

Research on Key Technologies for Fine Construction of Ultra Large Span Welded Spherical Grid Roofs Based on BIM Technology

Huang Hongyu

China Communications Fourth Navigation Bureau Jiangmen Hangtong Shipping Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong, 529145, China

Abstract

In modern construction engineering, large-span steel structure buildings have gradually become iconic achievements, and the welded ball grid roof with beautiful shape and perfect stress performance is a key technical difficulty that requires in-depth research in construction methods, measurement accuracy control, digital processing technology, and other aspects. This article is based on a specific engineering case, with BIM technology as the core, focusing on key technologies such as digital processing, complex process simulation analysis, multi block assembly and multi-level synchronous lifting, 3D scanning, and unmanned aerial vehicle surveying, aiming to provide reference technology innovation and guidance for the construction of large-span truss steel structures.

Keywords

large-span welded ball grid steel structure; BIM modeling; Digital processing; Construction precision control; Process simulation analysis; 3D scanning; Unmanned aerial vehicle surveying and mapping

基于 BIM 技术的超大跨度焊接球网架屋面精细化施工关键技术研究

黄红宇

中交四航局江门航通船业有限公司, 中国·广东 江门 529145

摘 要

在现代建筑工程中, 大跨度钢结构建筑逐渐成为标志性成果, 具有优美造型与完善受力性能的焊接球网架屋面作为重点技术难点, 需要在施工方法、测量精度控制、数字化加工技术等方面开展深入研究。本文基于某具体工程案例, 以 BIM 技术为核心, 围绕数字化加工、复杂工序仿真分析、多区块拼装多级同步提升、三维扫描及无人机测绘等关键技术进行探讨, 旨在为大跨度网架钢结构施工提供参考技术创新与指导。

关键词

大跨度焊接球网架钢结构; BIM 建模; 数字化加工; 施工精度控制; 工序仿真分析; 三维扫描; 无人机测绘

1 引言

大跨度钢结构广泛应用于客运枢纽、体育场馆、机场航站楼等建筑领域, 网架钢结构不仅造型复杂、跨度大且受力性能极佳, 逐渐成为全球建筑技术发展的重要标志。然而, 大量复杂工程对网架施工质量、安全有了更高需求, 迫切需要在精细化施工和创新技术上解决若干难题。BIM 技术为建筑全生命周期数字化建模和信息管理提供了高效工具, 通过将其与复杂工艺技术相结合, 可显著提升大跨度焊接球网架施工效率与精度。

2 研究现状

2.1 国外研究现状

国外在施工信息化领域较早开展了 BIM 应用, 美国通过 3D-4D-BIM 计划和 BIM 国家标准推动了实践深化, 日本、韩国也发布了 BIM 指引与指南, 将 BIM 技术应用覆盖建筑设计、预算、分析及施工管理等全生命周期。此外, 在整体提升技术方面, 国外工程采用了多项标志性实践, 包括新加坡樟宜机场、芬兰水塔等项目中的整体网架提升。

2.2 国内研究现状

随着中国建筑行业信息化和经济实力提升, BIM 技术在工程项目中的应用逐步普及, “十二五”规划提出 BIM 作为施工单位的核心技术之一。在精细化施工方面, 国内取得了多个标志性工程成果, 如国家体育场、首都机场维修机库等项目的整体提升技术, 但在施工仿真、测量精度控制、

【作者简介】黄红宇 (1979-), 男, 中国浙江金华人, 本科, 高级工程师, 从事房屋建筑工程结构研究。

三维扫描及无人机技术应用等方面积累仍不足,需要进一步研究。

3 案例研究:海口新海滚装码头客运综合枢纽工程

3.1 工程概况

海口新海滚装码头客运综合枢纽站工程位于海南省海口市秀英区,位于海口港新海港区汽车客货滚装码头的陆域,地理位置优越,邻近粤海铁路轮渡南港码头北防波堤北侧,且靠近重要的交通枢纽新海中路西侧。

该项目为客运综合枢纽工程的分项工程,主要施工内容包括集散区、南指廊、北指廊和中心区在内的屋盖网架钢结构以及主体结构的施工。屋盖网架钢结构采用正交斜放空间网格结构加桁架结构的形式;网架节点均采用焊接球节点,桁架结构分布于屋面边缘的悬挑及中心区域的天窗部分,附以系杆及平面支撑结构,节点类型为圆管相贯节点。此外,钢结构材质选用 Q355B,展现出极高的强度及抗疲劳性能。

项目根据建筑伸缩缝分为四个主要区域:集散区(A区)、南指廊(B区)、北指廊(C区)以及中心区(D区)。每个区域设计均充分考虑到施工需求,例如腹杆层预留了马道,以提升施工和后期维护的便利性。

3.2 区域参数分析

3.2.1 南北指廊

南北指廊的平面尺寸为 186 米 × 53 米,杆件规格从 $\varnothing 76 \times 5$ 至 $\varnothing 426 \times 25$ 不等,中心线最高标高达 26.9 米。这一区域采用网架与桁架结合的三维空间布置,确保结构的高度强度和空间利用率。

3.2.2 集散区

集散区的平面尺寸为 53 米 × 92 米,杆件规格为 $\varnothing 89 \times 5$ 至 $\varnothing 426 \times 25$,中心线的最高标高为 30.1 米。

3.2.3 中心区

中心区为本工程中最大的区域,其平面尺寸达 204 米 × 187 米,杆件规格覆盖 $\varnothing 76 \times 5$ 至 $\varnothing 457 \times 25$,而中心线最高标高则高达 42.7 米,展现出工程巨大的跨度和体系复杂性。

3.3 技术挑战及解决方案

结合工程条件和对技术的需求,项目在施工过程中面临多项挑战:结构复杂性、焊接精度、网架安装难度等问题。以下分析工程重难点及对应的解决措施。

3.3.1 复杂构件深化设计

焊接球节点较多,杆件尺寸不同且数量巨大,加之建筑设计与钢结构设计交叉协调工作量极大,为保证施工质量,项目通过 BIM 技术进行三维模拟,优化设计、减少施工现场开孔,并使用 Tekla 软件进行碰撞校核,全面提升深化设计精度。

3.3.2 构件制作与运输方案

本工程需焊接球数量巨大,高达 6000 个,制作涉及大面积预拼装以确保一次性吊装的成功率。项目加强了构件制作全过程的管理,并在施工现场设置材料中转场,确保及时供给,同时提前规划运输路径,降低风险。

3.3.3 焊接质量与控制

工程焊缝数量庞大,焊接作业不仅需考虑形式,还需有效控制焊接残余应力及可能的焊缝裂纹。使用合理的坡口设计、对称焊接,以及焊缝随机抽检机制,有效保障焊接质量。

3.3.4 大跨度网架施工技术及提升变形控制

大跨度网架安装采用“分区块扩散多级提升”法,通过区块组合拼装实现同步提升,避免传统满堂支撑法的材料浪费。同时,利用有限元分析技术模拟施工阶段的每一步应力与变形状况,并通过钢管支撑与顶升架法在提升至设计标高后进行精确调整,确保结构稳定性与精度。

3.3.5 测量精度控制

由于测量精度决定了网架的整体稳定性,项目采用全站仪结合 BIM 技术进行坐标测量,完成网架关键节点的三维定位;并通过三维激光扫描技术实时采集数据,分析安装偏差,从而调整施工方案。

3.4 关键技术应用

工程中广泛应用了 BIM 技术及其他先进技术,具体应用包括以下内容。

3.4.1 数字化加工技术

使用 Tekla 软件对空间网架进行三维建模,从节点逻辑碰撞检测到杆件相贯切割全流程均由 BIM 技术精确完成,形成高精度的加工与施工指导方案,减少人为误差。

3.4.2 复杂工序可视化模拟

通过 BIM 仿真动画对施工过程进行分区模拟,优化网架提升技术,明确施工步骤和细节,同时用于施工交底。施工过程中的关键操作均能通过模拟逐步调整并精确实施,大幅提升施工安全及效率。

3.4.3 坐标系统及精度控制

BIM 提供节点三维坐标数据,通过胎架测量控制系统以及三维激光扫描技术实现精确定位,施工过程中的测量偏差可以实时调整,保证了网架整体的高精度安装效果。

3.4.4 无人机测绘技术

无人机的航拍功能结合三维建模分析技术,为项目施工提供了全景视角,有助于全面展示施工效果,虽然对网架高精度测控应用效果有限,但为后续工程积累了宝贵经验。

3.5 案例启示

海口新海滚装码头客运综合枢纽站工程通过将 BIM 技术与传统施工技术相结合,成功克服了大跨度结构施工中的一系列技术难题。从施工深化设计到施工过程监控,BIM 技术贯穿全生命周期,使施工全过程透明化、数字化,更有效地保证了施工质量安全与经济性。该项目为大跨度建筑结构的建设提供了重要经验和参考范例,同时也显示出在此类复杂工程中信息化技术成果的显著优势。

4 核心技术创新

4.1 基于 BIM 的超大跨度焊接球网架屋面结构数字化加工技术

通过结合 Midas 和 Tekla Structures 软件,研究团队以 BIM 为核心,深化建模与数据集成,优化了数字化加工技术。具体包括切割和焊接预留技术,精准测算构件下料尺寸,从

而提高了加工效率与整体精度。同时,通过将 BIM 模型数据无缝传输至相贯线切割设备,实现了高效的杆件加工,形成了一套可指导数字化精细加工的精准控制方法。这一技术有效解决了大规模杆件加工过程中的精度偏差难题,为大跨度网架结构施工奠定了基础。

4.2 基于 BIM 的复杂工序模拟优化与仿真分析技术

大跨度网架施工工艺复杂,研究团队使用有限元分析 (FEA) 及 BIM 动画模拟技术对多区块扩散拼装和多级同步提升技术进行研究。在施工前,使用 BIM 技术对网架拼装与提升过程进行三维工序动画模拟,优化施工步骤与节点设计。基于仿真分析的计算结果,研究人员针对杆件受力、位移变形和结构稳定性做出了调整。例如,通过对提升点的受力分布进行分析,团队建立了有效的应力监控预警机制,大幅度降低了施工中结构失稳的风险。这一过程中,构件的施工步骤、变形及安全压力值等均实现了全程动态调整,提升了施工安全性和精细化水平。

4.3 基于 BIM 坐标系统的测量控制技术

开展基于 BIM 坐标网络的测量系统研究,为项目胎架平台和现场施工建立了统一的三维坐标参照系。研究团队通过胎架控制点位布设及 BIM 坐标的转换技术,成功实现了胎架节点与球节点之间的精准匹配。借助该测量控制网络,每一个节点和构件的安装偏差都能做到实时分析和调整,从而确保了网架精度的全局控制。这一技术尤其在项目后期施工中,通过高效的三维坐标交互校核方案,减少了项目的精度误差和重装率。

4.4 基于 BIM 的空间网架精度控制技术

网架安装过程中,研究团队引入三维激光扫描仪及全站仪,并结合 BIM 的拼装拟合功能对空间精度进行实时控制。具体而言,施工中生成的点云模型与 BIM 理论模型进行叠加对比,直观地反映节点和部件的实际偏差情况。研究成果还表明,采用虚拟拟合技术能够显著提高网架各球节点连接的准确性,大大优化了传统高空拼装中精度难以保证的问题。这种方法为复杂的空间网架安装提供了一套系统的精度控制解决方案,显著增强了项目施工精度和质量。

5 BIM 技术应用的整体效益

BIM 技术在超大跨度焊接球网架屋面施工中的应用实现了从设计到施工全过程的精细化管理和优化,大幅提升了项目的整体效益。以下是 BIM 技术应用的整体收益分析。

5.1 提高设计精度与模型可视化效果

BIM 技术通过三维建模的方式,将复杂的网架结构可视化,显著提升了设计阶段的精度和协调性。基于 BIM 模型的数据,可以精确记录节点与杆件的空间分布,为杆件切割与拼装提供可靠依据,有效规避施工中的设计偏差问题,提升了整体设计的可控性和可视化水平。

5.2 加强施工过程的精细化管理与仿真分析

BIM 技术结合复杂工序的模拟功能,能够直观展现施工过程的每一步骤。例如,通过三维动画对网架结构的拼装与提升过程进行全方位展现,有助于现场施工方案的可行性验证和安全性评估。同时,借助 BIM 模型进行施工仿真分析,

能够细致检测不同施工阶段的应力分布及变形量,提前发现并解决问题,降低施工中结构失稳或变形过大的风险。

5.3 提升加工和施工精度

基于 BIM 数据驱动的数字化加工技术,实现了杆件相贯线切割和焊接工作的自动化,并通过实时采集加工数据优化工艺参数,大幅提升了高精度加工的效率与质量。此外,在施工阶段,通过全站仪结合 BIM 坐标系统对关键节点位置进行测量和比对,实现了施工精度的有效控制。

6 结论与展望

在大跨度网架钢结构施工中,本研究基于 BIM 技术开展了精细化施工的关键技术探索,取得了显著成果,为钢结构工程的高质量实施及全流程安全提供了技术支撑。

6.1 数字化加工与精度控制

通过 BIM 模型深化及数字化加工技术的研究,实现了复杂大跨度网架的精准数控加工。结合切割与焊接余量预留技术,提升了网架结构加工效率与整体精度,构建了可推广的数字化加工工艺体系。

6.2 复杂工序模拟与仿真分析

采用 BIM 三维建模与有限元仿真分析技术,对施工全过程应力和变形进行动态监控,优化了多区块拼装和多级同步提升工艺流程,保障施工过程的安全性与高效性。

6.3 测量与安装精度控制

建立 BIM 坐标系统与胎架测量控制网相结合的测量体系,辅以全站仪测量与虚拟拼装技术,实现了网架施工的高精度测量与安装控制。同时,三维激光扫描技术的应用进一步提高了空间复杂结构的精度控制水平。

6.4 无人机测绘技术应用

首次在大跨度网架施工中引入无人机测绘,生成空间结构的三维模型,为结构线形偏差分析及后续施工提供了可靠的数据支持,并完善了无人机在钢结构施工中的操作规范。

展望未来,基于本研究的成果,大跨度网架钢结构施工领域可以进一步探索以下方向:①深化 BIM 技术与人工智能、物联网的结合,构建更加智能化的施工监控及管理体系,实现施工全生命周期的数字化与智能化。②推动无人机与激光扫描技术的多场景应用,促进测控数据采集和处理的自动化与精准化。③开发更完善的仿真分析软件与平台,进一步优化复杂工序模拟与动态应力监控技术,为工程施工提供更科学的决策支持。

参考文献

- [1] 斜放角锥焊接球钢网架的制作安装. 孙立福. 铁道标准设计,2003(01).
- [2] 大跨度错层多曲面焊接球钢网架施工技术. 仲鑫,张皓,杜鑫,等. 建筑技术开发,2024(02).
- [3] 大跨度多层焊接球弧形钢网架整体提升技术研究. 陆飞. 广东土木与建筑,2024(04).
- [4] 全民健身中心屋面焊接球钢网架安装技术研究. 覃滨. 中国金属结构,2023(11).
- [5] 焊接球钢网架施工技术. 金鸿祥. 建筑施工,2010(07).