第 50 卷 第 3 期：924-940 高电压技术 Vol.50, No.3: 924-940
2024 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240153

# 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

廖瑞金，罗 豪，成 立，杨丽君，赵学童，郝 建
（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**：发展数字孪生变压器对支撑电力装备智能运维具有重要价值。目前变压器已具有计算机辅助设计、工程仿真的一般功能，但面向运行维护的场景、性能数字孪生还处于初级阶段。为此，该文提出了一种将计算机辅助设计、工程仿真、制造进一步拓展为电力装备的计算机辅助运维(computer aided maintenance+，CAM+)新模式，包含了场景更新、虚实融合、故障定位、智能运维等功能。该文首先介绍了 CAM+的内涵，结合电力装备的数字孪生架构提出了面向数字孪生变压器的 CAM+模式的技术架构。然后，综述了 3 维场景可视化建模、高精度传感、多物理场耦合模型与快速计算、虚实融合的动态推演、多源数据融合、状态智能评估、知识图谱等 CAM+模式所涉及的关键技术。最后，分析了 CAM+在变压器场景更新、参量孪生和智能运维的应用，并总结了未来 CAM+所面临的挑战和发展方向。

**关键词**：CAM+；数字孪生变压器；虚实融合；动态推演；智能运维

## Computer Aided Maintenance (CAM+) Framework and Key Technologies Towards Digital Twin Transformers

LIAO Ruijin, LUO Hao, CHENG Li, YANG Lijun, ZHAO Xuetong, HAO Jian
(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract**: It is of significant value to develop digital twin transformers to support the intelligent operation and maintenance of power equipment. Currently, transformer possesses the general functions of computer-aided design and engineering simulation, however, the operation and maintenance oriented scenarios and performance digital twins are still in their infancy. Therefore, this paper proposes a new pattern which further expands computer-aided design, engineering simulation, and manufacturing into computer-aided maintenance+ (CAM+) for electric power equipment, including functions such as scenario updating, virtual-real fusion, fault location, and intelligent operation and maintenance. Firstly, this paper introduces the connotation of CAM+, and proposes the technical architecture of CAM+ pattern for digital twin transformers by combining the digital twin architecture of power equipment. Then, the key technologies involved in the CAM+ pattern, such as 3D scene visual modelling, high-precision sensing, coupled multi-physical field modeling and fast computation, dynamic deduction of virtual-real fusion, multi-source data fusion, intelligent assessment of state, and knowledge graph, are overviewed. Finally, the application of CAM+ for transformer scenario updating, parametric twinning and intelligent operation and maintenance is analyzed and the future challenges and directions of CAM+ are summarized.

**Key words**: CAM+; digital twin transformer; virtual-real fusion; dynamic deduction; intelligent operation and maintenance

## 0 引言

电力变压器作为电网的核心设备，其运行可靠性关系整个电网的安全。利用先进的计算机技术打造新一代数字化变压器，形成设备的数字孪生体，是实现电网生产运营数字化赋能的重要内容[1-2]。因此，对变压器数字孪生提出了新要求：拥有对设备外部场景的实时更新能力，对设备内部运行状态的推演和预测能力，对典型故障的反演和定位能力，

**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).

还能根据预判潜在的运行风险主动制定智能化运维方案的能力等[3-4]。只有实现设备场景和性能的数字孪生，支撑变压器的智能运维及检修策略制定，才能真正意义上达到数字化赋能的目的。

目前的变压器数字孪生工作仍停留在结构、物理场、数据等的展示与分析层面，包括基于计算机辅助设计(computer aided design，CAD)的 3 维结构展示、基于计算机辅助工程(computer aided engineering，CAE)的多物理场展示与分析，以及基于传感器获得的运行历史数据展示与分析等，极少部分具有计算机辅助制造(computer aided manufacture，CAM)[5-7]能力。然而，仅掌握变压器内部的结构以及物理场分布对于实际运维的指导有限，在运行维护中，现场期望能够利用计算机技术实现智能辅助运维，即将传统 CAD、CAE 和 CAM 的内涵从设计、工程、制造扩展至整个生产运维阶段。新的电力装备的计算机辅助运维(computer aided maintenance+，CAM+)包含了从设计、制造到运维的全功能体验，尤其在辅助运维阶段，能够实现变压器外部场景的实时更新，内部状态变化过程的预测，或各类故障较为准确的反演乃至定位。

然而，要实现具有 CAM+能力的新一代数字化变压器，不但需要利用 CAD 和 CAE 技术形成与设备物理实物完全对应和一致的虚拟模型，并获得电、磁、热、流等多物理场分布特性，还需要描述设备外部场景实时变化和内部材料及组件在多物理场下的各种特征、性能、行为的形成和演变过程[8-9]。CAM+作为数字孪生变压器终端辅助运维软件，利用 CAM+对不同工况下变压器外部场景和内部缺陷故障进行实时监测，将大幅提高运维效率。上述工作将包括 3 维场景可视化建模技术、变压器多物理场耦合机理模型与高效快速计算方法、虚实融合传感参量的动态推演数值模型、数字孪生可视化性能评估方法和知识图谱技术等，涉及多个交叉学科领域，难度很大。

为了实现变压器外部场景数字孪生、内部性能数字孪生、变压器的智能设计制造与运维等业界期待的关键应用，需要开发面向数字孪生变压器的 CAM+软件。首先，本文从数字孪生变压器 CAM+的内涵出发提出新的功能要求，进而综述了目前电力装备数字孪生的相关架构，并基于前人工作，结合变压器场景、性能数字孪生的特点，提出了数字孪生变压器 CAM+模式的技术架构。其次，针对实现 CAM+架构的相关关键技术进行了分析。然后，根据 CAM+的新理念，本文讨论了 CAM+的相关应用并例举了目前相关研究的进展。最后，从关键技术的分析，阐述了 CAM+面临的挑战，并对未来的发展、应用进行了展望。本文提出的 CAM+软件构想期待实现设备智能辅助运维，这对提高电网装备数字化、智能化水平具有重要意义。

## 1　数字孪生变压器 CAM+内涵

电力装备的计算机辅助运维(CAM+)，指用计算机辅助分析装备运行中的运行特性，特别是传统传感技术难以企及的，装备内部与运行状态密切相关的特征量的分布规律；同时可对装备的性能演化规律以及缺陷发生发展过程实现准确推演，并对装备的健康状态进行判断，给出运维建议。

### 1.1　CAM+软件与传统 CAD、CAE 软件区别

在变压器设计、分析以及数字化领域，目前主要采用的计算机辅助技术为 CAD 与 CAE 技术。如图 1，通过 Auto CAD/ANSYS/FLUNT/COMSOL 等商用的 CAD，CAE 软件，实现了变压器多物理场的优化设计、内部 3 维结构的高精度建模以及内部多物理场的高保真耦合仿真。但与变压器运行相关的内部参量如水分、纸绝缘聚合度分布、气体含量、绕组形变、局部放电与击穿风险等目前却是无法直接仿真获得的，这需要正确认识和深入理解设备中各类材料在不同物理场下的响应特征和性能演化规律，开发辅助数字孪生变压器运维的 CAM+软件。该 CAM+软件不仅需要具备传统 CAD 与 CAE 软件的功能，更要能够实现变压器外部场景的实时更新和内部性能的动态推演，即场景和性能的数字孪生，有效提高数字孪生变压器在状态评估、智能运维等方面的工作效率。

### 1.2　数字孪生变压器 CAM+模式的技术架构

数字孪生模型的技术架构是应用的基础，多年来数字孪生模型架构一直在不断更新完善。最初美国的 Grieves 教授提出数字孪生概念，定义了数字孪生的 3 维模型：物理实体、虚拟实体和连接关系，应用到了美国国家航空航天局(NASA)飞行器的健康管控领域[10]。随后，北京航空航天大学陶飞教授团队为拓展应用范围进一步提出了数字孪生 5 维模型：物理实体、虚拟实体、连接关系、数据、服务，并探讨了在船舶、车辆、发电厂、复杂机电装备、医疗、智慧城市等多个领域的应用[11]。接着，中国

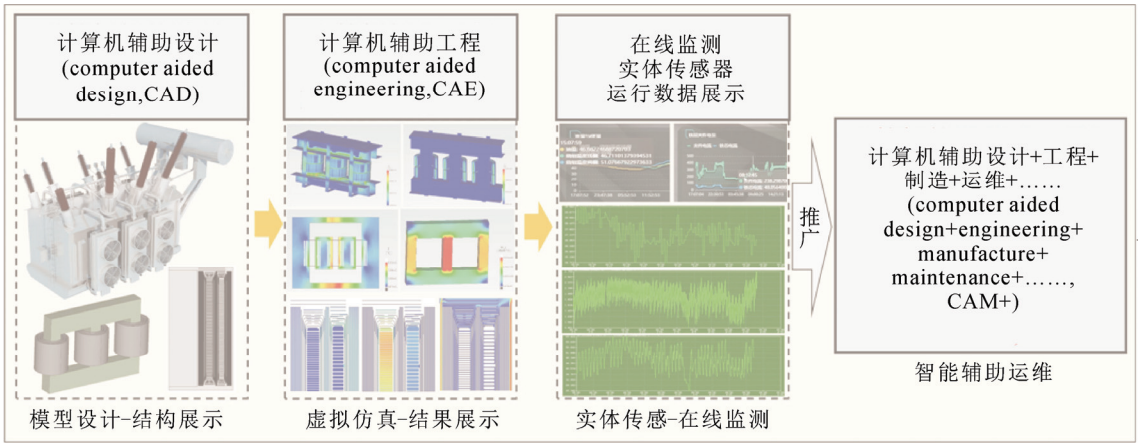



图 1 数字孪生变压器 CAM+与 CAD/CAE 的区别

Fig.1 Difference of digital twin transformer CAM+ and CAD/CAE

电科院蒲天骄团队在 5 维模型基础上结合能源互联网实际需求提出能源互联网数字孪生模型，进一步促进了数字孪生技术在能源行业的落地应用[12]。

近年来，不少专家学者对电力装备数字孪生的理论模型架构进行了积极探索，如表 1 所示。美国工业互联网联盟提出了数字孪生在工业应用中需要的数据、模型、服务[13]。上海交通大学江秀臣教授团队结合电力装备制造和管理组织方式，提出了物理层、通信层、虚拟层和应用层的技术框架，同时根据数字化电力设备的内涵特征，提出了数据采集、数据处理、数据分析、数据应用的基本架构[14-15]。华北电力大学刘云鹏教授团队结合能源互联网数字孪生的理论模型，提出物理层、感知层、传输层、虚拟层及应用层的输变电设备数字孪生系统架构，同时针对电力变压器智能运维层面，给出了实施思路[16-17]。武汉大学董旭柱教授团队面向电力设备设计运维提出了物理层、感知层、传输层、虚拟层和应用层的技术架构以实现孪生体的构建、仿真和运行[18]。此外，为实现电力装备设计运维的数字孪生，中国电子技术标准化研究院提出了基础支撑层、数据互动层、模型构建层、仿真分析层、功能层组成的数字孪生架构[19]。重庆大学杨帆教授团队在此基础上总结基础支撑层、数据互动层、建模仿真层和功能应用层，并基于 Microsoft Azure IoT 及 ANSYS Twin Builder 实现了变压器多物理场的数字孪生[20]。为实现电力装备的场景数字孪生，中国信息通信研究院单独针对基础设备的场景可视化，提出了数据采集层、平台构建层、呈现渲染层 3 层架构[21]。

表 1 电力装备数字孪生技术架构的代表性成果

Table 1 Representative results of the digital twin technology architecture for power equipment

| 应用架构名称 | 机构 | 成果 |
|---|---|---|
| 数字孪生的 3 维模型 | 美国密歇根大学 | 提出数字孪生概念，定义了数字孪生的 3 维模型：物理实体、虚拟实体和连接关系 |
| 数字孪生的 5 维模型 | 北京航空航天大学 | 提出了数字孪生 5 维模型：物理实体、虚拟实体、连接、数据、服务，并探讨了多个领域的应用 |
| 电力物联网体系架构 | 中国电力科学研究院有限公司 | 结合能源互联网领域的实际需求提出了能源互联网数字孪生模型和电力物联网“端-边-管-云-智”的分层架构 |
| 数字孪生工业应用框架 | 美国工业互联网联盟 | 提出了数字孪生在工业应用中需要的数据、模型、服务 |
| 电力装备数字孪生通用框架 | 上海交通大学 | 根据数字孪生的核心思想，结合电力装备制造和管理组织方式，提出了物理层、通信层、虚拟层和应用层 4 个层次的技术框架 |
| 数字化电力设备基本架构 | 上海交通大学 | 根据数字化电力设备的内涵特征，提出了数据采集、数据处理、数据分析、数据应用 4 个层次的基本架构 |
| 输变电设备数字孪生系统架构 | 华北电力大学 | 结合能源互联网数字孪生理论模型，提出物理层、感知层、传输层、虚拟层及应用层 5 层的技术架构 |
| 变压器智能运维数字孪生系统架构 | 华北电力大学 | 给出了变压器智能运维数字孪生体的实现思路，即虚拟体刻画-感知互动-多场计算-状态分析-智慧共享 |
| 电力设备数字孪生技术架构 | 武汉大学 | 面向设计运维提出了物理层、感知层、传输层、虚拟层和应用层 5 层技术架构 |
| 电力装备设计运维的数字孪生架构 | 中国电子技术标准化研究院 | 提出了基础支撑层、数据互动层、模型构建层、仿真分析层、功能层组成的架构 |
| 电力装备数字孪生技术架构 | 重庆大学 | 提出了基础支撑层、数据互动层、建模仿真层和功能应用层 4 层架构，实现了基于 Microsoft Azure IoT 及 ANSYS Twin Builder 的变压器多物理场的数字孪生 |
| 数字孪生场景可视化的技术框架 | 中国信息通信研究院 | 基于基础设备数据提出了数据采集层、平台构建层、呈现渲染层 3 层架构，实现了场景的 3 维可视化 |

总之，当前电力装备领域的数字孪生技术架构常用的主要是基础支撑、仿真分析、模型构建、数据互动和功能应用等几个方面，这加快了电力装备智能化、数字化发展的速率，推动了智能电网的建设。然而，随着数字化进程的不断推进，计算机辅助软件对电力装备的数字孪生运维已明显不足，有了更高要求：拥有对设备外部场景的实时更新能力，对设备内部运行状态的推演和预测能力，对典型故障的反演和定位能力，还能根据预判潜在的运行风险主动制定智能化运维方案的能力等。但由于目前数字孪生变压器在外部场景实时更新、内部参量虚实传感、性能准确反演预测、异常故障人机协同运维等方面还处于初级阶段，一些模型机理、计算方法、后处理技术等仍不完善，导致目前电力装备数字孪生的技术架构还不能完全支撑数字孪生变压器的 CAM+模式，不能高效、准确实现数字孪生变压器的可视化评估，以辅助智能运维。

为此，本文基于前人工作，结合变压器场景、性能数字孪生的特点，提出了数字孪生变压器 CAM+模式的技术架构，如图 2 所示，具体分为基础支撑层、仿真分析层、模型构建层、数据交互层和功能应用层。与先前电力装备数字孪生报道的技术架构主要区别在于，基础支撑层考虑了场景实时更新、模型构建层考虑了虚实融合的计算和动态推演模型的建立、功能应用层考虑了多种功能应用以辅助智能运维[22-24]。

基础支撑层：基于先进的 3 维实景扫描技术获取变压器场景数据，基于现场关键参量的高精度传感技术获取运行状态和环境的各种参量，结合电力变压器的结构数据、传感数据、环境数据、运行数据和检修数据等构建变压器的数字孪生体，实现与物理实体的同步映射。

仿真分析层：基于变压器组件材料多物理场耦合特性获取非线性特性数据库，并结合应用场景建立多物理场耦合机理模型；基于多物理场降阶模型获取面向数字孪生的变压器多场快速求解算法，实现 CAM+软件的多物理场耦合快速计算。

模型构建层：基于数据驱动方法获取物理场演

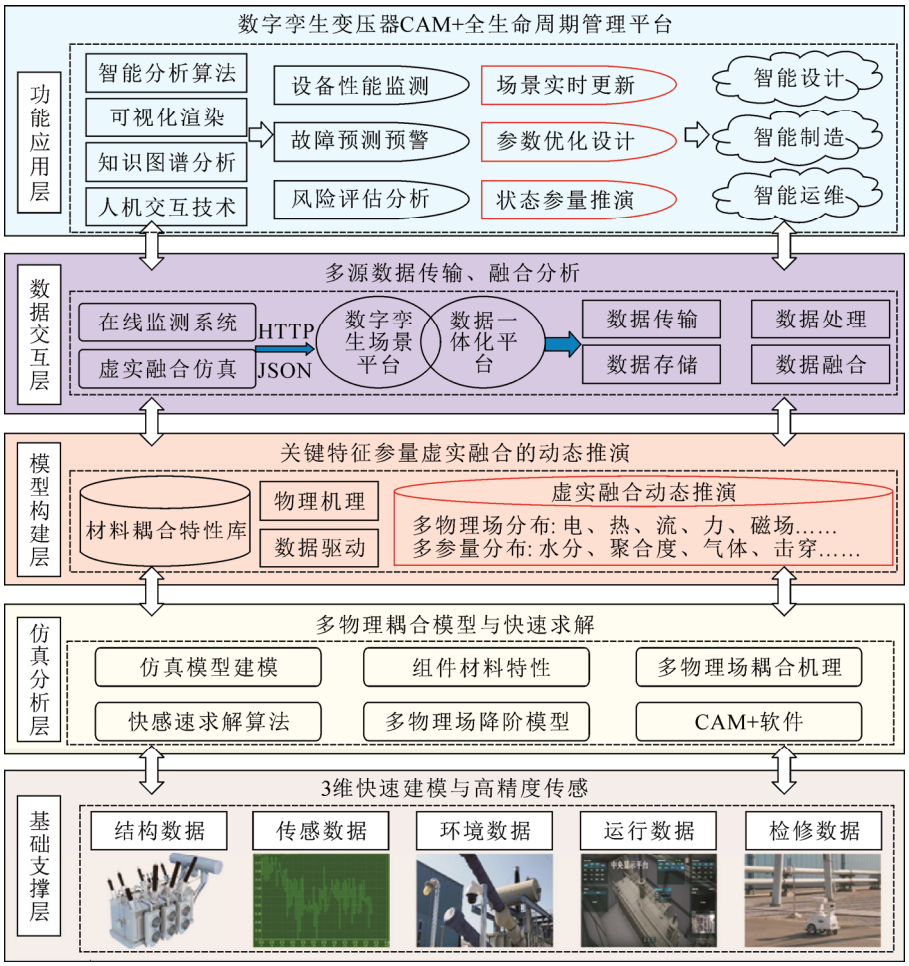



图 2　数字孪生变压器 CAM+模式的技术架构

Fig.2　Technology architecture of the CAM+ pattern for digital twin transformers

变规律，快速重构物理场当前状态并预测物理场未来状态；基于虚实融合的状态参量动态推演方法，以变压器内部材料的多场耦合特性，多场仿真计算结果为基础，建立电力变压器关键特征量、典型失效过程的物理模型，实现关键特征参量虚实融合的动态推演。

数据交互层：基于基础设施云平台的数据管理工具，管理在线监测系统和虚实融合仿真的数据；基于电力系统通讯协议对平台数据进行传输、处理、存储和现场复杂多源异构数据的融合，实现数据的交互。

功能应用层：基于虚实融合的变压器内部状态参量孪生，支撑 CAM+的全生命周期管理平台；基于智能分析算法、可视化渲染展示、知识图谱和人机交互等技术集成实现设备性能监测、故障预测预警、状态参量推演、场景实时更新、参数优化设计和风险评估分析等功能，为数字孪生变压器的智能设计制造和智能辅助运维提供有力支撑。

## 2 数字孪生变压器 CAM+的关键技术

数字孪生变压器CAM+模式的应用涉及到基础支撑层、仿真分析层、模型构建层、数据交互层和功能应用层的多项关键技术，下面详细介绍各个层级关键技术的具体内容。

### 2.1 基础支撑层关键技术

#### 2.1.1 3 维场景可视化建模技术

场景可视化建模技术主要是基于 3 维场景重建方法，实现外部场景的可视化展示。常用 3 维重建方法已有大量研究，如表 2 所示，目前现场主要采用的是 3 维激光扫描、倾斜摄影、建筑信息模型(building information management，BIM)建模技术[25-27]。

1）3 维激光扫描技术

原理：通过激光扫描点云建模，然后利用电力装备 RGB 图像和点云数据完成外观和网格重构，最后实现 3 维场景可视化。

特点：3 维激光扫描速度快、精度高，但是成本高，数据处理繁杂，且对建模软件要求高。

2）倾斜摄影建模技术

原理：倾斜摄影利用多个角度光学设备，将 2 维模型拼接形成 3 维模型。

特点：能够获取高分辨率的场景数据，且速度快、效果好、测量范围也广，但对天气要求较高，细节微小地方的精度也不高。

表 2 常用的 3 维重建方法

Table 2 Commonly used 3D reconstruction methods

| 常用 3 维重建方法 | 优势 | 缺点 |
|---|---|---|
| 3 维激光扫描技术 | 速度快、精度高 | 成本高，数据处理繁杂，软件要求高 |
| 倾斜摄影建模技术 | 速度快，效果较好 | 精度不高，测量范围广 |
| BIM 手工建模技术 | 操作简单、精度高，可人为修改，成本低 | 量大繁多 |
| 飞行时间法 | 测量速度快 | 受环境光线干扰严重 |
| 激光三角法 | 精度高、稳定性好 | 适用于中短距离测距，存在一定死区 |
| 结构光法 | 精度高，速度快 | 算法复杂，不适用于高光表面 |
| 单目视觉法 | 成本低、重建速度快 | 求解高度信息存在结果不唯一的问题 |
| 双目视觉法 | 高精度工业应用 | 特征匹配过程复杂、速度慢、成本高 |
| 神经网络图像重建法 | 速度快，效果较好，精度一般 | 需大量采集信息数据，精度较低 |
| 深度学习图像重建 | 速度快，效果较好，精度一般 | 提取数据特征过程繁杂 |
| 神经辐射场场景重建 | 速度快，可实时更新，可视化效果好，成本低 | 自动化较强，需要系列数字化设备 |

3）BIM 手工建模技术

原理：BIM 技术称作建筑信息模型技术，是将工程中的结构信息、部件信息、几何信息等绘制在一个渲染模型中集成展示。

特点：BIM 操作简单、精度高、可视化效果好、可人为修改、成本低，目前在变电站、换流站广泛应用，但是数据量大繁多且可视化预处理时间长。

总体上看，现有技术主要存在建模速度慢(数小时到数天)，成本高(专用设备、软件)，后处理复杂(局部缺失，需人工干预)等问题[28-29]。随着数字孪生变压器的发展，对外部可视化的 3 维场景要求能够低成本、快速更新，实现场景数字孪生。但目前仍然只是知识与传感信息的附着，无法实现快速更新，更不能实现现场突发性事件的快速更新。因此，CAM+还需要借助新的 3 维重建技术—神经辐射场来支撑低成本、实时更新的场景重建[30]。

4）基于神经辐射场的快速更新重建技术

原理：神经辐射场(neural radiation field，NeRF)是将连续场景表示为 5D 函数，通过 NeRF 的隐式表示、优化与加速、数据处理和重建，最后实现场景 60 s 内更新并保证建模精度在 mm 级别。

特点：NeRF 速度快，可实时更新，可视化效果好，成本低，但如何用于电力装备等大模型，同时在建模时，如何考虑变压器不同风险区域的建模质量，还有待研究。

需要说明的是：3 维场景可视化建模的边界不局限在可见光。除可见光外，红外、紫外等光谱影像手段也是电力系统中常用的检测技术，目前现场变电站、换流站已经利用红外实现了变压器设备的温度监测和油位检测等[31-32]，紫外也被广泛用于设备放电故障的定位和放电程度的量化评估[33-34]。因此，随着电网数字化转型，3 维场景可视化建模的边界问题有望拓展到可见光、红外、紫外等多光谱影像联合成像，其可视化结果不仅能包含设备外观信息，还能够反映设备发热、放电等信息，这对于数字孪生变压器的智能运维有重大意义。

2.1.2　高精度传感技术

目前，变压器内部关键参量如温度、局部放电、振动位移、应力应变和特征气体等均有传感装置和技术手段用于实现检测。例如利用热敏电阻、红外传感等监测温度，利用压电传感器等间接传感局部放电，利用位移传感器等监测机械应力，利用气相色谱、光声光谱、油色谱等检测油中气体[35-38]。然而，目前现场使用仍有不足：1）可靠性不足，变压器内部复杂大电流、强磁场噪声、强辐射下传感器的长期运行稳定性难以满足实际要求；2）体积较大，例如超声换能器达百 $cm^3$、振动传感器达十 $cm^3$；3）结构脆弱，一些传感器的机械强度较低，易在安装过程中损坏。

因此，需要进一步探索高精度、高可靠、易安装的传感器对关键参量进行监测。考虑到光纤具有先天抗电磁干扰、电绝缘性强等特性，适合在大电流、强磁场、强辐射等恶劣环境下监测分析，目前众多研究人员对光纤传感技术已有深入研究，开发了大量油中气体、温度、局部放电等的光纤式传感器，在实验室得到了较好应用[39-41]。此外，传感器芯片化也逐渐发展，基于 MEMS 技术，通过微模铸工艺，制作封装基片，再通过化学键合方法将封装基片固定在探测基片上，形成更牢固、可靠的传感器结构，可有效减小体积，提高可靠性[42]。然而，由于变压器内部结构复杂、存在强电磁场、实体传感器安装困难，导致内部传感器的种类和数量都很少，且一般传感布置都是局部单个位置点，无法获得分布式的传感信息。因此，先进高精度、高可靠传感技术一直是变压器状态信息获取和支持数字孪生变压器技术的关键之一。

对于分布式传感器技术，可以借鉴航空航天领域的虚拟传感器思想，通过融合虚实传感器构建变压器数字孪生体。如图 3 所示，利用油纸绝缘材料

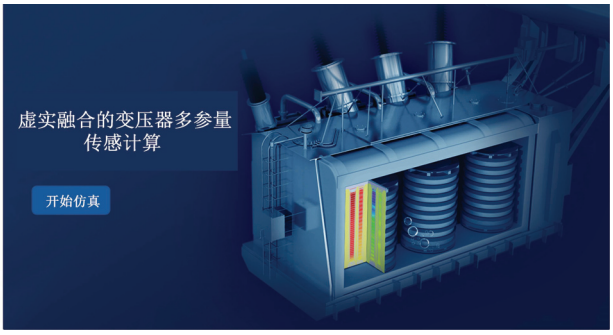



图 3　虚实融合的变压器多参量传感计算

Fig.3　Multi-parameter sensing computation for transformer with virtual-real fusion

在变压器内部多物理场作用下的变化特性结合有限元仿真开发变压器关键参量的虚拟传感器。同时，结合实体传感器进行反馈修正，能够有效弥补现有实体传感器分布式测量不足的特点，获得更多传感参量的种类和数据，为构筑变压器数字孪生体提供数据基础。

## 2.2　仿真分析层关键技术

2.2.1　多物理场耦合模型

多物理场耦合模型是变压器实现物理场仿真计算的基础，也是未来制约数字孪生变压器发展的关键技术之一。目前变压器在设备设计、运维仿真中已经有了大量的研究，但对电-磁-热-流等多物理场的耦合特性仍未考虑或考虑较少[43-44]。主要原因是变压器内部多物理场耦合复杂，能量转换密切，通常一个场的能量是另一个场的场源，材料特性呈非线性变化[8,45]。

如图 4 所示，变压器内部电-磁-热-流-力场耦合复杂，需要根据实际需求确定需要计算物理场的数量及其耦合关系。为揭示变压器内部材料的多物理场耦合特性，需要开展相关材料耦合特性的多参数数学模型研究。常用材料特性需要考虑电导率、相对介电常数、运动黏度和离子迁移率、导热率以及磁滞曲线等与不同物理场作用的影响关系。

因此，对于变压器油-纸绝缘材料、环氧材料、铁磁材料等，需要重点研究不同参数特性与各自影响的多物理场耦合特性。此外，还需进一步研究变压器多部件的多物理场建模，建立面向多场计算、绝缘分析与校核等特定场景的多物理场耦合模型。例如考虑漏磁损耗、涡流损耗等可建立结构件的磁-热-流耦合模型，考虑温升校核，建立油箱磁-热-流耦合模型和绕组热-流耦合模型。

2.2.2 多物理场耦合快速计算方法

1）基本单场计算

目前，国内外众多学者在考虑网格剖分、物理参数、方程组求解的影响下，针对电磁、流体、温度和结构力等单场的计算方法已有大量研究。如图5，针对变压器铁芯的磁场计算，采用等效磁阻率法解决了磁场计算建模时网格剖分过多的问题[46]。针对绕组匝间绝缘对温度的影响，采用等效导热系数法快速计算了温度场分布[47]。针对稳态采用有限元法，非正弦稳态采用谐波平衡法，瞬态采用时域有限元法。针对稀疏离散方程组，采用多重网格、因子形式的稀疏近似逆方法解决了离散矩阵预处理的问题[48-49]。针对求解效率低，采用 Krylov 子空间迭代法和 GMRES 算法等实现了方程高效快速求解问题[50-51]。总之，在后续基本物理场单场计算过程中，需要重点考虑变压器结构件的空间多尺度特性，精细剖分网格数量巨大；材料特性呈各向异性、非线性，方程性态差；计算方法要满足通用性、复杂工况与内部结构、精度和效率等。

2）多物理场耦合计算

多物理场耦合计算结果是数字孪生动态推演的数据来源，目前多物理场数值计算发展迅速，直接、间接耦合的计算方法被大量报道。数字孪生变压器要求快速计算，需要进一步研究变压器电磁、热、流等多物理场耦合的快速计算方法。

目前已有研究成果有：非线性降阶法、自适应步长的瞬态计算法、数据高效映射法、频域并行计算法等，实现了计算速度的大幅提升[52-55]。降阶方面，降阶模型的本质就是将非线性多维层面向低维层面转换，在不影响计算精度下降维减量以节省仿真计算时间。如图 6，目前变压器常用降阶模型主要有：响应面法、深度学习法、特征正交分解法，在多物理场快速计算上发挥了重要作用[46,56-57]。在变步长和并行计算方面，提出的基于 αATS-POD、POD-ATS-HTS、DMD-ATS 等变步长策略有效降低了有限元方程组的阶数和条件数，大大提高了计算速度[55,58-59]；报道的基于子循环自适应串行交错时间匹配算法大大减少了多场耦合的计算冗余，提高了计算效率[60]；同时成功基于 GPU 并行加速实现了油浸式变压器多场耦合仿真的快速计算[61]。总之，在后续的多物理场耦合快速计算方法研究中，需要重点考虑变压器内部电磁、流体、温度和结构力等多场强、弱耦合差异大；顺序迭代求解耦合场计算效率低；降阶模型的优化完善等。

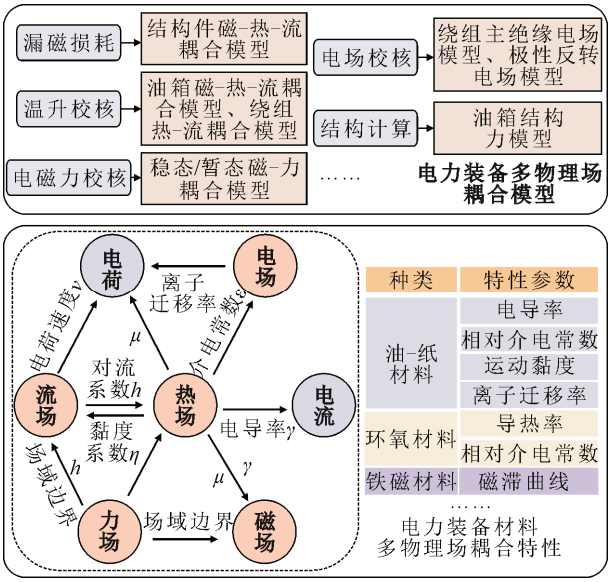



图 4 多物理场耦合材料特性及机理模型

Fig.4 Multi-physical field coupling material properties and mechanism models

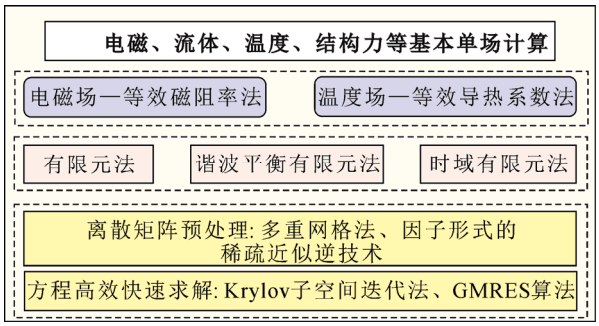



图 5 变压器内部基本单场计算

Fig.5 Basic single-field calculations inside a transformer

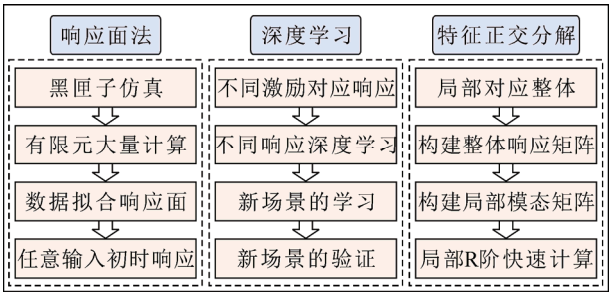



图 6 变压器多物理场计算的降阶模型

Fig.6 Reduced-order model of transformer multi-physics field calculations

尽管如此，变压器等复杂电力装备的 3 维多物理场计算时长仍处在数十分钟到数小时，甚至更长

时间，需要重点考虑变压器内部电磁、流体、温度和结构力等多场强、弱耦合差异大的特点，进一步研究先进的计算方法来缩短计算时间。

### 2.3　模型构建层关键技术

数字孪生变压器要求CAM+在多物理场计算结果的基础上实现更多传感参量，尤其是运维阶段关心的状态特征参量。根据现场实体传感器在线监测数据和状态特征参量的物理机理演化规律，结合虚实传感建立内部状态参量动态推演数值模型是实现变压器性能数字孪生的另一思路。在笔者先前的工作中，已经初步建立了相关参量的动态推演模型，获得了与运行状态直接相关的运维参量如变压器内部的水分、聚合度、气体、绕组形变、局部放电和击穿风险等分布，以支撑CAM+的智能运维。下面介绍几种参量动态推演数值模型的流程框架。

1）变压器水分分布

变压器纸板内水分将影响其老化速率与绝缘特性，这对于变压器状态评估非常重要，但目前现场运维对变压器固体绝缘水分含量尚无分布式检测手段和感知方法。因此，融合虚实传感并建立推演模型实现水分分布的传感监测能够突破目前物理传感器对于部分关键特征参量无法监测的技术瓶颈。

如图7所示，水分分布推演模型的建立主要分为3步。1）结合虚实传感实现多物理场的快速计算获得电场、温度场分布结果，并对比验证以反馈修正。2）考虑电场-温度耦合作用修正油纸水分平衡方程。3）借助水分扩散方程和水分总含量与运行时间的关系，建立任意位置时刻下固体绝缘水分含量及分布的数值推演模型[23,62-64]。

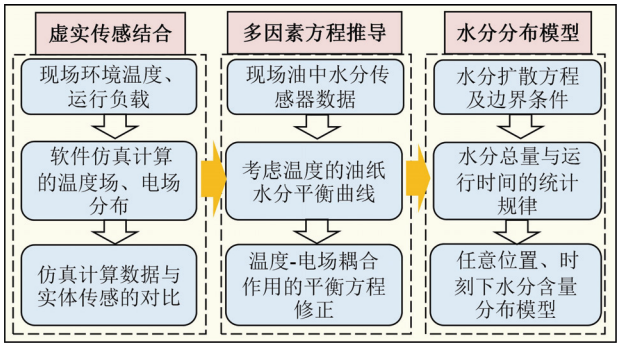



图7　水分分布动态推演模型的流程框架

Fig.7　Process framework for dynamic deduction model of moisture distribution

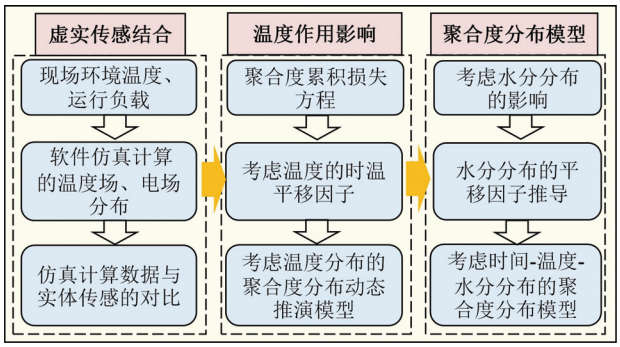



图8　聚合度分布动态推演模型的流程框架

Fig.8　Process framework for dynamic deduction model of degree of polymerization distribution

2）聚合度分布

聚合度作为反映变压器老化寿命最关键的参量，其难以通过传感方式在线检测获取[65-67]。虚拟推演获取聚合度分布对了解变压器内部老化薄弱点和运行寿命有重要参考价值。其推演模型的建立步骤如图8所示，首先结合虚实传感获得内部多物理场的分布数据。然后，考虑温度、水分分布的影响计算时-温平移因子和时间-水分平移因子。最后，基于时间-温度-水分分布的联合老化建立聚合度分布的动态推演数值模型[23]。

3）油中气体分布

油中溶解气体分析(dissolved gas analysis，DGA)是电力行业对油浸式变压器进行故障诊断的重要方法之一，但测量获取的溶解气体浓度与故障点处气体浓度存在极大的差异，对故障的识别与定位造成极大的干扰。借助热力学分析、流体分析等手段有望实现故障气体产生、扩散、输运过程的准确反演。笔者以丙烷分子为例，研究了热分解产气的产生过程。如图9所示，首先，考虑温度对化学平衡常数的影响，推导出计及温度影响的反应焓变与平衡常数之间的关系。然后，提出竞争因子系数量化反应中各物质的摩尔数，建立烷烃分子热分解方程组。最后，考虑原子守恒方程，得出变压器油中烷烃分子的热分解气体含量推演模型[68-70]。

4）其余参量的动态推演

此外，变压器内部更复杂的绕组形变和局部放电与击穿风险等难以直接通过传感监测的异常状态，也可通过虚实融合构建动态推演模型反演[71-72]。对于绕组形变，一方面，仍需准确掌握内绝缘在运行中承受的电、磁、热、流等多物理场信息。另一方面，还需结合多场仿真计算与灵敏度分析，建立虚实融合的变压器绕组形变推演模型，实现准确确定绕组形变类型、形变程度与发生形变的位置。对

于局部放电，除多物理场仿真计算的结果外，还需要进一步研究放电产生的油中溶解气体、电磁波等特性规律，并据此建立相应的数学模型和数值推演方法，通过数字孪生变压器的 CAM+实现局部放电发生、发展过程的动态推演与可视化展示。

### 2.4 数据交互层关键技术

#### 2.4.1 数据安全传输技术

数据的安全传输是实现数据上云并为后续的功能应用提供数据支撑的关键技术。目前，建设中的数字电网已经基于光纤实现了大容量高速传输，随着 5G、大数据、云平台等技术的快速发展，相关传输技术基本能够满足 CAM+对数据安全传输的要求。但关于数据传输安全技术仍需要不断加强，尤其是面向数字孪生体的智能运维层面。

目前数据传输面临的安全威胁主要分为窃取机密数据、篡改机密数据、伪造被认证授权的数据、拒绝服务等方面，这对数据传输安全技术提出了更高要求[73-74]。数据传输安全技术目前主要有：防火墙技术、部署安全协议、入侵检测、容错技术和数据加密处理技术。随着 CAM+的应用，网络连接资源的更新需求越来越高，消息可能存在延迟，从而导致网络漏洞。因此，网络基础设施等硬件也需要保证相应的要求，从而保证安全的数据传输。

#### 2.4.2 多源数据融合的协同分析技术

变压器的数据复杂，尤其是结合虚实融合建立的数字孪生体有着更为多源、异构的数据。在数据交互层中，CAM+模式可采用图数据的非关系数据库用于实现数据的处理、存储和融合。如图 10 所示，相较于传统的数据库，非关系型数据库能够以文档的形式额外存储元数据、XML 数据、机器人数据、变压器数字孪生体的虚实融合数据等，实现对更多信息的存储与利用。首先，需要开展面向变压器及其数字孪生体的多源异构数据清洗与治理，主要分为数据入库、数据存储和数据出库[75]。其次，需要对应用现场不同来源、不同厂家、不同装备采集的数据和数字孪生体数据开展多源数据融合，主要分为数据库的搭建、数据更新、数据加密[76]。

### 2.5 功能应用层关键技术

#### 2.5.1 设备状态故障诊断

变压器故障诊断方法主要分为两类。其中，基于数学诊断的方法有传统油中溶解气体分析、频率响应分析等，此类模型通过数学算式或物理模型诊断，有着计算量小，诊断效率高、便于工程应用的

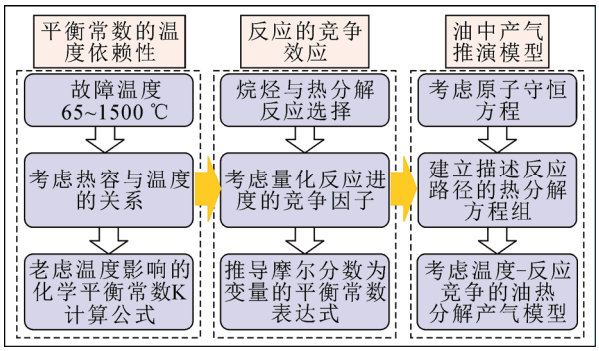



图 9 油中气体动态推演模型的流程框架

Fig.9 Process framework for dynamic deduction model of gas in oil

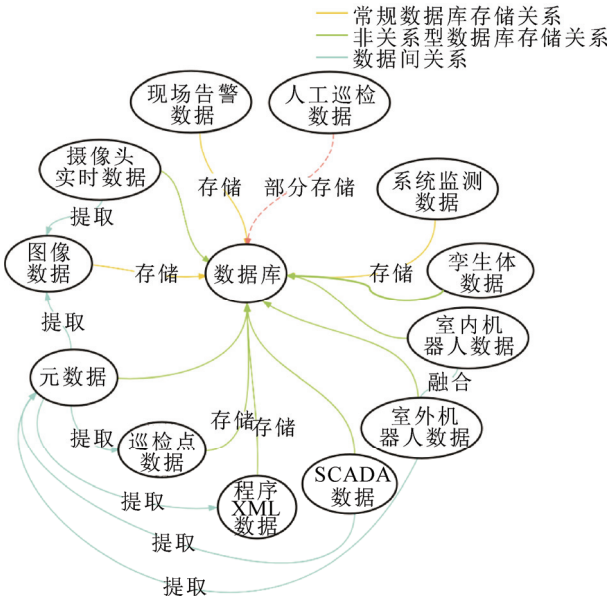



图 10 非关系型的数据库存储

Fig.10 Non-relational database storage

特点[77-78]。但对潜伏性故障，仍然存在故障诊断不准、数据信息不全等缺点。另外，基于人工智能方法有专家系统、人工神经网络、支持向量机、模糊数学等，此类智能方法可降低对专家意见的依赖性，提升诊断精度，但在应用过程中对历史样本数量、模型参数选取方面有着较高的要求[79]。

总之，由于目前故障诊断使用的参量比较单一，且没有深度挖掘故障发生的机理，导致无法对潜伏性故障实现精确定位和提前预判。因此，在变压器故障诊断方法上，还要继续深究故障机理，将实体传感的在线监测数据、环境数据与虚拟传感的仿真数据融合并相互修正，完善现有评价体系，实现更加全面、快速、准确的状态评估和异常故障预警，尤其是现场关联性较强的相似性故障。

2.5.2　知识图谱技术

变压器异常故障处置是智能运维的关键环节，处置策略目前主要依赖于传统的规则库查询和人工运维经验总结，而部分方法则借助深度学习，如循环神经网络、知识图谱等技术处理语言实现辅助决策[80]。知识图谱技术作为一种新技术，能对处置信息进行知识抽取、表示和管理，并结合人机交互辅助运维人员进行故障处置，有望支撑 CAM+在应急处理和调度智能化方面的应用。

CAM+模式构建的故障处置规则库知识图谱架构如图 11 所示，包含基础数据层、图谱构建层、信息解析层。其中基础数据层作为基础语料，图谱构建层作为知识网络，信息解析层是对信息进行解析和结构化表示，并从知识图谱的图数据库中匹配、检索或抽取相关数据和知识。最后，基于知识图谱架构存储相关异常故障处置案例，当异常故障发生时，快速分析研判，并给出对应的故障案例知识图谱以支撑智能运维。

## 3　数字孪生变压器 CAM+的应用

数字孪生变压器的CAM+应用主要分为场景数字孪生和性能数字孪生。如图 12 所示，本文根据目前电力变压器数字孪生应用的痛点问题，总结分析了未来 CAM+在数字孪生变压器领域中的应用实践，主要是场景可视化的实时更新和电力装备性能的参量推演、状态评估和人机协同智能运维，并以

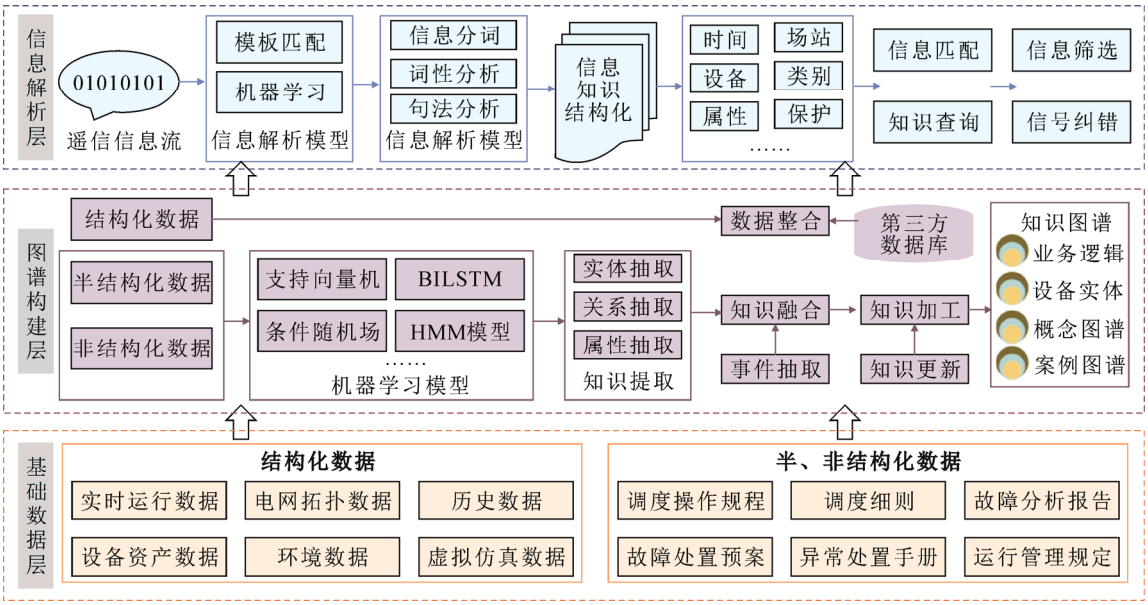



图 11　故障处置规则库知识图谱架构

Fig.11　Knowledge graph architecture for fault disposition rule base

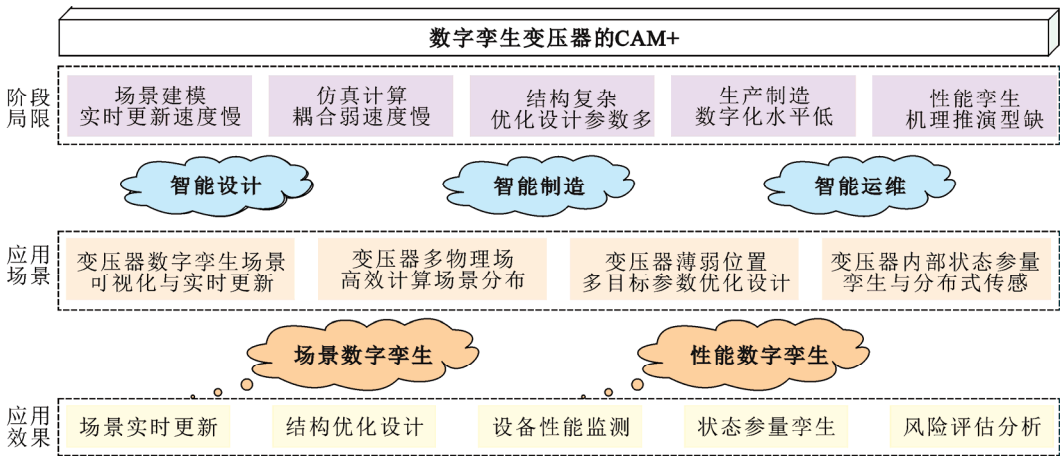



图 12　数字孪生变压器 CAM+的应用场景

Fig.12　Application scenarios of CAM+ for digital twin transformers

具体案例应用为例介绍。

### 3.1 变压器场景实时更新

变压器的数字孪生场景目前无法实现实时更新，笔者提出了一种改进的 BIM-NeRF 的建模方法，实现了变压器部件级别精准快速建模，支撑了变压器场景的实时更新。如图 13 所示，BIM-NeRF 建模的步骤是先进行 BIM 建模，再通过 Instant Neural Graphics Primitives (Instant-ngp)模型加速场景重建时间，最后结合 BIM 和 NeRF 的建模结果，将更新的结果回传至 3 维场景平台。结合 BIM 和 NeRF 建模，在实际运维中可以实现电力装备本体，辅助运维设备以及异常场景(如非法闯入、漏油等)的高精度场景重建和实时更新，为未来电网场景数字孪生的实时建模方法提供了一种新思路。

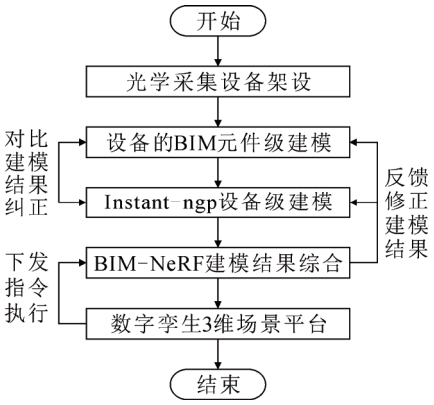



图 13 BIM-NeRF 的场景实时建模步骤

Fig.13 Scenario real-time modeling steps for BIM-NeRF

### 3.2 变压器内部状态参量孪生

变压器的 CAM+不仅需要具备传统 CAD 与 CAE 的功能，还能够结合装备设计单位与运行单位的实际工程需求，实现内部状态参量的孪生。如图 14 所示，CAM+可基于虚实融合的理念建立动态推演模型，初步实现与变压器运行相关的内部参量如水分含量及分布、聚合度分布、气体含量、绕组形变、放电风险等运维关心特征量的孪生推演，最终实现内部参量的可视化评估。基于此，数字孪生变压器的CAM+是作为构建具有生命力的数字孪生变压器的关键一步，有望为真正实现变压器的数字孪生提供数据基础，进而为智能评估、辅助运维等提供科学依据，具有重要的应用价值。

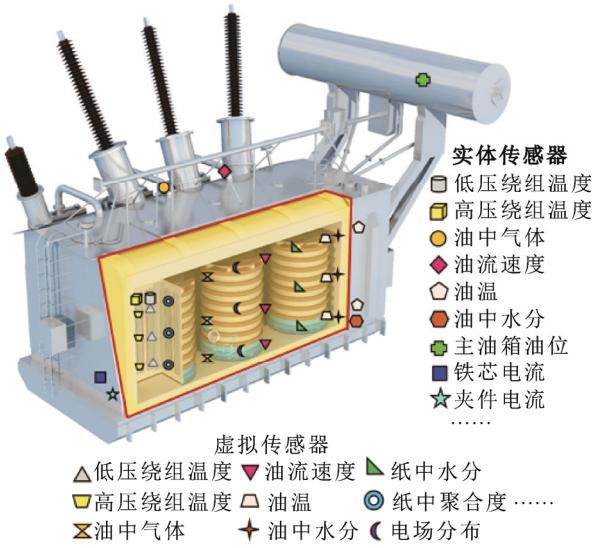



图 14 虚实融合的变压器内部状态参量孪生

Fig.14 Transformer internal state parameter twins of virtual-real fusion

### 3.3 变压器 CAM+的智能运维

变压器的CAM+最大优势就是借用计算机技术实现智能辅助运维。因此，打造基于 CAM+的变压器人机协同异常(故障)处置系统是支撑智能运维应用的重要环节。如图 15 所示，该系统主要分为数据融合、装备联动、智能分析、辅助策略、人机交互和案例管理 6 个部分。总体步骤主要是在数据融合分析的基础上，当异常发生时触发智能装备巡检变压器具体点位的各部件状态；并结合相关故障特征参量和人工智能评估算法分析判断异常(故障)；当故障类型确定后，结合标准处置流程、策略方案、人工经验，基于知识图谱技术生成标签化的智能辅助策略；然后将变压器 3 维场景、智能装备联动情况、智能分析结果及智能处置策略通过 CAM+平台全景可视化展示，同时将处置策略角色化下发至运维人员的手持终端，提示运维人员检查处置相关异常(故障)，并将信息反馈回 CAM+平台；最后建立异常(故障)处置专家案例库，结合语义相似度分析和神经网络算法实现后期相似案例处置方案的快速精准推送。总之，通过数字孪生变压器 CAM+的辅助运维，有望促进产品研发，提高运维效率，丰富更多传感参量，可为电力装备数字化转型提供参考。

## 4 面临挑战与未来展望

### 4.1 面临挑战

目前围绕电力重点装备构建面向装备全生命周期的数字孪生系统，实现装备的预测性维护与健康管理被工信部明确提出，相关电力数字化白皮书也发布许多，但由于较多相关关键技术处于初级阶段，限制了数字孪生变压器 CAM+的发展和应用落

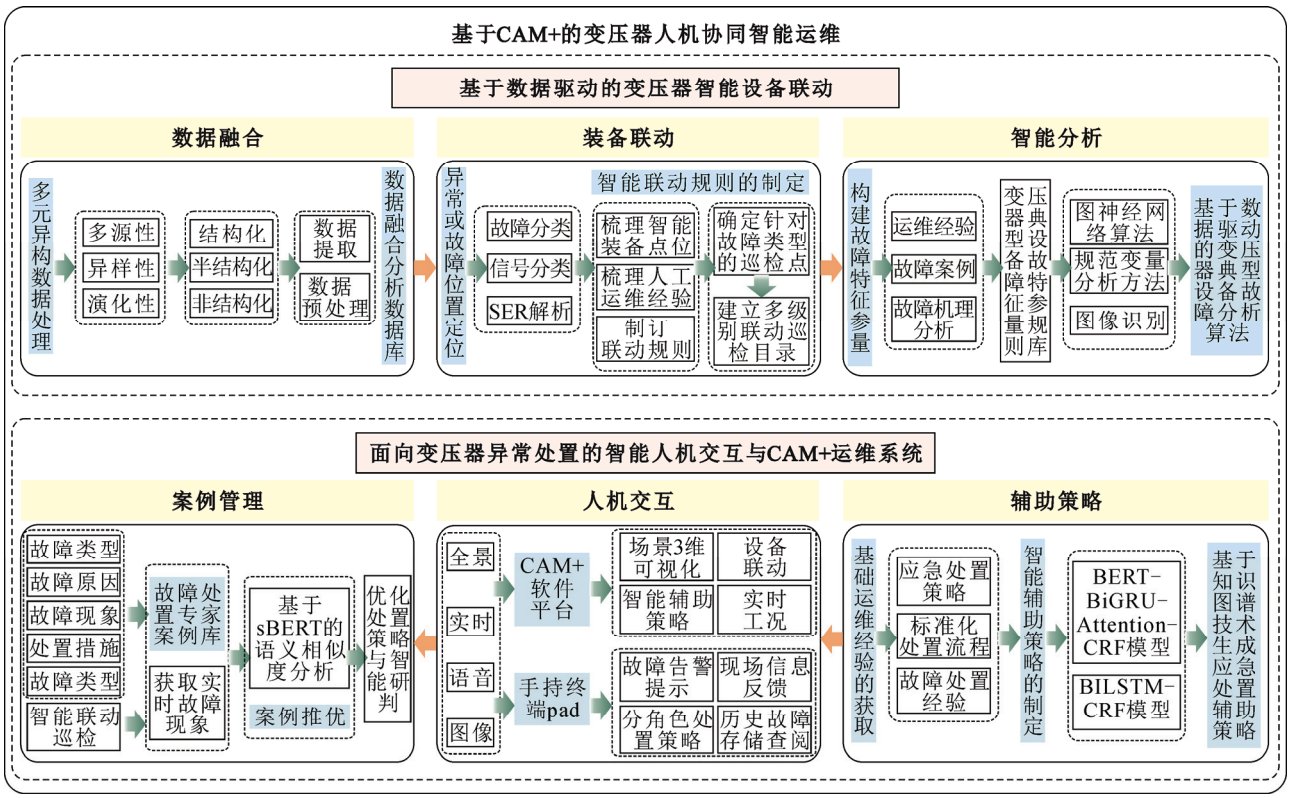



图 15　基于 CAM+的变压器人机协同智能运维框架流程

Fig.15　Framework process of transformer human-machine cooperative intelligent maintenance based on CAM+

地，还面临以下挑战和问题。

1）3 维场景建模问题

按照智能建筑、智能城市的模式已经完成了电力装备的 3 维建模。但主要问题是目前主要功能仍只是知识与传感信息的附着，实时更新性能差，无法支撑外观的可视化评估，不能真正实现场景的数字孪生。这方面还需要进一步研究低成本、实时更新的电力装备场景建模新方法。

2）高可靠高精度传感问题

各行业先进传感装置发展迅速，但由于变压器内部结构复杂、存在强电磁场、安装困难、内部参量机理不明，目前大多实体传感器只能安装在变压器外部进行间接传感，无法获得更多传感参量的数据，更不能获得分布式传感信息。这方面在后续还应对芯片化的高可靠高精度传感器和虚实融合的计算进行研究。

3）多物理场耦合的建模与计算问题

变压器的内部多物理场仿真计算已经研究多年。但由于高场强下材料非线性特性难以描述，多物理场直接耦合方程的计算收敛慢、求解效率低，导致与数字孪生要求的实时性、高效性存在差距。因此，这方面在后续还应针对实际应用场景，考虑多因素影响的材料特性建立准确的多物理场耦合模型，同时还要研究相关多场耦合的高效快速求解算法，并进一步关注适用于变压器数字孪生的降阶模型与加速计算算法。

4）故障演化与动态推演模型建立的问题

对于变压器内部特征参量的动态推演，需要正确认识和深入理解各类材料在不同物理场下的响应特征和性能演化规律，并针对不同预测需求，建立合适的动态推演数值模型。上述工作包括电介质材料在多物理场下的介电特性短时响应及长期演化特征，还包括设备绝缘、金属材料，固、液、气多相间的热、动力学过程，涉及多个交叉学科领域，所需的研究内容多、工作量大，需要后续重点研究。

5）数据交互问题

随着电力装备数字化转型，智能化平台建设越来越多，如数字孪生 3 维场景平台、数字一体化平台、机器人巡检平台、摄像头监控平台和电站固定的系统平台等。为保证平台统一管理，各个平台数据的交互，相关协议的开发是个难题。此外，落地应用一般针对数字化变电站、换流站，其内部数据传输的安全性也是一大挑战。

6）数字孪生系统可靠性问题

鉴于虚实融合传感实现变压器内部更多参量的计算和分布式传感，但对于计算数据的准确性还需要后续的真机试验不断反馈修正，是个长期的验证改进过程，且数字孪生虚拟系统的稳定性也受限于硬软件设备、通信、评估算法等多个方面，需要后续研究不断优化完善。

7）自主仿真软件问题

电力装备要实现数字化转型，需要工业互联网的仿真设计技术来支撑。工业仿真领域十大软件企业中国的企业数量为零，需要开发自主仿真软件，实现低成本的仿真计算。但存在高压多物理场建模与计算难、电力装备几何修复与网格处理难、电力装备仿真软件开发与发展难等几个难题。

8）运行状态异常故障诊断问题

变压器状态评估算法基本还是基于人工经验的判断和数据驱动的智能分析算法的评估。然而现场变压器的异常(故障)通常特征参量的数据量少，故障关联性强，这使得常规深度学习等智能算法的应用是有一定不足的，因此，CAM+需要考虑现场实际问题，研究相关智能算法实现异常(故障)的快速准确评估也是一大挑战。

### 4.2 未来展望

借助数字孪生技术，对电力变压器的短期故障发展过程以及长期性能演化过程进行准确仿真，最终实现计算机辅助运维，对于提高装备的安全性、可靠性以及电网的数字化程度至关重要。随着CAM+的不断优化完善，更多与现场运维关系更密切的特征参量，可以经虚拟传感的方式被感知，通过开发新型的虚、实传感器，为变压器的精准运维提供更多传感参量。此外，建立基于CAM+的新一代数字化变压器，通过对典型故障的反演，可为故障前的预警以及故障后的研判提供科学依据。同时，不同电力装备领域关于CAM+的基础研究还可以作为新的功能模块，为后续全面实现具有CAM+能力的变压器数字孪生体奠定基础，提高变压器的运维水平，真正实现对变压器的数字化赋能。

## 5 结论

1）该文提出了一种数字孪生变压器 CAM+模式的技术架构，该 CAM+除具备 CAD、CAE 等软件功能外，还能实现设备外部场景的实时更新，设备内部运行状态的推演和预测，典型故障的反演和定位，以及运行风险的智能运维等。

2）对数字孪生变压器 CAM+模式所需关键技术进行了分析。目前众多学者在关键技术如 3 维场景建模、高精度传感、多源异构数据融合、状态故障诊断、知识图谱等领域为构建CAM+奠定了基础，但未来还需从场景的实时更新、仿真的虚实融合、参量的动态推演、可视化评估等几方面重点开展研究以实现智能运维。

3）当前实现数字孪生变压器 CAM+模式的关键技术所面临的挑战在于：低成本、实时更新的电力装备场景建模新方法研究；芯片化传感器和虚实融合传感的方法计算；故障演化机理与动态推演模型的建立；相关数字化平台的接口交互、数据传输；电力装备仿真软件的自主开发；运行状态异常(故障)智能诊断方法的应用。

## 参考文献 References


[1] 中国南方电网. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R]. 广州：中国南方电网有限责任公司，2021.
China Southern Power Grid Company Limited. Digital power grid promotes the construction of a new type power system with new energy as the main body[R]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Company Limited, 2021.

[2] 国家电网有限公司. 新型电力系统数字化支撑技术体系白皮书[R]. 北京：国家电网有限公司，2022.
State Grid Corporation of China. The digital support technology system of new type power systems[R]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2022.

[3] 工业和信息化部. “十四五”信息化和工业化深度融合发展规划[EB/OL]. (2023-04-15). 北京：工业和信息化部，2021.
Ministry of Industry and Information Technology. Development plan for the deep integration of informatization and industrialization in the 14th five-year plan[EB/OL]. (2023-04-15). Beijing, China: Ministry of Industry and Information Technology, 2021.

[4] 国家能源局. 国家能源局关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见[EB/OL]. (2023-03-28). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/02/content_5749758. htm.
National Energy Administration of China. Several opinions of thenational energy administration on accelerating the development of digital and intelligent energy[EB/OL]. (2023-03-28). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/02/content_5749758. htm.

[5] 刘崇德. 变电所采用避雷针(线)保护的电子计算机辅助设计探讨[J]. 高电压技术，1986，(4)：18-24.
LIU Chongde. A research on CAD for substation protection by lightning rod or overhead grounding wire[J]. High Voltage Engineering, 1986, (4): 18-24.

[6] 田 荣. 中国 CAE 软件发展的新契机[J]. 计算机辅助工程，2011，20(1)：141-143，147.
TIAN Rong. New opportunity for CAE software development in China[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(1): 141-143, 147.

[7] 樊夏漪. 塑料模具 CAD/CAE/CAM 技术的应用及发展趋势[J]. 中国新技术新产品，2019(5)：15-16.
FAN Xiayi. Application and development trend of plastic mold CAD/CAE/CAM technology[J]. New Technology & New Products of

China, 2019(5): 15-16.

[8] 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.

[9] 张弦亮，郝　建，刘　丛，等. 变压器绕组热缺陷温度演化规律及其辨识方法[J/OL]. 高电压技术，2023：1-12[2021-02-26]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20230680.
ZHANG Xianliang, HAO Jian, LIU Cong, et al. Temperature distribution evolution of transformer windings thermal defect and its identification method[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-12 [2021-02-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230680.

[10] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. KAHLEN J, FLUMERFELT S, ALVES A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham, Germany: Springer, 2017: 85-113.

[11] 陶　飞，刘蔚然，张　萌，等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统，2019，25(1)：1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.

[12] 蒲天骄，陈　盛，赵　琦，等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028.

[13] Industrial Internet Consortium. Digital twins for industrial applications, definition, business values, design aspects, standards and use cases [R/OL]. (2023-04-15). https://www.researchgate.net/publication/339460951_Digital_Twins_for_Industrial_Applications_Definition_Business_Values_Design_Aspects_Standards_and_Use_Cases.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 刘云鹏，刘一瑾，律方成，等. 数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1621-1633.
LIU Yunpeng, LIU Yijin, LÜ Fangcheng, et al. Application prospect and key technology of digital twin in power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1621-1633.

[17] 刘云鹏，刘一瑾，刘　刚，等. 电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8636-8652.
LIU Yunpeng, LIU Yijin, LIU Gang, et al. Digital twin conception of intelligent operation and maintenance of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8636-8652.

[18] 董旭柱，郑　宇，张　帅，等. IEEE PES 电力设备数字孪生发展报告 [EB/OL]. [2022-04-15]. https://www.eptc.org.cn/knowledge/16337250-19366895618.
DONG Xuju, ZHENG Yu, ZHANG Shuai, et al. IEEE PES report on the development of digital twins for electric power equipment[EB/OL]. [2022-04-15]. https://www.eptc.org.cn/knowledge/16337250-19366895618.

[19] 中国电子技术标准化研究院，树根互联技术有限公司. 重磅发布|一图看懂《数字孪生应用白皮书》[R/OL]. http://www.cesi.cn/202011/7002. html.
China Electronics Standardization Institute, ROOTLOUD Technology Co., Ltd. White paper on digital twin application[R/OL]. http://www.cesi. cn/202011/7002. html.

[20] 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.

[21] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告[R/OL]. (2018-12). http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190859.htm.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report[R/OL]. (2018-12). http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190859. htm.

[22] 汪归归，宋　歌，陈安太，等. 飞行模拟场景中三维云的实时建模和绘制[J]. 计算机工程与设计，2011，32(7)：2414-2416，2522.
WANG Guigui, SONG Ge, CHEN Antai, et al. 3D cloud real-time modeling and rendering in flight simulator scene[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(7): 2414-2416, 2522.

[23] LUO H, CHENG L, YANG L J, et al. A novel approach to building digital twin transformers by combining virtual-real sensing: An example of degree of polymerization distribution[J]. Measurement, 2023, 222: 113714.

[24] 刘　刚，刘西娅，刘　尧，等. 基于响应面法的变压器静电环绝缘优化设计[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4163-4171.
LIU Gang, LIU Xiya, LIU Yao, et al. Optimal design of transformer electrostatic ring insulation based on response surface method[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4163-4171.

[25] 陈英达，曾群生，陈　彬，等. 面向电网变电站的视觉三维重建及语义分割技术研究[J]. 电力大数据，2022，25(10)：45-52.
CHEN Yingda, ZENG Qunsheng, CHEN Bin, et al. Research on visual 3D reconstruction and semantic segmentation technology for power grid substation[J]. Power Systems and Big Data, 2022, 25(10): 45-52.

[26] 郑勇峰，王枝军. 结合倾斜摄影测量技术的变电站三维重建[J]. 测绘通报，2018(8)：153-155，163.
ZHENG Yongfeng, WANG Zhijun. The three dimensional reconstruction of substation based on oblique photogrammetry[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(8): 153-155, 163.

[27] 赵云莉. 应用 BIM 技术的大型建筑综合体外立面三维重建算法[J]. 粉煤灰综合利用，2023，37(3)：112-118.
ZHAO Yunli. 3D reconstruction algorithm of large building exterior facade with BIM technology[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2023, 37(3): 112-118.

[28] 鄢化彪，徐方奇，黄绿娥，等. 基于深度学习的多视图立体重建方法综述[J]. 光学精密工程，2023，31(16)：2444-2464.
YAN Huabiao, XU Fangqi, HUANG Lü'e, et al. A review of multi-view stereo reconstruction methods based on deep learning[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(16): 2444-2464.

[29] 孙水发，汤永恒，王　奔，等. 动态场景的三维重建研究综述[J/OL]. 计算机科学与探索，2023：1-37[2024-02-26]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11.5602. TP. 20230921.2215.006. html.
SUN Shuifa, TANG Yongheng, WANG Ben, et al. A review of research on 3D reconstruction of dynamic scenes[J/OL]. Computer Science and Exploration, 2023: 1-37[2024-02-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5602. TP. 20230921.2215.006. html.

[30] MILDENHALL B, SRINIVASAN P, TANCIK M, et al. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis[C]// 16th

European Conference on Computer Vision. Glasgow, UK: Springer, 2020: 405-421.

[31] 沈小军，于忻乐，王远东，等. 变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J]. 高电压技术，2021，47(2)：387-395.
SHEN Xiaojun, YU Xinle, WANG Yuandong, et al. Three-dimensional visualization scheme of infrared thermal temperature measurement data for substaition electric power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 387-395.

[32] 刘 健，解 辰，蔺丽华. 基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J]. 高电压技术，2010，36(4)：964-970.
LIU Jian, XIE Chen, LIN Lihua. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 964-970.

[33] 刘云鹏，马国明，律方成. 基于紫外成像技术的电气设备放电故障定位[J]. 高电压技术，2007，33(5)：79-82.
LIU Yunpeng, MA Guoming, LÜ Fangcheng. Based on UV imaging technology locating discharge of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 79-82.

[34] 贾志东，王林军，尚晓光，等. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1467-1475.
JIA Zhidong, WANG Linjun, SHANG Xiaoguang, et al. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1467-1475.

[35] 张卫庆，王成亮，高爱民，等. 基于红外测温技术的电力变压器绕组温度自动监测方法[J]. 电子设计工程，2020，28(6)：87-91.
ZHANG Weiqing, WANG Chengliang, GAO Aimin, et al. Automatic monitoring method for winding temperature of power transformer based on infrared temperature measurement technology[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(6): 87-91.

[36] 黄石磊，蒲道杰. 一种新的 GIS 局部放电检测的压电式传感器[J]. 电子技术与软件工程，2014(9)：260.
HUANG Shilei, PU Daojie. A new piezoelectric sensor for partial discharge detection in GIS[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2014(9): 260.

[37] 张露予，王博文，翁 玲，等. 螺旋磁场作用下磁致伸缩位移传感器的输出电压模型及实验[J]. 电工技术学报，2015，30(12)：21-26.
ZHANG Luyu, WANG Bowen, WENG Ling, et al. The output voltage model of magnetostrictive displacement sensor in helical magnetic fields and its experimental study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 21-26.

[38] 尚丽平，曹铁泽，刘先勇，等. 变压器油中溶解气体在线色谱监测综述[J]. 变压器，2004，41(8)：36-39.
SHANG Liping, CAO Tieze, LIU Xianyong, et al. Summary of on-line chromatograph monitoring for dissolved gasses in transformer oil[J]. Transformer, 2004, 41(8): 36-39.

[39] 江 军，吴睿涵，何亚倩，等. 基于光强调制型光热干涉法的绝缘油中乙炔传感[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-9[2024-02-26]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 231544.
JIANG Jun, WU Ruihan, HE Yaqian, et al. Intensity modulated photothermal interferometry-based acetylene detection in insulation oil[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-9[2024-02-26]. https://doi.org/10.13334/j. 0258-8013.pcsee. 231544.

[40] 刘云鹏，李 欢，高树国，等. 分布式光纤传感在大型变压器温度和绕组变形监测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：6126-6135.
LIU Yunpeng, LI Huan, GAO Shuguo, et al. Research on application of distributed optical fiber sensing in monitoring of temperature and winding deformation of large transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6126-6135.

[41] 宋雨轩，陈伟根，张知先，等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的 GIS 内置局部放电超声传感技术[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3088-3097.
SONG Yuxuan, CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, et al. Ultrasonic sensing technology of partial discharge built into GIS based on fiber optic Michelson interferometry[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3088-3097.

[42] 张 博，陶亚光，常帅帅，等. MEMS 传感器输电线路舞动轨迹监测[J]. 中国测试，2022，48(1)：53-59.
ZHANG Bo, TAO Yaguang, CHANG Shuaishuai, et al. Transmission line galloping trajectory monitoring based on MEMS sensor[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 53-59.

[43] 曾非同，关向雨，黄以政，等. 基于多尺度多物理场的油浸式变压器流动-传热数值研究[J]. 电工技术学报，2020，35(16)：3436-3444.
ZENG Feitong, GUAN Xiangyu, HUANG Yizheng, et al. Numerical study on flow-heat transfer of oil-immersed transformer based on multiple-scale and multiple-physical fields[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3436-3444.

[44] 谢裕清，李 琳，宋雅吾，等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5957-5965.
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.

[45] 廖才波，阮江军，刘 超，等. 油浸式变压器三维电磁-流体-温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备，2015，35(9)：150-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.

[46] 张重远，刘迪程，高成龙，等. 基于 Twin Builder 的 110 kV 油浸式变压器三维磁场降阶模型及损耗分析[J/OL]. 高电压技术，2023：1-12[2024-02-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231151.
ZHANG Zhongyuan, LIU Dicheng, GAO Chenglong, et al. Three-dimensional magnetic field reduction model and loss analysis of 110 kV oil-immersed transformer based on twin builder[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-12[2024-02-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231151.

[47] 沈 楠，刘 刚，王晓晗，等. 基于最小热阻力法则的油浸式变压器绕组等效导热系数计算方法及应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2023，50(4)：60-68.
SHEN Nan, LIU Gang, WANG Xiaohan, et al. Calculation and application of equivalent thermal conductivity of oil-immersed transformer windings based on the law of least thermal resistance[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(4): 60-68.

[48] BOLTEN M, HUCKLE T K, KRAVVARITIS C D. Sparse matrix approximations for multigrid methods[J]. Linear Algebra and its Applications, 2016, 502: 58-76.

[49] KOPAL J, ROZLOŽNÍK M, TŮMA M. An adaptive multilevel factorized sparse approximate inverse preconditioning[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 113: 19-24.

[50] 周雪影，吕文婷. 基于子空间迭代法的快速 N-1 潮流计算方法研究[J]. 陕西电力，2014，42(4)：53-56.
ZHOU Xueying, LÜ Wenting. Study on fast N-1 power flow calculation method based on subspace iteration method[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(4): 53-56.

[51] 豆 朋，马 明，刘 东，等. 基于混合 LU 分解预处理 GMRES 的暂态稳定仿真并行算法[J]. 高电压技术，2017，43(10)：3419-3426.
DOU Peng, MA Ming, LIU Dong, et al. Parallel algorithm for transient stability simulation based on GMRES method preconditioned by

hybrid LU decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3419-3426.

[52] 雷　成，王亚东，石　岩，等. 基于异构网格数据映射算法的干式变压器多物理场耦合分析[J]. 电气应用，2022，41(4)：5-13.
LEI Cheng, WANG Yadong, SHI Yan, et al. Coupling analysis of dry-type transformer multi-physics field based on heterogeneous grid data mapping algorithm[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(4): 5-13.

[53] 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.

[54] 赵小军，李　琳，程志光，等. 定点谐波平衡有限元法与叠片铁心直流偏磁磁化特性研究[J]. 中国电机工程学报，2011，31(9)：126-132.
ZHAO Xiaojun, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Fixed-point harmonic-balanced finite element method and dc-biasing magnetizing characteristics of laminated core[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 126-132.

[55] 刘　刚，郝世缘，胡万君，等. 基于 POD-$\alpha$ATS 的油浸变压器瞬态温升降阶自适应变步长计算方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-10[2024-02-26]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/ 11.2107. TM. 20230814.1215.002. html.
LIU Gang, HAO Shiyuan, HU Wanjun, et al. Research on adaptive variable step size calculation method for transient temperature rise and fall of oil immersed transformer based on POD-$\alpha$ATS[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-10[2024-02-26]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.2107. TM. 20230814.1215.002. html.

[56] 武　频，孙俊五，封卫兵. 基于自编码器和 LSTM 的模型降阶方法[J]. 空气动力学学报，2021，39(1)：73-81.
WU Pin, SUN Junwu, FENG Weibing. Reduced order model based on autoencoder and long short-term memory network[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(1): 73-81.

[57] 谢裕清，李　琳. 基于本征正交分解的换流变压器极性反转电场降阶模型[J]. 中国电机工程学报，2016，36(23)：6544-6551.
XIE Yuqing, LI Lin. A reduced order model via proper orthogonal decomposition for polarity reverse electric fields in converter transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6544-6551.

[58] 刘　刚，郝世缘，胡万君，等. 基于 POD-ATS-HTS 混合变步长方法的油浸式电力变压器绕组瞬态温升计算方法研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(24)：9772-9785.
LIU Gang, HAO Shiyuan, HU Wanjun, et al. Research on transient temperature rise calculation method of oil immersed power transformer winding based on POD-ATS-HTS hybrid variable step method[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9772-9785.

[59] 刘　刚，郝世缘，朱章宸，等. 基于 DMD-ATS 油浸式电力变压器绕组瞬态温升快速计算方法研究[J/OL]. 电工技术学报，2023：1-12[2024-02-26]. https://doi.org/10.19595/j.cnki. 1000-6753. tces. 230465.
LIU Gang, HAO Shiyuan, ZHU Zhangchen, et al. Research on rapid calculation method of transient temperature rise of winding of DMD-ATS oil-immersed power transformer[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023: 1-12[2024-02-26]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753. tces. 230465.

[60] 刘　刚，郝世缘，胡万君，等. 基于 SCAS 时间匹配算法油浸式变压器绕组瞬态温升计算方法[J/OL]. 电工技术学报，2023：1-14[2024-02-26]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces. 222137.
LIU Gang, HAO Shiyuan, HU Wanjun, et al. Transient temperature rise calculation of oil immersed transformer winding based on SCAS time matching algorithm[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023: 1-14[2024-02-26]. https://doi.org/10.19595/j.cnki. 1000-6753. tces. 222137.

[61] 任增强，刘　刚，靳立鹏，等. 基于 GPU 并行加速变压器二维瞬态流场问题的研究及应用[J]. 华北电力大学学报，2023，50(6)：66-75.
REN Zengqiang, LIU Gang, JIN Lipeng, et al. Research and application of two-dimensional transient velocity field in transformer based on GPU parallel acceleration[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(6): 66-75.

[62] OOMMEN T V. Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems[C]// 1983 EIC 6th Electrical/Electronical Insulation Conference. Chicago, USA: IEEE, 1983: 162-166.

[63] 刘　骥，杨　航，张明泽，等. 交直流复合电场–温度场下油纸绝缘内水分暂态分布规律研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：3260-3272.
LIU Ji, YANG Hang, ZHANG Mingze, et al. Research on moisture transient distribution in oil-paper insulation under AC/DC composite electric field and temperature field[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3260-3272.

[64] GIELNIAK J, GRACZKOWSKI A, MORANDA H, et al. Moisture in cellulose insulation of power transformers - statistics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 982-987.

[65] 杨丽君，邓帮飞，廖瑞金，等. 应用时–温–水分叠加方法改进油纸绝缘热老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报，2011，31(31)：196-203.
YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 196-203.

[66] 廖瑞金，孙会刚，巩　晶，等. 变压器油纸绝缘老化动力学模型及寿命预测[J]. 高电压技术，2011，37(7)：1576-1583.
LIAO Ruijin, SUN Huigang, GONG Jing, et al. Ageing kinetic model and lifetime model of oil-paper insulation in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1576-1583.

[67] 廖瑞金，汪　可，尹建国，等. 初始水分含量对油纸绝缘热老化特性的影响[J]. 高电压技术，2012，38(5)：1172-1178.
LIAO Ruijin, WANG Ke, YIN Jianguo, et al. Influence of initial moisture on thermal aging characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1172-1178.

[68] 齐　波，张　鹏，张书琦，等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.

[69] CUI H Z, YA L Q, ZHU Y W, et al. Dissolved gas analysis for power transformers within distributed renewable generation-based systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1349-1356.

[70] 徐　晴，郝　建，叶文郁，等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Microscopic mechanism of thermal cracking and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1026-1037.

[71] 曹　辰，徐博文，李　辉. 基于振动与电抗信息的变压器绕组形变

状态综合监测方法[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1518-1530.
CAO Chen, XU Bowen, LI Hui. Composite monitoring method for the state of transformer winding deformation based on vibration and reactance information[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1518-1530.

[72] 苏志雄，于瑞冬，张周胜. 基于多重多项式结果-二重网格搜索的变压器局部放电定位[J/OL]. 高电压技术，2023：1-11[2024-02-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20230386.
SU Zhixiong, YU Ruidong, ZHANG Zhousheng. Partial discharge location of transformers based on multipolynomial resultant approach and 2-lattice search[J/OL]. High Voltage Technology, 2023: 1-11 [2024-02-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20230386.

[73] 程玉涛，李　宁，李海波. 基于加密算法的电力物联网电能质量数据安全传输方法[J]. 自动化技术与应用，2022，41(7)：87-90.
CHENG Yutao, LI Ning, LI Haibo. Secure transmission method of power quality data based on encryption algorithm in power internet of things[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(7): 87-90.

[74] 张　伟，丁朝晖，杨国玉，等. 基于区块链和数字签名技术的智慧电厂数据安全传输系统研究与设计[J]. 电力信息与通信技术，2021，19(7)：33-39.
ZHANG Wei, DING Zhaohui, YANG Guoyu, et al. Research and design of data security transmission system of smart power plant based on blockchain and digital signature technology[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(7): 33-39.

[75] 孙　瑜. 基于云数据中心的多源异构数据治理技术研究[J/OL]. 计算机测量与控制，2023：1-8[2024-02-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4762. TP. 20231012.0940.008. html.
SUN Yu. Research on multi-source heterogeneous data governance technology based on cloud data center[J/OL]. Computer Measurement & Control, 2023: 1-8[2024-02-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4762. TP. 20231012.0940.008. html.

[76] 闫佳和，李红辉，马　英，等. 多源异构数据融合关键技术与政务大数据治理体系[J]. 计算机科学，2024，51(2)：1-14.
YAN Jiahe, LI Honghui, MA Ying, et al. Multi-source heterogeneous data fusion technologies and government big data governance system[J]. Computer Science, 2024, 51(2): 1-14.

[77] 林凡勤，李明明，郭　红. 变压器故障诊断技术综述[J]. 计算机与现代化，2022(3)：116-126.
LIN Fanqin, LI Mingming, GUO Hong. Review on fault diagnosis technology of transformer[J]. Computer and Modernization, 2022(3): 116-126.

[78] 谭俊明，张诗建. 变压器故障诊断研究综述[J]. 机电工程技术，2021，50(10)：12-14，140.
TAN Junming, ZHANG Shijian. Review of transformer fault diagnosis method[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(10): 12-14, 140.

[79] 汤心韵，张　淼，邹旻昊，等. 机器学习用于变压器故障诊断综述[J]. 电气应用，2023，42(9)：69-76.
TANG Xinyun, ZHANG Miao, ZOU Minhao, et al. Overview of machine learning for transformer fault diagnosis[J]. Electrotechnical Applications, 2023, 42(9): 69-76.

[80] 刘　丽，闫晓梅，李　刚. 配电网故障处置中的知识图谱：进展、挑战与展望[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(7)：19-26.
LIU Li, YAN Xiaomei, LI Gang. Knowledge graph in distribution network fault handing: advances, challenges and prospects[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(7): 19-26.



**廖瑞金**
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电力装备多物理场仿真分析与软件开发、电力设备先进数字孪生技术、先进电工材料技术和电力装备智能监测与寿命管理的研究
E-mail: rjliao@cqu.edu.cn
LIAO Ruijin
Ph.D., Professor



**罗　豪**
1997—，男，博士生
主要从事电力装备数字孪生、状态智能评估方面的研究工作
E-mail: haoluo@cqu.edu.cn
LUO Hao
Ph.D. candidate



**成　立**(通信作者)
1989—，男，博士，教授
主要从事电力装备数字孪生、寿命评估、无损检测新方法的相关工作
E-mail: chengl16@cqu.edu.cn
CHENG Li
Ph.D., Professor
Corresponding author



**杨丽君**
1980—，女，博士，教授
主要从事大型电力变压器内绝缘老化机理及寿命预测、电力设备在线监测及故障诊断的研究
E-mail: yljcqu@cqu.edu.cn
YANG Lijun
Ph.D., Professor



**赵学童**
1984—，男，博士，教授
主要从事有机绝缘/储能材料的制备与应用，变压器等电力设备性能检测与评估技术的研究
E-mail: zxt201314@cqu.edu.cn
ZHAO Xuetong
Ph.D., Professor



**郝　建**
1984—，男，博士，教授
主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究
E-mail: cquhaojian@126.com
HAO Jian
Ph.D., Professor

收稿日期　2024-01-24　修回日期　2024-02-28　　编辑　卫李静