

基于数字孪生的变电站电气安装施工进度动态监控与优化方法研究

胥春先

中国能源建设集团云南火电建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要：变电站电气安装施工涉及多工序交叉推进，传统进度管控模式难以适配复杂现场工况。数字孪生作为智能制造与智慧城市领域的前沿技术，将其引入电力施工领域是极具前瞻性的探索，本文以数字孪生技术为依托，构建施工进度动态监控与优化方法框架。从施工流程特征出发，分析进度影响要素的作用机理，搭建涵盖数据采集、模型构建与交互应用的数字孪生体系。在此基础上，设计施工全要素感知与进度实时映射机制，并从工序重构、资源调配、多干扰适应等维度提出进度优化路径，为变电站电气安装工程的精细化进度管控提供理论支撑。

关键词：数字孪生；变电站电气安装；施工进度；动态监控；进度优化

引言：变电站电气安装是电力工程建设中技术密集、工序繁杂的关键环节，施工进度管控直接关系工程整体交付质量。然而，多工序交叉、多要素干扰的现场特征，使传统静态管控手段暴露出数据滞后、响应迟缓等短板。数字孪生技术通过物理场景与虚拟模型的实时映射，为施工进度的动态感知与智能优化开辟了新路径。探索该技术在变电站电气安装进度管控中的应用逻辑，对提升工程建设管理水平具有现实意义。

1 变电站电气安装与数字孪生基础理论

1.1 变电站电气安装施工流程与作业特征

变电站电气安装施工依托电力工程建设规范形成完整的作业链路，整体施工环节遵循电力系统建设的客观规律有序推进^[1]。施工开展前期会完成场地预处理、设备进场核验、管线基础布设等前置工作，后续依托标准化作业规范完成电气设备就位、线路接驳、系统调试等核心工序，最终落实工程质量校验与施工收尾工作。电气安装作业具备技术密集型属性，各类施工环节对操作精度与工艺标准有着极高要求，施工全过程需要匹配专业技术规范与电力安全准则。现场作业呈现多工序交叉推进的状态，不同类型电气设备的安装工艺存在差异化标准，施工环境易受场地条件、电力设备特性等因素影响。

1.2 变电站电气安装施工进度影响要素机理

变电站电气安装施工进度的波动由多重客观与主观要素共同作用形成。施工物资的供应状态、设备质量达标程度会直接影响各工序的推进效率，物资供给滞后或设备参数偏差会造成工序停滞与工期延误。施工现场的技术落实水平、作业人员的专业素养决定施工工序的完成质量与推进速度，技术操作不规范会引发返工问题，

间接拉长施工周期。外部环境条件与现场管理模式也会对施工进度产生深层作用，场地统筹规划不合理、工序衔接规划不完善，都会扰乱整体施工节奏，各类影响要素相互交织，共同决定施工进度的整体推进状态。

1.3 数字孪生技术架构与运行机制

数字孪生技术依托多层级技术架构实现物理场景与虚拟模型的深度映射，整体架构涵盖数据采集层、模型构建层、数据运算层与交互应用层。各层级技术模块形成闭环运行体系，数据采集层依托智能传感设备与数据传输技术捕捉物理实体的实时状态信息，模型构建层基于电力工程参数搭建高精度虚拟仿真模型。数据运算层对采集的多元数据进行筛选、分析与整合，实现虚拟模型与物理实体的状态同步更新。交互应用层承接前端数据处理结果，完成场景仿真、状态监测、数据推演等核心功能，整套运行体系依托数据流转实现虚拟场景对物理工程的精准复刻与动态迭代。

1.4 数字孪生适配施工进度管控的内在逻辑

数字孪生技术紧扣“数字化”与“智能化”双重发展趋势，能够依托虚拟仿真与动态数据管控能力，适配变电站电气安装施工进度精细化管理需求。技术体系可对施工全流程的数据信息进行实时捕捉与动态分析，还原施工现场的真实作业状态，实现对施工各工序推进情况的可视化管控。虚拟模型可复刻施工全流程的动态变化，依托数据推演预判施工过程中的进度偏差与潜在风险，为施工进度优化提供精准的数据支撑。技术应用打破传统进度管控的静态管理模式，以动态化、可视化的管控方式优化施工资源配置与工序规划，提升变电站电气安装施工进度管控的精细化与科学化水平。

2 变电站电气安装进度管控现存问题与机理分析

2.1 传统施工进度管控模式运行机制

变电站电气安装传统进度管控依托既定施工方案与阶段性管控思维开展日常管理工作。工程筹备阶段会结合项目整体建设目标划定各施工阶段的工期节点,细化各工序的作业时长与资源配置标准。现场管理工作依托人工统计与定期核查的方式记录施工推进情况,对比预设工期标准判别施工推进的整体状态^[2]。管控工作以阶段性核查为核心抓手,依靠纸质台账与人工汇总的方式整理施工数据,依托固定管控流程完成工期核对、工序督办与进度调整工作。

2.2 静态进度管控模式的固有短板

静态进度管控模式适配固定化施工场景,难以适配变电站电气安装复杂多变的施工场景。管控体系依托预设参数与固定工期规划开展工作,无法感知施工过程中出现的细微工况变动。数据采集与进度更新存在明显滞后性,现场施工的动态变动无法及时录入管控体系,造成进度数据与实际施工状态出现偏差。管控思维偏向固化的流程管理,缺少动态调整的弹性空间,面对工序变动与施工波动时难以做出灵活调整。单一固化的管控手段会降低工期管控的精准度,无法适配多工序交叉施工的复杂场景。

2.3 施工多要素动态干扰的作用规律

变电站电气安装施工全过程会受到多种内外要素的动态干扰,各类要素遵循特定规律影响施工工期推进。物资供给、设备调试、现场施工技术落实等内部要素会从工序源头影响施工推进节奏,要素状态出现波动便会造成工序推进速度出现浮动。场地环境、工程技术标准更新、现场资源调配等外部要素会持续干预整体施工链路,对多道工序的衔接推进产生持续影响。各类干扰要素具备随机性与联动性的特征,单一要素出现变动会引发连锁反应,对整体施工进度形成多层级的波动影响。

2.4 进度动态调控的现存制约因素

变电站电气安装施工进度动态调控工作面临多重现实条件的制约。传统管控体系的数据采集方式较为单一,现场施工动态数据的采集覆盖范围有限,精细化调控所需的数据基础存在缺失。现场管控体系缺少智能化的数据分析手段,无法对施工干扰要素进行精准甄别与预判,调控工作只能针对既定问题进行被动整改。施工资源调配体系灵活性不足,工序调整与资源优化的响应速度较慢,难以匹配动态施工的调控需求。传统管理体系的管控思维较为固化,动态调控的流程体系不够完善,大幅限制进度优化调整的实际成效。

3 基于数字孪生的施工进度动态监控体系构建

3.1 施工全要素数据感知与采集体系搭建

施工数据感知与采集是数字孪生技术落地进度管控的核心基础,整套体系围绕变电站电气安装施工的全部核心要素完成搭建工作^[3]。体系搭建聚焦施工现场资源工况、设备运行状态、工序推进进度等核心内容,依托智能传感设备与自动化采集技术捕捉施工现场各类有效信息。数据采集范围覆盖物资流转、设备安装、人员作业与场地环境等多个施工维度,填补传统人工采集模式的数据覆盖短板。技术搭建过程遵循电力工程施工标准,统一各类数据的采集精度与传输规范,保障原始数据具备真实性与有效性。

3.2 变电站电气安装工程孪生模型构建逻辑

变电站电气安装孪生模型的搭建遵循电力工程施工的客观规律与数字化建模标准。建模工作结合变电站设备结构参数、施工工艺标准与现场布设格局,搭建贴合真实施工场景的数字化虚拟场景。模型构建依托采集的施工基础数据完成参数赋值,还原各类电气设备的空间位置与施工工序的递进关系。依托精准的数据参数与科学的建模逻辑,实现虚拟场景对真实施工工程的完整复刻。

3.3 施工进度实时映射与动态追踪机制

施工进度映射与追踪机制依托数字孪生数据流转链路实现高效运转。施工现场产生的各类动态数据持续传入虚拟模型内部,推动虚拟场景施工状态跟随现场作业进程持续更新。机制运行依托数据交互技术打通物理施工场景与虚拟数字场景的对应关系,实现施工工序推进状态的数字化还原。系统可针对各道施工工序的推进进度进行持续跟踪,捕捉施工过程中的进度偏移与工序滞留情况。

3.4 多维度施工状态实时监测体系搭建

多维度施工状态监测体系针对变电站电气安装施工的多元管控需求完成搭建设计。体系突破传统单一工期监测模式,围绕施工进度、施工质量、资源配置、现场工况多个维度搭建一体化监测模块。各监测模块依托孪生模型的仿真运算能力解析施工状态数据,判别施工现场各维度的运行状态。体系可对施工过程中的资源调配失衡、工序推进滞后、施工工况异常等问题进行自动识别,为现场管控工作提供有效预警。多维度的监测模式能够全方位把控施工现场运行状态,提升施工进度管控的全面性与专业性。

4 基于数字孪生的变电站施工进度优化方法

4.1 施工工序逻辑关系梳理与重构方式

变电站电气安装施工体系具备工序繁杂、作业耦合

度高的行业特征,不同作业环节依托电力施工工艺标准形成层层衔接的作业链路^[4]。数字孪生技术具备高精度仿真与数据解析能力,能够对整体施工工序进行逐层拆解与系统梳理,清晰界定各作业环节的前置约束与后置承接关系。虚拟仿真场景可以复刻完整施工流程,精准甄别传统施工模式中工序交叉混乱、作业排布不合理及流程冗余等各类问题。结合电气安装专属工艺标准与现场作业环境条件对原有工序结构进行调整重塑,优化各施工单元的衔接模式,压缩无效作业间隔与空置工期。全新的工序排布模式可以规整整体作业脉络,强化施工流程的紧凑性与有序性,为施工进度精细化优化筑牢工艺层面的基础条件。

4.2 施工资源动态调配优化思路

施工资源的科学配置是提升变电站电气安装施工效率、把控工期节奏的核心内核。数字孪生模型可以全面整合施工现场人力储备、机械设备运行、物料耗材供给等各类核心资源的实时状态数据,深度挖掘资源投放不均衡、资源闲置堆积、资源供给缺口等各类低效问题。系统依托内置仿真运算算法,精准测算不同施工阶段、不同作业模块对应的资源需求体量,结合现场工序推进节奏动态匹配资源供给规模与投放节奏。新型优化思路彻底摆脱传统工程固定化、经验化的资源投放模式,根据现场实时作业负荷灵活调整各类资源的投入强度与投入时段。精细化的资源调控模式能够最大化激活各类施工资源的利用价值,削减资源配置失衡引发的工期延误问题。

4.3 多干扰场景下进度动态调整机制

变电站电气安装作业处于复杂多变的现场环境中,各类不确定干扰因素会持续作用于施工流程,造成既定工期规划出现偏差。数字孪生仿真体系可搭建多元施工干扰场景,推演各类环境变动、作业误差、资源波动等因素对工序推进的影响程度,精准捕捉不同干扰条件下的工期波动规律。进度动态调整机制依托施工现场实时更新的工况数据,持续迭代虚拟仿真场景的运行状态,结合剩余工序作业总量与现场资源储备条件,生成适配现场工况的进度优化方案。通过重新排布未完工序结

构、细化资源投放节奏、调整作业部署模式,有效弥补各类干扰带来的工期缺口,消解施工滞缓带来的负面作用。灵活的动态调控模式能够显著增强施工体系对复杂现场工况的适配能力,稳定整体施工工期节奏。

4.4 电气安装施工进度长效优化策略

电气安装施工进度的长效优化依托数字化技术实现施工管理体系的迭代升级与持续完善。数字化平台持续归集施工现场的作业运行数据、工况变动数据与进度调控数据,逐步构建覆盖全施工流程的专属工程数据库,为后续项目工期规划与管控优化提供充足的数据支撑。工程运行积累的海量数据可以反向赋能工序排布与资源调配方案的迭代升级,持续优化施工管理体系的运行状态与管控效能^[5]。依托数字化监测手段与仿真分析能力可以常态化排查施工过程中存在的效率短板与管控漏洞,针对性完善现场管控体系与作业实施模式。持续性的迭代优化模式能够稳步提升变电站电气安装工程的工期管控质量,推动工程建设整体效率实现长效提升。

结束语

数字孪生驱动的施工进度管控打破了传统静态管理的固有框架,以虚实映射与动态追踪的方式实现了进度偏差的及时捕捉与精准调控。从多维监测体系搭建到工序逻辑重构,再到资源动态调配与干扰场景适应,整套方法为变电站电气安装施工提供了系统化的管控手段。伴随数字化技术在电力工程领域的持续渗透,施工进度管理的精细化与智能化水平有望获得更深层次的提升。

参考文献

- [1]李果天.变电站电气安装施工中存在的问题及预防措施分析[J].电力设备管理,2025(1):211-213.
- [2]董阳,张家麟,贾宏伟.变电站电气设备安装工程施工管理策略[J].电力设备管理,2024(3):184-186.
- [3]黄一凡.变电站工程土建施工与电气安装的配合分析[J].电力设备管理,2023(11):132-134.
- [4]罗正旭.变电站电气安装技术重点及施工工艺分析[J].科技资讯,2024,22(22):99-101.
- [5]吕征,李明松.变电站电气设备安装及调试项目的进度管理[J].中国航班,2022(14):112-115.