

# Innovation and Reflection on Design Work Under the Context of Comprehensive Mechanized Construction

Kexiang Niu<sup>1</sup> Tingyu Lai<sup>2</sup> Chen Li<sup>2</sup> Ruicheng Wang<sup>1</sup> Jingchao Yang<sup>1</sup>

1. China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030001, China

2. Engineering Management Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Beijing, 100070, China

## Abstract

This article takes a 500kV transmission line project as the research object, and systematically explores the design innovation under the background of comprehensively promoting mechanized construction. The study first analyzed the adaptability requirements of mechanized construction for transmission engineering design, and constructed an innovative method system centered on equipment capability domain, virtual prototype simulation, data-driven feedback, and digital collaborative platform. The effectiveness of this system in improving design accuracy and construction compatibility has been verified through its application in typical processes such as basic drilling, tower material hoisting, wire tensioning, and crossing protection. The results indicate that design pre-construction and data-driven management based on mechanized construction can significantly reduce rework rates and safety risks, optimize equipment configuration and construction pace, achieve information integration between design, construction, and operation and maintenance, and provide technical support and model reference for high-quality construction of power transmission projects.

## Keywords

mechanized construction; Mechanical design; Design innovation; Reflection and exploration

## 全面推进机械化施工背景下设计工作的创新与思考

牛克想<sup>1</sup> 来庭煜<sup>2</sup> 李晨<sup>2</sup> 王瑞成<sup>1</sup> 杨景超<sup>1</sup>

1. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 中国·山西太原 030001

2. 国网冀北电力有限公司工程管理分公司, 中国·北京 100070

## 摘要

本文以某500kV输电线路工程为研究对象,围绕全面推进机械化施工背景下的设计创新进行了系统探讨。研究首先分析了机械化施工对输电工程设计提出的适配性要求,构建了以装备能力域、虚拟样机仿真、数据驱动反馈及数字协同平台为核心的创新方法体系。通过在基础成孔、塔材吊装、导线牵张及跨越防护等典型工序中的应用,验证了该体系在提升设计精度与施工匹配性方面的有效性。结果表明,基于机械化施工的设计前置与数据化管理可显著降低返工率与安全风险,优化设备配置与施工节拍,实现设计、施工与运维的信息贯通,为输电工程的高质量建设提供了技术支撑与模式参考。

## 关键词

机械化施工; 机械设计; 设计创新; 思考探究

## 1 引言

在我国建筑业由传统粗放式施工向高效智能化施工转型的进程中,机械化施工已成为提升工程建设质量与效率的关键路径。随着大型基础设施和城市综合体项目的不断增加,工程施工的复杂性和安全风险显著上升,传统以人工经验为主导的设计模式已难以满足现代化施工的精度与协调要求。机械化施工的全面推进,不仅意味着施工装备和工艺的机械替代,更深层次地影响了设计理念、设计流程以及多

专业协同机制的重构。在此背景下,设计工作正由“绘图导向”向“施工导向”转变,从静态的结构表达走向动态的全周期适配。机械化施工要求设计人员在前期阶段就考虑施工机械的空间作业条件、装备匹配性、运输吊装路径及工序衔接逻辑,促使设计成果具备更强的可施工性与工程经济性。同时,BIM、数字孪生与智能仿真等信息化手段的引入,使得设计环节能够与施工装备形成数据联动,实现施工过程的可视化与参数化控制。然而,当前设计体系在应对机械化施工需求时仍存在标准体系滞后、数据协同断层、设计思维惯性等问题,影响了机械化优势的充分释放。因此,探索在全面推进机械化施工背景下设计工作的创新路径,不仅是提高施工效率与工程品质的必然要求,也是建筑行业实现高质量

【作者简介】牛克想(1987-),男,中国山西晋城人,硕士,高级工程师,从事输电线路结构专业设计研究。

发展的重要突破口。

## 2 工程概述

本文以“某500kV输电线路工程”为研究对象，该工程由国家电网公司投资建设，总线路长度约178.6km，途经山西大同、阳泉及河北张家口三地，沿线地貌复杂，包含丘陵、风蚀残坡及浅山区等多种地形类型。全线共设铁塔384基，其中耐张塔132基、直线塔252基，最大档距达680m，最小转角 $2^\circ$ 。工程导线采用LGJ-400/50型钢芯铝绞线，地线采用OPGW-80光纤复合地线；基础类型以人工挖孔桩和旋挖钻孔灌注桩为主，局部采用岩锚桩结构。项目施工的总体以便达成全过程的机械化施工。在这个过程中，基础成孔的机械化率要超过95%，杆塔组立的机械化率需达到98%，架线张力放线的机械化率为100%。为了达成这一目标，在设计阶段就引入了“机械化适应性设计”理念，针对成孔设备扭矩选型、塔材分段以及运输模块化、牵张设备功率匹配以及跨越防护构造标准化等方面展开了前置设计。该项目计划的总工期是18个月，设计文件规定要与施工数字化管控平台同步进行开发，构建BIM+GIS一体化的设计体系，以此实现设计、施工以及运维整个过程的信息贯通。

## 3 机械化施工背景下项目设计流程

### 3.1 勘测与数据获取

在某500kV输电线路工程里，设计流程的首要环节是开展高精度勘测以及进行数据建模。针对沿线长达178.6km的复杂地貌，采用机载LiDAR和RTK-GNSS联合测绘技术，将点云密度控制在 $12\text{ pts/m}^2$ ，地面高程精度要优于 $\pm 5\text{ cm}$ ，借助BIM—GIS融合平台生成数字地形模型，达成塔位高差、坡度与通道净空的三维可视化呈现。之后利用地质钻探与静力触探相结合的办法，对基础持力层分布、岩性特征以及地下水水位进行分区建模，为旋挖钻机选型和孔深控制提供量化依据。比如在岩层抗压强度处于50~80MPa的路段，设计规定钻机额定扭矩不能小于 $200\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，钻杆刚度 $\geq 2.5 \times 10^6\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。依靠数据化勘测成果的标准化接口输出，设计端可直接导入参数化建模环境，达成从地形数据到结构模型的无缝对接。

### 3.2 基础设计

基础设计从传统的静态结构计算转变为“工艺—装备—结构”三要素协同。按照勘测结果，线路全线一共采用了旋挖钻孔灌注桩298基以及人工挖孔桩86基。在设计时，先依据不同地层赋予钻进阻力系数 $K_f$ 和桩端阻力参数 $f_p$ ，经过计算得出钻机功率 $P = \pi \cdot T \cdot n/30$ 。以典型中风化砂岩段来说，推荐的钻进转速是12至18rpm，单次进尺为0.25至0.35m。泥浆密度控制在1.25至1.35g/cm<sup>3</sup>，黏度是17至20s，成孔垂直度控制在 $\leq 1/200$ ，沉渣厚度 $\leq 50\text{ mm}$ 。凭借在设计图纸里提前设置工艺参数表与设备选型曲线，施工单位

可在现场直接调用设备匹配清单，避免了因设备不符导致的返工或者孔径偏差，达成基础施工设计的机械化适应性。

### 3.3 塔材结构设计

塔材设计运用模块化策略，把384基铁塔依照构型划分成9种标准塔型，并且在三维设计软件里构建“构件族库”。每一种塔型都依据运输限宽3.5米、限高4.2米、单件质量小于等于2.5吨的原则来进行分段，以此适应汽车吊以及履带吊的装配工况。塔段连接采用高强螺栓M24×80标准化接口，还配备快速锁紧销，以此提高现场拼装效率。借助Revit与Tekla互联，对塔身分段后的吊装姿态给予模拟，将吊点坐标误差控制在 $\pm 20$ 毫米以内，根据塔身重心位置与吊装半径，选用额定起重力矩大于等于500吨·米的履带吊作为主吊，辅助吊机采用QY160吨级汽车吊，设计文件附带吊装力矩—半径曲线以及吊点受力仿真报告，达成设计阶段与机械装备选型的同步校核，保障吊装作业安全与稳定。

### 3.4 架线设计

架线部分围绕全机械化张力放线展开，在设计阶段便着手构建张力与牵引参数的匹配模型。以LGJ-400/50导线作为示例，该导线的额定张力 $T_n$ 为23.2kN，安全系数设定为1.8，张力放线设备的设计张力范围处于35至45kN之间，牵引机匹配功率不低于160kW。根据不同的跨距以及地形坡度，设计并绘制出“弛度—张力—气温”三维曲面图，以此来指导施工过程中对弛度进行调整，为了提升自动控制的精度，在设计阶段定义导线温度补偿系数 $K_t$ 为 $0.0017\Delta T$ ，同时在控制逻辑里设定气象参数联动阈值，即风速 $\geq 8\text{ m/s}$ 时停止牵张作业。跨越区段防护架的净高控制要求 $\geq 7.5\text{ m}$ ，横向间距 $\geq 5\text{ m}$ ，凭借在设计文件中嵌入工况模拟以及设备工参清单，保障张力放线系统可在安全区间内运行，减少现场二次标定的情况。

### 3.5 设计交付与数字化管理

在设计成果交付阶段的时候，运用“BIM+GIS+数据库”三维集成平台来开展信息管理工作。所有的构件、桩基、设备参数以及施工工艺指标都会按照IFC标准格式导出，形成大约18GB的数字移交包，平台内部构建了编码规则，像“JL-BS-XX-YYY”表示基础、塔身以及线路编号，以此达成设计—施工—验收的一体化信息追踪。针对关键施工数据比如钻进速度、吊装角度、张力曲线等预留数据接口，方便在施工期间可实时回传并且校核设计假设，在验收阶段，BIM模型可直接生成工艺过程检核表以及构件合格率统计，达成纸质文件向数字档案的转变，这种有可追溯性的设计交付方式，让机械化施工在信息层面得到全周期的支撑，提高工程建设的系统化与智能化水平。

## 4 推进机械化施工背景下设计工作的创新方法

### 4.1 建立“装备能力域”驱动的设计前置机制

传统输电线路设计大多依靠静态的规范参数以及经验

公式,缺少对机械化装备性能边界的动态匹配。为了适应机械化施工的需求,在设计环节需要引入“装备能力域”模型,这个模型会对主导设备的扭矩、转速、臂长、负载曲线、稳定角以及场地约束条件进行多维量化,把设备性能区间嵌入到设计参数里,达成设计方案和装备能力的同步演化。比如在基础成孔设计的时候,不再只是给出孔径和持力层深度,而是附带设备选型矩阵以及施工功率需求分布图,用来检验孔深、土层硬度与旋挖机扭矩的适配性,塔材设计同样需要嵌入吊机回转半径与吊点荷载曲线,以此确定构件分段方式以及吊装路径,该方法的创新之处在于借助装备性能数据库与设计软件接口的实时联动,让设计人员在方案阶段就能筛选出最优设备组合,消除传统施工阶段“设计超设备能力”或者“设备冗余投资”的问题,从根本上达成设计与机械化施工的一体化耦合。

#### 4.2 推行基于“虚拟样机+工况仿真”的协同校核体系

在机械化施工的条件之下,结构与工艺的动态耦合特性较大提高,传统的二维图纸已难以呈现整个过程中的时空变形以及受力状况。为了克服这一限制,需构建“虚拟样机+工况仿真”的协同校核体系,借助BIM与多物理场仿真平台的耦合,针对基础钻进、塔身吊装、导线张力放线等关键环节展开实时仿真验证。以500kV铁塔吊装为例,系统于虚拟环境里模拟吊装路径、风场扰动以及塔身稳定性,输出塔体应力云图与吊点受力曲线,提前识别结构薄弱区域与安全边界,此方法还可达成不同装备组合下的效率对比,辅助优化设备调配方案,创新之处在于达成从“静态设计安全”至“动态工况可靠性”的转变,使得设计阶段的模型拥有仿真决策功能。实践证明,借助虚拟样机预演,可将现场吊装路径调整次数降低40%,平均节约工期约12%,有效提升机械化施工的确切性与安全冗余度。

#### 4.3 构建“数据驱动的自校正设计反馈链”

在传统的工程实践当中,设计数据和施工反馈长期处于相互割裂的状态,使得后续项目不断重复积累同类偏差。要突破这一限制,就要构建以数据驱动作为核心的自校正设计反馈链,这个系统主要由三个部分构成,分别是前端数据采集层、中间数据分析层以及设计模型校正层,前端借助装备传感器实时采集钻进速度、扭矩变化、吊装姿态、张力曲线等施工参数,中间层依托云端数据平台来完成清洗、特征提取以及偏差分析,设计层会把分析结果自动回写到参数化模型里,调整设计边界条件与经验系数。比如说,当实际旋挖钻机进尺效率比设计值低超过15%的时候,系统会自动调整后续设计段的岩层阻力修正系数,以此提高预测精度,

依靠这个闭环机制,设计模型持续进行自我修正,形成可进化的数据知识库,这种方法达成了机械化施工过程对设计端的“反哺”,从经验型设计转变为数据认知型设计,提升了设计的科学性,还为后续工程提供了可量化的经验积累。

#### 4.4 构建“设计—施工—运维一体化”的全生命周期数字协同平台

随着机械化施工的不断发展,项目管理模式正从单一阶段的优化朝着全过程协同转变。为了给这种转变提供支持,需要开发“设计—施工—运维一体化”的数字协同平台,以此达成数据、模型以及文档的贯通共享,平台依据统一的编码体系和信息标准,把设计图纸、设备参数、施工日志以及运维监测数据都归入同一个数据库。设计人员可实时获取施工阶段的工况数据,反过来验证结构假设,运维团队也可以基于设计模型直接调用构件应力与安装记录,实现精准维护,平台内置的数据可视化接口可对关键性能指标进行动态展示,该方法的创新之处在于融合了BIM、CIM、物联网传感以及云计算,消除了设计与施工之间的“数据断层”,达成了从设计意图到施工执行再到运维监测的闭环管理。凭借这种模式,工程信息传递精度提高了大约30%,施工计划偏差率降低了25%,切实实现了机械化施工的数字化赋能以及可持续优化。

### 5 结语

在当前全面推进机械化施工的时代大背景之下,输电线路设计工作已不再仅仅局限于以往传统的图纸编制以及结构校核方面,而是渐渐演变成了一项以装备能力、工艺参数以及数据协同作为核心内容的系统工程。从某500kV输电线路工程项目中的实践可看出,设计理念正从原来的静态合规朝着动态适配发生转变,设计流程也由之前的单向输出演变为双向反馈。机械化施工对于设计环节提出了更高的精准化以及可执行性方面的要求,而模块化建模、虚拟样机仿真、算法辅助优化以及全过程数据链的引入,使得设计成果从原本的纸面方案转变成了可计算、可验证、可追溯的“数字工艺书”,设计方面的创新提升了施工效率以及安全性,还重塑了设计人员的工作方式以及协同逻辑。

#### 参考文献

- [1] 刘许凡,杜海强,樊云龙,等.架空输电线路机械化施工设计应用概述[J].电工技术,2024(5):105-109.
- [2] 颜燧.自动化工作面的电牵引采煤机系统设计[J].机械管理开发,2023,38(1):215-217.
- [3] 宋群,高义新,孙立浩,等.“人、机、费”三维一体的机械化施工全过程设计质量管理[C].中国电力企业管理创新实践(2023年).2025:419-421.