

DOI: 10.7672/sjgs2020100012

国家速滑馆项目曲面玻璃幕墙设计与施工*

张怡¹, 罗惠平¹, 苏振华¹, 苏李渊¹, 张超¹, 贾月云¹, 张道博², 冯鹏², 孙达¹

(1.北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2.清华大学, 北京 100084)

[摘要] 国家速滑馆天坛轮廓曲面玻璃幕墙造型复杂、体量大、功能繁多、受外界影响大, 给设计和施工带来一系列难题。介绍全过程运用 BIM 技术参与设计和指导施工关键工作, 通过应用可调节连接构件实现幕墙单元误差控制, 最终达到预期流畅的玻璃幕墙视觉效果。

[关键词] 钢结构; 体育馆; 玻璃幕墙; 建筑信息模型; 连接件; 设计; 施工技术

[中图分类号] TU767

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2020)10-0012-04

Design and Construction of Curved Glass Curtain Walls of National Speed Skating Oval Project

ZHANG Yi¹, LUO Huiping¹, SU Zhenhua¹, SU Liyuan¹, ZHANG Chao¹, JIA Yueyun¹, ZHANG Daobo², FENG Peng², SUN Da¹

(1. Beijing Urban Construction Group Co. Ltd., Beijing 100088, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: National Speed Skating Oval has a unique-shaped curved glass curtain walls with complicated shapes, large volume, many functions, which is greatly affected by external influence factors. The key steps of using BIM technology to participate in the design and guidance of construction in detail are introduced. Adjustable connecting members are used to achieve error control of the curtain wall units. The expected smooth visual effect of glass curtain wall is finally achieved.

Key words: steel structures; gymnasium; glass curtain walls; building information modeling (BIM); connecting members; design; construction

1 工程概况

国家速滑馆外幕墙为天坛轮廓造型, 立面连续弯曲, 采用复杂网壳结构体系(预应力拉索+S形钢龙骨+水平钢圆管龙骨), 面材为弯弧玻璃、平板玻璃、圆管玻璃灯带^[1], 玻璃幕墙外立面由 22 根“冰丝带”环绕, 平均每条丝带长约 622m(见图 1, 2)。外立面 2 层以上为天坛轮廓曲面幕墙系统, 总玻璃块数 3 360 块, 单曲面玻璃块数 1 440 块, 面积约为 8 800m², 平板玻璃 1 920 块, 面积约为 5 900m², 随着屋顶轮廓的高低变化水平延展, 造型复杂, 使得整个建筑造型得以完美体现晶莹剔透、冰的质感^[2-3]。

通过对柔性单索与刚性网壳组合的结构进行力学与变形分析, 及对玻璃板块进行合理优化, 使

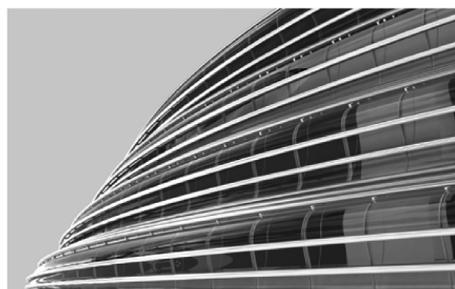


图 1 国家速滑馆幕墙立面效果

用规则的有理化单元拟合连续流畅的建筑形体。设计中采用 BIM 技术, 使节点更优化, 确保优雅外形和富于光影变化的视觉效果。

2 设计原则

国家速滑馆曲面玻璃幕墙设计严格遵循 GB/T 21086—2007《建筑幕墙》^[4] 标准, 具体原则如下。

2.1 安全可靠原则

体育场馆作为大型公共建筑, 安全是首要重点考虑因素。玻璃幕墙设计时, 充分考虑风荷载、雪

* 国家重点研发计划(2019YFF0301500)

[作者简介] 张怡, 项目经理, 高级工程师, E-mail: 53738649@qq.com

[通讯作者] 苏振华, 工程师, E-mail: 1004719688@qq.com

[收稿日期] 2020-03-17

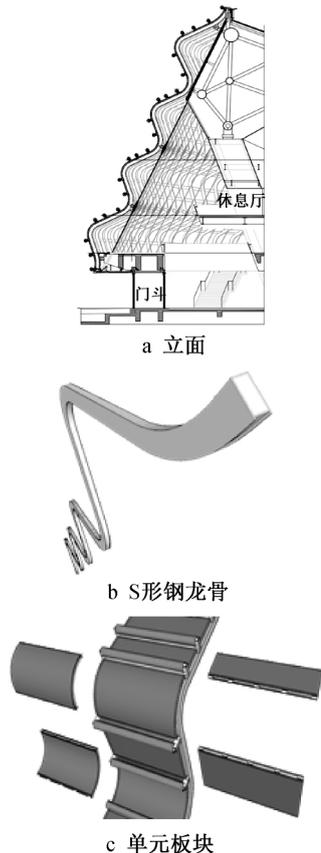


图2 国家速滑馆玻璃幕墙结构示意图

荷载、地震作用、温度变形及施工荷载等因素对幕墙的影响,设计安全系数完全满足工程安全、可靠要求^[5-6]。

2.2 结构轻巧稳定原则

国家速滑馆玻璃幕墙系统在满足结构强度要求的前提下,全力追求轻巧明快的建筑效果。

2.3 环保节能原则

从选材类型、幕墙形式、结构方案、保温隔热设计等多方面进行详细、周密的研究和设计,从而满足环保节能的原则及要求。

2.4 可拆卸更换、维修方便原则

在国家速滑馆正常使用阶段,应考虑幕墙结构局部受损、需更换的情况。幕墙板块拆卸与更换能否实现、方便与否,直接关系到幕墙功能。本工程幕墙结构要求在使用过程中方便拆卸与更换,且不影响幕墙正常使用。

2.5 经济性原则

在以上原则得到充分保证的基础上,保证幕墙功能完善、造价合理。

此外,幕墙结构各项物理特征还需达到以下指标:抗风压性能2级、水密性3级、气密性3级、平面内变形性能3级、热工性能6级。

3 玻璃幕墙设计、施工重难点分析

3.1 体量大

国家速滑馆场馆外形近似椭圆柱体,屋盖为马鞍形双曲面金属屋面,22根透明圆管玻璃水平缠绕在幕墙表面(正面为TP6+1.52SGP+TP6夹胶弯弧玻璃,背面为高亮白色4mm厚铝复合板),并在玻璃隆起的地方相对密集,形成疏密有致的水平线。

整个工程天坛轮廓曲面玻璃幕墙面积约17896m²,共3360块玻璃单元板块,冰丝带总长度约13998.6m。整体体量大,给设计、施工均带来一定困难。

3.2 加工困难

幕墙、钢龙骨体系加工困难。本工程幕墙大部分玻璃为弯弧玻璃,包括单元弯弧玻璃(外凸、内凹)和冰丝带玻璃。单元弯弧玻璃属于浅弯玻璃,冰丝带玻璃形状为1/2圆的深弯玻璃。

弯弧玻璃加工尺寸均不相同,无法流水线生产大面弯弧,故采用定制化模具,确保尺寸精度满足要求。幕墙安装精度在毫米级,对玻璃尤其是弯弧玻璃的加工精度要求更高。

3.3 安装复杂

速滑馆平、立面均不规则,标高控制点复杂,受外部环境(如施工过程中的风荷载、温度变形、楼层间变形)影响较大^[7],为保证玻璃幕墙每块玻璃安装质量精良,接缝横平竖直,完全满足气密性、水密性要求,达到建筑设计效果,设计、施工难度大。

3.4 密封性问题

幕墙结构主要工作在现场完成,受条件限制,以及框架结构变形、耐候密封胶老化及施工破坏等因素影响,幕墙易产生密封性问题,引发雨水渗漏,幕墙密封性施工是重点^[8]。而本工程曲面幕墙外形奇特,更给施工密封性带来挑战。

3.5 测量定位难

本工程建筑形体由连续天坛轮廓曲面组成,为达到安装精度要求,须对每层平面、每块幕墙曲面进行定位、放线。标高控制点复杂,受外部环境影响较大。

3.6 钢龙骨和钢索变形影响

本项目主体钢结构跨度大,钢结构构件加工和组样偏差风险大,主体结构施工和幕墙安装均会产生变形位移。钢龙骨跨中连接的主体拉索产生的变形也会导致曲面幕墙钢龙骨产生二次变形。因此,幕墙设计、施工过程中吸收和消化变形位移量是设计、测量放线、施工重点。

4 设计、施工关键技术

4.1 设计

对幕墙进行BIM整体建模,保证模型和施工图

同步进行,协调设计,充分利用有限元软件,调整优化幕墙形状^[3,9]。在保证外观的前提下,合并面材相似尺寸,降低加工难度。具体措施如下。

1) BIM 深化设计使用 Rhino & Grasshopper 和 Catia 软件深化模型,具体步骤为:①模型深化分析、确定设计与施工方案;②各专业交叉作业问题检查;③曲面部位的细化分析处理;④生成三维参数基础;⑤提取三维构件参数。

2) 投入具有丰富设计经验的工程设计人员,设计兼容性更强的幕墙系统。

4.2 材料供应

针对玻璃幕墙主要材料,即玻璃、钢龙骨、铝型材,选择规模大、行业地位高、口碑好的供应商,保证材料质量,供货周期满足工程需要。严格确定各材料生产工序、计算生产周期、复检生产成品、预留备用生产流水线,同期前往材料供应商工厂进行检查、监造和调研,出具相应报告并反馈给供应商,保质保量地完成材料供应。

4.3 材料加工

对于玻璃幕墙原材料后加工处理,采取如下措施保证玻璃幕墙单元最终质量与安装精度。

1) 要求厂家严格按模型输出数据加工。

2) 玻璃检测时,重点检查玻璃四边和对角线尺寸,幕墙设计人员驻厂参与检测。

3) 加强管理,保证工厂玻璃注胶质量合格。

4) 波浪形钢龙骨采用 Tekla Structures 整体建模,从模型输出构件尺寸,保证钢结构精度。

5) 采取焊接热应力释放措施,防止焊接变形。

6) 使用钢尺复测钢结构加工尺寸,保证加工精度。

7) 弯铝型材与波浪形钢结构的配合直接影响玻璃的安装精度及其外观效果,故铝型材拉弯后,使用全站仪复测加工尺寸,保证加工精度。

4.4 测量定位

为保证曲面玻璃幕墙测量精度和工程质量,测量方案为:建立测量控制网→传递控制点→测设三维控制点标高→对三维控制点复测检查→对曲弧幕墙精准放线定位→监控测量幕墙安装质量。

4.4.1 综合测量放线法

采用三维坐标定位法与 GPS 空间定位技术相结合的测量放线方法。

1) 三维坐标定位法 通过平面二维确定定位点,利用垂直传递和标高测量确定定位点标高,精确完成三维空间点定位测量。

2) GPS 空间定位技术 本工程为时变“四维”空间结构,采用 GPS 空间定位法进行测量。该技

术不存在误差累积,精度高、速度快、效率高、全天候、不受天气影响,无须通视,点位不受限制,可同时提供平面、高程、三维空间坐标数据及时空坐标变化数据,适用于造型复杂、大跨度等空间时空变形位移的钢结构幕墙设计、施工。GPS 测量精度累计不超过 $\pm(0.3\sim 1)$ mm,满足建筑测量放线精度要求。

4.4.2 实时三维监测校核

充分运用 BIM 建筑三维模型、Rhino 软件和电子仿真模拟技术,精确计算三维空间坐标数据,模拟幕墙施工工序,监测幕墙安装精度,复核幕墙空间数据,为现场施工提供准确的数据来源。对设计数据、施工数据实时反复校核,保证施工测量数据正确,整体施工效果满足设计要求。

4.5 适应钢结构变形措施

为保证适应主体钢结构变形,提高幕墙工程施工质量,从幕墙设计、施工放样、施工安装、施工结构计算和钢结构软硬区划分等方面采取有效措施。

4.5.1 幕墙设计

1) 采用电子模拟技术,对主体钢结构设计和施工变形进行仿真模拟分析,正确计算结构设计和施工变形量,结合生产加工和施工安装进行预变形控制,减少结构幕墙施工变形量。

2) 运用真实的建筑三维建模为幕墙施工测量放线和幕墙板块分格下料提供精确数据。

3) 应用幕墙收口实测调整设计法,吸收结构在幕墙施工中产生的变形量。

4) 幕墙板块连接考虑结构偏差影响,预留大于变形量 3 倍值进行设计。

5) 对于幕墙板块,支座连接预留三维六度可调节量,节点按可调节方案进行设计。

4.5.2 施工放样

1) 测量放线时间选择在主体钢桁架安装卸载后进行,避免卸载变形影响放线精度。

2) 施工放线采用三维空间定位法进行,以便幕墙施工精确放线和对板块安装质量监测与精确定位。

3) 采用全站仪、经纬仪进行施工测量放线。

4) 测量放线时间选择在 7:00—10:00 或阴天无大风天气,减少温度和大风对放线精度的影响。

5) 放线及监测过程中发现结构偏差及时反馈给总包和设计人员研究预调值。

4.5.3 施工安装

1) 结构小偏差利用节点三维可调消化吸收。

2) 偏差较大时采用增减支座长短的方式调整。

3) 施工中加强过程动态监测,及时纠正。

4) 合理选择收口部位和施工顺序。

5) 收口板块采用实测、定位加工法,加工收口板块以吸收结构尺寸偏大或偏小的变形量。

4.5.4 施工结构计算

通过施工结构计算,控制安装过程的加载顺序,尽量减少主体结构变形。

4.6 适应钢索变形措施

对影响钢龙骨变形的主体拉索,采用定制连接钢耳板的方案吸收尺寸偏差,如图3所示。根据现场返尺情况定制连接钢耳板,沿钢龙骨上、下移动耳板,可吸收上、下±30mm偏差。

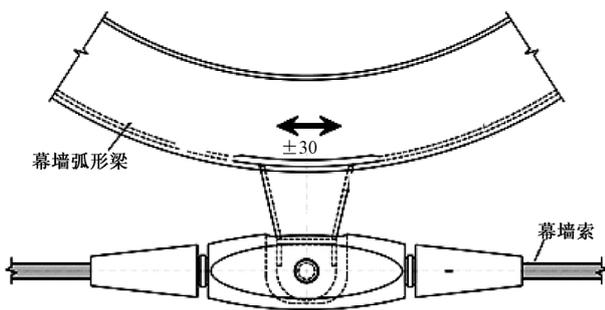


图3 幕墙拉索与钢龙骨连接节点

若出现钢龙骨中心与主体拉索中心偏心时,可左、右移动耳板,吸收左、右±10mm偏差。根据现场返尺情况定制连接钢耳板,沿钢龙骨前后方向调节耳板大小,可吸收上、下±25mm偏差。幕墙拉索与钢龙骨连接节点剖面如图4所示。

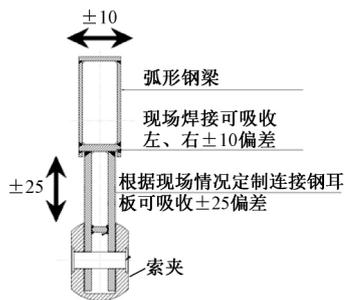


图4 连接节点剖面

4.7 玻璃幕墙安装

玻璃横向施工为施工段同时对向施工,预留4个施工段接缝处的竖向玻璃吸收安装误差。此4处竖向玻璃现场返尺后,将数据导入BIM模型,调整模型后重新输出加工数据,按实测数据加工后安装,提高幕墙安装精度及幕墙气密性、水密性。

玻璃幕墙单元板块通过可调节连接件固定在幕墙横钢龙骨上,定位主要依赖幕墙横钢龙骨的精确定位。在玻璃幕墙单元板块初步与横钢龙骨连接后,通过全站仪将玻璃单元的角部坐标与模型坐

标复核,并进行微调。

玻璃幕墙单元上、下边框通过如图5所示150mm长L形横梁连接件固定在横钢龙骨上。每个横梁连接件与横钢龙骨结构采用3个M10×50不锈钢螺钉固定,L形横梁连接件预留一字形螺栓孔位,允许该玻璃幕墙单元竖直方向上、下移动5mm,用以吸收设计、加工、测量和安装所产生的误差。而玻璃幕墙单元左、右边框通过竖向铝合金压块连接件固定在横钢龙骨上。压块底座长170mm,布置3个50mm长压块,能允许该玻璃幕墙单元水平方向左、右移动约7mm,用以吸收设计、加工、测量和安装所产生的误差及提供单元间转角。

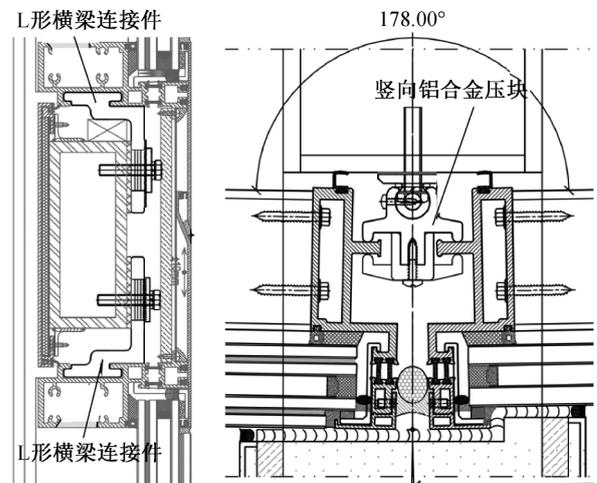


图5 玻璃幕墙可调节连接件

在单元板块接缝处安装胶条及注胶。施工过程中保证密封条安装到位,贴合紧密,对接缝处无间隙。耐候密封胶施工严格按施工工艺要求操作,施工厚度和宽度必须严格按图纸和工艺要求并尽量选择中午(11:00—15:00)进行打胶,保证气密性和水密性。对于处理完的交接缝进行现场喷淋试验。

5 结语

国家速滑馆天坛轮廓曲面玻璃幕墙造型奇特新颖,给设计和施工均带来极大困难。为保证施工质量和成型效果,本工程在设计及施工阶段充分利用BIM技术,用于指导材料加工组装、辅助测量定位、调节结构变形、优化玻璃安装,同时,将实际安装定位数据用于更新三维模型,调节优化后续安装工序。同时,设计优化了连接钢耳板、可调节铝合金节点等可调节连接构件,吸收了结构施工过程中产生的误差。最终所有玻璃幕墙全部一次性顺利安装,整体幕墙达到预期效果。相关技术方法可为其他曲面玻璃幕墙结构提供参考和借鉴。

(下转第26页)

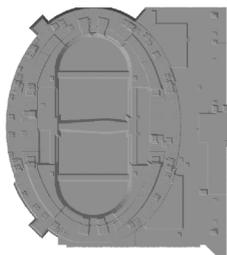


图 8 国家速滑馆基槽 BIM 模型

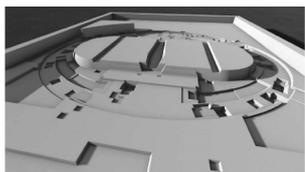


图 9 Lumion 3D 可视化建模

地理信息系统 (geographic information system, GIS) 是一种重要的空间信息技术^[8-9]。GIS 的三维分析多是在数字高程模型即 DEM (digital elevation model) 模型上进行的,其中 DEM 用来表现工程所在区域的地表特征和空间属性。高精度的 DEM 模型可实现各种复杂多样的地形,已被广泛应用于模拟地形的三维表现、真实场景、电子沙盘等工程中。

DEM 模型常通过 ArcGis 软件来实现。ArcGis 的扩展模块 3DAnalyst 可创建三维模型并进行空间分析计算。其中,3DAnalyst 的关键模块 ArcScene 是一个高效的三维处理分析工具,通过 ArcScene 不仅可对传统的三维地物地形进行创建,还可进行各种三维地质空间分析。

本工程使用了 GIS 技术,通过 ArcGis 软件对开槽前和清槽后的点、线、面域等要素进行高精度建模,生成高程模型、DEM 模型。开槽前和清槽后的 DEM 模型如图 10 所示。

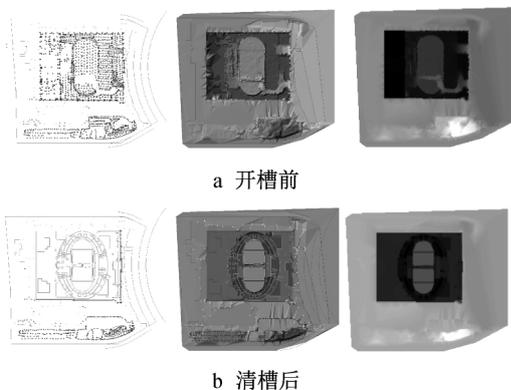


图 10 DEM 模型建立过程

同时,本工程通过 3DAnalyst 模块模拟空间坡度、坡向、地表径流等地貌信息,也进行了土方开挖方量计算。

4 结语

本文以国家速滑馆桩基工程为例,针对桩基种类众多、工期紧等特点,通过精细化编码和一体化静载试验技术,提高了施工效率,缩短工期 28d 以上。同时,本工程应用 Revit, SketchUp, Lumion 等多种软件建立了完整的 BIM 模型,并将 BIM 模型应用于复杂基坑的三维校核和交底,提高了对复杂图纸的解译能力和工作效率。本工程还应用 GIS 技术进行了高效、精准的土方量计算。本工程实践经验为同类工程提供了新的思路,具有显著的示范作用。

参考文献:

- [1] 陈彬磊,王哲,杨育臣.国家速滑馆超限高层建筑工程抗震专项审查报告[R].北京:北京市建筑设计研究院有限公司,2017.
- [2] 杨育臣,陈彬磊,朱忠义,等.国家速滑馆主体结构设计[J].建筑结构,2018,48(20):1-4.
- [3] 向卫国,黄焕民,张娴.城市新城区规划信息模型创建及应用研究[J].工程管理学报,2020,34(1):74.
- [4] 倪赛雄,李璐,何昌杰,等.BIM 技术在长沙冰雪世界工程岩壁切割中的应用[J].施工技术,2020,49(2):11-13.
- [5] 范安全,王玉伟,朱若愚,等.BIM 技术在浪漫滩特大桥梁施工中的应用[J].施工技术,2020,49(2):115-118.
- [6] 陆亚珍,吴限,吴彬,等. BIM 技术在装配式建筑中的应用[J].工程建设与设计,2020(4):17-18.
- [7] 白思敏,李松晏,秦传明,等.基于 BIM 技术的预制梁中幕墙预埋件精准定位研究与应用[J].施工技术,2020,49(2):107-109.
- [8] 叶凯峰. GIS 技术在交通运输规划管理中的应用[J].科技风,2020(6):16.
- [9] 徐娜.房产测绘中 GIS 技术的应用分析[J].工程建设与设计,2020(4):254-255.

(上接第 15 页)

参考文献:

- [1] 杨育臣,陈彬磊,朱忠义,等.国家速滑馆主体结构设计[J].建筑结构,2018,48(20):1-4.
- [2] 张晋勋,高树栋,王泽强,等.国家速滑馆大跨度马鞍形索网结构关键施工技术[J].施工技术,2019,48(24):41-44,48.
- [3] 张怡,苏李渊,史自卫,等.国家速滑馆项目基于 BIM 的智慧建造实践[J].城市住宅,2019,26(7):12-16.
- [4] 中国建筑科学研究院,中国建筑标准设计研究院.建筑幕墙:GB/T 21086—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [5] 胡锋,管基海,刘清春,等.酒杯形双曲面玻璃幕墙施工技术[J].施工技术,2018,47(3):44-46.
- [6] 高树鹏.复杂空间双曲单元式玻璃幕墙的设计与施工[J].浙江建筑,2013,30(7):41-43,47.
- [7] 晋钢,徐顾鑫.上海东方艺术中心柔性索网体系曲面幕墙安装技术[J].建筑施工,2005,27(9):31-35.
- [8] 祖恩练.浅谈房屋建筑异形幕墙工程的施工要点[J].建筑发展,2018,2(9):105-106.
- [9] 姚硕. BIM 技术在幕墙设计中的应用研究[J].国际建筑学,2019,1(2):65.