

大跨度空间网格结构施工精度控制与变形协同技术

傅艳芳

福建建筑工程有限公司 福建 南平 353000

【摘要】：凭借跨度优势与造型灵活性而在大型公共建筑领域得以广泛应用的大跨度空间网格结构，其施工过程因涉及多环节协同，故精度偏差累积与变形不协调问题会对工程质量与结构安全产生直接影响，且现有施工控制技术多将焦点置于单一环节误差修正，缺乏对精度与变形的协同调控，有鉴于此，本文对施工精度与变形的核心影响因素进行梳理，对变形协同调控机理展开探索，提出融合精度预判与自适应调整的协同技术路径，明确各施工环节控制要点与协同策略，以为提升工程施工质量、降低安全隐患提供理论与技术支撑。

【关键词】：大跨度空间网格结构；施工精度控制；变形协同；自适应调整

DOI:10.12417/2811-0528.26.04.056

在建筑行业朝着大跨度、复杂化方向不断发展的背景下，因受力合理、造型多样等特点而成为体育馆、会展中心等大型建筑优选结构形式的空间网格结构，面临着施工流程复杂所带来的挑战，构件预制、运输、吊装等环节的误差容易发生累积，同时临时荷载、环境变化等因素也易引发变形不协调问题，对结构安全构成威胁，并且当前施工精度控制技术存在协同性不足的缺陷，难以适应复杂工程需求，所以开展施工精度控制与变形协同技术研究，明确协同调控机制，构建全流程控制体系，对于推动空间结构施工技术创新、保障工程质量而言具有重要意义。

1 大跨度空间网格结构施工精度与变形的影响因素分析

1.1 构件自身特性影响

作为影响大跨度空间网格结构施工精度基础因素的构件自身特性，涵盖材料性能、截面尺寸精度以及加工工艺水平等方面，这些特性直接决定着构件的初始质量状态，其中材料的收缩、徐变特性会使构件在加工与存放过程中产生自发变形，进而对后续装配精度造成影响，截面尺寸偏差会导致构件连接面无法精准贴合，增加拼接难度，而加工工艺的稳定性不足则会使批量构件存在尺寸离散性，进一步放大精度偏差，除此之外，构件的刚度特性也会对施工过程中的受力变形产生影响，刚度不足的构件在吊装过程中容易产生非预期变形，破坏施工精度。

1.2 施工动态因素作用

施工过程中的动态因素对结构变形有着显著的驱动作用，吊装设备的运行稳定性与吊装姿态的控制精度，会直接影响构

件就位过程中的受力状态，进而引发局部或整体变形，构件拼接过程中连接顺序与紧固力度的控制不当，会在结构内部产生附加应力，诱发变形，同时施工人员的操作熟练度与施工流程的衔接连贯性，也会通过影响施工节奏而对结构变形产生间接作用，由于不同施工环节的动态干扰相互叠加，容易导致变形累积与扩散，因此厘清施工动态因素对变形的作用路径，并针对性地采取调控措施，成为控制结构变形的关键环节。

1.3 环境与荷载的耦合作用影响

环境要素和荷载作用的耦合效果，会对施工精准度和结构形变产生协同作用。温度改变会使构件出现热胀冷缩的形变，不同构件对温度的反应差异容易造成连接节点的精准度偏差。风力、雨雪等气象状况不但会对吊装作业的精准度控制产生干扰，还会给已安装的结构增加额外荷载，引发非预期的形变。施工过程中的临时荷载，像施工机械重量、材料堆放荷载等，与环境荷载叠加之后，会改变结构的受力平衡状态，加剧精准度偏差和形变之间的相互作用。这种耦合效果具有复杂性和不确定性，会让精准度控制和形变调控的难度明显增加，需要建立有针对性的协同应对机制。

2 大跨度空间网格结构施工精准度控制的核心技术

2.1 预制运输精准度的预先判断

构件预制和运输阶段的精准度预先判断技术，是提高施工精准度的前置保障手段。在预制环节，通过构建构件加工精准度预测模型，结合材料性能参数和加工工艺参数，提前判断构件加工过程中可能出现的尺寸偏差。采用高精度的加工设备和在线监测技术，实时跟踪构件加工状态，及时纠正加工偏差。在运输阶段，针对构件的尺寸和重量特性，优化运输方案，选

作者简介：傅艳芳(1982.8-)，女，汉族，福建三明人，专科，工程师，研究方向：建筑工程施工。

用合适的运输设备和固定装置。通过数值模拟分析运输过程中的振动、冲击等荷载对构件精准度的影响，提前采取减振、防冲击措施。精确的精准度预先判断能够有效减少预制和运输环节的误差积累，为后续施工精准度控制奠定基础。

2.2 吊装实时监测与修正

吊装过程中的实时精准度监测和动态修正技术，是控制施工精准度的核心环节。通过在构件和吊装设备上布置高精度传感器，实时采集构件的空间位置、姿态以及受力数据。利用数据传输和处理系统，对采集到的数据进行实时分析，判断构件就位精准度是否符合设计要求。当监测到精准度偏差超出允许范围时，启动动态修正机制，通过调整吊装设备的运行参数、优化吊点位置等方式，及时纠正偏差。

2.3 拼接节点精准度匹配

拼接节点的精准度匹配和密封加固技术，是保障结构整体精准度和稳定性的关键支撑。在节点拼接前，对构件连接面进行精确清理和平整度检测，确保连接面贴合紧密。采用高精度定位装置实现节点的精确对接，通过调整构件姿态和位置，消除连接间隙，保障节点拼接精准度。拼接完成后，及时进行密封处理，选用合适的密封材料，防止环境因素对节点造成侵蚀。同时，采取科学的加固措施，提高节点的承载能力和稳定性。节点作为结构受力传递的核心部位，其精准度匹配质量直接影响结构的整体力学性能，完善的拼接节点处理技术能够有效提高结构施工精准度和使用寿命。

3 大跨度空间网格结构施工变形协同调控机理

3.1 变形多维度表征

作为实现变形协同调控基础前提的结构变形多维度协同表征方法，通过对几何变形、力学变形等多维度指标进行整合来构建全面的变形表征体系，从几何维度对构件与结构的位移、转角等变形参数进行精准描述，从力学维度分析变形过程中的应力、应变分布状态，利用三维扫描、数值模拟等技术手段获取结构施工各阶段的变形数据并建立变形数据库，通过数据融合与分析明确不同维度变形之间的关联关系以实现对结构变形状态的全面且精准表征，为后续协同调控提供全面数据支撑以确保调控措施具有针对性与有效性的多维度变形表征。

3.2 各阶段变形协调

施工各阶段变形的耦合协调机制作为解决变形不协调问题的核心所在，鉴于大跨度空间网格结构施工分为多个连续阶段且各阶段变形存在相互影响、相互制约的耦合关系，通过分析各施工阶段的变形特征与演化规律来明确不同阶段变形的耦合路径，建立以结构最终成型精度为目标并反向优化各阶段

变形控制指标的各阶段变形协调控制模型，在施工过程中实时追踪各阶段变形状态，通过调整施工参数、优化施工顺序等方式实现各阶段变形的协同匹配，能够有效化解各阶段变形的矛盾冲突、避免变形累积并保障结构整体变形协调的该机制。

3.3 精度变形联动调控

以精度偏差与变形的内在关联为基础建立两者之间联动响应机制的精度偏差与变形联动调控逻辑，是实现精度与变形协同控制的关键核心，当监测到精度偏差时分析偏差产生的变形根源，当出现变形异常时预判其对精度控制的影响，通过构建整合精度控制与变形调控措施的联动调控模型以实现两者的协同联动，在调控过程中以精度要求为约束、以变形稳定为目标来动态调整调控参数。

4 施工精度控制与变形协同技术体系构建

4.1 全流程技术框架

以施工全生命周期为视角、涵盖构件预制、运输、吊装、拼接等所有施工环节的全流程协同控制技术框架设计，作为构建协同技术体系的核心支撑，明确各环节的精度控制目标与变形调控要求并梳理各环节之间的协同关系，将精度预判、实时监测、动态修正、变形协调等核心技术融入框架各环节以形成闭环式协同控制流程，同时明确框架的组织架构与责任分工以保障各环节技术措施有效落地，能够实现施工过程的系统性、整体性控制、避免单一环节控制的局限性并提升协同控制整体效能的全流程技术框架。

4.2 数字孪生调控平台

搭建以数字孪生为基础的精度与变形协同调控平台，是提高协同控制智能化程度的重要方式。该平台将数字孪生技术作为核心要素，构建物理实体和数字模型之间的实时映射联系。通过汇聚施工过程中的各类监测数据、设计数据、施工数据，推动数字模型进行实时更新，精确模拟结构施工状况和变形发展过程。借助平台的分析和预测功能，提前对精度偏差和变形风险作出预判，并提出具有针对性的调控建议。平台支持多部门、多环节的数据共享与协同作业，实现精度控制和变形调控的一体化、智能化管理。数字孪生调控平台的搭建能够明显提升协同控制的效率和精度，为复杂施工过程的管控提供有力保障。

4.3 标准化实施流程

制定协同技术的标准化实施流程，是确保协同技术规范应用的重要基础。通过梳理协同控制技术的核心要点和应用步骤，制定包含技术准备、过程实施、质量检验等环节的标准化流程。明确各环节的操作规范、技术参数、质量标准以及验收

要求，让施工人员能够规范执行协同控制措施。针对不同施工场景的特殊性，制定有差异的流程调整方案，提高流程的适配性。同时，建立流程执行的监督和考核机制，及时发现并纠正流程执行过程中的偏差。标准化实施流程能够减少人为因素对技术应用效果的影响，保证协同技术的应用质量和稳定性。

5 协同技术在大跨度空间网格结构施工中的应用要点

5.1 结构类型适配策略

不同结构类型的协同技术适配策略，是保证协同技术有效应用的关键前提。大跨度空间网格结构有多种结构形式，不同结构形式的受力特性、施工难度以及精度要求存在差别。针对网架结构、网壳结构等不同类型，分析其结构特点对协同控制的需求。对于受力复杂的网壳结构，加强变形监测和联动调控力度；对于拼装难度大的网架结构，优化预制精度和拼接节点处理技术。通过建立结构类型和协同技术的匹配关系，制定有差异的适配策略。适配策略能够使协同技术更好地符合不同结构类型的施工需求，提高技术应用的针对性和有效性。

5.2 复杂环境优化手段

在复杂施工环境中实施协同调控优化手段，是妥善应对不利施工状况的关键保障。当施工面临高温、高寒、大风等复杂环境时，施工精度把控和变形调控的难度会显著上升。针对高温环境，可增加监测频次，采取构件隔热办法，以减轻温度变形带来的作用；针对大风环境，可调整吊装作业时段，强化构件固定措施，提升吊装过程的稳固性。通过数值模拟方式分析复杂环境对施工精度和变形的作用程度，预先制定应急调控方

案。

5.3 应用质量管控重点

协同技术应用过程中的质量管控重点，是保障施工质量的重要支撑。构建全流程质量管控体系，明确质量管控的关键环节与控制指标。在技术应用之前，对施工人员开展技术培训与考核，确保其掌握协同控制技术的操作重点。在施工过程中，加强对监测数据、调控措施执行情况的检查，及时察觉质量隐患。对关键环节的施工质量进行抽样检验，确保符合设计和规范要求。建立质量问题追溯与整改机制，对发现的质量问题及时整改并跟踪验证。严格的质量管控能够保障协同技术的应用成效，确保大跨度空间网格结构的施工质量与安全。

6 结论

本文围绕大跨度空间网格结构施工精度控制与变形协同技术开展研究，系统梳理了构件自身属性、施工动态因素以及环境与荷载相互作用等核心影响因素。明确了施工精度控制的核心技术路径，包含预制运输阶段的精度预先判断、吊装过程的实时监测修正以及拼接节点的精度匹配技术。深入探究了变形协同调控原理，建立了变形多维度描述方法、各阶段变形相互协调机制以及精度与变形的联动调控逻辑。构建了包含全流程技术框架、数字孪生调控平台与标准化实施流程的协同技术体系，提出了适配不同结构类型、应对复杂环境的应用策略与质量管控重点。研究成果能够有效提高大跨度空间网格结构施工精度控制与变形协同调控水平，为相关工程施工提供理论指引与技术支持。后续可进一步开展协同技术的长期性能监测与优化研究，增强技术的适用性与耐久性。

参考文献：

- [1] 轩慎青,陈良超,方舟,等.大跨度空间网格结构健康监测系统设计及应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(05):108-116.
- [2] 李鑫.“原位拼装、整体顶升”法施工技术在大跨度空间网格结构屋面中的应用[J].科学技术创新,2022,(16):113-116.
- [3] 蔡小平.大跨度空间网格结构的拼装和滑移施工[J].建筑施工,2020,42(11):2069-2071.
- [4] 迂长伟,韩超,王振辉,等.新型单层空间大跨度不规则曲面钢网格结构施工关键技术[J].建筑技术,2022,53(12):1627-1630.
- [5] 过洪赟.空间网格钢结构构件劣化预判监测方法[D].哈尔滨工业大学,2023.