第 52 卷 第 4 期：1588-1599 高电压技术 Vol.52, No.4: 1588-1599
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250904

基于有限体积的油纸套管热-流耦合场数值计算和侵入式降阶方法研究

王青于[1]，高志杰[1]，黄克捷[2]，楚智霖[1]，刘　鹏[1]，彭宗仁[1]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510663）

摘　要：为了解决电力设备热-流耦合场仿真计算长期依赖国外进口商业软件、自主可控性不足且计算效率低的问题，提出了一种基于有限体积法的套管热-流耦合场全阶数值算法，并采用 POD-Galerkin 方法构建了套管热-流耦合场的侵入式降阶模型，解决了纯数据驱动的物理一致性和泛化能力差的难题。以 110 kV 油纸套管为研究对象，通过自主研发全阶模型计算结果、Fluent 商业软件仿真数据与实际套管温升试验数据的对比分析，验证了所开发算法的计算精度与工程适用性。在此基础上，利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)对套管热-流耦合场全阶模型输出的温度场和多维流场数据进行了模态分析，合理选取了正交基数量，将温度场自由度从 59 842 降至 6，流场自由度从 119 684 降至 40。研究结果表明：降阶模型与全阶模型的温度场和流场最大相对误差均小于 6%，同时计算效率提升了 3.06 倍。该文研究可为油纸套管热-流耦合场的自主化仿真与高效计算提供有效解决方案，对打破国外商业软件垄断具有重要意义。

关键词：油纸套管；有限体积法；热-流耦合；POD-Galerkin；侵入式降阶

Numerical Calculation of Oil-paper Bushing Heat-flow Coupling Field Based on Finite Volume and Intrusive Order Reduction Method Study

WANG Qingyu[1], GAO Zhijie[1], HUANG Kejie[2], CHU Zhilin[1], LIU Peng[1], PENG Zongren[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To solve the problem of long-term dependence on foreign imported commercial software, insufficient autonomy and low computational efficiency in the simulation calculation of heat-flow coupling field of electric power equipment, we put forward a full-order numerical algorithm based on the finite volume method of bushing heat-flow coupling field, and construct an intrusive reduced-order model of bushing heat-flow coupling field by using the POD-Galerkin method, which solves the problem of the purely data-driven physical consistency and the poor generalization ability. By taking the 110 kV oil-paper bushing as the research object, the computational accuracy and engineering applicability of the developed algorithm are verified through the comparative analysis of the computational results of the self-developed full-order model, the simulation data of Fluent commercial software, and the actual bushing temperature rise test data. On this basis, the temperature field and multi-dimensional flow field data which are output from the full-order model of bushing heat-flow coupling field are analyzed modally by using singular value decomposition (SVD), and the number of orthogonal bases is selected reasonably, so that the degree of freedom of the temperature field is reduced from 59 842 to 6, and the degree of freedom of the flow field is reduced from 119 684 to 40. The results of the study show that the maximal relative error of the temperature field and the flow field of the reduced order model and the full-order model is less than 6%, and the computational efficiency is improved by 3.06 times at the same time. The research can provide an effective solution for the independent simulation and efficient calculation of the heat-flow coupling field of oil-paper bushing, which is of great significance to break the monopoly of foreign commercial software.

Key words: oil-paper bushing; finite volume method; heat-flow coupling; POD-Galerkin; intrusive reduced-order

基金资助项目：南方电网公司科技项目(ZBKJXM20222166)。
Project supported by Science and Technology Project of CSG (ZBKJXM20222166).

0 引言

在深化电力设备数字化转型的进程中，实现设备运行状态的智能评估已成为提升电力系统可靠性的关键环节[1-3]。作为特高压输变电系统的核心安全组件，油纸套管的实时状态物理场仿真对于其数字化建设和智能运维具有重要价值。研究表明，温度场特征参数作为评估设备健康状态的核心指标，不仅直接关联绝缘材料的老化进程，更是制定预防性维护策略的重要数据基础。通过构建精准的温度场仿真模型，可有效解析电力设备内部传热机制，为设备数字孪生体系提供高保真度的温度态势感知能力，进而支撑智能电网的预测性运维体系建设[4-7]。

物理场仿真分析技术是利用有限元法(finite element method，FEM)求解微分方程描述的场问题的数值计算方法。该方法的起源可追溯到 20 世纪 50 年代，当时工程师和数学家从不同路线得出了相同的连续系统求解方法，即有限元法。随着仿真理论和计算机技术的进步，目前有限元法已成为一种非常成熟的技术，多种商业软件都具有电磁场有限元仿真计算功能。物理场仿真分析技术的应用可提高电力设备的设计和研究效率，缩短研发周期，降低研发成本，提高电力设备的性能和可靠性。谢更生等利用商业仿真软件对±800 kV 换流变阀侧套管内部温度进行计算[8]，并根据仿真结果与温升试验进行对比，验证了套管热设计的合理性；陈思等根据绕组的周期性分布特征，提出了基于等效热参数的干式变压器温度场快速仿真方法[9]，利用 COMSOL Multiphysics 得到了简化变压器热模型的温度场结果，经对比，简化热模型与完整热模型仿真的温度场分布特征几乎一致；魏本刚等采用有限体积法求解了 10 kV 油浸式变压器及分体式冷却器的温度场分布[10]，得到分体式冷却器在不同布置方式下的绕组热点温度，并将仿真结果与试验结果对比，而获得了分体式冷却布置方式对变压器热点温度变化趋势的影响。研究表明，随着数值计算方法的优化，有限元法[11-12]与有限体积法[13-14]可极大地提高数值模型的计算精度，但目前对油纸套管等电力设备温度场计算主要依赖于 COMSOL 等商业软件，存在垄断、信息泄露等安全问题，因此开发国产电力设备热-流耦合数值算法迫在眉睫。

此外，由于油纸套管等设备结构复杂，网格节点众多，沿用传统数值计算方法开展热-流耦合仿真，其时长可达小时级或天级，仅能用于设备的设计环节，并不具备向设备运维监测提供实时反演的能力。因此，为了实现电力设备多物理场内特性的在线可视化，亟需开发模型降阶技术，实现热-流耦合场快速计算。

本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)[15-16]与伽辽金(Galerkin)投影[17-18]结合是一种强大的降维和数值求解方法，尤其适用于解决复杂的流体力学问题。通过 POD 提取主模态，结合伽辽金投影的低维数值求解方法，不仅显著提高了计算效率，而且保留了原系统的主要物理特性。这使得 POD-Galerkin 方法在解决湍流、非线性流动、流体-结构相互作用等复杂问题时，具有显著优势。为了提高变压器等电力设备多物理场计算的速度，荆澜涛等提出将本征正交分解与有限元结合建立瞬态温度场降阶模型[19]，并结合实测数据给出了数字孪生建模与降阶计算流程，可以在保证求解精度的同时极大限度地提高求解效率；刘刚等提出一种结构保留的本征正交分解与离散经验插值方法相结合的计算策略[20]，根据油浸式电力变压器绕组的基本特点，建立了单分区分匝绕组传热模型，对其瞬态传热过程进行了计算，计算结果表明，该方法在保证精度的基础上计算效率提高了 5.1 倍。然而，由于有限元法基于变分原理或加权余量法离散方程，其离散格式本质上是数学近似，难以严格保证物理守恒律(如质量、动量和能量守恒)。而有限体积法通过控制体积的积分形式天然满足守恒性，所以本征正交分解与有限体积相结合的瞬态热流场降阶模型可以更好地解决电力设备内部的传热问题。Simple 算法是一个简单且稳定的压力-速度耦合方法，通过迭代求解速度和压力场，满足质量守恒条件，其适用于较简单的流动问题，但在计算复杂流动时可能收敛较慢。算子分裂压力隐式(pressure implicit with splitting of operators，PISO)算法增加了额外的压力-速度修正步骤[21]，在每次迭代中进行多次修正，从而加速收敛，更适合处理复杂流动问题，尤其是在需要快速收敛的情况下。因此，本文将本征正交分解与有限体积相结合，自主编程开发油纸套管的热-流耦合场计算全阶及降阶程序。

综上所述，为了给电力设备热-流耦合场仿真提供国产化替代方案，本文开发基于 PISO 方法的油纸套管热-流耦合场数值计算算法，基于有限体积法离散质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程，

对流体动量守恒方程进行多次压力修正，通过动量插值方法来消除不合理的压力场，自主研发油纸套管热-流耦合场全阶计算程序；基于 POD-Galerkin 构建套管热-流耦合场计算能量、动量和质量的低阶模型，实现油纸套管热-流耦合场仿真计算国产化和快速计算。

1 油纸套管热-流耦合场模型

1.1 油纸套管结构及边界条件

本文选取 110 kV 油纸套管。如图 1 所示，该 110 kV 油纸套管总长度为 2 973 mm，采用多层复合结构设计，主要由中心导体、电容芯体、绝缘介质、瓷套组件、油枕和连接法兰等部件构成。在运行工况下，套管法兰以上部分暴露于空气中，法兰下端与变压器油面保持 180 mm 的距离。其中，中心导体采用中空管状密封结构，电容芯体则通过在导体表面紧密绕制多层绝缘纸带形成梯度绝缘。上瓷套采用大小伞结构的伞裙，以确保良好的耐污闪性能。其整体结构自上而下依次为：上瓷套、连接法兰、法兰筒体、下瓷套以及底部的接线端子。

油纸套管运行过程中的热源主要是导管，当套管通流时，内部产生的热量通过热传导传递到导管表面。导管表面的热量通过热对流、热辐射和热传导传递到芯体和变压器油中，变压器油中热量的传递方式主要是热对流，固体中的传热方式主要是热传导。最终热量在上下瓷套表面通过热对流和热辐射传递到空气和油中。

当油纸套管的导管中通入 800 A 额定交流电流时，根据参文[22]对管状导体中电流分布的推导，采用复数形式的坡印亭定理得到其交流阻抗。可计算该 110 kV 油纸套管的额定功率为 86 000 W/m^3。导管和外瓷套等固体表面同时存在热对流和热辐射[9]。热对流的热通量 q_1 为：

$$q_1 = h(T_B - T_L) \tag{1}$$

式中：h 为对流传热系数，W/(m^2·K)；T_B 为壁面温度，K；T_L 为离壁面足够远的流体温度。

热辐射的热通量 q_2 为：

$$\begin{aligned} q_2 &= \varepsilon\sigma\left(T_B^4 - T_L^4\right) = \\ &\varepsilon\sigma\left(T_B^3 + T_B^2T_L + T_BT_L^2 + T_L^3\right)\left(T_B - T_L\right) \approx \\ &4\varepsilon\sigma T_m^3\left(T_B - T_L\right) = \\ &h_r\left(T_B - T_L\right) \end{aligned} \tag{2}$$

式中：ε 为物体的发射率；σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数，取 σ=5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4)；$h_r = 4\varepsilon\sigma T_{ag}^3$ 为等效辐射传热系数，T_{ag} 为固流体平均温度。

油纸套管的外瓷套与空气等效对流换热系数为 5 W/(m^2·K)[8]，套管初始温度和环境空气温度设置为 25 ℃，套管与油接触面等效对流换热系数设置为 100 W/(m^2·K)[8]，油温为 85 ℃，轴对称边界条件为 $\partial T/\partial r = 0$。材料物性参数如表 1、表 2 所示。

油纸套管的结构普遍呈现轴对称几何特征，其热-流耦合参数(如速度场与温度场)在轴对称条件下

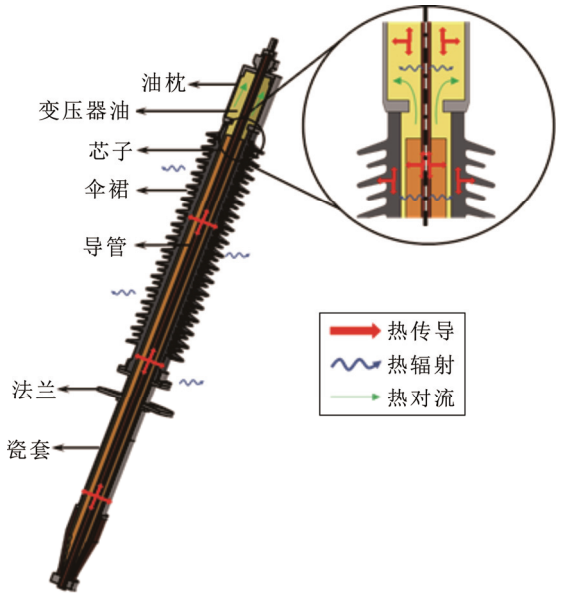


图 1 110 kV 高压油纸套管结构及传热机制

Fig.1 Structure of 110 kV high-voltage oil-paper bushing and heat transfer mechanism

表 1 固体材料参数

Table 1 Solid material parameters

部件	材料	密度/(kg·m^{-3})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})
法兰 油枕	铝合金	2 770	871	202.4
导电管	黄铜 H62	8 430	385	109
电容 芯子	油浸纸	900	2 310	0.26
绝缘子	瓷	2 850	1 000	3

表 2 变压器油材料参数

Table 2 Transformer oil material parameters

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	830.6
比热容/((J·kg^{-1}·K^{-1})	2 000
热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.103
动力黏度/(Pa·s)	0.001 29
热膨胀系数/K^{-1}	0.000 8

仅依赖于径向与轴向坐标，而独立于环向分量。这一特性允许将三维问题转化为二维轴对称模型，在完整保留物理场分布规律的前提下，显著降低计算复杂度与网格生成难度。另外，轴对称建模通过消除环向自由度，简化了边界条件设置流程，不仅增强了数值求解的收敛性，还可减少大量的计算资源消耗。该方法针对旋转对称结构的电力设备具有普适性，可在显著提升仿真效率的同时保持物理场预测精度。

1.2 热-流耦合有限体积全阶模型

油纸套管中存在空气和变压器油两种流体，针对流体的流动和传热过程，质量守恒、动量守恒和能量守恒方程在圆柱坐标系下表示如下：

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(ru_r\right)}{\partial r}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \tag{3}$$

$$\rho\frac{\partial u_r}{\partial t}+\rho\left(u_r\frac{\partial u_r}{\partial r}+u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial r}-\gamma\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}-\frac{u_r}{r^2}\right)=F_r \tag{4}$$

$$\rho\frac{\partial u_z}{\partial t}+\rho\left(u_r\frac{\partial u_z}{\partial r}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial z}-\gamma\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right)=F_z \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho c_pT)}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\rho c_pu_rT\right)}{\partial r}+\frac{\partial\left(\rho c_pu_zT\right)}{\partial z}-\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right)=S_T \tag{6}$$

式中：r、z 为径向和轴向坐标，m；u_r、u_z 为流体速度在径向和轴向的分量，m/s；t 为时间，s；ρ 为流体密度，kg/m³；p 为流体压强，Pa；γ 为流体动力黏度系数，Pa·s；F_r、F_z 为外力在径向和轴向的分量，N/m³；c_p 为定压比热容，J/(kg·K)；λ 为热导率，W/(m·K)；T 为温度，K；S_T 为热源，W/m³。

本文采用非结构网格下的控制容积积分法来离散控制方程，控制容积如图 2 所示，在非结构网格中，每一个节点都可以有不同数目的相邻节点，而且节点的编号也是任意的，对每个控制体积，将控制方程(动量守恒方程、能量守恒方程)进行体积分。通过高斯散度定理，将控制方程中的导数项转化为控制体积表面的面积分，从而建立起物理量在控制体积界面和内部的关系。积分后得到动量守恒方程、能量守恒方程在控制容积上的离散方程为式(7)、(8)。

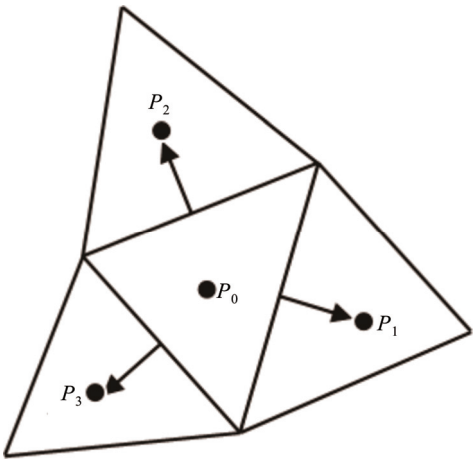


图 2 控制容积

Fig.2 Control volume

$$a_0^u u_{P_0}^{k+1}=\sum_j a_j^u u_{P_j}^k+b^u-V_{P_0}\nabla p_0^k \tag{7}$$

$$a_0^T T_{P_0}^{k+1}=\sum_j a_j^T T_{P_j}^k+b^T \tag{8}$$

式中：a_0^u 为控制容积单元 P_0 的动量守恒离散方程的系数；a_j^u 为控制容积单元 P_0 的临点 P_j 的动量守恒离散方程的系数；$u_{P_0}^{k+1}$ 为控制容积单元 P_0 第 $k+1$ 时步的速度；$u_{P_j}^k$ 为控制容积单元 P_0 的临点 P_j 第 k 时步的速度；b^u 为速度源项；V_{P_0} 为控制容积单元 P_0 的体积；∇p_0^k 为控制容积单元 P_0 第 k 时步的压力梯度；a_0^T 为控制容积单元 P_0 的能量守恒离散方程的系数；a_j^T 为控制容积单元 P_0 的临点 P_j 的能量守恒离散方程的系数；$T_{P_0}^{k+1}$ 为控制容积单元 P_0 第 $k+1$ 时步的温度；$T_{P_j}^k$ 为控制容积单元 P_0 的临点 P_j 第 k 时步的温度；b^T 为温度源项。

PISO 算法在每一时步的计算中分裂为一次预估和多步修正的关系：1）由上一时步计算中得到的流速 u_0 和压强 p_0 求解动量守恒方程，得到流速的中间值 u'_{m}，压强不变。2）一次修正：忽略邻点速度修正对主节点的影响，假设 u'_{m} 与一次修正值 u^*_{m} 之和、p_0 与压强一次修正值 p^*_{m} 之和满足式(7)。

$$a_0\left(u'_{\mathrm{m}P_0}+u^*_{\mathrm{m}P_0}\right)=\sum_{j=1}a_ju'_{\mathrm{m}P_j}+b^u-V_{P_0}\cdot\nabla\left(p_0+p^*_{\mathrm{m}}\right) \tag{9}$$

求解式(9)可得节点的一次修正值 u^*_{m}，通过离散，可得到有限容积界面的速度修正值，后代入质量守恒方程可以解得节点的一次压强修正值 p^*_{m}，修正后流速变为 u''_{m}，压强变为 p'_{m}；3）二次修正：忽略邻点速度修正对主节点的影响，假设 u''_{m} 与二次修正值 u^{**}_{m} 之和、p'_{m} 与压强二次修正值 p^{**}_{m} 之和满

足式(7)。

$$a_0\left(u''_{\mathrm{m}P_0}+u^{**}_{\mathrm{m}P_0}\right)=\sum_{j=1}a_j u''_{\mathrm{m}P_j}+b^u-V_{P_0}\cdot\nabla\left(p'_{\mathrm{m}}+p^{**}_{\mathrm{m}}\right) \tag{10}$$

求解式(10)可得节点的二次修正值u^{**}_{m}，通过离散，可以得到有限容积界面的速度修正值，后代入质量守恒方程可以解得节点的一次压强修正值p^{**}_{m}，修正后流速变为u'''，压强变为p''。

本研究提出了一种基于 PISO 算法的非结构网格求解方法，用于求解不可压缩黏性流体的热-流耦合问题。该方法的核心在于其核心是处理压力与速度的耦合关系。计算流程如图 3 所示，首先假设压力场，求解动量方程得预测速度场；因该速度场常不满足连续性方程，故构建压力修正方程，修正压力和速度，在一次校正步的基础上，二次修正压强与速度。具体步骤为初始化物理量和边界条件，经预测、压力修正并检查收敛性，不满足则继续迭代，满足则输出结果。该方法为非结构网格下的热-流耦合问题提供了有效的数值求解方案。

上述方法得到的二次修正后的u_r、u_z和p可使速度场和压力场更好地同时满足线性化的动量方程与质量守恒方程。同时，对于非稳态问题，若在一个时间层次的推进中总是用初始时刻的流场计算离散方程系数，那么完成第二步修正也就完成了一个时间层次推进，可进入下一个时间层的计算。

1.3 热-流耦合场有限体积降阶模型

油纸套管温升涉及流场与温度场的耦合，因此，引入降阶算法需要同时考虑温升计算中的动量守恒方程和能量守恒方程。首先，根据式(7)、式(8)，可得到油纸套管热-流耦合场计算控制方程的通用离散形式为：

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{G}^{k+1}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{G}^{k}+\boldsymbol{Q} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{L}$ 为有限体积系数矩阵，矩阵中各元素根据热流场中各有限容积的物性参数、位置及时间步长形成；$\boldsymbol{Q}$ 为有限体积右端矩阵，与各有限容积的流速、温度有关；$\boldsymbol{G}^{k+1}$ 与 $\boldsymbol{G}^{k}$ 分别为第 $k+1$ 时步和第 k 时步的变压器油状态参数，包括径向速度、轴向速度及温度。当初始温度、初始流速及边界热流条件设置完成后，便可通过式(11)进行迭代求解。得到瞬态过程中整个求解域的温度和流速变化。

油纸套管热-流耦合场的降阶计算流程如图 4 所示，通过油纸套管全阶计算程序计算得到油纸套管在800 A工频电流下不同时刻的油纸套管热-流耦合场样本数据，其中油纸套管温度场、流场样本如图 5、图 6 所示。利用计算所得到的 d 个时间序列下的热-流耦合场样本构建了快照矩阵 $\boldsymbol{S}=[\boldsymbol{G}^1\ \boldsymbol{G}^2\ \boldsymbol{G}^3\cdots\boldsymbol{G}^d]$，通过对快照矩阵进行主成分分析和奇异值分解，得到油纸套管热-流耦合场的 POD 基函数$\boldsymbol{\varphi}_i$与谱系数α_i，利用热-流耦合场控制方程建立时间与谱系数的函数，通过基函数与谱系

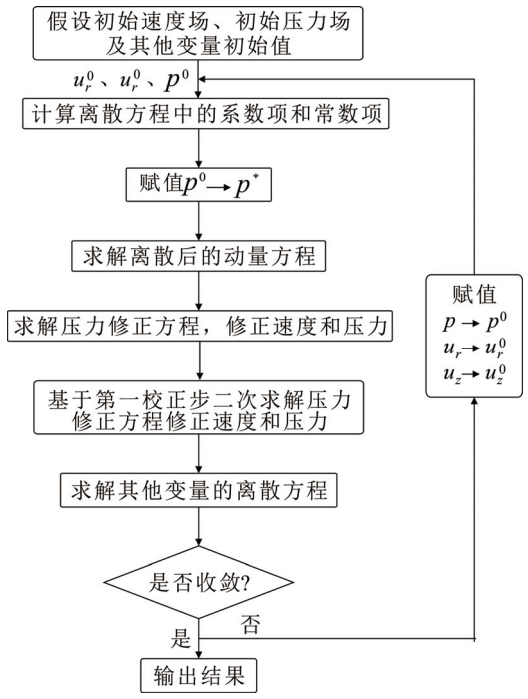


图 3 热-流耦合全阶算法计算流程

Fig.3 Calculation flow of full-order algorithm for heat-fluid coupling

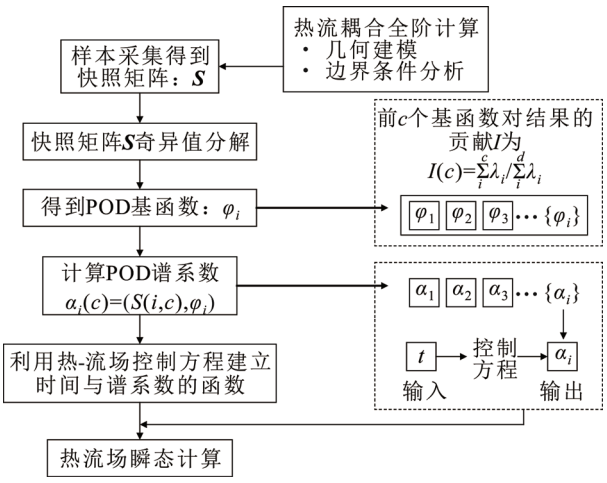


图 4 热-流耦合降阶算法计算流程

Fig.4 Calculation flow of coupled heat-flow full-order algorithm

数的线性叠加可得到热流场第 k 时间步的分布 $\boldsymbol{G}^k$：

$$\boldsymbol{G}^k = \sum_i \alpha_i^k \boldsymbol{\varphi}_i^k \tag{12}$$

式(12)中不同物理量对应的基函数和谱系数的个数由各自的数据特征决定。将式(12)代入式(11)可得：

$$\boldsymbol{K}\sum_i \alpha_i^{k+1}\boldsymbol{\varphi}_i^{k+1} = \boldsymbol{L}\sum_i \alpha_i^k \boldsymbol{\varphi}_i^k + \boldsymbol{Q} \tag{13}$$

如图 5、图 6 所示，POD 模型降阶及重构方法就是求 1 组维数小于 d 的 c 维标准正交基 $[\boldsymbol{\varphi}_1\ \boldsymbol{\varphi}_2 \cdots \boldsymbol{\varphi}_c]^{\mathrm{T}}$，使得用低维正交基映射得到的数据接近真实列向量里的数值，经推导转化为数学语言，即对 $\boldsymbol{S}$ 进行奇异值分解，求矩阵的左奇异向量 $\boldsymbol{Z}$，表示为：

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{Z}\boldsymbol{\Sigma}_\sigma \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{Z}$ 为 $n\times n$ 阶矩阵；$\boldsymbol{V}$ 为 $d\times d$ 阶矩阵；$\boldsymbol{\Sigma}_\sigma$ 为 $n\times d$ 阶对角矩阵 $\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_d,0,0,\cdots,0)$，其非零元素为矩阵 $\boldsymbol{S}$ 的奇异值矩阵。奇异值矩阵前 c 个主成分的贡献率 I 可以由式(15)算得，其中 d 为奇异值的个数。

$$I(c) = \sum_i^c \sigma_i \Big/ \sum_i^d \sigma_i \tag{15}$$

奇异值越大，包含的信息越多。在奇异值分解中，奇异值通常按从大到小的顺序排列，而且减小的很快。通常前 10%的奇异值之和占全部奇异值总和的 99%以上。通过将选取后所有时步的前 c 阶基函数和谱系数进行叠加，即可得到降阶后的所有时步物理场的重构场 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{re}}$ 与 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{re}}$。

对热-流耦合场瞬态求解，为提升求解效率，将温度、径向速度与轴向速度的样本矩阵进行奇异值分解，可得到基函数及不同时间步的谱系数。通过对式(13)进行伽辽金投影，可得：

$$\boldsymbol{Z}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\sum_i^d \alpha_i^{k+1}\boldsymbol{\varphi}_i^{k+1} = \boldsymbol{Z}_d^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{L}\sum_i^d \alpha_i^k \boldsymbol{\varphi}_i^k + \boldsymbol{Q}) \tag{16}$$

对比式(11)和式(16)可知，原热-流耦合场方程中的系数矩阵 $\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{L}$ 由 n 阶变为 c 阶。因为 $c<<n$，所以待求解方程的阶数大幅度降低，方程的求解时间大大减少。

2 油纸套管热-流耦合场自主全阶算法验证

为验证基于 PISO 算法的自研全阶程序的合理性和准确性，本章节开展了自主研发全阶模型计算结果、Fluent 商业软件仿真数据和实际温升试验数据的对比分析。

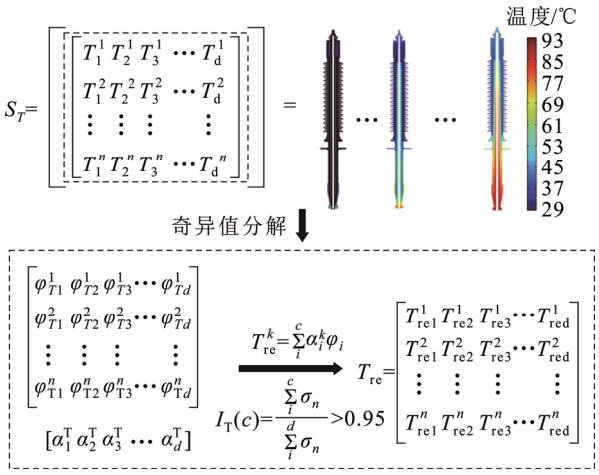


图 5 温度场降阶过程

Fig.5 Temperature field degradation process

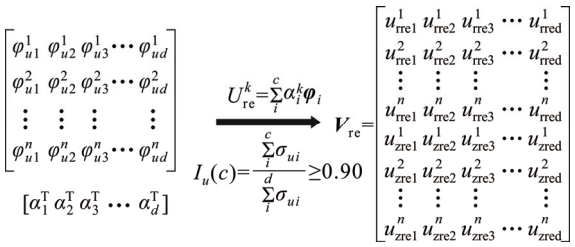


图 6 流场降阶过程

Fig.6 Degradation process of flow field

2.1 数值计算方法对比

本文所有数值计算在 DELL Precision 3660 电脑完成，CPU 型号为 13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900K@3.00 GHz，内存为 128 GB，核数为 24，GPU 显卡型号为 NVIDIA T1000 8 GB，编程软件为 MATLAB2024b。

依据厂家提供图纸，建立了 110 kV 油纸套管的精细化仿真模型，采用商业仿真软件 Fluent 和自主开发的全阶程序对该套管进行了热-流耦合场数值计算，模型网格数为 59 842。

利用全阶算法对油纸套管热-流耦合场进行迭代计算，如图 7 所示，在计算域内沿径向从内向外依次选取 3 个典型监测点，分别位于导电导管、绝缘芯体及外部瓷套的关键位置。在伪瞬态迭代计算过程中，系统记录每个监测点每隔一段时间间隔的温度采样数据，以追踪瞬态传热过程中的温度场演化规律。各监测点温度变化规律如图 8 所示。

由图 8 可知，在油纸套管热-流耦合场的全阶算法迭代计算过程中，3 个不同径向位置的监测点温

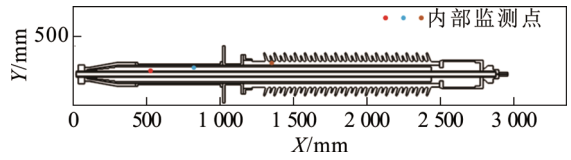


图 7 监测点位置

Fig.7 Location of monitoring points

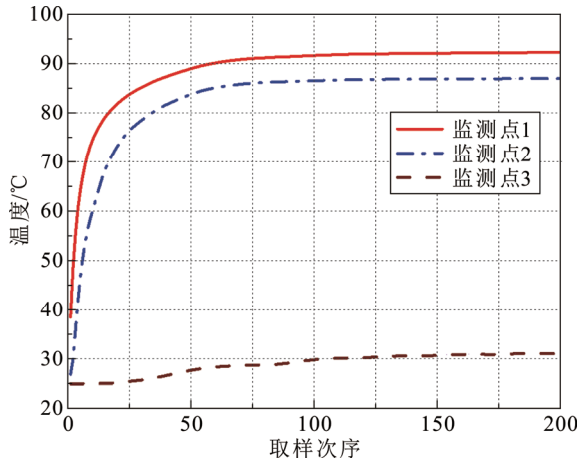


图 8 监测点温升过程

Fig.8 Monitoring point temperature rise process

度随迭代次数增加均呈现先上升后趋于稳定的典型变化特征，但 3 个监测点的温度变化曲线呈现显著的空间差异性，温度上升速度和最终稳定稳定温度均不同，揭示了套管内部存在的显著径向温度梯度，反映了油纸绝缘材料与金属导体间复杂的热-流耦合作用机制。考虑到空间差异性的存在，局部监测点的温度收敛并不能充分表征整个计算域的收敛状态，因此本文采用通过监测套管整体温度判断其收敛情况的方法，即当套管所有点的计算温度与上一时刻的计算温度之差均小于 0.001 ℃时，认为计算收敛，所得套管温度场收敛过程如图 9 所示。该全局收敛判据不仅能够有效避免局部热点的干扰，还能准确捕捉套管整体热平衡状态的建立过程，提升了计算结果的精度和可信度。

当油纸套管内部达到稳态时，套管整体、套管芯体温度场与流场的云图对比如图 10—12 所示。

从图 10、图 11 可见，本文所用的全阶程序与仿真软件的稳态温度场分布规律基本一致。套管整体温度最大误差为 4.1 ℃，相对误差为 6.83%。整体温度最大误差所在区域为变压器油与法兰的接触面，因为流体与固体物性参数差异大，所以该位置温度误差较大。套管芯体温度最大误差为–1.7 ℃，

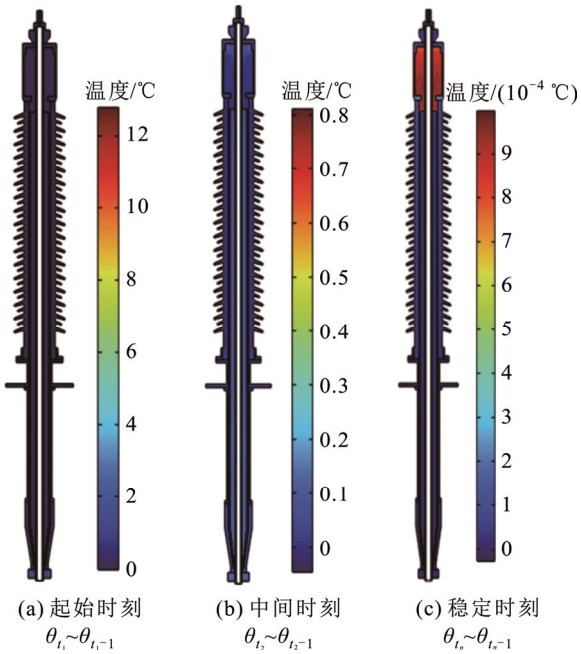


图 9 油纸套管温度场收敛过程

Fig.9 Convergence process of oil-paper bushing temperature field

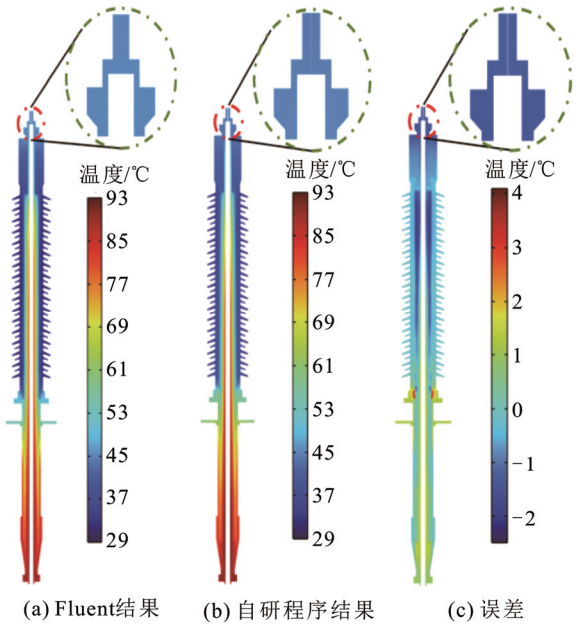
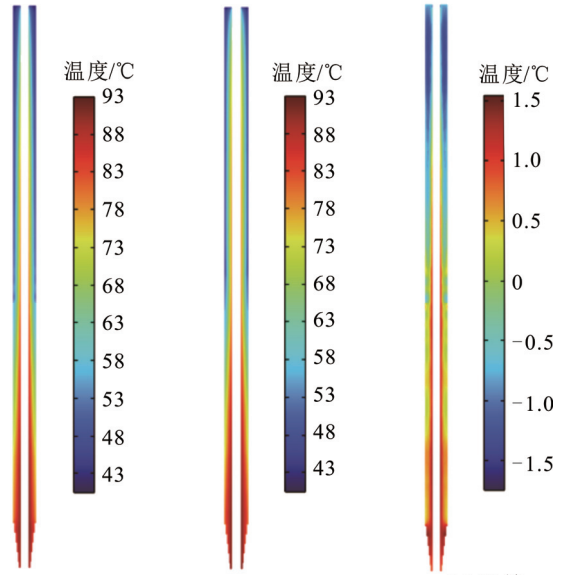


图 10 油纸套管稳态温度场对比

Fig.10 Comparison of steady state temperature field of oil-paper bushing

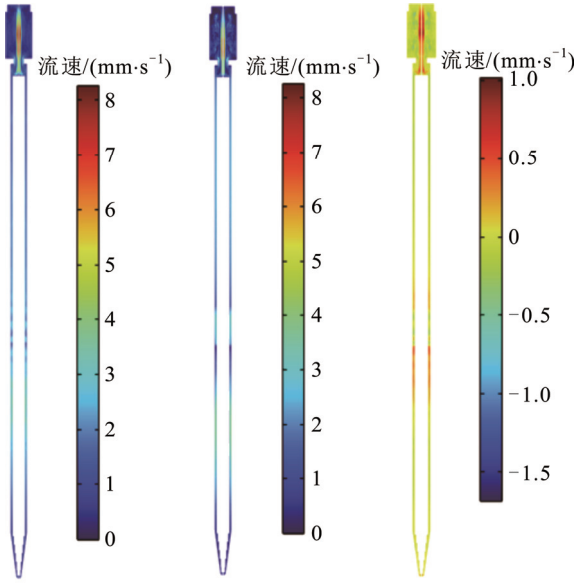
相对误差为–3.5%。对于油纸套管，其热点温度是保障变压器套管安全、高效运行的关键参数，反映了设备健康状态：热点温度直接关联套管绝缘与导体的老化程度。套管温度过高，会使机械强度下降，影响套管的安全稳定运行，所以需精准求解套管热



(a) Fluent结果 (b) 自研程序结果 (c) 误差

图 11 油纸套管芯体稳态温度场对比

Fig.11 Comparison of steady-state temperature fields of oil-paper bushing cores



(a) Fluent结果 (b) 自研程序结果 (c) 误差

图 12 油纸套管稳态流场对比

Fig.12 Comparison of steady state flow fields of oil-paper bushing

点温度，全阶模型所得导管最高温度为 93.9 ℃，芯体最高温度为 93.8 ℃，Fluent 所得导管最高温度为 94.1 ℃，芯体最高温度为 94.0 ℃，对于导管和芯体热点温度，相对误差为 0.202%和 0.223%，可知全阶模型对于油纸套管热点温度的计算是精准的。

从图 12 可见，本文所用的全阶程序与仿真软件的稳态流场分布情况一致，该油纸套管在额定工况下运行时，套管中的变压器油会在油枕中形成环流，仿真软件计算所得最大流速为 8.26 mm/s，自研全阶计算程序所得最大流速为 7.31 mm/s，最大流速误差为 0.95 mm/s，相对误差为 11.5%。

2.2 温升试验对比

为进一步验证上述热-流耦合场全阶计算程序的正确性，对此 110 kV 油纸套管进行温升试验。试验中，中心载流导体加载 800 A 工频交流电，套管保持竖直放置，试验布置如图 13 所示。油箱中安装有加热棒，使油温保持 85 ℃。为了准确测量套管各关键点的温度分布，在套管各关键点布置 K 型热电偶，共 15 个测量点，测量点 1—3 间隔一定距离分别安装在中心载流导体的外径位置。为了对比芯体与中心载流导体的温度分布，测量点 4—9 一一对应安装在油浸纸芯体中的相应位置。测量点 10—12 依次安装在上次套内外壁表面。测量点 13—15 依次安装在下瓷套内外壁表面。

试验中，110 kV 油纸套管加载有效值为 800 A

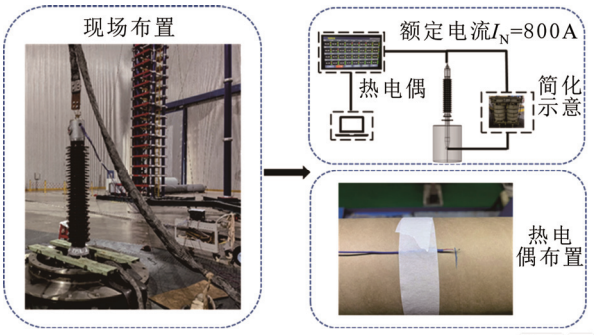


图 13 温升试验布置

Fig.13 Temperature-rise experimental setup

的工频交流电，试验过程中环境温度为(25±0.1) ℃，套管尾部油温采用恒温加热，温度为(85.0±0.2) ℃，与仿真计算边界条件相同，套管温度缓慢上升，直至套管温度连续 2 h 内温升小于 1 ℃，停止试验。所得各测量点温度变化曲线如图 14 所示，将温升试验中各测点稳态温度与全阶计算结果对比，所得对比结果如图 15 所示。

由图 15 可得，各测量点的全阶程序计算结果与试验结果分布规律相似，全阶计算结果与试验结果基本一致。全阶计算中，最大误差点为测量点 3，最大误差为 6.71 ℃，相对误差为 7.70%。差值的主要来源有：1）套管芯子的简化，实际油纸套管中的电容芯子由铝箔和绝缘纸绕制而成，铝箔分散在绝缘纸中，由于厚度较薄，且为了方便计算，将电容

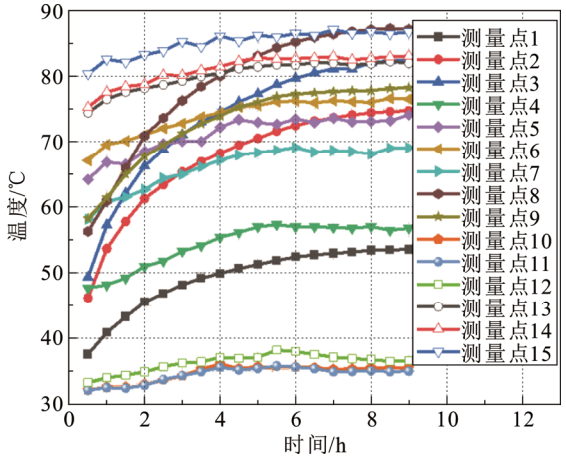


图 14 测量点温升过程

Fig.14 Measuring point temperature rise process

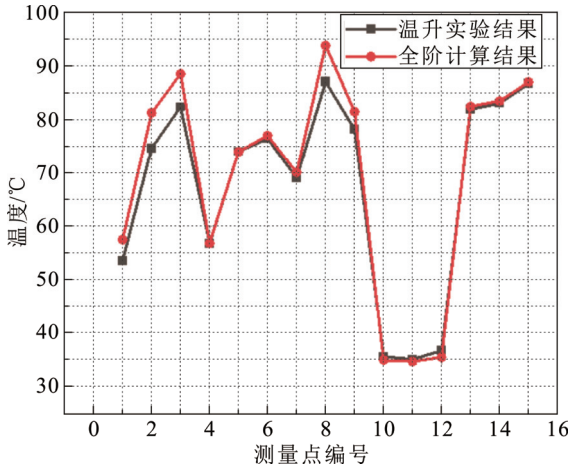


图 15 测量点稳态温度对比

Fig.15 Comparison of steady state temperatures at measurement points

芯子简化为油浸纸复合材料。2）材料参数设置于实际材料的属性有一定差异。3）油温存在变化。温升试验中，变压器油的温度是在 85 ℃上下浮动，而全阶计算中油温恒定为 85 ℃。

3 油纸套管热-流耦合场降阶计算

基于全阶模型计算结果，选取前 d 个时间步的温度和流速计算结果为样本数据，结合 POD 和有限体积方法构建降阶模型。因为流场计算难以收敛，计算复杂，为尽可能提高计算精度和提高效率，本文选取全阶模型前 200 个时间步的计算结果构建各物理量快照矩阵，结合式(14)和式(15)对温度场快照矩阵和流速场快照矩阵进行奇异值分解，得到 200 个正交基，并计算各阶正交基的累计贡献率，如图 16、17 所示。可以看出，随着正交基序号增加，其对于整体物理场的贡献率显著降低，因为选取的正交基越多，虽然结果精准度会提高，但计算时间也会大幅增加，所以为了在保证精度的同时尽可能提高计算效率，所以对于温度场而言选取前 6 个正交基，前 6 个正交基对于温度场的贡献率已超过 95%，而流场则选取前 20 个正交基，前 20 个正交基对于流场的贡献率则达到 90%以上。

根据选取的正交基，对稳态温度场和流场进行重构，以温度场为例，其重构原理如图 18 所示，通过选取的特定正交基以及谱系数，计算不同模态下的油纸套管温度场分布，后通过线性组合的方式进行温度场还原。该油纸套管温度场与流场重构结果如图 19—21 所示。

如图 19、图 20 所示，降阶模型重构的温度场

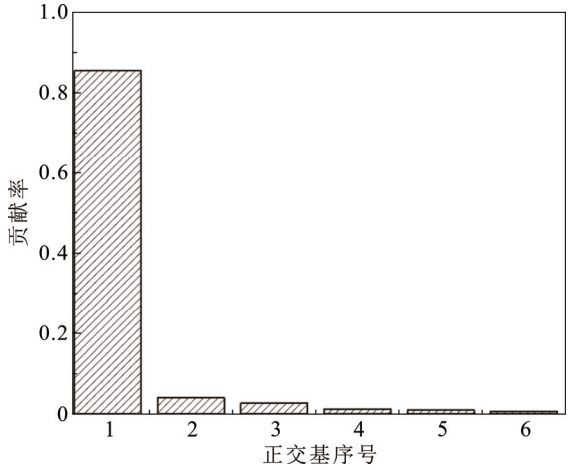


图 16 温度场正交基贡献率

Fig.16 Orthogonal basis contribution of temperature field

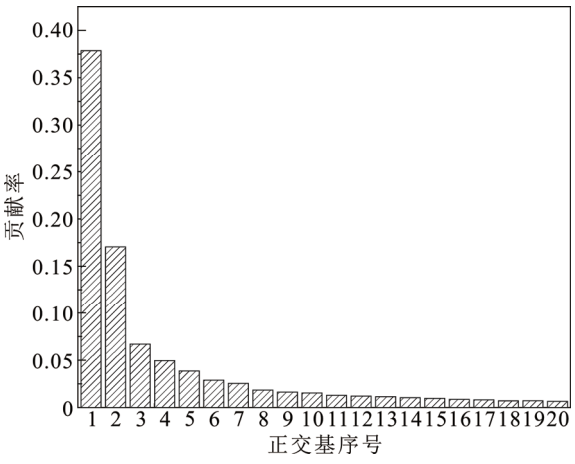


图 17 流场正交基贡献率

Fig.17 Orthogonal basis contribution of flow field

分布与全阶计算结果表现出良好的一致性，两者在空间分布特征和温度梯度变化趋势上基本一致。定

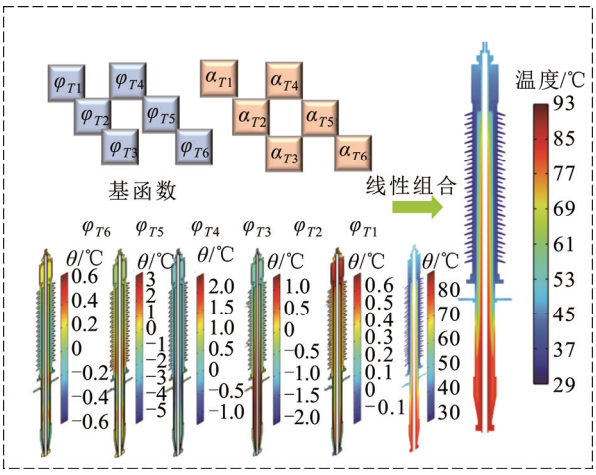


图 18 温度场重构原理

Fig.18 Principle of temperature field reconstruction

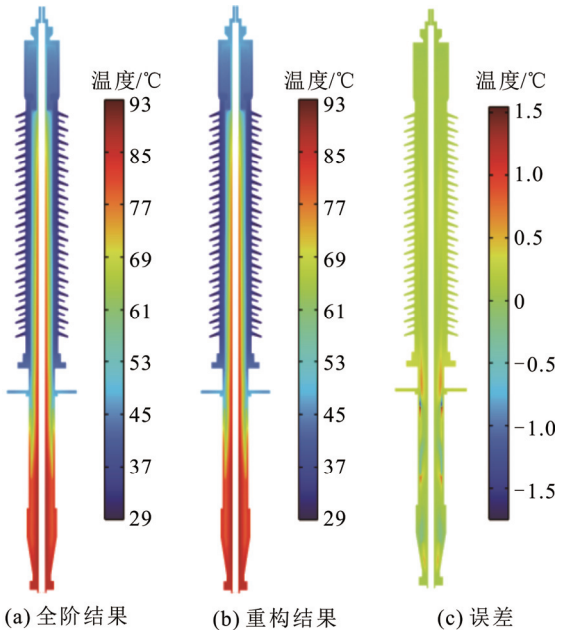
量分析表明，油纸套管全域温度场重构误差整体控制在较低水平，而变压器油区域由于对流效应显著，温度场变化更为复杂，导致其最大重构误差达到 1.5 ℃，相对误差为 2.4%，油纸套管芯体的最大重构误差为 0.7 ℃，相对误差为 0.01%，表明降阶模型有效捕捉了热-流耦合场的关键物理特征。

如图 21 所示，油纸套管内部变压器油流场重构结果与全阶计算结果基本一致，重构流场最大相对误差为–5%，误差最大处在变压器油与固体接触处，该处由于网格较为粗糙，导致此处误差较大。

通过对油纸套管温度场和流场的重构，可以发现，降阶模型对于芯体等关键部位的物理特征具有优异的捕捉能力，而对固体流体接触面等狭小部位捕捉能力相对较弱，原因在于 POD 方法中低能量模态的舍弃，对于温度场和流速场分别保留了 95%和 90%能量对应的来源，导致对于高频特征(如套管局部涡流、油边界层)的捕捉能力下降。

通过选取了温度场前 6 个正交基与流场的前 20 个正交基建立了油纸套管降阶模型，利用该降阶模型计算 110 kV 油纸套管正常运行时的热-流耦合场，与全阶模型的计算结果进行对比，如图 22 所示，得到了两种模型下油纸套管各测量点稳态温度的对比曲线。

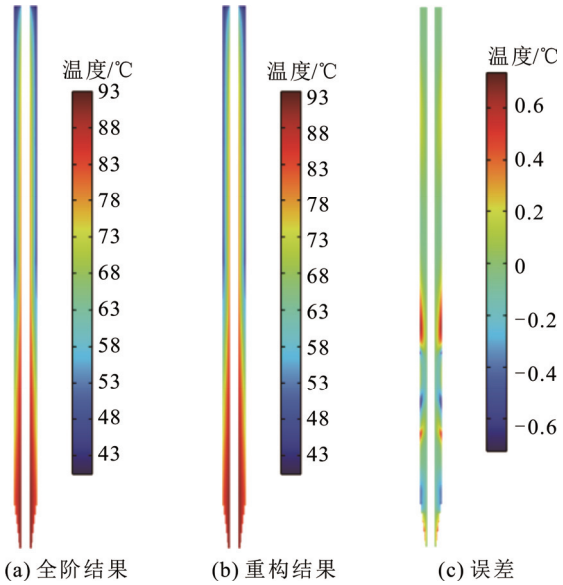
如图 22 所示，对于该 110 kV 油纸套管，当通流 800 A 时，其全阶模型与降阶模型在各测量点的稳态温度基本一致，最大误差为 1.28 ℃，出现在测量点 5，即在油纸套管芯体内部。全阶模型与降阶模型稳态温度最大相对误差的绝对值为 2.04%，最大相对误差出现在点 10，即在上瓷套外壁。误差来



(a) 全阶结果 (b) 重构结果 (c) 误差

图 19 油纸套管全阶与降阶程序重构温度场对比

Fig.19 Comparison of reconstructed temperature field of oil-paper bushing with full-order and reduced-order procedures



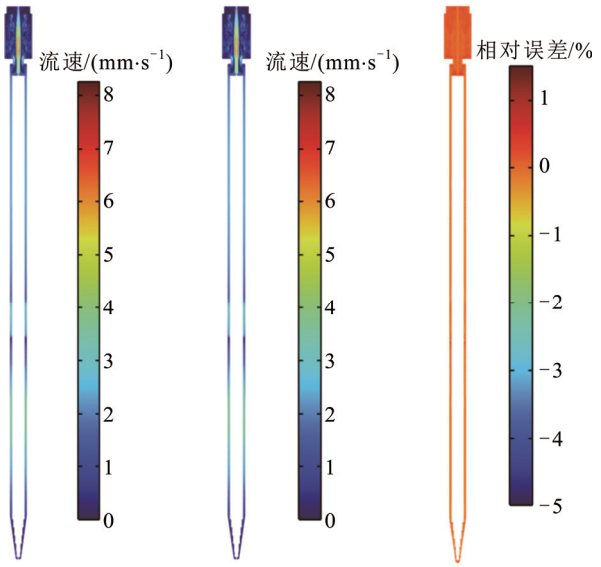
(a) 全阶结果 (b) 重构结果 (c) 误差

图 20 油纸套管芯体全阶与降阶程序重构温度场对比

Fig.20 Comparison of reconstructed temperature fields of full-order and reduced-order procedures for oil-paper busing cores

源一是低能量模态的舍弃，二是能量守恒方程和动量守恒方程计算中的固有误差，即对对流项等非线性量的简化处理等。

为了评估降阶模型的计算效率，对比了仿真软件、全阶模型以及降阶模型的各步骤消耗时间，对比结果如表 3 所示。



(a) 全阶结果 (b) 重构结果 (c) 相对误差

图 21 油纸套管全阶与降阶程序重构温度场对比

Fig.21 Comparison of full-order and reduced-order procedures for reconstructing flow fields in oil-paper bushing

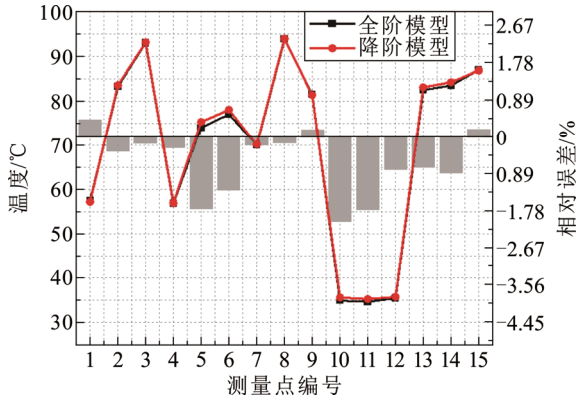


图 22 全阶模型与降阶模型各测量点稳态温度对比

Fig.22 Comparison of steady state temperature at each measurement point between the full-order model and the reduced-order model

表 3 计算时间对比

Table 3 Comparison of calculation time

方法	预处理时间/s	计算时间/h	总时间/h
商业软件	—	5.27	5.27
全阶算法	—	9.64	9.64
降阶算法	16	3.15	3.15

由表 3 可知，对于降阶模型，需要处理温度场和流场样本，形成基函数矩阵，存在预处理时间，而通过对与温度场正交基和流场正交基阶数的选取，将温度场的计算自由度从 59 842 降低到 6，流场的计算自由度从 59 842×2 降低到 20×2，大大降低了有限体积方程的阶数，大幅度缩短了计算的时间，其计算时间为 3.15 h，相比较于全阶模型的计算时间，降阶模型的计算速度提升了 3.06 倍，该结果表明了基于有限体积方法的 POD 油纸套管降阶模型在处理热-流耦合问题时具有高效性。

4 结论

本文以 110 kV 油纸套管为研究对象，利用有限体积法与 POD-Galerkin 自主开发了油纸套管热-流耦合场全阶及降阶数值计算程序，对打破国外 CAE 商业软件垄断，实现我国 CAE 软件国产化、自主化提供了支撑，本文主要研究结论如下：

1）本文采用有限体积法，基于 PISO 算法自主编程开发了油纸套管热-流耦合场全阶数值计算程序，温度场稳态结果与商业仿真软件 Fluent 对比分布基本一致，最大误差为 4.1 ℃。

2）基于 110 kV 油纸套管搭建了温升试验平台，并将本文中所自主开发的油纸套管热-流耦合程序应用于温升试验，通过与各测量点稳态温度进行对比，表明全阶计算结果与测量点温度趋势相符，温度最大相对误差为 7.70%。

3）本文将 POD 方法与有限体积方法相结合，自主开发了油纸套管热-流耦合侵入式降阶算法，解决了非侵入式降阶方法(数据驱动)对训练数据集依赖性强，工况参数频繁变化的动态应用场景中适应性差的问题。使得套管能量守恒方程的阶数从 59 842 降低到了 6，动量守恒的方程从 59 842×2 降低到了 20×2，实现了套管温度、流速和压强分布的快速计算，降阶模型的计算结果与全阶模型的计算结果基本一致，油纸套管温度场和流场的最大相对误差不超过 6%，而降阶模型的计算效率则相较于全阶模型提升了 3.06 倍。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 廖瑞金，罗 豪，成 立，等. 面向数字孪生变压器的计算机辅助运维(CAM+)构架与关键技术[J]. 高电压技术，2024，50(3)：924-940.
LIAO Ruijin, LUO Hao, CHENG Li, et al. Computer aided maintenance(CAM+) framework and key technologies towards digital twin transformers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 924-940.

[3] 刘亚东，陈 思，丛子涵，等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1539-1554.

LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.

[4] 唐 钊，刘轩东，陈 铭. 考虑流体动力学的干式变压器热网络模型仿真分析[J]. 电工技术学报，2022，37(18)：4777-4787.
TANG Zhao, LIU Xuandong, CHEN Ming. Simulation analysis of dry-type transformer thermal network model considering fluid dynamics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4777-4787.

[5] 李 元，刘 宁，梁 钰，等. 基于温升特性的油浸式变压器负荷能力评估模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(22)：6737-6745.
LI Yuan, LIU Ning, LIANG Yu, et al. A model of load capacity assessment for oil-immersed transformer by using temperature rise characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6737-6745.

[6] 田慕琴，朱晶晶，宋建成，等. 基于流固耦合分析的矿用干式变压器温度场仿真[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3972-3981.
TIAN Muqin, ZHU Jingjing, SONG Jiancheng, et al. Temperature field simulation of coal dry-type transformer based on fluid-solid coupling analysis[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3972-3981.

[7] 倪子瞻，盛戈皞，张立静，等. 基于多物理场仿真和神经网络算法相结合的油浸式变压器热点温度动态反演方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2466-2477.
NI Zizhan, SHENG Gehao, ZHANG Lijing, et al. Dynamic inversion method of hot spot temperature of oil-immersed transformer based on combination of multiphysics simulation and neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2466-2477.

[8] 谢更生，史石峰，王琪林，等. ±800 kV 换流变阀侧套管温度场仿真与大电流温升试验分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：994-1002.
XIE Qingsheng, SHI Shifeng, WANG Qilin, et al. Simulation and experimental analysis of ±800 kV converter transformer valve-side bushing under high current[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 994-1002.

[9] 陈 思，盛戈皞，张立静，等. 基于绕组等效热参数的干式变压器温度场分布快速仿真方法[J]. 高电压技术，2025，51(1)：97-109.
CHEN Si, SHENG Gehao, ZHANG Lijing, et al. Fast simulation method of temperature field distribution for dry-type transformer based on equivalent thermal parameters of windings[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 97-109.

[10] 魏本刚，吴楠楠，任晓明，等. 基于有限体积法的分体式冷却变压器热学三维仿真技术[J]. 电力自动化设备，2018，38(2)：177-181.
WEI Bengang, WU Nannan, REN Xiaoming, et al. Three dimensional simulation technology of separated cooling type transformer based on finite volume method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 177-181.

[11] XIU L C, DU Z Y, TIAN Y, et al. Numerical calculation of transient electric field considering space charge in oil-paper insulation of converter transformers[J]. COMPEL, 2022, 41(1): 155-171.

[12] 刘星亮，邱 祁，王若宇，等. 基于有限元仿真的高频高压变压器分段绕组漏感设计方法[J]. 高电压技术，2020，46(2)：610-617.
LIU Xingliang, QIU Qi, WANG Ruoyu, et al. Design method for leakage inductance of high-frequency high-voltage transformer with winding segmented based on finite element simulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 610-617.

[13] 温 苗，林 莘，仲思蒙. 变压器套管传热性能的数值模拟和试验验证[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2956-2961.
WEN Miao, LIN Xin, ZHONG Simeng. Numerical simulation and experimental study of heat transfer characteristics in transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2956-2961.

[14] 邓永清，阮江军，董旭柱，等. 基于自适应网格控制的 10 kV 油浸式变压器多物理场仿真计算[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924-2933.

[15] PIERQUIN A, HENNERON T. Nonlinear data-driven model order reduction applied to circuit-field magnetic problem[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(11): 7402509.

[16] JIANG G H, KANG M, CAI Z W, et al. Online reconstruction of 3D temperature field fused with POD-based reduced order approach and sparse sensor data[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 175: 107489.

[17] WANG X L, WANG Y, CAO Z Z, et al. Comparison study on linear interpolation and cubic B-spline interpolation proper orthogonal decomposition methods[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5: 561875.

[18] WANG Y, YU B, CAO Z Z, et al. A comparative study of POD interpolation and POD projection methods for fast and accurate prediction of heat transfer problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(17/18): 4827-4836.

[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.

[20] 刘 刚，靳立鹏，胡万君，等. 基于混合有限元法的油浸式变压器稳态流-热耦合场并行计算方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2259-2269.
LIU Gang, JIN Lipeng, HU Wanjun, et al. Parallel calculation method for steady-state fluid-thermal coupling field of oil-immersed transformer based on hybrid finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2259-2269.

[21] 李国杰，黄 萌，陈 斌. 基于 PISO 算法的非结构化网格 VOF 算法[J]. 工程热物理学报，2013，34(3)：476-479.
LI Guojie, HUANG Meng, CHEN Bin. VOF method on unstructured grid using PISO algorithm[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(3): 476-479.

[22] 张日强. 管状导体的集肤效应[J]. 电炉，1990(6)：10-12，46.
ZHANG Riqiang. Skin effect in tubular conductors[J]. Electric Furnace, 1990(6): 10-12, 46.



王青于
1991—，女，博士，副教授，硕导
主要从事超/特高压交、直流套管绝缘结构优化设计、多物理场数值计算方法等方面的研究工作
E-mail: wqy.1991624@xjtu.edu.cn

WANG Qingyu
Ph.D.
Associate professor



高志杰(通信作者)
1999—，男，硕士生
主要从事超/特高压交、直流套管绝缘多物理场数值计算方法等方面的研究工作
E-mail: 2969194545@qq.com

GAO Zhijie
Corresponding author

收稿日期 2025-06-18 在线出版日期 2025-08-20 编辑 卫李静