

# Research and Application of Virtual Prefabrication Technology for Steel Structures

Yi Li<sup>1</sup> Aizhu Zhu<sup>2</sup> Donghua Yu<sup>3</sup> Dabin Yang<sup>4</sup>

1. Hubei Gongjian Hongtu Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China
3. Hubei Industrial Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430076, China
4. Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, 250101, China

## Abstract

With the continuous development of digital technologies, virtual pre-assembly techniques centered on 3D laser scanning, Building Information Modeling (BIM), and digital twins have emerged. Steel-structure virtual pre-assembly refers to the use of digital methods to simulate the on-site assembly process of structures, thereby enabling “data to substitute for physical objects” in pre-inspection and analysis. This approach has gradually become an inevitable trend in the development of the civil engineering industry. This paper systematically reviews the historical evolution of virtual pre-assembly technologies, analyzes the current status and challenges of virtual pre-assembly systems, standards and specifications, as well as engineering applications in steel structure projects, and further outlines the future prospects for the development of this technology.

## Keywords

virtual pre-assembly; steel structures; 3D laser scanning; digital construction

# 钢结构虚拟预拼装技术的研究与应用

李毅<sup>1</sup> 朱爱珠<sup>2</sup> 俞栋华<sup>3</sup> 杨大彬<sup>4</sup>

1. 湖北工建洪图建设有限公司, 中国·湖北 武汉 430000
2. 华中科技大学, 中国·湖北 武汉 430074
3. 湖北省工业建筑集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430076
4. 山东建筑大学, 中国·山东 济南 250101

## 摘要

随着数字技术的不断发展, 以三维激光扫描、建筑信息模型 (BIM) 和数字孪生为核心的虚拟预拼装技术应运而生。钢结构虚拟预拼装技术就是通过数字化手段模拟结构现场拼装过程, 实现“数据代替实物”的预检验与分析, 已逐步成为土木工程行业发展的必然趋势。本文系统回顾了虚拟预拼装技术的发展历史, 分析了其当前钢结构工程虚拟预拼装技术体系、标准规范、工程应用等方面现状与挑战, 并展望了该技术的发展前景。

## 关键词

虚拟预拼装; 钢结构; 三维激光扫描; 数字化施工

## 1 引言

钢结构以其强度高、自重轻、施工快、造型美观等众多优点, 广泛应用于各类大跨度空间结构、超高层建筑、复杂桥梁等工程中。传统的实体预拼装通过在专用场地将构件临时组拼, 检验加工精度、发现误差并及时修正, 最终保障现场安装顺利进行。随着大型复杂钢结构工程的日益增多, 传统的实体预拼装技术因其成本高、周期长、受场地环境制约等多方面缺点, 越来越难以适应现代工程建设的需求。

随着数字技术的不断发展, 以三维激光扫描、建筑信息模型 (BIM) 和数字孪生为核心的虚拟预拼装技术应运而生, 其总体技术框架如图 1 所示, 该技术通常以工厂/现场扫描数据为输入, 经过点云预处理与模型配准对齐, 实现关键部位的偏差计算与可视化, 并输出检测报告与处置建议; 最终将结果反馈至加工修正、复检或安装方案优化, 形成闭环质量控制流程。该技术通过现代测量与信息技术, 在数字空间内高精度复现结构及其构件, 模拟结构实际拼装过程以实现对构件加工质量的高效、全面检测, 提高工程结构建造质量和建造效率, 并显著降低工程建造成本。

【作者简介】李毅 (1986-), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 中级规划师, 从事城市规划与设计研究。

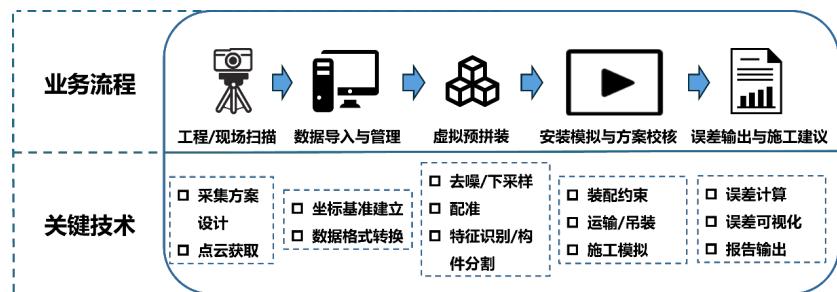


图 1 虚拟预拼装总体技术框架



图 2 虚拟预拼装发展历程

## 2 虚拟预拼装技术的发展历程

虚拟预拼装技术的发展与测量技术和计算机技术的进步息息相关,大致可分为如图 2 所示的三个阶段:

第一阶段—萌芽与探索阶段:该阶段以“数字化放样”和“三维模型对比分析”为主要特征。从 20 世纪 90 年代开始到 21 世纪初期,全站仪和早期三维 CAD 软件逐渐诞生并快速普及,工程师们开始尝试将设计模型与构件关键点的实测坐标进行对比分析,检测构件加工精度。但受限于测量点数量少、处理和分析效率低、模型相对粗糙,仅能用于结构或构件局部或关键连接位置的校验,尚不能真正实现结构的虚拟拼装。

第二阶段—技术逐渐形成与应用初期阶段:三维激光扫描技术的成熟与 BIM 理念的引入是此阶段的主要条件。到 2010 年前后,高精度、高密度的点云数据能够完整捕捉构件实物的三维几何形态,通过将点云模型与基于设计图纸建立的 BIM 模型进行精准匹配与偏差分析,评估结构构件整体加工和建造质量。至今,该技术在国家体育场、上海中心大厦、大兴机场等重大工程中进行了成功尝试<sup>[1]</sup>,证明了该技术在解决超大型复杂构件预拼装难题上有巨大潜力,可创造巨大的工程应用价值,这正标志着该技术体系的初步形成。

第三阶段—成熟推广与标准化逐渐形成阶段:这一阶段主要从 2020 年前后到未来数年间,钢结构虚拟预拼装技术将从“可用”向“好用、通用”变化。硬件方面,扫描仪速度、精度和便携性大幅提升;软件方面,出现了大量的专业化、自动化的虚拟预拼装分析平台和开源程序库 (PCL 库等),算法更加快捷智能,检测精度高,且拼装过程和结果显示可视化效果好。更重要的是,相关技术标准陆续出台,如中国的《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205-2020)<sup>[2]</sup>中明确了虚拟预拼装可作为预拼装验收的一种方法。因此,在此阶段虚拟预拼装技术不断迈向成熟和标准化,逐

渐推广应用到各类建筑、桥梁等钢结构的建设工作中。

## 3 钢结构虚拟预拼装技术的发展现状与挑战

当前,钢结构虚拟预拼装技术已形成集“数据采集-模型处理-分析决策”于一体的完整技术链条:首先,以地面三维激光扫描为主流,摄影测量、激光跟踪仪等作为补充,实现毫米级精度的构件数字化;然后,通过坐标系统一定位、点云去噪与简化、智能配准等算法运算,将点云模型与 BIM 模型进行精准对齐与分析;最后,软件自动计算构件关键尺寸、孔位、接口尺寸等的加工偏差,生成彩色云图与量化分析报告,为项目决策者提供重要依据<sup>[3]</sup>。

钢结构虚拟预拼装技术主要的应用模式包括构件出厂前质量控制、虚拟替代实体拼装、安装模拟与碰撞检查和竣工数字化存档等,如图 3 所示。其中,出厂前质量控制是在制造厂内扫描单体构件,确保其符合设计要求,从源头控制工程建造质量<sup>[4]</sup>。虚拟替代实体拼装是对多个关联构件分别扫描后,在软件中模拟拼装,检测接口匹配误差,完全替代或大幅减少实体拼装<sup>[5]</sup>。安装模拟与碰撞检查是结合施工方案,在虚拟环境中模拟吊装顺序和路径,提前发现潜在的碰撞冲突<sup>[6]</sup>。竣工数字化存档则主要是形成记录构件实际形态的“数字资产”,为结构物后期运营、维护和改造提供精准可靠的数据基础。

然而,钢结构特别是大型复杂钢结构虚拟预拼装技术的研究和应用仍然面临许多挑战:首先,技术门槛高、预拼装成本相对较高。主要表现为对人员的技术复合能力要求高,初期软硬件投入多。其次,标准细则待完善的空间大。主要表现为现有标准对可接受偏差阈值、不同结构类型的适用方法等细节规定尚较欠缺。第三,数据流贯通不畅。在钢结构设计、工厂制造、场地扫描、点云处理和分析等各环节的数据格式与平台不统一,存在严重的“信息孤岛”现象,影响预拼装全过程效率。最后,环境条件影响复杂。钢构件或结构

扫描时环境温度产生的变形对扫描精度的影响机制、运输和吊装过程对结构构件变形的影响等无法准确获取,这些会直接影响预拼装技术预测的精度<sup>[7]</sup>。

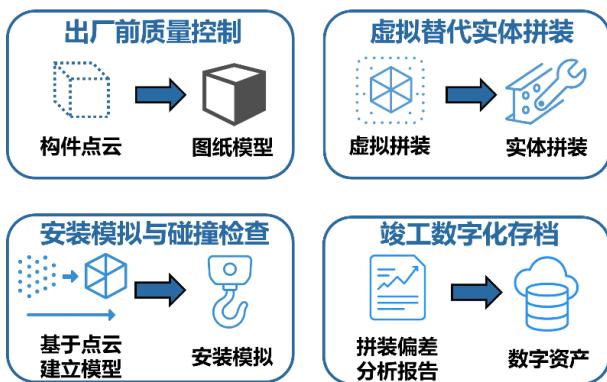


图 3 虚拟预拼装典型应用模式

#### 4 钢结构虚拟预拼装技术发展趋势与应用前景

随着数字化技术的快速发展和相关软硬件系统的不断发展,钢结构虚拟预拼装技术将成为现代钢结构工程质量控制的“标配”,其未来发展将不再局限于技术本身精度的提升,而是深度融入到钢结构工程全生命周期,并与新一代信息技术发生“化学反应”,催生出全新的工作范式,创造出更多新价值。该技术近期的发展将可能呈现如图 4 所示的三种趋势。趋势一:全流程智能化。人工智能特别是深度学习将彻底改变点云数据处理模式。算法能够自动识别构件类型、特征线、焊缝、螺栓孔群,实现全自动、高精度的点云模型与 BIM 模型配准,并将处理时间从数小时缩短至数分钟,甚至更短;同时自动诊断偏差根源如切割或焊接变形等<sup>[8]</sup>。通过在工厂制造的关键构件上预埋低功耗传感器,在运输、现场堆存及安装过程中,实时采集变形、应力、温度和湿度数据信息,同步更新结构及构件的数字模型,形成动态的施工过程检测分析。趋势二,平台化。基于云计算和 5G 网络,构建统一的工程项目数字孪生协同平台。钢结构工程设计、制造、安装、监理、总包等各方可基于同一权威数据源,进行远程的、并行的虚拟预拼装审核与决策。极大提升跨地域、多标段大型项目在建设各环节的协同效率,还能确保数据链条的完整性与可溯性。趋势三,标准体系化。随着虚拟预拼装技术的完善与普及,行业将推动形成更细致的、更全面的标准和规范体系,将针对不同结构类型(如大跨度桁架、高层框架、复杂节点)和应用场景(完全替代实体、部分替代、辅助实体),制定明确的精度等级、测量方案、验收标准和决策方案等。

结构虚拟预拼装形成的误差分析结果可直接反馈给自动化生产线如切割及焊接机器人,用于校准和工艺优化,实现精确建造,推动面向制造和安装的数字化设计,提升整个产业链的工业化和自动化水平。随着该技术标准化体系的建

立与完善,虚拟预拼装技术将从“有益补充”变为“不可或缺”,成为有效保障各类规模大、构造复杂且拼接精度要求极高的钢结构工程的高品质建设的必要手段。因此,钢结构虚拟预拼装技术在大跨度、大空间、造型复杂的各类建筑与桥梁结构建造工程中具有非常广泛的应用前景。

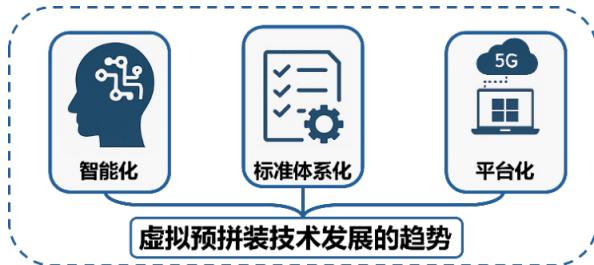


图 4 虚拟预拼装技术可能的发展趋势

#### 5 结语

本文回顾了虚拟预拼装技术的主要发展历程,分析了该技术的发展现状和存在的现实挑战。虚拟预拼装技术从辅助性测量工具,已发展成为驱动钢结构工程产业变革的核心数字化技术,正沿着全流程智能化、平台化、标准体系化趋势发,未来将成为构建土木工程智能建造体系的关键基石。对于土木工程行业而言,持续推动该技术的标准化、培养复合型人才、构建开放协同的数字化生态,是充分发挥虚拟预拼装技术潜力、引领钢结构工程迈向更高品质与效率的必然路径。

#### 参考文献

- [1] 余永明.北京大兴国际机场航站楼测量关键技术[J].北京测绘,2019,33(12):1425-1431.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205-2020[S].中国计划出版社,2020.
- [3] Liu J, Cui N, Cheng G, et al. Towards the automated virtual trial assembly of large and complex steel members using terrestrial laser scanning and BIM[J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116448.
- [4] 郭祺,杨振龙,冀小伟. 重型钢构件虚拟预拼装技术研究[J].建筑施工,2021,43(09):1786-1788.
- [5] Cheng G, Liu J, Cui N, et al. Virtual trial assembly of large steel members with bolted connections based on point cloud data[J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104866.
- [6] Wang Y G, He X J, He J, et al. Virtual trial assembly of steel structure based on BIM platform[J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104395.
- [7] 朱爱珠,王佳盟,潘文铭,等. 基于PCL的钢箱节段虚拟预拼装技术[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(01):10-17.
- [8] Kim B, Jo I, Ham N, et al. Simplified Scan-vs-BIM Frameworks for Automated Structural Inspection of Steel Structures[J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 11383.