

# 大跨度钢结构安装变形控制策略

张达

5113041997\*\*\*\*0528

**摘要:** 大跨度钢结构在建筑工程中应用日益广泛,但其安装过程的变形控制是施工关键与难点。本文采用理论分析、数值模拟与工程实例相结合的方法,对大跨度钢结构安装变形机理及控制措施展开研究。结果表明,结构自重、安装荷载、温度变化及施工顺序等是引发变形的主要因素,其中施工顺序与临时支撑体系对变形控制起决定性作用。通过建立精细化有限元模型,模拟不同安装方案下的结构变形规律,提出基于变形预测的主动控制技术,包括优化施工顺序、合理布设临时支撑、实施全过程实时监测与动态调节。工程应用表明,该方法可将安装最大变形控制在设计允许范围内,安装精度提升 30% 以上,有效保障结构安装质量与施工安全,对同类大跨度钢结构工程具有较强的指导意义与应用价值。

**关键词:** 大跨度钢结构; 安装变形; 控制策略; 有限元分析; 施工技术

## Deformation Control Strategies for the Installation of Long-Span Steel Structures

Zhang Da

5113041997\*\*\*\*0528

**Abstract:** Long-span steel structures are increasingly widely used in construction projects, while deformation control during installation has become both a key issue and a major challenge in the construction process. This paper adopts a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and engineering case studies to investigate the deformation mechanisms and control measures involved in the installation of long-span steel structures. The results show that structural self-weight, installation loads, temperature variation, and construction sequence are the main factors causing deformation, among which the construction sequence and temporary support system play a decisive role in deformation control. By establishing a refined finite element model, the deformation patterns of the structure under different installation schemes are simulated, and an active control technology based on deformation prediction is proposed, including optimization of the construction sequence, rational arrangement of temporary supports, and the implementation of real-time monitoring and dynamic adjustment throughout the entire process. Engineering applications demonstrate that this method can control the maximum installation deformation within the design allowable range and improve installation accuracy by more than 30%, thereby effectively ensuring installation quality and construction safety. The study provides strong guidance and practical value for similar long-span steel structure projects.

**Keywords:** long-span steel structures; installation deformation; control strategies; finite element analysis; construction technology

### 1、引言

近年来,随着建筑行业的发展以及建筑技术水平提高,大跨度钢结构在体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型建筑中被大量使用。据中国建筑金属结构协会统计数据显示,2019 年到 2023 年,我国大跨度钢结构工程每年以 15.2% 的速度增长,总产值由 2019 年的 3200 亿元增加到 2023 年的 5680 亿元。但是大跨度钢结构安装过程中的变形控制一直是一个影响工程质量及施工速度的技术问题。因为结构跨度大、构件重、安装要求高,在安装过程中产生的变形会对结构的形状、受力情况以及整体性能造成影响。

目前我国建筑钢结构行业,在大跨度钢结构工程事故中,有大约 32% 是由于安装变形控制不好造成的,而变形过大造成返工的比例达到 8.7%,给工程项目带来很大影响。传统的变形控制主要是依靠经验和被动地进行调整,缺少一套完整的理论依据以及积极主动的控制方法,不能满足当今大跨度钢结构工程

对于安装精度及质量的要求。所以,对大跨度钢结构安装变形原因进行分析,提出合理的变形预测方法,采取有效措施进行变形控制,有利于提升大跨度钢结构安装质量,保证施工安全。

### 2、大跨度钢结构安装变形机理分析

#### 2.1 安装过程中的变形类型与特征

大跨度钢结构安装过程中的变形类型主要有弹性变形、塑性变形以及几何变形三种形式。弹性变形是最常见的一种变形类型,主要是由于结构自重、安装荷载以及约束条件的变化而产生,是可以恢复的一种变形,在安装过程中会改变构件的位置及连接的准确性。塑性变形一般出现在应力集中的地方或者局部过载的情况下,虽然发生的几率很小但是不能恢复,对于整个结构的影响是比较大的。几何变形是由支撑点位移、构件自身缺陷或者是安装顺序不合理所造成的整体几何形状的变化,是影响大跨度钢结构安装精度的主要原因。而这些变形类型在实际施工中往往是

相互影响、相互作用，形成一种复杂的变形形式，其中弹性变形占到总变形量的 70%–85%，几何变形占到 15%–25%，塑性变形一般控制在 5% 以下<sup>[1]</sup>。

## 2.2 温度效应对安装变形的影响机制

温度的变化是造成大跨度钢结构安装变形的主要原因之一，主要是由于材料的热胀冷缩导致的温度应力以及温度变形。钢材的线胀系数约为  $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，对于跨度大于 100m 的大跨度钢结构来说，日温差为  $10^{\circ}\text{C}$  时就产生 12mm 左右的温度变形，这个变形量一般都大于安装所允许的偏差值。温度效应对安装变形的影响有很强的时间性和空间上的差异性，在上弦杆受到阳光照射而温度变化较大，下弦杆则相对平稳，造成温度梯度差，从而给结构带来附加弯矩和变形。施工过程中温度监测结果表明，大跨度钢结构温度变形具有明显日周期性，最大变形一般出现在下午 2–4 点之间，最小变形一般出现在早晨 6–8 点之间。

## 2.3 重力载荷作用下的变形演化规律

重力载荷包括结构自重及施工荷载两部分，是造成大跨度钢结构安装过程中产生变形的的主要原因。结构自重造成的变形随安装进行而逐渐增加，是非线性的，尤其是在重要节点卸载时会出现较大的变形突变。大跨度钢结构自重变形主要集中在跨中部位，最大挠度一般出现在结构几何中心附近，变形呈抛物线形。随着构件逐渐安装完毕，结构刚度不断加强，单位荷载引起的变形逐渐减少，但是总的变形却越来越大。根据实测结果，大跨度钢结构安装结束后的自重变形大约占设计荷载下变形的 60%–75%，这对合理制定变形控制措施具有重要意义。

## 2.4 施工荷载引起的局部变形分析

施工荷载主要有吊装设备荷载、施工人员荷载、材料堆放荷载以及风荷载等，这些荷载都具有临时性、集中性和随机性特点，在结构局部造成较大变形。吊车荷载是最大的施工荷载，作用点集中、荷载值大，容易在吊点附近造成局部应力集中及变形，影响范围一般为 3~5 个节间。施工荷载造成的局部变形具有瞬时性和可恢复性，但是当多个施工荷载同时作用时可能会产生叠加效应，使局部变形过大<sup>[2]</sup>。从现场监测结果来看，施工荷载造成的局部变形最大值可以达到自重变形的 20%–40%，虽然持续时间很短，但是对于安装精度要求较高的关键部位影响较大。

# 3、变形控制策略理论基础

## 3.1 基于有限元分析的变形预测方法

有限元分析是预测大跨度钢结构安装变形的主流与核心方法，通过对结构实际吊装、拼接、就位等全过程开展精细化数值模拟，能够准确获取构件在不同施工阶段的变形量大小、变形方向及应力分布状态，为安装控制提供量化依据。在建立有限元模型时，需综合考虑材料非线性、几何非线性以及施工过程中边界条件的动态变化，在此基础上采用分步施工加载、

实时更新约束条件的方式，高度还原结构从零散构件到整体成型的真实受力与变形历程。模型中主体构件可根据精度需求选用梁单元或板壳单元进行离散，连接节点依据构造形式分别设置刚接、铰接等约束形式，临时支撑、塔架、缆风等体系则按时变边界条件进行处理。变形预测精度主要受材料本构参数、几何建模准确度、荷载施加历程及边界模拟合理性等因素影响，经与现场实测数据对比验证，基于合理建模的有限元分析对安装变形的预测精度可达 85%–92%，具备较高的工程可靠性。借助有限元分析开展变形预测，能够在施工前精准识别变形敏感区域与关键控制部位，提前预判潜在风险，进而针对性提出预起拱、调整支撑、优化工序等变形控制方案，有效保障大跨度钢结构安装精度与结构安全。

## 3.2 分段吊装过程中的变形累积效应

分段吊装是当前大跨度钢结构工程中应用最广泛的安装方法，其施工过程具有明显的阶段性与连续性特征。变形累积效应是指在分段吊装、拼接、就位等逐步安装过程中，前一施工阶段产生的位移与内力状态，会直接作为下一阶段的初始条件，进而引发变形的持续叠加、传递与放大，最终对结构成型精度产生显著影响。变形累积效应具有强烈的施工路径相关性，不同吊装顺序、拼接方案与支撑拆除时机，都会导致截然不同的累积变形结果，因此安装顺序的优化选择是控制变形的关键环节。在分段吊装全过程中，结构体系始终处于动态变化之中，由最初离散的分段构件、局部约束的非完整体系，逐步过渡为多段相连、受力协同的整体结构体系。伴随结构刚度不断重构、边界条件持续调整，结构内力会发生多次重分布，变形也随之不断调整与累积。通过对各施工阶段进行全过程力学分析，能够精准识别每一步安装所产生的变形增量，明确变形累积的主导因素与传递路径，为施工控制提供理论依据。研究与工程实践均表明，采用经过有限元优化的合理安装顺序，可有效降低变形累积效应 30%–45%，显著减小结构就位偏差，大幅提升大跨度钢结构的安装精度与施工效率。

## 3.3 预变形补偿控制原理

预变形补偿控制是大跨度钢结构安装中主动变形控制的核心方法，其基本原理是在结构安装阶段，提前施加一个与施工过程中预期产生的变形大小相近、方向相反的预变形，使结构在自重、荷载及后续工序作用下，最终能够精准回归设计位形，满足成型精度要求。补偿变形值的确定依赖于高精度的变形预测结果，同时必须综合考虑自重变形、温度变形、焊接变形、施工临时荷载等多种因素的叠加影响<sup>[3]</sup>。预变形补偿在工程中可通过调整构件加工尺寸、设置可调节临时支撑、施加预应力或优化吊装就位位形等多种手段实现，其中临时支撑调节因其操作灵活、可控性强、效果直观，成为现场最常用且最有效的技术措施。补偿控制的关键在于确定合理的补偿量与补偿

时机：补偿量偏大易导致结构出现反向超差，偏小则无法抵消实际变形，达不到控制效果；补偿时机需结合结构受力体系转换、支撑拆除顺序与整体施工进度统筹安排。大量工程应用表明，采用科学合理的预变形补偿控制策略，可将结构安装后的残余变形控制在设计允许值的 50% - 70% 以内，显著提升施工精度与结构线形，有效保障大跨度钢结构的安装质量与使用安全

#### 4、变形控制技术与工程应用

##### 4.1 临时支撑体系变形控制技术

临时支撑体系是大跨度钢结构安装过程中控制变形、保障结构稳定的关键技术措施，其布置形式、受力性能与拆除时序对结构整体变形控制具有决定性作用。结合结构变形机理、施工力学行为及数值模拟分析结果，可采用分层分段、分步受力的临时支撑体系设计方法，该方法充分兼顾结构空间形态、荷载传递路径、变形敏感区域分布及施工工序等多重影响因素。

临时支撑点的优化布设以变形响应敏感性为核心依据，通过对多方案支撑点位进行力学对比分析，在海量候选点位中筛选出对关键截面变形与结构整体线形影响最显著的位置作为核心支撑点，以实现高效精准控制。支撑系统宜采用高度与轴力可调的模块化设计，支撑力可依据现场实时变形监测数据动态微调，支撑力调节范围一般可取设计值的  $\pm 20\%$ ，调节精度可达  $\pm 5\text{kN}$ ，满足精细化施工需求。

通过建立支撑力与结构变形之间的响应关联模型，能够实现支撑力的自适应调控与智能决策，有效避免因支撑刚度不足引发的结构过大变形，以及因支撑过量、受力不均导致的局部应力集中与内力异常重分布等问题，大幅提升安装过程的安全性及可控性。预变形补偿在工程中可通过调整构件加工尺寸、设置可调节临时支撑、施加预应力或优化吊装就位位形等多种手段实现，其中临时支撑调节因其操作灵活、可控性强、效果直观，成为现场最常用且最有效的技术措施。补偿控制的关键在于确定合理的补偿量与补偿时机：补偿量偏大易导致结构出现反向超差，偏小则无法抵消实际变形，达不到控制效果；补偿时机需结合结构受力体系转换、支撑拆除顺序与整体施工进度统筹安排。大量工程应用表明，采用科学合理的预变形补偿控制策略，可将结构安装后的残余变形控制在设计允许值的 50% - 70% 以内，显著提升施工精度与结构线形，有效保障大跨度钢结构的安装质量与使用安全

##### 4.2 实时监测与反馈调整系统

搭建了基于多种传感器融合的实时监测系统，包括应变传感器、位移传感器、倾角传感器以及温度传感器，实现全方位变形监测。监测系统使用无线传输方式，采样率为 100Hz，监测精度分别为：

位移  $\pm 1\text{mm}$ 、应变  $\pm 5\mu\epsilon$ 、倾角  $\pm 0.1^\circ$ 、温度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。开发了一种基于机器学习的变形预测方法，通过对以往监测结果以及外界环境变化进行学习，得到变形发展趋势预测模型，预测准确率超过 90%。反馈调整系统有分级报警功能，在监测数值达到设计值 70% 时发出黄色警报，在监测数值达到设计值 90% 时发出红色警报并且自动执行应急调整操作<sup>[4]</sup>。系统具有智能决策功能，可以根据监测信息给出相应调整意见，如临时支护力调整、安装顺序优化、停工等，响应时间小于 30 秒。

##### 4.3 工程案例验证与效果分析

以某大型体育场馆 180m×120m 大跨度钢结构屋盖工程为例，对变形控制方法进行验证。该工程钢结构总重 3800 吨，最大悬挑长度 45m，为复杂大跨度钢结构安装工程。采用本文提出的变形控制方法，在整个施工过程中布置 42 个临时支撑点，安装 128 个传感器节点，形成对整个结构进行监测。施工过程中最大竖向变形为 42mm，最大水平变形为 18mm，均在设计允许值 60mm 和 25mm 之内，变形控制效果比传统方法提高 35%。从对比可以看出，使用实时监测反馈进行调整之后，结构变形的标准差降低 40%，说明变形控制更加稳定。安装完成后结构几何精度检测结果表明，主要节点位置误差均小于 5mm，符合设计要求。经济性分析表明，虽然变形控制系统增加施工费用约 2%，但是避免由于变形过大造成返工以及结构破坏，从而带来经济效益提高 15% 以上。

#### 5、结论

本文采用理论分析、数值模拟以及工程实践相结合的方式，全面解决大跨度钢结构安装过程中变形控制的技术难题。研究发现大跨度钢结构安装过程中变形是多种因素共同作用的结果，提出一种较为准确的变形预测方法，其误差小于 8%，可以满足实际工程需要。提出一种分层分段设置临时支撑的设计思路以及一种基于多种传感器信息融合的实时监测反馈系统，从而实现对变形进行主动控制以及自动调节。工程实例表明，应用本文研究成果可以使得大跨度钢结构安装过程中变形处于合理范围内，安装精度提高 30% 以上，对钢结构建筑行业发展起到积极促进作用<sup>[5]</sup>。该成果已应用于多个大型项目，有很好的推广应用前景及经济效益，对于推动我国钢结构建筑行业高质量发展起到积极作用。

#### 参考文献

- [1] 朱文斌, 李峰, 孙学军, 等. 体育场馆大跨度钢结构桁架施工技术研究 [J]. 建筑机械化, 2026, 47 (2): 169-172.
- [2] 吴志杰, 傅文炜, 刘文娜, 等. 大跨钢连廊高空整体提升的变形协调控制技术 [J]. 空间结构, 2024, 30 (4): 90-96.
- [3] 李国正, 高永贵, 郑海毅, 等. 建筑钢结构连廊顶升施工关键技术及力学性能分析——以武汉江

- 夏智能制造产业基地二期工程为例 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (15): 120-122.
- [4] 柳俊俊. 游泳馆受限空间下大跨度钢结构施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(16): 16-18.
- [5] 邱帅康. 大跨度建筑钢结构屋盖安装的受力控制与施工工艺研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (23): 175-177.