第 51 卷 第 5 期：2300-2310 高电压技术 Vol.51, No.5: 2300-2310
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240267

面向数字孪生应用的大容量 GIS 整间隔稳态温升及降阶模型研究

侯世英[1]，罗　澳[1]，杨　帆[1]，权帅峰[2]，霍小晶[2]，孙　帅[3]
（1. 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;
2. 西安西电开关电气有限公司，西安 710077;
3. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院)，广州 510080）

摘　要：超高压、大容量、数字化电网目标架构对高压开关领域提出了新的挑战。为研究 550 kV/8 000 A 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)的稳态温升，解决获取温度场时存在模型自由度大、计算时间长等问题，该文研究了 GIS 整间隔模型热特性并构建了基于本征正交分解(proper orthogonal decomposition，POD)方法的温度场降阶模型以面向数字孪生应用。首先，建立了基于物联网的电力设备数字孪生实现架构，提出了数字孪生驱动的 GIS 状态感知方法框架。基于该框架，搭建了以珠东北站示范工程中的 GIS 为原型的虚拟实体模型，分析了模型在 8 800 A 时的磁密、损耗、温度以及气流流速分布，进而搭建了大电流温升试验平台进行验证，试验测量结果与仿真结果吻合度高。其次，采用拉丁超立方采样方法构建该模型在不同工况下的快照矩阵输入参数样本集，进一步对温度快照采用 POD 方法生成温度场降阶模型。最后，对比了降阶前后模型的计算时长与误差：降阶模型相较全阶模型的计算时长由小时级降至秒级，阶数为 6 时均方根误差为 0.053%满足 POD 误差规范要求。该文研究结果可为大容量开关的设计和运维提供支撑，为数字孪生技术在开关设备领域的应用提供参考。
关键词：气体绝缘开关设备；数字孪生；多物理场仿真；降阶模型；本征正交分解

Research on Steady Temperature Rise and Reduction Model of High-capacity Complete GIS Bay for Digital Twin Applications

HOU Shiying[1], LUO Ao[1], YANG Fan[1], QUAN Shuaifeng[2], HUO Xiaojing[2], SUN Shuai[3]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The target architecture of ultra-high voltage, large capacity, and digitalized power grid poses new challenges to the field of high-voltage switchgear. To study the steady-state temperature rise of 550 kV/8 000 A gas insulated switchgear (GIS) and solve the problems of large model freedom and long calculation time when obtaining the temperature field, this paper investigates the thermal characteristics of a complete GIS bay model and constructs a temperature field reduced-order model based on the proper orthogonal decomposition (POD) method for digital twin applications. Firstly, the digital twin realization architecture for power equipment based on the Internet of Things is established, and a framework for digital twin-driven GIS state-awareness method is proposed. Based on this framework, a virtual entity model prototyping the GIS in the demonstration project of Zhuhai Northeast Station is constructed, and the distributions of magnetic density, loss, temperature, and airflow velocity at 8 800 A are analyzed; furthermore, a high-current temperature rise test platform is constructed for validation, and the experimental measurements are in good agreement with the simulation results. Secondly, the Latin hypercube sampling method is used to construct the input parameter sample set of the snapshot matrix of the model under different working conditions, and the POD method is further applied to the temperature field snapshot file to generate the temperature field downscaling model. Finally, the computational time and error of the model before and after the downscaling are compared: the computational time of the downscaled model is reduced from hourly

基金资助项目：国家重点研发计划 (2021YFB2401700)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401700).

order of magnitude to second compared with that of the full-order model, and the root-mean-square error of the model is 0.053% when the order is 6, which meets the requirements of the POD error specification. The results of this paper can provide supports for the design operation and maintenance of large-capacity switches, and provide a reference for the application of digital twin technology in the field of switchgear.

Key words：gas insulated switchgear; digital twin; multiphysics simulation; reduced-order model; proper orthogonal decomposition

0　引言

为促进“双碳”目标的达成，数字化新型电力系统建设亟需履行重要使命。超高压、大容量、数字化电网目标架构成为系统发展的必然趋势[1]，对高压开关领域也提出了新的挑战。目前，国内外开关设备厂商生产的 550 kV 组合电器设备主要以额定电流 6.3 kA 及以下为主，无法满足大容量目标网架工程的建设需要；且输送容量的提高以及设备长期处于大电流工况下运行，设备更易因接触劣化等原因造成过热性故障[2]。此外，在数字化背景下要实现快速、准确地获取设备内部状态，对计算实时性也提出了更高的要求。因此，研究这类更高通流性能的大容量高压开关设备的热点分布、建立面向数字孪生应用的气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)温度场降阶模型，对开展设备的产品设计优化、温度监测以及减少过热性故障发生具有工程意义，为数字化新型电网建设背景下的在线监测等提供理论依据[3]。

GIS 因其结构及电接触的复杂性，因内部接触不良造成的设备故障频繁发生，是影响电力系统正常运行的严重安全隐患之一。为避免温升过高产生的不良影响，研究及预测 GIS 内部温度场分析意义重大。目前已有不少研究采用多物理场耦合仿真方法求解设备的温度分布[4]。文献[5]引入了多重边界条件以分析 GIS 母线温度分布；文献[6-7]在气体绝缘设备环保化趋势的背景下[8]分别对 1 100 kV 特高压二维母线及 126 kV 断路器温升特性及耦合机理展开研究；文献[9-10]以 126 kV 的 GIS 为对象，分别对隔离开关及母线、断路器进行温升计算，对设备布置方式以及热点分布提供参考依据；文献[11]对不同运行工况下的 GIS 隔离开关开展温升特性研究，考虑将 C_4F_7N/CO_2 混合气体应用于 GIS；大容量 GIS 仿真方面的目前的研究工作较少，其中文献[12]针对 550 kV/8 000 A 大容量 SF_6 充气式套管的温升特性展开仿真研究，综合考虑了涡流、集肤效应等因素分析了其在 1.1 倍额定电流下的温度分布并分析了相关因素对热特性的影响；GIS 整间隔温升仿真方面，文献[13]以 252 kV 小型化 GIS 整间隔为研究对象搭建并计算其多物理场耦合仿真模型，探究了设备温度分布规律和小型化设计策略。上述工作主要针对 GIS 某个部件为对象开展，且电压等级大多为 550 kV 及以下，因此针对 550 kV/8 000 A 额定等级的大容量 GIS 整间隔热特性有待研究。

此外，随着电力设备数字孪生概念的提出，构建与设备实体相对应的数字孪生模型以实现物理实体到数字孪生体的映射已成为当前研究热点[14-15]。多物理场仿真作为基于模型驱动的数字孪生体构建方法的关键技术之一，通过场计算模型求得全局物理参量分布，可以用于面向性能分析的数字孪生场景[16]。然而，涉及多物理场求解的 3 维仿真模型计算时长往往为分钟至小时级别，难以满足数字孪生实时性的要求。电力行业数字孪生技术应用白皮书中也强调了在电力装备数字孪生模型中引入多物理场模型降阶技术的重要性，其可在提升计算速度的同时保障计算精度[17]；文献[18]针对变压器的二维温度场模型搭建了有限元全阶模型，并基于 POD 方法建立了相应的降阶模型，整体计算时间由小时级控制至秒级；文献[19]对换流变阀侧套管进行数字孪生建模，基于该模型分析套管内部在不同运行状态下的热特性；文献[20]基于 Twin Builder 建立了 110 kV 油浸式变压器的 3 维磁场降阶模型，实现了变压器磁场损耗的快速计算。目前关于电力设备数字孪生模型的研究主要集中于变压器和套管等，且大多降阶算法应用对象为 2 维模型，针对开关设备的相关研究较为缺乏。

针对上述问题，本文构建了基于物联网(internet of things，IoT)的电力设备数字孪生架构及数字孪生驱动的 GIS 状态感知方法框架。基于以上框架建立了 GIS 虚拟实体模型，分析了模型在 1.1 倍额定电流下的稳态温升，深入探究了 GIS 整间隔的磁密、损耗、温度以及气流流速分布特点，搭建大电流温升试验平台验证了模型的有效性；在该虚拟实体模型的基础上，建立了基于 POD 方法的 GIS 温度场

降阶模型以面向数字孪生应用，降阶前后的温度场计算时长由小时级降至秒级，阶数为 6 时均方根误差为 0.053%，确保了降阶模型的时效性和正确性。本文研究为进一步优化大容量气体绝缘开关设备的设计和运维提供了重要参考，为推动数字孪生技术在开关设备领域的应用以及开关设备智能化转型提供了技术支持和理论指导。

1 气体绝缘开关设备数字孪生框架建立

电力设备数字孪生是指利用数字化技术(如传感器、数据采集、虚拟现实、人工智能等)对电力设备进行建模、仿真和分析，以创建与实际设备相对应的虚拟实体模型，并实时反映实际设备的状态和行为[21]。针对电力设备的数字孪生技术需基于 IoT 平台实现以作为支持和实施数字孪生的基础设施。图 1 为基于 IoT 的电力设备数字孪生实现架构。

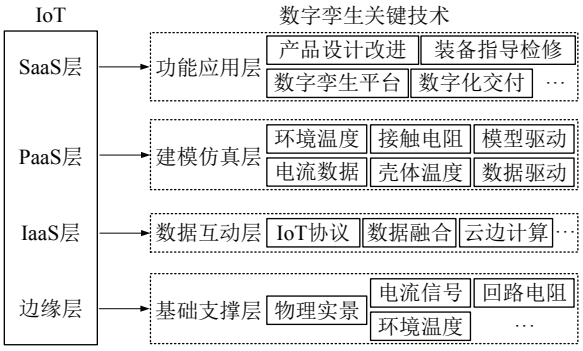


图 1 基于 IoT 的电力设备数字孪生实现架构

Fig.1 Digital twin implementation architecture of electric equipment based on IoT

图 1 中：功能应用层(software as a service，SaaS)为用户提供直观、易用的界面，使用户能方便地对电力设备进行监测、分析和优化，可提供一系列针对电力设备的数字孪生应用程序，例如监测和诊断软件、预测性维护工具、性能优化平台等；建模仿真层(platform as a service，PaaS)可提供一套用于构建虚拟实体模型的开发工具和模拟环境，包括模型建立、参数调整以及仿真运行等功能，使其能快速灵活地建立与测试电力设备数字孪生模型；数据互动层(infrastructure as a service，IaaS)提供云计算基础设施，用于存储、处理和分析设备数据，以支持 SaaS 和 PaaS 的运行；边缘层可实现实时数据处理、实时监测与控制，以提高响应速率和效率。这些层级共同构成了电力设备数字孪生技术的完整架构，从而实现对电力设备的监测、分析与优化。

GIS 温度场计算包括导体及壳体等结构间的热传导与流体传热等部分，为多物理场耦合计算问题，而复杂的耦合关系使得数值计算仿真模型难以实时获取设备运行状态。针对以上问题，结合图 1 所示架构，提出数字孪生驱动的 GIS 状态感知方法框架如图 2 所示。数据层包含有限元仿真模型的高保真数据以及 GIS 设备实体的运行监测数据；模型层基于物理信息得到多组快照数据，利用 POD 方法提取快照数据的最优正交基，以降低求解空间维度得到高保真降阶模型，构建能实时映射设备实体的数字孪生体；最终通过设备实体运行监测数据对 GIS 物理实体进行全面感知，以及在数字化平台上对虚拟实体进行 3 维展示、运行状态监测等，以协助工作人员进行检修。

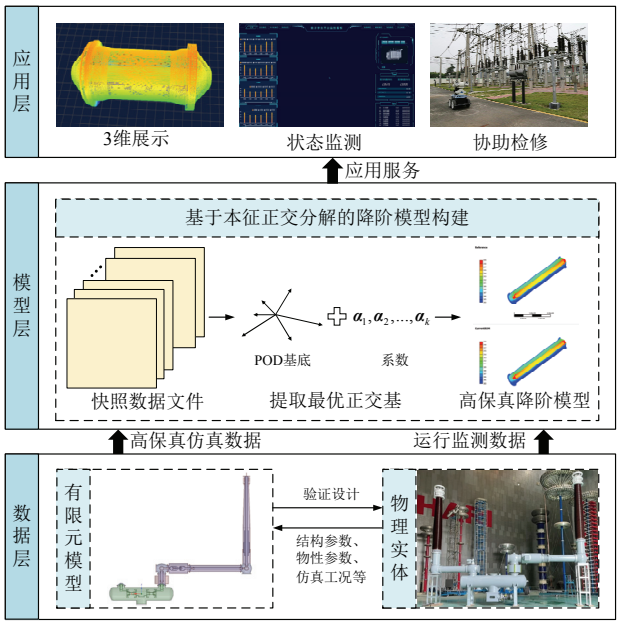


图 2 数字孪生驱动的 GIS 状态感知方法框架

Fig.2 Framework for GIS state perception driven by digital twin

2 GIS 设备虚拟实体模型建立

模型是数字孪生的重要组成部分，基于物理实体属性建立的虚拟实体模型可实现对现场运行的电力设备状态进行实时监测。本章详细描述了额定等级为 550 kV/8 000 A 的 GIS 物理模型及数学模型，明晰了模型所需计算参数及边界条件等设置，搭建了 GIS 虚拟实体并模拟了设备内部运算过程。

2.1 物理模型

本文选取位于珠东北站示范工程中设备型号

为 ZF8A-550 的 GIS 为研究对象，根据其实际运行工况及几何尺寸建立物理模型如图 3 所示。该组合电器设备共有 4 个独立气室：断路器气室、电流互感器与三通气室、隔离开关与母线气室以及套管与三通气室，其间由封闭的盆式绝缘子隔开，设备整体由内部导体、外部金属壳体以及其间的 SF_6 气体组成。

在整个 GIS 设备的通流回路中，存在多个电接触结构如图 4 所示，且通以大电流时电接触处的热效应尤为明显，需将接触电阻纳入物理模型以考虑其对热特性的影响[22-23]。本文设备选用表带触指，为尽可能保证接触电阻的仿真处理与实际工况相近，构建模型时在触指与导杆等接触部位间增加圆环等实体结构，并对回路电阻试验测得的电阻值反算出相应的电导率与热导率，将其赋实体模型以纳入计算。

2.2　材料参数及边界条件

GIS 各部件材料包括铝合金、铜、环氧树脂等，由样机制造厂家提供的 GIS 不同部件的材料属性如表 1 所示。

本文计算初始条件设置为：套管气室环境温度为 27.3 ℃，断路器气室为 23.5 ℃，其余气室为 20.8 ℃；电流大小为 8 800 A。模型外壁面设置为对流换热边界条件，根据经验参数计算式算得不同壁面传热参数输入计算。

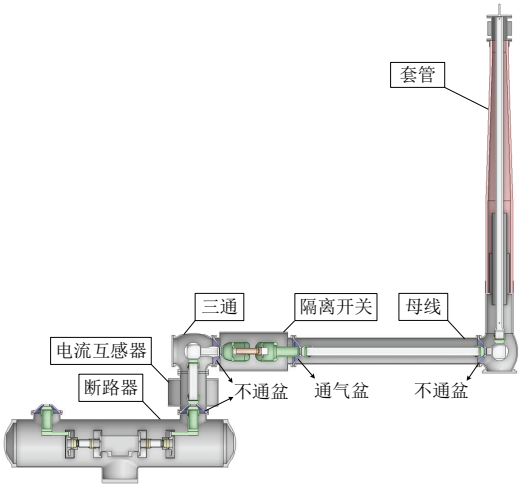


图 3　气体绝缘开关设备结构示意图

Fig.3　Structural diagram of GIS

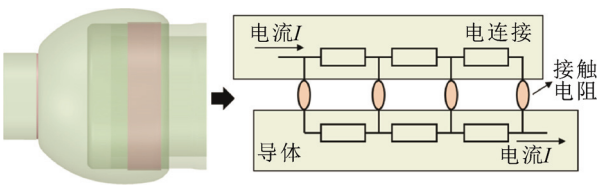


图 4　接触电阻等效电路模型

Fig.4　Equivalent circuit model of contact resistance

2.3　数学模型

GIS 设备运行时热量交换过程主要由热传导、热对流和热辐射 3 种方式组成，在产热与散热过程作用下得到稳态温升。其热源主要包括电流流经导体产生的电阻损耗及壳体在电磁感应下的涡流损耗。该过程主要由电磁作用产生，所产生的功率损耗为散热过程的热源。

计算该准静态电磁场时假设不考虑位移电流的影响，相应的电磁场方程组可表示为：

$$\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}\\ \nabla\times\boldsymbol{E}=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{B}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{J}$ 为总电流密度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度；ω 为角频率。

场量间存在本构关系有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}\end{cases}\tag{2}$$

式中：μ 为材料磁导率；σ 为材料电导率。

求解电磁场实际问题往往需对式(1)引入矢量磁位 $\boldsymbol{A}$ 和标量电位 φ 辅助求解，得到 3 维涡流场控制方程为：

$$\nabla\times\frac{1}{\mu}(\nabla\times\boldsymbol{A})=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}-\sigma(\mathrm{j}\omega\boldsymbol{A}+\nabla\varphi)\tag{3}$$

表 1　GIS 基本材料参数

Table 1　Basic material parameters of GIS

部件	材料	电导率/($S\cdot m^{-1}$)	热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)
端子板 三通盖板 隔离开关、电流互感器外壳	铝 5052-H112	2.03×10^7	200
母线外壳 断路器规则法兰	铝 5083-H112	1.68×10^7	120
触头座 导体杆	铝 6063-T6	3.1×10^7	201
套管中间屏蔽、接地屏蔽	铝 1050A-O	3.45×10^7	231
套管、断路器壳体	铝 5083-O	1.85×10^7	156
隔离开关动触头、触指	纯铜	5.8×10^7	380
断路器触头	铜铬合金	2.6×10^7	175.8
三通内导、壳体 断路器中间触头座、导电臂、传动机构框架 隔离开关动侧屏蔽 盆子法兰	铸铝 ZL101H-T6	2.3×10^7	150
三通屏蔽 断路器不规则法兰	铝 6A02-H112	2.6×10^7	175.8
盆子绝缘子	环氧树脂	0	0.16
盆子嵌件 断路器压气缸	铝 6A02-T6	3.1×10^7	154.9

式中：$\boldsymbol{J}_s$为外加电流激励；$\boldsymbol{J}_e$为涡流电流。

最后可由下式求得设备损耗：

$$P=\int_V \frac{\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{J}^*}{2\sigma}\mathrm{d}V \tag{4}$$

式中：P 为总功率损耗；V 为设备总体积；$\boldsymbol{J}^*$为总电流密度复共轭。

损耗作为热源载荷映射至热-流耦合场，伴随热传导、热对流以及热辐射过程直至设备达到热平衡，固气组分间热交换达到稳态。固体材料部件热传导数学模型如式(5)所示：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial T}{\partial z})+Q=0 \tag{5}$$

式中：λ 为介质导热系数；T 为温度函数；Q 为体热源密度。

对流传热作为气体绝缘设备主要的散热方式之一，其内部 SF_6 气体自然对流数学模型可由式(6)—式(8)描述为：

$$\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v})=0 \tag{6}$$

$$\rho\boldsymbol{v}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})=-\nabla p+\eta\nabla^2\boldsymbol{v}+\rho g \tag{7}$$

$$\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+Q_c=\rho c_p v\cdot\nabla T \tag{8}$$

式中：ρ 为流体密度；$\boldsymbol{v}$ 为流体速度；p 为流体压力；η 为粘度系数；g 为重力加速度；Q_c 为流体内热源项；c_p 为定压比热容。

热辐射过程主要发生在设备外壳内的各部件表面间以及壳体外表面与外界环境之间，辐射热量满足 Stefan-Boltzmann 定律，其中壳体外表面与空气间的辐射热量可表示为：

$$Q_r=s\varepsilon\sigma_1(T^4-T_{amb}^4) \tag{9}$$

式中：Q_r为辐射热通量；s 为辐射表面面积；ε 为物体发射率；σ_1 为 Stefan-Boltzmann 常数；T_{amb} 为环境温度。

2.4 GIS 虚拟实体运算流程

对设备实体进行实时数据采集，数据通过一定的运算流程时进行处理方可对设备进行数字化管控。结合前文提及的物理模型、数学模型及材料与边界条件设置，建立 GIS 虚拟实体运算流程见图 5。

GIS 各部件中的损耗分布作为温度场热源决定了温度场分布，而温度对金属材料的电导率参数影响较明显，因此温度计算需在每一步迭代时重复计算电导率以至收敛。在图 5 计算流程中设立 2 个设备实体输入端口，分别为实测运行电流与环境温度，根据设备数据可实现虚拟实体对设备实体的有效映射，是数字孪生中重要的一环。虚拟模型体在实体信息的基础上完成设备物理量计算后，得到的 GIS 热点分布可有效评估设备状态。

3 1.1 倍额定工况下的 GIS 热特性分析及试验验证

3.1 功率损耗分布

采用 Maxwell 涡流求解器求解电磁场及损耗结果。对导体截面施加 8 800 A 交流电后计算得出的 GIS 整间隔磁感应强度分布如图 6 所示。

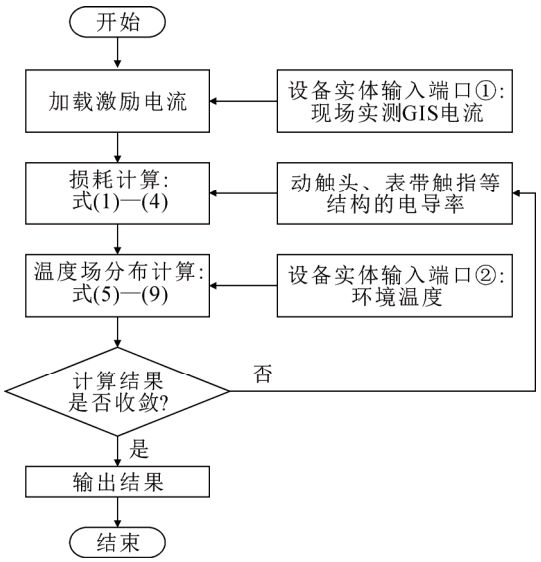


图 5 GIS 虚拟实体模型计算流程式

Fig.5 Virtual entity model calculation process of GIS

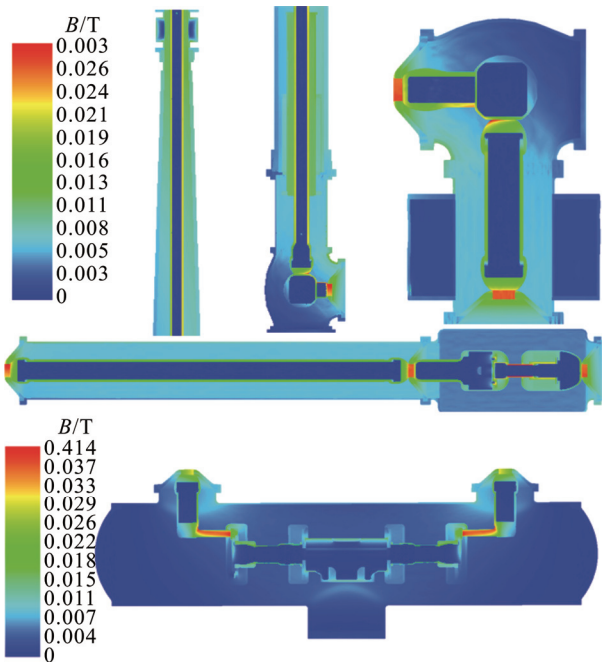


图 6 GIS 各气室磁感应强度分布云图

Fig.6 Magnetic field density distribution of each gas chamber in GIS

由图 6 可见，磁密从内到外逐渐增大，于通流导体外边缘达到峰值，电接触处磁密较为明显且在导电臂处达到最大值为 0.041 4 T，金属外壳上存在感应磁场。

工频交流下 GIS 各部件功率损耗由各自形状结构与材料参数决定。经计算 4 个不同气室的功率损耗如表 2 所示，其中套管和三通气室的损耗占比最大，占总损耗近 40%。

3.2　温度与流速分布

仿真计算得到 GIS 整间隔温度分布如图 7 所示。设置通流大小为 8 800 A 时设备最高温度约为 86.77 ℃，位于图 7 中 E 区域的断路器盆子嵌件与触头座电接触处，其次为 A 区域的套管导体顶部区域，分析其原因分别为：断路器损耗主要集中于两端导杆，因该部分导体规则，趋肤效应更为明显；由表 2 可知套管所在气室所占功率损耗最大，且所处垂直气室上下温差更明显。B 区域中母线盆子凹面处的电接触部位温升约为 77.11 ℃，相较于同一水平线上的电接触区，C 区域温升低于 B 区域近 5 ℃，分析其主要原因为 B 区触头座及触指等区域所处凹面处盆子，热气流堆积明显，散热效果差于 C 区域。

此外，设备温度整体呈“上高下低”的分布规律，外部壳体温度最小处位于断路器气室壳体底部约为 30.61 ℃，温度最高处位于套管气室散热栅处约为 66.61 ℃。

SF_6 气体流速分布云图如图 8 所示，气体在各气室上部流速较大，内部导体发热引起绝缘气体以浮力驱动流形态上下流动。流速最大处位于套管内部导杆顶部空心圆孔处流速矢量线图如图 8(c)所示，流速最大值约为 1.28 m/s，次最大流速处位于图 8(d)处，由图 8 结合图 7 的温度分布可知，套管所处纯垂直气室顶部内部温升整体高于底部主要原因为：重力导致的浮力驱动流使得套管气室内部气体流动，热气流多堆积于顶部，且顶部空间窄不利于散热。

图 8(a)、(b)分别为 GIS 垂直气室与水平气室流速矢量线分布，可看出导体附近的热量使内部 SF_6 气体向上运动。图 8(c)、(d)可看出流体在非等温自然对流下沿求解域边界向上流动到达顶部后向下流动最终形成环流，也是水平放置的设备温度呈“上高下低”的规律分布的主要原因。

表 2　不同气室功率损耗分布

Table 2　Power loss distribution in different gas chambers

气室	功率损耗/W	占比/%
套管和三通气室	1 853.77	39.98
水平母线与隔离开关气室	1 151.57	24.84
三通与电流互感器气室	549.04	11.84
断路器气室	1 082.06	23.34
合计	4 636.44	100

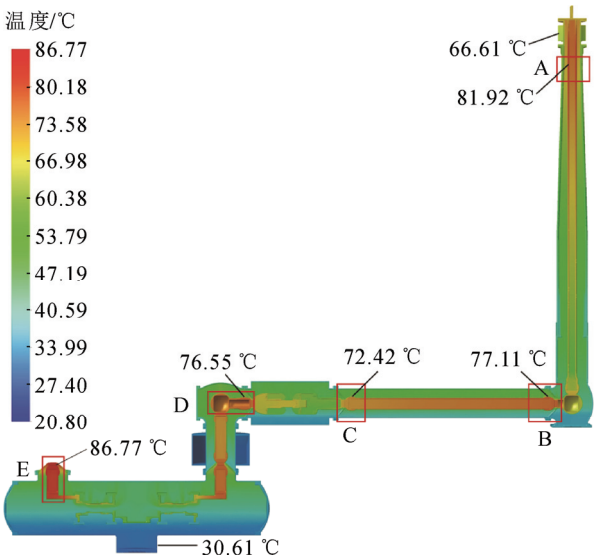


图 7　GIS 整间隔温度分布云图

Fig.7　Temperature distribution cloud chart of complete GIS bay

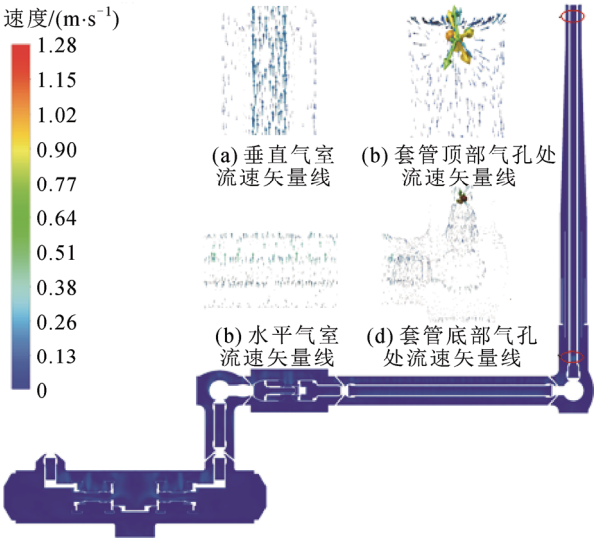


图 8　GIS 整间隔速度分布云图

Fig.8　Velocity distribution cloud chart of complete GIS bay

3.3　试验平台

为验证仿真结果准确性，针对本文研究对象原型搭建了 550 kV 大电流温升试验平台。试验依照标

准 DL/T 593-2016 进行，在厂房内对各样机所在回路接入升流器输出端，利用调压器和升流器对样品所在试验回路加载大电流，试验原理如图 9 所示。

试验通流前后以及样机装配过程中均采用直流电压降法对样机进行电阻测量(测量电流 100 A)，并记录以保证装配良好，同时记录初始环境温度。完成装配后将腔体抽至稳定真空度后[23]充入 SF_6，对完整样机一端连接 YSL-240-12000 型号的大电流温升试验装置施加 8 800 A 的工频交流电，使用 1 级允差 T 型热电偶进行温度测量，测量系统为 GTM-ⅢB 型温升测试装置。持续施加电流直至温升达到稳定(1 h 内升温不超过 1 K)记录各测点温度。

3.4 试验结果与仿真结果对比分析

各气室仿真结果与实测温度值对比如图 10 所示，可看出构建的 GIS 虚拟实体仿真结果与试验实测值有较好的一致性，最大误差位于气室 2 中隔离开关的铜质触指外约为 8.5 ℃。分析误差主要源于：

1）试验误差。由于试验在室内进行且样机所处环境温度存在波动，难以获得设备完全稳态时温度；样机金属材料发射率会随温度与环境发生变化，与仿真所设定的恒定值存在偏差。

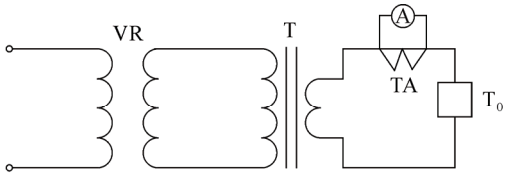
2）仿真误差。不同软件间的对热源损耗采取体载荷的加载方式会造成数据传递上的误差；且仿真模拟时未能考虑壳体中实际存在的环流，会加速壳体的温升以及内部 SF_6 对流传热；对流换热过程采用等效系数方式处理，壳体边界换热未能完全贴合实际模拟。

分析图 10 可见，本文建立的 GIS 虚拟实体模型温度场计算结果趋势合理且一致性较高，对大容量气体绝缘开关设备的温升计算可提供可靠参考。

4 面向数字孪生应用的 GIS 温度场降阶模型搭建

4.1 基于 POD 的温度场降阶方法

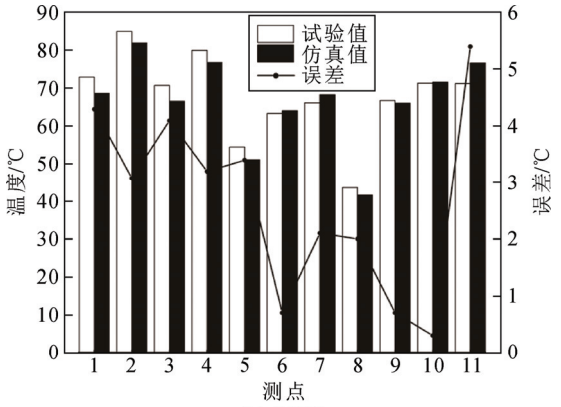
POD 法用于降维计算时，对已知原始数据所构



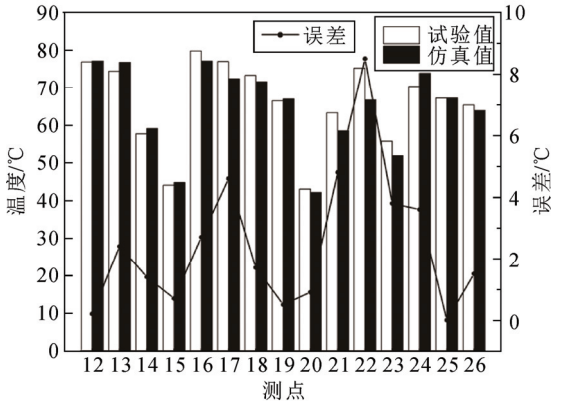
VR—调压器；TA—电流互感器；T—升流器；T_0—试验样品

图 9 温升试验回路原理图

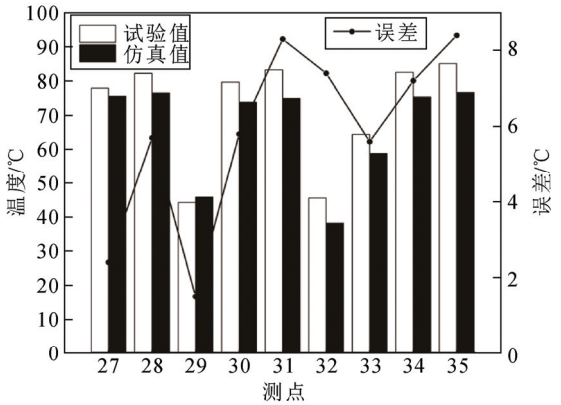
Fig.9 Schematic diagram of the temperature rise test circuit



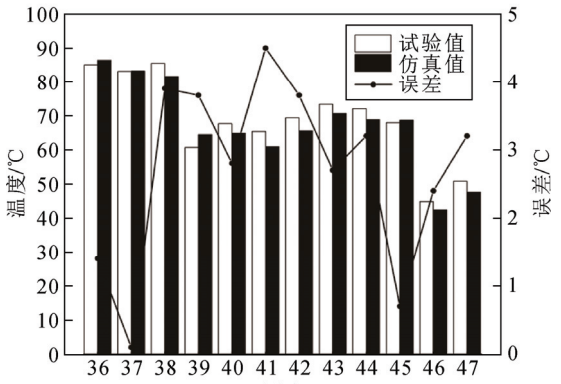
(a) 气室1



(b) 气室2



(c) 气室3



(d) 气室4

图 10 仿真结果与试验数据对比图

Fig.10 Comparison of simulation results with experimental data

成的样本空间进行 POD 基提取，该 POD 基可反映样本空间的主要特征；基于此最优正交基，可实现采用少量数据近似逼近原物理场中的大规模数据，从而达到降低原问题维度、提高计算速度的效果[24]。高维系统向低维空间映射示意图如图 11 所示，其中 Snapshot 为快照矩阵集中的快照，α_j(j=1, …, k)为第 j 个 POD 基底对应的系数。

首先，需构建原始数据构成的矩阵即快照矩阵。对本文第 3 章仿真工作设置不同运行电流工况，得到对应各条件下的温度数据构建快照矩阵如式(10)：

$$\boldsymbol{\psi}=\begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & \cdots & x_1^{(s)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & \cdots & x_x^{(s)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n^{(1)} & x_n^{(2)} & \cdots & x_n^{(s)} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：x 为对求解场中感兴趣的未知量，此处为温度值；n 为自由度个数；s 为工况数也为快照数。由于网格节点数往往远大于设置工况数，因此矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 行数 n 远大于列数 s。

该快照矩阵包含大量信息，为有效提取矩阵中的重要特征，可对矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition，SVD)有[25]：

$$\boldsymbol{\psi}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{U}=[\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2,...,\boldsymbol{u}_m]\in\mathbf{R}^{m\times m}$ 为左奇异阵；$\boldsymbol{V}=[\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\cdots,\boldsymbol{v}_n]\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 右奇异阵；$\boldsymbol{\Sigma}$ 为由快照阵 $\boldsymbol{\psi}$ 的奇异值组成的对角矩阵。

由矩阵运算可得出，式(11)中的 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 正交矩阵中的列向量分别为矩阵 $\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}$ 的特征向量。对角阵 $\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_n)$，其中的 n 个非零奇异值从大到小排列，即 $\sigma_1\geq\sigma_2\geq\cdots\geq\sigma_n\geq 0$。且可知矩阵 $\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}$ 的特征值与矩阵 Ψ 中的奇异值存在关系：$\lambda_i=\sigma_i^2(i=1,2,\cdots,n)$。

矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 中的奇异值可表征矩阵中的重要特征信息，且其中一部分则能体现矩阵几乎所有特性。若 $\boldsymbol{\Sigma}$ 中奇异值减小很快，则前 10%甚至 1%的奇异值则可表征 99%以上的特征信息。因此，为使得有效降低矩阵阶数，可剔除一些较小的奇异值以使得图 12 中的矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 近似成立。近似矩阵示意图如图 13 所示，原始快照矩阵 Ψ 可近似表示为：

$$\boldsymbol{\psi}\approx\boldsymbol{U}^{*}\boldsymbol{\Sigma}^{*}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}*} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{\Sigma}^{*}$为 $\boldsymbol{\Sigma}$ 截取前 k 个奇异值后的截断奇异值矩阵，且 $k<<m\,\&\,n$ (&表示和)；$\boldsymbol{U}^{*}$和 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}*}$分别为 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$ 截取前 k 列和前 k 行后的截断左、右奇异阵。

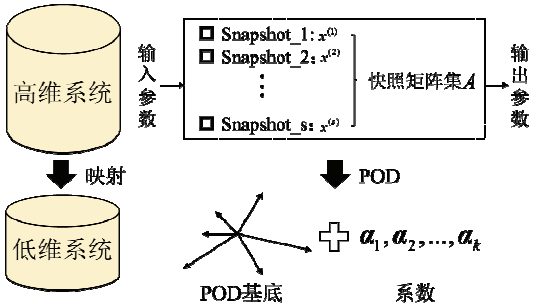


图 11　高维系统向低维 POD 基底空间映射

Fig.11　Mapping of high-dimensional system to low-dimensional POD base space

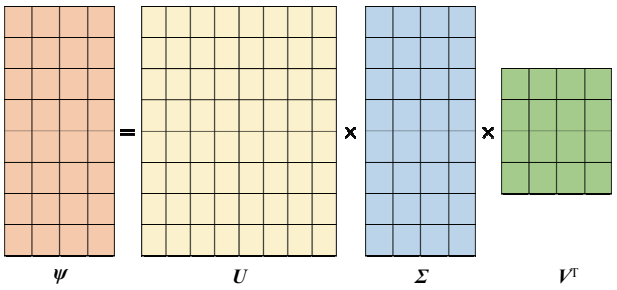


图 12　SVD 分解示意图

Fig.12　Schematic diagram of SVD decomposition

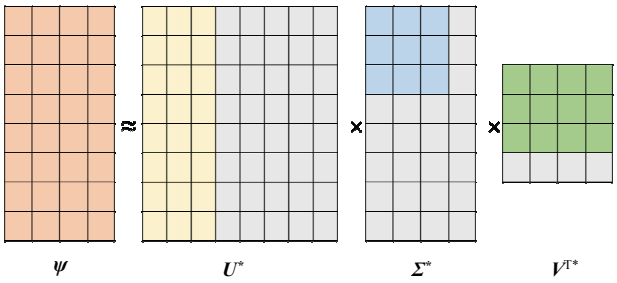


图 13　近似矩阵示意图

Fig.13　Schematic of the approximation matrix

$\boldsymbol{U}^{*}$的 k 个列向量对应的特征值最大，其列向量组成的矩阵则为 1 组标准正交基向量(POD 基底)，该矩阵即为由 POD 基底组成的降阶子空间。矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 中的任一列向量可由该基底与相应系数乘积线性表示如式(13)所示：

$$\boldsymbol{X}^{(i)}=\sum_{j=1}^{k}(\boldsymbol{X}^{(i)},\xi_j)\xi_j=\sum_{j=1}^{k}\alpha_j\xi_j \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{X}^{(i)}$为矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 中第 i 个列向量；正交基向量组表示为 $\xi_j=\{\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_k\}$。

4.2　温度场快照文件生成与导入

本文以关键产热部位损耗：套管导体损耗 P_1、表带触指损耗 P_2、单接触面损耗 P_3、隔离开关触指损耗 P_4、断路器触头座损耗 P_5、及环境温度 T_a 为

输入参数，以设备各部件温度为输出参数组成多组工况条件下的样本空间集。考虑设备实际运行状态时的环境温度及过热点温度范围，采用拉丁超立方抽样方法对 6 组输入参数范围中抽取样本点，该方法对数值模拟领域较为友好。部分实验样本设计点如表 3 所示。

基于表 3 中的 45 组输入参数设计点生成快照矩阵，遍历各设计点进行计算且迭代步数设为 1 000。在得到的温度场快照矩阵中，随机选取其中 80%组工况数据采用 POD 方法构建温度场降阶模型，剩余的 20%用于验证所构建的降阶模型在样本外是否满足计算要求。降阶模型生成后，根据图 14 可见，当阶数为 6 时，降阶模型均方根误差已降至 0.053%，则选用 6 为阶数构建降阶模型。最后，生成的降阶模型可在 Twin Builder 中对降阶前后的 GIS 温度场云图分布进行可视化处理，并将降阶模型导出为 ROM 模块可用于后续 GIS 温度场驱动系统的搭建。

要进一步搭建 GIS 温度场驱动系统，需接入现场实测运行电流通过电磁场快速计算模型获得损耗分布结果，结合实测环境温度数据从而快速获取 GIS 温度分布结果。本文所构建的温度场降阶模块输入端之一为 GIS 损耗，其为损耗快速计算模块的输出端。该损耗快速计算模块可结合 Maxwell 采用响应面方法实现，以构建电流与损耗间的对应关系实现快速计算，此部分不在本文讨论范围。系统搭建完成后，还可对云图结果的输入端增设查看云图的视角与存储路径，当输入数据更新时则可生成查看对应的温度云图[20]。

4.3 温度场降阶模型及有效性分析

降阶模型构建完成后，可查看每组训练快照中的原仿真模型 Reference、降阶模型 CurrentROM 以及两者间的误差 Difference 的云图分布，随机选取某组训练点下的结果云图对比如图 15 所示，对 GIS 整间隔模型各节点上的温度数据而言，该工况下的全阶模型温度场训练数据与降阶模型结果间的最大温度误差为 6.93 K，且整体误差分布均在 1%以下，可反映 GIS 温度场降阶模型的有效性。

由表 4 可看出，降阶模型计算效率相较全阶模型大幅提升，可满足开关设备面向数字孪生应用时温度场实时仿真的要求。本文构建的温度场降阶模块为在 Twin Builder 中构建 GIS 温度场驱动系统提供了基础，进一步可利用 Twin Deployer 形成部署

表 3 部分输入参数集样本点

Table 3 Partial input parameter set sample points

样本	P_1/W	P_2/W	P_3/W	P_4/W	P_5/W	T_a/K
1	309.827	11.165	6.226	0.978	26.129	300.817
2	474.291	15.465	12.758	7.457	3.161	302.817
3	17.447	10.305	4.445	11.943	14.007	310.150
4	382.922	2.565	3.851	7.956	1.885	293.483
5	53.994	0.415	5.039	15.432	26.767	291.483
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
41	401.196	2.135	5.632	11.445	8.903	304.15
42	346.375	10.735	0.882	10.947	15.283	304.817
43	529.113	5.145	8.304	16.429	0.609	297.483
44	145.363	1.275	11.273	14.934	2.523	285.483
45	583.934	18.045	9.789	4.467	19.111	309.483

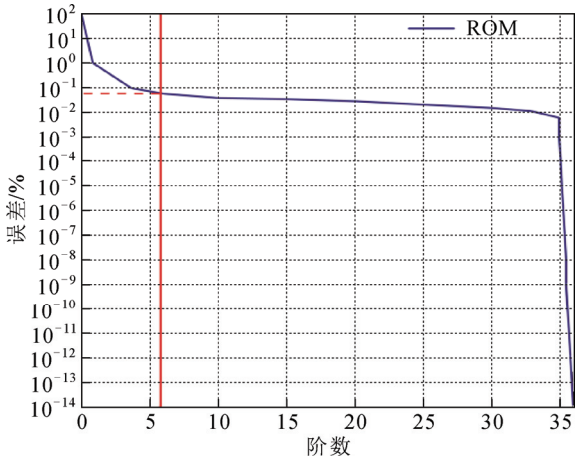


图 14 不同阶数下降阶模型误差

Fig.14 Errors of descending order models of different orders

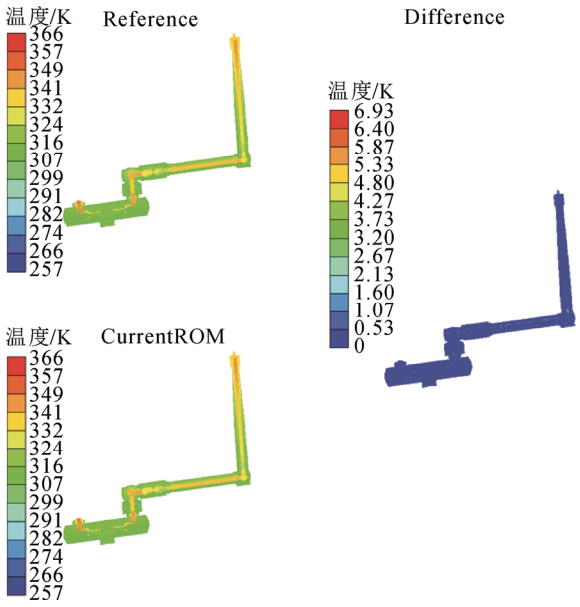


图 15 GIS 温度场降阶模型对比云图

Fig.15 Reduced-order model comparison cloud map of GIS temperature field

表 4　温度场结果的仿真计算时间对比

Table 4　Comparison of simulation calculation time of temperature field results

模型	求解时间/s	速度提升比
全阶模型	4 680	8 830.19
降阶模型	0.53	

数字孪生模型即.twin 文件的 SDK，该 SDK 可使驱动系统脱离 Ansys 环境运行产生仿真结果的功能。

5　结论

本文分析了额定等级为 550 kV/8 000 A 的 GIS 在 1.1 倍额定电流下的稳态温升，搭建大电流温升试验平台验证了模型有效性，构建了基于 POD 的温度场降阶模型以面向数字孪生应用。结论如下：

1）构建了数字孪生驱动的 GIS 状态感知方法框架，基于该框架建立了型号为 ZF8A-550 的 GIS 虚拟实体模型，分析了模型在 8 800 A 时的磁通密度、功率损耗、温度及流速分布，其中最大温度位于断路器盆子嵌件与触头座电接触处为 86.77 ℃，气流最大位于套管顶部导杆圆孔处为 1.28 m/s，由于浮力驱动流效应设备温度整体呈“上高下低”的规律分布。

2）采用拉丁超立方抽样法抽取设计点构成了快照矩阵样本空间，对矩阵中的温度数据采用 POD 方法提取最优正交基构建了温度场降阶模型，并在 Twin Builder 中实现了可视化显示。降阶模型均方根误差为 0.053%，降阶前后获取温度场分布结果的时间由小时级降至秒级，为面向数字孪生应用的 GIS 温度场驱动系统的搭建提供了基础。

参考文献　References

[1] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.

[2] CONG H X, JIN H. Research on undetected overheat fault of the GIS bus bar contacts based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14(2): 839-848.

[3] 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)：2769-2782.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.

[4] WANG B, JIA X Y, YANG J, et al. Numerical study on temperature rise and structure optimization for a three-phase gas insulated switchgear busbar chamber[J]. Energy, 2022, 254: 124463.

[5] 陈　强，李庆民，丛浩熹，等. 引入多重边界条件的 GIS 母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报，2016，31(17)：187-195.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of GIS bus bar based on coupled multi-physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.

[6] 崔兆轩，林　莘，钟建英，等. C_4F_7N/CO_2 混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. 电工技术学报，2023，38(9)：2491-2499.
CUI Zhaoxuan, Lin Xin, ZHONG Jianying, et al. Study on the temperature rise characteristics of C_4F_7N/CO_2 mixed gas ultra high voltage bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2491-2499.

[7] CHENG X, DU S, GE G W, et al. Electromagnetic-thermal-flow field calculation and optimal design of environment-friendly live tank multi-break vacuum circuit breakers[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217: 109081.

[8] 黄小龙，赵双伟，王　勇，等. 环保型高压电力开关设备研究进展综述[J]. 工程科学与技术，2023，55(3)：14-29.
HUANG Xiaolong, ZHAO Shuangwei, WANG Yong, et al. A review of research progress on environment-friendly high-voltage power switchgear[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 14-29.

[9] 侯国斌，傅明利，邓晓峰，等. GIS 温升的多物理场仿真与实验及热通量分布特性[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2322-2328.
HOU Guobin, FU Mingli, DENG Xiaofeng, et al. Multi-physics coupling simulation and experiment of temperature rise in GIS and heat flux distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2322-2328.

[10] WU X W, SHU N Q, LI H T, et al. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 277-280.

[11] ZHAO L H, WANG Z L, ZHU H Y, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnector under different operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3601-3610.

[12] 王流火，陶雄武，周俊宏，等. 550 kV/8 000 A 大容量 SF_6 充气式套管温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(3)：986-993.
WANG Liuhuo, TAO Xiongwu, ZHOU Junhong, et al. Simulation research on temperature rise characteristics of 550 kV/8 000 A large capacity SF6 inflatable bushing[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 986-993.

[13] 郭煜敬，张　博，王之军，等. GIS 整间隔温升仿真及典型通流结构优化技术研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(增刊 1)：257-265.
GUO Yujing, ZHANG Bo, WANG Zhijun, et al. Simulation technique on temperature rise of GIS bay and typical current-carrying structure optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 257-265.

[14] 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.

[15] 任卓翔，闫　帅，陈志福，等. 电工装备低频电磁仿真中若干关键问题研究现状及趋势[J]. 高电压技术，2024，50(3)：905-923.
REN Zhuoxiang, YAN Shuai, CHEN Zhifu, et al. State of the art and trend of several key issues in low frequency electromagnetic simulation of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 905-923.

[16] 杨 帆，吴 涛，廖瑞金，等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1505-1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.

[17] 中国电力企业联合会科技开发服务中心. 电力行业数字孪生技术应用白皮书 2022[R/OL].[2024-03-20]. https：//www. thepaper. cn/newsDetail_forward_19289460.
Science and Technology Development Service Center of China Electric Power Enterprises Federation. White paper on application of digital twin technology in electric power industry[R/OL].[2024-03-20]. https: //www. thepaper. cn/newsDetail_forward_19289460.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 张重远，刘迪程，高成龙，等. 基于 Twin Builder 的 110 kV 油浸式变压器 3 维磁场降阶模型及损耗分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：941-951.
ZHANG Zhongyuan, LIU Dicheng, GAO Chenglong, et al. Three-dimensional magnetic field model order reduction and loss analysis of 110 kV oil-immersed transformer based on twin builder[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 941-951.

[21] LI Z, LIU K, LIN M, et al. A zero-sample state evaluation model for valve-side bushing of UHV converter transformer oriented to digital twin under attribute analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(5): 1123-1134.

[22] 吴 吉，王增彬，吕 鸿，等. 考虑气流场影响的 GIS 温升计算与实验研究[J]. 高电压技术，2020，46(3)：815-823.
WU Ji, WANG Zengbin, LÜ Hong, et al. Calculation of GIS temperature rise considering effect of gas flow and experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 815-823.

[23] 王增彬，刘姝嫔，周宏扬，等. GIS 盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3820-3826.
WANG Zengbin, LIU Shupin, ZHOU Hongyang, et al. Multiphysics simulation method for GIS epoxy spacer temperature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3820-3826.

[24] ZHOU L, WEN J H, WANG Z K, et al. High-fidelity wind turbine wake velocity prediction by surrogate model based on d-POD and LSTM[J]. Energy, 2023, 275: 127525.

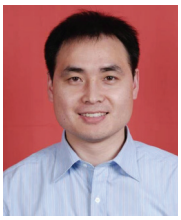
[25] 王青于，楚智霖，程建伟，等. 换流变阀侧套管极性反转暂态电场模型降阶[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2420-2431.
WANG Qingyu, CHU Zhilin, CHENG Jianwei, et al. Reduced order model of polarity reversal transient electric field of converter transformer valve-side bushing[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2420-2431.

[26] WANG Y, MA H H, CAI W H, et al. A POD-galerkin reduced-order model for two-dimensional rayleigh-bénard convection with viscoelastic fluid[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 117: 104747.



侯世英
1962—，女，博士，教授
主要从事电力装备多物理场计算方面的研究工作
E-mail: Houshiying@cqu.edu.cn

HOU Shiying
Ph.D., Professor



杨 帆(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作
E-mail: yangfan@cqu.edu.cn

YANG Fan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2024-02-26 修回日期 2024-09-20 编辑 卫李静