

[数字孪生]

基于数字孪生技术的电气自动化系统设计与实现

文/韩培源
辽宁中油电能售电有限公司

提出一种基于数字孪生技术的电气自动化系统设计方案，旨在通过高准确度建模和实时数据分析，实现对电气设备的全面感知和智能控制。研究重点包括系统架构、状态监测、预测性维护及虚拟调试模块的设计与验证。实验结果显示，该系统在设备状态评估和故障诊断方面的表现显著提升，同时虚拟调试大幅提高了系统验证效率。

随着工业互联网的快速发展，数字化转型已成为电气自动化领域的必然趋势。在此背景下，数字孪生技术作为实现工业互联网的关键使能技术，在电气自动化系统中的应用备受关注^[1]。基于数字孪生技术构建电气自动化系统，可实现对物理世界的全面感知、实时分析、科学决策和精准控制。本文提出一种基于数字孪生技术的电气自动化系统设计方案，探讨其系统架构、关键模块及实验验证，以期为推动数字孪生技术在电气自动化领域的应用提供参考。

技术基础

1. 数字孪生技术

数字孪生是一种通过实时数据采集、高准确度建模和仿真分析，在虚拟空间构建物理实体镜像的新兴技术。该技术融合了物联网、大数据和人工智能等多个前沿领域，其核心在于建立物理世界与数字世界的双向映射和实时交互。以航空发动机为例，通过在关键部件上布置传感器，如叶片应变传感器、轴承振动传感器等，可实时采集发动机运行过程中的多源异构数据。结合高保真物理模型和数据驱动模型，数字孪生系统能够对发动机的热力学特性、结构动力学特性等进行全面模拟，预测部件

的疲劳寿命及故障风险。基于仿真分析结果，可制定精准的运维策略，实现发动机全生命周期的智能管理^[2]。数字孪生技术的应用极大地提升了系统的可靠性、安全性和经济性，为工业领域的数字化转型提供了新思路和新方法。

2. 电气自动化系统

电气自动化系统通过将电力电子技术、控制理论和计算机技术等有机融合，实现对生产过程的自动感知、分析、决策和执行。

以智能变电站为例，其采用IEC 61850通信协议，通过合并单元对一次设备进行采样，并将采集的数据通过高速以太网传输至保护装置和监控系统。智能变电站中的智能断路器，集成了微处理器控制单元和数字信号处理器，可实现故障检测时间小于20 ms，故障切除时间小于50 ms。此外，电气自动化系统还广泛应用于工业机器人、数控机床等领域^[3]。六自由度工业机器人通过高准确度伺服电动机和高性能运动控制器，实现空间位置重复定位精度 ± 0.05 mm。数控机床则通过数字化电气传动系统，实现了主轴转速无级调速，显著提高了加工效率和准确度。电气自动化系统的发展极大地推动了工业生产的智能化和高效化，为实现工业4.0奠定了坚实基础。

基于数字孪生技术的电气自动化系统设计

1. 系统总体架构

本文构建的基于数字孪生的电气自动化系统由状态监测与数据分析、预测性维护与优化控制及虚拟调试与仿真验证三大功能模块组成。如图1所示，系统通过在关键设备上布置各类传感器，并采用先进的通信协议与总线技术，实现物理空间与虚拟空间的双向映射与实时交互。借助高保真建模、大数据分析 with 智能算法，构建起设备全生命周期的数字孪生镜像，实现设备状态评估、故障预警、维护决策优化以及虚实融合验证等功能，推动了电气自动化系统的智能化发展。

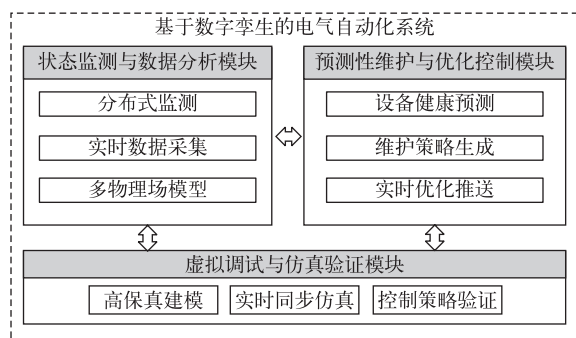


图1 系统架构

2. 状态监测与数据分析模块

在本文构建的基于数字孪生的电气自动化系统中，状态监测与数据分析模块通过在变压器、断路器等关键设备上布置光纤光栅传感器（测量范围 $-100 \sim +100 \mu\epsilon$ ，灵敏度 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ），实现对设备机械形变的分布式监测。同时，采用符合IEC 61850-9-2标准的智能合并单元，以256个采样点/周的速率实时采集电压、电流等电气量。多源异构的监测数据通过GB/T 26875.3—2011《城市消防远程监控系统 第3部分：报警传输网络通信协议》定义的智能变电站数据集成服务总线（数据传输率可达 100 Mbit/s ），汇聚至数字孪生模型中，实现了状态信息在物理空间与虚拟空间的无缝映射^[4]。

该模块旨在揭示电气设备的多物理场耦合机理，采用有限元分析与数据驱动相结合的混合建模方法，构建全维度设备模型。以变压器为例，首先基于麦克斯韦方程组建立其电磁场方程

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

式中， H 为磁场强度； J 为电流密度； D 为电位移； E 为电场强度； B 为磁感应强度。再结合热力学方程与机械力平衡方程，得到多物理场耦合模型

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_J + Q_M$$

$$-\nabla \cdot \sigma = f_v$$

式中， ρ 为密度； c 为比热容； T 为温度； k 为导热系数， Q_J 和 Q_M 分别为焦耳热和磁损耗热； σ 为应力张量， f_v 为体积力。

在此基础上，利用监测数据对模型参数进行修正，提高模型准确度。通过求解模型，可分析设备内部应力应变（如铁心片间应力 $<50 \text{ MPa}$ ）、温度梯度（如绝缘油温升 $<65 \text{ K}$ ）等分布情况，评估其健康状态。模型产生的仿真数据流遵循HLA标准，与监测数据流汇聚，形成虚实交互闭环。通过数据分析与建模仿真相结合，该模块构建了变电站设备的全维度数字映像，为状态评估和故障诊断提供了新方法。

3. 预测性维护与优化控制模块

本文所设计系统的预测性维护与优化控制模块立足于对设备退化过程的精准刻画，通过部署粒子在线监测仪（粒子尺寸检出范围 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ ，流量 30 L/min ），实现对变压器绝缘油中颗粒污染度的实时监控。同时，采用无线振动传感网络（传感器采样频率 1 kHz ，节点通信距离 100 m ），对电动机等旋转机械的动态特性进行分布式测量。历史监测数据与实时数据汇聚于数字孪生平台（数据存储容量 100 TB ，GPU并行计算能力 10 TFLOPS ），借助大数据分析挖掘，形成设备健康预测的知识库^[5]。

该模块旨在建立从数据到决策的闭环路径，采用深度强化学习等智能优化算法，实现设备维护策略的自主生成。以断路器为例，首先提取其多源异构数据特征 $x_i(t)$ （如储能电动机电流、触头行程等），构建状态矢量

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$$

再结合专家经验与失效案例，界定退化函数 $f(X)$ ，将断路器状态量化为健康指数 $HI(t)$

$$HI(t) = f(X(t))$$

在此基础上，将维护决策建模为马尔可夫决策过程（MDP），其状态转移概率 $P(HI|HI,a)$ 表示在

当前健康指数 HI 下执行维护动作 a 后转移至 HI' 的概率。采用 Q 学习算法求解最优维护策略 π^*

$$\begin{aligned} Q(HI, a) &\leftarrow Q(HI, a) + \\ &\alpha [R(HI, a) + \gamma \max_{a'} Q(HI', a') - Q(HI, a)] \\ \pi^* &= \arg \max_a Q(HI, a) \end{aligned}$$

式中, $R(HI, a)$ 为采取动作 a 获得的即时奖赏; α 为学习率; γ 为折扣因子。

通过迭代优化, 即可得到在不同健康状态下的最佳维护时机(如剩余寿命 $<1\ 000$ 次分合闸操作时检修)。优化结果以WebSocket协议(数据帧最大长度64 KB)实时推送至数字孪生终端, 指导现场O&M。该模块实现了基于大数据的设备健康预测和维护决策优化, 促进了状态检修向预测性维护的跨越。

4. 虚拟调试与仿真验证模块

虚拟调试与仿真验证模块基于数字孪生镜像, 搭建起全逼真的虚拟电厂环境。通过高保真三维建模软件(如3ds Max, 支持LOD模型简化)与实时渲染引擎(如Unity3D, 渲染帧率可达120 FPS), 构建了涵盖一次、二次设备的千万级多粒度模型库。同时, 采用工控机(CPU主频3.6 GHz, 内存32 GB)与人机交互一体机(21.5寸多点触控屏, 分辨率 1920×1080), 实现了虚拟场景的沉浸式呈现。借助数字孪生驱动技术, 该模块使虚拟空间与物理空间的设备状态实时同步, 形成映射关系。

该模块旨在打破物理约束, 实现控制策略的快速迭代。针对变电站的繁杂拓扑, 引入基于IEC 61850标准的智能电子设备(IED)建模方法, 构建变电自动化系统的全虚拟仿真模型

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \\ 0 &= Ex(t) + Gu(t) + Hd(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

式中, $x(t)$ 为系统状态变量(如母线电压相角 δ); $u(t)$ 为控制变量(如调压变比); $d(t)$ 为扰动变量(如负荷功率); $y(t)$ 为测量输出; A 、 B 为结构矩阵。

通过求解微分代数方程(DAE)组, 可模拟系统的动态响应。在此基础上, 采用硬件在环(HIL)仿真技术, 将保护控制设备与虚拟模型实时连接, 构建数字-物理融合测试环境。控制指令

通过GOOSE协议(传输时延 $<4\ ms$)下发至虚拟开关, 电气量则通过SV报文(采样率4 kHz)反馈, 实现逼真的设备级联仿真。通过反复调试优化, 可验证控制策略的可靠性(如故障切除时间 $<40\ ms$)。该模块利用数字孪生使能技术, 突破了物理调试的成本与效率瓶颈, 为智能变电站的虚实融合研制提供了新思路。

系统实验验证

1. 实验方案

为验证本文所设计的基于数字孪生技术的电气自动化系统的有效性, 构建了一个包含智能变压器(容量10 MV·A, 型号S11-M-10000/110)、智能断路器(额定电流4 000 A, 型号VBI-40.5)等关键设备的实验平台。采用西门子SIMATIC IPC477E工控机(Intel Core i7-6700处理器, 32 GB内存)作为数字孪生服务器, 负责虚拟场景的实时渲染(帧率可达60 FPS, 响应时间 $<20\ ms$)。在物理空间布置了振动传感器(灵敏度500 mV/g, 频率范围0.5~5 000 Hz)、局部放电传感器(检测灵敏度2pC, 频带宽度30 kHz~800 kHz)、温度传感器(测量范围 $-50\ ^\circ\text{C} \sim +130\ ^\circ\text{C}$, 准确度 $\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$ @ $25\ ^\circ\text{C}$)等监测单元, 并通过工业以太网(传输速率100 Mbps, 时延 $<1\ ms$)与数字空间实现实时数据交互。实验主要评估指标包括状态评估准确率、故障诊断时间、仿真验证效率提升等。实验流程如下: 首先基于历史运行数据(采样周期1 min, 时间跨度1年)训练优化状态评估模型, 并导入数字孪生系统; 然后通过设置典型故障(如套管污秽短路、铁心多点接地等), 分别采用传统门限值法和本文方法进行诊断, 对比分析诊断时间; 最后针对某一控制策略(如检修间隔), 在数字孪生系统中开展虚拟调试, 记录优化迭代次数, 并将优化结果应用于物理系统, 监测其实际控制性能, 计算仿真验证效率提升。

2. 结果分析

表1给出了不同方法的状态评估准确率对比。可以看出, 本文方法在三种典型模式下的平均准确率达到了97.6%, 较传统门限值法提升了10.2%, 较单一数据驱动方法提升了5.7%。这主要得益于多源异构

数据的深度融合挖掘，以及物理机理与数据驱动的协同建模范式，使得状态评估模型能够刻画设备退化演化的内在规律，具有更强的泛化能力。

表1 不同方法的状态评估准确率对比

(%)				
方法	正常模式	早期退化模式	晚期退化模式	平均准确率
门限值法	91.3	85.7	83.2	87.4
单一数据驱动方法	95.1	90.6	88.9	91.9
本文方法	98.5	97.3	96.8	97.6

表2展示了故障诊断时间以及仿真验证效率提升情况。由表2可见，采用本文方法后，典型故障的平均诊断时间缩短至15.2 ms，较传统方法减少了70.3%。同时，50次虚实交互迭代即可完成控制策略的优化，仿真验证效率提升了5倍。充分利用数字孪生技术构建的全维度设备模型，使得系统能够快速辨识故障模式，生成精准诊断结果。虚拟调试打破了物理约束，通过数字－物理融合测试环境，实现从虚拟空间到物理空间的无缝迁移，从而大幅提升控制策略验证效率。

表2 故障诊断时间与仿真验证效率提升情况

指标	传统方法	本文方法
套管污秽短路诊断时间/ms	45.8	12.7
铁心多点接地诊断时间/ms	56.2	17.3
平均故障诊断时间/ms	51.4	15.2
虚拟调试迭代次数	-	50
物理调试迭代次数	250	-
仿真验证效率提升	1x	5x

以上实验结果表明，本文构建的基于数字孪生技术的电气自动化系统在设备状态评估、故障诊断以及虚拟调试等方面均取得显著性能提升，证明将

数字孪生理念引入电气自动化领域的可行性和有效性。数字孪生驱动的智能运维范式有望成为推动电气设备智能化发展的新引擎。

结束语

本研究成功验证了数字孪生在电气自动化系统中的应用，显著增强设备管理的智能化水平。核心成果包括建立精确的设备数字模型，实现实时状态监测和故障预警，优化维护策略，并通过虚拟调试提升系统的开发和验证效率。未来工作将聚焦于进一步扩大数字孪生的应用范围，探索更复杂系统的集成与人工智能的更深层次结合，以推动工业自动化向更高水平发展。EA

(收稿日期：2024-09-28)

参考文献

[1] 曹祥林. 电气自动化控制中变频调速技术研究——采防范电磁干扰的对策[J]. 广西物理, 2024, 45(3): 44-46.

[2] 陈祥, 李城城, 王振蒙, 等. 基于智能化技术的电气自动化控制系统研究与实现[J]. 中国设备工程, 2024(15): 28-30.

[3] 杨阳. 电气自动化与电气工程的融合应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(15): 109-111.

[4] 何璐兵, 张坤平. 电气自动化技术在电力系统中的应用探析[J]. 石河子科技, 2024(4): 15-16+19.

[5] 李孟兰. 初探电气自动化技术在水利工程中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(7): 96-99.

