

# 钢壳混凝土索塔制作安装精度控制措施分析

文 / 于慎谦 安徽省高等级公路工程监理有限公司

**摘要：**索塔作为桥梁结构的关键支撑部件，其制作与安装的精度对整体结构的稳定性和安全性至关重要。本文旨在探讨索钢壳混凝土塔制作与安装过程中的精度控制措施，以确保钢壳混凝土索塔施工的高质量完成。通过分析钢壳混凝土索塔施工的关键环节，提出了一系列针对性的精度控制措施，旨在为相关工程实践提供参考。

**关键词：**钢壳混凝土索塔制作；索塔安装；精度控制；桥梁工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.062

## 引言

索塔是悬索桥和斜拉桥等桥梁结构中不可或缺的重要组成部分，承担着支撑主缆或拉索的重要任务。索塔的制作与安装精度直接影响到桥梁的整体性能和耐久性。因此，在索塔施工过程中，采取有效的精度控制措施至关重要。

### 一、工程概况

安罗高速黄河大桥主桥为双塔双索面组合梁斜拉桥；索塔采用钢壳混凝土樽型塔。索塔包括上塔柱、中塔柱、下塔柱、上横梁、中横梁和下横梁，总高182m。塔柱采用空心圆端形单箱单室断面，横、纵桥向外轮廓尺寸均为10m，中间设钢锚梁，每套钢锚梁锚固1对斜拉索。单侧索塔设计节段共划分为36个节段，其中下塔柱T1节段为起步段，高2.5m；其他节段根据起吊重量、壁厚变化以及和横梁的关系，高度划分为4m、4.4m、4.5m、4.679m、4.721m、5m、5.2m、5.4m、5.6m、6m等几种。主要工程内容包括主桥南塔钢壳等结构件原材料采购、厂内制造、运输、现场组拼、整节段运输、现场栓焊连接、防腐涂装及附属配合等工作。索塔如下图所示：



图1 安罗黄河特大桥主桥索塔造型示意

### 二、工程难点与重点

#### (一) 工程制作安装的难点

制作安装的难点主要包括以下几个方面：第一、异形结构制造复杂，安罗高速黄河大桥主桥的索塔采用钢壳混凝土樽型塔，这种异形结构在制造过程中需要高精度的加工和组装，以确保各个部件的精确配合。由于塔柱采用空心圆端形单箱单室断面，且横、纵桥向外轮廓尺寸均为10m，这种大尺寸的异形结构在制造过程中需

要严格控制尺寸精度和形状精度，增加了制造的难度。第二、弧线多且刚性小易变形，索塔包括上塔柱、中塔柱、下塔柱等多个部分，每个部分都有复杂的弧线形状。在制造和安装过程中，需要保证这些弧线的精确度和一致性，同时又要考虑钢壳塔的刚性较小，容易变形的问题。这需要在设计和制造过程中采取一系列措施，如增加支撑结构、优化焊接工艺等，以确保钢壳塔的稳定性和精度。第三、运输难度大，由于索塔结构复杂且尺寸庞大，需要分块段进行运输。在运输过程中，需要确保各个部件的安全性和完整性，同时又要考虑运输路线的选择和运输工具的适应性。这增加了运输的难度和成本。第四、现场拼装精度要求高，在项目现场设置了整节段拼装场，将各个分块段进行组拼和整节段运输。这需要严格控制拼装精度，确保各个部件的精确配合和整体稳定性。同时，现场拼装还需要考虑天气、环境等多种因素的影响，增加了拼装的难度。

#### (二) 工程制作安装的重点环节

该工程制作安装的重点环节包括以下几方面：第一、索塔钢壳曲线壁板设计复杂，特别是变截面区域的内壁板单元。为确保精确度，我们建立BIM模型进行放样，使用数控激光划线技术布划折弯线和组装位置线，通过压力机冷弯成型，设计专用组焊胎型，采用低线能量焊接工艺减少变形，并用热矫正技术矫正线形和焊接变形。第二、索塔钢壳断面为非标准异形结构，尺寸控制具挑战性。为减少结构变形，采取立式组拼方式，并设计专用组焊胎型确保结构尺寸精度满足设计规范。第三、钢锚梁与钢牛腿是荷载传递关键结构，其制作精度至关重要。措施包括精密加工关键荷载传递零件，将钢牛腿与内壁板组焊定位，机加工牛腿水平板，对钢锚梁底板贴合面进行机加工，确保平面度，并与索塔钢壳节段配合组装。第四、索塔钢壳线形特殊，确保竖向线形符合要求是关键。主要措施包括构建BIM模型分析线形，对曲率变化小的节段采用直线替代曲线制造，曲率变化大的节段采用近似曲线制造，并建立累计精度管理体系以控制制造与安装线形精度。

#### (三) 索塔制作精度控制措施

(1) 钢壳节段块体运输至桥位现场后，在专用胎架上完成节段整体组装，胎架上布设对位点，用以控制节

段块体定位组装,对位点通过全站仪放点后,还需精确测量对位点支撑垫标高,整体标高小于2mm,保证钢壳节段整体处于一个水平面上进行组装,每轮胎架使用前必须经过专检复核。

(2)为便于运输将每节钢壳划分为10个块体,在进行钢壳节段整体组装过程中,关键在于精确控制测点a、b、c、d的位置尺寸及标高。测点a设置于2号块体,测点b位于6号块体,而测点c与d则位于4号块体。基于此,选定2号、4号及6号块体作为参照基准块体。在组装胎架上进行节段块体的整体组装时,首先应精确定位2号与6号块体,重点确保块体基线与胎架对位线的精确对齐、块体的倾斜度以及块体纵基线的垂直度。采用相同工艺方法定位4号块体后,利用全站仪对节段上口测点a、b、c、d的位置尺寸及标高进行测量。若测量结果不符合要求,则需进行相应的调整。主要通过调整块体的组装位置和改变块体高度方向的倾斜度等方法,以最大限度地确保基准块体的组装精度。随后,以已组装完成的基准块体为基准,依次进行其他块体单元的组装工作。

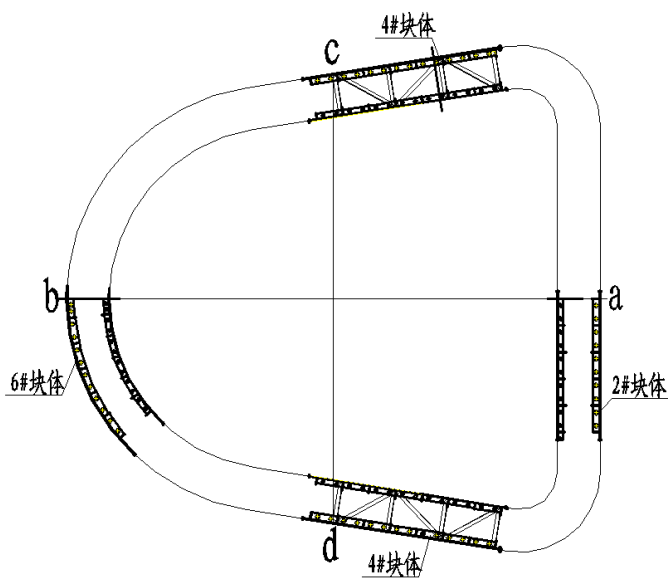


图2 钢壳节段基准块体组装示意

(3)钢壳节段组装尺寸检测合格后,需在节段竖向焊缝位置增加水平加劲或马板,同时,为控制节段上口位置收缩变形,需对节段焊接前进行加固,即在钢壳内腔胎架立柱与内壁间增加角钢支撑,角钢支撑与钢壳内壁接触点需选取刚性较大部位。

(4)钢壳节段组装工艺设计时,节段上口及下口轮廓尺寸需增加一定的焊接预变形量,长度方向增加6mm工艺量,宽度方向增加4mm工艺量,用以减小焊接变形内收缩对几何尺寸的影响,节段竖向焊缝焊接时,严格执行焊接工艺规定的焊接顺序,焊接时严格控制焊接参数及层间温度,最大限度减小焊接变形对几何尺寸的影响。

(5)钢壳节段组装时以横基线为基准进行整体组装,节段“1+1”立式预拼装时,以横基线控制节段间位置关

系,预拼装时以横基线为基准划出桥位监测点a、b、c、d,保证节段在现场组装、预拼装及桥位架设中具有统一的测量基准,同时需核查检测点距离节段上口的尺寸,确保测点标高的准确性。

(6)钢壳节段(T23~T34)其上设置钢牛腿和钢锚梁结构,结构形式复杂、焊缝密集、焊接变形大,结构几何精度不易控制,给钢壳节段制作及现场架设带来了困难,为此,公司技术中心多次组织方案讨论会,并制定出了单元件、块体及钢壳节段制作工艺控制措施,具体如下:

1)单元件精度控制措施:原钢牛腿上承板的机械加工过程已优化,由原先在单个钢牛腿上进行的加工转变为将钢牛腿与壁板单元合并为一个整体后,再进行钢牛腿上承板平面和螺栓孔的加工。此外,尽可能在工厂内完成壁板单元的二拼工作,以实现更高层次的工厂化生产。在钢锚梁的顶、底、腹板制作过程中,预先设定工艺余量,以控制焊接变形和收缩,确保其在可控制的范围内。承压板和锚垫板在预留机加工余量后进行机加工,承压板和腹板也预留机加工余量,以增加接触面,形成磨光顶紧,确保传力的稳定性。钢锚箱内侧的承压板、承压板及加劲件合并为一个组合件,并在检测合格后进行组装。钢锚梁整体组焊完成后,将在修整的基础上,对钢牛腿接触位置增加机加工工序,以确保钢锚梁与钢牛腿的连接间隙符合要求。

2)块体制作精度控制措施:为保证现场节段线形及接口匹配,块体胎架和节段胎架接近,单一块体按内壁板单元、外壁板单元、角钢及钢筋等连接件顺序依次定位,形成稳定块体,块体按图示顺序组装,严格控制含a、b、c、d测量点的基准块体,其余块体可适当匀借,控制两侧壁板钢牛腿基线纵向与钢锚梁中心线锚点错位 $\leq 0.5\text{mm}$ ,高程公差小于等于1mm,壁板角度、线形等满足规则要求后进行定位焊及角钢、钢筋焊接工作。整体节段块体修整检测合格后块体单元拆解,并按工艺完成块体单元除锈、涂装工作,发运至现场。含牛腿块体优先定位,保证钢牛腿、钢锚梁接触连接面、锚点等关键尺寸。节段块体匹配制作,每个块体参与试装,确保块体间匹配尺寸符合要求;

3)钢锚梁节段精度控制措施:增加第一层钢锚梁支撑胎架(重点控制左右支撑胎架上部水平,高低差 $\leq 1\text{mm}$ );钢锚梁优先定位后,钢牛腿块体单元需一定空间配合定位,需对现有组拼胎架进行改制,含钢牛腿块体下方胎架下移30~50mm,并保证胎架整体稳固,节段上方接口变形较大,优化支撑加固措施。在组拼胎架布设节段纵横基线、块体单元基线、增加钢锚梁中心线、监控点基准线,各基准线相互关系均应保证;各基准线间距、垂直、标高等项点检测合格后,方可进行拼装。

4)钢锚梁定位及精度控制:以胎架上的钢锚梁中心线为基准,定位下层钢锚梁,保证锚点位置、钢锚梁底板接触面标高 $\leq 1\text{mm}$ ,满足要求后定位并码固,并避免后续块体组装时位置移动。

5) 节段组装精度控制：必须严格控制钢牛腿块体单元以及包含监控点 a、b、c、d 的四个基准块体单元的精度，确保轴线位置和高程的准确性。对于其他块体，可根据实际情况进行适当的匀借，以减少接口错位。以胎架的纵横基线、钢锚梁及其中心线、块体基线为基准，组装两侧包含牛腿块体（基准块体，包括监控点 c、d）时，钢锚梁中心线与块体监控点基线的偏差应控制在 1 毫米以内；检查钢锚梁底板与钢牛腿上承板接触面的间隙，确保其不超过 1 毫米；在满足壁板角度、线形等要求后进行定位焊接。组装钢壳轴线处的块体单元（基准块体，包括监控点 a、b），严格控制块体基线偏差在 0.5 毫米以内；在满足块体角度、线形等要求后进行定位焊接。按照相同原则依次组装其他块体，组装时若块体角度、线形等存在公差，可适当匀借（匀借时不得调整基准块体）。所有检测项点满足要求后进行定位焊接。若节段包含第二层锚梁，则需对第二层锚梁进行复位检查，检查钢锚梁与钢牛腿接触平面及高强螺栓连接，并进行必要的修整，若存在异常情况，应分析原因后进行调整。焊接完成后，进行全面的修整和检测，修正节段复位线，检测监控点偏差、上下环口截面高程偏差和错台等项点，如有必要，进行焰切和修磨处理。在节段预拼装时，进行钢锚梁的复位检测；部分节段需进行索导管的安装，并确保索导管的固定和加固。

### 三、钢壳塔精度控制措施

(1) 在已安装的塔段上，对上口数据进行了测量，主要针对曲线段的平面特征点；同时，对测量标识点的平面位置（X/Y 方向）进行了测定。这些数据将作为后续塔段安装线形调整的依据。

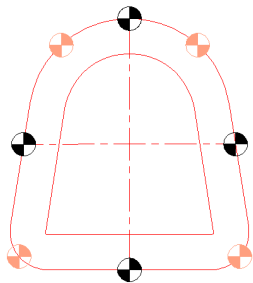


图 3 已安装钢塔上顶面测点布置

(2) 塔段调整就位后，用钢针划钢塔竖向偏移测量位置线和横向偏移位置线（如图 4），并记录数据，马板焊接完成后再次测量数据进行对比分析。

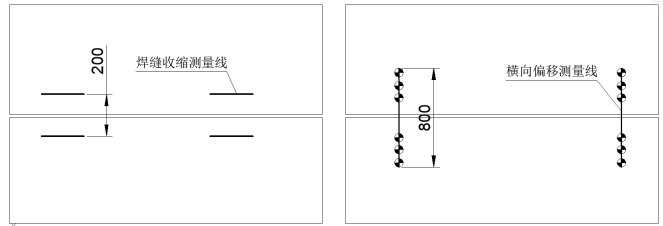
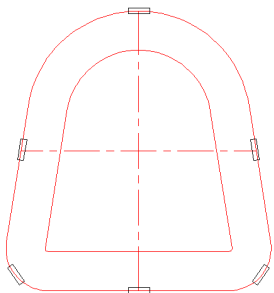


图 4 焊接安装施工测量线布置图

(3) 塔段焊接之前划节段竖向偏移测量位置线和横向偏移位置线，并记录数据。(4) 塔段调整到位后，采用大马板先对 4 个面同时进行码固（每个面不少于 8 个），码固方式为“八”字形，防止塔段发生水平或竖向偏移。

(5) 对错台位置进行调整，调整到位后用马板码固焊缝。

(6) 塔段环缝焊接时，若塔段轴线偏差较大，先焊接轴线偏向的反方向一侧（两人同时焊接），在焊接长度达到 800mm 时，在同时焊接另外三个方向的焊缝；要求打底后轴线偏向的反方向一侧的马板可以先拆除，另一侧的马板需在填充后拆除。若塔段轴线控制较好时，可四面同时焊接。(7) 钢壳节段桥位调整时，通过整体转角实现线性的调整，即通过接口位置焊接间隙调整钢壳节段的空间位置，尽量避免采用整体旋转或平移调整方式，防止钢壳焊缝接口部位出现板厚错台加大情况，保证钢壳节段接口位置匹配性。

### 结语

综上所述，索塔钢壳制作与安装过程中的精度控制措施是确保桥梁结构稳定性和安全性的关键。通过严格控制原材料质量、加工精度、模板制作与安装精度以及测量、吊装和连接作业精度等方面，可以有效提高索塔的施工质量和精度。本文提出的精度控制措施可为相关工程实践提供参考和借鉴。

### 参考文献

[1] 张杰. 西十铁路汉江特大桥超高索塔施工关键技术 [J]. 铁道建筑技术, 2024 (03): 108-110+205.  
 [2] 江世明. 矮塔斜拉桥索塔大节段模板浇筑及索鞍定位技术研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023 (01): 134-137.  
 [3] 刘玉恒, 孙涛, 施明宇. 矮塔斜拉桥主塔施工关键技术研究 [J]. 安徽建筑, 2023, 30 (03): 71-72+96.  
 [4] 肖正恩, 朱江川, 浦仕龙, 等. 勐古怒江斜拉桥索塔施工关键技术 [J]. 中国水运 (下半月), 2021, 21 (12): 88-90.  
 [5] 张平, 林珊, 李育文, 等. 斜拉桥索塔劲性骨架设计与施工技术研究 [J]. 市政技术, 2022, 40 (06): 29-34+46.  
 [6] 林峰. 红水河特大桥索塔施工关键技术 [J]. 西部交通科技, 2020 (01): 81-84.

作者简介：于慎谦(1980.10-)男，汉族，高级工程师，硕士，专业：岩土工程。