

DOI: 10.7672/sgjs2026030142

# 狮子洋大桥超高索塔钢壳制造与施工关键技术\*

吴小兵<sup>1</sup>, 郭峰超<sup>2</sup>, 张颖雯<sup>2</sup>, 张文才<sup>3</sup>

(1. 中铁宝桥集团有限公司, 陕西 宝鸡 721006; 2. 广东湾区交通建设投资有限公司, 广东 广州 511400;  
3. 中铁宝桥(舟山)有限公司, 浙江 舟山 316000)

[摘要] 狮子洋大桥是粤港澳大湾区超级工程狮子洋通道的关键控制性工程, 索塔高 342m, 采用钢壳-混凝土组合结构, 索塔结构形式新颖、技术难度大, 钢壳作为索塔的核心受力构件, 其制造与施工质量直接关系到桥梁的整体安全和耐久性。对狮子洋大桥超高索塔钢壳制造与施工关键技术进行研究, 主要包括钢壳制造、涂装施工、机加工, 并介绍复杂壁板单元自动化焊接技术、剪力钉自动化焊接技术、桥位环口焊接群控技术的应用。工程实践表明, 壁板单元采用的分步组焊+分阶段矫正制造工艺可有效解决薄壁焊接变形控制难度大及制造工效低的问题, 双壁空腔大断面钢壳节段采用的立式组拼工艺提高制造质量, 轮载式智能移动平台搭载喷漆机器人的应用保证钢壳涂装质量, 自动化与群控焊接技术保证焊接过程智能化与高质量。

[关键词] 桥梁; 索塔; 钢壳; 混凝土; 涂装; 焊接

[中图分类号] U445

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0142-08

## Key Technology of Manufacturing and Construction of Steel Shell of Super High Cable Tower of Shiziyang Bridge

WU Xiaobing<sup>1</sup>, GUO Fengchao<sup>2</sup>, ZHANG Yingwen<sup>2</sup>, ZHANG Wencai<sup>3</sup>

(1. China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721006, China; 2. Guangdong Bay Area Transportation Construction Investment Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;  
3. China Railway Baoji Bridge Group (Zhoushan) Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

**Abstract:** The Shiziyang Bridge is the key control project of the super project Shiziyang Channel in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. The tower is 342m high and adopts steel shell-concrete composite structure. The cable tower is novel in structure and difficult in technology. As the core stress component of the cable tower, the manufacturing and construction quality of the steel shell is directly related to the overall safety and durability of the bridge. In this paper, the key technologies of manufacturing and construction of steel shell of super high cable tower of Shiziyang Bridge are studied, including steel shell manufacturing, coating construction and machining. The application of automatic welding technology of complex panel unit, automatic welding technology of shear stud and welding group control technology of bridge ring port is introduced. Engineering practice shows that the step-by-step assembly welding + phased correction manufacturing process adopted by the panel unit can effectively solve the problems of difficult control of thin-walled welding deformation and low manufacturing efficiency. The vertical assembly process adopted by the double-wall cavity large-section steel shell segment improves the manufacturing quality. The application of wheel-mounted intelligent mobile platform equipped with spraying robot ensures the quality of steel shell coating. Automation and welding group control technology ensure the intelligent and high quality of welding process.

**Keywords:** bridges; cable tower; steel shell; concrete; coating; welding

\* 广东省交通集团有限公司重点科技项目(JT2023ZD01-02)  
[作者简介] 吴小兵, 工程师, E-mail: 191917014@qq.com  
[收稿日期] 2025-09-15

### 1 工程概况

狮子洋通道路线全长约 35km, 采用设计速度 100km/h 的 8 车道高速公路标准, 过江段双层桥长

约 15.14km,采用双向 16 车道(上 8 车道+下 8 车道)高速公路标准,其与黄埔大桥、南沙大桥、虎门大桥、深中通道、港珠澳大桥、黄茅海跨海通道等共同构建大湾区世界级跨江通道群。狮子洋大桥为狮子洋通道项目的关键控制性工程,采用主跨 2 180m 双层钢桁悬索桥一跨过江方案(见图 1)。



图 1 狮子洋大桥效果

Fig. 1 Effect of Shiziyang Bridge

狮子洋大桥索塔总高 342m,采用 6 横梁门式塔(见图 2),主塔塔柱自下而上共分为 62 个节段。塔柱采用钢壳-混凝土组合结构,横梁采用钢结构,鞍罩为封闭箱室组合结构,高度 7m。塔柱混凝土采用高强、高弹、高稳健、低收缩混凝土,塔柱外壳及其加劲肋、横梁及其加劲肋采用 Q355D, Q355DZ35 钢材。

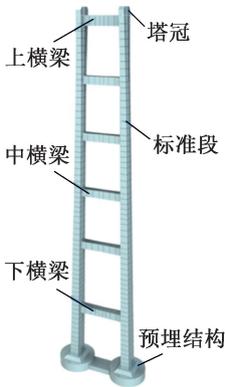


图 2 狮子洋大桥索塔结构组成

Fig. 2 Cable tower structure composition of Shiziyang Bridge

上、下塔柱采用双壁单箱三室断面,横向壁厚均为 1.2~1.4m,纵向壁厚均为 1.0~1.6m,且均设置钢壳,其中外侧钢壳(外壁板)厚 18mm,内侧钢壳(内壁板)厚 10mm。下塔柱高程为 6.000~62.100m,截面尺寸由 12.090m×16.890m(横桥向×顺桥向)过渡到 11.346m×15.606m;上塔柱高程为 62.100~337.916m,截面尺寸由 11.346m×15.606m(横桥向×顺桥向)过渡到 7.690m×16.200m。

索塔钢壳标准节段主要由内外壁板、横竖向加劲肋、钢筋网片、连接角钢、剪力钉等组成(见图 3),

内外壁板竖向钢筋依次穿过横向加劲肋钢筋孔沿塔高方向连接,横向钢筋依次穿过竖向加劲肋钢筋孔环形连接。内外竖向加劲肋通过缀板连接,斜撑与竖向加劲肋中心线相交,与水平加劲肋焊接。

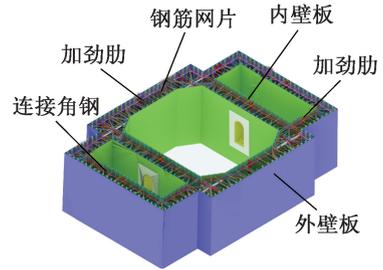


图 3 索塔钢壳标准节段

Fig. 3 Standard segment of cable tower steel shell

主塔钢壳预埋段自下而上分为定位钢框架、T0 节段及 T1 节段(见图 4),其中,定位钢框架主要分为定位调节块与横向联系梁,二者通过栓接连接,在定位调节块下方设置 I 类支墩与 II 类混凝土支墩,在横向联系梁节点位置设置 III 类混凝土支墩,提供框架横向联系梁的竖向刚度。T0 节段与 T1 节段拼接,水平加劲板与外壁板翼缘距节段底部 1.4m,水平横撑采用 L 型角钢,竖向钢筋布置与标准节段一致。T1 节段内外壁板通过横撑连接,水平横撑采用 L 型角钢,竖向钢筋布置与标准节段一致,但在塔座水平钢筋处断开,塔座水平钢筋共 3 层,与外壳处竖向钢筋绑扎。

钢横梁与主塔钢壳节点采用承压板+预应力钢束设计(见图 5),利用预应力钢束将横梁端板压在塔壁上,钢横梁顶板、底板、腹板及其加劲肋均焊接在钢横梁端板上。

## 2 超高索塔钢壳制造

### 2.1 制造方案

索塔钢壳制造流程:零件加工→板肋组焊→剪力钉组焊→壁板单元接宽→钢筋穿入→节段立式组拼→节段立式预拼→涂装,制造过程中需重点控制薄壁零件加工、壁板单元制造、节段组拼等精度。由于索塔钢壳内部结构复杂,空间狭小,加之组成索塔钢壳的内外壁板较薄,板肋焊缝密集,钢筋纵横交错,因此壁板单元采用分步制造,以满足制造精度要求。

### 2.2 关键技术

#### 2.2.1 壁板单元制造技术

壁板单元制造流程:采用激光划线设备划纵横基线及位置线→按线组装竖向加劲肋,采用多电极焊接专机进行智能焊接,焊接完成后进行焊接变形

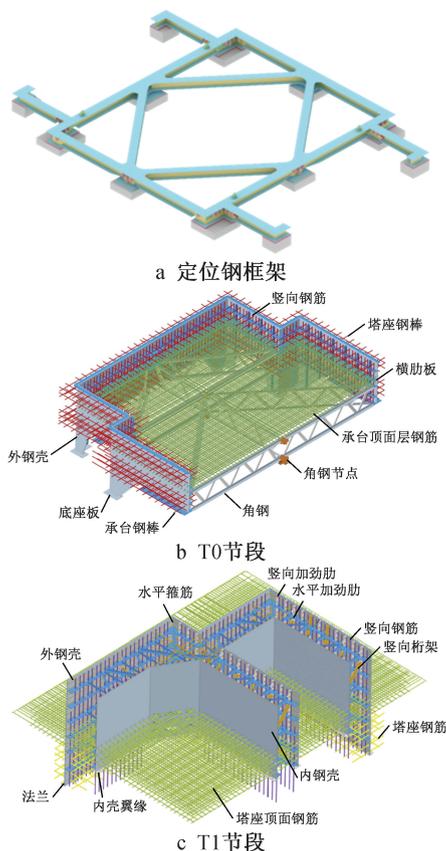


图 4 主塔钢壳预埋段

Fig. 4 Pre-embedded section of steel shell of main tower

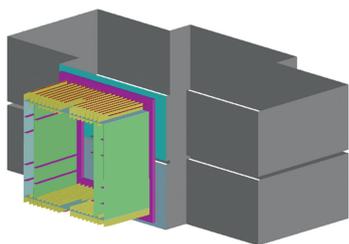


图 5 钢横梁连接结构

Fig. 5 Steel beam connection structure

矫正→按横向加劲肋位置线和专用角度样板组装横向加劲肋,采用焊接机器人进行智能焊接,焊接完成后进行焊接变形矫正→焊接剪力钉→在平台上按线组装壁板单元→按焊接工艺焊接接宽板单元,并矫正焊接变形→按施工图穿入钢筋,如图 6 所示。

索塔钢壳断面轮廓尺寸较大,为保证整体制造精度,需将壁板单元划分为 2~3 个单元件制造,再将单个单元件焊接。焊接前调节反变形量,同时在满足焊接效率及质量的前提下,设计较小的坡口截面,保证焊接完成后壁板单元横向收缩及角变形均在可控范围内。

针对钢筋连接纵横交错的特点,需结合索塔钢

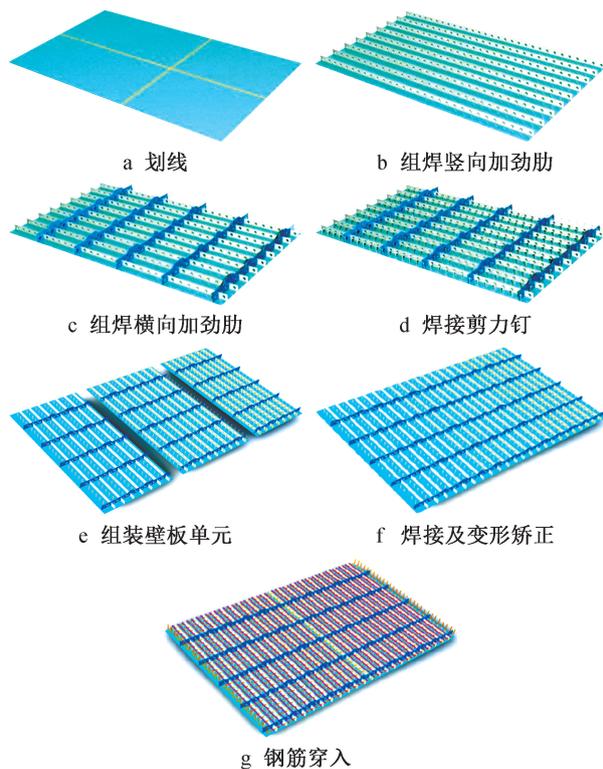


图 6 壁板单元制造流程

Fig. 6 Panel unit manufacturing process

壳节段组装时各单元件的组装顺序,将横竖向钢筋分别带入相应的单元件中形成附筋单元,再将各附筋单元采用三维可视化虚拟组拼技术模拟索塔钢壳节段组拼过程,确保各横竖向钢筋不仅不干涉各附筋单元件组装,且各横竖向钢筋可按设计要求进行连接,在吊装组拼过程中不发生坠落现象。

### 2.2.2 节段立式组拼

立式组拼胎架设计时遵循“三竖一横一高”基准,满足内外侧壁板拼装定位要求。胎架内周圈设置塔架并布设可调节支撑杆,满足纵桥向及横桥向壁板倾斜要求。胎架上表面须精准划出钢壳节段下端口轮廓线,便于壁板单元快速定位。此外,还设有爬梯、平台、走道等设施,如图 7 所示。



图 7 钢壳节段立式组拼胎架

Fig. 7 Steel shell segmental vertical assembly falsework

节段立式组拼流程:按照胎架上标识组装大仓室 4 块大内壁板单元,利用全站仪扫描上下箱口间

壁板单元倾角并调整,合格后支撑固定→组装大仓室4块斜向内壁板单元,测量大仓室箱口尺寸,合格后固定大仓室内壁板单元→组装小仓室内壁板单元,利用支架及马板固定→组装小仓室内壁小板单元,利用支架及马板固定→组装小仓室最后一侧内壁板单元,测量小仓室箱口尺寸及小仓室与大仓室相对位置,检测合格后固定→按照标识安装大仓室外壁板单元,同时利用定位角钢约束内外壁板,测量上箱口尺寸并通过外支撑调整、固定→组装4个小外壁板单元,测量合格后固定→组装4个小外壁板单元,测量合格后固定→组装剩余外壁板单元,测量合格后固定,整体尺寸通过全站仪检查合格后,使用支撑工装约束箱口,焊接内外壁板立位焊缝并安装角钢桁架及缀板,通过全站仪测量并在钢壳节段上端口划二次切割线,使用端面铣平设备铣平上端口,如图8所示。

### 3 钢壳涂装施工

#### 3.1 涂装体系

主塔钢壳及钢横梁采用的长效型防腐涂装体系如表1所示。

表1 主塔钢壳及钢横梁涂装体系

Table 1 Main tower steel shell and steel beam coating system

部位	涂装体系及用料
主塔钢壳及钢横梁外表面	表面净化处理
	二次表面喷砂除锈
	环氧富锌底漆2道
	环氧云铁中间漆2道
	丙烯酸聚氨酯面漆1道
主塔钢壳及钢横梁内表面	氟碳面漆1道
	二次表面喷砂除锈
	环氧富锌底漆1道
	环氧云铁中间漆2道
主塔钢壳混凝土与钢材接触面	环氧厚浆漆2道
	醇溶性无机硅酸锌车间底漆1道
高强螺栓及短尾环槽铆钉摩擦面	喷砂除锈 无机富锌防滑涂料

#### 3.2 关键技术

##### 3.2.1 喷砂除锈

采用轮载式智能喷砂机器人对主塔钢壳内外表面进行智能化喷砂,轮载式智能喷砂机器人以AGV智能搭载平台集成喷砂机械手,同时搭载喷砂枪体的方式完成内外壁板喷砂除锈施工,对于局部设备无法达到部位、死角处和支墩处采用手工补喷的方式进行处理。喷砂车间安装自动循环回砂系统,将喷砂枪体接入自动循环回砂系统,保证智能喷砂设备连续不间断地循环供料。设备调至自动

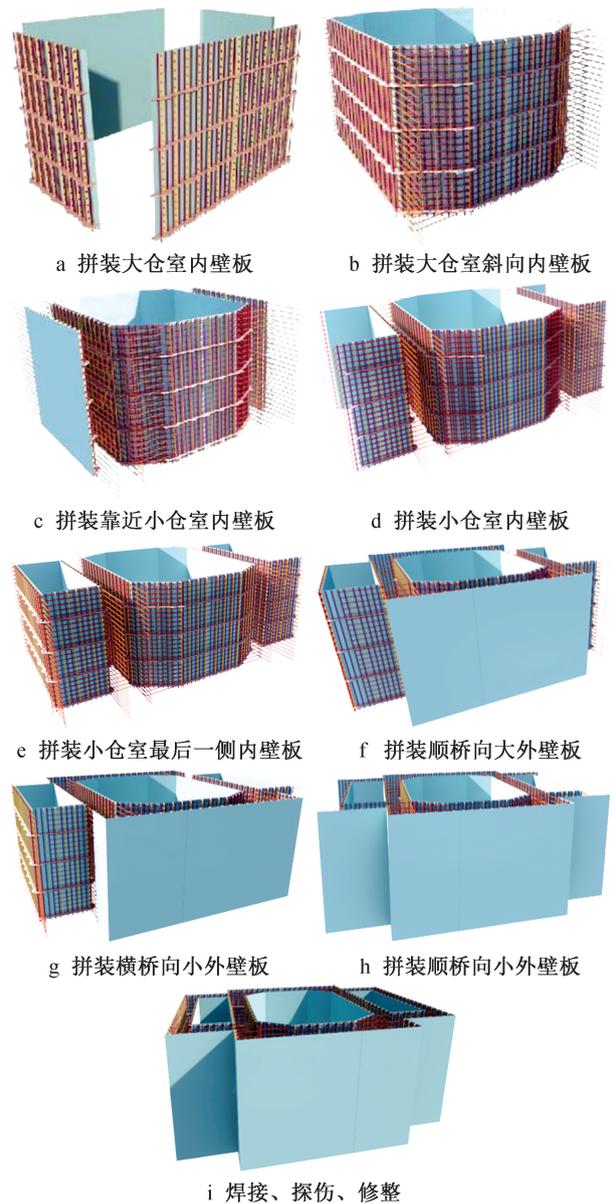


图8 钢壳节段立式组拼流程

Fig. 8 Steel shell segmental vertical assembly process

喷砂模式,以4m/min的速度喷砂,沿着磁导轨方向定速行进,人工遥控移动设备。

##### 3.2.2 喷漆施工

大面积喷涂前首先对焊缝、棱角、板边、过焊孔、角钢和加劲肋背面等隐蔽部位及2种涂层交界部位进行预涂,预涂采用刷涂或辊涂。正式喷漆采用轮载式智能喷漆机器人对主塔钢壳内外表面进行智能化涂装,轮载式智能移动平台搭载喷漆机器人,轮载式平台起到行走主体和载物平台的功能,平台上安装了机器人、控制系统和供漆系统,平台移动采用激光导航。遥控自动导引车进入作业区域进行识别定位,设备在作业区域反复行走扫描识别,形成作业地图,对行进轨迹和喷涂轨迹进行编程,设备按照指定轨迹匀

速前进,同时喷枪做往复运动。

### 3.2.3 桥址涂装

桥址涂装主要包含连接处焊缝及栓接部位的补涂,焊缝接头部位两侧 80mm 范围内不涂装,底漆、中间漆和面漆涂层边缘分别错开 50mm,形成渐进式遮盖,待焊接完成后进行补涂。涂层损伤处补涂前须将损伤处边缘向四周扩大至少 1cm,将边缘打磨出梯度,便于涂层补涂时良好搭接。所有焊缝及磕损处理结束后,对整体外表面进行第 2 道面漆涂装,涂装前须做好表面净化处理。

## 4 横梁及钢壳机加工

### 4.1 横梁端板机加工

1) 端板零件精切下料、组装、焊接,为保证焊缝质量同时控制焊接变形,对接焊缝采用双面坡口双面交替焊接。

2) 端板对接焊缝进行无损检测,对不合格焊缝进行返修,返修合格后将余高磨平处理并进行平面度测量、变形修整。

3) 组焊端板加劲肋和锚垫板等零件,如图 9 所示。

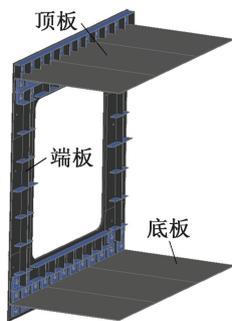


图 9 横梁端板组装

Fig. 9 Beam end plate assembly

4) 端板加劲肋、锚垫板等焊接完成后,对平面度进行测量、修整,保证端板单元整面平面度 $\leq 3\text{mm}$ 。

5) 横梁节段单独制造(见图 10),端板单元与横梁顶底腹板焊接,采取必要措施控制焊接变形。

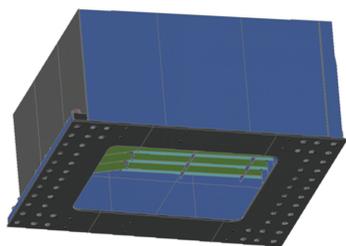


图 10 横梁节段制造

Fig. 10 Beam segment manufacture

6) 横梁节段翻身端板朝上放置并调平,在横梁两侧腹板上焊接固定块,将导轨与横梁腹板固定,

通过激光镭射仪检测并调整床身轨道平面度及两侧床身平行度,调整完毕后固定两侧床身。

7) 加工横梁端板表面和端板上下磨光顶紧边(见图 11),加工完成后采用激光跟踪仪检测加工面平面精度,合格后进行横梁打砂、涂装。

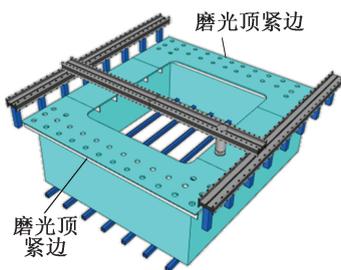


图 11 横梁机加工

Fig. 11 Beam machining

### 4.2 钢壳结合面机加工

#### 4.2.1 带 L 形台阶壁板机加工

带 L 形台阶壁板由 80mm 厚钢板采用龙门铣床整体加工而成,分 3 个加工面,同时为避免切削产生的热量引起变形,分节段分步加工,每次切削量 $\leq 2\text{mm}$ 。1 号面单板加工至板厚 42mm,2 号面加工至留 10mm 工艺量,3 号面(非接触面)加工至设计值。

加工前对板件进行固定约束,以防止机加工过程窜料或加工变形影响加工精度。首先交替加工 1,3 号面,然后加工 2 号面。采用 2mm 进刀量进行粗加工,选择 0.5~1mm 较小进刀量进行精加工,尽可能地选用较大的切削速度,加工完成后对平面度进行检测、修整。

将壁板加工面放置在平台上,加工面做好保护,为减小焊接变形,首先按线组焊竖向加劲肋,并检测、修整平面度,然后组焊横向加劲肋,再次检测、修整平面度(见图 12)。

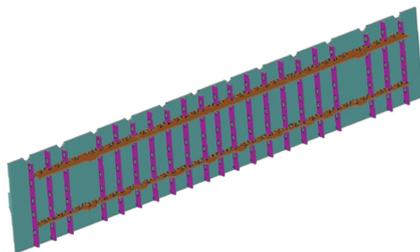


图 12 带 L 形台阶壁板横竖向加劲肋

Fig. 12 Horizontal and vertical stiffeners of L-shaped step panel

#### 4.2.2 钢壳壁板机加工

1) 以 T25 节段为例,结合面钢壳壁板由 4 块板单元组成,首先进行壁板单元接宽(三拼),由于

接宽焊缝为熔透焊接,且壁板厚度为 42mm,为防止焊接变形,焊接前须采取反变形及刚性固定措施。

2) 三拼焊接完成后,对焊缝进行探伤,并对三拼板单元进行整体修整。

3) 将修整合格的三拼板单元与带 L 形台阶壁板单元进行对接熔透焊,为防止焊接变形,采用加长马板对焊缝进行约束,同时设置反变形量(注意机加工的保护)。

4) 拼接完成后对焊缝进行探伤,并对四拼板单元进行整体修整。

5) 以结合面钢壳壁板为基准组装钢壳节段,为减小焊接变形,保证焊后壁板平面度,设置角式马板固定。

6) 为保证结合面顶紧边的金属接触率,减小焊接、修整等热加工对其的影响,在钢壳节段总拼焊接修整完成后划线加工顶紧边, T25 节段顶边及 T26 节段底边一次加工完成(见图 13)。

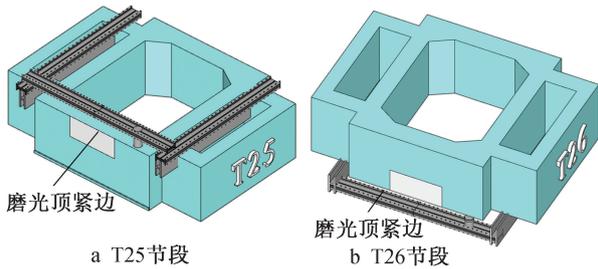


图 13 钢壳节段顶紧边加工

Fig. 13 Top tight edge processing of steel shell segment

7) 钢壳顶紧边直线度及平面度测量合格后,对 2 节钢壳进行立式预拼,顶紧边接触率、钢壳轴线、高程等须满足要求。

8) 在立拼状态下,将各壁板锁死后进行结合面钢壳壁板整面加工,如图 14 所示。

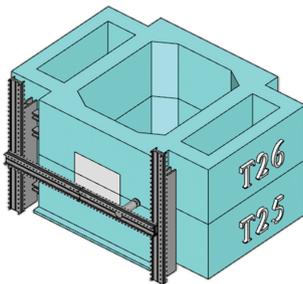


图 14 钢壳立式预拼机加工

Fig. 14 Vertical pre-assembly machining of steel shell

## 5 先进技术应用

### 5.1 复杂壁板单元自动化焊接技术

狮子洋大桥索塔钢壳壁板单元横竖向加劲肋

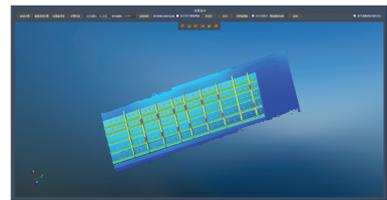
呈较密集分布,存在板肋与壁板之间平角位及板肋与板肋之间立位焊接,焊接位态多,要求高,工作量大。由于无法使用半自动焊接设备,需通过机器人进行焊接,但传统机器人焊接需依靠三维模型图进行离线编程,模型构建工作量大,编程效率低,且常规的视觉辅助编程也需利用三维模型,焊缝区域打磨过于光亮严重影响视觉辅助编程中激光和相机工作稳定性。为解决现有离线编程效率低、视觉辅助编程稳定性差等问题,开发线性激光扫描杆件外轮廓、免编程逆向建模、激光除锈、基于 RANSAC 算法的药芯焊丝电弧跟踪自动化焊接技术,实现一键启动自动化焊接,无须构建三维模型,提高机器人视觉功能稳定性,建立壁板单元自动化焊接生产线(由悬臂架、6 轴机械臂、激光扫描仪、三维相机、焊枪、保护气体、控制系统等组成),可实现一键启动,通过激光扫描壁板单元外轮廓,自动生成壁板单元三维模型,自动排列焊接顺序,实现自动化焊接。

#### 1) 蓝色线性激光扫描+免编程逆向建模

通过蓝色线性激光进行扫描,利用蓝色激光波长短、反射频率高的特点,减小外界环境亮度对扫描精度的影响,实现对杆件的逆向建模(见图 15)。逆向建模时通过 3D 视觉扫描和 AI 算法,无须使用 CAD 模型即可自动重建工件三维模型,并识别焊缝位置,实现“免示教”焊接。利用 AI 算法自动生成焊接程序,规划焊接路径,提高了施工效率,降低了人工劳动强度。



a 蓝色线性激光扫描



b 逆向建模

图 15 蓝色线性激光扫描与逆向建模

Fig. 15 Blue linear laser scanning and reverse modeling

#### 2) 激光除锈

采用激光除锈技术对钢板进行除锈,该技术利用高能量密度激光束对金属表面锈蚀层进行快速去除,当特定波长(通常为 1 064nm)的激光束照射

到锈蚀层时,锈蚀层中的氧化物会快速吸收光子能量,在极短时间内升温至数千 $^{\circ}\text{C}$ ,发生瞬间气化或等离子化,同时产生冲击波使锈蚀层从基材上剥离。除锈后的钢板表面呈哑光色,避免了传统采用手持式打磨机打磨过于光亮及打磨对钢板的损伤问题,降低了钢板对激光扫描、三维相机拍摄的影响程度,有效提高了视觉辅助功能的稳定性。

### 3) 基于 RANSAC 算法药芯焊丝电弧跟踪焊接

研究基于 RANSAC 算法的药芯焊丝电弧跟踪焊接技术(见图 16),通过激光视觉传感系统获取焊缝点云数据,利用 RANSAC 算法精确提取焊缝特征点,实现高精度的焊缝识别与自动跟踪,可保证焊接稳定性好,能够精准适应组装间隙与变形,焊缝成形美观,避免使用实心焊丝导致焊接过程飞溅大,解决了药芯焊丝无法跟踪、易焊偏、包角质量差的技术难题,减少了焊接打磨,提高了焊接效率和质量稳定性。



图 16 药芯焊丝电弧跟踪焊接

Fig. 16 Flux-cored wire arc tracking welding

## 5.2 剪力钉自动化焊接技术

狮子洋大桥索塔内外壁板布满剪力钉,数量多,焊接要求高,焊接量大。目前常使用栓钉拉弧式焊机焊接剪力钉,存在焊接质量易受设备和人为因素影响等问题,因此,研发了剪力钉自动化焊接生产线(见图 17)。该生产线由 3 轴龙门数控系统、剪力钉和磁环供料系统、机器人自动上料系统、自动剪力钉焊枪、焊接定位加紧系统和工业清洗系统等组成,通过对剪力钉人工焊接工程进行自动化设计与制造、安装与调试,达到剪力钉自动化焊接的目的。该生产线设置缺料提醒、错误报警、停机功能,配备激光划线装置,可自动刻画剪力钉位置线,实现剪力钉安装精准定位,同时配备激光清洗系统,能够自动清理剪力钉安装位置的油污及灰尘,节省工件清洗和焊接时间,现场施工如图 18 所示。

采用的软件系统具有导图功能并执行自动焊接过程,龙门运送机器人、焊枪到达指定位置后发送启动信号给机器人,机器人接收到启动信号后将剪力钉和磁环安装至焊枪,利用焊枪来料检测装置检测剪力钉和磁环存在的信号,并反馈给软件系



图 17 剪力钉自动化焊接生产线

Fig. 17 Automatic welding production line of shear studs



图 18 剪力钉现场焊接

Fig. 18 Field welding of shear studs

统,控制机器人执行下降动作,到位后软件系统发送引弧信号引导机器人控制焊枪进行焊接。

## 5.3 桥位环口焊接群控技术

狮子洋大桥索塔高达 342m,由 62 个节段和 6 道钢横梁构成,桥位焊接涉及高空作业,受施工平台、焊接位态及空间因素等影响,自动化焊接难度大,需进行人工焊接。为解决焊接数据无法采集、焊接管理流程效率低、焊接生产决策分析缺失、环缝焊接质量无法有效溯源等问题,开发应用智能监测的焊机-焊工-焊缝-焊材四位一体焊接群控系统(见图 19),通过统一焊接规范,提高焊接质量。

通过技术人员在云端上传焊工资质及身份信息、焊接工艺、焊缝地图、焊材种类等基础信息,焊机码实现人机互绑,系统将工艺下发至每台焊机,控制焊机参数在工艺要求范围内调节,防止超规范焊接。

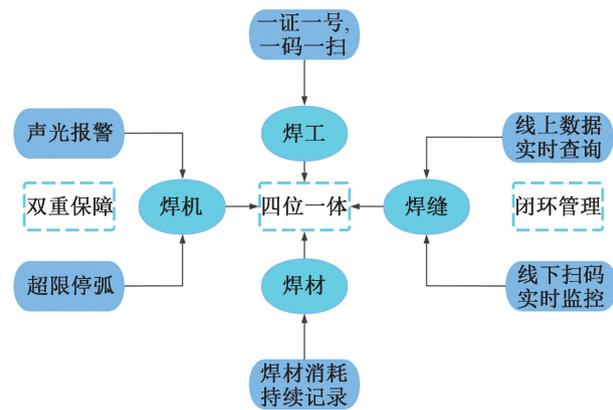


图 19 焊接群控系统

Fig. 19 Welding group control system

采用 5G 技术系统记录焊接过程数据,形成焊缝记录报表,支持焊缝质量追溯,可实现 200ms 级焊接电流/电压波动闭环控制,违规操作实时告警响应时间 $<0.5\text{s}$ 。支持技术人员远程监控和维护焊机,减少停机时间,同时提升焊工在复杂环境下的作业安全性和效率。

采用的数字化焊机集中管理系统通过有线或无线等方式实现焊机与群控服务器的连接,服务器可连入企业局域网或互联网,获得授权的用户可随时在网络可达的范围内通过浏览器直接访问系统。该系统具有焊机管理、焊接规范管理、焊接状态实时监控、焊接数据统计分析、历史数据曲线重现、焊机故障实时提醒等功能,实现了焊接过程动态优化。

## 6 结语

狮子洋大桥索塔采用独特的钢壳-混凝土组合结构,同时具有钢塔的抗拉强度高及混凝土塔的抗压性能好、刚度大等特点,使塔身自重降低 50%,有效减轻了结构负荷。本文对狮子洋大桥超高索塔钢壳制造、涂装、机加工及先进技术应用等进行了阐述。通过制定科学合理的制造方案,完成了壁板单元制造、节段立式组拼等,确保了钢壳结构几何精度和焊接质量。在涂装施工中,从涂装体系的选择到喷砂除锈、喷漆施工及桥址涂装等关键技术的应用,有效保障了钢壳耐腐蚀性。对于横梁及钢壳结合面的机加工,通过精准的工艺控制和先进的检测手段,保证了结合面平面度、顶紧边金属接触率及整体装配精度。

针对施工重难点问题开展技术创新,研发并应用了复杂壁板单元自动化焊接技术、剪力钉自动化焊接技术及桥位环口焊接群控技术等,提高了施工效率、焊接质量和作业安全性,降低了人工劳动强度,为高质量建造提供了技术支撑,确保了工程质量。

## 参考文献:

- [1] 刘治国,傅立军,苏洋. 桥梁钢壳混凝土索塔细节设计及制造相关问题的探讨[J]. 公路,2025,70(4):149-154.  
LIU Z G, FU L J, SU Y. Discussions on the detail design and manufacture of bridge steel shell tower [J]. Highway, 2025, 70 (4): 149-154.
- [2] 席刚. 斜拉桥钢壳混凝土索塔的质量控制[J]. 福建建材, 2017(5):67-69,87.  
XI G. Quality control of steel shell concrete pylon of cable-stayed bridge [J]. Fujian building materials, 2017(5): 67-69, 87.
- [3] 张圣建,梁桓玮,许春荣,等. 滞回荷载下钢壳-混凝土组合索塔跨顶比分析[J]. 世界地震工程,2025,41(1):209-217.  
ZHANG S J, LIANG H W, XU C R, et al. Shear-span ratio analysis of steel shell-concrete composite pylon under hysteretic load [J]. World earthquake engineering, 2025, 41(1): 209-217.
- [4] 肖飞. 悬索桥索塔钢-混凝土结合段模型试验研究[J]. 铁道工程学报,2018,35(7):41-46.  
XIAO F. Model test research on the steel-concrete composite section in main tower of suspension bridge [J]. Journal of railway engineering society, 2018, 35(7): 41-46.
- [5] 陈逸君,黄文金,王志福,等. 外包钢壳混凝土异形索塔及其施工临时支撑研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024,41(1):45-51.  
CHEN Y J, HUANG W J, WANG Z F, et al. Research on external steel shell-concrete irregular cable tower and its temporary construction support [J]. Journal of Hebei University of Engineering (natural science edition), 2024, 41(1): 45-51.
- [6] 吕建锋. 大型斜拉桥索塔钢锚梁-钢牛腿制造相关问题探讨[J]. 城市道桥与防洪,2022(12):179-182,23-24.  
LÜ J F. Discussion on manufacture of steel anchor beam and steel corbel for cable pylon of large cable-stayed bridge [J]. Urban roads bridges & flood control, 2022(12): 179-182, 23-24.
- [7] 蒋能世,张毅君,李金余,等. 南京长江第五大桥南边塔首节段钢壳安装定位技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019,15(12):257-259.  
JIANG N S, ZHANG Y J, LI J Y, et al. Installation and positioning technology of steel shell in the first section of the south tower of Nanjing Fifth Yangtze River Bridge [J]. Highway transportation technology (applied technology edition), 2019, 15 (12): 257-259.
- [8] 荆刚毅,杜洪池,蒋能世,等. 南京长江第五大桥钢壳-混凝土组合索塔桥位施工关键技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019,15(10):211-214,222.  
JING G Y, DU H C, JIANG N S, et al. Key construction technology of steel shell-concrete composite pylon bridge site of Nanjing Fifth Yangtze River Bridge [J]. Highway transportation technology (applied technology edition), 2019, 15 (10): 211-214, 222.
- [9] 陈平,华乐. 南京长江第五大桥钢混组合塔钢壳制造关键技术[J]. 世界桥梁,2019,47(3):20-25.  
CHEN P, HUA L. Key manufacturing techniques for steel shells of steel-concrete composite pylons of Nanjing Fifth Yangtze River Bridge [J]. World bridges, 2019, 47(3): 20-25.