

BIM技术在装配式风电混塔 安装施工中的应用 前景

罗 飞, 毛莉丽, 张 迪, 黄 浩

大唐云南发电有限公司滇中新能源事业部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年8月4日

摘 要

随着风电行业向高塔化、规模化发展, 装配式风电混凝土-钢混合塔筒因兼顾刚度与安装便捷性得到广泛推广, 但其安装施工具有高精度、高协同、高风险特征, 传统管理模式存在诸多不足。BIM技术以三维参数化模型为载体, 可实现项目全生命周期信息共享与跨专业协同, 为解决上述问题提供了有效路径。本文在梳理国内外相关研究成果的基础上, 结合工程实践, 系统构建BIM技术在装配式风电混塔安装施工中的应用体系, 深入分析三维建模与碰撞检测、施工模拟与进度管理、构件信息追踪、可视化交底与协同管理等关键技术的实施路径与应用效果, 探讨当前应用存在的问题及改进方向, 并展望其未来发展趋势。研究表明, BIM技术可显著提升装配式风电混塔安装的质量、效率与安全性, 降低施工成本, 是推动其数字化、工业化、智能化建造的关键支撑, 可为行业高质量发展提供理论支撑与实践参考。

关键词

BIM技术, 装配式风电混塔, 安装施工, 协同管理, 数字化建造

Application Prospect of BIM Technology in Installation and Construction of Prefabricated Wind Power Hybrid Towers

Fei Luo, Lili Mao, Di Zhang, Hao Huang

Dianzhong New Energy Division, Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: July 1, 2026; accepted: July 22, 2026; published: August 4, 2026

文章引用: 罗飞, 毛莉丽, 张迪, 黄浩. BIM 技术在装配式风电混塔安装施工中的应用前景[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 16-22. DOI: 10.12677/hjce.2026.158196

Abstract

With the development of wind power industry toward high towers and large-scale deployment, prefabricated steel-concrete hybrid wind turbine towers have been widely promoted due to their balanced structural stiffness and convenient installation. Nevertheless, their installation and construction are characterized by high precision requirements, multi-disciplinary coordination and high construction risks, and the traditional management mode has obvious deficiencies. As a carrier of three-dimensional parametric models, BIM technology enables full-life-cycle information sharing and cross-disciplinary collaboration of projects, which provides an effective solution to the above problems. On the basis of sorting out domestic and international research achievements and combining practical engineering experience, this paper systematically constructs an application system of BIM technology for the installation and construction of prefabricated hybrid wind turbine towers. The implementation paths and application effects of core technologies including 3D modeling, clash detection, construction simulation, schedule management, component information tracing, visual technical disclosure and collaborative management are analyzed in depth. Existing application bottlenecks and corresponding improvement strategies are discussed, and the future development trends are prospected. The research results show that BIM technology can significantly improve the construction quality, efficiency and safety of prefabricated hybrid wind turbine towers while cutting construction costs. It acts as a core support for the digital, industrial and intelligent construction of wind power facilities, and can offer theoretical support and practical references for the high-quality development of the wind power industry.

Keywords

BIM Technology, Prefabricated Hybrid Wind Turbine Tower, Installation and Construction, Collaborative Management, Digital Construction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源结构调整持续深化,风电作为清洁能源的主力形式,进入规模化、高效化与高塔化发展阶段。塔筒作为风电机组的核心承载结构,其高度不断提升,以便在更高空区域获得更稳定的风能资源,从而提升机组发电量。传统全钢塔筒在高度提升后会受到运输限宽、造价上升、振动控制难度加大等条件制约,而现浇混凝土塔筒则存在现场湿作业多、工期长、环境影响大等短板。装配式风电混凝土-钢混合塔筒通过工厂预制混凝土节段或管片、现场机械化装配、上部与钢塔筒对接的方式,将混凝土结构与钢结构的优势相结合,既提升了下部结构刚度与稳定性,又保持了上部结构安装便捷的特点,因此在陆上风电项目中得到迅速推广。然而,此类塔架的安装施工具有高度系统化、高度集成化与高度风险性的特征,大型预制构件重量大、安装对位精度要求高,钢混连接节点、预应力系统、法兰锚固等构造复杂,施工流程涉及拼装、吊装、张拉、灌浆、对接、校准等多道关键工序,且需要土木、钢结构、机电、吊装、预应力等多个专业高度协同。传统施工管理模式在空间关系表达、工序衔接预判、风险提前识别、多方信息同步等方面存在明显不足,易导致构件碰撞、返工返修、精度超标、进度延误与成本超支等问题,难以适应新型塔架工业化建造的要求。

BIM 技术的出现为解决上述问题提供了系统性解决方案。BIM 以三维参数化模型为载体,整合项目全生命周期内的几何、材料、工艺、进度、成本、质量等信息,支持跨阶段、跨专业的数据共享与业务协同,能够在施工前完成方案模拟、冲突检测与优化,在施工中实现动态管控、精度监测与协同决策,在施工后形成完整的数字化交付档案。近年来,国内外研究与工程实践已逐步证实 BIM 在装配式结构与风电工程中的应用价值,但针对装配式风电混塔安装施工全过程、全专业、全要素的系统化学术论述仍较为有限,尤其缺少将建模、模拟、协同、管控、追溯融为一体的整体性应用框架。基于此,本文在梳理国内外相关研究成果与规范标准的基础上,结合典型工程实施经验,构建 BIM 技术在装配式风电混塔安装施工中的完整应用体系,深入分析各项关键技术的实施路径、作用机制与应用效果,并对其未来发展前景与趋势进行展望,以期为行业高质量发展提供理论支撑与实践参考。

2. 国内外研究现状

在风电工程与装配式建造领域,国外对 BIM 技术的研究与应用起步较早,美国、德国、丹麦等风电强国依托完善标准体系,将 BIM 覆盖风电场规划、塔筒精细化建模、吊装仿真、进度管控、结构验算全链条,侧重 BIM 与有限元、物联网、数字孪生融合,实现设计至运维数据贯通,在混塔节点深化、预应力管控、安装精度优化方面形成成熟体系。

国内 BIM 技术在装配式建筑落地成熟,并逐步向风电工程延伸。祝磊等较早论证 BIM 在风电塔筒深化设计、施工协同领域的应用潜力;董龙锋等依托参数化建模、场地仿真、虚拟拼装提升预制混塔构件加工精度与生产效率[1];肖剑等结合实体风电混塔项目,验证 BIM 在碰撞检查、施工方案优化、减少现场返工的工程价值,打通设计与施工信息壁垒[2]。陈利搭建塔筒构件信息数据库,通过虚拟预拼装、吊装路径优化实现现场精准安装[3];张禹建立精细化 BIM 模型并耦合有限元软件,分析钢混连接段力学性能,为施工质量管控提供理论依据[4]。姚博强等借助 BIM 完成预埋件、灌浆套筒、连接节点深化,规避前期设计冲突[5]。田东、叶平从通用装配式混凝土结构视角,阐述 BIM 协同设计、构件生产、施工模拟的实施路径,为风电混塔数字化施工提供借鉴[6] [7]。覃学溥将 BIM 与数字孪生技术结合搭建装配式施工协同优化平台,其技术思路对风电混塔智能建造具备较强参考意义[8]。

总体来看,现有研究已由单一环节应用转向多维度集成,普遍验证 BIM 可提升施工精度与安全水平,但面向混塔现场安装全流程、多专业深度协同、全周期闭环管控的系统性研究仍存在短板:多数文献仅聚焦建模可视化或局部工序模拟,缺少覆盖施工筹备、现场装配、精度监测、多方协同、数字化交付的一体化框架,与智慧工地、人工智能、物联网的融合研究仍有较大拓展空间。因此,开展 BIM 在装配式风电混塔安装施工的成套应用研究具备重要理论价值与工程实践意义。

3. BIM 在装配式风电混塔安装中的关键应用

3.1. 三维建模与碰撞检测

三维精细化建模是 BIM 技术在装配式风电混塔安装施工中应用的基础,建模精度与信息完整性直接决定后续模拟、分析、管控与协同的可靠性。建模工作需严格遵循相关国家标准与行业规范,按照构件级、节点级、参数级的要求完成模型创建,确保模型能够真实反映构件尺寸、材料属性、预埋件位置、预应力孔道、法兰接口、连接钢筋、灌浆套筒、爬梯与操作平台等构造细节。模型通常采用 Revit 等软件进行参数化构建,针对混凝土节段、管片、钢塔筒、转接段、连接件等建立专用构件族,统一命名规则与信息录入标准,使模型不仅具备几何展示功能,更能够承载重量、吊装点位、公差要求、安装顺序、生产信息等关键数据。

在模型整合完成后,利用 Navisworks 等平台开展全专业、全维度碰撞检测,是消除施工隐患、减少

现场返工的核心步骤。碰撞检测主要包括实体硬碰撞、空间软碰撞与间隙碰撞三类，硬碰撞用于识别构件之间实体干涉问题，例如管片钢筋与预埋件冲突、预应力孔道错位、法兰接口不匹配等；软碰撞用于判断安装空间、操作空间与吊装空间是否充足，避免因空间不足导致无法施工；间隙碰撞则针对拼装缝、灌浆层、贴合面等进行检查，确保间隙满足设计与规范要求。通过施工前的系统化碰撞检测与优化整改，能够从源头上消除绝大多数设计与施工冲突，显著提升构件拼装成功率与安装精度。大量工程实践表明，经过 BIM 碰撞优化后的混合塔架安装，返工率可明显下降，安装一次合格率显著提升。

3.2. 施工模拟与进度管理

施工模拟是 BIM 在装配式风电混塔安装中最具实用价值的功能之一，通过将三维模型与施工工艺、时序逻辑相结合，实现对关键工序的虚拟预演与方案优化。施工模拟覆盖从场内拼装到高空对接的全流程，包括管片卸车、堆放、拼装平台定位、管片拼装、节段翻身、吊点选择、吊车站位、吊装路径规划、起吊、回转、对位、落钩、临时支撑、预应力张拉、灌浆封堵、钢塔对接等全部动作。通过虚拟模拟，可以直观判断吊车工作半径、起升高度、回转范围是否满足要求，识别大风影响、构件晃动、障碍物干涉等风险点，从而提前优化站位、调整顺序、完善吊具与措施，确保现场施工安全可靠。

在施工模拟基础上，将进度计划与 BIM 模型进行关联，形成 4D 施工管理平台，实现进度可视化与动态管控。4D 模型能够按照时间轴展示各工序计划状态与实际完成状态，自动比对偏差并对滞后工序进行预警，使管理人员实时掌握施工节奏。同时，进度模型可与人力、机械、材料等资源计划联动优化，避免资源闲置或供应不足，确保工序衔接顺畅、工期可控。通过施工模拟与 4D 进度管理的协同应用，项目工期可得到有效压缩，施工组织更加科学，整体效率显著提升。

3.3. 构件信息管理与追踪

装配式风电混塔构件数量多、类型多、精度要求高，若缺乏系统化信息管理，极易出现错装、漏装、使用不合格构件等问题。BIM 技术通过构建统一的构件信息库，将每个构件的编号、规格、尺寸、生产厂家、生产日期、强度报告、预埋件信息、吊装点位、安装位置、检验结果等数据集成为模型之中，实现构件全生命周期可追溯。在实际施工中，结合二维码或 RFID 技术，使 BIM 模型与现场实体构件建立一一对应的映射关系，构件进场时通过扫码快速核验信息，不合格构件直接退场；堆放时按照模型规划区域定位存放，避免混乱；安装时扫码确认位置与顺序，防止错装；完成后将安装精度、作业人员、时间节点等信息回写至模型，形成完整闭环记录。

这种基于 BIM 的构件追踪模式，从根本上改变了传统依靠台账与人工核对的管理方式，实现了信息流与实物流的同步，大幅提升构件管理效率与安装准确性。同时，完整的信息记录可为后续运维、检修与质量追责提供可靠依据，真正实现全过程可管、可控、可追溯。

3.4. 可视化交底与协同管理

传统技术交底以二维图纸与文字说明为主，复杂节点与工序难以准确传递，易造成理解偏差从而引发施工错误。BIM 技术通过三维模型与模拟动画开展可视化技术交底，将拼装步骤、吊装要点、精度要求、安全注意事项、节点构造等内容直观呈现，使作业人员快速理解设计意图与工艺要求，大幅降低沟通成本与错误率。尤其对于法兰对接、预应力张拉、灌浆工艺、垂直度控制等关键工序，可视化交底能够显著提升施工一致性与标准化水平。

在多方协同方面，基于 BIM 云平台构建参建各方协同工作体系，整合建设、设计、施工、监理、构件厂、吊装单位、检测机构等多方主体，实现模型、图纸、方案、变更、签证、验收资料等在线实时共

享。现场发现质量或安全问题后，可直接关联模型位置拍照上传，系统自动推送至责任单位并跟踪整改闭环，形成发现－派单－整改－复核－销项的完整流程。设计变更在模型中更新后立即同步至所有终端，避免因信息不同步导致错施工、漏施工。通过协同平台的高效运转，信息孤岛被彻底打破，沟通效率大幅提升，问题处理周期明显缩短，为高质量、快节奏施工提供有力保障。

4. BIM 技术应用前景分析

4.1. 应用效果与技术优势

综合国内外工程实践数据，BIM 技术在装配式风电混塔安装施工中的应用效果显著，在质量、效率、成本、安全四个维度均体现出明显优势。在质量控制方面，BIM 通过碰撞检测、虚拟预演与精度监测，使安装偏差大幅降低，构件拼装合格率明显提升，因接口不匹配、孔道不通、间隙超标等问题造成的返修显著减少。在施工效率方面，4D 进度管理与工序模拟使施工组织更加合理，工序衔接更加紧凑，无效等待时间缩短，整体工期得到有效压缩。在成本控制方面，返工损耗、材料浪费与措施投入明显下降，人工、机械效率提升，综合成本显著降低。在安全管控方面，吊装方案模拟与风险前置识别使高空作业、大型吊装等高风险工序更加可控，安全事故概率大幅降低。

从技术机理来看，BIM 的核心优势体现在可视化、前置化、协同化、数字化与可追溯五个方面。可视化解决了二维图纸表达不清、理解偏差的问题；前置化将问题消灭在施工之前，避免事后整改；协同化打通多方信息链条，实现高效联动；数字化实现全过程数据留痕与自动分析；可追溯则为质量、安全与运维提供完整依据。这些优势使 BIM 不再是简单的建模工具，而成为贯穿施工全过程的数字化管理平台，是装配式风电混塔实现工业化、标准化、智能化建造的关键支撑。

4.2. 现存问题与改进方向

尽管 BIM 技术应用价值显著，但在当前装配式风电混塔施工中仍存在一些制约推广的现实问题。部分项目建模精度不足，信息录入不完整，设计模型向施工模型传递时出现损耗；应用深度普遍停留在建模、可视化与简单模拟层面，与数字孪生、物联网、智能监测、AI 预警等深度融合不足；行业内缺少针对风电混塔的专用 BIM 标准，建模要求、信息交付、协同流程尚不统一；兼具 BIM 技术与风电施工经验的复合型人才相对短缺；部分通用软件在异形构件、专用节点、预应力系统等方面的适配性仍有待提升。

针对上述问题，未来可从五个方面持续改进。一是加快推进标准体系建设，制定适用于风电混塔的建模、交付、应用与验收标准，统一精度等级、信息结构与协同流程。二是提升应用深度，推动 BIM 从展示型、模拟型向管控型、智能型升级，加强与现场监测设备、数据平台、智慧工地系统的融合。三是打通全生命周期数据流，实现设计、生产、施工、运维模型统一传递与复用，避免重复建模与信息断层。四是加强人才培养，构建懂风电、懂施工、懂 BIM 的复合型团队，提升一线实操能力。五是推动软件适配优化，开发风电混塔专用构件库、节点库与插件，提升建模效率与计算准确性。

4.3. 应用前景与发展趋势

在“双碳”目标引领与风电行业规模化、高效化发展的大背景下，装配式风电混塔市场需求将持续扩大，对施工质量、工期、成本与安全的要求也将不断提升，BIM 技术作为智能建造核心工具，具备极为广阔的应用前景。从政策层面看，国家持续推动 BIM 技术在工程建设领域的普及应用，鼓励数字化、智能化建造，为 BIM 在风电工程中的推广提供了良好政策环境。从市场层面看，高塔筒、大容量机组成为主流，混塔安装对高精度、高协同、高可控施工的依赖度越来越高，BIM 已成为不可或缺的技术手段。从技术层面看，建模软件、协同平台、物联网监测、移动终端等软硬件日趋成熟，为 BIM 深度应用提供

了可靠支撑。从行业升级层面看,风电工程正从传统建造向工业化、数字化、智能化转型,BIM 将成为贯穿全产业链的基础性技术平台。

未来,BIM 在装配式风电混塔施工中将呈现五大发展趋势。一是向数字孪生一体化发展,基于 BIM 构建物理实体与数字模型实时映射的孪生体系,实现动态监测、智能分析与自主预警。二是向 5D 一体化管控发展,在三维模型与进度基础上进一步集成成本、质量、安全、资源,实现多目标一体化动态调控。三是与 AI 深度融合,利用人工智能进行吊装风险识别、精度偏差预测、工序优化推荐与安全隐患自动排查。四是实现工厂与现场数据深度协同,BIM 模型直接驱动构件生产、物流、装配全过程,形成设计-生产-施工闭环。五是向云端化、轻量化、移动化发展,支持网页端、手机端、平板端便捷访问与现场操作,使数字化管控真正落地一线。

4.4. BIM 落地应用的风险

BIM 技术在装配式风电混塔中应用价值较大,但当前风电混塔项目推广 BIM 过程中也存在现实约束、经济成本与协同风险,无法简单实现全覆盖普及。

第一,项目前期数字化投入成本偏高。风电混塔项目 BIM 落地需配套专业建模软件、云端协同平台、RFID/二维码构件识别设备、现场移动巡检终端等软硬件采购支出;同时高精度参数化建模、节点深化、全专业碰撞优化、4D 进度模拟等工作需配置专职 BIM 技术团队,人工成本、培训成本显著高于传统施工模式。对于中小型风电投资项目,有限的前期预算易造成 BIM 应用浅尝辄止,仅停留在简单三维可视化展示,难以实现全流程深度管控,投入产出效益难以充分释放。

第二,对各参建主体数字化能力门槛要求较高。BIM 一体化体系要求建设单位、设计院、预制构件厂、施工总包、吊装分包、监理、第三方检测机构均具备基础 BIM 操作与数据对接能力。现阶段大量风电一线施工班组、预制厂技术人员缺乏 BIM 建模、模型协同、扫码溯源等实操经验,部分设计人员仍习惯二维图纸输出,模型交付标准不统一,极易出现设计模型与施工模型信息断层、现场人员无法读懂数字化模型、变更信息流转滞后等问题,大幅抵消 BIM 协同优势。

第三,行业专用标准缺失引发跨主体协同障碍。目前国内暂无针对装配式风电钢混混合塔筒的 BIM 建模、信息交付、协同管理专项标准,通用建筑 BIM 规范无法适配预应力孔道、钢混转接法兰、大尺寸预制管片、风电专用吊装工艺等特殊构造与施工工序。不同单位采用不同建模软件、构件编码规则、信息录入格式,模型互操作性差,跨单位模型整合、数据互通难度大,易产生信息丢失、碰撞检测漏判、构件追踪失效等协同风险。

第四,技术融合落地存在实操风险。当前多数项目 BIM 仅独立应用,未能深度耦合物联网实时监测、AI 智能预警、数字孪生动态映射系统,现场吊装变形、塔筒垂直度、预应力张拉应力等实测数据无法自动回传 BIM 模型,仍依赖人工手动录入,存在数据滞后、人为录入误差风险;同时通用 BIM 软件对风电异形混凝土管片、复杂预应力节点适配性不足,自定义构件族开发工作量大,易出现模型精度不足、力学信息缺失等问题,影响施工管控可靠性。

5. 结论与讨论

本文通过文献梳理、规范分析与工程经验总结,系统研究了 BIM 技术在装配式风电混塔安装施工中的应用体系、关键技术、实施效果与发展前景。研究表明,装配式风电混塔安装施工具有高精度、高协同、高风险的典型特征,传统管理模式难以满足现代工程建设要求,而 BIM 技术凭借三维建模、碰撞检测、施工模拟、进度管控、信息追溯、可视化交底与多方协同等核心能力,能够从根本上提升施工质量、效率、安全性与经济性,是实现风电混塔数字化、工业化、智能化建造的关键技术支撑。工程实践证明,

BIM 技术的系统性应用可显著提升安装精度、缩短施工工期、降低返工率、节约综合成本、减少安全风险,具备大规模推广的条件与价值。当前应用仍存在精度不足、深度不够、标准不统一、人才短缺等问题,需要通过标准建设、技术融合、人才培养与平台优化持续完善。未来,随着数字孪生、5D 管控、AI 智能、云端协同等技术的不断成熟,BIM 将在风电混塔全生命周期中发挥更加核心的作用,推动行业高质量发展,为我国能源转型与“双碳”目标实现提供坚实技术保障。

参考文献

- [1] 董龙锋,孙岩波,阎明伟,等. BIM 技术在装配式风电混合塔筒构件生产中的应用[J]. 建筑技术, 2021, 52(6): 714-717.
- [2] 肖剑,胥勇,丛欧,等. BIM 技术在装配式风电混合塔架项目中的应用[J]. 混凝土世界, 2017(7): 66-69.
- [3] 陈利. 基于 BIM 的装配式混凝土风电塔筒安装与控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [4] 张禹. 基于 BIM 的预制装配式风电塔架可靠性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [5] 姚博强,李贝,吕雪源,等. 基于 BIM 技术的装配式混凝土风电塔架深化设计[J]. 施工技术, 2019, 48(10): 5-7.
- [6] 田东,李新伟,马涛. 基于 BIM 的装配式混凝土建筑构件系统设计分析与研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(17): 58-62.
- [7] 叶平. BIM 技术在装配式混凝土结构工程中的应用研究[J]. 工程机械与维修, 2025(11): 66-68.
- [8] 覃学溥. BIM 技术协同优化在装配式建筑施工中的应用[J]. 新城建科技, 2026, 35(3): 7-8.