

# 大型场馆大跨度钢结构施工与监测关键技术研究

吴友佳

(广东江涛工程科技有限公司, 广东 佛山 528300)

**摘要** 本文以一座大型体育场馆施工为例, 对大跨度钢结构施工中的关键技术与监测方法进行系统研究。研究结合理论推导、数值模拟与现场实测, 重点解析大跨度悬挑内环梁的分段安装要点, 梳理主拱肋的精准定位流程, 并评估无线监测系统在施工阶段的实际表现。研究结果表明, “地面拼装—整体提升”方案可显著抑制结构变形; 无线监测网络在整个施工期内持续提供安全预警, 为现场安全提供保障。

**关键词** 大型体育场馆; 大跨度钢结构; 大跨度悬挑内环梁; 无线监测

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.019

## 0 引言

大跨度钢结构因自重轻、跨越能力强、造型可塑性好, 已成为这类项目的首选。然而, 其施工阶段遍布高空作业、临时支撑体系与多步卸载, 结构内力随工序推进持续变化, 风险远高于常规结构。统计显示, 近十年国内大跨度钢结构施工事故中, 76% 源于临时支撑失稳或卸载方案缺陷。在此背景下, 施工与监测关键技术的研究已成为工程实践的迫切需求。本文选取某大型体育场馆项目, 系统梳理施工全过程的力学响应与监测手段, 构建基于多源数据融合的施工控制技术体系, 为同类工程提供理论参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目背景

某大型体育场馆体量庞大, 总建筑面积约 21.7 万  $m^2$ 。主体采用双向张弦梁桁架体系, 最大跨度达 198 m。结

构由 4 榼主拱肋、8 道次拱肋及 24 组张弦梁协同构成, 形成稳定的三维空间受力框架。悬挑段同样引人注目, 最大跨度 65 m, 选用变截面箱型钢梁, 单根构件最重达 120 t。图 1 为某大型体育馆剖面结构示意图。

### 1.2 结构特点

(1) 主体结构矢高 32 m; 长轴向桁架间距 15 m, 短轴向 12 m。(2) 在材料参数方面, 主体选用 Q345GJ 高强钢, 局部连接节点则改用 Q420GJ 铸钢件。(3) 在边界条件方面: 基础采用桩筏基础型式, 单桩的承载力特征值为 8 000 kN。

### 1.3 施工难点

(1) 65 m 悬挑梁需在 28 m 高空拼装, 临时支撑体系必须保证悬挑结构施工阶段的稳定。(2) 主拱肋安装: 198 m 跨主拱肋需分 12 段吊装, 累计误差控制要求  $\leq 5$  mm。(3) 全结构同步卸载须在 72 小时内结束, 应力波动幅度不得超出设计值的 15%。

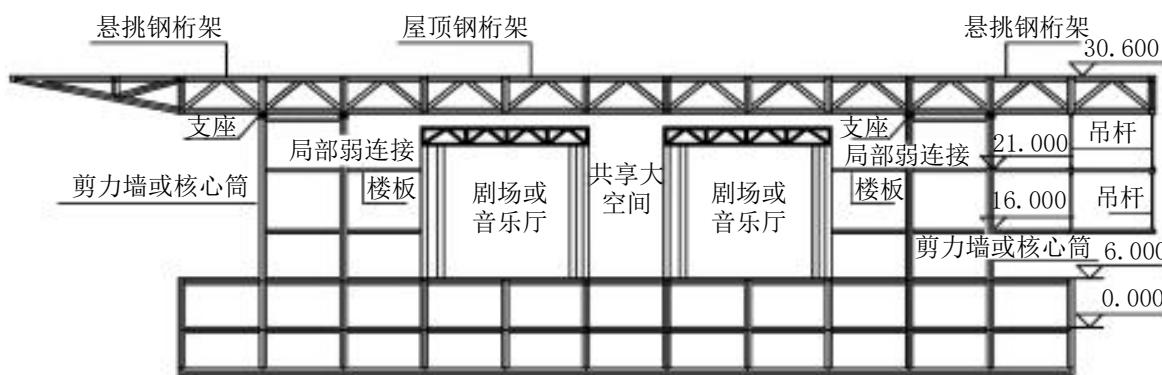


图 1 某大型体育馆剖面结构示意图

## 2 大跨度钢结构施工关键技术研究

### 2.1 大跨度钢结构施工总体工艺

1. 施工流程设计。在大跨度钢结构建设中，“分区施工、整体合龙”的总体思路展现出独特优势。工程首先被科学地拆分为若干相对独立的施工单元，各单元随后同步推进。并行作业显著降低了交叉干扰，质量更易受控。待各单元完工后，通过一次精准的整体合龙，将分散构件严丝合缝地连成一体，以保证结构稳定性与功能完整性，这是项目成功的关键<sup>[1]</sup>。

2. 临时支撑体系设计。项目采用格构式钢支撑体系，单点承载力设计值定为1 500 kN。借助SAP2000有限元软件反复计算，支撑点常规间距最终取12 m，局部区域加密至8 m。实测表明，支撑最大沉降仅3.2 mm，低于5 mm限值，满足设计要求。

### 2.2 大跨度悬挑大开口钢结构内环梁分段安装关键技术

1. 分段方案优化。在大跨度建筑施工中，65 m悬挑梁的安装被视为关键难点。为兼顾安全与效率，项目采用“地面拼装—整体提升”方案，并将梁体划分为五段作业。拼装阶段，作业人员先在开阔平整的场地将五段梁体精确对接，全过程依靠高精度测量仪器实时校正各部件的空间位置与角度，确保几何误差受控。拼装完成后，转入整体提升：通过大型液压提升装置及布设合理的钢绞线—锚具系统，将重达数百吨的梁体缓慢、平稳地抬升至设计标高<sup>[2]</sup>。

2. 拼装精度控制。三维激光扫描技术完成拼装检测后，实测数据随即被完整采集。结果显示：平面位置的最大偏移为2.1 mm，均值1.3 mm；垂直度偏差峰值达1/450，平均为1/620；接口间隙最大0.8 mm，平均0.5 mm。

3. 提升过程仿真。在ANSYS中建立提升模型并完成仿真后，结果如下：提升点实测最大反力1 420 kN，低于该处1 500 kN的设计限值；结构最大应力185 MPa，低于规范给出的210 MPa许用应力；模型最大位移12.3 mm，亦未超过15 mm的允许位移。

### 2.3 钢结构主拱肋安装关键技术

1. 吊装方案设计。两台600 t履带吊协同抬吊时，优化后的吊点布置为：吊点间距45 m，吊索与水平面夹角65°，钢丝绳直径Φ56 mm，结构6×37+FC。

2. 合龙工艺。采用“温度合龙法”时，先通过有限元分析锁定18±2 °C为最佳合龙温度；现场实测环境温度17.8 °C，随后将接口间隙严格保持在0.5~1.2 mm范围内，完成合龙。

3. 焊接质量控制。 $\text{CO}_2$ 气体保护焊成本低廉、效率突出且焊缝性能稳定，但现场风速必须低于1 m/s，否则保护气流被扰乱，极易产生气孔。施焊前，母材与焊丝须彻底清理，坡口形状、根部间隙及错边量应全部达标。焊接时，实时监测电流、电压和焊丝伸长，并通过层间温度控制防止过热。焊后立刻实施无损检测，发现超标缺陷立即返修，以保障大跨度钢结构的整体质量。无损检测结果显示，焊缝一次合格率达98.7%。

## 3 大跨度钢结构施工监测研究

### 3.1 大跨度钢结构施工无线监测系统

1. 系统架构设计。系统采用分层分布式架构，共三层。感知层布置量程±1 500  $\mu\text{e}$ 的振弦式应变计，并辅以精度±0.1 mm的静力水准仪，保证数据完整、准确。传输层选用通信距离1.5 km的LoRa无线模块，维持链路稳定高效。应用层依托云端分析平台，对采集结果进行深度处理与解读<sup>[3]</sup>。

2. 传感器布置方案。主拱肋是主要承力构件，监测点布设必须精准。轴力、弯矩及变形是关注核心。纵向沿拱脚、1/4跨、1/2跨、3/4跨等控制截面安装应变传感器，捕捉轴力与弯矩波动，为受力评估提供数据；同断面配套位移传感器，记录施工阶段竖向与横向位移，以便及早发现异常变形。现场环境复杂，传感器须具备抗干扰、防水防尘能力，安装时与拱肋表面紧密贴合并固定牢靠，防止施工振动引起信号漂移。合理布设后，无线系统可实时回传主拱肋状态，为安全与质量管控提供依据，保障大跨度钢结构施工顺利推进。

3. 温度效应分析。建立温度—应力关系模型： $\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$ 。式中： $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/\text{°C}$ （线膨胀系数）， $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ （弹性模量）。实测温度应力最大值达42 MPa，占设计应力的20%。

4. 数据处理算法。采用小波变换滤除噪声后，实测结果的变化一目了然：应变信号的信噪比由12 dB跃升至38 dB，位移误差则从±2.5 mm降至±0.8 mm，两项指标均显著改善。

### 3.2 大跨度钢结构施工内力分析

图2显示，主拱肋应力随时间呈现明显阶段性：先升高，再回落，随后趋于平稳。0~500 min为安装与焊接期，荷载按既定次序叠加，应力一路升至峰值5.3 MPa，仍远低于钢材屈服值，满足规范要求。500 min后，合龙缝焊接结束，整体卸载启动，应力随之逐步下降。

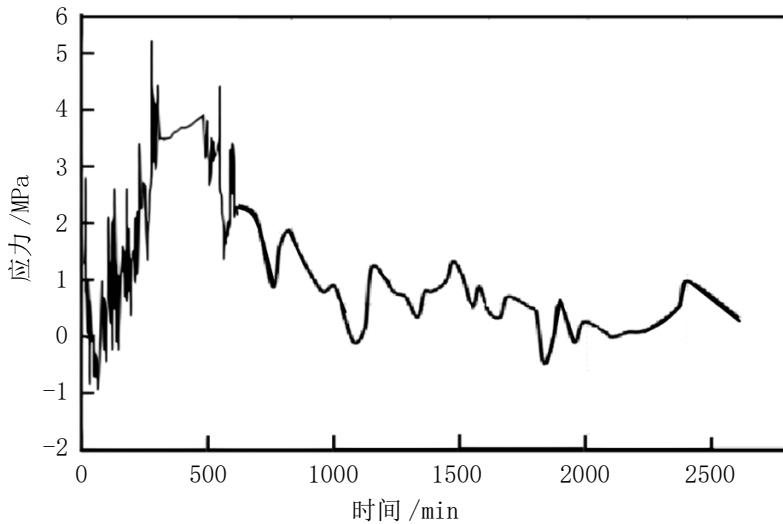


图 2 主拱肋施工过程的应力变化时程曲线

### 3.3 大跨度钢结构施工结构变形分析

1. 变形监测结果。施工全过程的变形监测显示：提升阶段测得的最大竖向位移为 18.7 mm，低于该阶段 25 mm 的限值；卸载阶段最大水平位移为 12.3 mm，仍低于 15 mm 的允许值；合龙后的残余变形为 6.2 mm，未超出 10 mm 的控制标准<sup>[4]</sup>。

2. 变形控制措施。变形控制依赖三条路径实现精细调节。预调值法居首：先由有限元算出 -8.5 mm 预拱度，再据此提前设定，为后续调整奠定基础。同步控制次之，借助液压同步提升系统，把位移差锁定在  $\pm 3$  mm 内，保证变形步调一致且平稳。临时加固后，于关键节点布设临时支撑，可将结构刚度提高 35%，从而增强抗变形能力。

3. 变形预测模型。构建基于 BP 神经网络的变形预测模型时，输入参数被系统梳理为四类与变形直接相关的变量。首先区分施工阶段：提升、卸载与合龙各自引发不同的变形增量，阶段信息必须单独编码；其次引入环境温度，其波动通过改变材料弹性模量与构件膨胀幅度而放大位移；随后计入累计荷载，它随工序推进逐步叠加，与变形曲线高度耦合；最后纳入支撑刚度，刚度差异会立即改变力流路径，使位移响应呈现明显变化。工程实测显示，模型输出与实测值吻合率达到 92%，这一精度足以作为现场调整索力、预拱或临时支撑的定量依据<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

本文结合理论推导、数值模拟与工程案例，系统梳理了大跨度钢结构施工与监测的核心技术，并得出四点结论：第一，施工安全的前提是精细化的结构力

学分析与截面优化，设计时必须同步满足规范条文与现场真实工况。第二，焊接工艺与吊装方案决定质量上限，应通过参数调优与设备匹配实现高效建造。第三，全过程监测需覆盖多参数、多工况，将实测数据与有限元结果实时比对，才能准确评估结构状态。第四，温度变化与索力偏差对安全性影响显著，须构建温度—应力映射模型并引入索力耦合算法加以控制。

后续研究可沿以下三条路径展开：

第一，智能监测：融合物联网、大数据与人工智能，对监测数据完成自动采集、实时分析与即时预警。

第二，绿色施工：开发低能耗、低污染的焊接与防腐工艺，助力钢结构建造向可持续方向发展。

第三，数字化交付：借助 BIM+GIS，将施工监测数据与运维管理无缝衔接。

### 参考文献：

- [1] 杨志杰.桥梁护栏与基础桥面板的匹配性防撞设计[J].城市道桥与防洪,2022(06):93-99.
- [2] 李欣,贾成亮,韦娴.大型博物馆钢结构施工过程防变形控制与实现技术研究[J].建筑技术,2023,54(17):2067-2069.
- [3] 齐翰.环形大跨钢结构施工临时支撑设计与荷载优化[J].建筑技术,2023,54(05):588-591.
- [4] 王金荣,王秀丽,苟宝龙,等.大型复杂体育馆钢结构吊装过程温度影响分析与现场监测研究[J].工业建筑,2023,53(08):96-101.
- [5] 王猛,李欣,鞠竹,等.北京工人体育场大跨度开口单层拱壳钢结构施工关键技术[J].建筑结构,2023,53(06):18-25.