

# 超大跨径钢桁拱预埋段精准匹配安装施工技术

邓浩宇

中铁八局集团第一工程有限公司 重庆 九龙坡区 400053

**摘要:** 针对超大跨径钢桁拱拱脚预埋段“重量大、尺寸大、结构复杂、安装精度要求高”的施工难题,结合传统工艺在定位偏差、适配性不足等方面的短板,本文以凤来大溪河特大桥为基础预埋段为载体研究提出一套融合多技术协同的精准施工方法。以BIM数字化基准为引领,采用预埋构件底部钢锚梁承托+中部橡胶角钢缓冲+顶部定位工装校准三点协同支撑工艺,结合3D扫描+虚拟预拼等核心技术,构建预埋件从加工、模拟拼装、现场安装到检测验证的全流程精度控制体系。通过在凤来大溪河特大桥中的应用,实现了拱脚预埋段定位偏差 $\leq 2\text{mm}$ 、钢结构整体精度 $\leq 5\text{mm}$ 的控制目标,相比传统工艺缩短工期6个月,创造直接经济效益714万元,同时保障了结构安全与施工环保,研究成果为同类超大跨度桁架式拱桥拱脚预埋施工提供了成熟的技术借鉴,具有显著的工程应用价值。

**关键词:** 超大跨径钢桁拱桥;预埋段;定位;虚拟预拼

## 引言

随着我国高速公路网向山区纵深延伸,超大跨径钢桁拱桥因跨越能力强、适应复杂地形地质条件等优势,在重大交通工程中应用日益广泛。拱脚预埋段作为钢桁拱与拱座基础的核心连接构件,是传递拱肋荷载、保障桥梁整体稳定性的关键节点,其安装精度直接决定后续拱肋拼装质量与桥梁结构安全。当前,超大跨径钢桁拱预埋段普遍存在重量大、尺寸大、结构异形且精度要求严苛等特点,传统定位安装工艺易出现定位偏差过大、构件适配性不足、施工效率偏低等问题,难以满足高标准施工需求。为此,本文以凤来大溪河特大桥拱脚预埋段施工为工程依托,开展精准定位安装施工技术研究,破解施工难题,为同类工程提供技术参考。

## 1 工程概况

凤来大溪河特大桥为武两高速公路控制性工程,全长1136.7m,主桥为580m上承式全栓接钢桁拱桥,共设8个拱脚和4个V撑,涉及200根钢拉杆(直径100mm/120mm,单根长9.04m/10.08m,单重约1t)、20个钢锚梁(最大重量6.5t)及440根32mm预应力螺纹钢筋。拱脚预埋需同时对位25根钢拉杆,精度要求极高,定位偏差需控制在2mm内,远超规范要求的10mm标准。

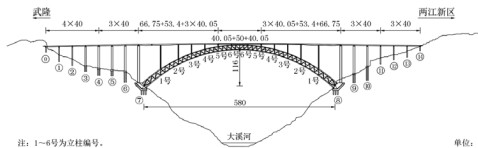


图1 凤来大溪河特大桥立面布置

## 2 总体施工方案

拱脚预埋段在拱座基础施工完成后进行,提前进行

型钢支架的搭设与预压作业,利用加工好的钢锚梁导向定位安装钢拉杆,安装过程中利用三点协同支撑固定调整钢拉杆,保证对位精度。钢拉杆精调完毕采用3D扫描进行双重精度复核,并模拟0#节段拼装对位精度,保障0#节段实际操作中对位准确。由于0#节段自重较大,缆索吊<sup>[1]</sup>控制精度不高,安装时配合特制工装进行滑入式对位,利用多向千斤顶进行精调,安装完毕后再次利用3D技术进行精度测量验证。

## 3 关键施工技术

### 3.1 三点协同支撑体系与预埋件精准定位技术

拱座预埋件施工受场地限制,大型吊装设备无法进场。只能采用汽车吊与塔吊协同,完成预埋件、拱座钢筋及模板安装。鉴于拱座预埋件安装精度要求高、操作难度大且后期调节空间有限,采用大号型钢支架搭配定位工装辅助安装可提升一次安装精度,减少后续调整量。

针对钢拉杆预埋精度控制难题,创新设计“底部钢锚梁+中部带橡胶片角钢+顶部定位工装”三点协同支撑体系分别对预埋钢拉杆顶、底部进行限位,中部通过橡胶片角钢支撑,防止钢拉杆中部下挠。底部采用设计钢锚梁将钢拉杆底部进行精确定位,钢锚梁安装前复测确定其位置精度及角度符合设计要求,并将精确定位的钢锚梁与型钢支架通过焊接固结,防止钢拉杆安装时,钢锚梁发生偏移导致精度不合格,并在钢拉杆安装后底部采用球形螺母将钢拉杆进行居中定位。

钢拉杆安装完成后顶底两点精度复测合格后,通过带橡胶片的角钢对钢拉杆下挠位置进行精确支垫,避免钢拉杆下挠导致钢拉杆内部局部应力增加。确保钢拉杆始终只承受轴向应力,维持原设计受力状态。

钢拉杆安装时遵循先下后上,左右对称的顺序,有效避免上缘拉杆安装后出现头重脚轻的情况,防止支架扭转。钢拉杆吊装时控制重心位置使其起吊后成倾斜状,减少起吊后姿态调整时间。人工将钢拉杆底端引入定位工装预留孔内,通过汽车吊大小两个吊钩调整钢拉杆倾斜程度,配合手拉葫芦逐步将钢拉杆缓慢下放至钢锚梁处,穿过钢锚梁后立即采用凹形垫圈与球形螺母将钢拉杆两端进行临时固定。



图2 定位工装实体示意图

所有预埋钢拉杆安装完成后,由测量人员采用精密全站仪对钢拉杆进行逐根复核,并精调钢拉杆位置。通过对钢拉杆凹形垫片进行支垫来调整顶端与底端位置,控制其精度小于2mm要求。钢拉杆中部采用带橡胶片的角钢进行支垫,保持钢拉杆轴线精度。顶部定位工装采用20槽钢与2cm钢板精密加工,穿孔误差 $\leq 0.5\text{mm}$ ,实现杆体平面位移与倾角的刚性限位。

### 3.2 0#节段滑入式对位与多向精调技术

SS0#节段A0、B0单个锚箱重96t,最大截面尺寸4.2m $\times$ 4.2m,整体沿拱轴方向长5m。创新采用“滑梁导向+多向千斤顶精调”技术,利用缆索吊将预埋段依次吊装并调整杆件姿态,保证钢拉杆与杆件孔洞同轴。

提前在支架上设置左右限位梁,限制0#节段安装过

程中的左右偏移使钢拉杆受剪导致内部结构缺陷,在滑梁底部设置“凹”槽,构件底部承压板区域下缘与支架滑道梁接触,使钢箱位于支架左右导向梁之间,同时逐步整体下放0#节段钢箱使钢拉杆端头穿过杆件孔洞,直至构件滑落到指定位置。



图4 锚箱滑入式对位安装示意图

对位在支架8个支点处设置5t千斤顶与调节丝杆,结合顺桥向两侧5个三维控制网点,对锚箱顶板、内外腹板栓群18个测点进行精调,复核点精度全部 $\leq 2\text{mm}$ 。千斤顶进行顶推时,同时控制缆索吊受力状态,通过不同多个方向千斤顶不同形成同时顶推实现锚箱的三维调节。精调完成后,通过1.6cm钢板焊接限位板,并增设型钢横梁支撑,抑制锚箱因受力不均产生的“翘屁股”变形,形成稳定受力体系。

0#节段安装完成后进行后浇带施工,由于承压钢板关系,浇筑区呈现仰斜式,加上承压钢板距现有混凝土面仅1.5m,承压钢板上设计含有预埋锚筋,作业空间狭小,大大增加混凝土浇筑质量的控制难度。后浇带采用微膨胀自密实混凝土,浇筑前预埋排气管排出内部空气,同时在承压钢板上开振捣孔,保证承压钢板质量又能使混凝土充分振捣。

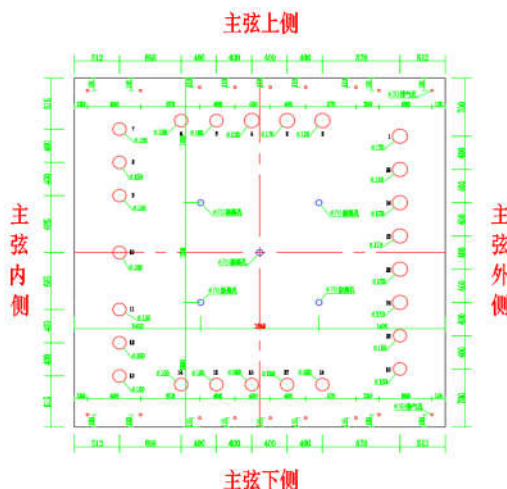


图5 承压板开孔示意图

### 3.3 3D扫描+虚拟预拼适配技术

0#节段吊装对位前需要确定底部承压板开孔位置，由于钢拉杆呈空间分布常规测量难以满足定位需要，利用3D扫描+虚拟预拼适配技术进行承压板开孔定位。采用徕卡P50全站仪对钢箱与钢拉杆进行3D扫描<sup>[2]</sup>获取其点云数据，通过Geomagic软件切片分析<sup>[3]</sup>，将锚箱与拉杆进行模型匹配，与0#节段承压板预留孔拟合校验，确保群杆协同精度。

在拱座前墙、侧墙上距地面1.5m至2m处粘贴黑白棋盘格标靶3个，并使用全站仪获取其中心施工坐标。在拱

座四周选取扫描主站点4个、副站点4个，主站点布设要求为距离扫描物体小于50m且大于5m，副站点距离扫描物体小于30m且大于5m，扫描仪调平要求为误差不大于5"，分辨率设置为3.1mm，扫描角度 $\alpha$ 及范围设置为覆盖所有杆群区域，扫描完成后针对黑白棋盘格与杆群区域进行局部加密至0.8mm，获取拱座0#节段锚箱的点云数据。相邻扫描站点之间至少保证2个球形标靶重看，用以各扫描测站之间点云粗配准。最后采用基于数据驱动的点云精配准技术，获得带有现场安装坐标系的预埋段点云数据。

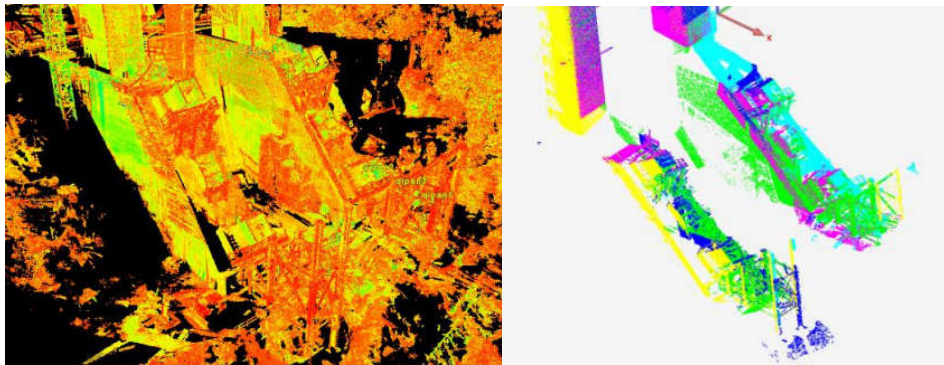


图6 0#节段点云数据匹配示意图 (左图为粗匹配, 右图为精匹配)

选取主站点1中拱座承台顶面、侧面、交界墩侧面以及固定的型钢作为参照物，坐标分别为D承顶主1、D承侧主1、D交侧主1、D型钢主1，通过移动、旋转站点2中同一参照物使之与D承顶主1、D承侧主1、D交侧主1、D型钢主1相同，从而得到变换矩阵 $K = [dx, dy, dz, Rz]$ ，再将站点2所有扫描获取的点云数据经矩阵K变换后则与站点1统一于同一坐标系下，重复该操作可使得所有站点扫描点云均在同一坐标系中，将3个标靶的坐标带入扫描点云，可得具有施工坐标系坐标信息的三维点云。

通过Geomagic数据处理软件将扫描获取的点云数据进行处理获取带坐标点的模型数据，在上、下平面 $\pi_1$ 、 $\pi_2$ 处沿法向截取长度为4cm的点云，使用函数将其拟合为小圆柱体，获取上下基点与直径R，取同一根杆件中上平面处圆柱体1上基点P1 ( $x_1, y_1, z_1$ )与下平面处圆柱体2下基点P2 ( $x_2, y_2, z_2$ )得到钢拉杆空间直线方程：

$$L = \begin{cases} x = x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y = y_1 + t(y_2 - y_1) \\ z = z_1 + t(z_2 - z_1) \end{cases}$$

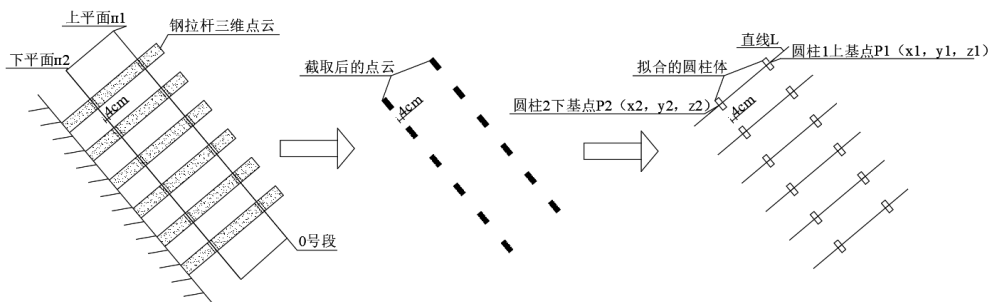


图7 点云处理示意图

对现场每个0#节段随机抽取总数10%的预埋杆件量取直径 $R'$ ，与计算所得R进行误差对比，通过公式验证：

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |R_i - R| < 3mm$$

通过实际测量计算对比 $\varepsilon = 0.8mm < 3mm$ ，误差在可

控范围之内。通过向量关系分别于钢拉杆对应直线L方程求取交点，可以得到承压板开孔坐标，从而保证了0#节段的精确对接。

为保证0#节段与散拼1#节段顺利对接，同样运用3D扫描技术在钢梁拼装场内获取带有拼装场独立坐标的模

型数据,通过坐标转换将带独立坐标的1#节段模型数据转换成带桥位坐标的模型数据,并在软件上对其进行模拟预拼,评定0#节段安装精度,并通过该数据提前预知0#节段与1#节段安装状态,提前采取处理措施保证后续拱肋拼装精度。

采用虚拟数字预拼提前预拼0#、1#节段实际安装姿态与设计线形进行对比,提前预知0#、1#节段的对位效果,可通过后期配板、调整焊缝角度对后续节段进行调整,消除0#节段预埋误差,降低后续节段拼装的施工难度。通过此方式最终将钢结构精度控制在5mm以内。

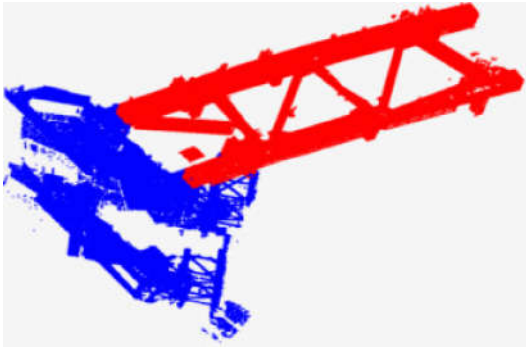


图8 桥位虚拟预拼成果示意图

### 3.4 有限空间大吨位钢拉杆分级张拉技术

钢拉杆防腐施工完成后,采用穿心千斤顶对钢拉杆进行张拉,张拉采用“预张拉消除+分级张拉+超张补偿”

工艺,使拱脚预埋段有足够的压力储备。钢拉杆最大张拉力3450KN,设计预留钢拉杆张拉端长度仅40cm,不满足穿心千斤顶张拉条件,故通过加工同材质连接套筒与丝杆接长张拉端,保证张拉长度,满足大吨位张拉操作需求。

### 结束语

本文提出的超大跨径钢桁拱拱桁预埋段精准定位适配施工工艺,通过多技术协同构建了全流程精度控制体系,成功将预埋段定位偏差控制在2mm内,钢结构整体精度 $\leq 5\text{mm}$ ,解决了传统工艺适配性差、精度不足的核心难题。

在风来大溪河特大桥应用中,预埋段精准定位关键技术经工程验证成熟可靠,其中“三点协同支撑”“滑入式对位”“3D扫描虚拟预拼”等技术显著提升了施工效率与质量。

### 参考文献

- [1]李昭东,房媛.缆索起重机在桥梁施工中的运用[J].建筑机械,2025,(07):19-23.DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2025.07.064.
- [2]丁燕翔.3D扫描测量+BIM技术在大型异形建筑施工中的应用[J].建筑,2025,(12):110-112.
- [3]卞海丁,魏进,王锦涛.超大跨径管拱形钢波纹管涵洞的受力特性与土压力计算方法[J].岩土力学,2025,46(08):2532-2546.