第 51 卷 第 5 期：2311-2321 高电压技术 Vol.51, No.5: 2311-2321
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240211

阀侧套管数字孪生模型结构及构建方法

何永胜[1,2]，张施令[1]，杨　帆[3]，鲁宗相[2]
（1. 国网重庆市电力公司，重庆 400015；2. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084；
3. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044）

摘　要：换流变压器阀侧套管是特高压直流输电系统中的重要组件，传统故障预警与状态评估方式借助于大量物理试验和人工数据采集。该文围绕阀侧套管开展数字孪生模型研究，提出了电力设备数字孪生模型构建规范，并基于实体套管几何模型等建立了阀侧套管孪生模型。研究表明：阀侧套管数字孪生模型可有效计及阀侧套管芯子绝缘材料在−40~120 ℃温变和 10^{-1}~10^{3} Hz 频变的非线性特性，进一步应用阀侧套管孪生模型演算获得套管导电杆与绝缘油直接换热特性，且阀侧套管尾部温度接近变压器油温 90 ℃。提出的阀侧套管数字孪生模型显著提高了阀侧套管电磁-热流耦合模型的计算速度，实现了阀侧套管运行状态平台可视化。应用该文提出的电热耦合非线性数学模型和换流变阀侧套管数字孪生平台，生成套管相关结构参数，生产制造了缩比阀侧套管并通过负极性截波雷电冲击 575 kV 电压系列现场试验。基于所提出的数字孪生模型结构，搭建了换流变阀侧套管数字孪生可视化平台，有效提高了阀侧套管运维及监测效率，实现了对于阀侧套管可视化监测及数字孪生技术的应用。
关键词：换流变压器；阀侧套管；数字孪生；非线性；电热耦合；可视化

Structure Specification and Modeling Method on Digital Twin of Valve-side Bushing

HE Yongsheng[1,2], ZHANG Shiling[1], YANG Fan[3], LU Zongxiang[2]
(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The valve-side bushing of converter transformer is an important component in the ultra-high voltage direct current transmission system. Traditional fault warning and status evaluation methods rely on a large amount of physical experiments and manual data collection. Therefore, this paper focuses on the research of digital twin models for valve-side bushings, proposes a construction standard for digital twin models of power equipment, and establishes a valve-side bushing twin model based on geometric models of solid bushings. The research results show that the digital twin model of the valve-side bushing can effectively consider nonlinear characteristics of the insulation material of the valve-side bushing core in the temperature range of –40~120 ℃ and the frequency range of 10^{-1}~10^{3} Hz. Further application of the valve-side bushing twin model can obtain direct heat transfer characteristics between the bushing conductive rod and the insulating oil, and the temperature at the tail of the valve-side bushing is close to the transformer oil temperature of 90 ℃. The twin model proposed in this paper can significantly improve the calculation speed of the electromagnetic heat flow coupling model, and achieved visualization of the operating status platform of the valve-side bushing. The nonlinear mathematical model of electric thermal coupling proposed in this paper and the digital twin platform of the converter valve-side bushing were applied to generate the relevant structural parameters of the bushing. The scaled valve-side bushing was produced and manufactured, and the negative polarity cut-off lightning impulse 575 kV voltage series on-site tests were conducted. Based on the proposed digital twin model structure, this paper constructs the digital twin visualization platform for the converter valve-side bushing, effectively improving the efficiency of valve-side bushing operation and monitoring, and realizing the application of valve-side bushing visualization monitoring and digital twin technology.
Key words: converter transformer; valve-side bushing; digital twin; nonlinear; electro-thermal coupling; visualization

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5700-202324620A-3-2-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202324620A-3-2-ZN).

0 引言

换流变压器(简称换流变)阀侧套管是高压换流变的重要组件，也是换流变的安全薄弱点，其运行状况直接关系到换流变本体乃至整个换流站的运行安全[1-4]。一方面，运行中的换流变阀侧套管芯子承受大量的谐波电流分量，容易发生芯体过热并导致电气性能失效[5-6]。另一方面，换流变阀侧套管内部电场-温度场耦合关系复杂，局部放电问题较为突出，加重了换流变阀侧套管失效风险。因此，亟需一种针对投运套管进行可靠状态监测的手段，实现对于换流变阀侧套管的内部状态分析、评估及预警，确保换流变阀侧套管安全运行。

数字孪生技术是推动能源领域数字化智能化发展的重要引擎，将其应用于阀侧套管等高价值设备研发和状态监测评估中，构建特高压阀侧套管数字孪生模型，对于充分发挥数字孪生技术优势，推动阀侧套管研究和提高安全水平，有重要的学术价值和实际工程意义。

目前随着计算机技术以及电力系统智能化的推进，数字孪生技术在电力设备监测与评估领域已经得到初步应用，旨在建立实体设备到仿真模型的映射，实现对于电力设备的全周期状态监测与故障预警[7-10]。文献[11]通过基于配电变压器电路模型建立孪生模型，通过对低压绕组的测量实现对于中压绕组的波形反演；文献[12]基于多物理场耦合建立了变压器数字孪生模型，实现投运变压器不同负载工况下热寿命预测；文献[13]提出了基于数字孪生技术的多绕组变压器保护模型，实现对于实体变压器内部故障诊断。

在数字孪生模型建立过程中，对于监测设备进行准确的参数仿真计算是孪生模型准确性的必要基础[14]。针对换流变阀侧套管，国内外学者开展了一系列仿真工作，用于通过计算的方式描述换流变阀侧套管的运行状况。文献[15]建立了换流变阀侧气体套管仿真模型，讨论了换流变套管在不同运行工况下外绝缘性能；文献[16]建立 800 kV 特高压换流变阀侧套管仿真模型，研究了套管的电、热场分布特性及影响规律；文献[17]分析了阀侧套管典型结构及布置方式，仿真研究了不同电压作用下套管电场分布特性。文献[18]通过仿真研究了空间电荷及金属颗粒对于阀侧套管内电场分布影响。

换流变阀侧套管传统故障预警与状态评估需要借助于大量物理试验和人工数据采集，阀侧套管运维依赖经验且耗时长。因此，本文围绕阀侧套管开展数字孪生模型研究，基于实体套管几何模型等开展了换流变阀侧套管孪生模型的构建。目前电力系统中设备层面的数字孪生技术仍在起步阶段，对于设备数字孪生模型的系统结构框架还不明晰；同时对阀侧套管内部物理机理的正确认知是孪生建模的基础前提，其内部电热耦合关系有待进一步准确掌握；另外，尽管换流变阀侧套管的运行工况仿真方法趋于成熟，由于受限于仿真时效性的限制，其在数字孪生技术方面的应用还有待开发。

针对上述情况，本文围绕换流变压器阀侧套管提出了电力设备数字孪生模型的结构规范，基于内部物理机理及降阶算法研究成果，开展了阀侧套管孪生模型的构建，并通过仿真验证了本文所提出模型的有效性。本文提出了阀侧套管数字孪生模型结构，搭建了换流变阀侧套管数字孪生可视化平台，有效提高了阀侧套管设计及监测效率，实现了阀侧套管可视化监测及数字孪生技术应用。

1 阀侧套管数字孪生模型结构确定

数字孪生模型在电力装备领域具有重要应用前景，得益于数字孪生模型 3 个典型特征：①孪生模型能够深入设备内部开展微观、长时间尺度的仿真研究；②数字孪生模型具有高度的集成性以及实时性；③数字孪生模型能够实现设备运行模式的可视化。针对上述 3 个典型特征，结合数字孪生模型在电力设备的实际应用中存在全寿命周期监测实现难、环境模型内的数据与孪生体内部多物理场数据接口不统一、实施落地难的问题，本章创新地提出了特高压阀侧套管数字孪生模型结构，为电力设备的数字孪生建模研究提供了通用参考工具，规范结构框架如图 1 所示。

结构规范具体分为几何模型、材料模型、环境模型、物理场模型、驱动模型以及可视化模型 6 个部分。

1）几何模型。数字孪生几何模型参数反应监测设备内部每一个基本元件及相互之间的连接方式，且用于后续开展多物理场计算，是数字孪生模型的基本骨架。

2）材料模型。材料模型及其演变特性是设备数字孪生的建模重、难点之一，各部件材料物理参数与环境变量之间的耦合关系是限制多物理场计算

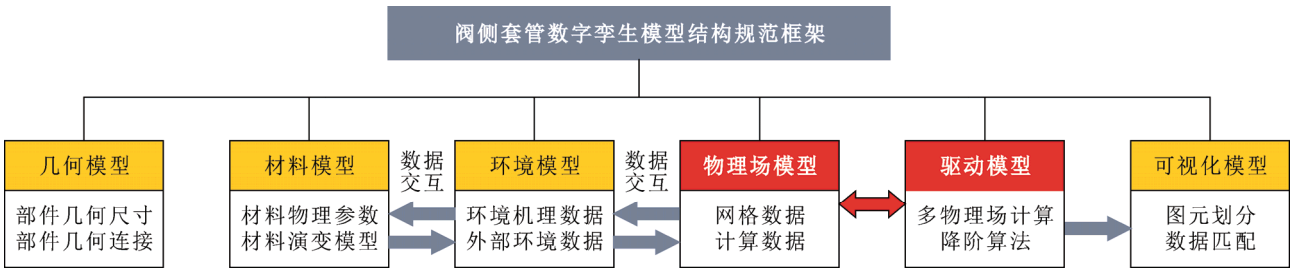


图 1　阀侧套管数字孪生模型结构框架

Fig.1　Structural specification framework of valve-side bushing digital twin model

精确度的重要因素，因此在建立阀侧套管电-热耦合模型时应当充分考虑材料参数可能涉及的演变效应。

3）环境模型。运行设备所处的环境会作为边界条件进一步影响设备运行状态。设备全周期状态监测过程中设备所处的环境状态通常会有显著差异，因而对设备所处环境进行充分考虑对于设备运行状态监测具有重要意义。

4）物理场模型。基于多物理场计算的模型是数字孪生模型的核心部分，直接决定了数字孪生模型的准确性，也是设备尺度数字孪生模型相比于其他级别的孪生模型最显著的区别。物理场模型与前述模型存在数据交互，通过材料模型和环境模型同步获取结构材料的物理参数和相应的计算边界条件。

5）驱动模型。数字孪生模型的工程应用对于计算实时性具有较高的要求，而开展多物理场仿真计算需要耗费大量的时间与算力，因此在构建孪生体的过程中需要通过降阶快速计算方法来驱动数字孪生模型的实时更新。

6）可视化模型。通过可视化表征其内部的参数变化，将设备的结构内容和运行状态以简明直观的方式展示出来，为监测评估提供直观高效的工具。

通过以上 6 个模型，建立了电力设备从实体结构→数据结构→虚实融合的数字孪生模型结构，可以实现阀侧套管的完整数字孪生建模。基于降阶算法的驱动模型使得孪生模型在保证计算准确性的基础上，满足电力设备状态监测的实时性要求。

2　阀侧套管数字孪生建模

基于前文所构建的数字孪生模型结构，分别通过 6 个模型的建立，从而开展换流变压器阀侧套管的孪生建模。

2.1　几何模型的构建

典型的换流变压器阀侧套管的几何结构如图 2 所示，主要由以下关键部分组成：①均压球；②中心导杆；③绝缘气体填充区域(高电压等级一般为六氟化硫气体)；④套管外瓷套及绝缘伞裙；⑤电容芯子极板(高电压等级一般为环氧树脂极板)；⑥铝箔；⑦连接法兰；⑧变压器升高座；⑨变压器油。

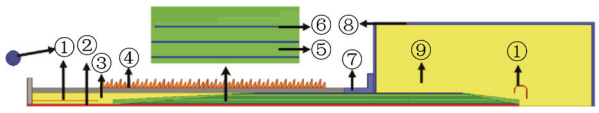


图 2　换流变阀侧套管几何结构

Fig.2　Structure of valve-side bushing of converter transformer

阀侧套管中心导杆作为套管载流部分，起到连接整流阀厅和换流变阀侧绕组的作用，通常设计为空心圆柱体；电容芯子极板是套管内绝缘的组成部分，是改善变压器绕组与出线母线端连接区域电场分布的核心组件，其结构为包覆与中心导杆外层的同轴圆柱，最外层连接瓷套与法兰；外瓷套、伞裙及法兰由于结构复杂，而大部分结构未参与有效计算，因而几何建模过程中在不影响计算精度的前提下进行相应简化，以减小建模及计算工作量。

2.2　材料模型的构建

多种绝缘材料的配合使用是套管设备特别是特高压套管绝缘性能的关键。与其他设备不同的是，特高压阀侧套管内部电场强度大、运行温度高，其变压器升高座内绝缘油在运行期间通常保持在 90 ℃以上。在如此电、热环境下部分绝缘材料存在物理参数随极端的环境状态变化而演变明显的情况，因此在构建套管数字孪生材料模型时，需同时对各材料物理参数和材料的演变模型进行建模。本研究以环氧树脂电容式特高压阀侧套管为例建模，其不同部件材料及参数如表 1 所示，其中 θ 为温度，℃。

在套管所采用的材料中，多数材料的导热率与热容都存在随环境温度变化而改变的非线性特征，气体材料尤为明显。但由于大多数非线性材料的热

属性对后续电热耦合机理研究及计算结果影响较小，在构建孪生材料模型时忽略不计。电容芯子极板的材料环氧树脂电导率会随着材料所处环境的温度变化而改变明显，温度升高时电导率增大，温度场的变化会进一步反过来影响电介质的损耗，温度场和绝缘介质电场相互耦合。

2.3 环境模型的构建

环境模型包括通过监测、传感装置采集到的套管运行工况下部分外部状态参量。对于一般电力装备，本文将环境模型分为激励环境和外部环境。构建孪生模型时，激励环境是必要的，这是因为不论是电力设备的表面运行状况，还是其内部多物理场机理，都需要电力系统输入设备的电压、电流等数据作为激励，这一类激励数据通常作为电力设备的常规监测目标可有效获取[19]。

2.4 物理场模型的构建

对阀侧套管的物理场建模主要覆盖电磁场和温度场，且二者之间存在耦合关系。为了考虑绝缘材料非线性，实现电热耦合场的快速计算并提高准确度，套管电热场计算中需要在确定散热路径下，通过有限元法结合模型降阶算法以得到套管内部电热场分布结果。

2.4.1 阀侧套管电场计算模型

运行中的阀侧套管所承受的典型电压波形为交直流复合电压波形，计算时需要综合考虑介电常数及电导率的影响，计算套管内部结构按照阻-容复合电场分布。对于已投运的换流变阀侧套管，其内部电场通过电场准静态场计算，可表示为：

$$(\gamma+\varepsilon\frac{\partial}{\partial t})\nabla\cdot(\nabla\varphi)=0 \tag{1}$$

式中：φ 为电势；γ 和 ε 分别为材料的电导率和介电常数；t 为时间。忽略时间效应，在静电场和恒定电流场中电位方程可描述为：

$$\begin{cases}\nabla\cdot(\varepsilon\nabla\varphi)=-\rho_0\\ \nabla\cdot(\gamma\nabla\varphi)=0\end{cases} \tag{2}$$

对于空间电荷 ρ_0 而言，在直流电场中有：

$$\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{E}=-\dfrac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\\ \nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度；$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量；ρ 为电荷密度。

阀侧套管存在的直流电场会使得套管内绝缘电容芯子极板中电荷定向移动形成空间电荷，根据式(3)能计算出各极板的空间电荷密度值。进一步，换流变阀侧套管要考虑直流输电系统潮流反送情况下极性反转电压和空间电荷作用。根据换流变压器阀侧套管工况和绝缘试验要求，在直流出线绝缘结构设计时所考核电压主要有直流耐压试验电压、交流耐压试验电压和极性反转试验电压 3 种形式，同时将其考虑至换流变阀侧套管数字孪生可视化平台外施电压模块中。在极性反转时，阀侧套管电压从 $-U$ 跃变到 U 时，可以简化为在 $-U$ 的电压上突然累加一个 $2U$ 的阶跃电压，即阀侧套管平板绝缘结构极性反转时的电场变化情况。假定上板有极性反转电压−15 kV 和+15 kV，下板接地，可得放电时间 τ 为 57.265 s。变压器油和油浸绝缘纸板不同时刻等位线分布如图 3 所示。

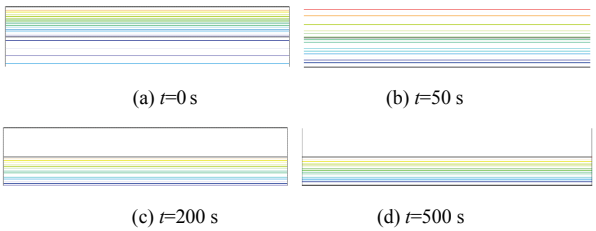
2.4.2 阀侧套管温度场计算模型

运行经验表明，阀侧套管发热问题导致电容芯子绝缘失效问题较显著。阀侧套管内部主要包含 2 个热源：中心导杆的欧姆损耗和电容芯子的介质损耗。换流变阀侧套管中心导杆和进出线端的载流体承担阀侧电流时产生的焦耳热为换流变套管的主要热源之一，单位体积发热功率 p 可表示为：

表 1 套管部件对应材料及其参数

Table 1 Materials and parameters of the bushing components

部件	材料	电导率/(S·m^{-1})	相对介电常数 ε_r	密度/(kg·m^{-3})	热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	导热率/(W·m^{-1}·K^{-1})
①	铝	3.8×10^{7}	1.0	2 700	900	230
②	铜	5.8×10^{7}	1.0	8 954	383.1	386
⑤	环氧树脂	$45.4\times e^{-10\,860/\theta}$	4.5	1 117	1 800	0.35
⑥	铝	3.8×10^{7}	1.0	2 700	900	230
③	SF_6	1×10^{-20}	4.0	—	780	—
④	电陶瓷	5×10^{-16}	3.6	7 536	1 400	0.27
⑨	绝缘油	2×10^{-13}	2.2	830.6	1 964	0.144
外部	空气	1×10^{-20}	1.0	—	1 005	—



(a) t=0 s (b) t=50 s

(c) t=200 s (d) t=500 s

图 3 套管平板绝缘结构反转过程等位线分布

Fig.3 Distribution of equi-potential lines during the reversal process of sleeve flat insulation structure

$$p=\frac{P}{V}=\frac{I^2R}{Sl}=\frac{I^2R}{(\pi(r_1^2-r_2^2))^2} \tag{4}$$

式中：P 为导杆发热功率；V 为金属部件体积；I 为流过导杆的电流；R 为金属电阻；S 为金属部件的表面积；l 为金属部件长度；r_1、r_2 分别为导杆内径和外径。考虑到换流变阀侧套管的电流含有较高的谐波分量，因此考虑谐波作用下的集肤效应的等效电流可表示为：

$$\begin{cases} R_{\mathrm{h}}^{\max}=\dfrac{R_{\mathrm{dc}}^{\max}(D^2-d^2)}{4\Delta h(D-\Delta h)} \\ \Delta h=\sqrt{\dfrac{\rho_{120}}{\pi f_{\mathrm{h}}\mu}} \\ R_{\mathrm{dc}}^{\max}=\dfrac{4\rho_{120}L}{4(D^2-d^2)} \end{cases} \tag{5}$$

式中：Δh 为套管载流导电管的谐波电流的趋肤深度；在 120 ℃的管温上限条件下，$R_{\mathrm{h}}^{\max}$ 为谐波电流下最大电阻。$R_{\mathrm{dc}}^{\max}$ 为 120 ℃时的最大直流电阻；L 是管的长度。ρ_{120} 为管材料在 120 ℃下的电阻率，μΩ/mm；μ 为管材料的磁导率，H/mm；f_{h} 为谐波频率；$R_{\mathrm{h_Cu}}$ 和 $R_{\mathrm{h_Al}}$ 分别为铜管和铝管的最大电阻值。载流导电管外径为 D、内径为 d。换流变的介质损耗功率可表示为：

$$P=2\pi f\varepsilon\tan\delta\cdot E^2 \tag{6}$$

式中：E 为交流电场强度；ε 为介质损耗角；f 为交流电压频率值；tanδ 为介质损耗角正切值。阀侧套管的温度场可等效为轴对称模型计算，并表示为：

$$\frac{1}{r}\times\frac{\partial}{\partial r}(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial T}{\partial z})+q_{\mathrm{v}}=0 \tag{7}$$

式中：λ 为材料热导率；T 为阀侧套管温度值；q_{v} 为单位体积热功率；r 为径向长度。另外，套管中的流体动力学守恒方程可表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\rho_t}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_t\boldsymbol{v})=0 \\ \dfrac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=\dfrac{1}{\rho_t}\nabla\cdot\sigma+g \\ \dfrac{\partial\rho_t T}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_t\boldsymbol{v}T)=\nabla\cdot(\dfrac{\lambda}{c_p}\nabla T) \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{v}$ 为流体的速度矢量；g 为重力加速度；ρ_t 为套管内流动介质密度值；c_p 为比热容值。通过上述计算方法，可以得出换流变阀侧套管内部的损耗以及温度场分布，为孪生模型的构建提供基础。根据绝缘介质在恒定电场作用下介质损耗，损耗功率 $q(r)$可表示为：

$$q(r)=\frac{U(r)^2}{R}=\frac{(U(r)d)^2S}{\rho d}=\sigma_{\mathrm{AC}}E(r)^2Sd \tag{9}$$

式中：S 为泄漏电流面积；d 为泄漏电流距离；σ_{AC} 为套管介质交流电阻率。绝缘介质在交流电压作用介质焦耳发热 $P_{\mathrm{ac}}(\omega)$可表征为：

$$P_{\mathrm{ac}}(\omega)=U_{\mathrm{RMS}}^2\omega C(\omega)\tan\delta(\omega) \tag{10}$$

式中：U_{RMS} 为外施电压有效值，V；ω 为角频率，rad/s；C 为电容量实部，F。

2.4.3　阀侧套管电热耦合非线性计算模型

对阀侧套管影响较大的内部物理场主要是电磁场和温度场。套管物理场可分为外部物理场(包括外部的瓷套形状、环境温度、环境湿度等)和内部物理场(包括套管内部的材料、几何尺寸、作用力、温度、电场等)。在完善的套管设计中，几何尺寸、材料都需要把满足不发生电场击穿作为基本考虑因素。由于电场与温度场又通过材料介质属性参数存在耦合关系，因此本文在物理场建模中，聚焦构建了阀侧套管内部的电场-温度场耦合模型。

在运行过程中，阀侧套管载流结构涡流发热和绝缘介质焦耳发热将在套管芯子内部建立温度梯度分布，且环氧浸纸复合材料的电导率与温度密切相关，而稳态条件下电场分布又取决于电导率。随温度、谐波频率的变化，阀侧套管绝缘芯子材料的介电常数和损耗呈非线性变化如图 4 所示。

对于 Yy 型联结换流变压器网侧、阀侧和 Yd 型联结换流变压器阀侧，i_{d} 为电流基波分量，a 相电流 i_{a1} 傅里叶级数展开式为：

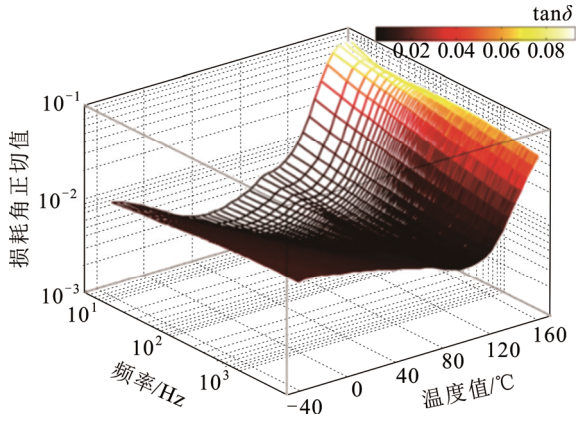


图 4　阀侧套管芯子绝缘材料温变和频变特性

Fig.4　Temperature and frequency characteristics of insulation material for valve-side sleeve core

$$i_{a1}=\frac{2\sqrt{3}}{\pi}i_d(\cos(\omega t)-\frac{1}{5}\cos(5\omega t)+\frac{1}{7}\cos(7\omega t)-\frac{1}{11}\cos(11\omega t)+\frac{1}{13}\cos(13\omega t)-\frac{1}{17}\cos(17\omega t)+\frac{1}{19}\cos(19\omega t)-\frac{1}{23}\cos(23\omega t)+\frac{1}{25}\cos(25\omega t)\cdots) \quad (11)$$

绝缘介质焦耳发热功率可用各次谐波电压作用下发热功率的代数叠加表征：

$$P_{ac}^{'}(\omega)=\sum_{n=1}^{\infty}|U_n|^2\, n\omega_0 C(n\omega_0)\tan\delta(n\omega_0) \quad (12)$$

式中：U_n为 n 次谐波分量幅值；ω_0为基波频率值。依据宽带介电谱试验数据，可拟合得到损耗角正切值的温变和频变特征参量具体数值，并计算出现峰值的频率点 ω_p。对于介电性能较复杂的复合材料相对介电常数 ε_{HN}，可引入多项式 H-N 方程，用于表征 m 个独立松弛极化过程，如式(13)所示：

$$\varepsilon_{HN}(\omega)=\varepsilon_\infty+\sum_{i=1}^{m}\frac{\Delta\varepsilon_i}{(1+(i\omega\tau_{HN_i})^{\beta_i})^{\gamma_i}}+\frac{\sigma_0}{i\varepsilon_0\omega^s} \quad (13)$$

式中：σ_0 为直流电导率；$\Delta\varepsilon=\varepsilon_\infty-\varepsilon_0$；$\varepsilon_\infty$为介质的光频相对介电常数；$\varepsilon_0$ 为真空介电常数；τ_{HNi} 为松弛极化的松弛时间；β 和 γ为介质的松弛峰对称分布参数；s 为常数。套管中心导体为简单空心载流结构，所以其电热耦合效应基本可不考虑。对于阀侧套管芯子，绝缘介质电导率为场强和温度函数，具体关系式可通过常数 a、b、A 确定。可得：

$$\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}(r\frac{\mathrm{d}T(r)}{\mathrm{d}r})+\frac{A\mathrm{e}^{aE(r)-\frac{b}{T(r)}}(E(r))^2}{k}=0 \quad (14)$$

式(14)所示的 2 阶微分方程存在闭式解，k 为阀侧套管介质热导率，通解表达式如下：

$$T(r)=a_1I_0(2\sqrt{\beta r})+a_2K_0(2\sqrt{\beta r})+\frac{\alpha}{\beta}-\frac{\gamma}{\beta}\ln r \quad (15)$$

式中：a_1、a_2 为待定常数；I_0 为零阶的第一种修正贝塞尔函数；K_0为零阶的第二种修正贝塞尔函数；α 为待定常数，其表征套管芯子径向电场分布和温度分布相互耦合并呈非线性关系。

阀侧套管物理场模型孪生实现中，将孪生体进行网格化处理，通过相应的网格模型实现分析计算。网格模型是对阀侧套管几何模型进行有限元剖分后的有限元网格参数。网格模型数据包括网格数据和计算结果数据。计算结果数据是通过后续降阶算法生成的对应设备几何模型的多物理场计算结果。网格数据是对套管几何模型进行有限元剖分后的有限元网格参数，网格数据中各节点不但会参与阀侧套管的多物理场计算，还会与可视化模型对接作为阀侧套管可视化的根据，因此构建其网格数据需要网格节点数据与网格数据。图 5 为阀侧套管网格化模型示意图。

特高压换流变阀侧套管数字孪生平台中通过相关公式快速计算数字孪生模型的边界条件，例如式(15)中的 2 阶微分方程存在闭式解，表明套管芯子径向电场分布和温度分布相互耦合并呈非线性关系。将相关参数代入后即可计算套管芯子的径向温度分布 $T(r)$，然后将其数值载荷加载在套管芯子上进行 3 维数字孪生模型的温度场计算，将有效缩短迭代次数和计算时间。另外，对于介电性能较复杂的复合材料，可引入多项式 H-N 方程，用于表征 m 个独立松弛极化过程如式(13)所示，其可有效定量描述阀侧套管芯子绝缘材料温变和频变特性，通过式(13)定量表达式代入换流变阀侧套管数字孪生平台中作为材料参数输入，可有效考虑频率和温度因素的影响，快速输出多物理场计算结果。

2.5 可视化模型的构建

可视化模型通过以下步骤构建：①数据导入。通过读取并识别阀侧套管多物理场计算中所用的网格模型，提取对应的网格架构作为可视化模型的基础。②网格划分。基于提取出的网格架构将对应的网格模型重组形成显示的最小网格单元。③图元装配。将多物理场计算结果匹配至与其对应的可视化网格进行图元装配，实现渲染网格的图元赋值，为后续渲染做准备。④渲染显示。对匹配后的网格进行上色渲染，实现模型的可视化呈现。其具体流程图如图 6 所示。

按照上述 6 个模型的建立，搭建完成的换流变压器阀侧套管数字孪生模型如图 7 所示。

3 阀侧套管数字孪生模型结果仿真验证

本文以典型特高压阀侧套管为研究对象，总长 14 120 mm，管身外径 810 mm，构建的中心导体几何模型长度为 14 120 mm，内径为 59 mm，外径为 98 mm；构建电容芯子极板模型的极板厚度为

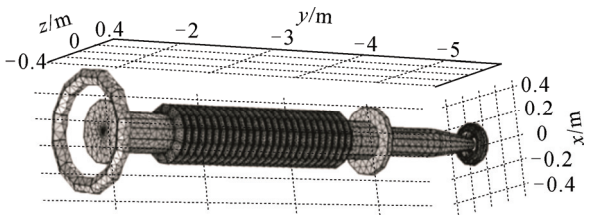


图 5 网格化模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of grid model

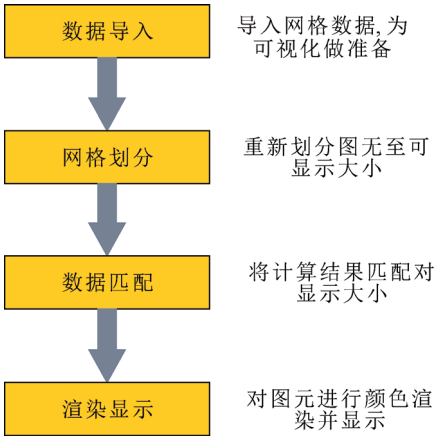


图 6　可视化搭建流程图

Fig.6　Flowchart of visual model building

3 mm，铝箔厚度为 1 mm，初始极板长度为 11 395mm，上阶梯差 380 mm，下阶梯差 160 mm，以此计算出末屏极板几何参数；套管瓷套头盔半径 643 mm，外壳长度 8 820 mm，内径 600 mm，伞裙对数 87，大伞半径 400 mm，高度 47.5 mm，小伞半径 385 mm，高度 47.5 mm，法兰内径 600 mm，外径 655 mm，高度 1 158 mm，变压器升高座高度为 4 047 mm，内壁厚度为 20 mm，外径 1 390 mm，顶部均压球内、外径分别为 2 190、1 000 mm，壁面厚度为 5 mm，底部均压球外径为 623 mm，其壁面厚度为 5 mm，其顶部开口半径为 168 mm；以套管顶部为上端，法兰以上的套管外瓷套及伞裙处于空气中，法兰以下的套管部件浸没在升高座中的变压器油内，从而与变压器阀侧相连。将网格最大尺寸设置为 10 mm，最小尺寸设置为 1 mm，增长率为 1.2。

3.1　电场分布特性

对上述套管几何模型及参数设置进行仿真计算，得到套管在交流激励下与直流激励下的电势、电场强度分布如图 8 所示。电容芯子极板强迫套管中心导杆与接地末屏之间的电场分布，起到改善电场分布的作用。

电容芯子极板在交流和直流电压作用下径向电位从高到低过渡，但电势分布仍存在一定差异。SF_6 区域在直流作用下电势非常高，在靠近套管顶部头盔区域这一现象较突出，如图 9 所示。在套管头盔区域，绝缘介质为 SF_6。SF_6 相对介电常数与环氧树脂及其他材料相近，但其电导率却小得多，最终导致 2 者作用下的电场分布不一致。

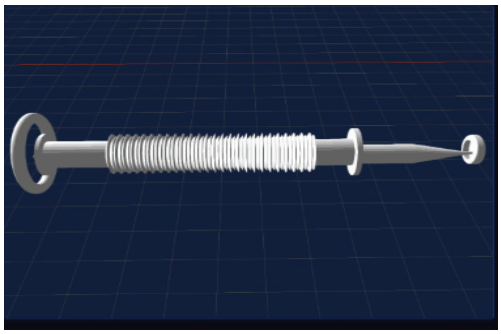


图 7　阀侧套管数字孪生模型

Fig.7　Bushing digital twin

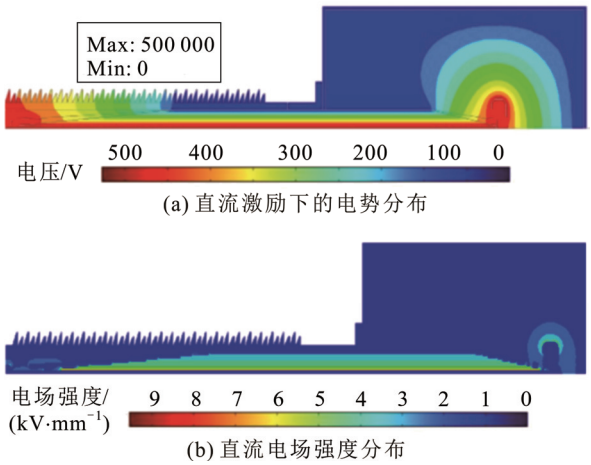


图 8　套管直流激励下的电势、电场分布

Fig.8　Potential and E-field distribution under DC excitation

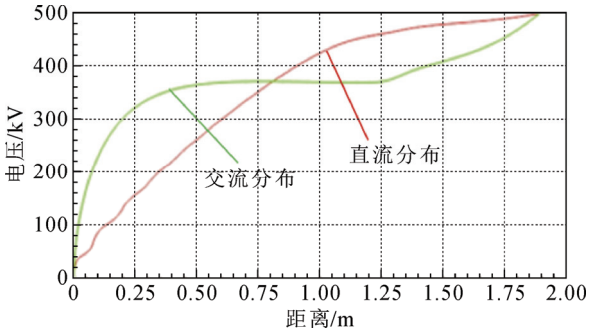


图 9　套管侧边交、直流激励下的电势分布

Fig.9　Potential distribution on the side of the bushing under AC and DC excitation

图 10 为实际运行工况，反映的是特高压阀侧套管顶部均压球和复合伞裙运行中的紫外观测结果。图中显示在实际特高压电压作用下阀侧套管顶部均压球无放电发生，且复合伞裙同样无外部放电现象，这表明电容芯子极板强制地改变了套管内绝缘的电场强度分布情况，体现了套管增强中心导杆周围空间绝缘性的作用，表明验证结果与实际套管工况相符。

3.2 套管损耗计算

首先，在未考虑油纸介电常数与温度的非线性时进行仿真计算介质损耗及套管整体温度场情况，再通过油纸介电常数与温度的非线性在电场及温度场之间的迭代，计算介质损耗及总损耗。介质损耗发热功率计算方式如 2.4.2 节所述，阀侧套管芯子绝缘介质损耗可表示为：

$$\tan\delta=\frac{1.8\times10^{12}}{\varepsilon f}\cdot\gamma \tag{19}$$

绝缘油的 tanδ 取 90 ℃下的结果 0.203%。图 11 所示为套管损耗密度分布图。套管损耗密度主要为导电杆的欧姆损耗，而介质损耗最大的区域在电容芯子内，其损耗分布与电场相似且大于其他区域，介质损耗与相对介电常数、损耗角正切和电场强度的平方成正比，因此根据上文中电场强度的分布图显示，电容芯子内部的介质损耗密度最大，在电容屏边缘同样产生聚集区域。图 11 表明阀侧套管中心导体发热显著，表征其在高次谐波电流作用下涡流损耗发热；同时套管芯体部分考虑其绝缘介质非线性特性作用焦耳发热较显著，其计算结果与阀侧套管实际运行状态下损耗发热特性较一致。

3.3 套管温度分布特性

套管轴向整体的温度场分布如图 12 所示。从轴向分布看，浸油的下瓷套部分温度几乎为油温，且整体温度高于位于空气中伞裙部分的温度。这是由于下瓷套部分位于变压器油箱中，变压器油温从试验中可得在 79.5 ℃，基础温度较高，散热方式主要为变压器油箱内抽油泵导致的油流循环至散热器散热。而套管伞裙部分充分与空气接触，空气温度为室温 19.7 ℃，较油温低，且伞裙结构与空气接触面积较大，散热效果好。

阀侧套管整体分为 4 部分：油枕、伞裙、法兰和下瓷套，0~555 mm 处为油枕处，无电容芯子环绕，温度轴向传递较大，导电杆与绝缘油直接换热且绝缘油整体温度接近一致，因此受绝缘油影响，温度稳定在 45 ℃附近，较其他部分较高；555~2 883 mm 处为上瓷套，即伞裙，此处温度轴向散热路径较大，在 130 mm 处稳定在 30~35 ℃，径向传递不随径向距离等梯度升高；2 883~3 065 mm 为法兰处，由于处于变压器油箱与空气交接处，温度梯度较大；3 065 mm 以下为油中下瓷套。温度场稳定后，整体温度接近变压器油温 90 ℃。图 13 为实际运行工况，反映的是在特高压阀厅内部观测到的阀侧套管表面



(a) 顶部均压球 (b) 复合伞裙

图 10 运行中的特高压阀侧套管紫外观测结果

Fig.10 UV observation results of the bushing on the side of the ultra-high pressure valve during operation

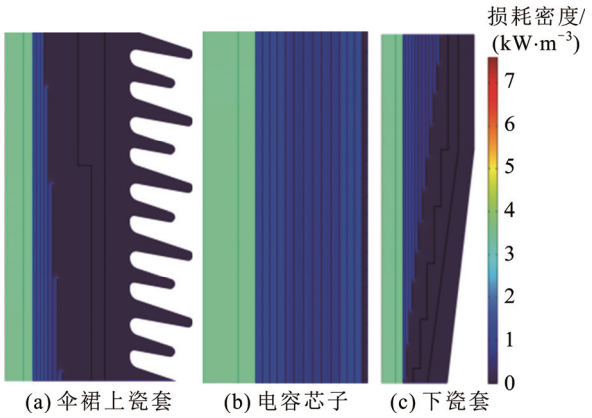


图 11 套管各区域损耗密度分布

Fig.11 Distribution of loss density in area of bushing

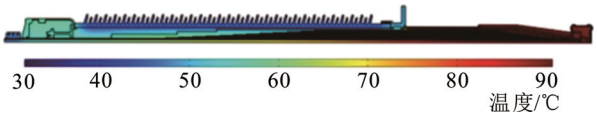


图 12 套管温度场分布图

Fig.12 Distribution diagram of bushing temperature field

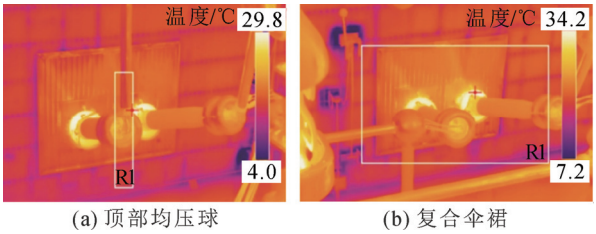


图 13 运行中顶部均压球和复合伞裙温度分布

Fig.13 Temperature distribution of top pressure ball and composite umbrella skirt during operation

温度分布情况，显示了特高压阀侧套管顶部均压球和复合伞裙运行中表面温度分布，其最热点温度分布在升高座附近(颜色最鲜亮位置)，套管复合伞裙部分温度分布较均匀。以上为在换流阀厅内部的实际测量结果，与仿真计算结果呈现相同温度分布规

律，表明仿真结果与套管实际工作工况相符。

4　阀侧套管数字孪生可视化平台展示

本文提出数字孪生可视化平台主要包括如图14所示的4方面：数据接口统一规范、面向数字孪生的数据传输方案、数字孪生模型在孪生平台的导入与配置列表、数字孪生平台的可视化实现。通过对电力装备数字孪生平台的创新，可实现更高程度的模型精度和详细度，以及更强的实时性。基于本文提出的换流变阀侧套管数字孪生建模规范，搭建了换流变阀侧套管数字孪生可视化平台，平台实时监测界面及窗口如图15所示。

应用本文提出的电热耦合非线性数学模型和换流变阀侧套管数字孪生平台，生成套管相关结构参数，生产制造了缩比阀侧套管如图16所示。

图16所示套管在试验电压255 kV，持续时间60 s条件下，顺利通过工频干耐受电压试验。当以3 kV电压对套管测量端子施加工频耐受试验电压时，持续时间为60 s下，其测量端子通过工频耐受试验电压。同时测量了套管芯体整体介质损耗因数及电容量随试验电压变化关系如表2所示。

表2表明在试验电压为10、76、126 kV试验条件下，套管介质损耗因数值保持在0.353%左右，且电容量值保持为397 pF，表明套管芯体设计具有良好的稳定性。在雷电冲击干耐受电压试验(BIL)中施加1次负极性全波雷电冲击500 kV电压，通过试验；施加2次负极性截波雷电冲击575 kV电压，通过试验；施加2次负极性全波雷电冲击500 kV电压，通过试验。在76、126 kV测量电压下，局部放电量测量值为2、3 pC，其局部放电值均满足要求。本文所开发的数字孪生平台具有拆解和多物理场分布可视化能力，该平台以先进的几何结构拆解功能，将电力设备的复杂几何结构得以解构，并通过视觉界面以高度直观的方式呈现。这一特性的实现使用户能够深入探索设备内部结构的精细特征，包括元件、连接和构造，进而推动了内部机制的深入理解。与此同时，该数字孪生平台还引入了多物理场分布的可视化，以呈现不同物理现象在设备内的分布情况。这涵盖了换流变阀侧套管电场、热场、磁场等多个物理场的分析，从而为用户提供了全面信息，以探究这些多重物理过程如何相互作用，以影响设备的性能和响应。

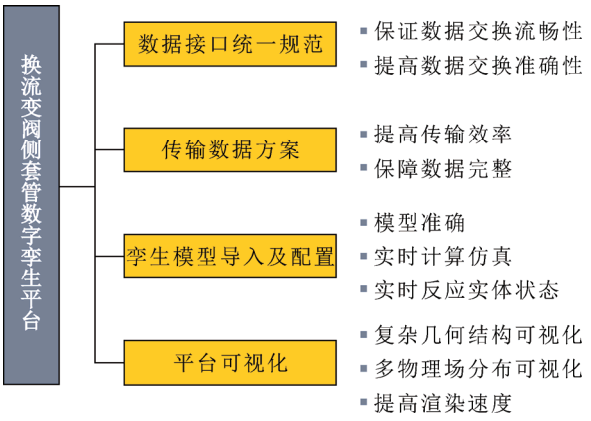


图14　数字孪生平台结构框架

Fig.14　Structure framework of digital twin platform

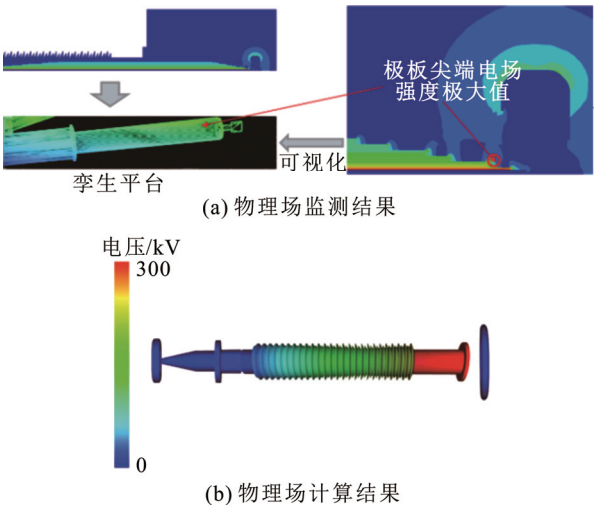


图15　换流变压器阀侧套管数字孪生监测平台

Fig.15　Digital twin platform for valve side bushing of converter transformer



图16　套管实物现场试验

Fig.16　Physical on-site testing of bushing

表 2 介质损耗因数及电容量随试验电压变化关系

Table 2 Relationship between dielectric loss factor and capacitance with test voltage variation

试验电压值/kV	工频耐压前		工频耐压后	
	tanδ/%	C/pF	tanδ/%	C/pF
10	0.353	397	0.355	397
76	0.353	397	0.355	397
126	0.353	397	0.355	397

5 结论

1）本文提出了针对电力设备的数字孪生模型结构，结构规范具体分为几何模型、材料模型、环境模型、物理场模型、驱动模型以及可视化模型 6 个部分，为包括换流变阀侧套管在内的电力设备数字孪生建模提供了参考。

2）依据所提出的数字孪生建模方法，基于内部物理机理及降阶算法研究成果，建立了完整的换流变压器阀侧套管数字孪生模型，应用阀侧套管数字孪生模型实现电-热耦合的快速计算，搭建了换流变阀侧套管数字孪生可视化平台，实现对于阀侧套管可视化监测及数字孪生技术应用，提升了阀侧套管状态监测效率。

3）开展有限元建模仿真，验证了所提出的阀侧套管数字孪生模型的有效性，并进行了孪生模型可视化平台展示，可对换流变阀侧套管电场、热场、磁场等多个物理场进行在线分析，实现了对于换流变阀侧套管运行状态实时评估，提出的数字孪生技术可有效支撑阀侧套管运行监测。

参考文献 References

[1] 张学成，檀金华，牛万宇，等. ±1 100 kV 直流输电工程换流变压器阀侧套管的设计[J]. 高电压技术，2012，38(2)：393-399.
ZHANG Xuecheng, TAN Jinhua, NIU Wanyu, et al. Bushings design of converter transformer's valve side of UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 393-399.

[2] 张施令，彭宗仁. ±800 kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计分析[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2257-2266.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design and analysis of insulation structure of ±800 kV valve side converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2257-2266.

[3] 杜伯学，朱闻博，李 进，等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报，2019，34(6)：1300-1309.
DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1300-1309.

[4] 谢 超，刘红太，盛 康，等. 换流变压器阀侧套管故障分析[J]. 南方电网技术，2011，5(2)：95-98.
XIE Chao, LIU Hongtai, SHENG Kang, et al. Analysis of valve-side bushing failures in converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 95-98.

[5] 周安春，高理迎，冀肖彤，等. 干式 SF_6 气体绝缘换流变压器阀侧套管电流致热型放电故障分析及现场修复[J]. 电网技术，2018，42(5)：1401-1409.
ZHOU Anchun, GAO Liying, JI Xiaotong, et al. Analysis and field-repair of current overheating faults on dry type SF_6 gas-insulated valve side bushing in converter transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1401-1409.

[6] 林 翔，刘 凯，吴子豪，等. 换流变阀侧高压套管缺陷动态热特性模型与温度预测研究[J]. 变压器，2022，59(10)：48-54.
LIN Xiang, LIU Kai, WU Zihao, et al. Study on defect dynamic thermal characteristic model and temperature of converter transformer valve-side high voltage bushing[J]. Transformer, 2022, 59(10): 48-54.

[7] 李 轩，梅 飞，沙浩源，等. 基于多状态数据均衡与 XGBoost 的特高压换流阀运行状态评估[J]. 高电压技术，2022，48(2)：644-652.
LI Xuan, MEI Fei, SHA Haoyuan, et al. Operation state evaluation of UHV converter valve based on multi-state data equalization and XGBoost[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 644-652.

[8] 刘 杉，侯俊义，周建辉，等. 基于强制空气冷却的换流变阀侧套管设计及特性[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4478-4487.
LIU Shan, HOU Junyi, ZHOU Jianhui, et al. Design and characteristics of side bushing of converter valve based on forced air cooling technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4478-4487.

[9] 靳铭凯，郭鹏鸿，陈维江，等. 磁场-结构场双向耦合作用对变压器绕组轴向振动过程的影响[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3296-3304.
JIN Mingkai, GUO Penghong, CHEN Weijiang, et al. Two-way magnetic-structural coupling effect on vibration process of power transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3296-3304.

[10] 赵 鹏，蒲天骄，王新迎，等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(2)：447-457.
ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power internet of things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-457.

[11] MOUTIS P, ALIZADEH-MOUSAVI O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 63(4): 1952-1963.

[12] 杨 帆，郝翰学，王鹏博，等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.

[13] 邓祥力，朱 慧，刘世明，等. 适用于变压器保护的数字孪生建模技术研究[J]. 电网技术，2022，46(12)：4982-4993.
DENG Xiangli, ZHU Hui, LIU Shiming, et al. Research on digital twin modeling technology suitable for transformer protection[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4982-4993.

[14] 林 牧，刘 凯，王乃永，等. 换流变阀侧套管数字孪生建模及热

特性分析[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1653-1662.
LIN Mu, LIU Kai, WANG Naiyong, et al. Establishment of digital twin model of converter transformer valve-side bushing and analysis of its thermal characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1653-1662.

[15] 张施令，彭宗仁. 高压换流变阀侧 SF_6 气体套管外绝缘结构设计[J]. 高压电器，2019，55(4)：117-124，132.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design of SF_6 gas bushing external insulation structure on high voltage converter transformer valve side[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 117-124, 132.

[16] 王　乾. 特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性与优化方法研究[D]. 天津：天津大学，2020.
WANG Qian. Electrothermal field distribution and optimization for a UHV converter transformer valve side bushing[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2020.

[17] 段　昊，汤　浩，刘　凯，等. 特高压换流变压器阀侧升高座区域弹性电接触部件电阻异常原因分析[J]. 电网技术，2023，47(11)：4810-4819.
DUAN Hao, TANG Hao, LIU Kai, et al. Causes of abnormal resistance of electrical contact elements in valve side ascending flange of UHV converter transformer[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4810-4819.

[18] 董　盼，杨　鑫，贾鹏飞，等. 10 kV 高压开关柜内部短路电弧冲击过程仿真及安全设计[J]. 高电压技术，2022，48(1)：328-336.
DONG Pan, YANG Xin, JIA Pengfei, et al. Simulation and safety design of internal short-circuit arc impact process of 10 kV high voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 328-336.

[19] 荆澜涛，董雪情，杨　超，等. 面向数字孪生应用的变压器温度场有限元降阶建模方法研究[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2408-2419.
JING Lantao, DONG Xueqing, YANG Chao, et al. Research on finite element reduced order modeling method of transformer temperature field for digital twin application[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2408-2419.



何永胜
1972—，男，硕士，教授级高工
研究方向为电力系统的运行控制
E-mail: heyongsheng@cq.sgcc.com.cn

HE Yongsheng
Professor



张施令(通信作者)
1986—，男，博士，教授级高工
研究方向为超/特高压绝缘结构的优化设计及 SF_6 气体绝缘设备运行状态检测
E-mail: 526793305@qq.com。

ZHANG Shiling
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-02-05　修回日期　2024-10-14　　编辑　卫李静