

输变电组塔工程施工仿真系统研究与应用

潘 杰 张得科

甘肃送变电工程有限公司 甘肃 兰州 730070

摘 要：输变电组塔工程施工仿真系统集成高精度三维建模、多物理场耦合动力学分析及实时交互等关键技术，通过构建逼真的施工虚拟环境，实现施工方案优化、风险精准评估与高效人员培训。该系统有效降低施工成本，提升作业安全性与效率，在电力工程建设领域发挥重要作用。随着智能化、数字孪生等技术的创新发展，其跨平台协同化应用趋势显著，将为输变电工程建设带来更广阔的发展前景与技术革新。

关键词：输变电组塔；工程施工；仿真系统；应用

引言

随着电力行业的快速发展，输变电组塔工程规模与复杂度不断提升，传统施工方式在方案设计、风险管控及人员培训等方面面临诸多挑战。施工仿真技术凭借其可视化、可模拟的特性，成为优化工程建设的重要手段。本文聚焦输变电组塔工程施工仿真系统，深入探讨高精度三维建模、多物理场耦合分析等关键技术，剖析其在施工全流程中的应用成效，并展望系统未来发展趋势，旨在为电力工程建设提供理论支撑与技术参考。

1 输变电组塔工程施工仿真系统概述

输变电组塔工程施工仿真系统，作为一种融合先进技术的专业工具，在电力工程领域发挥着关键作用。该系统主要针对输变电线路钢管塔单动臂组塔等复杂施工场景，利用现代计算机技术与仿真算法，构建出高度还原现实的虚拟施工环境。在实际输变电线路建设中，钢管塔由于其高度高、结构尺寸大、重量重，对施工精度和安全质量要求极为严格。铁塔施工面临诸多挑战，如施工难度大、危险因素多，且施工技术与设备更新迅速。组塔前对施工作业人员进行全面培训必不可少，而传统培训方式在面对这些复杂情况时，效果往往差强人意。施工仿真系统则提供了创新解决方案，它通过图文并茂讲解、视频动画展示、试题考核巩固，以及虚拟现实模拟考核和仿真实验操作等多样化手段开展培训。系统功能主要分为演练培训和仿真模拟两大部分。演练培训模块，从方案简介、抱杆介绍，到施工准备、抱杆安装、吊装塔材、拆除抱杆，直至最后清理场地，对整个施工过程进行细致演示，帮助施工人员全面了解施工流程。仿真模拟模块，技术人员只需输入相关参数数值，如起吊重物的吨位、塔台高度等，计算机就能自动模拟抱杆吊装场景。在可视化的三维环境里，系统可实时分析计算起吊绳受力、抱杆最大起重量、起立角度、不平

衡力矩和塔材在空中位置等关键数据。通过对这些数据的深入分析，能够有效避免施工过程中的干涉、碰撞等风险，将抽象的施工概念、复杂的技术要点、重要的安全措施以及规范的施工行为，借助3D虚拟仿真技术直观呈现给施工人员，极大提升施工人员对施工过程的理解与掌控能力，为保障输变电组塔工程的高效、安全施工提供有力支持。

2 输变电组塔工程施工仿真系统关键技术

2.1 高精度三维建模技术

在输变电组塔工程施工仿真系统中，高精度三维建模技术为整个仿真奠定基础。利用先进的激光扫描技术，能够快速且精准地获取施工现场复杂地形、既有建筑以及各类设施的三维数据。这些数据通过点云的形式呈现，而后借助专业的建模软件，如3dsMax、Maya等，结合逆向工程技术，将点云数据转化为精确的三维模型，高度还原现实场景。对于组塔施工中的各类设备，像抱杆、起重机等，同样运用参数化建模方法，精确设定其尺寸、结构和运动参数，确保模型不仅在外观上逼真，更能在后续的仿真中准确模拟设备的运行状态。通过对输电塔结构进行精细化建模，细致到每一个杆件、节点的力学特性和几何形状，使得在仿真过程中能够精准分析塔架在不同施工阶段的受力与变形情况，为施工方案的优化提供可靠依据^[1]。

2.2 多物理场耦合动力学分析技术

多物理场耦合动力学分析技术在输变电组塔施工仿真中起着核心作用。施工过程中，涉及到多种物理场的相互作用，如力学场、热场和电磁场等。以力学场为例，在组塔时，抱杆提升塔材过程中，不仅要考虑塔材自身重力、风力等外力作用，还要分析抱杆因受力产生的弹性变形以及各部件间的接触力传递，这些力学因素相互耦合，影响着施工的稳定性。热场也不容忽视，电

气设备运行时产生的热量,会导致周围材料的热膨胀和热应力变化,进而影响设备的性能和结构的可靠性。通过数值计算方法,如有限元分析(FEA),建立多物理场耦合的数学模型,将各种物理场的控制方程联立求解,模拟出施工过程中不同物理场的动态变化及其相互影响。这样能够提前预测施工中可能出现的结构失效、设备过热等问题,为保障施工安全与设备正常运行提供有力的技术支持。

2.3 实时交互与虚拟现实技术

实时交互与虚拟现实技术极大地增强了输变电组塔施工仿真的沉浸感与实用性。借助头戴式显示设备(HMD),如HTCVive、OculusRift等,施工人员能够身临其境地进入虚拟的施工场景,360度全方位观察施工现场的布局、设备状态以及施工流程。配合动作捕捉设备,像LeapMotion等,施工人员的手部动作能够实时反馈到虚拟环境中,实现与虚拟物体的自然交互,例如模拟操作施工设备、调整塔材位置等。在虚拟现实环境中,还能设置各种施工故障和突发情况,让施工人员进行应急演练,提高其应对实际问题的能力。实时交互功能还支持多人协作仿真,不同地点的施工人员、工程师可以通过网络连接,共同参与到同一虚拟施工场景中,协同作业、交流方案,有效提高施工前的规划与沟通效率,为实际施工的顺利开展做好充分准备。

3 输变电组塔工程施工仿真系统应用分析

3.1 施工方案优化

输变电组塔工程施工仿真系统通过三维建模与动态模拟技术,构建与实际工程高度契合的数字化施工环境。基于地理信息系统(GIS)采集的地形数据、杆塔参数及设备性能指标,系统可对吊装路径、组塔流程等施工环节进行全流程仿真推演。例如,在复杂山地环境中,系统能模拟不同吊装机械的起吊角度、旋转半径及负载能力,分析各工况下的力学传递路径,直观呈现构件安装顺序对整体结构稳定性的影响,从而规避传统方案中可能出现的空间干涉、受力不均等问题。通过仿真系统的参数化调整功能,施工团队可快速生成多套方案并进行对比分析。系统对不同方案中的施工效率、设备配置、材料损耗等关键指标进行量化评估,以可视化图表形式呈现各方案的优劣。例如,对比不同吊装设备组合下的工期差异,精准测算机械闲置时间与资源利用率,辅助决策层选取最优方案。仿真系统还能对施工过程中的临时支撑结构进行力学性能模拟,确保在不同施工阶段结构的安全性及可靠性,为施工方案的科学制定提供数据支撑。

3.2 施工风险评估与控制

输变电组塔工程施工仿真系统依托有限元分析与多体动力学算法,实现对施工过程风险的精准识别与量化评估。在仿真环境中,系统可模拟强风、暴雨等极端气象条件对施工设备与结构的影响,通过应力应变云图与位移变形曲线,直观展现结构薄弱部位与潜在失效模式。例如,模拟大风工况下杆塔的动态响应,分析各连接节点的受力变化,提前发现因风振引发的螺栓松动、构件疲劳等风险隐患。针对识别出的风险因素,仿真系统可进行风险等级评估与控制策略模拟。通过建立风险评估模型,综合考虑风险发生概率与影响程度,对风险进行分级管理。系统还可模拟不同风险控制措施的实施效果,如增加临时缆风绳、调整吊装顺序等,对比优化后的结构受力状态与风险降低程度。例如,在模拟高空作业风险时,系统通过虚拟人运动轨迹分析,评估安全防护设施的有效性,为制定科学的风险防控方案提供依据,实现施工风险的主动预防与动态控制^[2]。

3.3 施工人员培训与管理

输变电组塔工程施工仿真系统构建沉浸式虚拟培训环境,为施工人员提供高仿真的实操训练平台。通过虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术,施工人员可在虚拟场景中进行吊装操作、高空作业等复杂施工任务训练。系统实时反馈操作过程中的动作规范、安全隐患及设备运行状态,如提示吊装角度偏差、起重量超限等问题,帮助施工人员掌握正确的操作流程与应急处理方法。在人员管理方面,仿真系统可记录施工人员的训练数据与操作表现,生成个性化能力评估报告。通过分析人员在不同施工任务中的操作熟练度、决策准确性等指标,识别人员技能短板,为针对性培训提供数据支持。系统还可模拟多人协同作业场景,评估团队成员间的配合默契度与信息传递效率,优化人员配置与分工方案。例如,在模拟组塔施工中,通过观察各岗位人员的操作节奏与响应速度,调整人员组合,提升整体施工效率与安全性,实现施工人员能力与工程需求的精准匹配。

4 输变电组塔工程施工仿真系统发展趋势

4.1 智能化与自主决策

(1)随着人工智能技术的飞速发展,输变电组塔工程施工仿真系统将朝着智能化与自主决策方向大步迈进。系统可利用机器学习算法对大量历史施工数据以及实时采集的数据进行深度挖掘与分析,从而精准预测施工过程中可能出现的各类问题,如设备故障、天气变化对施工进度的影响等。例如,通过分析过往施工中设备运行参数数据,预测设备何时可能出现故障,提前安排

维护,避免施工中断。(2)在施工方案的制定与优化方面,智能化系统能够依据施工现场的实际情况,如地形地貌、周边环境、资源配置等因素,自主生成多种施工方案,并通过模拟仿真对这些方案进行评估,自动筛选出最优方案。相比传统依靠人工经验制定方案的方式,大大提高了方案的科学性与合理性。(3)智能化的施工仿真系统还可实现对施工过程的实时监控与自动调整。一旦施工过程中出现与预设方案不符的情况,系统能够迅速做出反应,自动调整施工策略,保证施工的顺利进行。例如,当遇到突发强风等恶劣天气时,系统自动调整组塔设备的运行参数,保障施工安全^[3]。

4.2 与数字孪生技术深度融合

(1)数字孪生技术为输变电组塔工程施工仿真系统带来了全新的发展机遇。通过构建与实际施工现场完全对应的数字孪生模型,施工人员能够在虚拟环境中对整个施工过程进行全方位、多角度的模拟与分析。在数字孪生模型中,每一个施工设备、每一个施工步骤都能以高度逼真的形式呈现出来,施工人员可以提前发现施工过程中潜在的问题,如设备之间的碰撞干涉、施工流程的不合理性等。(2)数字孪生技术使得施工过程中的实时监测与反馈成为可能。施工现场的各类传感器将实时数据传输至数字孪生模型,模型根据这些数据实时更新状态,施工人员可以直观地看到施工进度、设备运行状态等信息。一旦发现问题,能够立即在数字孪生模型中进行分析与优化,并将优化后的方案迅速应用到实际施工中,大大提高了施工的效率与质量。(3)在输变电组塔工程施工完成后的运维阶段,数字孪生模型同样发挥着重要作用。通过与实际运行数据的持续对比与分析,数字孪生模型能够预测设备的老化趋势、潜在故障等,为运维人员提供准确的决策依据,实现设备的精准运维,延长设备使用寿命。

4.3 跨平台与协同化发展

(1)为了满足不同用户在不同场景下的使用需求,输变电组塔工程施工仿真系统将逐渐向跨平台方向发

展。无论是在个人电脑、平板电脑还是智能手机等不同终端设备上,用户都能够便捷地访问和使用施工仿真系统。这将打破设备限制,让施工人员、管理人员等随时随地都能对施工方案进行查看、分析与讨论。(2)跨平台发展也为施工仿真系统的协同化应用奠定了基础。在输变电组塔工程建设过程中,设计单位、施工单位、监理单位等多个参与方均涉及其中。跨平台的施工仿真系统可有效实现各方数据共享与协同工作。设计单位能实时将设计方案上传至系统,施工单位依据方案开展施工仿真,并反馈结果,双方借助系统沟通协作,共同优化方案。(3)协同化发展还体现在施工仿真系统与其他相关软件的集成上。例如,与项目管理软件集成,实现施工进度与项目管理的无缝对接;与地理信息系统(GIS)集成,能够更好地结合施工现场的地理环境进行施工规划与仿真。通过跨平台与协同化发展,提高整个输变电组塔工程建设的效率与协同性^[4]。

结束语

综上所述,输变电组塔工程施工仿真系统凭借多项关键技术,在施工方案优化、风险防控及人员培训等环节展现显著优势,为工程建设提质增效提供有力保障。随着智能化、数字孪生等前沿技术的深度融合,该系统将朝着自主决策、跨平台协同方向持续发展。未来需进一步深化技术创新,拓展应用场景,推动输变电工程建设向智能化、数字化方向迈进,为电力行业高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1]余声.输变电工程中内悬浮外拉线组立钢管塔的安全施工技术[J].电气技术与经济,2023(10):125-128.
- [2]谷新贺.输变电工程中大型组合索道运输施工关键技术[J].电力设备管理,2022(20):189-192.
- [3]李济洲,陈之林.110kV输变电工程杆塔规划设计[J].阜阳职业技术学院学报,2020,31(1):46-50.
- [4]陈聪.110kV输变电工程杆塔规划设计研究[J].现代物业,2021(28):38-39.