

基于数字孪生的复杂电气工程施工安全风险动态预警模型

翟建鹏

天津市特种设备工程建设监理有限责任公司 天津 300384

摘要: 本文聚焦基于数字孪生的复杂电气工程施工安全风险动态预警模型。阐述了数字孪生技术、施工安全风险及动态预警模型构建的基础理论;全面识别施工安全风险,构建指标体系并划分风险等级;然后设计模型总体架构与各层级核心功能;实现了多源数据采集融合、数字孪生模型构建等关键技术;最后通过可视化与预警发布技术呈现风险信息。该模型可打破信息壁垒,实现一体化管控,为复杂电气工程施工安全风险管控提供实时、精准决策支持。

关键词: 数字孪生;复杂电气工程;施工安全风险;动态预警模型

引言: 复杂电气工程施工周期长、环境复杂、技术难度高,施工安全风险具有复杂性、突发性等特点,传统管控方式存在滞后性,难以满足需求。数字孪生技术融合多学科数据,具备实时性、动态性与交互性优势,能复刻实体全生命周期过程。将其应用于复杂电气工程施工安全风险管控,可打破各环节信息壁垒,实现一体化管控。本文旨在构建基于数字孪生的动态预警模型,为施工安全风险管控提供新思路与技术支持。

1 相关基础理论

1.1 数字孪生技术核心内涵

数字孪生技术是一种融合多学科、多维度数据的智能化仿真技术,核心在于构建物理实体与虚拟模型的全要素映射、实时联动与闭环优化体系。其以物理空间实体为基础,通过数据采集、建模仿真、数据分析等技术,在虚拟空间复刻实体的几何形态、运行状态、物理特性及关联关系,实现物理与虚拟空间的双向数据交互。相较于传统仿真技术,数字孪生具备实时性、动态性与交互性三大核心优势,可通过虚拟模型模拟实体全生命周期过程,提前预判问题、优化决策^[1]。在复杂电气工程中,该技术打破了施工各环节的信息壁垒,实现施工过程、设备状态、环境因素的一体化管控,为安全风险预警提供精准的数据支撑与仿真载体,是推动电气工程施工智能化、安全化转型的核心技术之一。

1.2 复杂电气工程施工安全风险基础理论

复杂电气工程施工安全风险指在施工全流程中,受人员、设备、环境、管理等多因素叠加影响,可能引发安全事故、造成人员伤亡或财产损失的潜在隐患,其核心特征体现为复杂性、突发性、关联性与不确定性。该类风险的形成源于各风险因素的相互作用,人员操作不规范、设备老化故障、恶劣施工环境、安全管理制度缺失等均可能成为风险触发点。从风险管控理论来看,复

杂电气工程施工安全风险需遵循“识别-评估-预警-处置”的全流程管控逻辑,通过系统梳理风险源、量化风险等级,构建针对性的防控体系。相较于普通工程,复杂电气工程具有施工周期长、作业环境复杂、技术难度高、交叉作业多等特点,风险因素更具隐蔽性与传导性,单一风险若未及时管控,易引发连锁反应,因此需基于风险叠加原理与动态管控理念,实现对风险的精准把控与提前干预。

1.3 动态预警模型构建基础

动态预警模型构建以风险管控理论、数据驱动理论与系统工程理论为核心基础,旨在通过实时数据采集与智能分析,实现对安全风险的动态监测、等级评估与及时预警。数据驱动理论为模型提供核心支撑,要求模型具备多源数据接入、融合与分析能力,通过挖掘数据背后的风险关联规律,构建风险预测模型。系统工程理论强调模型的整体性与协同性,需统筹考虑施工各环节、各要素的关联关系,确保模型能覆盖风险形成、传导、爆发的全流程。模型构建需以风险等级划分标准为依据,结合阈值设定、趋势分析等方法,实现从风险萌芽到风险爆发的全阶段预警。动态预警模型还需具备自适应能力,可根据施工进度、环境变化、风险处置效果等动态调整模型参数与预警阈值,克服传统静态预警的滞后性缺陷,为复杂电气工程施工安全风险管控提供实时、精准的决策支持,实现“早发现、早预警、早处置”的管控目标。

2 复杂电气工程施工安全风险识别与指标体系构建

2.1 施工安全风险全面识别

复杂电气工程施工安全风险全面识别需采用“全域覆盖、分层分类、多方法结合”的思路,贯穿施工准备、主体施工、竣工验收全阶段,确保风险源无遗漏、无死角。识别过程中,结合文献研究法、现场调研法、专家访谈法与故障树分析法,从人员、设备、环境、管理四

大维度展开系统梳理。人员维度重点识别操作技能不足、安全意识薄弱、违规作业等风险；设备维度聚焦设备选型不当、老化故障、维护不到位等隐患；环境维度关注高温、暴雨、大风等恶劣天气及复杂作业场地带来的风险；管理维度排查制度缺失、流程不规范、责任不落实等问题。针对交叉作业多、技术难度高的施工环节，采用专项识别模式，结合施工方案与技术规范，精准定位隐蔽性风险源^[2]。建立风险识别动态更新机制，根据施工进度与现场变化，实时补充新增风险源，形成完整的风险清单，为后续指标体系构建与等级划分奠定基础。

2.2 风险指标体系构建

基于风险全面识别结果，遵循科学性、系统性、可操作性与针对性原则，构建复杂电气工程施工安全风险指标体系，分为目标层、准则层与指标层三级结构。目标层为复杂电气工程施工安全综合风险，准则层对应人员、设备、环境、管理四大风险维度，指标层则细化各维度核心风险因子，形成层级清晰、覆盖全面的指标体系。人员维度设置操作技能熟练度、安全培训覆盖率等指标；设备维度选取设备完好率、定期检修频次等指标；环境维度纳入恶劣天气预警响应效率、作业场地安全系数等指标；管理维度包含安全制度健全度、责任落实到位率等指标。指标选取过程中，兼顾定量与定性指标，通过专家打分法优化指标权重，确保指标体系能精准反映施工安全风险水平，为风险等级评估与预警模型构建提供标准化依据。

2.3 风险等级划分标准

结合复杂电气工程施工安全风险特征与行业规范，采用“定量评估+定性修正”的方法，制定四级风险等级划分标准，分别为低风险（蓝色预警）、中风险（黄色预警）、较高风险（橙色预警）、高风险（红色预警）。等级划分以风险指标体系为基础，通过层次分析法确定各指标权重，采用模糊综合评价法计算风险综合得分，结合得分区间界定风险等级。低风险得分区间为 $[0,2.5)$ ，此时风险隐患轻微，不影响施工正常开展，仅需常规巡查管控；中风险得分区间为 $[2.5,4.5)$ ，存在一定风险隐患，需制定针对性防控措施，加强动态监测；较高风险得分区间为 $[4.5,6.5)$ ，风险隐患可能引发局部安全事故，需暂停相关作业，限期整改；高风险得分区间为 $[6.5,10]$ ，风险隐患极易引发重大安全事故，需全面停工，启动应急处置预案。同时，建立等级动态调整机制，根据风险处置效果实时更新风险等级，确保管控措施精准适配风险状态。

3 基于数字孪生的动态预警模型框架设计

3.1 模型总体架构

基于数字孪生的复杂电气工程施工安全动态预警模型总体架构采用“物理层-数据层-模型层-应用层”四层架构，各层级协同联动，实现从物理实体数据采集到安全预警发布的全流程闭环管控。物理层为架构基础，涵盖复杂电气工程施工全过程的实体对象，包括施工人员、机械设备、作业环境、施工设施等，通过各类传感设备实现实体状态的实时感知。数据层承担数据处理核心职责，对物理层采集的多源数据进行清洗、融合、存储与管理，形成标准化数据资源池，为后续模型运算提供数据支撑^[3]。模型层是架构核心，构建数字孪生虚拟模型与风险预警算法模型，实现物理与虚拟空间的精准映射及风险的动态分析预测。应用层面向实际管控需求，提供风险可视化监测、等级预警、应急处置建议等功能模块，为施工管理人员提供决策支持。各层级通过数据接口实现双向交互，确保模型具备实时性与动态性。

3.2 各层级核心功能设计

模型各层级围绕安全风险动态预警核心目标，设计差异化核心功能，确保架构整体高效运转。物理层核心功能为多维度数据实时采集，通过部署物联网传感设备、视频监控设备、定位设备等，精准采集人员位置与操作状态、设备运行参数、环境温湿度与天气情况、施工进度等数据，实现物理实体状态的全面感知。数据层核心功能包括数据清洗、融合、存储与调用，通过数据清洗剔除异常数据，采用多源数据融合技术整合异构数据，依托云端数据库实现数据安全存储，同时提供高效数据调用接口，保障模型层数据需求。模型层核心功能为虚拟模型构建与动态更新、风险分析与预警运算，通过数字孪生技术复刻物理实体，实时同步状态变化，结合预警算法模型量化风险等级。应用层核心功能为风险可视化展示、预警信息发布、应急处置方案推送，通过可视化平台直观呈现风险状态，及时向管理人员推送预警信息，辅助制定应急处置策略。

4 模型关键技术实现

4.1 多源数据采集与融合技术

多源数据采集与融合技术是模型实现的基础支撑，采集环节采用“物联网+人工补充”的混合采集模式，覆盖施工全场景多类型数据。通过物联网传感设备自动采集设备运行参数、环境监测数据、人员定位信息等实时数据，采用5G与边缘计算技术确保数据传输的实时性与稳定性；针对制度文件、专家经验等非结构化数据，通过人工录入与智能识别技术完成采集。融合环节采用三级融合策略，首先进行数据预处理，剔除噪声数据、补全

缺失数据,实现数据标准化;其次通过特征层融合提取各数据源核心特征,构建统一特征空间;最后通过决策层融合结合权重分配算法,整合各特征数据的分析结果,形成精准、全面的数据成果。该技术有效解决了多源数据异构、冗余、不一致等问题,为模型运算提供高质量数据支撑。

4.2 数字孪生模型构建与动态更新技术

数字孪生模型构建采用“几何建模+物理建模+行为建模”一体化方法,结合BIM、GIS、仿真模拟等技术,实现物理实体的全要素复刻。几何建模基于BIM技术构建施工场景、设备、设施的三维几何模型,确保模型与实体的几何一致性;物理建模通过导入设备物理参数、材料特性等数据,模拟实体的物理运行规律;行为建模结合施工进度计划与历史数据,模拟人员操作、设备运行、施工流程等动态行为。动态更新技术依托实时采集的数据,采用增量更新与全量更新相结合的方式,实现模型与物理实体的同步联动。当实体状态发生小幅变化时,通过增量更新技术修改模型对应参数;当实体发生重大变更时,启动全量更新优化模型结构。同时引入机器学习算法,通过分析历史数据优化模型参数,提升模型对实体状态的模拟精度。

4.3 风险分析与预警算法实现

风险分析与预警算法采用“传统算法+智能算法”融合模式,兼顾算法的准确性与高效性。风险分析阶段,基于层次分析法确定各风险指标权重,结合模糊综合评价法对多维度风险指标进行量化评估,初步判定风险等级;同时引入LSTM神经网络算法,基于历史数据与实时数据构建风险预测模型,预测风险发展趋势。预警算法通过设定动态阈值实现分级预警,结合风险等级划分标准,针对不同风险维度设置差异化阈值,当风险指标超出对应阈值时,自动触发预警机制。算法实现过程中,通过数据训练优化模型参数,提升风险预测与预警的精准度;同时设置算法自适应调整模块,可根据施工场景变化与风险处置效果,动态优化算法逻辑,避免误预警与漏预警。该算法体系实现了风险的静态评估与动态预测相结合,为预警

决策提供科学依据。

4.4 可视化与预警发布技术

可视化与预警发布技术聚焦风险信息的直观呈现与高效推送,为施工管理人员提供便捷的管控工具^[4]。可视化技术基于WebGL与GIS技术,构建三维可视化管控平台,将数字孪生模型、实时风险数据、预警信息等整合呈现,支持场景缩放、视角切换、风险点定位等功能,管理人员可通过平台直观掌握施工安全风险全局状态与细节信息。针对高风险点,采用高亮标注、动态提醒等方式强化展示,提升风险关注度。预警发布技术采用“多渠道联动”模式,结合平台弹窗、手机APP推送、短信通知、现场声光报警等多种方式,确保预警信息及时传递至相关责任人。平台内置应急处置知识库,发布预警信息时同步推送对应风险的处置方案与流程,辅助管理人员快速开展应急处置工作,最大限度降低风险损失。

结束语

本文构建的基于数字孪生的复杂电气工程施工安全风险动态预警模型,通过多源数据采集融合、数字孪生模型构建等关键技术,实现了对施工安全风险的动态监测、等级评估与及时预警。该模型具备实时性、精准性与自适应能力,能有效克服传统静态预警的缺陷,为施工管理人员提供实时、精准的决策支持。未来,可进一步优化模型算法,拓展应用场景,提升模型在复杂环境下的适应性与可靠性,推动电气工程施工安全管控水平持续提升。

参考文献

- [1]李永胜,余军,李毅男,等.基于数字孪生的大坝运行安全预测-预警-预演-预案关键技术研究与应用[J].水利技术监督,2025,(12):34-37+73.
- [2]万景红,张梦如,薛子龙,等.基于数字孪生技术的抽水泵站运行监测与分析[J].水利技术监督,2025,(12):42-44+57.
- [3]江铭健.电气工程施工中的安全管理与质量控制策略研究[J].房地产世界,2024,(19):62-64.
- [4]吴志超.电力工程施工安全管理以及质量控制管理分析[J].电气技术与经济,2024,(01):264-267.