

复杂空间网格支撑筒钢结构施工工艺研究

黄晓波

新疆三联工程建设有限责任公司 新疆 克拉玛依 834000

【摘要】：网格支撑筒钢结构是一种由密集网格状钢构件组成的筒状受力体系，广泛应用于超高层建筑及大跨度空间结构，但其施工工艺面临诸多挑战。本论文通过研究该结构的施工特点，分析了传统施工方法在实际应用中的不足，特别是在加工下料和施工安装环节中的问题。针对这些问题，提出了基于 BIM 技术、计算机数控 CNC 加工的现代化技术应用，以及滑移胎架与智能纠偏等智能化方案。通过实际工程案例验证，所提出的优化措施显著提高了施工精度、效率和安全性，同时缩短了工期，降低了施工成本。研究结果为类似结构的施工提供了有效的技术支持，并推动了建筑施工技术的进步。

【关键词】：复杂空间；网格支撑筒钢结构；三维建模；滑移胎架；智能纠偏；优化方案

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.006

引言

复杂空间网格支撑筒钢结构因其独特的几何形状和高度的结构要求，成为超高层建筑和大跨度空间建筑所广泛应用的一种结构体系。施工过程中，涉及大量精密的设计与高空拼装，其施工难度和风险相对较高。如何在保证结构稳定性和安全性的前提下，提升施工效率，成为这一领域亟待解决的重要问题。该论文以复杂空间钢结构网格支撑筒为研究对象，聚焦于施工工艺的创新与优化，旨在通过结合现代化的技术对具体的工程实例进行分析，探索最适合的施工技术路径，提供切实可行的技术解决方案。

1 复杂空间网格支撑筒钢结构的特点与施工挑战

复杂空间网格支撑筒钢结构具有独特的空间几何形状，结构形式复杂，通常由多个交织的钢构件和支撑体系组成。这种结构类型通常用于大型建筑项目，如体育场馆、展览馆以及一些特殊功能的超高层建筑中，因其具备良好的稳定性和抗震性，能够提供更大的空间跨度和层高，是地标性建筑青睐的一种结构体系。但其复杂性也给施工过程带来了显著的挑战，双曲面的几何形状使得构件的加工和施工拼接过程难度加大。钢结构的各个部件在生产和运输过程中需要精确匹配，以确保最终拼装时能够精准对接，这对于施工的精度和工期提出了极高要求。空间网格支撑筒钢结构的施工过程中，需要对大量的钢材连接节点进行精准计算和处理，这些连接节点通常应力较为复杂，且需要高空拼装连接来保证结构的整体稳定性。传统的施工方法往往依赖于工程师的经验和简化的计算模型，无法精确模拟复杂节点的受力和技术要求。

施工过程中还面临其他诸如吊装作业的安全性、施工设备的合理配置以及施工顺序的优化等问题^[1]。吊装作业中的钢材单元往往依赖高空散装或分块安装，需大量临时支撑（如脚手架），工期长且安全风险高，避免因误操作而导致结构损伤或安全事故，成为施工管理中的一大难题。由于复杂空间网格支撑筒钢结构的构造涉及多个环节的协调与配合，施工周期长，

纠错成本高，任何环节的拖延或错误都会影响整体工期和质量。这些问题使得该类结构的施工面临更高的技术要求与管理难度，需要施工单位在前期进行细致的材料优化与受力分析，施工过程中采用先进的施工技术，运用现代化的信息模型技术，提升施工质量和效率。

2 现有施工工艺的不足与问题分析

现有施工工艺在复杂空间网格支撑筒钢结构的施工过程中存在诸多不足，影响了施工效率与工程质量。传统施工方法往往依赖于手工操作和经验积累，尽管这种方式在某些简单结构中可行，但对于复杂的网格支撑筒钢结构而言，难以满足其精度要求和施工速度。许多施工单位在面对这些复杂的结构形式时，无法有效实施精细化的工艺流程，导致了构件连接的误差和结构的不稳定。在施工过程中，钢材的切割、焊接、拼装等环节往往没有充分的数字化控制和精准的工艺监控，导致了接头位置不准确、误差积累等问题。传统的施工工艺通常依赖于现场的人工操作和经验判断，这种方式材料浪费率约 15%~20%，返工率约 10%，不仅对工人的技能要求较高，而且由于人为因素的干扰，构件预制误差 $\pm 5\text{mm}$ ，累计偏差需现场调整，造成了结构连接不精确，甚至可能影响到整体结构的稳定性。

现有施工方法在吊装作业中的不足，主要表现为设备选择不合理和吊装路径规划不精准。由于空间网格支撑筒钢结构的构件体积大、重量不一且形状复杂，传统吊装设备的选择往往不能满足要求，导致吊装过程中的不匹配。吊装路径设计不科学，可能出现吊装过程中发生碰撞、路线不畅通等问题，这不仅增加了施工难度，也延误了工期。传统的吊装工艺需要长时间高空散装或分块安装，缺乏针对复杂环境下的安全预防措施，吊装过程中可能面临不稳定的天气、突发的环境变化等因素，增加了施工风险。在这种情况下，若不对吊装作业进行有效优化，极易引发安全事故，给施工人员和整个工程带来不可预见的损失。吊装作业的优化显得尤为重要。

施工进度控制也存在不足。在现有工艺中，施工步骤往往较为单一，缺乏有效的工序优化与管理，导致在施工过程中出现频繁的停滞和延误。这种工期的延误会对整体项目的时间安排产生连锁反应，进而增加项目成本^[2]，人工费用占直接费40%以上（如焊接、校正），工序的无序和资源配置的不足，往往使得多个施工环节无法同步进行，从而造成施工效率的下降。这些问题的根本原因在于现有施工工艺未能适应复杂空间网格支撑筒钢结构的特殊需求。施工中的高精度要求和多工序协调问题，使得传统工艺无法满足现代建筑工程中对高效、精准施工的要求。

3 施工工艺创新与优化方案的提出

在面对复杂空间网格支撑筒钢结构的施工挑战时，创新与优化施工工艺显得尤为重要。为提升施工效率并解决现有施工工艺中的问题，必须采用先进的技术手段与系统化的工艺流程。数字化技术的引入，特别是建筑信息模型（BIM）在设计 and 施工阶段的应用，为施工工艺的创新提供了有力支持。通过 Tekla Structures (Xsteel) 软件三维建模，可生成相贯线切割数据，利用 FastCAM 套料软件，支持管材相贯线展开，可以精确计算各构件的尺寸与位置，进而为过程中的钢材加工、节点连接及吊装作业提供详细的施工图和数据支持。钢结构下料前通过 PKPM 软件进行应力分析，直观了解各复杂受力节点的应变情况，及时进行下料优化，这种技术不仅提高了施工精度，还能有效减少现场的施工误差，避免传统工艺中由于手工操作带来的不必要问题。在钢材加工环节，采用 CAM 软件完成复杂的三维坡口建模与编程，后置处理生成代码后，利用西门子 SINUMERIK 机床机器人、凯斯锐大管径相贯线切割机国际先进加工设备进行钢结构加工，对比传统工艺构件外形尺寸及孔群定位误差由 $\pm 3.0\text{mm}$ 降低至 $\pm 1.0\text{mm}$ ，路径精度提升 300%。通过计算机数控（CNC）切割与焊接技术，能够确保钢材的尺寸和焊接质量达到更高的标准。这种自动化设备在钢材的切割和连接中表现出了极高的精度，避免了传统人工焊接和切割时可能出现的误差和不规范操作。加工过程中结合 BIM 与有限元分析，实现了结构-建筑一体化设计，对加工构件精度、质量要求提供了技术支持，减少了材料浪费及施工过程中钢材返工和修复的概率。

吊装作业方面，采用现代化的起重设备、滑动胎膜架和精密的吊装计划进行配合。通过吊装路径的预先计算与模拟，生成吊装模拟分析动画，可以在施工前预测和解决可能出现的冲突问题，确保各吊装单元的顺畅完成。针对复杂的交叉网格筒体钢结构吊装，吊装前预制环形滑动胎架，将结构预制模块进行集中加工后，在现场进行快速组装和就位，减少高空吊装次数。这种方式不仅提高了现场施工效率，还缩短了工期，减少了现场施工人员的工作强度，同时降低了交叉作业、疲劳作业等安全隐患^[3]。在施工顺序的安排上，通过引入三维扫描与 BIM

校核等智能化的施工管理系统，可以将现场拼装误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内，实时监控各个施工环节的进展并及时纠偏。根据施工现场的实际情况和资源的分布，合理调整各工序的顺序与工作量，从而实现资源的最优配置，减少工序间的等待与停滞，优化工期安排。对于施工中可能遇到的环境因素变化，智能管理系统还能灵活应对，及时调整施工计划，确保施工过程高效、有序。

结构节点的连接工艺也需要不断创新。网格筒体埋件、多节点交叉杆件等复杂节点，采用整体铸造几何形态（如树状交叉节点），承载效率较焊接节点可提高 30%，有效提高了节点连接的精度和稳定性，减少焊接对材料性能的影响。在重要的受力节点部位，优先采用复合连接体系，即焊接+螺栓混合节点技术，该技术的应用兼顾了刚度与施工便捷性，有效提升了钢结构的整体承载能力和抗震性能。这些创新与优化方案的实施，有助于提升复杂空间网格支撑筒钢结构的施工质量与效率，同时减少了安全风险，缩短了工期，降低了成本。通过综合应用现代化的技术手段，施工过程中的各项任务得到了合理规划与有效执行，最终确保了工程顺利完成。

4 实际工程案例分析与方案验证

在多个复杂空间网格支撑筒钢结构的实际工程项目中，所提出的施工工艺创新与优化方案得到了有效应用，取得了显著成果。以昆仑文化园（一期）项目施工为例，该项目中心树花型结构底部采用了交叉网格支撑筒体钢结构。该项目通过精准的数字化建模，设计阶段即对结构构件和节点进行详细规划，避免了施工过程中出现尺寸不符或连接不精确的情况。在钢材加工环节，结合 BIM 模型与 CNC 数控技术，所有钢构件的切割和焊接都按照精准的规格进行，保证了加工质量和后期拼装的精度。这一创新工艺的引入，大幅提高了施工效率，同时减少了材料浪费和返工次数。

吊装作业的改进也是该项目的一大亮点。通过现代化的起重设备、滑动胎膜架和精密的吊装计划，所有钢构件的吊装路径进行了事先模拟，确保了吊装作业的顺畅进行。在该项目的吊装过程中，智能化调度系统根据现场实际情况实时调整施工进度和吊装设备配置，有效避免了设备资源的浪费和施工环节的滞后^[4]。模块化施工技术的引入使得预制构件的加工与现场组装的时间得到大幅压缩，尤其是在较为复杂的节点连接和高空吊装作业中，提前进行模块化预制和环形滑动胎架的应用大大减少了现场的工作强度和施工风险。对于结构节点的优化处理，采用了焊接+螺栓混合节点技术和整体铸造几何形态技术，进一步提高了施工的精度和节点的稳定性。这一技术的应用显著提高了结构的整体性能，减少了焊接节点对钢材性能的影响，提升了施工过程中的安全性与稳定性。在钢结构连接环节，预埋件的精准设置和螺栓连接的标准化，不仅增强了结构的抗震能力，也使得施工时节点位置的调整更加灵活高效。

施工进度控制方面,智能化施工管理系统的使用有效解决了工序衔接和资源调度的问题。该系统通过实时监控施工进度,自动调整施工计划,确保每一工序都能在规定时间内完成,避免了资源闲置和工序冲突。项目中的每一个环节都得到了有效监管,提升了施工整体协调性,确保了工期按时完成。通过对该项目的全过程跟踪和评估,可以看到所提出的施工工艺创新和优化方案在实际工程中的成功应用。这些技术改进不仅提升了施工质量,也降低了工程的安全隐患,减少了施工成本,并大大提高了工作效率,为今后的复杂空间网格支撑筒钢结构施工提供了宝贵经验和参考。

5 施工工艺优化的效果评估与总结

对施工工艺优化的效果评估表明,创新与优化措施在实际施工过程中产生了显著的成效。BIM技术的引入显著提高了设计和施工过程中的精确度。通过三维建模和施工模拟,设计人员能够在施工前准确预测并解决潜在的结构冲突,确保了每个构件的精准拼装。施工中,基于BIM数据的钢材加工与现场装配极大地减少了误差,提高了拼装的精度和施工效率。数据的精准传递和共享,确保了设计意图与施工执行的高度一致,减少了因信息传递不畅或理解偏差导致的错误。

钢材加工方面,CNC数控技术的应用显著提高了加工精度,减少了人工干预带来的误差。与传统手工切割和焊接方式相比,数控加工能够在更短时间内完成更高质量的构件生产,同时提升了钢材使用的效率,降低了浪费^[5]。在节点连接的处理上,焊接+螺栓混合节点技术和整体铸造几何形态技术的应用,有效地提高了连接的稳定性,确保了结构的抗震性和耐久性。优化后的连接方式不仅提高了施工的精度,也使得施工过程中节点调整更加灵活,减少了因节点不精确带来的质量问题。

参考文献:

- [1] 王云川.海洋平台分级顶升平移装备的研究[D].天津大学,2012.
- [2] 朱小永.优化低净空长大隧道刚性悬挂接触网施工工艺[J].运输经理世界,2023,(26):107-109.
- [3] 李晓波.电气化铁路改造中接触网施工工艺[J].智能城市,2021,7(20):132-133.
- [4] 张博统.浅析建筑工程中外墙外保温体系的施工工艺及质量控制[J].绿色环保建材,2017,(03):146.
- [5] 张一帆,金文纨,徐龔,等.技术复杂度视角下中国专利合作的空间特征[J/OL].地理科学,1-11[2025-11-28].

吊装作业的优化也大幅提升了施工安全性和效率。吊装设备与滑动胎架的精确规划,配合三维扫描与BIM校核等智能化的施工管理系统实时监控和调整,确保了吊装过程的流畅性与安全性。通过吊装路径模拟,减少了现场的冲突和吊装设备的闲置,极大提高了施工速度和工作效率。模块化施工技术使得大量构件可以在工厂内完成预制,再进行现场快速组装,这一方法显著缩短了工期并降低了现场施工的复杂性,减少了高空作业的安全隐患。

施工过程中采用的智能化施工管理系统,通过对各工序的实时监控和进度调整,提升了整体施工的协调性与效率。系统能够自动优化施工资源配置,避免了资源浪费和作业间的等待时间,确保了每个环节都能按时完成,从而保障了工期的严格控制。这一系统的实施,强化了施工管理的精准性和灵活性,提高了项目的整体施工效能。通过对施工工艺的创新和优化,不仅提高了钢结构施工的精度和效率,还有效控制了工程的成本和施工周期。技术手段的不断进步,使得复杂空间网格支撑筒钢结构的施工过程更加高效、安全和可控,带来了较传统工艺更加优越的施工效果。优化后的施工工艺也为未来类似项目提供了可借鉴的经验,推动了建筑行业技术的进步,尤其是在处理复杂结构施工中的应用。

6 结语

通过对复杂空间网格支撑筒钢结构施工工艺展开研究与优化,所提出的创新技术及优化方案已在实际工程项目中获得有效验证。运用建筑信息模型(BIM)技术、计算机数字控制(CNC)加工、滑动胎架技术、BIM校核等手段,不仅提升了施工精度与效率,还大幅降低了施工风险和成本。伴随技术的持续发展,施工工艺的创新将不断推动建筑行业朝着智能化、精确化方向迈进。这些研究成果为未来同类结构的施工提供了宝贵借鉴,具备重要的工程应用价值。