

文章编号: 1674—8247(2023)03—0001—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.001

# 高速铁路站房反向支撑弧形菱形幕墙施工技术研究

张学军

(中国中铁股份有限公司, 北京 100039)

**摘要:** 本文通过对江门站幕墙技术的阐述, 分析了装饰幕墙与仿生结构融合的技术难点、关键技术和实施途径。工程实践结果表明, 类似结构与装饰融合设计, 尤其是不同专业间的融合处理, 需要在前期进行反复可行性分析与论证, 综合考虑材料的工艺制作及偏差处理的可操作性。本文通过仿生结构设计和幕墙的协同研究, 创新地解决了反向支撑弧形菱形幕墙体系的难点, 实现了幕墙的曲面弧度线型, 整体效果良好, 较好地实现了施工技术与设计协同。

**关键词:** 菱形幕墙; 反向支撑; 结构融合; 施工技术

**中图分类号:** TU767 **文献标识码:** A

## Study on the Construction Technology of Reverse-supported Arc Rhombic Curtain Wall of High-speed Railway Station Building

ZHANG Xuejun

(China Railway Group Limited, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper elaborates on the curtain wall technology of Jiangmen railway station, and analyzes the technical difficulties, key technologies, and implementation approaches of the integration of decorative curtain wall and bionic structure in detail. The practice shows that the integration design of similar structures and decorations, especially the integration between different disciplines, requires repeated feasibility analysis and demonstration in the early stage, and comprehensively considers the operability of material process production and deviation treatment. Through the research of bionic structure design and curtain wall collaboration, this paper innovatively solves the difficulty of reversely supporting the arc diamond curtain wall system, and realizes the curved surface radian line of the curtain wall, with good overall effect and better realization of construction technology and design collaboration.

**Key words:** rhombic curtain wall; reverse support; structural integration; construction technology

随着社会经济的快速发展, 我国已跻身高速铁路大国行列<sup>[1]</sup>。高速铁路的迅猛发展对铁路客运站建筑设计整体性、属地鲜明的文化气息、站台的舒适性以及独特空间形态与功能提出了更高的要求, 铁路客运站房开始向性能化发展。目前, 我国铁路站房多通

过大跨度结构来实现独特的空间形态与建筑功能, 如雄安站屋盖采用单层正交结构体系和装饰清水高性能混凝土技术<sup>[2]</sup>提升站房整体施工质量和整体效果。本文将仿生建筑应用于高速铁路站房, 探索新工艺、新技术在高速铁路站房施工技术的应用效果, 以期为

收稿日期: 2023-04-10

作者简介: 张学军(1968-), 男, 高级工程师。

引文格式: 张学军. 高速铁路站房反向支撑弧形菱形幕墙施工技术研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 1-5.

ZHANG Xuejun. Study on the Construction Technology of Reverse-supported Arc Rhombic Curtain Wall of High-speed Railway Station Building[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 1-5.

铁路站房施工质量和国际化发展的提升奠定良好的基础<sup>[3]</sup>。

仿生建筑设计越来越受到时下设计师的青睐,结构仿生设计、装修仿生设计、仿真研究<sup>[4]</sup>建构一体化等理念逐步呈现。本文以江门高速铁路站房为工程背景,该铁路进站口在结构上和装饰幕墙上均采用仿生设计理念,结构如“编织筒”状、幕墙玻璃镶嵌其中,结构与装饰幕墙融合。因编织筒状结构先行施工,装饰幕墙需就结构偏差而进行消解处理。为实现装饰幕墙与双曲编织筒结构的形状融合,幕墙需在龙骨制作、玻璃处理、节点连接进行特殊设计。本文为实现幕墙与结构的双曲线型融合,总结和解决了众多技术难题<sup>[5-7]</sup>。研究成果为仿生技术在工程中的应用提供了参考。

## 1 工程概况

江门站建筑面积4万m<sup>2</sup>,建筑高度31.7m。站前仿生结构包括编织筒和支承网架组合结构,编织筒钢结构呈圆形,上大下小,上部为48片网壳形成的内嵌式网格,下部为主管及支管各24根组成的编织筒骨架。围护结构为玻璃幕墙,与编织筒钢结构分离嵌合,幕墙系统以编织筒钢结构作为主承力支承点,沿编织筒主管杆件内侧点支反向连接,如图1所示。



图1 编织筒与弧形幕墙结构体系图

## 2 菱形弧形幕墙的特征

玻璃幕墙体系投影面积为550m<sup>2</sup>,采用“8+12A+6+1.52PVB+6”钢化空心夹胶Low-E玻璃,竖向最大扭曲距离180mm,造型空间为双曲面,弧度可达12mm/m。

依据编织筒状钢结构的圆弧形及三向曲面特点,幕墙结构突破传统平直平面的特性,衔接主体结构贴合设计成反向支撑菱形结构。此结构利于展现主体结构“编织筒”的效果,幕墙结构与主体钢结构相辅相成,较好地展现了仿生设计特点。

幕墙结构以菱形幕墙进行编制排布,形成了造型

变化的外立面。该设计增加了与编织筒钢结构的协调性,菱形幕墙相交处顺从编织筒钢管件弧度,形成协调性强的幕墙线条。

幕墙系统设计以编织筒结构作为主要的受力支撑点,借助主钢管结构依附于编织筒内侧,幕墙玻璃采用反向支撑设计,将玻璃体系设计于受力的主钢管结构和幕墙自身龙骨杆件中间,巧妙地将幕墙自身龙骨隐匿于室内和视野盲点范围内,如图2所示。

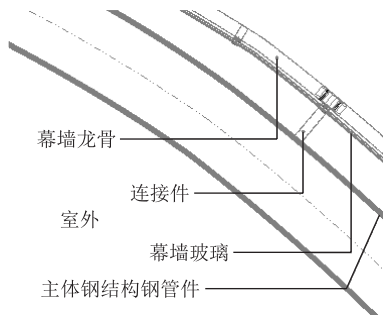


图2 幕墙结构构造设计节点图

## 3 菱形弧形幕墙的技术难点

(1)如何完美地实现弧形幕墙的曲面系统是一大技术难点。编织筒状钢结构为双向变化体系,幕墙体系亦随之呈现横向弯曲变化、纵向弧形上挑,圆弧顺滑度误差在5mm以内。要实现幕墙体系的弧形变化特征,贴合主体编织筒钢结构的变形角度,实现幕墙与结构的协调性,在曲面材料加工、龙骨弧形弯曲、节点连接等方面需要予以研究。

(2)在幕墙深化过程和BIM模型构建中,考虑到幕墙分割、裁剪、弧度等外观造型因素,将固定幕墙玻璃面板与编织筒钢结构支承支座垂直连接,以紧密贴合编织筒钢结构的弧形弯曲状态。由于幕墙的支承杆件支座直接焊接在主体编织筒钢结构上,编织筒钢结构的弧形控制误差将会对连接固定的支承杆件支座产生较大影响。支承件支座安装过程中需重新测量定位及调整,给支承杆支座的加工精度带来困难,同时支座的调整又将对菱形幕墙的整体线性、弧度、分割裁剪产生二次影响。因此,连接固定编织筒钢结构与玻璃幕墙面板的支承杆件支座的定位、加工精度以及活动连接是本幕墙体系最大的技术难点。

(3)平面二维支承爪件适用于平面和角度变化不大的玻璃幕墙支承,本菱形幕墙体系为贴合编织筒钢构的屈曲形态,平面二维支承爪件无法满足要求。支承爪件需考虑菱形弧形幕墙的变化角度,避免支承爪件长度与角度不均匀而带来的对玻璃面板的附加应

力,避免玻璃面板拉裂出现安全隐患。本菱形幕墙体系的技术难点为支承支座的固定问题,如图3所示。另外,部分玻璃贯穿结构杆件,玻璃的精准下料存在较大难度。

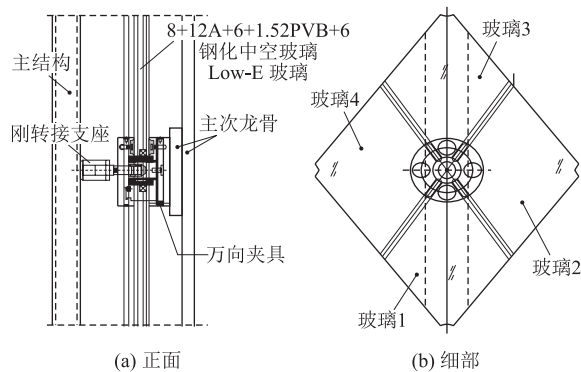


图3 幕墙与钢结构的连接节点图

## 4 菱形弧形幕墙技术要点

### (1) 支承杆件支座优化技术

需要严格控制固定连接编织筒钢结构与菱形幕墙的支承杆件支座的精度。每块菱形玻璃由4个支承杆件支座连接固定。在幕墙深化时每个支座进行编号,便于现场安装施工时玻璃板块的找寻、支座复核定位、调整校核和现场安装。编号最好以编织筒钢结构“双向交织的网格”分为主次区,并从上而下将分隔点进行排序。

支承杆件支座加工前,提前采用三维激光扫描仪对编织筒钢结构进行三维成像扫描,形成三维BIM图。与深化设计图纸进行核对比较,校核出钢结构的精度误差,为支承杆件支座的加工提供基础数据,减少因主体编织筒钢结构施工产生的误差。

支承杆件支座现场安装前,采用全站仪对支座预先进行定位校核,对支座的焊接点位三维坐标( $x, y, z$ )进行初步放样标注。校核结果与幕墙深化设计图纸对比,综合分析支座的加工精度误差或编织筒钢结构三维扫描的遗漏误差,对精度误差较大的支座进行优化调整。

支承杆件支座优化调整应按照以下原则进行调整:考虑菱形幕墙玻璃的性能和线性分布,支座与编织筒钢结构偏差在 $\pm 3\text{ mm}$ 内的,可原位进行安装处理,通过幕墙龙骨及其他辅助件进行调整;当偏差大于 $\pm 3\text{ mm}$ 时,将支座进行径向和垂向平移调整,以达到加固支座连接的目的;若偏差值较大,偏离距离较宽,则需重新根据误差和实际尺寸加工支座。支座在 $x, y$ 方向的偏差按照以下规则调整:优先保证水平方

向上支座点位的高程标高一致,其次确保斜弧向支座点位连线为顺滑曲线,利用水平向的第一视觉和斜向的隐秘视觉盲角来减少定位偏差,如图4所示。

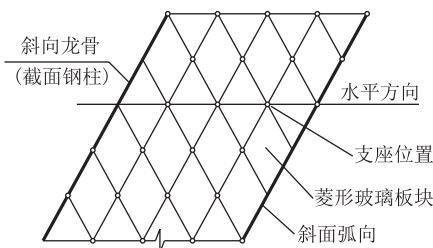


图4 支座调整示意图

### (2) 玻璃板块优化制作技术

在支承杆件支座优化调整及现场定位安装完成后,应采用全站仪对支座系统进行多角度目视观察和校核测量,确保支架在分割线上为光滑圆弧。发现较大误差时,应及时进行修正。全站仪复核后,对偏差误差支座点位进行分析和记录,将二次误差偏差数据反馈至幕墙玻璃的尺寸加工中。

幕墙玻璃板块制作中,提前结合支承杆件支座的编码编号,对玻璃板块进行拓展编号,通过三维BIM构建幕墙板块的加工生产图,以便加工完成后的标识、存放、运输和快速安装。

玻璃幕墙体系为菱形玻璃面板,在面板加工中需考虑菱形面板的自稳形态、交角结合处的孔洞预留等问题。四边形菱形玻璃面板支撑点均在角部,会出现应力集中问题。为防止此类问题的发生,在生产时应采用反倒角处理,如图5所示。在玻璃面板预留孔洞处亦按照以上方式消除集中应力,并施作软胶套等防护措施。

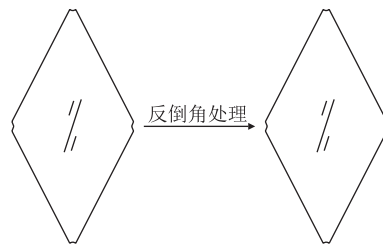


图5 反倒角处理图

### (3) 点式万向驳接支座应用

为解决菱形弧形幕墙因角度变化导致支承爪件难以连接的问题,同时为避免因支承爪件长度与角度不均匀导致的附加应力拉裂玻璃面板的问题,采用新型连接装置万向驳接支座。该支座内部可自由微转动调节,适应弧形玻璃面板的三维变化和角度变换。

万向驳接支座主要由钢转接支座、球铰结构、圆筒芯、隔压板及装饰板组成,如图6所示。

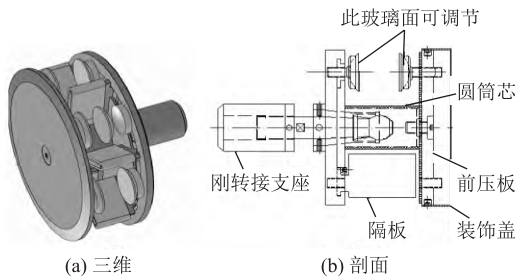


图6 支座三维及剖面图

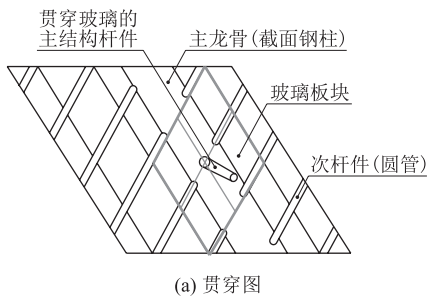
①球铰式结构球缺平面部分与玻璃贴合,材质为与玻璃呈平面接触的非金属质(如尼龙)或有利于玻璃受力的软金属(如纯铝、铜等)。结构与夹具前后压盖为球面接触,在前后压盖上采用特制的球面螺栓连接,既保证球铰转动灵活,又整体连接夹具与球铰,便于施工。

②玻璃内部和外部的2个球体与玻璃夹持部分的中间厚度刚好形成1个球体,以实现玻璃的自由变形伸缩。该结构不仅有利于玻璃的旋转,还可以确保玻璃与夹具的接触面积正确。

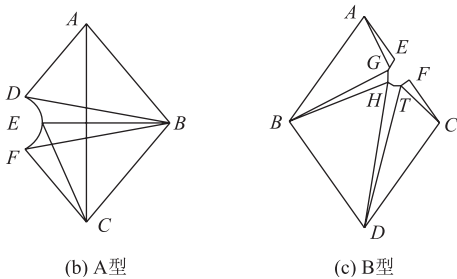
③夹具中每对球孔两侧的隔板均由性能良好的非金属材料制成。菱形玻璃幕墙面板与夹具中间的圆柱芯共同组成1个三面围护结构。当材料作用卸载时,菱形玻璃面板使用反向角度进行处理。玻璃板块的各个角部可以与夹具中间的筒芯保持紧密贴合。

(4) 支座贯穿玻璃面板的处理

编织筒钢结构形态显现“下收上放”的屈曲变化,菱形幕墙的分块分隔部分存在不完全对应的状态,即支承连接支座极少部分需贯穿玻璃面板。根据现场实际情况,支承连接支座与主体编织筒结构和菱形幕墙接驳主要分为3种类型。A型采用4块玻璃,即连杆的中心与玻璃板的点支撑中心基本重合;B型采用2片玻璃,即连接构件的中心和玻璃板点支撑的中心偏离;类型C贯穿1块玻璃板块。A型玻璃缺口涉及4块菱形玻璃的加工,4块玻璃最好整体下料分隔,圆形贯穿孔洞在整块玻璃上提前加工完成,随后每块玻璃面板形状的角端应修整成圆弧形;B型玻璃缺口涉及到2块菱形幕墙,可单块分别加工制作成半椭圆形,而后拼接修整;C型玻璃缺口处理方法与A型缺口一致,整体贯穿加工即可。玻璃幕墙贯穿示意图如图7所示。



(a) 贯穿图



(b) A型

(c) B型

图7 玻璃幕墙贯穿示意图

5 菱形弧形幕墙的实现途径

实现菱形弧形幕墙的技术要素包括龙骨、玻璃面板等原材料、安装设备工具的精度、方法的选择等。菱形弧形幕墙实施多采用玻璃热弯法、折线法、玻璃冷弯法等。玻璃热弯法和玻璃冷弯法是通过改变玻璃的平面特性来实施曲面或弧形的成型;折线拟合法是通过化弧面为平面,将若干细小平面拟合为曲面或弧面,该方式不改变空间形状,通过化繁为简、化整为零的方式来实现。

玻璃热弯法:龙骨以及玻璃在工厂热弯后进行安装。主次龙骨按照尺寸材质进行深化设计,根据深化图进行热弯加工,玻璃热加工采用专用模具制作设计造型,而后运到工地安装。

折线拟合法:菱形玻璃幕墙埋件被设置在主体结构,耳板通过焊接的方式进行连接;按照图纸进行菱形玻璃的深化,幕墙的曲面造型采用“以折代曲”的方式实现。

玻璃冷弯法:玻璃现场冷弯,直接安装。将主次龙骨进行深化处理,将其交到加工厂进行热弯处理;随后进行冷弯工装的制作和玻璃安装。

为研究3种施工方法的优劣势,将制作3种试验样板从装置的时间性、可操作性、有效性、经济性进行比较:

(1) 玻璃热弯法

玻璃热弯法的优点:①采用天然玻璃板过渡,外觀光滑美观;②玻璃和龙骨成型快速。玻璃热弯法

的不足之处:①热弯工艺复杂,对运输的要求比较高;②热弯加工成本较高,约为680元/m<sup>2</sup>;③测量精度要求高,安装困难<sup>[8]</sup>。

### (2)折线拟合法

技术特点:幕墙曲面安装平板玻璃。优点:①安装方便简单;②速度快,缩短工期;③玻璃无需任何处理,费用仅为250元/m<sup>2</sup>。缺点:①表面效果不理想,棱角仍比较分明,外观要求有待进一步提高;②玻璃板分段较小,安装繁琐<sup>[9]</sup>。

### (3)玻璃冷弯法

技术特点:将平板玻璃冷弯现场拧压成型,实现曲面效果,在应力允许范围内实现玻璃的扭曲变形。优点:①现场冷弯拧压成型,具有较强的操纵性;②符合曲面外观要求的曲面效果。玻璃冷弯法的缺点:①玻璃安装成本为320元/m<sup>2</sup>,与折线拟合法相比,成本偏高;②安全性和可行性需实验验证<sup>[10]</sup>。

综上所述,折线拟合法有较好的经济性,热弯法具有较好的外立面、操作性强。

## 6 结束语

江门站编织筒结构与配套的围护幕墙体系复杂,设计新颖,在仿生结构设计和幕墙协同设计上有诸多创新之处。此类设计形式较好地展现了仿生建筑的特点,是新一代幕墙体系的发展方向。创新的设计给施工带来不小困难,此类幕墙体系在施工中存在诸多难题,如幕墙曲面弧度线型<sup>[11]</sup>的实现、材料加工制作、点位误差控制、连接构造等方面。反向支撑弧形菱形幕墙体系在江门站的实施效果良好,较好地实现了施工与设计协同。

## 参考文献:

- [1] 朱颖. 高速铁路的规划与设计[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(2): 1-5.  
ZHU Ying. Planning and Design for High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(2): 1-5.
- [2] 宋海宏. 高性能混凝土制备及性能研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(5): 36-39.  
SONG Haihong. Preparation and Properties of High Performance Concrete [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(5): 36-39.
- [3] 燕菲菲,陈永. “一带一路”倡议下国际铁路培训思考与探索[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 90-94.  
YAN Feifei, CHEN Yong. Reflection and Exploration of International Training on Railways under the Belt and Road Initiative [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 90-94.
- [4] 张丽君,赵雷,孙新宇. 高速铁路沿线轻钢类建筑物失效运动路径数值仿真研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 11-19.  
ZHANG Lijun, ZHAO Lei, SUN Xinyu. Numerical Simulation for Failure Path of Light Steel Buildings along High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 11-19.
- [5] 段文付,张大伟. 光谷国际网球中心弧面菱形形式玻璃幕墙关键施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(2): 24-26, 108.  
DUAN Wenfu, ZHANG Dawei. Key Construction Technology of Rhombic-Arc-Point Styled Glass Curtain Wall of Optical Valley International Tennis Center [J]. Construction Technology, 2017, 46(2): 24-26, 108.
- [6] 叶建,谭江蜀,游宇,等. 复杂曲面菱形玻璃幕墙施工技术[J]. 建筑机械化, 2021, 42(9): 36-39.  
YE Jian, TAN Jiangshu, YOU Yu, et al. Construction Technology of Complex Curved Rhombus Glass Curtain Wall [J]. Construction Mechanization, 2021, 42(9): 36-39.
- [7] 梁贵登,程小剑,毛旺兴,等. 异形曲面菱形折拼铝板幕墙施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(16): 78-80, 84.  
LIANG Guideng, CHENG Xiaojian, MAO Wangxing, et al. Construction of Diamond-shaped Folding Aluminum Panel Curtain Wall with Special-shaped Surface [J]. Construction Technology, 2019, 48(16): 78-80, 84.
- [8] 陈翀. 双曲面框支承玻璃幕墙施工技术研究: 基于青岛国际创新园项目[D]. 青岛: 青岛理工大学.  
CHEN Chong. Research on Construction Technology of Hyperbolic Frame Supported Glass Curtain Wall—based on Qingdao International Innovation Park Project [D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University.
- [9] 郭彦林,窦超,刘学武,等. 中央电视台新主楼菱形幕墙单元变形性能研究[J]. 施工技术, 2006, 35(12): 99-102.  
GUO Yanlin, DOU Chao, LIU Xuewu, et al. Study on Deformation Behavior of Lozenge Curtain Wall Unit in CCTV New Building [J]. Construction Technology, 2006, 35(12): 99-102.
- [10] 喻颖瑞. 大型公共建筑异形幕墙工程施工技术要点分析[J]. 建材与装饰, 2017(30): 1-2.  
YU Yingrui. Analysis on the Key Points of Construction Technology of Special-shaped Curtain Wall Engineering in Large Public Buildings [J]. Construction Materials & Decoration, 2017(30): 1-2.
- [11] 贺才钦. 折线形墙下墙背应力计算探讨[J]. 高速铁路技术, 2011, 2(4): 15-19.  
HE Caiqin. Calculation of Stress at the Back of Lower Part of Polygonal Retaining Wall [J]. High Speed Railway Technology, 2011, 2(4): 15-19.