

基于数字孪生技术的电气自动化系统仿真与优化研究

徐渊斐

山西管家营法兰锻造股份有限公司，山西省忻州市，035400；

摘要：围绕电气自动化系统的安全、能效与可靠运行，文章提出以数字孪生为核心的仿真与优化方法论。通过构建与现场设备、控制逻辑与运行环境对应的模型族，形成从设计、调试到运行维护的贯通链条。方案强调对象建模与语义统一、时序一致与数据质量、机理模型与数据驱动的耦合求解、指标闭环与演进治理四条主线，旨在在不干扰控制面的前提下提升全局性能。针对多源异构、工况突变与参数漂移等难题，给出模型分层、场景库、校准与验证、故障注入与回放等工程化路径，提出评估指标体系，支撑长期演进与低成本迁移。方法路径不依赖特定厂商实现，主张轻量化与标准化接口，便于跨站点与跨场景迁移复用，并以度量与审计保持可解释与可追溯。

关键词：数字孪生；电气自动化；仿真模型；系统优化；预测性维护

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.060

引言

电气自动化系统由一次设备、测量与执行链路、控制与保护装置以及监控运行平台共同构成，既要满足实时性与确定性，又要兼顾安全韧性与经济运行。传统仿真多用于设计阶段的离线分析，难以覆盖运行过程中的状态漂移、工况扰动与设备老化，导致策略在现场落地时出现偏差。数字孪生通过持续映射物理系统的结构、参数与状态，使虚拟模型与现场对象保持同步，从而在不影响生产的情况下进行推演、优化与风险评估。为了让这一能力真正服务现场，需要一套可复用的建模框架、与控制节拍相容的数据通道、可验证的时序约束以及面向全生命周期的治理机制。本文围绕概念建模与体系架构、仿真技术与可靠性保障、优化方法与运维闭环三个方面展开，力求给出具备工程可操作性的路径。与此同时，新能源接入与负荷侧波动带来更多情形，单纯依赖经验与静态边界已难以支撑稳定运行。以数字孪生为载体把知识、数据与约束统一在同一空间，有助于提高工程可验证性。

1 数字孪生的概念框架与体系架构

1.1 对象建模范式与语义统一方法

数字孪生的对象应以电气一次设备、二次装置与工艺单元为基本单元，分别刻画结构与拓扑、控制逻辑与状态机、运行环境与约束边界。建模入口采用自顶向下的功能分解与自底向上的元件复用结合的方式，形成可拼装的模型族^[1]。每个对象具备身份标识、量纲一致的

属性集、状态转换规则与质量标记，并绑定数据来源、刷新周期与可信区间。语义统一依赖命名规范与量纲体系，所有测量值、指令与报警以路径式命名关联到对象，使跨系统传递时含义不发生漂移。为了控制复杂度，引入工艺单元与场景两类组合体：前者用于描述稳定结构，后者用于封装工况与边界条件，从而在不同装置间迁移时只需替换场景即可完成适配。

模型组织采用分层分域：设备层在细粒度上刻画元件特性与耦合关系，控制层抽象联锁与策略，运行层聚焦能耗、可靠性与风险指标。层间以明确定义的接口交换状态与事件，接口携带时标与质量位以保障可追溯性。在生命周期管理上，以基线与差异清单记录版本演进，变更前以静态检查与小规模仿真校验语义一致、约束不冲突，变更后以对账机制核对现场与模型的对象数量、阈值与连线关系，避免模型漂移。通过对象化、分层化与可追溯的组织方式，使孪生模型既能表达复杂性，又能保持可维护性与可迁移性。对象之间还需具备跨域协作能力。针对变电、配电与用能侧的边界对象，设置桥接层以承载跨域引用与权限校核，确保在共享测点与控制意图时不破坏各自的安全边界。为提升工程效率，建立模板库与规则库，把常见设备、回路与告警策略沉淀为参数化模板，新建项目以少量参数即可生成大部分模型与配置。模型质量则以一致性检查、引用完整性与未使用对象清理三类审计指标长期跟踪，审计结果与变更记录一起归档，形成可追溯的模型资产。

1.2 架构分层、数据通道与时序一致性

体系架构建议分为边缘层、控制与仿真耦合层、平台层与应用层。边缘层负责近现场采集与协议转换,并进行去噪、异常检测与数据压缩;耦合层承载实时仿真与策略沙箱,使虚实交互在局部闭环内完成,不干扰现场节拍;平台层提供模型管理、版本治理、计算编排与存储服务;应用层面向能效优化、健康评估与运行决策。数据通道采用双轨设计:一条用于低时延的状态同步与事件上报,另一条用于批量的历史回放与训练样本汇聚。两条通道均携带精确时标与来源指纹,确保在回放与对账时复原顺序^[2]。

时序一致性是虚实耦合的底线。为此在授时体系上形成统一根时钟,站内以分发树向各节点下发基准,建立时延预算与抖动上限。仿真推进采用固定步长与自适应步长混合机制,高频部分以固定步长保障稳定性,低频部分以自适应步长提升效率。在联动试验中设置缓冲区与背压策略,防止事件风暴导致队列溢出。为提升可靠性,关键链路采用冗余通道与健康监测,切换以心跳与质量位驱动,输出侧采用保持与软落地策略,保证切换窗口内动作可控。通过分层架构、双轨通道与时序约束的共同作用,虚实间的交互具备可验证的实时性与稳定性。为了让架构具备演进能力,平台引入模型注册与版本兼容策略,新旧版本在受控范围内并存,通过适配层完成字段映射与行为约束,避免一次性切换带来风险。边缘到平台的通路设置质量闸门,对缺失、越界与突变进行规则治理,必要时触发回放与人工确认,防止异常扩散至上层决策。对于跨站点部署,站点之间只交换经过汇总与脱敏的指标与事件,既满足集团级洞察,又不增加现场链路负担。

2 仿真技术体系与可靠性保障

2.1 多尺度建模与求解精度控制

电气自动化场景同时存在设备级的电磁瞬态、回路级的拓扑变化与站级的调度切换,多尺度现象交织带来仿真精度与计算成本的权衡。多尺度建模以分区耦合为主线:在局部敏感区域保留细粒度机理,在外围采用等效简化,通过边界口匹配电气量与能量守恒,维持整体一致^[3]。为减少全局重算,引入事件触发的局部重构,对开关动作、负荷跃迁与故障扰动等情形局部细化网格与步长,而对平稳阶段采用粗粒度推进。

求解精度通过三类手段控制:误差估计与自适应步长,依据残差与监控量变化率自动调整推进节奏;参数区间与鲁棒估计,将不确定参数视为区间变量,在可行

域内寻找最差情形以获得保守边界;对比标定,使用台账数据、历史运行片段与合成基准进行多源比对,以曲线重合度与事件重现度为核心指标。计算组织上采用任务图编排,将耦合子域映射为算子,按依赖关系并行调度;当资源受限时以优先级策略保障对安全有影响的子任务先行完成。对于受拓扑变化影响显著的场景,采用图结构表达网络关系,在拓扑切换时仅更新受影响的子图,避免全局重构。对含强非线性与刚性特征的局部,引入分裂步法或隐式求解以提升稳定性。在计算资源调度上,针对峰时负荷设定降阶策略与任务限流,确保安全相关算子优先执行。评估环节给出覆盖面与置信度指标,明确仿真结论的适用范围,从而在决策时量化风险余度。对于边界条件变化缓慢的子域,可采用分段等效保持稳定性,同时在关键切换点增设监测以捕捉突变。

2.2 数据驱动与机理耦合的校准与验证

孪生模型需要在长期运行中与现场保持一致,参数漂移与环境变化要求持续校准。数据驱动与机理耦合的思路是以物理约束作为先验,以运行数据作为证据,两者在统一的损失函数下共同作用^[4]。校准流程分为三步:先以机理模型给出可行域与灵敏度排序,确定关键参数集合;再以增量数据在滑动窗口内进行辨识,避免一次性大幅调整引入震荡;末端以多场景交叉验证,拒绝只在少数情形下有效的过拟合。

为了提升可信度,验证需覆盖结构一致、行为一致与指标一致三个层面。结构一致关注拓扑、连线与边界条件的等价;行为一致检验事件顺序与幅值的重现;指标一致对能耗、越限、告警密度与恢复时间等进行统计对比。数据质量通过完整性、时效性与一致性量化,缺失与异常按规则修复并保留痕迹。校准任务纳入变更管理,所有版本具备基线、审批与回滚路径;在推广前先在影子环境运行回放,对比基线差异并生成评审报表。面向长期运行的漂移问题,引入季节与工况的分段基线,在不同区间内维护各自的参数集与残差分布,切换区间时执行过渡校核,避免边界震荡。对难以直观观测的潜在变量,借助理量与能量守恒约束间接估计,并在装置停检窗口内以专项试验进行加严验证。验证通过后以小比例灰度方式推广,设置观察期与回退条件,确保现场风险可控。在组织方式上,建立跨专业评审与例会机制,将模型差异、数据质量与现场偏差作为固定议题,保持节奏稳定与责任清晰;对关键指标设立红黄绿分级与处置时限,使治理从文件化落实到行动上。

3 优化方法与运维闭环

3.1 能效优化与多目标协调策略

电气自动化系统的优化目标通常包含能耗、可靠性、质量约束与运行成本等多重维度，目标之间存在耦合与冲突。基于孪生体的优化把约束显式化：在模型内嵌入安全边界、设备寿命曲线与运行配额，搜索空间被限定在可行域。多目标协调可采用分层求解：上层给出日内或小时级的功率与工况配比，下层在分钟与秒级执行细化调度与动作编排。为避免策略跳变，目标权重引入平滑项与切换惩罚，使优化输出符合现场可执行的节拍。

在求解技术上，针对平稳阶段采用凸近似与启发式混合搜索，加速收敛并给出可解释的边界；在扰动阶段采用滚动时域优化与情景集以应对不确定性。孪生体提供快速评估能力，对备选策略进行批量推演，筛选出满足约束且收益稳定的方案。落地层面需要考虑人机协同，策略下发前在沙箱中进行联动演练，生成风险条目与处置预案；上线后以指标看板跟踪节约量、越限率与设备负荷水平，并在偏离阈值时触发自动回退或微调。通过目标协调与滚动优化的结合，让能效提升与安全边界在同一框架内得到兼顾。当存在电价阶梯、低谷激励与罚款条目时，目标函数内显式建模时间价值与违规成本，避免策略在账面节能而在经济上不优。对存在多主体协同的场景，建立结算与责任划分规则，把收益与风险分摊到具体装置与班组，使优化结果与绩效挂钩。为处理不可测扰动，引入情景采样与鲁棒边界，在外界条件恶化时仍能维持基本可行的运行解。当策略与现场经验冲突时，引入对话式解释组件，展示约束来源、影响范围与备选方案，便于值守人员进行判断与接管，避免黑箱带来的抵触与风险。

3.2 预测性维护与全生命周期优化路径

预测性维护利用孪生体对退化过程进行刻画，把故障前兆从噪声中分离出来。方法路径包含健康刻画、风险评估与计划编排三步。健康刻画以状态量、事件与检修记录联合建模，形成可解释的健康指数；风险评估把失效模式映射为场景，计算在不同负荷与环境条件下的失效概率与影响范围；计划编排在资源、停机窗口与生产节拍之间进行权衡，优先处理对安全与连续性影响大的对象。

在全生命周期层面，孪生体把设计、采购、安装、调试与运维连接为一条可追溯链路。设计阶段沉淀模型

模板与参数边界，采购阶段以数据契约约束关键性能，安装与调试阶段以对账与回放核对一致性，运维阶段以指标与知识库驱动优化迭代。为了避免体系复杂化，治理结构设置最小闭环：每一次变更均有证据、责任人与回滚路径；每一次故障均在模型中复盘并固化规则；每一个对象从投入到退役均有完整履历。通过把维护与经营目标纳入统一度量，企业在可靠性、能效与成本之间形成稳健平衡。在执行层面，以工单系统承载从告警到处置的全链路记录，告警与健康指数联动生成处置建议与备件需求，减少等待与反复拆装。知识获取方面，把一次故障的复盘结论沉淀为可机读规则与场景，后续事件自动匹配最相近的处置脚本，提高响应一致性。对外部供应与服务环节，以数据契约明确交付口径与质保责任，使孪生体不仅描述技术对象，也约束协作流程。对于新建与改造工程，推行分阶段交付与影子运行，先在小范围软上线，待指标稳定后再扩大覆盖，缩短学习曲线并降低一次性变更的冲击。

4 结语

数字孪生把电气自动化系统的结构、参数与时序拉到可计算的空间内，使设计、运行与优化建立起证据化的通道。以对象化建模、分层架构与时序一致为基础，仿真稳定承载策略推演与风险评估；以机理数据耦合、校准验证与基线对账为抓手，模型在长期运行中保持与现场一致。围绕能效、可靠性与成本的协调，通过滚动优化与预测性维护形成闭环，推动全生命周期的持续改进。面向未来，孪生体将走向轻量化与标准化，在跨站点与跨场景的迁移中展现更高复用度，支撑电气自动化的高质量发展。

参考文献

- [1] 韩培源. 基于数字孪生技术的电气自动化系统设计与实现[J]. 电气时代, 2025, (06): 34-37.
- [2] 王勇. 工业 4.0 背景下数字技术在工业电气自动化系统中的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(09): 77-80. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2024.09.023.
- [3] 韦学艺. 基于智能技术的电气工程自动化控制系统分析[J]. 科技视界, 2025, 15(16): 1-3.
- [4] 王民, 顾欢. 数字技术在工业电气自动化中的应用与创新[J]. 中国宽带, 2023, 19(10): 82-84.