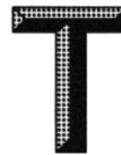


ICS 29.240.30
CCS F 20



团 体 标 准

T/CI 920—2025

电力装备数字孪生模型构建技术规范

Technical specification for electric power equipment digital twin model
construction standard

2025-03-03 发布

2025-03-03 实施

中国国际科技促进会 发布

湖北科学技术出版社 出版

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
4.1 电力装备数字孪生模型构建分层架构	2
4.2 电力装备数字孪生模型数据	3
5 数据采集与处理	6
5.1 数据源要求	6
5.2 数据预处理	6
5.3 数据安全	7
6 模型构建技术选择	7
6.1 模型类型选择	7
6.2 建模流程	7
6.3 模型校验	7
7 系统集成与接口规范	7
7.1 通信协议	7
7.2 API 设计	7
7.3 平台兼容性	8
8 安全与可靠性	8
8.1 安全要求	8
8.2 可靠性指标	8
9 多尺度建模与跨层级协同	8
9.1 建模粒度划分	8
9.2 跨层级数据融合	8
10 典型故障模式与模型响应	9
11 测试与验收标准	9
11.1 测试内容	9
11.2 验收流程	9
11.3 与外部软件及数据库的交互接口	9
12 运维与更新	9
附录 A（规范性）电力装备数字孪生模型构建示例	10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由重庆大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：重庆大学、上海科梁信息科技股份有限公司、国网思极位置服务有限公司、山东思极科技有限公司、重庆广仁能源装备股份有限公司、国网宁夏电力有限公司、南京电力设计研究院有限公司、四川汇思电气有限公司、南京师范大学、天津云圣智能科技有限责任公司、南京南瑞水利水电科技有限公司、福建数字孪生信息技术有限公司、福建水利电力职业技术学院、西安兴汇电力科技有限公司、江门市赛为电力科技有限公司、山东德源电力科技股份有限公司、国网河南省电力公司郟县供电公司。

本文件主要起草人：杨帆、王鹏博、李鸿彪、林黎明、何迪、洪敏、王志远、靳盘龙、顾承阳、陈明禄、陈方平、徐希涛、李赤峰、蒋晨达、于杰、张大赛、张洋洋、张大庆、邱玥、马辉、石林龙、孔斌、赵文博、于一鸣、王立、罗维、桂帆、李中胜、赵品祎。

本文件为首次发布。

电力装备数字孪生模型构建技术规范

1 范围

本文件规定了数据预处理、模型构建技术选择、系统集成与接口规范、安全与可靠性、多尺度建模与跨层级协同及典型故障模式与模型响应。

本文件适用于电力装备（如变压器、GIS等）数字孪生模型的构建，涵盖设备数据采集、模型设计、仿真优化、系统集成及安全要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 30155	智能变电站技术导则
GB/T 41723	自动化系统与集成 复杂产品数字孪生体系架构
GB/T 43441.1	信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求
IEC 61850	电力系统自动化 第1部分：概论
IEEE 1451	智能传感器接口（所有部分）
DL/Z 860.7420	变电站通信网络和系统 第7—420部分：基本通信结构 分布式能源逻辑节点
DL/T 890	电力系统数据通信协议 第1部分：导则和一般要求
ISO/IEC 27001	信息安全、网络安全和隐私保护信息安全管理要求

3 术语和定义

GB/T 43441.1、GB/T 41723、DL/Z 860.7420 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

实体 entity

具体或抽象的事物。

3.2

目标实体 target entity

现实世界被选中进行数字化映射的实体。

3.3

数字实体 digital entity

目标实体的数字化映射。

3.4

数字孪生 digital twin

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达。

3.5

数字孪生系统 digital twin system

基于数据驱动来实现目标实体与数字实体间各要素动态迭代的系统。

注:数字孪生系统由目标实体、数字实体、两者之间的数据连接以及数据连接过程中涉及的模型、数据和接口等要素组成。

3.6

数据驱动 data driven

通过构建物理实体的高保真虚拟模型,采集传感器数据和运行数据驱动虚拟对象和物理同步运动、实现物理世界和信息世界的深度融合和互联互通。

3.7

高保真模型 high fidelity model

融合物理机理与数据驱动模型,误差率 $\leq 1\%$ 。

3.8

边缘计算节点 edge computing node

部署在设备本地的计算单元,支持实时数据处理与模型轻量化运行。

3.9

动态孪生体 dynamic twin

根据实时数据自动更新参数与行为的虚拟模型。

4 总则

4.1 电力装备数字孪生模型构建分层架构

4.1.1 物理层

电力装备本体及传感器(温度、振动、电流、电压等)。

4.1.2 数据层

4.1.2.1 数据采集：支持 IoT 协议（MQTT、CoAP）和工业协议（OPC UA、Modbus）。

4.1.2.2 数据存储：时序数据库（InfluxDB、TDengine）与关系型数据库（PostgreSQL）。

4.1.3 模型层

4.1.3.1 物理模型：基于有限元分析（FEA）、多体动力学（MBD）的机理建模。

4.1.3.2 数据驱动模型：LSTM、Transformer 等时序预测算法。

4.1.3.3 混合模型：物理模型与 AI 模型的联合校准（如 PINN 物理信息神经网络）。

4.1.4 应用层

故障诊断、寿命预测、能效优化等场景。

4.2 电力装备数字孪生模型数据

4.2.1 几何数据

几何数据按分级，分为设备类型、部件类型、具体参数 3 个层级。其中部件类型和具体参数关键词中包含“NOTE”和“ORIGINCOORD”关键词。“NOTE”关键词为备注内容。“ORIGINCOORD”关键词为设备/部件建模原点的世界坐标，用 1×3 的数组定义。所有数据单位默认为 m。

表 1 几何数据关键词分级

设备类型	部件类型	具体参数
EQUIP_NAME	PART_NAME	PARAS_NAME: 2022
		ORIGINCOORD : [x y z]
		NOTE : “xxx”
	ORIGINCOORD : [x y z]	
	NOTE : “xxx”	

网格数据应包括有限元网格和渲染网格两部分，其中有限元网格以 nas (bdf) 文件格式存储，渲染网格以 stl 文件格式存储。

有限元（有限体积等）网格可使用四面体（CTETRA）、六面体（CHEXA）网格等，应包含“\$\$ Grid Data Section”和“\$\$ Element Data Section”两部分。

nas (bdf) 文件数据部分格式如下：

表 2 nas (bdf) 文件数据部分格式

行	数据格式	格式说明
1	\$\$ GRID Data	网格节点数据部分
2	GRID 1 1.09357 -8.0 -160.935274	标识号(GRID) 节点编号(1) x y z
3	GRID 2 1.09911 -8.0 -160.886703	
4	GRID 3 0.900888 -6.6 -160.913297	

表 2 (续)

行	数据格式	格式说明
5	GRID 4 0.906428 -6.6 -160.864726	
6	\$\$ Element Data Section	网格单元数据部分
7	CTETRA 1 1 1 9 10 8	标识号(CTETRA) 网格编号(1) node1 node2
8	CTETRA 2 2 10 1 8 2	node3 node4

渲染网格以三角形网格形式存储, 如一个部件各部分几何需要分别作为单独对象渲染, 则各部分几何应分别保存为一个 stl 文件。

表 3 stl 文件数据部分格式

行	数据格式	格式说明
1	facet normal -1.000000e+02 0.000000e+00 0.000000e+00	面法向量 (facet normal) normal_x normal_y normal_z
2	outer loop	三角面顶点列表(outer loop)
3	vertex 0.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00	顶点 1(vertex) x y z
4	vertex 0.000000e+00 0.000000e+00 1.000000e+01	顶点 2(vertex) x y z
5	vertex 0.000000e+00 1.000000e+01 0.000000e+00	顶点 3(vertex) x y z
6	endloop	结束三个顶点的定义(endloop)
7	endfacet	结束一个三角面的定义

4.2.2 材料数据

材料物理参数包括数据类型, 材料型号和具体参数 3 个层级。其中, 数据类型分为: ①材料物理参数“MATERIAL_SIMU”, 用于仿真计算; ②渲染材质“MATERIAL_JS”, 用于渲染。具体参数“PARA1”应根据具体需要进行自定义。

表 4 材料数据关键词分级

数据类型	材料型号	具体参数
MATERIAL_SIMU	MATERIAL_NAME	PARAS_NAME : xxx
	NOTE : “xxx”	PARAS_NAME: xxx
MATERIAL_JS	MATERIAL_NAME	PARAS_NAME: xxx
	NOTE : “xxx”	PARAS_NAME: xxx

材料物理参数 (MATERIAL_SIMU) 材料型号 “MATERIAL_NAME” 应根据需要自行定义, 可以为 “SILICON_STEEL” “TRANS_OIL” “COPPER” 等, 格式为字符串。具体参数 “PARAS_NAME” 应根据材料参与的物理场自行定义, 可以为 “Permeability” “Bulk Conductivity” 等, 参数值可以为整型、浮点数或数组。

4.2.3 监测数据

监测数据以数据库方式存储。每种监测数据应单独保存为一个数据表，每种监测数据类型（DATA_NAME）可选的，包括数据条目（ID）、监测的设备 ID（EQUIPMENTID）、传感器 ID（SENSORID）、传感器状态（SENSORSTATE）、采集时间（CAPTURETIME）和监测数据（PARAS）。传感器状态可选的为 0（暂停运行）或 1（在运行），或根据需要自行定义。

表 5 监测数据关键词分级

表名	表头	数值类型
DATA_NAME	ID	INT
	EQUIPMENTID	INT
	SENSORID	INT
	SENSORSTATE	INT
	CAPTURETIME	DATETIME
	PARAS_NAME	FLOAT

4.2.4 静态台账数据

静态台账数据是设备自出厂以来的基本数据，这些数据是记录和管理电力系统中各种设备详细信息的数据集合，对于电力系统的运行、维护、管理和决策至关重要。

表 6 静态台账数据

表名	表头	数值类型	参数说明
EQUIPMENT_LEDGER	DEVICE_NAME	STRING	设备名称
	DEVICE_TYPE	STRING	设备类型
	UNITS	STRING	单位
	COUNT	INT	数量
	MANUFACTURER	STRING	生产厂家
	INSTALLATION_SITE	STRING	安装位置
	USE_PATTERN	STRING	使用方式

4.2.5 静态台账数据

通过记录检修数据可以定期对电力设备进行维护和保养，确保设备处于良好的工作状态，延长设备的使用寿命。此外通过分析检修数据，可以监控设备的性能变化，优化设备运行参数，提高电力系统的效率和可靠性。

表 7 检修维护数据

表名	表头	数值类型	参数说明
MAINTENANCE_DATA	DEVICE_ID	INT	设备 ID
	DEVICE_NAME	STRING	设备名称
	DATE	DATETIME	检修日期
	TIME	DATETIME	检修时间
	CONTENT	STRING	检修内容
	STATUS	STRING	检修状态
	PROBLEM_LOG	STRING	问题记录
	NOTE_KEEPER	STRING	检修人

4.2.6 结果数据

结果数据以 json 文件格式存储。结果数据应包括数值计算结果数据，每次计算保存一个文件。数值计算结果用 (x, y, z, data) 格式保存，同时应与渲染网格的网格顶点相匹配，data 为网格顶点数值计算结果数据。

表 8 结果数据关键词分级

设备/部件	场量
EQUIP_NAME	TIME: “xxx”
	DATA : “xxx”

5 数据采集与处理

5.1 数据源要求

表 9 数据采集规则

数据类型	采集频率	精度要求
运行参数	1 Hz~1 kHz	电流±0.5%、温度±1℃
环境数据	1 Hz	湿度±2%、气压±0.5 kPa
设备状态	事件触发	开关状态、故障信号 (0/1)

5.2 数据预处理

5.2.1 清洗：剔除异常值（ 3σ 原则）、填补缺失值（KNN 插值）。

5.2.2 标准化：Min-Max 归一化或 Z-Score 标准化。

5.2.3 特征工程：提取时域（均值、方差）、频域（FFT、小波变换）特征。

5.3 数据安全

5.3.1 传输加密：TLS 1.3 协议或工业加密网关。

5.3.2 存储加密：AES-256 算法，访问权限按角色分级（RBAC 模型）。

6 模型构建技术选择

6.1 模型类型选择

表 10 模型构建分类

场景	推荐模型类型	示例工具/算法
稳态分析	物理模型（FEA、CFD）	ANSYS、COMSOL
动态行为预测	混合模型（PINN、Kalman 滤波）	TensorFlow、PyTorch
故障分类	数据驱动模型（SVM、随机森林）	scikit-learn、XGBoost

6.2 建模流程

6.2.1 参数化建模：建立设备几何与物理参数的映射关系（如变压器绕组参数）。

6.2.2 多物理场耦合：电-磁-热-力多场联合仿真（Maxwell 方程耦合热传导方程）。

6.2.3 模型降阶（ROM）：使用 POD（本征正交分解）或 Koopman 算子简化计算复杂度。

6.3 模型校验

6.3.1 静态验证：对比设计图纸与仿真结果（几何误差 $\leq 0.1\%$ ）。

6.3.2 动态验证：通过阶跃响应、频率响应测试（拟合度 $R^2 \geq 0.95$ ）。

7 系统集成与接口规范

7.1 通信协议

7.1.1 工业协议：OPC UA（支持跨平台）、DDS（高实时性）。

7.1.2 物联网协议：MQTT（轻量级）、AMQP（高可靠性）。

7.2 API 设计

7.2.1 数据接口：RESTful API（JSON 格式）或 gRPC（高性能二进制）。

7.2.2 控制接口：支持 Modbus TCP 指令集或自定义指令（需提供 SDK）。

7.3 平台兼容性

与 SCADA、EMS、ERP 系统无缝集成（支持 OPC UA DA/HA）。

8 安全与可靠性

8.1 安全要求

8.1.1 网络安全：防火墙隔离、入侵检测系统（IDS）。

8.1.2 模型安全：防止对抗样本攻击（鲁棒性测试）。

8.2 可靠性指标

8.2.1 系统可用性 $\geq 99.99\%$ （全年宕机时间 ≤ 52 min）。

8.2.2 模型容错：在 20%数据丢失时仍能输出合理结果。

9 多尺度建模与跨层级协同

9.1 建模粒度划分

表 11 模型分层构建

层级	建模对象	典型应用场景
组件级	变压器绕组、断路器触头	局部过热分析、电弧仿真
设备级	完整变压器、发电机	能效优化、寿命预测
系统级	变电站、输电网	潮流计算、稳定性分析

9.2 跨层级数据融合

9.2.1 数据映射规则

建立组件级参数（如材料应力）与系统级指标（如电网频率）的关联方程。

9.2.2 协同仿真

9.2.2.1 使用 FMI（功能模型接口）实现多工具联合仿真（如 ANSYS+MATLAB）。

9.2.2.2 支持硬件在环（HIL）测试，连接真实控制器与虚拟模型。

10 典型故障模式与模型响应

故障注入测试。

表 12 故障测试要求

故障类型	注入方法	模型预期响应
局部放电	模拟高频脉冲电流 (≥ 10 MHz)	识别放电位置 (误差 ≤ 0.5 m)
机械卡涩	增加运动部件摩擦 系数 (+300%)	预测剩余寿命 (误差 $\leq 10\%$)
绝缘老化	修改材料介电常数 (年衰减率 5%)	预警击穿风险 (提前 ≥ 30 天)

11 测试与验收标准

11.1 测试内容

- 11.1.1 功能测试：模型响应速度、预测精度 (MAPE $\leq 5\%$)。
- 11.1.2 压力测试：支持 10 万并发数据点采集与处理。
- 11.1.3 安全测试：渗透测试与漏洞扫描 (OWASP Top 10 覆盖)。

11.2 验收流程

- 11.2.1 实验室仿真验证 (基准测试)。
- 11.2.2 现场试运行 (≥ 3 个月)。
- 11.2.3 第三方机构认证 (符合 IEC 62443 标准)。

11.3 与外部软件及数据库的交互接口

物理实体和数字孪生体本身之外的一些软件，为数字孪生系统提供软件环境。外部软件为数字孪生系统的运行提供了参考信息，以及一些功能支撑，所以需要专门的接口来获取相关的模型和数据。接口应满足定义清晰，调用方便，易于维护和升级的要求。

12 运维与更新

- 12.1 模型版本管理：GitOps 流程，记录每次迭代变更。
- 12.2 在线更新：支持热升级 (无须停机)。
- 12.3 健康监测：内置自检模块，实时报告模型置信度。

附录 A

(规范性)

电力装备数字孪生模型构建示例

A.1 模型构建示例

电力装备数字孪生模型主要是由几何数据、网格数据、监测数据等有机融合而形成的高保真模型，虚拟设备和实际设备应做到协调感知统一，边缘计算节点与中心云信息互通，构建成动态孪生体，形成数字孪生系统；数字实体能够实时的反映目标实体设备的物理状态变化，可以提前预测设备机械故障和材料老化等问题，为电力设备的运维带来极大的便利性，以下是换流变压器的模型构建示例。

以换流变压器为例，换流变压器按部件分为铁心、绕组、夹件、引线、分接开关、冷却器、套管、油箱、油枕 9 部分。

表 A.1 换流变压器设备部件分级

设备类型	部件类型
TRANSFORMER	CORE
	WINDING
	CLAMP
	WIRE
	SWITCH
	COOLER
	DRIVEPIPE
	TANK
	OIL_PILLOW
	ORIGINCOORD : [x y z]
NOTE : "xxx"	

换流变压器铁心为双心柱有旁轭结构，双心柱有旁轭结构在几何建模时具体参数如下：

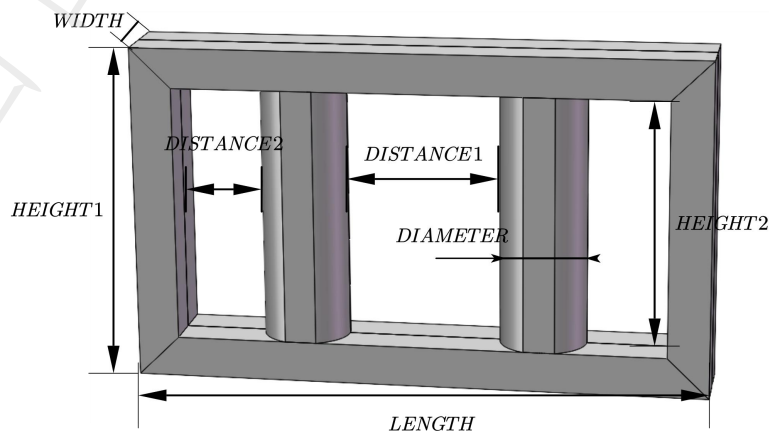


图 A.1 双心柱有旁轭结构

表 A.2 双心柱有旁轭结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
CORE	LENGTH	float	铁心长度
	WIDTH	float	铁心宽度
	HEIGHT1	float	铁心高度
	HEIGHT2	float	铁心框高度
	DISTANCE1	float	两心柱间距
	DISTANCE2	float	心柱与旁轭间距
	DIAMETER	float	心柱直径

线圈几何数据：两柱式换流变压器绕组线圈几何结构具体参数如下：



图 A.2 线圈结构

表 A.3 线圈结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
WINDING	DIAMETER11	float	阀侧绕组外径
	DIAMETER12	float	阀侧绕组内径
	DIAMETER21	float	网侧绕组外径
	DIAMETER22	float	网侧绕组内径
	HEIGHT	float	绕组电抗高度
	COIL_HEIGHT	float	线圈高度
	COIL_THICKNESS	float	线圈饼厚
	COIL_SPACING	float	线圈饼间距

夹紧件几何数据如下。

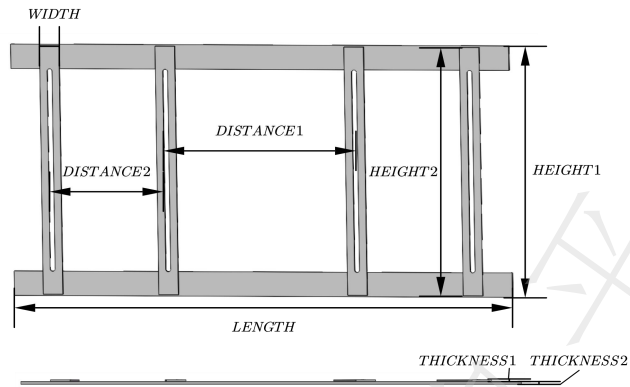


图 A.3 夹紧件结构

表 A.4 夹紧件结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
FRAME	WIDTH	float	拉板宽度
	DISTANCE1	float	两拉板中心距 1
	DISTANCE2	float	两拉板中心距 2
	HEIGHT1	float	夹紧件总高度
	HEIGHT2	float	拉板高度
	THICKNESS1	float	拉板厚度
	THICKNESS2	float	夹件厚度

油箱几何数据如下。

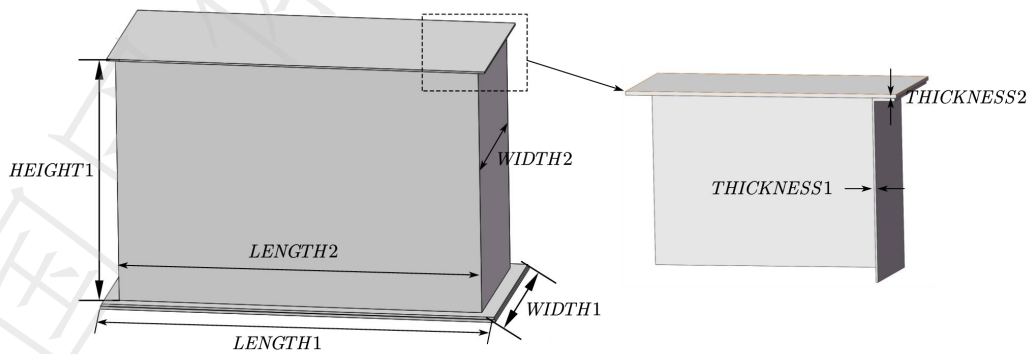


图 A.4 油箱几何结构

表 A.5 油箱结构具体建模参数

部件类型	具体参数	数据类型	参数说明
TANK	LENGTH1	float	箱体长度
	LENGTH2	float	箱底/箱盖长度
	WIDTH1	float	箱底/箱盖宽度
	WIDTH2	float	箱体宽度
	HEIGHT1	float	箱体高度
	THICKNESS1	float	箱体厚度
	THICKNESS2	float	箱底/箱盖厚度

变压器材料数据：换流变压器材料可以有铜（COPPER）、硅钢（SILICON_STEEL）、油（OIL）、绝缘纸板（INSULATING CARDBOARD）。变压器参与磁场、温度场、流场计算，具体参数有密度、电导率、磁导率、热导率、比热容、动力黏度等。

表 A.6 变压器材料物理参数

材料型号	具体参数	数据类型	参数说明
COPPER	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	float	磁导率
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率
SILICON_STEEL	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	array	磁导率，N×2 数组
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率
OIL	Bulk_Conductivity	float	电导率
	Permeability	float	磁导率
	Density	array	密度，N×2 数组
	Cp	array	比热容，N×2 数组
	Thermal_Conductivity	array	热导率，N×2 数组
	Viscosity	array	动力黏度，N×2 数组
INSULATING_CARDBOARD	Bulk_Conductivity	array	电导率，N×2 数组
	Permeability	float	磁导率
	Density	float	密度
	Cp	float	比热容
	Thermal_Conductivity	float	热导率

监测数据：换流变压器的监测数据根据状态评估的需要和实际情况，应包括电压（VOLTAGE）、油温（OIL_TEMPERATURE）、电流（CURRENT）、有功功率（ACTIVE_POWER）、油色谱数据（OIL_CHROMATOGRAM）、绕组温度（WINDING_TEMPERATURE）、接地电流（GROUNDING_CURRENT）。

表 A.7 换流变压器监测数据

表名	表头	数值类型	参数说明
TEMPERATURE	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	SENSORID	INT	传感器 ID
	SENSORSTATE	INT	传感器状态
	CAPTURETIME	DATETIME	数据采集时间
	OIL_TEMPERATURE	FLOAT	温度值
	WINDING_TEMPERATURE	FLOAT	绕组温度
VOLTAGE	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	VOLTAGE	FLOAT	电压值
CURRENT	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	CURRENT	FLOAT	运行电流
	GROUNDING_CURRENT	FLOAT	接地电流
ACTIVE_POWER	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	ACTIVE_POWER	FLOAT	有功功率
OIL_CHROMATOGRAM	ID	INT	数据条目
	EQUIPMENTID	INT	设备 ID
	JWND	FLOAT	甲烷浓度
	YWND	FLOAT	乙烷浓度
	YXND	FLOAT	乙烯浓度
	YQND	FLOAT	乙炔浓度
	YYHT	FLOAT	一氧化碳
	EYHT	FLOAT	二氧化碳
	QQND	FLOAT	氢气浓度
	SND	FLOAT	水浓度
	DND	FLOAT	氮浓度
	YQND	FLOAT	氧气浓度

孪生模型可视化示例如下。

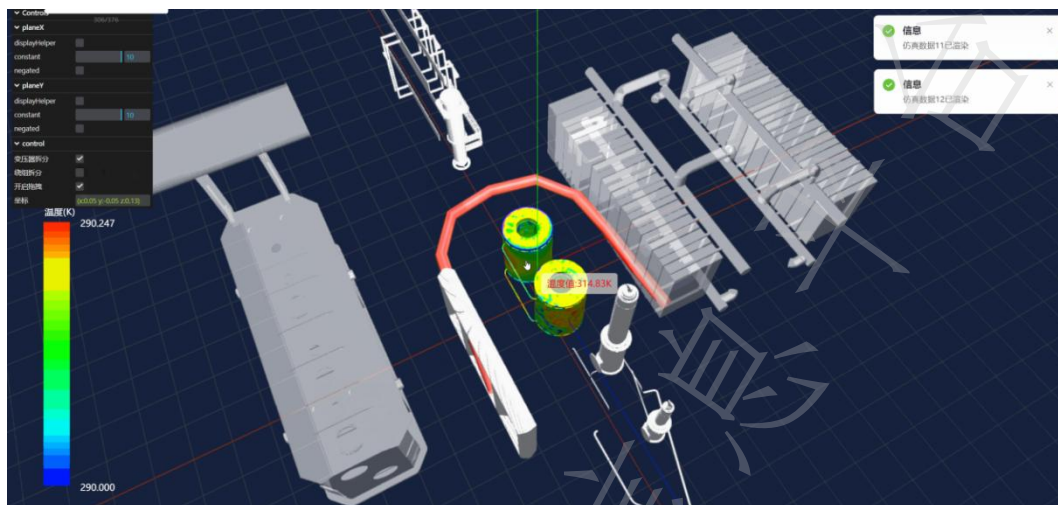


图 A.5 变压器数字孪生模型可视化示例

数字孪生模型构建应满足八大要求：标准化、精准化、轻量化、可重构、可融合、可进化、可交互、可视化。如图 A.6 所示。



图 A.6 数字孪生模型构建准则

团 体 标 准

电力装备数字孪生模型构建技术规范

T/CI 920—2025

*

湖北科学技术出版社出版发行
武汉市雄楚大街268号湖北出版文化城B座
13—14座 (430070)

总编室: (027) 87679429

湖北新华印务有限公司印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 6千字

2025年2月第一版 2025年2月第一次印刷

书号: 155706 · 107 定价: 49元



6 977819 691061

版权专有, 侵权必究