、 E_3 为动静触头间的区域;三个子区域所占权重 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 0.3、0.4、0.3。计算得到 Y 值越大,则灭弧室内部电场分布越不均匀。

本文基于 Matlab 平台对神经网络进行训练,其中训练集为 25 组正交样本;验证集为 16 组单因素样本;网络拟合期望误差为 1×10^{-6} ,学习率为 0.01,训练步数为 100。网络结构为 3-10-5-2,即输入层含有 3 个节点,隐含层有 2 层,分别含有 10、5 个节点,输出层含有 2 个节点。网络训练完毕后,通过有限元仿真方法得到 10 组样本作为测试集,以验证神经网络的拟合精度。神经网络测试结果如图 9、图 10 所示。

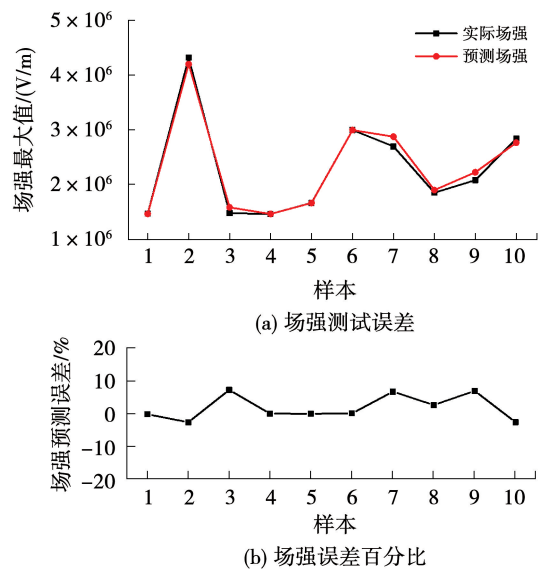


图 9 场强预测值与实际值对比

Fig. 9 Comparison of predicted and actual electric field

从图 9、图 10 拟合结果以及误差分布来看,对于给定的主屏蔽罩参数组合,BP 网络基本能够正确

输出对应结构下灭弧室的最大场强值以及电场均匀度,且最大误差不超过 10%,训练后的网络基本满足拟合精度要求。

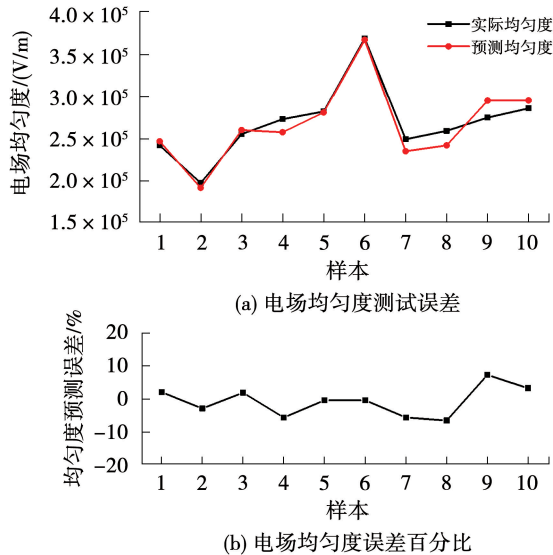


图 10 电场均匀度预测值与实际值对比

Fig. 10 Comparison of electric field uniformity

3.2 基于遗传算法灭弧室结构优化

从仿真结果图 5、图 6、图 7 可知触头间隙、主屏蔽罩两端端部区域为灭弧室内部场强集中处,因此针对 12 kV 真空灭弧室电场优化时,可以将这三个区域的电场分布的均匀度以及最大场强设定为衡量指标。同时上述图 9、图 10 测试结果表明训练后的 BP 神经网络模型能够正确拟合主屏蔽罩结构参数与电场特性间的映射关系,因此在此基础上引入遗传算法进行寻优计算,即可在主屏蔽罩结构尺寸约束条件下,找出一组最佳的结构参数配置使得灭弧室电场特性达到最优。遗传算法寻优过程如图 11 所示。

本文在衡量灭弧室电场特性时设定了 E 、 Y 两个优化指标,故上述问题实质上为多目标优化问题,因此本文采用综合评价指标 H 来量化灭弧室电场特性。 H 与优化指标场强 E 以及场强均匀度 Y 的关系如下:

$$H = \frac{k_1 [E_{\max} - E(x)]}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{k_2 [Y_{\max} - Y(x)]}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (2)$$

式(2)中 H 越接近 1,则场强 $E(x)$ 越小,电场也更加均匀,灭弧室绝缘性能也就越优异; k_1 、 k_2 为场强 E 、均匀度 Y 的权重。

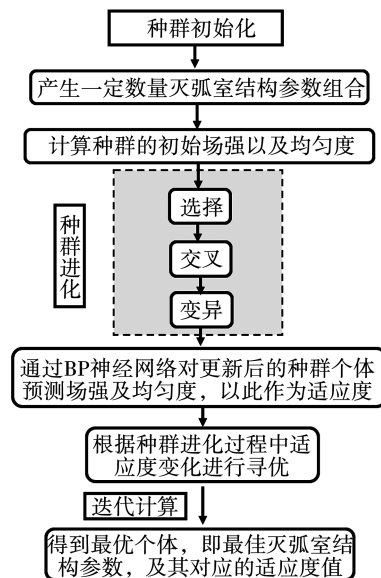


图 11 遗传算法寻优过程

Fig. 11 Optimization process based on genetic algorithm

本文基于 MATLAB 平台对遗传算法寻优过程进行代码实现,其中种群规模设置为 20;交叉率及变异率分别设置为 0.2、0.2;种群最大迭代次数设置为 100。在关于灭弧室绝缘特性的研究文献中^[8,18],大多学者着重考虑了场强因素,其开展真空灭弧室结构优化的目的就是降低最大场强值,从而使灭弧室内部电场分布尽可能均匀,因此本文认为场强 E 对灭弧室电场特性来说更为重要,在评价指标 H 中设置二者权重比 $k_1:k_2$ 为 7:3。算法迭代过程中,适应度 H 、屏蔽罩参数变化如图 12 所示。

从图 12 中可看出最优个体适应度函数 H 经过 50 代优化后就已经初步稳定在 0.955 5 左右;此后阶段由于遗传算法继续执行种群交叉、变异等操作,因此种群平均适应度 H 及染色体(屏蔽罩结构参数的组合)将会在小范围内持续波动,并最终在 70 代左右彻底稳定,此时主屏蔽罩结构参数优化结果如表 4 所示。

表 4 优化结果

Table 4 Results of optimization

参数	优化前	优化后
直径 D/mm	101.3	109.9
厚度 H/mm	4.3	2.03
卷边角度 $A/(\circ)$	145.3	117.96
场强 $E/(\text{V}/\text{m})$	3 545 006	1 467 572
场强均匀度 $Y/(\text{V}/\text{m})$	212 666	226 484
综合评价指标 H	0.476 4	0.955 5

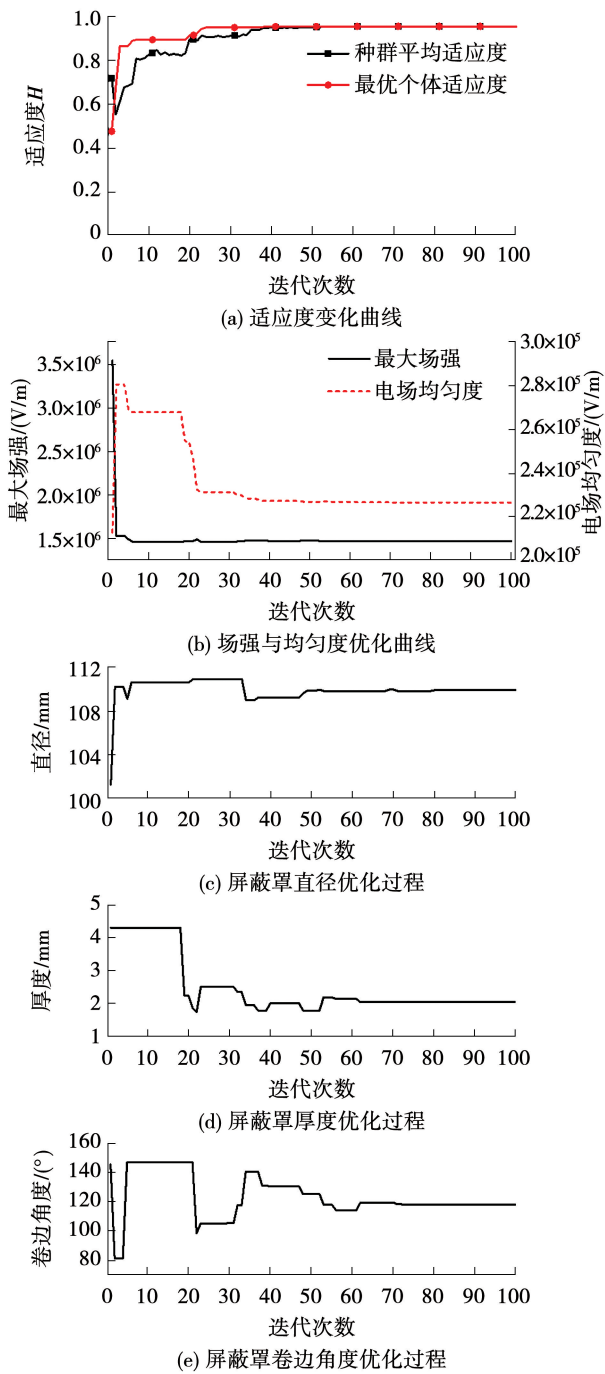


图 12 屏蔽罩结构参数迭代优化过程

Fig. 12 Structure optimization process of shield

通过数值仿真得到优化前后真空灭弧室内部场强分布及沿主屏蔽罩内表面电场强度分布如图 13 所示。

可知优化后的主屏蔽罩由于其直径明显增大,屏蔽罩裙边部位与触头的距离也将更远,这就避免形成电场集中区域,使得沿屏蔽罩内表面方向电场强度明显下降,其中裙边处最大场强值由 $3.54 \times 10^6 \text{ V/m}$ 降低至 $1.04 \times 10^6 \text{ V/m}$;同时触头间

隙处的电场强度也将略微降低,由 $1.482 \times 10^6 \text{ V/m}$ 降低至 $1.467 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。由对比结果可知优化后的主屏蔽罩绝缘性能更为优异,本文采用的遗传算法结合神经网络的优化设计方法可以有效改进主屏蔽罩结构参数,达到调控灭弧室内部电场分布的效果。

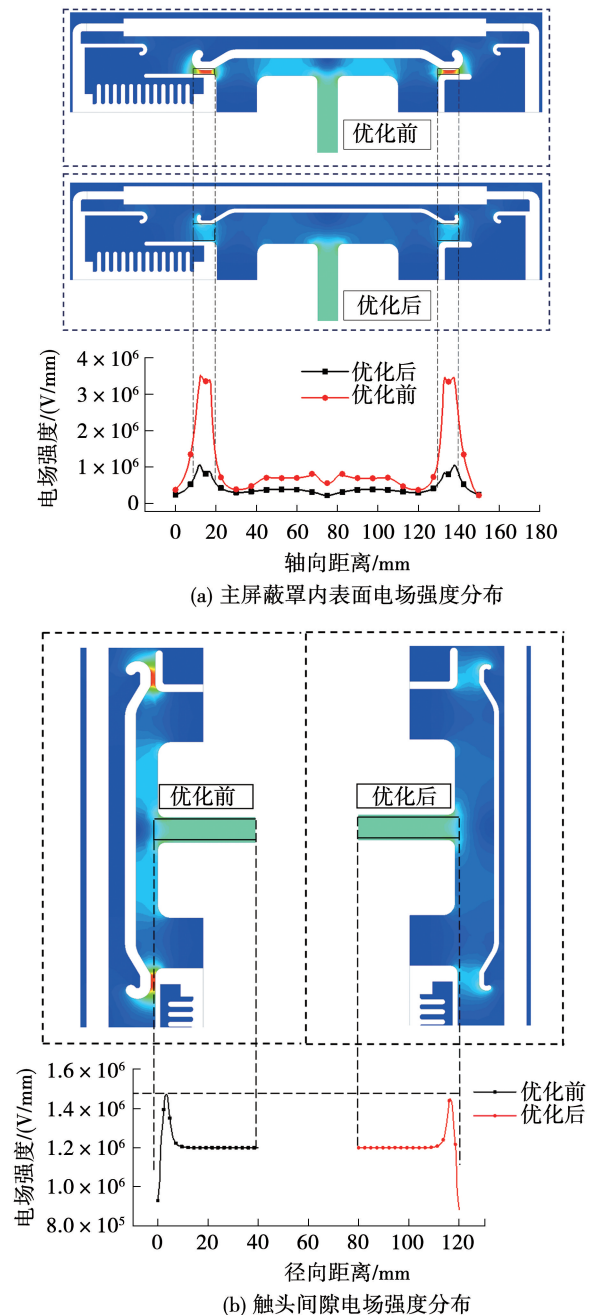


图 13 屏蔽罩结构优化前后对比

Fig. 13 Comparison of electric field of shielding cover

4 主屏蔽罩材料对灭弧室电场的影响

主屏蔽罩材料也会对灭弧室电场分布产生影

响,当主屏蔽罩材料为高氧化铝陶瓷、电工纯铁 DT4 以及钕铁硼永磁铁时,灭弧室内部电场分布情况如图 14 所示。

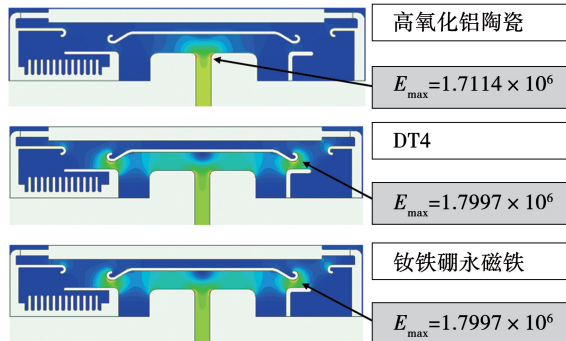


图 14 屏蔽罩材料对灭弧室电场影响

Fig. 14 Influence of shielding material on electric field

当主屏蔽罩材料为电工纯铁 DT4、钕铁硼永磁铁时,灭弧室内电场分布情况与主屏蔽罩为不锈钢时的分布基本相同,高场强区域仍基本分布在触头间隙及主屏蔽罩两端处。这是因为金属材料的导电率一般较高,电流容易流动,因此金属导体作为屏蔽罩材料时,其都能够起到均匀电场分布的作用。而当屏蔽罩材料为高氧化铝陶瓷时,灭弧室内部在正对着触头间隙的绝缘外壳区域上电场变化梯度较大,这与不加屏蔽罩情况下的电场分布较为类似,将可能导致外壳局部被击穿。这是因为导电率低的材料电流通过困难,其作为屏蔽罩时无法很好地均匀电场分布。

此外灭弧室开断过程中会产生温度极高的真空电弧,屏蔽罩材料导热率大小会对其吸收电弧能量的能力有影响。尽管高氧化铝陶瓷作为主屏蔽罩材料时也能够起到吸附电弧生成物,防止外壳被污染等作用,但是其吸收电弧能量的能力远不及金属导体,故屏蔽罩材料需选用导热率较大的金属材料。

在金属导体材料中,电工纯铁及永磁铁成本较高,但二者对灭弧室电场分布的影响与不锈钢相比并无显著差异。因此综合考虑电场分布特性和生产成本,不锈钢是主屏蔽罩材料的最优选择。电工纯铁及永磁铁属于磁性材料,其作为屏蔽罩材料对灭弧室产生的影响主要体现在灭弧室开断电流过程中。在灭弧室开断电流时,二者因具有磁化性质将产生外加磁场,并与灭弧室触头自身产生的磁场相

叠加,会对触头间隙真空电弧形态产生影响。

5 结 论

本文针对 12 kV 真空灭弧室电场分布问题进行研究,搭建了灭弧室二维电场仿真模型,分析了主屏蔽罩结构变化对灭弧室电场分布的影响,然后基于遗传算法以及神经网络对主屏蔽罩结构参数进行改进,研究结论如下:

1) 基于有限元单因素计算方法可得到主屏蔽罩结构因素对灭弧室内部电场分布的影响规律,即最大场强数值会随着屏蔽罩直径的增加而减小、随着屏蔽罩厚度的增加而增长、随着外卷裙边角度的增加而减小。这对灭弧室绝缘优化设计工作虽有一定参考价值,但灭弧室内部电场特性与主屏蔽罩各结构参数间的影响关系极为复杂,非线性程度较高,且难以通过数学模型来定量描述,因此该方法不能够体现多个结构参数对电场的共同影响机理。

2) 基于遗传算法和神经网络的优化方法能够在考虑多个结构因素对灭弧室电场特性共同影响的前提下,寻找出屏蔽罩最优结构参数,使灭弧室电场特性更加优异,这是以往传统的单因素优化方法所不能实现的。经该方法优化后,灭弧室电场最大值降低 2.07×10^6 V/m,屏蔽罩及触头间隙处电场均匀度提高 1.4×10^4 V/m,遗传算法结合神经网络的优化方法可以有效达到调控灭弧室内部电场分布的效果。

3) 在对灭弧室进行设计时,主屏蔽罩选择不锈钢材料效果最好,可使灭弧室兼具成本低廉及绝缘性能优异等优点。并且在灭弧室结构设计阶段,传统的有限元方法在更新模型参数进行仿真计算时往往需要花费大量时间精力;本文采用的神经网络方法则省略了复杂的有限元计算过程,只需根据训练过程中拟合的灭弧室结构参数与电场特性的关系即可快速、准确预测出新型灭弧室结构对应的电场特性,因此具有广阔的应用前景。但是神经网络方法也有着局限性,其无法做到像有限元计算那样可以给出电场分布具体细节。因此在灭弧室结构优化工作中,需要考虑两种方法的独特优势,根据不同优化阶段内的具体需求对两种方法进行甄别使用。论文研究工作可为灭弧室整体结构设计与绝缘优化工作提供理论参考。

参考文献:

- [1] 钟建英, 陈刚, 谭盛武, 等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769.
- [2] 董华军, 孙鹏, 李东恒, 等. 考虑电动斥力的真空断路器刚柔耦合系统机械特性研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 147.
DONG Huajun, SUN Peng, LI Dongheng, et al. Research on structural characteristics of rigid-flexible coupling system of VCB considering electro-dynamic repulsion force[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3): 147.
- [3] 李元琦, 葛亦宁, 汪黎, 等. 分体式有载分接开关结构可靠性验证及优化[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(7): 12.
LI Yuanqi, GE Yining, WANG Li, et al. Reliability verification and optimization of split-type on-load tap changer structure[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(7): 12.
- [4] 董华军, 李东恒, 李金金, 等. 真空开关传动系统疲劳裂纹扩展特性研究[J/OL]. 电工技术学报, 1-14[2025-09-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tees.250629>.
DONG Huajun, LI Dongheng, LI Jinjin, et al. Research on fatigue crack propagation characteristics of vacuum switch transmission system[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-14 [2025-09-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tees.250629>.
- [5] 朱军, 李波, 阮江军, 等. 基于人工过零技术的直流真空分断过程分析及验证[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(1): 63.
ZHU Jun, LI Bo, RUAN Jiangjun, et al. Analysis and test for the DC vacuum interruption process based on the artificial current zero technology[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(1): 63.
- [6] 赵峰, 杨和, 李玲. 关合电容器组高频涌流对真空灭弧室绝缘特性的影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 169.
ZHAO Feng, YANG He, LI Ling. Research on impact of high frequency inrush current when making capacitor bank on insulation characteristic of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 169.
- [7] 石玉侠. 真空灭弧室电场数值仿真及结构优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
- [8] 刘晓明, 徐秋敏. 采用改进模拟电荷法的真空灭弧室电场数值求解研究[C]// 第一届电器装备及其智能化学术会议, 2007, 11月8日-10日, 中国, 西安. 2007: 724-730.
- [9] 李烁, 修士新, 贾申利, 等. 金属罐体对真空灭弧室内部电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 570.
LI Shuo, XIU Shixin, JIA Shenli, et al. Influence of metal tank on the internal electric field distribution of vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 570.
- [10] 黄永宁, 余晓, 樊益平, 等. 363 kV 多断口快速真空断路器电场仿真分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 19.
HUANG Yongning, YU Xiao, FAN Yiping, et al. Electric field simulation of the 363 kV multi-break fast vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 19.
- [11] 程显, 田小倩, 葛国伟, 等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3200.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200.
- [12] 吴高波, 阮江军, 黄道春, 等. 多断口真空断路器均压电容研究综述[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 77.
WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Review of grading capacitors of multi-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 77.
- [13] 程显, 李鑫, 葛国伟, 等. 串联用一体化均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 820.
CHENG Xian, LI Xin, GE Guowei, et al. Insulation configuration and optimization of integrated voltage self-sharing interrupter for series connection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 820.
- [14] 葛国伟, 王文博, 程显, 等. 基于两间隙异步联动的一体化高压真空灭弧室电场设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5555.
GE Guowei, WANG Wenbo, CHENG Xian, et al. Electric field design of integrated high-voltage vacuum interrupter based on two-gap asynchronous linkage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5555.
- [15] 马士奇, 刘晓明, 陈海, 等. 基于平面域水平可视图的真空灭弧室静态绝缘优化设计与分析[J]. 真空科学与技术报, 2022, 42(2): 118.
MA Shiqi, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Optimization and analysis on electric field of vacuum interrupter based on HVG[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(2): 118.
- [16] KUEHN B, KURRAT M, HILBERT M, et al. Characterization of metal vapor deposition on vacuum interrupter ceramics and its impact on electric field distribution[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3333.
- [17] FENG Weigang, LIU Zhiyuan, MA Hui, et al. Breakdown of shield gaps in vacuum interrupters[J]. High Voltage, 2020, 6(4): 693.
- [18] SHEMSHADI Asaad, AKBARI Asghar, MOHAMMAD Seyed, et al. A novel approach for reduction of electric field stress in vacuum interrupter chamber using advanced soft computing algorithms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1951.
- [19] CAO Yundong, LIU Xiaoming, WANG Erzhi, et al. Electric field optimization design of a vacuum interrupter based on the ta-

- bu search algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 169.
- [20] 董华军, 康凯, 郭英杰, 等. 两种 40.5 kV 真空灭弧室电场和电势分布的对比研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(7): 801.
- DONG Huajun, KANG Kai, GUO Yingjie, et al. Electric potential and field distributions of two types of 40.5 kV vacuum interrupters[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(7): 801.
- [21] 康凯. 40.5 kV 真空灭弧室电场优化及磁场分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- [22] 姚灿江, 孙龙勇, 刘英英. 新型 72.5 kV 真空断路器的研发设计[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 23.
- YAO Canjiang, SUN Longyong, LIU Yingying. Development and design of new 72.5 kV vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 23.
- [23] 王文成, 张朋, 李秀峰, 等. 基于正交设计的真空灭弧室电场特性分析[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 30.
- WANG Wencheng, ZHANG Peng, LI Xiufeng, et al. Electric field characteristics analysis of vacuum interrupters based on orthogonal design[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 30.
- [24] 刘晓明, 刘威, 李龙女, 等. 基于改进神经网络和遗传算法的真空灭弧室优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(4): 359.
- LIU Xiaoming, LIU Wei, LI Longnü, et al. Optimal design of vacuum interrupter based on improved neural network and genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(4): 359.

(编辑:刘素菊)