真空旁路开关灭弧室绝缘仿真及不确定性分析

刘晓明^{1*} 李国铮¹ 陈海¹ 史红菲¹ 李培源¹ 陈军平² (1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 河北工业大学电气工程学院 天津 300401; 2. 成都旭光电子股份有限公司 成都 610500)

Insulation Simulation and Uncertainty Analysis of Vacuum Interrupter for Bypass Switch

LIU Xiaoming^{1*}, LI Guozheng¹, CHEN Hai¹, SHI Hongfei¹, LI Peiyuan¹, CHEN Junping²

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Chengdu Xuguang Electronics Co., Ltd., Chengdu 610500, China)

Abstract As an important protection device in the DC power system, the bypass switch usually works under open circuit conditions. In order to analyze the insulation reliability of the vacuum bypass switch, a threedimensional physical mathematical model of the electric field is established by using the finite element method to illustrate the distribution of the electric field under standard lightning impulse to withstand peak voltage. The macroscopic enhancement factor of surface electric field intensity is introduced to quantitatively describe the uniformity of the electric field concentration region. Moreover, the chaotic polynomial expansion method is applied to analyze the uncertainty of the center slot fillet radius of the contact electrode to ensure the reliability of insulation performance and manufacturing processes.

Keywords Bypass switch, Insulation performance, Polynomial Chaos Expansion, Uncertainty analysis

摘要 真空旁路开关在直流系统中作为重要的保护器件长期工作在分闸状态下。针对真空旁路开关绝缘可靠性问题, 文章以 3.6 kV/2500 A 真空旁路开关灭弧室为研究对象,采用有限元分析手段,建立三维电场物理数学模型,分析其在标准雷 电冲击耐受峰值电压作用下的电场分布情况;并引入表面电场宏观增强因子,对电场集中区域的场域分布均匀程度进行定量 分析。此外,采用混沌多项式展开法,对灭弧室触头电极中心开槽圆角半径进行不确定性分析,以确保其绝缘性能和加工制 备的可靠性。

关键词 旁路开关 绝缘性能 混沌多项式展开法 不确定性分析 中图分类号: TM561.2 **文**献标识码: A **doi**: 10.13922/j.cnki.cjvst.202405014

真空旁路开关以其长寿命、小型化与介质环保 等优势在新型电力系统保护中具有新的应用前景^[1]。 旁路开关的结构与性能研究主要包括配用灭弧系 统的结构与绝缘性能、以及配用机构系统的结构与 快速关合动作性能。由于旁路开关长期服役在分 闸状态,绝缘性能对其运行可靠性具有重要影响。 研究表明,采用电场物理数学模型建模与数值模拟 手段进行绝缘性能影响因素分析是评估旁路开关 长期运行性能的有效途径之一。旁路开关绝缘性 能主要取决于其所配用的真空灭弧室,其内部以真 空作为绝缘介质,其结构组成主要包括绝缘外壳、 动静触头、波纹管、屏蔽罩以及动静导电杆等部件。 动静触头结构以及屏蔽罩型面对真空灭弧系统的 绝缘性能具有直接影响^[2-4]。马士奇等^[5]以12 kV/ 1250 A/31.5 kA 真空灭弧室为对象,将水平可视图法 拓展至轴对称场域中,分析电场影响因素,并以最 大场强最小化为目标,实现了绝缘结构优化设计。 董增波等^[6]在对真空灭弧室静态绝缘性能分析中,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52177139)

^{*}联系人: E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn

采用非支配排序多目标遗传算法实现了电场均匀 度的优化设计。

近年来,将不确定性量化方法与实际应用相结 合,为解决工程可靠性问题提供了新思路^[7-10]。不确 定性量化是一种针对系统内各参数可能存在的误 差或变化,分析其对系统整体性能影响的方法,即 采用数学方法将不确定性问题转化为多个确定性 问题,定量化描述系统随机过程,分析在不同因素 影响下系统发生变化的概率^[11]。常用不确定性量化 方法主要有蒙特卡罗模拟法^[12]、混沌多项式展开 (Polynomial Chaos Expansion, PCE)法^[13]、代理模型 法、降维法等。其中,PCE 法通过将不确定性问题 进行有限阶数的展开,将其转化为确定性问题求解。 PCE 法能够简化复杂系统的计算,使用方便,但也 存在不能处理过多变量的问题。

综上,本文以 3.6 kV/2500 A 旁路开关真空灭弧 室为研究对象,构建其三维电场物理数学模型,采 用有限元数值模拟手段,定量分析静态耐压下绝缘 性能以及触头沿面宏观增强因子分布规律。此外, 聚焦触头电极中心开槽圆角区域(在此记作 *D*_e)这 一场强集中区域,为研究触头电极中心开槽圆角半 径(*r*_e)对于极间电场的影响,采用 PCE 法,对其进行 不确定性分析,找到合理的参数范围,为工程设计 和制备提供理论基础。

1 真空灭弧室数学模型及边界条件加载

灭弧室电场数值模拟满足麦克斯韦方程组^[14]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho \\ \nabla \times E = 0 \\ D = \varepsilon E \end{cases}$$
(1)

式中, ρ 为体电荷密度,D为电位移矢量, ε 为介电常数,E为电场强度。

采用有限元法进行电场求解,边界条件如下:

$$\tau_1: \quad \varphi = \varphi_0 \\ \tau_2: \quad \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}n} = q_0 \tag{2}$$

式中, τ_1 为满足狄利克里条件的表面, τ_2 为满足诺伊 曼条件的表面, φ_0 为边界条件 τ_1 的电位, q_0 为边界 条件 τ_2 的电荷量。

建立真空旁路开关灭弧系统三维电场仿真模 型如图1所示。

灭弧室三维电场有限元数值模拟过程中,考虑 真空旁路开关结构特点,首先构建等效无限远电场 计算域。其次,在前处理剖分中,考虑屏蔽罩薄壁



图1 灭弧室三维电场仿真模型

Fig. 1 Simulation model of 3D electric field for interrupter

结构,为保证精细化求解精度,采用最小网格单元质量为0.00602的自由四面体网格进行全场域剖分。

静态绝缘计算条件:考虑最恶劣情况,依据 《GB/T 11022-2011》标准雷电冲击耐受峰值电压 (Basic impulse level, BIL),静触头及其金属连接件施 加 46 kV;动触头及其金属连接件施加地电位。

材料属性:绝缘外壳材料为陶瓷(相对介电常数取值5.0);动静触头选用铜;灭弧室内介质为真空。

2 真空灭弧室静态绝缘仿真分析

真空灭弧室绝缘特性主要是指在承受 BIL 电 压条件下绝缘性能可靠,其绝缘强度主要取决于真 空灭弧室全场域电场分布的均匀程度。其中,典型 子区域的电场均匀程度值得关注(如动静触头极间 隙、触头与屏蔽罩间隙,以及屏蔽罩与屏蔽罩间隙)。

基于上述分析,针对 3.6 kV/2500 A 旁路开关真 空灭弧室绝缘问题,定量分析触头电极在满开距下承 受 BIL 电压条件下真空灭弧室电场分布情况,如图 2 所示,并对绝缘薄弱点场强进行分析;图中实心矩形 和空心矩形分别表示沿面场强采样点的起点和终点。

研究表明: 在满开距下, 真空旁路开关灭弧室 场强主要集中在动静触头表面以及屏蔽罩端部区 域。动静触头表面电场强度最大值分别为 2.064× 10⁷ V/m 和 2.156×10⁷ V/m, 均位于触头电极中心开 槽处圆角区域; 屏蔽罩内表面电场强度最大值为 9.850×10⁶ V/m, 位于屏蔽罩端部。断口区域场强最 大值点位于静触头中心开槽圆角区域, 同时也是灭 弧室内部场强最大值点, 即绝缘薄弱点。

3 表面电场宏观增强因子分布分析

真空灭弧室内部电场尤其是断口区域电场属 于稍不均匀电场^[15],其电场强度由宏观增强因子与 微观增强因子决定:

$$E_{\rm g} = \beta_{\rm g} \cdot \beta_{\rm m} \frac{U}{d} \tag{3}$$



- 图2 动静触头表面及屏蔽罩内表面场强分布。(a)静触头表 面场强分布,(b)动触头表面场强分布,(c)屏蔽罩内表 面场强分布
- Fig. 2 Field intensity distribution along the surface of movable and static contact and inner surface of shielding cover.(a) Field intensity distribution along the surface of static contact, (b) field intensity distribution along the surface of movable contact, (c) field intensity distribution along the inner surface of shielding cover

式中, E_g 为电场强度,U为高电位电极施加电位值, d为触头行程, β_g 为触头结构宏观增强因子,与边缘 曲率半径等几何参数相关; β_m 为触头表面结构微观 增强因子,与触头电极微观结构有关。

当 β_{g} 和 β_{m} 趋近于1时,表示灭弧室内部各区 域电场强度无限接近于断口中心区域场强,即灭弧 室绝缘设计的目标。其中, β_{m} 主要受电极表面组织 结构以及微观蚀坑的影响。在真空灭弧室绝缘结 构设计中, β_{m} 值既难以测定也难以控制。但可通过 真空灭弧室的老炼过程降低 β_{m} 值。而 β_{g} 反映触头 宏观结构参数对电场分布的影响,可通过对灭弧室 内部结构型面优化实现对其进行调控,进而改善电 场分布均匀度。文中,忽略 β_{m} 对电场畸变与劣化的 影响,求得动静触头表面以及屏蔽罩内表面满开距 下 β_{g} 分布,如图 3 所示,图中实心矩形和空心矩形 分别表示触头中心平面沿线 β_{g} 采样点的起点和终点。

分析表明,在动静触头沿面区域,高β_g值点集 中在触头中心开槽边缘圆角区域和触头外侧圆角



图3 动静触头表面及屏蔽罩内表面 βg。(a)动触头表面 βg 分布,(b)静触头表面 βg,(c)屏蔽罩内表面 βg

Fig. 3 β g curves along the surface of movable and static contacts and inner surface of the shielding cover. (a) β g curves along the surface of movable contacts, (b) β g curves along the surface of static contacts, (c) β g curves along the surface of inner surface of shielding cover

区域,最大值均出现在触头电极中心开槽圆角区域, 分别为 1.074 和 0.929;在屏蔽罩内表面区域,β_g最 大值点位于屏蔽罩端部区域,其值为 0.393。

4 灭弧室绝缘性能分析

在真空灭弧室场域中,三交面处由于材料属性

较为复杂,存在材料劣化失效不确定性,是击穿的 薄弱点,有必要对其场强分布进行定量分析,以确 保灭弧室绝缘可靠性,三交面采样点如图4所示。



图4 三交面采样点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sampling points at three intersection

为研究真空旁路开关灭弧室绝缘弱点变化情况,对比分析触头电极沿面(*E*maxd)、屏蔽罩内表面沿面(*E*maxp)、三交面子区域1(*E*maxl)以及三交面子区域2(*E*max2)场强最大值,结果如表1所示。研究表明:灭弧室内部场强最大值出现在电极沿面区域,同时,三交面子区域1的场强最大值与触头电极沿面场强最大值数量级相同。

表1 真空灭弧室各区域场强最大值

 Tab. 1
 The maximum field strength in each region of vacuum bypass switch interrupter

场强最大值	$E_{\rm maxd}$	$E_{\rm maxp}$	$E_{\rm max1}$	$E_{\rm max2}$
参数值/×10 ⁶ V/m	21.6	9.8	12.9	3.2

5 混沌多项式展开法

研究表明真空灭弧室场域内场强最大值位于 触头电极中心开槽圆角区域(即 *D*_e),为分析触头电 极中心开槽圆角半径(*r*_e)对于场强最大值的影响, 并给出合理的取值,采用 PCE 法进行分析。

PCE 法是一种新兴的不确定性量化算法,采用 多项式组合形成随机空间来描述和传播随机变量 的不确定性。对于混沌多项式展开模型,描述如下:

$$Y(\theta) = \alpha_0 H_0 + \sum_{i_1=1}^{\infty} \alpha_{i_1} H_1(\varepsilon_{i_1}(\theta)) + \sum_{i_1=1}^{\infty} \sum_{i_2=1}^{i_1=1} \alpha_{i_1 i_2} H_2(\varepsilon_{i_1}(\theta), \varepsilon_{i_2}(\theta)) + \dots +$$
(4)
$$\sum_{i_1=1}^{\infty} \sum_{i_2=1}^{\omega_{i_1=1}} \cdots \sum_{i_n=1}^{i_{n-1}=1} \alpha_{i_1 i_2 \cdots i_n} H_n(\varepsilon_{i_1}(\theta), \varepsilon_{i_2}(\theta), \dots, \varepsilon_{i_3}(\theta))$$

式中, θ 为随机变量, α_0 为常系数,n为展开阶数,

 $H_n(\varepsilon)$ 为 n 阶的 Hermite 正交多项式。

PCE 法是利用正交多项式的优异性能,对随机问题进行有限阶数展开,通过对随机变量输入到响应的映射过程建立代理模型,进而分析不确定性问题。技术路线如下:

Step1: 确定变量个数以及 Hermite 展开阶数。

Step2: 定义随机变量分布,确定变量取值范围 的平均值与方差,基于正交变换确定其相关系数。

Step3: 选择配点个数, 基于获取的 x 空间配点 输入相应的外部计算结果。

Step4:设置抽样次数并输入所需求解的界限值。 Step5:求解大于所设定界限值的概率,形成概 率密度分布曲线。

6 不确定性分析

在真空灭弧室制备和使用过程中,存在影响绝 缘性能的多种不确定性因素,如环境、材料、加工工 艺等。本文针对由加工工艺可能产生的误差对于 真空灭弧室绝缘性能的影响因素进行分析。由于 场强最大值主要集中在极间区域,而触头电极表面 场强主要集中在 De 区域。也就是说, r_e是真空灭弧 室场强的敏感参数之一。

在此,定义触头电极表面最大场强与平均场强 之比为不确定性变量,分析动静触头在不同触头电 极表面及屏蔽罩区域下不确定性变量的概率密度 分布,提出不确定性变量表达式:

$$\eta = \frac{E_{\max}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}E_{i}}$$
(5)

式中,η为不确定性变量, *E*_{max}为触头电极表面场强 最大值, *E*_i为触头电极表面采样点的场强值。

为了给不确定性分析提供参考指标,首先对于 动静触头在不同 r_e下 η 值进行确定性分析,由于触 头电极中心开槽深度为 1.0 mm,将 r_e取值范围设定 在 0.1~0.9 mm 之间,分析结果如图 5 所示。

考虑实际加工过程中可能存在的误差,将r。取 值范围分为三组,分别为 0.1~0.3 mm、0.4~0.6 mm 和 0.7~0.9 mm。对不确定性仿真进行设置,定义变 量为 2 个,分别为动触头中心开槽圆角半径 r_{e1} 和静 触头中心开槽圆角半径 r_{e2},且两个变量均服从于正 态分布,Hermite 展开阶数设定为 3 阶,相关系数为 默认设置,配点个数设置 15,抽样次数设置 100 万



图5 动静触头在不同 r_e下确定性分析。(a)动触头在不同 r_e下确定性分析,(b)静触头在不同 r_e下确定性分析

Fig. 5 Deterministic analysis of movable and static contact under different $r_{\rm e}$. (a) Deterministic analysis of movable contact under different $r_{\rm e}$, (b) deterministic analysis of static contact under different $r_{\rm e}$

次,通过设置不同临界值,求得不确定性变量的概 率密度函数(Probability Density Function, PDF)的曲 线,不确定性分析结果如图 6 所示,图 6(a)和(b)分 别表示不确定性变量 η 随着 r_e 变化的 PDF曲线。

研究表明:动静两侧触头随着 r。变化其 η 概率 密度函数变化趋势基本相同,当 r。取值范围为 0.1~0.3 mm 时,η变化范围较大,触头电极击穿概率 较大;当 r。取值范围为 0.7~0.9 mm 时,与确定性分 析结果相比较,η大于确定性分析结果的概率在 90% 以上,对实际加工过程要求较高。基于上述分 析,r。取值范围应在 0.4~0.6 mm 内。

7 结论

采用有限元方法,对 3.6 kV/2500 A 真空旁路开 关灭弧室静态绝缘性能进行数值模拟与可视化分 析。研究表明,在满开距下,绝缘薄弱点(即电场强 度最大值点)位于触头电极中心开槽圆角区域及屏 蔽罩端部区域。



图6 动静触头在不同 r_e下不确定性分析。(a)r_e=0.1~0.3 mm, (b)r_e=0.4~0.6 mm, (c)r_e=0.7~0.9 mm

Fig. 6 Uncertainty analysis of movable and static contact under different $r_{\rm e}$. (a) $r_{\rm e}$ =0.1~0.3 mm, (b) $r_{\rm e}$ =0.4~0.6 mm, (c) $r_{\rm e}$ =0.7~0.9 mm

为研究灭弧室内绝缘影响因素和电场分布均 匀程度,引入表面电场宏观增强因子 βg,并定量分 析其在不同子区域的分布情况。

为探究触头电极中心开槽圆角半径(r_e)对于场 域内场强最大值的影响机理,采用 PCE 法分析在不 同 r_e取值范围下,动静触头表面不确定变量的概率 密度分布,进而提出合理的 r_e取值阈。

当 r_e取值范围在 0.4~0.6 mm 时,兼顾绝缘性能和加工难度,本文所选取的 r_e的值在该范围之内,满足工程需要。

参考文献

- [1] Zou J Y, Chen J P, Liu X M, et al. Vacuum switch technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2021 (邹积岩, 陈军平, 刘晓明, 等. 真空开关技术 [M]. 北京: 机械工业 出版社, 2021 (in Chinese))
- [2] Wang Z Q, He J S, Zou J Y, et al. Power switching technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science And Technology Publishing, 2003 (王章启,何俊生,邹积岩,等. 电力开关技术 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2003 (in Chinese))

- [3] Liu W. Electromagnetic field joint optimization design of vacuum interrupter based on improved neural network[D]. Tianjin Polytechnic University, 2020 (刘威. 基于改进神经网络的真空灭弧室电磁场联合优化设计 [D]. 天津工业大学, 2020 (in Chinese))
- [4] Suzuki S, Matsuo T, Sakuma R, et al. Diffusion of metal vapor from electrodes to the vacuum interrupter shield and its dependence on electrode construction[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(2): 485–489
- [5] Ma S Q, Liu X M, Chen H, et al. Optimal design and analysis of static insulation of vacuum interrupter based on horizontal viewable plane domain[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(2): 118-124 (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 科学与技术学报, 2022, 42(2): 118-124 (in Chinese))
- [6] Dong Z B, Yang P, Fan H, et al. Optimal design and analysis of static insulation of vacuum circuit breaker interrupter based on NSGA-II[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(12): 1198–1202 (董 增波, 杨鹏, 范辉, 等. 基于 NSGA- II 的真空断路器灭弧 室静态绝缘优化设计与分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(12): 1198–1202 (in Chinese))
- [7] Xie S W, Hu Z J, Wang Y Y, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038–1054 (谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1038–1054 (in Chinese))
- [8] Li X Z, Han B, Li G J, et al. Two-stage probabilistic state estimation for AC/DC distribution network considering non-Gaussian coupling uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4949– 4960 (李幸芝, 韩蓓, 李国杰, 等. 考虑非高斯耦合不确 定性的交直流配电网两阶段概率状态估计 [J]. 电工技 术学报, 2020, 35(23): 4949–4960 (in Chinese))
- [9] Zhang X L, Xiao H, Gomez T, et al. Evaluation of ensem-

ble methods for quantifying uncertainties in steady-state CFD applications with small ensemble sizes[J]. Computers and Fluids, 2020, 203(1): 104530

- [10] Chen Y L, Ma W M. Uncertainty quantification for trace simulation of fix-II no. 5052 test[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 143(1): 107490
- [11] Zhao Y G, Li Y, Wang L Y, et al. The application of univariate dimension reduction method based on mean point expansion in the research of electrical impedance tomography uncertainty quantification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(18): 3776–3786 (赵营鸽, 李颖, 王灵月, 等. 基于均值点展开的单变元 降维法在 EIT 不确定性量化研究中的应用 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(18): 3776–3786 (in Chinese))
- [12] Fang S D, Cheng H Z, Xu G D, et al. A nataf transformation based on extended quasi monte carlo simulation method for solving probabilistic load flow problems with correlated random variables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 255–263 (方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于 Nataf 变换含相关性的扩展准 蒙特卡洛随机潮流方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 255–263 (in Chinese))
- [13] Yu Q Y, Liu C Y, Wu D C, et al. Radiation sensitivity analysis of multiconductor trans-mission Lines based on generalized polynomial chaos method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3591– 3600 (于全毅, 刘长英, 吴定超, 等. 基于广义混沌多项 式法的多导体传输线辐射敏感度分析方法 [J]. 电工技 术学报, 2020, 35(17): 3591–3600 (in Chinese))
- [14] Wu Q, Liu X M, Zou J Y, et al. Numerical solution and accuracy validation of electric field using response surface methodology and geometric feature charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2060–2066 (吴其, 刘晓明, 邹积岩, 等. 采用响应面法-几何特征模拟电荷法的电场数值求解及精度验证 [J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 2060–2066 (in Chinese))
- [15] Paul G S. The vacuum interrupter theory, design, and application[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008