

常泰长江大桥防撞设施钢结构制造工艺研究

张震, 薛军, 何涛, 苏凯

[中铁山桥(南通)有限公司, 江苏 南通 226000]

摘要: 以常泰长江大桥防撞设施工程为研究对象, 主体结构由增强橡胶软体防撞圈与钢骨架组成。针对制造过程中软体周圈弧形钢结构易变形、扩散块与钢支架结构设计不合理及精度难控制等关键工艺难题, 开展新型防撞设施工程制造工艺的优化研究。通过引入创新工法, 结合制造工艺改进与结构设计优化, 有效提升了构件精度与整体可靠性, 并经工程实践验证了该工艺的可行性。研究成果不仅确保了工程质量, 创下了该类型桥梁防撞工程的先例, 也为后续类似工程提供了宝贵的工艺借鉴与实践经验。

关键词: 桥梁工程; 防撞设施; 制造工艺; 结构优化; 组装

中图分类号: U443.5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0382-05

Research on Manufacturing Process of Steel Structures for Anti-collision Facilities of Changtai Yangtze River Bridge

ZHANG Zhen, XUE Jun, HE Tao, SU Kai

[China Railway Shanqiao (Nantong) Co., Ltd., Nantong 226000, China]

Abstract: Taking the anti-collision facility project of the Changtai Yangtze River Bridge as a research object, its main structure consists of reinforced rubber flexible anti-collision rings and a steel frame. Aiming at the key technical challenges in the manufacturing process, such as the easy deformation of the soft circumferential-shaped steel structure, the unreasonable design of the diffusion block and the steel support structure, and the difficulty in controlling the precision, the optimization research on the manufacturing process of new anti-collision facilities is conducted. By introducing the innovative construction method, and combined with the modification of manufacturing process and optimization of structural design, the precision of components and the overall reliability are effectively enhanced, and the feasibility of this process is validated through engineering practice. The research results not only ensure the engineering quality and set a precedent for this type of bridge anti-collision engineering, but also provide the valuable process insights and practical experience for similar projects in the future.

Keywords: bridge engineering; anti-collision facilities; manufacturing process; structural optimization; assembly

0 引言

当前, 我国基础设施建设正处于高速发展阶段, 跨航道桥梁数量显著增加, 由此引发的船桥碰撞事故亦日益频发^[1-3]。为最大限度地保障船舶与桥梁结构的正常服役性能, 相关领域学者创新性地提出了一种自浮式钢箱-软体多级耗能防船撞装置^[4-6]。在加工制造过程中, 持续优化制造工艺与结构设计, 推动理论成果向实际工程应用转化, 已成为确保此类工程项目顺利实施的关键所在。

1 工程概况

常泰长江大桥防撞设施工程位于常泰长江大桥

涉水桥墩位置^[7], 整体结构由增强橡胶软体防撞圈与钢骨架共同构成。钢箱高为3.6 m, 宽度为3 m, 软体直径3 m, 设计吃水为1.6 m, 总体尺寸为23.7 m×23.0 m×3.6 m, 见图1。其中, 外置软体防撞圈为小能量撞击工况下的主要耗能构件, 其主体为帘布增强橡胶基复合材料制成的薄壁空腔结构, 由软体腔体、腔内散粒体填充层以及外部防护罩三部分组成。为保障防撞设施具备良好的自浮能力, 在钢骨架内侧与桥墩接触区域设置了带摩擦板型橡胶护舷的钢支架, 以此降低防撞设施与桥墩表面之间的摩擦阻力。为进一步提升软体圈的耗能效率并增强其抗穿刺性能, 在软体圈外侧撞击区域加装了内部填充聚氨酯泡沫的钢质外壳扩散块。扩散块外侧另布置有三条橡胶护舷带, 可在撞击发生时起到有效的缓冲作用, 见图2。

收稿日期: 2025-12-22

作者简介: 张震(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁钢结构制造研究工作。

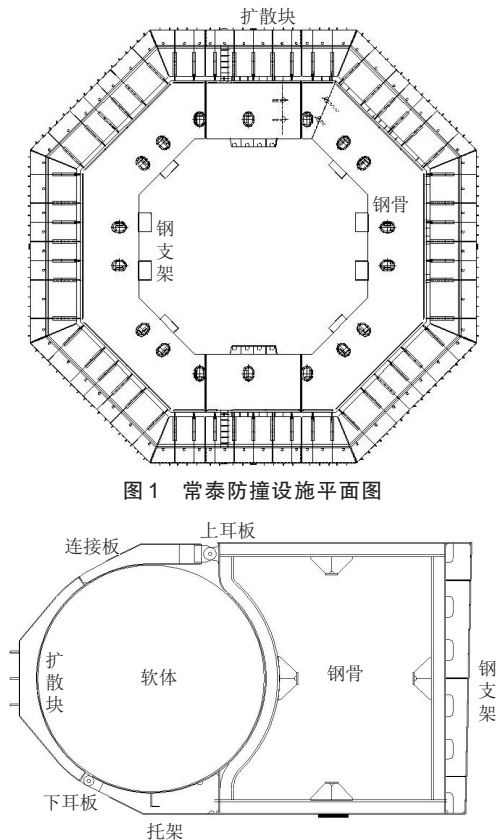


图 1 常泰防撞设施平面图



图 2 常泰防撞设施断面图

2 项目制造工艺难点分析

该项目为新型结构体系,其外圈环箍采用圆弧形构造,钢骨与扩散块、扩散块与托架及各节段之间均采用不锈钢螺栓连接,孔群数量多,对安装精度要求较高。通过分析项目结构特征,并结合近年来的制造经验与现有设备、场地条件,总结出以下制造重难点:板单元制造工艺;钢骨节段组工艺;扩散块-连接板节段组工艺;块体拼装工艺。在制造过程中,需制定经济合理的板单元划分及组方案,在减少焊接工作量的同时有效控制焊接变形。精度控制的关键环节如下。

- (1)钢骨外腹板单元由外腹壁板、异形 L 肋及三角加劲组成,需将异形 L 肋的零件加工误差及外腹板外侧局部平整度偏差控制在 5 mm 内;
- (2)钢骨隔板单元作为结构刚性支撑与拼装内胎,直接决定钢骨的空间尺寸,须严格控制其长度、宽度偏差、对角线偏差;
- (3)环箍中扩散块-连接板主体结构均采用 8 mm 薄板,底板半径达 1 512 mm,焊接变形显著,需保证其内侧局部平整度偏差值不超过 5 mm;
- (4)环箍中扩散块-连接板结构为可更换结构,

须确保环箍托架耳板与扩散块耳板同心度偏差不大于 2 mm;

- (5)原扩散块与钢支架结构存在设计不合理的地方,须进行优化调整来弥补缺陷;
- (6)针对钢骨-软体-环箍组成的新型结构体系,应制定合理的制造与安装顺序,尽量缓解焊接空间受限带来的施工困难,以节约工期。

3 制造工艺优化和技术创新

3.1 制造工艺方案概述

结合近年钢结构制造经验与现场条件,针对该新型结构体系提出以下工艺流程:零件下料→板单元组焊→钢骨节段、托架节段、扩散块-连接板节段(见图 3)连续匹配制造→钢骨-托架节段拼装→软体-紧固带安装→扩散块-连接板节段拼装→解体运输→桥位安装。采用节段连续匹配制造方式,不仅有利于缩短拼装周期、节约施工成本,还可有效保障各块体之间的匹配精度与整体尺寸一致性。

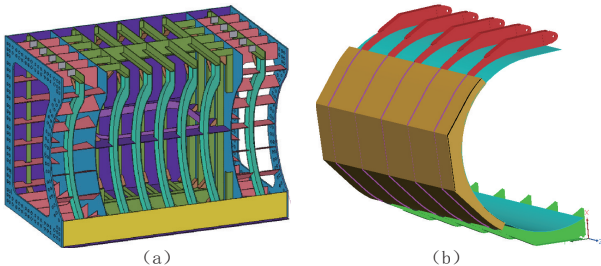


图 3 常泰防撞设施节段构造图

3.2 扩散块与钢支架结构形式优化

为便于钢结构施工与结构稳定,对扩散块与钢支架结构进行优化,具体优化结果见表 1。

3.3 数字化自动化建造技术

我国“十四五”规划明确提出要发展数字化智能建造^[11-14]。在钢结构加工制作领域,依托技术持续进步,数字化与智能化已成为提升效率、保障质量的关键路径^[15]。通过引入智能化装备与精细化管理,可对制作工艺进行科学优化,减少临时约束装置(如临时吊耳等)在节段翻身与吊装过程中对母材造成的损伤。同样,焊接变形若控制不当,也可能对母材产生不利影响。

在板单元制造中,应用自动焊接机器人实施钢塔板单元间的焊缝自动化焊接,不仅能有效保证焊缝的外观与内在质量,同时也验证了焊接机器人高效率、高质量的优势,为其推广至其他构件单元的制

表1 扩散块与钢支架结构形式优化

方案类型	原设计结构形式	优化后结构形式
扩散块结构	1.原顶板与侧板为一体,顶板内表面与隔板贴合,导致顶板与隔板焊缝无法焊接;	1.将顶板与侧板分离,隔板与顶板上表面对齐,顶板坡口朝外,焊接完成后打磨圆滑;
	2.扩散块内箱被隔板隔离多段,无法灌注聚氨酯泡沫;	2.在左侧每道侧板下方开孔,待箱体焊接完成后将连接板侧朝上,自上问下灌注阻燃型泡沫 ^[8-10] ,灌注发泡完成后表面焊接封堵;
钢支架结构	3.转角处扩散块连接板为可拆卸型,原设计为圆孔不满足可拆卸要求	3.根据转角大小及焊接螺栓长度,确定扩散块连接板长圆孔大小
	1.原钢支架表面工艺孔过小,无法焊接内部隔板与钢骨内腹板的焊缝,无法保证其防腐性能;	1.参考南京二桥防撞设施项目,采用开放式钢支架,增加工艺孔至隔板与内腹板全焊接;
	2.原钢支架底板与钢骨底板为仰位焊接,熔池成型困难	2.考虑钢支架底板焊接时陶瓷衬垫不易安装,用钢衬垫作为背面焊接

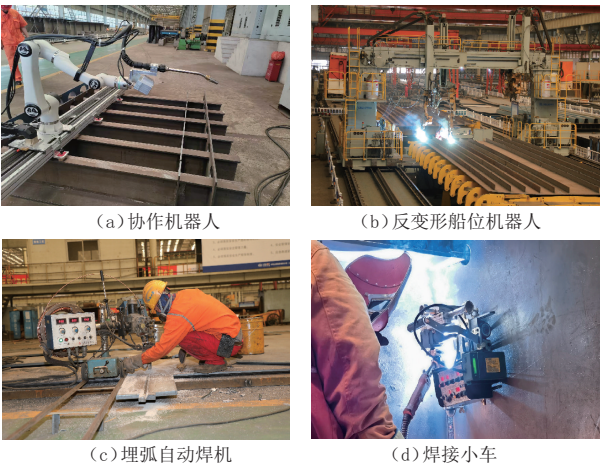


图4 自动焊接设备照片

5 防撞设施制造关键技术

5.1 板单元制造工艺

5.1.1 板单元划分

本防撞设施结构划分为隔板单元(横/竖)、腹板单元(内/外)、顶/底板单元、钢支架单元、托架单元、扩散块单元及连接板单元。

5.1.2 环箍单元制造工艺

针对构成环箍主体的关键弧形构件,包括外腹板单元、托架单元、扩散块单元及连接板单元。这些弧形结构是确保环箍整体空间尺寸准确与内侧表面平整度的关键基础,其内侧局部平整度允许偏差须严格控制在5 mm 范围内。为确保制造精度,需对以下工艺流程实施重点管控:

(1)数字化展开放样:借助三维建模软件,利用

曲面展开功能,将空间曲面构件转化为高精度的平面下料图;

(2)数控下料与余量管理:放样后采用数控精切下料,在长度与宽度方向上合理预留焊接收缩余量,以补偿后续工序可能产生的尺寸变化;

(3)分段成型工艺:受压型设备尺寸限制,采取“先压型、后拼焊”的方式,通过分段成型、焊接拼合实现整体曲率,即以直段逼近曲线;

(4)拼板精度与变形控制:钢板对接拼板时,错边量不得大于0.5 mm,施焊前需预设反变形,以抑制焊接引起的板面变形,确保构件平面度;

(5)胎架组装与成型检测:在专用曲面组装胎具上进行整体组焊。焊接前须准确定位内部加劲,使其兼作面板的内支撑;焊接后采用弧度样板检测实际曲率,并对不合格处进行校正,见图5。

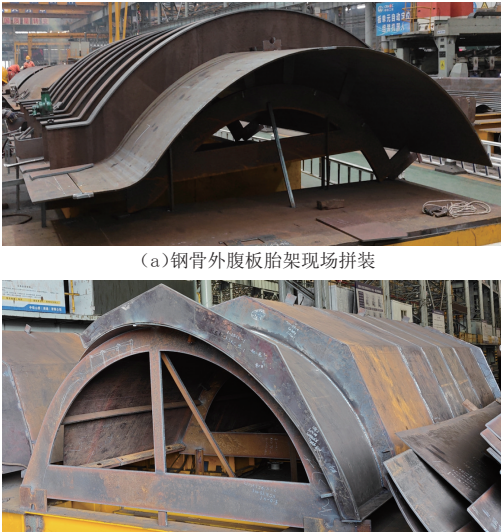


图5 板单元胎架现场拼装

5.1.3 隔板单元制造工艺

隔板单元作为钢骨节段内部的关键刚性支撑件,同时兼具后续构件拼装“内胎模”的功能,其制造精度直接决定钢骨整体空间结构尺寸的准确性。因此,须严格控制其外形尺寸偏差,具体精度要求为:长度与宽度允许偏差为±2 mm,对角线长度差不得超过3 mm。

为实现上述精度目标,隔板单元的制造采用以下工艺控制措施:

(1)主板下料:隔板主板采用数控精密切割下料,确保基板轮廓尺寸精确,为后续组装奠定基础;

(2)组焊防变形控制:在专用组装平台上布置具有预设反变形的胎架。将主板置于胎架上,组装并焊接内部肋板。组装时,使用卡具将主板周边与胎

架牢固固定,以有效约束焊接过程中的变形趋势;

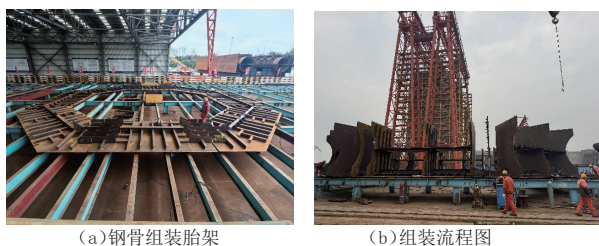
(3)自动化焊接:主要焊缝采用焊接机器人施焊。通过精确控制焊接热输入与顺序,最大限度减少焊接变形,从而确保隔板单元的最终外形尺寸满足设计要求。

5.2 节段组装工艺

5.2.1 节段精度控制

(1)胎架设计

为确保钢骨节段组装精度与结构稳定性,组装过程在专用平台上进行。平台基础通过工字钢进行加固硬化,保证胎架基础牢固,避免在使用过程中发生沉降。胎架按每轮同时组装四个节段的规模布置,并设置清晰的纵向与横向定位基线,见图6。



(a)钢骨组装胎架

(b)组装流程图

图6 节段胎架现场拼装

为进一步保障测量控制的可靠性与实时性,在胎架外部独立设置永久性基线、基准点及测量标志塔。整个组装过程中,对胎架结构实施变形监控,防止因荷载或环境影响导致胎架变形,从而确保节段组装精度持续受控。

(2)拼装流程

首先,在拼装平台上以横向与纵向基线为基准,进行板单元的逐次组装。具体流程如下:

a. 定位底板单元:以平台纵横基线为基准,首先精确定位底板单元,作为整个节段组装的基础平面。

b. 安装竖隔板单元:以底板上的基准线为准,依次安装各竖隔板单元。在此过程中,需严格控制隔板之间的间距以及各竖隔板自身的垂直度。

c. 安装横隔板单元:借助已定位的竖隔板及其加劲肋上的三角板位置,进行横隔板单元的定位与安装。此步骤是控制节段内部空间尺寸的关键,需重点保证横隔板的组装精度。

d. 安装腹板单元:依据底板基准线及已安装隔板的定位线,分别定位并安装内、外腹板单元。

e. 安装顶板单元:最后,以已安装的隔板及腹板形成的定位线为基准,完成顶板单元的定位与安装。

通过以上顺序严谨、基准统一的阶梯式组装流程,确保各板单元位置准确,从而保证最终节段的外

形尺寸与整体平面度满足设计要求。

5.2.2 焊接变形控制

为保证整体制造精度,节段在长度方向上预先加放1‰的工艺余量。待节段组装焊接完成后,在预合拢阶段使用激光经纬仪进行精准测量与画线,并据此切除预留的余量。画线时,需额外计入0.8‰的焊接收缩补偿量,且整个画线过程必须严格符合节段主要尺寸的精度控制要求。

节段的建造遵循板单元制作的基本原则,通过最大限度地采用部件、组件及平面与曲面块体进行装焊,以提升制造效率与精度控制。相关具体工艺要求均在生产设计图纸及建造工艺细则中予以明确规定和清晰表达。

焊接作业遵循明确的顺序原则:采用“先内后外、先下后上、由中心向两侧对称施焊”的方式,首先完成结构主要角焊缝的焊接;随后再进行壁板的组装及其余角焊缝的焊接。该顺序旨在有效控制焊接变形,确保节段几何尺寸的稳定。

5.3 块体拼装工艺

5.3.1 拼装流程

钢骨节段组装完成后,以其外腹板为拼装基准,依次进行块体拼装。具体工艺流程如下:

(1)安装托架单元:以底板定位线与钝边坡口为基准,精确定位托架单元。安装时需保证托架面板与钢骨外腹板之间的平整度。此外,考虑到扩散块-连接板结构为可更换设计,必须严格控制环箍托架耳板的同心度,其偏差不得超过2 mm。

(2)安装扩散块-连接板节段:以连接板上表面为定位基准,依次匹配安装扩散块-连接板节段。安装过程中:优先调整下部耳板连接位置,确保扩散块下耳板与托架耳板的同心度偏差符合要求;再定位连接板上耳板与对应钢板耳板位置;最后采用弧度样板对环箍内腔形状进行检查验证。相邻扩散块-连接板节段的外表面横向基线高度差应控制在2 mm以内。

(3)检测、焊接及下胎:全部定位与调整完成后,对整体外形尺寸及环箍内腔尺寸进行检测。合格后,焊接上下吊耳焊缝,随后将块体解体并吊离胎架,转运至存放区,见图7。

需要特别说明的是,若块体拼装在厂房内进行,需对厂房环境实施恒温控制,确保作业期间温度波动小于2℃,以避免温差引起的尺寸变化对匹配精度造成不利影响。

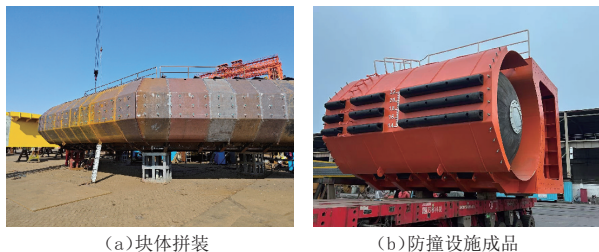


图7 块体成型

6 结 语

以常泰长江大桥防撞设施为对象,系统研究了弧形钢结构制造中的精度控制、焊接变形控制以及结构优化等关键技术难题,得出以下结论:

(1)通过采用数字化展开放样、分段成型、反变形胎架等创新工艺,结合自动化焊接技术,有效解决了薄板弧形成形及多节段匹配精度控制等问题。

(2)对扩散块与钢支架的结构优化,显著提升了可制造性、防腐性能与功能可靠性。

(3)实践表明:所提出的“板单元—节段—块体”连续匹配制造流程及严格的焊接顺序控制,能够有效保障整体尺寸精度与结构质量。

(4)已形成的成套制造工艺成功应用于常泰大桥项目,不仅为同类新型自浮式防撞设施的建造提供了系统解决方案,也为推动钢结构数字化、智能化建造积累了重要的工程经验。

参考文献:

[1] 邓勇.国内外桥梁预防船舶碰撞技术浅析[J].中国水运,2025(20):

120-122.

[2] 黄杰忠,孔维琛,钟继卫,等.基于协整与卡尔曼滤波方法的悬索桥船撞事故识别[J].桥梁建设,2021,51(6):45-52.

[3] 樊伟,钟正午,王君杰,等.桥梁船撞研究进展综述:事故、分析与防护[J].中国公路学报,2024,37(5):38-66.

[4] 方海,姚鹏飞,沈孔健.自浮式钢箱-软体多级耗能防船撞装置撞击试验研究[J].桥梁建设,2022,52(3):38-44.

[5] 陈亮,王倩.一种自浮式防撞装置的防船撞性能分析[J].公路,2021,66(7):129-133.

[6] 邹永超,贾恩实.桥墩柔性自浮式防撞装置基本结构尺度研究[J].桥梁建设,2024,54(4):112-118.

[7] 郑清刚,苑仁安,周子明.常泰长江大桥工程设计创新综述[J].土木工程与绿色建筑,2025,1(5):12-20.

[8] 李晴文,史立文,杨春光,等.阻燃型硬质聚氨酯泡沫的制备与性能研究[J].化学工程师,2025,39(7):94-97.

[9] 史立文,李晴文,杨春光,等.不同发泡剂和催化剂组合对阻燃型硬质聚氨酯泡沫的性能影响研究[J].化工新型材料,2025,53(增刊1):261-265.

[10] 邢凤钦,张伟,佟铭玉.阻燃型硬质聚氨酯泡沫的研究进展[J].辽宁化工,2021,50(5):650-653;657.

[11] 张娜娜.智能建造技术在市政道路桥梁施工中的应用实践—以北京市北清路快速路桥梁工程为例[J].绿色建造与智能建筑,2025(11):84-86;94.

[12] 李金峰,吴建明.高速公路桥梁智能建造中心安全管理研究[J].公路,2025,70(12):454-460.

[13] 王道斌,邵冬明.“智能交通与建造”微专业的建设实践与效果分析[J].物流科技,2025,48(23):182-184.

[14] 李艳哲.中铁大桥局集团有限公司:桥梁智能建造新装备应用[J].施工企业管理,2025(8):120.

[15] 陈振明,王朋,万敏芳,等.钢结构智能制造技术的发展历程与工程实践[J].钢结构(中英文),2024,39(11):80-86.

(上接第325页)

57.90 mm/h,路面出现1个污水井盖冒流

D2 000 mm顶拉管井改造成D1 000 mm普通井,污水管网系统因井室空间减少调蓄容积约361.2 m³,对初雨截流的降雨量下降约19.44%,因此对整个系统污水溢流频次控制不利。而D2 000 mm顶拉管井直接作检查井增加调蓄容积提高污水管网系统在雨天运行时的安全韧性。

4 结 语

顶拉管具有适用广、避障碍能力强、次生灾害小、造价低^[8]等特点,已在珠三角地区得到验证和大规模推广。顶拉管井直接作为检查井方便运维,节约投资,增加含合流污水系统的安全韧性。

参考文献:

[1] 卢纯青.小口径顶管技术在市政污水管道施工中的应用[J].福建建筑,2018(1):73-76.

[2] 刘盛兵,向启贵,刘坤.水平定向钻穿越施工及其风险控制措施探讨[J].石油与天然气化工,2008,37(4):353-356.

[3] 郭坤,李齐军.重力流排水管定向钻技术改进探讨[J].给水排水,2018,54(6):102-105.

[4] 陈伟鹏.排水工程中定向钻导浆拉管、顶拉管的应用技术[J].城市道桥与防洪,2021(11):163-166.

[5] 姜春雨,方振东,王涛,等.顶拉管工艺在排水管道施工中的应用[J].水电站设计,2024,40(4):33-36;57.

[6] 季莹莹.市政道路上先导顶拉管施工技术[J].四川水利,2022(增刊1):67-70.

[7] 冯宇,封天雨,王慧妍,等.长春北郊西合流制排水系统多目标联合调度控制优化分析[J].净水技术,2018,44(增刊1):331-339.

[8] 徐荣华,孟远.顶拉管施工技术的探讨[J].港工技术,2024,61(2):353-356.