

# 漏斗形支撑体系与半球形结构施工技术

庞玉林, 赵向东, 潘科霖  
(中交一航局武汉建设投资有限公司)

**摘 要:**为解决漏斗形支撑体系与半球形结构不规则组合的钢结构施工问题, 鉴于其独特结构形式和受力体系对杆件定位精度与受力稳定性的高要求, 且国内缺乏相关研究, 以湖北省科技馆新馆沉浸影院钢结构体系为研究对象, 采用 BIM 施工模拟方法, 结合胎架上 8 个液压千斤顶辅助, 成功模拟出微调修正偏差、保障杆件安装受力稳定。实践表明, 漏斗形支撑体系与半球形结构施工技术的研究有效解决了高空拼装对弧形结构安装精度控制及稳定性, 为类似工程施工技术发展提供重要参考。

**关键词:**漏斗形支撑体系; 半球形钢结构; BIM; 液压千斤顶校准; 高空拼装技术

## 0 引言

随着建筑业的发展, 当下建筑及未来建筑结构越来越复杂, 曲线造型、大空间结构的建筑越来越普遍化, 而混凝土结构的抗拉强度较弱, 韧性不足, 难以满足曲线、曲面结构的造型需要, 施工难度及精度控制较大, 对大空间及曲线造型的建筑形成了一定的制约性。而钢结构因其自身的抗拉强度高、韧性强、标准化加工和环保等因素, 借助 BIM 技术的发展, 既能满足工程造型及空间结构的需求, 又以施工周期短, 施工过程环保, 碳排放量低以及可回收等优点, 在现代建筑中举足轻重。但钢结构施工仍面临高空作业风险大、节点连接精度要求高等挑战。针对漏斗形支撑体系与半球形结构组合的特殊性, 结合 BIM 模型坐标参数, 采用液压千斤顶辅助调整单根杆件与合龙后整体结构的位置, 实现了毫米级误差控制。同时通过优化焊接顺序与温度场模拟, 有效降低了异形钢结构的热变形问题, 确保了结构的施工精度, 开发了专用胎架与调整支撑系统。

## 1 工程概况

湖北省科技馆新馆中庭的沉浸式 3D 影院, 是整个建筑的核心亮点之一, 其独特的钢结构设计极具挑战性。影院的内外壳均采用经纬线分割的单层网壳结构, 结构形式不仅美观, 在力学性能上具有一定优势。屋盖中心部分采用经纬线分割的圆管桁架, 在屋盖边缘位置, 使用三角形立体桁架进行封边处理, 增强了屋盖的稳定性和整体性。外围部分同样为经纬线分割的单层网壳,

其中经线采用方管截面, 纬线采用圆管截面, 不同的截面形式适应了结构不同部位的受力需求。

影院的底部结构设计为半球形, 上部屋盖形似锅盖, 支撑体系呈现出漏斗状。影院结构高度为 50.675 m, 漏斗直径为 50.4 m。此造型设计使支撑体系不仅承担着球形影院的全部荷载, 同时兼具美观的功能, 成为建筑外观的重要组成部分。从结构连接方式来看, 支撑体系下端通过外壳稳固地支承于底层混凝土基础, 上端则借助封边三角桁架支承于 4 层主桁架上, 形成了一个完整且复杂的受力体系。整个结构具体由屋盖管桁架、屋顶中弦桁架、环形步道、半球形内壳、漏斗形支撑体系以及连接半球形内壳与漏斗形支撑体系的桁架等部分组成(影院结构分解图见图 1)。

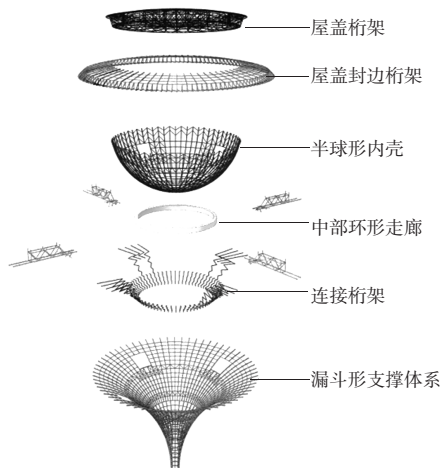


图 1 影院结构分解图

## 2 施工方案

### 2.1 总体施工方案

本项目整体结构复杂,受力体系特殊。考虑到中庭结构下端支座支承于混凝土基础,上端通过4层主桁架限制其侧向位移的受力特点,经过多方案比选,最终确定采用顺装方案。该方案在安装过程中,通过胎架支撑体系,为中庭结构杆件提供必要的竖向及侧向约束,使施工过程中的结构受力体系尽可能与原设计结构相似,有效保障施工过程中结构的稳定性和安全性,采用8台千斤顶作为安装位置调整设备,调整不规则构件的安装定位<sup>[1]</sup>,确保结构造型满足设计要求,立面图见图2。

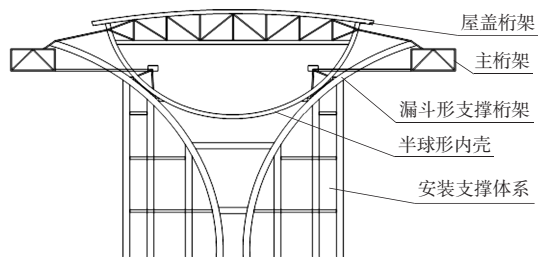


图2 结构立面图

### 2.2 安装顺序规划及安装方案

#### 1) 支撑胎架安装

支撑胎架的搭设质量直接影响到整个结构的安装精度和稳定性。胎架采用高强度钢材制作,根据结构受力特点和安装需求,合理设计胎架的形式和布局<sup>[2]</sup>。在搭设过程中,严格按照设计要求进行施工,确保胎架的垂直度、平整度和承载能力满足要求,胎架安装完成后,将8台千斤顶均匀布置在胎架上,作为安装位置精度调整措施,千斤顶的安装随分段安装同步向上调整布置。

#### 2) 漏斗形支撑体系立柱安装

分3段进行安装,每一段立柱的安装都至关重要。第1段立柱安装时,精确控制其垂直度和定位坐标,通过测量仪器进行实时监测和调整。第2段立柱安装时,确保与第1段立柱的连接质量,采用高强度螺栓和焊接相结合的连接方式,保证连接的可靠性。第3段立柱安装时,将其与主体结构进行连接,形成稳定的结构体系。

#### 3) 半球形底部结构安装

在漏斗形支撑体系立柱安装完成并形成稳定结构后,开始进行半球形底部结构的安装。底部

结构的安装需要考虑其曲面形状和受力特点,采用分段拼装、逐步合龙的方式进行施工。在安装过程中,使用BIM模型进行实时指导,确保各构件的安装位置准确无误。

#### 4) 半球形内壳与漏斗形支撑体系连接桁架安装

连接桁架是实现半球形内壳与漏斗形支撑体系协同工作的关键部件。在安装过程中,严格控制连接节点的质量,确保桁架与内壳和支撑体系之间的连接牢固可靠。

#### 5) 半球形上部结构安装

上部结构的安装在底部结构和连接桁架安装完成后进行。同样采用分段拼装的方式,按照设计要求逐步完成各构件的安装。在安装过程中,注意控制结构的整体稳定性和安装精度。

#### 6) 屋顶中弦桁架安装

屋顶中弦桁架是屋盖结构的重要受力构件,其安装质量直接影响屋盖的承载能力和稳定性。采用合理的吊装方案,确保桁架在吊装和安装过程中的安全。最后进行屋盖管桁架安装,严格控制各管桁架之间的连接精度,通过焊接和螺栓连接等方式,确保屋盖结构的整体性和稳定性。

### 2.3 竖向施工段划分

由于科技馆中庭结构采用“地面拼装+高空安装”的安装方案,为了充分发挥塔吊的性能,同时尽量减少高空作业量,降低施工风险,对竖向施工段进行了合理划分,将有斜腹加强杆的部位均划分至地面拼装。地面拼装可以提供更好的施工条件,便于控制构件的加工和拼装精度,同时减少高空焊接和安装工作量,提高施工效率和安全性。在实际施工过程中,根据不同的施工部位和构件特点,制定适合的施工段划分方案,并严格按照方案执行,确保施工过程有序进行。

## 3 基于BIM模拟的施工流程分析

### 3.1 BIM技术应用目的

本项目钢结构为双曲面结构,其复杂的造型对构件的加工制造和安装精度提出了极高的要求。为了确保最终安装成品能够达到设计要求,采用BIM(Tekla)技术进行建模分析。BIM技术的应用主要目的在于通过建立精确的三维模型对各单元构件进行拆分和分析,预测模型在安装过程中可能产生的偏差以及因大量焊接产生的变形问题,从而提前制定相应的解决方案,避免在实际施工

过程中出现结构合龙偏差和结构变形过大等问题,保证施工质量和进度。

### 3.2 软件协同分析

在施工流程分析过程中,将 BIM(Tekla)技术与 MIDAS Gen 结构设计软件相结合。首先,使用 Tekla 软件建立详细的钢结构三维模型,对各构件进行精确拆分和编号,明确各构件的尺寸、形状和连接方式。然后,将 BIM 模型导入 MIDAS Gen 结构设计软件中,进行安装过程分析。在分析过程中,模拟钢结构在不同施工阶段的受力状态,对支撑体系进行全面验算,重点关注应力集中部位和薄弱部位的构件及节点。通过分析,对这些部位进行优化设计和适当补强,确保整个结构在施工过程中的安全性和稳定性<sup>[9]</sup>。如在对漏斗形支撑体系立柱的分析中发现某些节点在施工过程中应力集中较为明显,通过优化节点设计、增加加强板等措施,有效降低节点应力,提高结构的可靠性。

## 4 基于 BIM 的安装流程模拟

### 4.1 支撑体系胎架安装

在进行支撑体系胎架安装前,首先根据 BIM 模型确定胎架的位置和布局。胎架基础采用混凝土浇筑,确保基础具有足够的承载能力。胎架主体结构采用型钢制作,各构件之间通过焊接或螺栓连接。在安装过程中,严格按照设计要求控制胎架的垂直度和水平度,利用全站仪等测量仪器进行实时监测和调整。安装完成后,对胎架进行全面检查和验收,确保胎架能够安全可靠地支撑钢结构构件。

### 4.2 漏斗形结构立柱安装

漏斗形结构立柱安装分 3 段进行。第 1 段立柱安装时,将其准确吊装到胎架上预先设定的位置,通过调整胎架上的千斤顶和缆风绳,精确控制立柱的垂直度和定位坐标。在立柱底部与胎架之间设置垫板,确保立柱与胎架之间的连接紧密。安装完成后,对立柱的垂直度和定位坐标进行复测,误差控制在允许范围内。第 2 段立柱安装时,采用与第 1 段立柱相同的方法进行吊装和定位,重点保证两段立柱之间的连接质量。在连接部位,先采用高强度螺栓进行临时固定,然后进行焊接。焊接过程中,按照预先制定的焊接顺序进行,以减少焊接变形。第 3 段立柱安装时,将其与主体结构进行连接,形成稳定的支撑体系。在连接过

程中,注意调整立柱的位置和角度,确保与主体结构的连接紧密可靠。

### 4.3 漏斗形结构外壳安装

漏斗形结构外壳安装分 5 个阶段进行。在安装每个阶段的外壳构件时,首先根据 BIM 模型确定构件的安装位置和顺序。利用塔吊将外壳构件吊装到指定位置,通过胎架上的液压千斤顶和手拉葫芦等工具进行微调,确保构件的安装精度。在外壳构件之间的连接节点处,采用焊接和螺栓连接相结合的方式,保证连接的强度和可靠性。在安装过程中,对每个阶段的外壳结构进行测量和监测,及时调整安装偏差,确保整个漏斗形结构外壳的形状和尺寸符合设计要求。

### 4.4 其他部分安装

在完成漏斗形结构外壳安装后,按照 BIM 模拟的安装流程,依次进行漏斗形结构内壳、天桥连廊、环形走道、环形封边桁架、半球形结构、屋顶中弦网壳和锅盖形屋顶管桁架的安装。在每个部分的安装过程中,都充分利用 BIM 模型的指导作用,严格控制各构件的安装精度和连接质量。如在半球形结构安装过程中,由于其曲面形状复杂,通过 BIM 模型进行精确的定位和放样,采用分段拼装、逐步合龙的方式进行施工,确保半球形结构的安装精度和外观质量。

### 4.5 胎架拆除

在所有钢结构构件安装完成并经过验收合格后,进行胎架拆除。胎架拆除按照先上后下、对称拆除的原则进行,避免因拆除顺序不当导致结构受力不均,影响结构安全。在拆除过程中,利用塔吊将胎架构件逐步吊离现场,确保拆除工作安全有序进行。拆除完成后,对现场进行清理,为后续的装修和设备安装等工作创造条件。

## 5 屋顶桁架安装

### 5.1 屋顶桁架结构特点

屋顶主桁架均由圆钢管组成,最大截面为  $\phi 245 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ ,虽然单个构件重量较轻,但由于其处于内外壳正上方,下部杆件密集,安装空间有限,给施工带来了较大难度。在安装过程中,需要考虑桁架的吊装方案、安装顺序以及与其他构件的连接方式等问题,确保屋顶桁架能够安全、准确地安装到位。综合考虑屋顶桁架的结构特点和施工现场条件,决定采用整榀主桁架吊装的方式,先吊装南北向桁架,再吊装东西向桁架,形

成稳定的十字结构,对于余下主桁架按序对称安装,环形次桁架由中心向外安装的方法。在吊装过程中,注意控制桁架的垂直度和定位坐标,确保与已安装构件的连接准确无误。环形次桁架由中心向外安装,在安装过程中,逐步调整次桁架的位置和角度,保证与主桁架的连接紧密。

## 5.2 安装过程控制

在屋顶桁架安装过程中,严格控制各环节的施工质量。在单品桁架构造分析阶段,研究桁架的结构特点和受力性能,确定合理的吊装方案和安装顺序。在吊装过程中,对桁架的变形进行实时监测,一旦发现变形超过允许范围,立即停止吊装,并采取相应的调整措施。在桁架与其他构件的连接过程中,确保连接节点的质量,采用高强度螺栓和焊接相结合的方式,保证连接的可靠性。如在主桁架与环形次桁架的连接节点处,先采用临时定位板进行临时固定,然后进行焊接,焊接完成后对节点进行探伤检测,确保焊接质量符合要求<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

本文深入研究了漏斗形支撑体系、半球形底部结构及大跨度钢桁架屋盖的施工方法与关键技术。通过采用分解组合的方式,总结了从工程概

况分析、施工方案制定、基于 BIM 模拟的施工流程分析到具体安装过程的每一个环节。在研究过程中,结合丰富的施工经验,运用结构分析软件和 BIM 模拟技术,对安装方案进行了全面优化,通过实际工程应用,验证了改进后施工方案的合理性和有效性。

该施工技术的成功应用,有效保障了施工过程中稳定的受力体系,大大降低了施工安全风险,同时可确保钢结构安装精度达到毫米级。与传统施工方法相比,施工效率提高约 20%,为项目的顺利交付奠定了坚实基础。同时,研究成果为后续国内类似复杂钢结构工程的施工提供了充分的理论依据和实践经验,对推动相关工程施工技术的发展具有重要意义。未来,随着建筑技术的不断发展,针对此类复杂钢结构的施工技术还将不断创新和完善,以更好地满足建筑行业日益增长的需求。

## 参考文献:

- [1] 中国钢结构协会. 建筑钢结构施工手册[M]. 中国计划出版社, 2002.
- [2] GB 50755—2012 钢结构施工技术规范[S].
- [3] JGJ 7—2012 空间网格结构技术规程[S].
- [4] 赵伟佳. BIM 在湖北省科技馆新馆建设中的关键技术研究与应用[J]. 工程建设与设计, 2023, 45(3): 123–128.