

大跨度异形曲面钢结构与幕墙施工技术研究

王 嘉

上海建工五建集团有限公司, 上海 200063

[摘要]以上海市普陀区职工文体活动中心工程为例, 围绕大跨度异形曲面钢结构与幕墙施工工艺, 重点研究了钢结构液压同步提升技术、异形曲面玻璃和铝板加工及安装控制技术, 实现了文体活动中心项目的钢结构及异形曲面玻璃和铝板的精确安装, 取得了良好的经济效益和社会效益, 为今后类似工程的施工提供一定参考。

[关键词]异形曲面; 钢结构; 液压同步提升; 曲面玻璃

DOI: 10.33142/ec.v6i2.7737

中图分类号: TU17

文献标识码: A

Research on Construction Technology of Large-span Special-shaped Curved Steel Structure and Curtain Wall

WANG Jia

Shanghai Construction No. 5 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200063, China

Abstract: Taking the project of Shanghai Putuo District Staff Recreation and Sports Center as an example, focusing on the construction technology of large-span special-shaped curved steel structure and curtain wall, this paper focuses on the hydraulic synchronous lifting technology of steel structure, special-shaped curved glass and aluminum plate processing and installation control technology, realizing the precise installation of the steel structure, special-shaped curved glass and aluminum plate of the cultural and sports center project, and achieving good economic and social benefits, so as to provide some reference for the construction of similar projects in the future.

Keywords: irregular surface; steel structure; hydraulic synchronous lifting; curved glass

党的十八大以来, 习近平总书记多次强调, “体育是提高人民健康水平的重要途径, 是满足人民群众对美好生活向往、促进人的全面发展的重要手段”。近年来, 全国各地越来越注重人民健康水平提升和精神文化发展的需求, 逐步加快公共惠民文体项目的建设。此类项目建筑大多呈现不规则的异形结构造型, 施工难度较大。本文以上海市普陀区职工文体活动中心项目为例, 对异形钢结构的吊装、异形曲面中空 LOW-E 玻璃和曲面穿孔铝板装饰施工工艺进行研究, 以期为今后类似案例提供一定的借鉴意义。

1 工程概况



图1 上海市普陀区职工文体活动中心整体效果图

普陀区职工文体活动中心新建工程, 位于普陀区石泉社区(W060402 单元) B1-9 地块, 南侧为华池路, 北侧为沪宁铁路, 东侧为光新路, 西侧为新体育广场。建筑分为地上

4 层和地下 2 层, 设置体育功能用房、文化功能用房、地下停车库和各类辅助用房等, 建筑总面积为 56159.79 平方米。建筑地下部分为现浇钢筋混凝土框架结构, 桩筏基础, 地上部分采用钢框架结构, 建筑整体效果如图 1 所示。

2 项目重难点分析

2.1 钢结构吊装

本项目钢结构跨度大、吊装难度较高, 主体钢结构主要为异型局部双曲面结构, 标准构件少, 构件加工复杂多变。项目主要钢构件包括框架钢柱、钢梁、桁架, 楼板采用钢筋桁架楼承板, 总的用钢量约 9300 吨。钢柱大部分集中布置在轴线交点位置, 柱间距控制在 10m 内。单根钢梁最大跨度为 28.689m, 重量为 29.346 吨。单榀桁架最大跨度为 60m, 重量为 32 吨。钢桁架吊装采用液压同步系统分区整体提升, 单次提升重量高达 500 吨。

2.2 异形曲面玻璃和铝板幕墙施工

本项目异形曲面玻璃和铝板加工难度大、安装精度要求高。异形曲面结构幕墙的防水、防渗漏和抵抗变形是深化设计阶段及施工安装过程的重要控制点, 涉及结构构件三维建模深化、加工及安装拼接方法、防渗漏处理等多项环节。

3 项目关键技术

3.1 钢结构整体液压同步提升技术

本项目钢结构安装总体施工流程为: 预埋钢柱柱脚螺栓 → 分区安装地下室钢柱 → 安装地上一节钢柱和一

层顶板钢梁 → 安装地上二节钢柱和二层顶板钢梁 → 安装地上三节钢柱和三层顶板钢梁 → 安装地上四层屋面梁 → 地上四层屋面桁架拼装及提升 → 安装屋面小构件。上述钢结构安装整体流程中，最为关键的步骤是屋面桁架整体提升，本项目中采用了液压同步提升技术以实现钢结构屋面桁架的整体提升。

液压同步提升技术采用液压提升器作为提升机具，柔性钢绞线作为承重索具，具有安全、可靠、自身重量轻、运输安装方便、中间不必焊接等独特优点。液压提升器两端的楔型锚具具有单向自锁作用，当锚具工作（紧）时，会自动锁紧钢绞线；当锚具不工作（松）时，钢绞线可上下活动。液压提升的完整过程如图 2 所示。本技术还采用了行程及位移传感监测和计算机控制，通过数据反馈和控制指令传递以实现全自动的同步动作、负载均衡、姿态矫正、应力控制、操作闭锁、过程显示和故障报警等多种功能。操作人员可在中央控制室内通过液压同步计算机控制系统的人机界面进行液压提升过程及相关数据的观察和控制指令的发布。

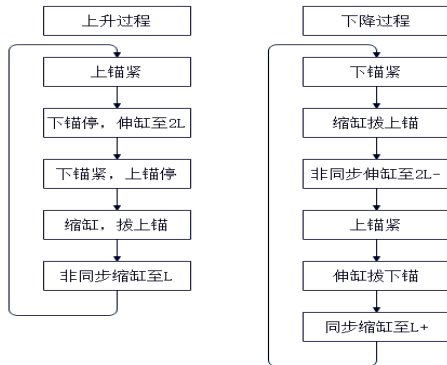


图 2 液压提升过程示意图

钢结构屋面桁架整体提升分区进行，提升顺序依次为 4 区、1 区、和 3 区，最后提升超塔吊起重能力的钢梁，屋面施工分区如图 3 所示。本项目对钢结构胎架拼装、提升前、初始提升过程、正常提升过程、提升就位、合拢后和卸载结束等施工阶段进行全过程的监测控制，实现提升架等结构的同步性和安全性。

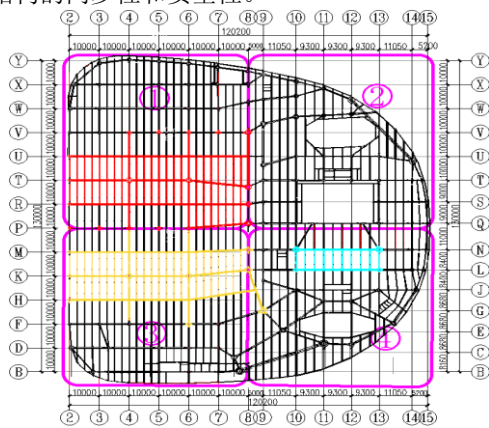


图 3 屋面施工分区示意图

3.2 异形曲面玻璃和铝板安装技术

针对本项目幕墙的异形曲面造型，采用了曲面中空夹胶钢化 LOW-E 玻璃、曲面 3mm 厚铝板、3mm 厚穿孔铝板。玻璃和铝板的曲面尺寸偏差在 2mm 以内，确保其外形尺寸和钢构件的吻合安装。

幕墙玻璃大面位置采用幕墙为钢龙骨框架式布局；竖向为显明扣盖，横向为隐框。玻璃横边首先在加工厂通过结构胶与铝合金副框粘接，合片板块运至现场后通过分段式铝合金压板压住玻璃副框从而与横梁相连。板块竖向通过铝合金压板与幕墙立柱相连，可实现有效机械固定，防止结构胶失效导致玻璃脱落。主立柱受力形式为单跨简支梁，通过钢角码在层间与主结构相连，主跨距 4m~8.4m，玻璃横向分割多为 1.2 米。常规板块规格：玻璃板块均为不等边 4 边型，板块横向分格不大于 1250mm，高度不大于 2850mm。

3.2.1 单曲面和隐框幕墙构件加工及安装控制

为了准确展现建筑的异形造型，本项目利用有限元软件 ANSYS 对建筑结构的每个构件进行静力学和动力学分析。在符合规范的前提下，选择安全、经济的结构断面，确保建筑外观呈现曲面弧形美的要求。

考虑到本项目结构体系的形体空间变化复杂，一方面要保证龙骨结构视觉造型上的艺术性，另一方面还要控制钢结构加工和安装的误差，为解决该难题，本项目从三方面采取措施。首先，在设计阶段采用专业曲面建模和方便尺寸精度定位的犀牛 Rhinoceros 7 建模软件，精准确定建筑弦体曲面的位置和整体结构的空间参数，以保证施工图设计和构件加工工艺的精确度。其次，本项目支撑结构中的钢管均为空间弯曲，工厂加工设计时采用专用三维刚性胎模来控制 and 检测几何尺寸，保证质量要求。最后，每根钢管的现场安装定位坐标均用激光经纬仪测放和跟踪测量，且通过人工校核同一水平高度龙骨的中心距离，以确保后续玻璃和铝板的安装准确无误。针对钢结构局部双曲面造型的加工和安装，均按照三维模型进行控制加工单个钢构件，所有构件的曲率严格按照设计尺寸进行加工，同时做好弯弧校正控制。钢构件的打孔、焊接、涂装均严格按照设计要求进行。特别是钢构件上表皮平、次网格方钢管交汇处链接预制节点的加工，均铸造单独成型。

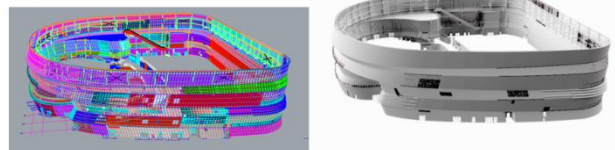


图 4 犀牛软件建模曲面图

3.2.2 异形曲面玻璃和铝板光滑过渡质量控制

安装前采用现场三维定位，在墙面分单元加工完毕再吊装的方式进行施工。主体钢结构安装完成后重点做好柱脚支座位置加劲板设计及固定。特别是 V 字叉柱高度高、

在运输过程避免产生永久变形,同时确保临时结构的稳定性,做好现场拼装支撑。

本工程曲面玻璃顶安装控制方法:

本工程幕墙均为曲面铝板、玻璃,如何将这些玻璃拟合成理论模型光滑过度的形状,保证最大程度的吻合度,是一件极其复杂而细致的工作。

从安装角度来说,整体形状的吻合取决于每片玻璃、铝板的正确定位,而要保证单片玻璃、铝板的正确定位,就要找出每块玻璃、铝板的特征点(即拐点)的理论位置,拐点的理论空间位置可以利用三维空间坐标来表示。同时由于玻璃、铝板都是附着在龙骨上,要保证玻璃、铝板面形状,首先就要保证龙骨面的形状,玻璃、铝板就相当于在龙骨骨架上覆盖的一层皮,准确定出龙骨的位置和弧度,也就保证了玻璃、铝板的正确定位。

在安装过程中采用全站仪三维坐标放样法与直角坐标空间定位结合的方案进行定位放线,同时将数据输入电脑,依靠专用程序进行跟踪校核,并随时调整以保证安装的准确度,确保了钢幕墙支托、固定中节点、支撑副框、钢结构施工的顺利完成。

由于该结构体系为壳体空间变化,形体复杂,一方面要保证龙骨结构视觉造型上的艺术性,另一方面还要控制钢结构加工、安装的误差。在结构设计中采用专用 3D 建模软件,准确确定壳体曲面位置和结构的参数,以保证施工图设计和加工工艺的精确度;工厂加工时采用了三维刚性胎模控制、检测几何尺寸保证每根钢管的空间弯曲度;现场安装时将每个幕墙支托、固定中节点、每根钢管的电脑定位坐标用全站仪三维空间定位,再用激光经纬仪配合跟踪测量,以确保玻璃安装时准确无误。

空间异形钢结构安装测量-全站仪三维坐标放样方法:在壳体的 A 区及六个分区的玻璃下料单中,运用全站仪、反射贴片对已安装完成的钢结构进行实测,建立准确的钢结构电脑三维立体图,可保证下料单的精度,避免钢化玻璃因下料单误差而造成的损失。

全站仪三维坐标放样法的标高放样采用无仪高、反射贴片代替棱镜的三角高程测量,精度、效率较高,在空中定位测量有较好效果,在复杂的空中结构安装中较水准仪+钢尺法应用更便捷。

(1) 根据该工程的特点和平面图的具体情况,以壳体多功能厅为独立施工坐标系为基准,计算各钢构柱中心和控制点在该坐标系下的理论坐标,运用极坐标原理对钢柱进行测量放样;

设 O (X₀, Y₀, Z₀) 为测站点, P (X_p, Y_p, Z_p) 为放样点, i₀ 为仪高, v_p 为棱镜高, L 为平距, S 为斜距, V 为天顶距, α 为水平方向值,则 P 点相对测站点的放样参数为:

$$L^2 = (X_p - X_0)^2 + (Y_p - Y_0)^2$$

$$\tan \alpha = (Y_p - Y_0) / (X_p - X_0)$$

$$\tan V = L / (Z_p + i_p - Z_0 - v_p)$$

$$S = L / \sin V$$

(2) 运用全站仪、反射贴片对已初步安装的钢构件进行检测、校正;

(3) 运用全站仪、反射贴片对已安装完成的钢构件进行实测,运用全站仪数据采集器、接口技术使全站仪和计算机二者相联,在计算机上建立准确的钢构件三维立体图,并以此做为玻璃下单的依据。

全站仪三维坐标放样法可以同时进行多根钢结构柱的放样、检校,提高了工作效率,提高了测量精度,在空间结构复杂的工程放样、检测中,应得到推广应用。

曲面玻璃幕墙安装。对每个工厂加工运至现场的玻璃板块成品,我们对每个区域、每个板块的编号都是唯一的,进行人工分选,放置到垂直运输的位置内。但是原则是尽可能做到按区域运输到现场,便于现场的管理和施工措施的解决。把玻璃板块垂直吊运至壳体的卸货平台上,然后用人工即刻安装。注意玻璃在吊运过程中,必须系好揽风绳,确保吊运的安全。玻璃在安装时必须对好钢龙骨的中线,空留出设计要求的缝隙,让缝隙圆滑、大小一致、美观等,玻璃压块保证数量符合图纸要求,不能漏压、少压玻璃压块,或者不压紧玻璃压块等。在玻璃安装完成后,清洁玻璃缝隙,使硅胶接触处干净,密封胶要密实,厚度符合图纸要求,胶封圆滑、过渡自然等。打胶时采用绳梯,注意安全

从上所叙,要达到设计要求的异形形状,关键在于龙骨的定位安装。因此必须将玻璃、铝板的理论空间位置的三维坐标返到龙骨上表面上,首先要确定出龙骨空间位置的三维坐标。确定龙骨交接位置的定位点,就用经纬仪投放到局部区域定位点上,从整体而言,这样也就保证了玻璃、铝板面缝隙的顺直。该工程的玻璃、铝板都是局部通过玻璃付框、铝角码固定的,但不同一区域上的铝龙骨是由不同高度位置的不同半径弧度的龙骨构成的,的形状也主要是由这些不同半径弧度的龙骨来决定的,因此首先必须确定出不同半径的龙骨的起点和端点。将不同位置不同半径弧度的龙骨的龙骨线条的上表皮中心位置的起点和端点的理论三维坐标提供出来并编号,通过全站仪极坐标法实地放样出来,用记号笔标好位置和相应编号,确定了不同半径弧度的龙骨的安装位置。安装前,不同半径的龙骨都要实地放样,每根龙骨要进行比照,符合标准才能进行安装。径向铝方通线条通过转接件进行起点和端点的定位安装,起点和端点用螺栓固定好后,由于弧度都已在地面经过检查和校正,达到标准要求,因此中部转接件就按弧的高度的进行调节安装固定。

总的来说,异形玻璃面的整体形状取决于线条龙骨面的形状。根据该工程特点,玻璃、铝板是固定在线条龙骨面上,控制好每一条龙骨的定位安装,就保证了龙骨面的

整体形状，也就确保了玻璃面、铝板面和理论模型的吻合度。缝隙通过全站仪定点法进行控制，确保达到在同一个切面上的精准度要求。同一条曲线形状又通过控制不同半径的弧度和弧度的起点及端点来进行拟合，起点和端点主要采用全站仪极坐标法放样出来，并用不同的点位进行复核，确保达到精度要求。采用的主要仪器精度指标如下：TDJ2（即2秒光学经纬仪），RTS238 全站仪：2 mm+3PPM。

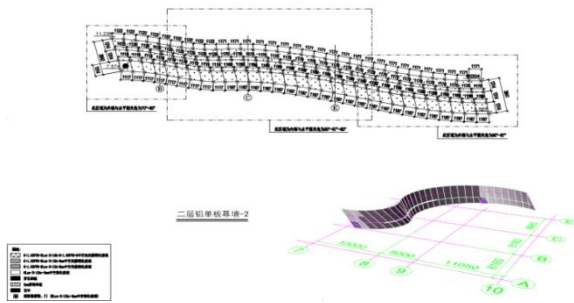


图1 TDJ2（即2秒光学经纬仪）

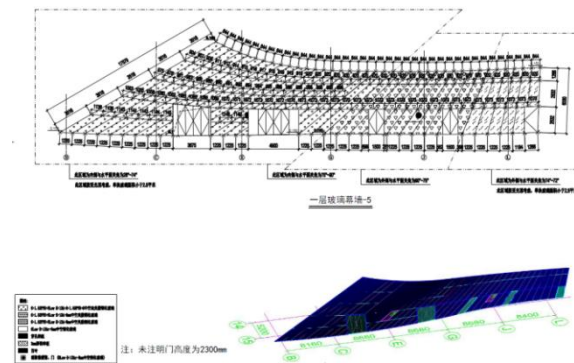


图2 RTS238 全站仪：2 mm+3PPM

4 结语

钢结构主体，结合异形曲面玻璃铝板装饰板材，具有结构安全性能高、施工速度快、装饰美观、透光性好、强度高、耐候性好等多方面优点，被广泛应用于文体中心、体育馆、机场、车站、会展中心等大跨度公共建筑工程项目中。通过本项目的钢结构液压同步提升安装、曲面玻璃装饰铝板的深化加工到现场施工全过程管控，对钢结构异形曲面结构的施工工艺有了更深层次的了解。

【参考文献】

- [1]董栓,贾俊杰,徐宏香,等.大跨度空间钢结构液压整体同步提升施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2012,000(34):1-8.
- [2]陈德龙.钢结构液压整体同步提升施工技术研究[J].价值工程,2018,37(31):2.
- [3]李文明,张洪亮,张帆,等.120t屋面钢网架整体液压同步提升施工技术[J].施工技术,2010(2):3.
- [4]母鉴楠,张锋.洛阳奥体异形曲面屋面铝单板装饰层施工工艺[J].山西建筑,2022(19):048.
- [5]沈海如.三维曲线形玻璃铝板组合式幕墙施工技术研究[J].建筑知识:学术刊,2014(1):3.

作者简介：王嘉（1989.7-），男，毕业院校：天津大学；所学专业：工程造价； 就 职 单 位：上海建工五建集团有限公司，职务：项目经理，职称级别：中级工程师。