

双柳长江大桥主、散索鞍钢结构制造技术

李 森, 李 明, 董小亮, 孙 畅

武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月23日

摘 要

双柳长江大桥为主跨1430 m的双塔单跨简支梁悬索桥, 主跨布置为(430 + 1430 + 430)米。主、散索鞍是悬索桥上部结构的主要组成部分, 该项目主、散索鞍鞍体均为铸焊结构, 主索鞍鞍体重达170 t, 散索鞍鞍体重达125 t。本文介绍该大桥主、散索鞍钢结构制造技术和质量控制要点, 主、散索鞍鞍体制造完成后, 经检测, 各项技术指标均满足设计和规范要求。

关键词

悬索桥, 主索鞍, 散索鞍, 制造工艺, 质量控制

Manufacturing Technology for the Steel Structures of Main and Splay Cable Saddles for the Shuangliu Yangtze River Bridge

Sen Li, Ming Li, Xiaoliang Dong, Chang Sun

Wuhan Marine Machinery Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 21, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 23, 2026

Abstract

The Shuangliu Yangtze River Bridge is a twin-tower, single-span suspension bridge with a main span of 1430 meters; the span arrangement is (430 + 1430 + 430) meters. The main cable saddles and splay cable saddles are key components of the suspension bridge's superstructure. For this project, the bodies of both types of saddles feature a cast-welded structure; the main cable saddle weighs 170 tons, while the splay cable saddle weighs 125 tons. This paper outlines the manufacturing technology and key quality control measures for these steel saddle structures. Post-manufacturing inspections confirmed that all technical specifications met the design and regulatory requirements.

Keywords

Suspension Bridge, Main Cable Saddle, Splay Cable Saddle, Manufacturing Process, Quality Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

索鞍是悬索桥主缆系统的主要受力构件, 索鞍分为主索鞍、散索鞍两种, 其主要作用是平顺改变主缆线型并将载荷传递到桥梁主塔和支墩[1], 早期欧美悬索桥(如金门大桥)多采用整体厚大铸钢索鞍, 整体铸造整体性好, 但铸件重量大, 厚大截面内部易产生缩松、成分偏析, 缺陷返修量大, 机加工成本高, 大件浇铸风险高[2]。20 世纪后期逐步开始探索分块铸造、铸焊拼接工艺, 但受限于大型铸-轧异种钢焊接技术, 大吨位索鞍仍以整体铸造为主, 大跨升级时受铸件成型约束明显[3]。国内大跨悬索桥起步晚, 发展速度快, 经历整体铸造到铸焊组合式两个阶段。第一阶段(20 世纪 90 年代): 早期工程, 采用整体铸造索鞍, 材质 ZG310-570 铸钢, 铸件厚大部位缺陷多, 探伤合格率低, 返修工作量巨大。第二阶段(2010 年后): 为解决铸钢焊接性能差的痛点, 国内推出焊接结构用铸钢 ZG270-480H(GB/T7659-2010), 广泛应用于铸焊组合索鞍: 鞍头采用 ZG270-480H 铸钢, 下部鞍座采用 Q345 系列厚钢板焊接, 是当前国内主流制造方案[4]。

双柳长江大桥为特大型悬索桥, 索鞍鞍体采用铸焊结构, 鞍头使用 ZG270-480H 铸件, 鞍座采用 Q345R 厚钢板。索鞍鞍体焊接均为厚板焊接, 且属于铸-轧异种接头, 焊接较为困难。索鞍鞍体尺寸、重量大, 鞍槽为多段圆弧曲面, 直接约束主缆钢丝排列; 鞍槽圆弧半径、槽底平整度、隔板槽位置精度要求极高, 导致索鞍加工效率低。

为解决索鞍焊接难度大, 加工效率低等问题, 本文通过焊评试验确定了焊接参数与方法, 并采取控制措施, 解决了索鞍焊接问题; 通过分体加工解决了主索鞍体积大、重量重导致的加工困难问题; 通过主、散索鞍鞍槽曲面智能化加工研究提高加工效率。

2. 工程概况

双柳长江大桥为主跨 1430m 的双塔单跨简支梁悬索桥, 主跨布置为(430 + 1430 + 430)米, 边跨比 0.301, 矢跨比采用 1/9。全桥共设两根主缆, 两塔间主缆平行, 横向间距 43.2, 北岸主塔和锚碇间主缆分别向主塔外侧偏 0.85°, 南岸主塔和锚碇间主缆分别向主塔外侧偏 0.92°。

2.1. 主索鞍鞍体结构介绍

主索鞍鞍体长宽高尺寸 4.3 m × 3.3 m × 3.8 m, 理论总重量约 170 t (边跨鞍体+中跨鞍体), 为减轻吊装、运输重量, 鞍体分两半制造, 吊至塔顶后用高强度螺栓拼接起来。主索鞍鞍体采用铸焊式结构, 鞍头为 ZG270-480H 的铸件, 底座为 Q345R 钢板结构。主索鞍鞍体结构示意图如图 1。

2.2. 散索鞍鞍体结构介绍

散索鞍鞍体为铸焊结构, 长宽高尺寸为 4.45 m × 4.5 m × 5.5 m, 重约 125 t, 鞍头部位采用 ZG270-480H 的铸件, 鞍座为 Q345R 钢板和锻件焊接结构。散索鞍鞍体结构示意图如图 2。

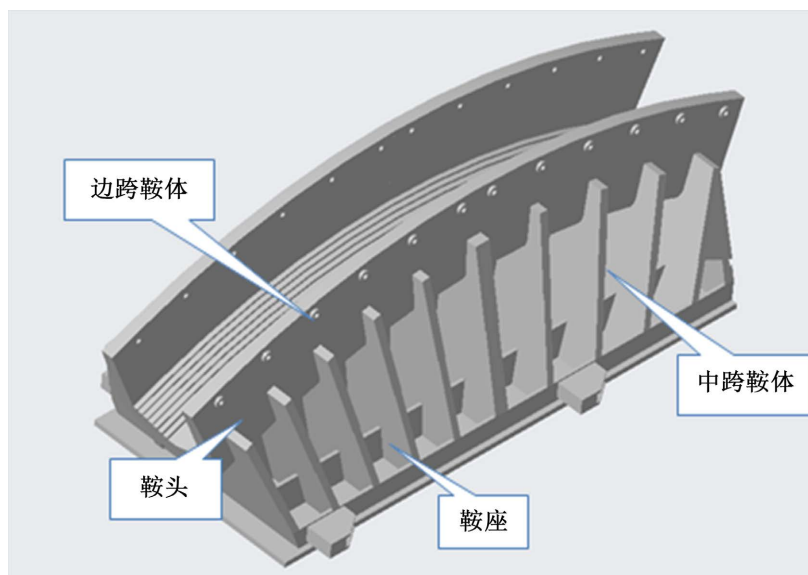


Figure 1. Schematic diagram of the main cable saddle body structure

图 1. 主索鞍鞍体构造示意图

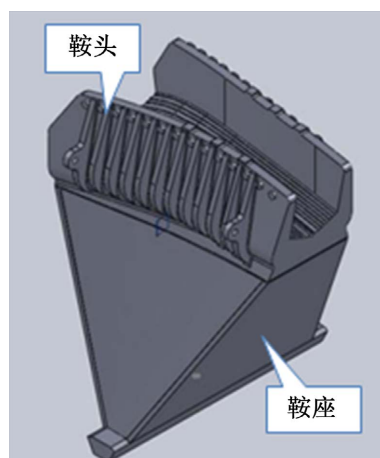


Figure 2. Schematic diagram of the loose saddle structure

图 2. 散索鞍构造示意图

3. 索鞍制造重难点及主要技术措施

3.1. 主、散索鞍焊接

3.1.1. 焊接重难点分析

主索鞍鞍体、散索鞍鞍体为组焊件，尺寸和重量较大。主索鞍鞍头、散索鞍鞍头和鞍座间的焊缝质量直接关系索鞍的可靠性和安全性，其特点是重量大，焊接坡口大，结构刚性大。这些都给焊接带来了较大的难度。

鞍头(ZG270-480H)就碳当量来说，焊接性能一般，但由于铸造组织特点及裂纹敏感指数较高，焊后容易造成冷裂纹。鞍体焊接从结构和材料方面均存在较大难度，主要难点如下：

- 1) 由于铸造组织特点及冷裂纹敏感指数较高，并且是大坡口焊缝焊接，鞍座结构焊后易产生冷裂纹。
- 2) 鞍体组焊钢板与铸件之间、钢板之间间距小，焊接操作空间小，给焊接作业带来困难。

3) 肋板与鞍头和底板为封闭格字型大坡口全熔透对接和T接焊缝,又是厚板焊接,结构刚性非常大,应力集中,容易造成层状撕裂。

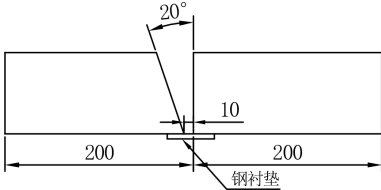
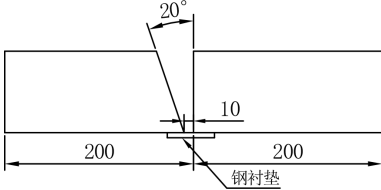
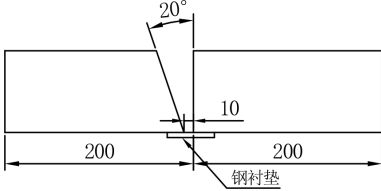
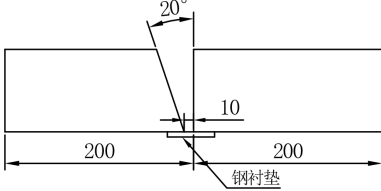
4) 焊接应力大,容易导致焊接变形。

3.1.2. 焊接控制措施

为保证构件焊缝质量,具体采取的控制措施如下:

- 1) 采用 CO₂ 气体保护焊进行焊接,具有焊接效率高、焊缝成形美观、焊接质量易于控制等优点[5]。
- 2) 采取整体预热的方式进行预热,焊接过程中进行退火,焊后整体退火消除应力。
- 3) 为防止变形,在适当的部位应加焊工艺拉筋,并采取偶数名焊工同时对称焊接的方法,对于长度大于 1 m 的焊缝,采用分段退焊法,尽量减小焊接变形。焊接进程中应适时检测焊接变形,根据变形情况调整焊接顺序。
- 4) 焊接前进行焊接工艺评定确保焊接方案的可行性,焊接工艺评定方案如下表 1 所示。

Table 1. Welding procedure qualification plan
表 1. 焊接工艺评定方案

序号	焊接位置	试板坡口示意图	母材及厚度	焊接材料	焊后热处理
1.	横焊		Q345R ($\delta 100$) /Q345R ($\delta 100$)	YCJ501-1/ $\Phi 1.2$	去应力退火
2.	立向上		Q345R ($\delta 100$) /Q345R ($\delta 100$)	YCJ501-1/ $\Phi 1.2$	去应力退火
3.	横焊		ZG270-480H ($\delta 100$) /Q345R ($\delta 100$)	YCJ501/ $\Phi 1.2$	去应力退火
4.	立向上		ZG270-480H ($\delta 100$) /Q345R ($\delta 100$)	YCJ501/ $\Phi 1.2$	去应力退火

主、散索鞍鞍体焊接顺序如图 3、图 4 所示。

3.2. 主索鞍、散索鞍机加工

3.2.1. 主索鞍鞍体机加工重难点及应对措施

主索鞍鞍体由两半锁合而成,主索鞍鞍体理论总重量达 170 t,两块鞍体之间结合面与底面夹角 90°,

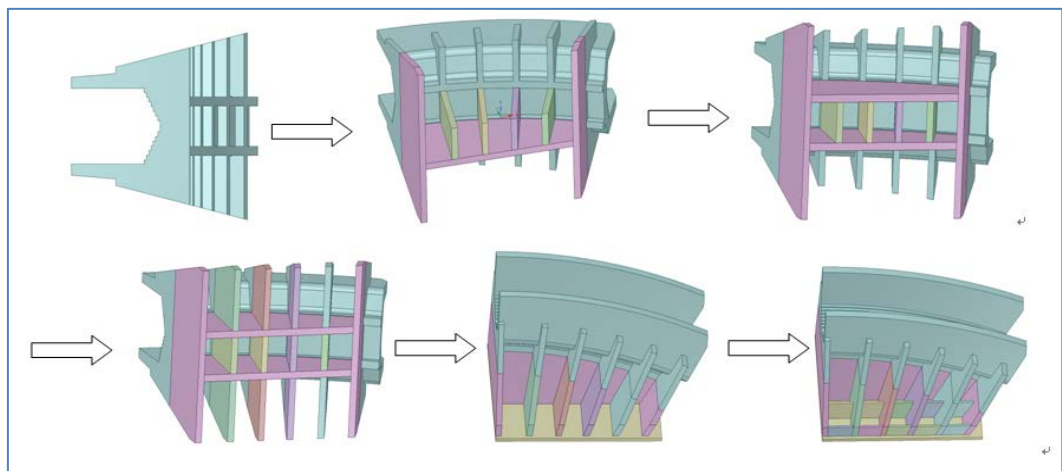


Figure 3. Welding sequence of the main cable saddle body
图 3. 主索鞍鞍体焊接顺序

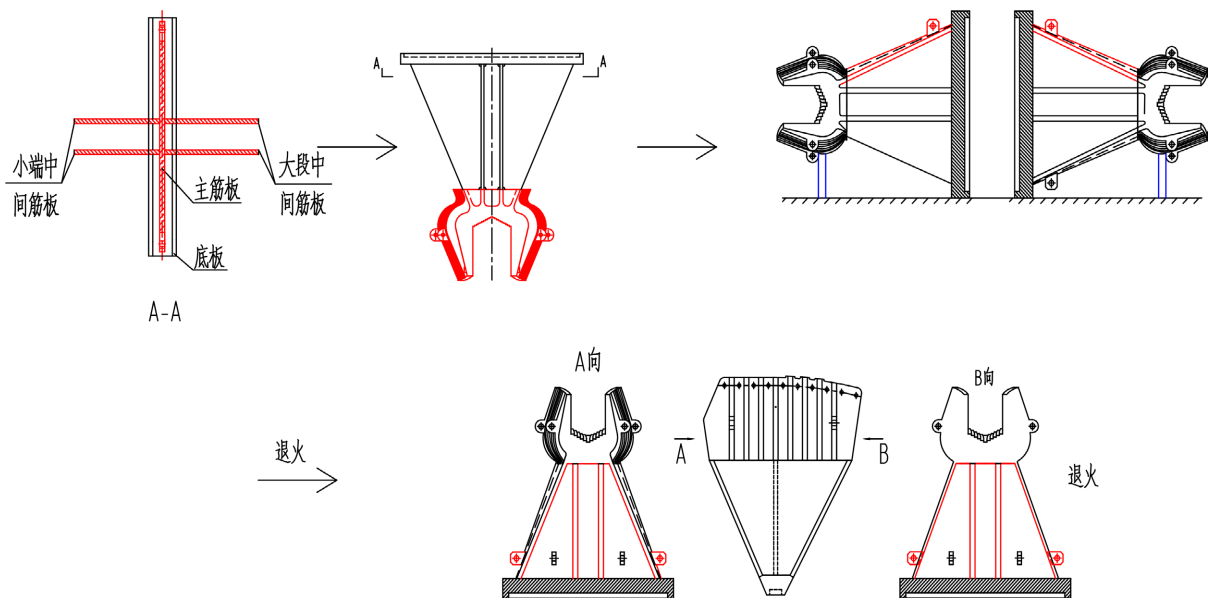


Figure 4. Welding sequence for the saddle body of the saddle for bundled strands
图 4. 散索鞍鞍体焊接顺序

因两块鞍体锁合后质量及体积大，鞍槽圆弧较长，如整体机加工机床主轴悬伸长，加工效率和加工精度相对较分体加工有所降低。针对该索鞍的结构特点，进行了相应的工艺研究，加工过程中主要重点及控制点如下：

- 1) 鞍槽对称中心面与底面的垂直度。
- 2) 鞍槽整体轮廓度及鞍槽宽度深度尺寸精度。
- 3) 结合面与底面的角度偏差。

鞍体加工主要控制点及应对措施：

- 1) 在单件鞍体加工时在边跨和中跨鞍体底面设置基准带，加工鞍槽时以鞍体底面设置基准带为基准进行校正控制。
- 2) 采用重型数控镗铣床及其配备回转台加工，鞍体在回转台上回转，消除了二次装夹加工误差。

3) 数控铣各基准面及绳槽时, 槽宽和槽深公差进行适当调整, 保证尺寸精度和鞍槽对接精度。

4) 在结合面加工时先加工一个基准带, 在加工结合面和底面时以此基准带为基准校正和加工结合面整个平面, 保证结合面与底面的夹角精度满足要求。

3.2.2. 散索鞍鞍体加工重难点及应对措施

散索鞍鞍体长宽高尺寸 $4.45\text{ m} \times 4.5\text{ m} \times 5.5\text{ m}$, 重达 125 吨, 散索鞍作为悬索桥的关键零部件, 在其制造过程中, 其加工重点和难点是鞍槽的精度和鞍槽与底面摆轴面的位置精度, 散鞍鞍槽为三维空间复杂曲面, 且鞍槽与底面距离大, 校正困难, 加工难度很大。在其制造过程中, 其关键控制加工技术难点如下:

1) 散索鞍的鞍槽由三维空间曲面组成, 槽形复杂, 且因鞍体重量大, 一般采用工件固定方案加工鞍槽时加工时残留较大, 需要采用人工劈铲打磨方法去除残留, 加工效率低, 加工质量保证难度大。

2) 散索鞍呈锥形结构, 外表面无可作为加工时校正的基准, 底面与鞍槽顶面距离达 3 m , 机床加工时校正鞍槽与底面的相对位置困难。

针对上述难点情况, 在加工中我们采取以下措施:

1) 为了保证鞍槽的精度, 加工时采用 4 轴联动数控镗床来进行鞍槽和侧壁的加工。通过三维 CAM 软件 UG 编制加工程序, 然后通过专用仿真软件 VERICUT 进行仿真加工, 确保加工出的鞍槽的精度[6]。

2) 为了保证摆轴座底槽与鞍头的位置度要求, 在加工过程中, 设置工艺基准, 作为加工鞍槽和底部的找正基准。

3) 鞍体焊接后整体加工时采用大型工作台加工, 通过回转工作台实现底板加工工位到鞍槽加工工位的转换, 减小重新起吊和校正引起的二次装夹误差。

3.2.3. 主、散索鞍鞍槽曲面智能化加工研究

主、散索鞍鞍槽为空间三维曲面, 其制造重难点主要是鞍体的加工及鞍槽尺寸精度检查。索鞍鞍体零件结构大, 鞍槽为三维空间复杂曲面, 加工精度要求高, 目前一般为数控机床运用加工程序三轴联动数控加工鞍槽, 因加工过程中工件不能旋转, 导致鞍槽曲面与机床主轴不能保持垂直, 加工过程中残留较大, 加工效率低, 加工质量也不高[7]。为提高鞍槽加工面的精度及效率, 本项目执行过程中开展了索鞍鞍槽四轴数控编程、数控加工方面的研究。

主要研究内容:

结合该项目索鞍制造工艺和加工设备, 研究通过四轴数控加工编程系统。实现基于现有机床设备的四轴数控加工技术, 提高鞍槽加工精度, 提升加工质量及效率。通过集中我公司先进制造技术优势, 经过半年时间的准备和摸索试验, 完成了主索鞍、散索鞍鞍槽四轴联动数控加工技术研发, 在双柳长江大桥项目进行了实际应用。

4. 主要研究成果

4.1. 索鞍焊接研究成果

索鞍焊评试验结果如表 2。

金相图如表 3。

历时两个月, 完成焊评试验, 总结如下:

1) 针对双柳长江大桥索鞍的焊接我司制定了焊接评定方案, 共包括三种焊接位置(平焊、横焊和立焊)的 5 组焊评(4 组对接, 1 组补焊), 该焊评依据双柳长江大桥的设计图纸以及《钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验》GB/T 19869.1-2005 的要求[8], 能够覆盖索鞍鞍体的所有结构的接头形式、板厚、材质及焊接位置。

Table 2. Summary of welding test results
表 2. 焊接试验结果统计表

编号	材质	板厚(mm)	金相结果	外观检查	UT	MT
1.	Q345R/Q345R	100/100	合格	合格	合格	合格
2.	Q345R/Q345R	100/100	合格	合格	合格	合格
3.	ZG270-480H/Q345R	100/100	合格	合格	合格	合格
4.	ZG270-480H/Q345R	100/100	合格	合格	合格	合格

Table 3. Metallographic diagram
表 3. 金相图

编号	1.	2.	3.	4.
图片				

2) 焊评的焊接过程均按照《钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验》GB/T 19869.1-2005 的要求执行，各项试验结果均满足图纸设计及相关标准的要求。可以认定焊接工艺评定试验合格。

3) 按照焊评方案对双柳长江大桥主、散索鞍鞍体进行焊接，鞍体焊缝均合格。

4.2. 索鞍机加工研究成果

1) 采用最先进的三维 CAM 软件 UG 编制主索鞍、散索鞍四轴加工程序。

2) 索鞍实物鞍槽加工时采用四轴联动的方式，即通过机床的 X、Y、Z 轴及机床的回转工作台参与旋转的联动 B 轴，使机床的主轴方向始终为鞍槽底弧的径向，将鞍槽槽内的全部余量通过铣削的方式去除[9]。

3) 通过主索鞍鞍体、散索鞍鞍体索槽的加工、检测数据分析可知，索鞍索槽四轴联动数控加工技术在特大型索鞍中可以进行实际应用，通过采用该新技术索鞍加工效率提高了 38%，缩短了加工时间 27%，加工精度提高 30%。

4) 经检验，零部件的主要加工尺寸、表面粗糙度及形位公差均符合图纸要求，两半鞍体鞍槽接口对接无错台，鞍槽圆弧轮廓度小于 0.3/1000 mm，整体小于 1 mm。

5) 主、散索鞍鞍体平面度小于 0.08/1000 mm，整体平面度小于 0.5 mm，满足设计及规范要求。

5. 结语

针对双柳大桥主索鞍、散索鞍结构及材质结构特点，通过分析制造重难点，采取相应措施，同时在制造过程中加强质量控制，保证产品质量满足设计及规范要求，验证了主索鞍、散索鞍的制造的工艺合理，同时通过采取四轴联动工艺，大幅提高了鞍体加工效率，节省了加工时间，为其他项目索鞍加工可提供参考。

参考文献

[1] 钱冬生, 陈仁福. 大跨度悬索桥的设计与施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
[2] Bickford, J.H. (1990) An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Connections. Marcel Dekker.

- [3] 张清华, 李乔, 唐亮. 悬索桥主缆与鞍座摩擦特性理论分析方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 44-51.
- [4] 董小亮, 陈云节, 陈离, 等. 南沙大桥索鞍焊接及热处理工艺实践与探讨[J]. 机械工程与技术, 2019(6): 484-490.
- [5] 董小亮, 叶觉明, 李汉梅. 悬索桥索鞍设计制作主要问题及对策[J]. 钢结构, 2015, 30(1): 59-64.
- [6] 王德跃. 基于 UG 和 VERICUT 的整体叶轮数控编程及仿真加工[J]. 航天制造技术, 2011(1): 70-71.
- [7] 张金晶. 数控机床在线测量技术与误差分析[J]. 装备制造技术, 2009(9): 82-83.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19869.1-2005 钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验[S]. 2005.
- [9] 刘智. 数控机床在线测量技术研究[J]. 湖北农机化, 2020(3): 165.