

# 钢箱桁组合梁转体桥拼装顺序研究

刘海军<sup>1</sup>, 车元平<sup>1</sup>, 窦 晗<sup>1</sup>, 张 波<sup>1</sup>, 陈 国<sup>2</sup>

(1. 中铁一局集团第三工程有限公司, 陕西 西安 721000; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 以合(肥)新(沂)高铁跨京沪高铁特大桥为工程背景, 研究了钢箱桁组合梁转体桥的拼装顺序和关键技术。结果表明: “3+1侧拼”法显著提高了钢桁梁的组装效率, 有效解决了全焊接钢箱桁结构施工中普遍存在的焊接变形、安装精度及高空作业难等挑战。同时, 采用钢码板和杆端开口技术, 解决了焊接空间受限的问题。转体施工中, 通过设定3°的试转和67°的正式转体角度, 实现了安全性与可控性的双重保障。该研究成果为类似大跨度钢箱桁组合梁桥的施工提供了技术参考。

**关键词:** 铁路桥梁; 钢箱桁组合梁; 转体桥; 拼装顺序; 预拱度

中图分类号: U445.4; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0230-05

## Research on Assembly Sequence of Steel Box Truss Composite Beam Swivel Bridge

LIU Haijun<sup>1</sup>, CHE Yuanping<sup>1</sup>, DOU Han<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>2</sup>

(1. China Railway First Group Third Engineering Co., Ltd., Xi'an 721000, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Taking the Hefei-Xinyi High-speed Railway Bridge over the Beijing-Shanghai High-speed Railway as the engineering background, the assembly sequence and key technologies of steel box truss composite beam swivel bridge are studied. The results show that the “3+1 side-assembly” method has significantly improved the assembly efficiency of the steel truss beam, effectively addressed the common challenges in the construction of fully welded steel box truss structures, including welding deformation, installation accuracy and difficulties associated with high-altitude operations. Concurrently, the steel setting plates and rod end opening technologies are used to overcome the problem of limited welding space. During the swiveling construction, by setting a trial swiveling angle of 3° and a formal swiveling angle of 67°, the dual guarantees of safety and controllability are realized. This research outcome provides the technical references for the construction of similar long-span steel box truss composite beam bridges.

**Keywords:** railway bridge; steel box truss composite beam; swivel bridge; assembly sequence; camber

## 0 引言

全焊接钢箱桁结构因具有承载能力大、工业化程度高、施工速度快等特点, 在大跨桥梁工程中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而, 全焊接钢箱桁结构的施工存在很大的挑战, 主要集中在焊接工艺的精准性、安装精度、环境适应性, 以及施工管理的高效性上<sup>[3-4]</sup>。焊接过程中, 需严格控制热变形和应力集中, 以防止焊接缺陷, 这要求采用高标准的焊接技术和严格的质控措施<sup>[5-6]</sup>。安装时, 节点连接的准确性至关重

要, 每一环节都必须精确对位, 这依赖于精密的测量和定位技术。施工环境的变化对焊接质量影响极大, 因此, 必须对温度、湿度等条件进行严格控制<sup>[7]</sup>。同时, 大跨度结构的吊装和安装风险较高, 需要精心规划和严密的安全生产管理。

拼装过程涉及众多精细的步骤, 包括精确的构件预制、复杂的现场组装, 以及对焊接工艺的高标准要求。因此, 整个拼装过程无疑是一项技术密集且难度较大的工程挑战<sup>[8-9]</sup>。任何微小的误差都可能导致整个结构的性能受到影响, 因此, 每一个节点都需要精确对接, 每一条焊缝都需要严格按照规范执行。这就要求施工团队必须具备高超的技术水平和丰富的施工经验, 以确保拼装工作的高效、准确和安全。

收稿日期: 2024-12-19

作者简介: 刘海军(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 从事路桥施工技术研究工作。

通信作者: 陈国(1980—), 男, 博士, 教授, 从事桥梁施工技术研究工作。电子信箱: chenguo2009@126.com

# 1 工程概况

合新高铁跨京沪高铁特大桥位于安徽省定远县定远站南侧,中心里程 DK230+744.44。(72.2+72.2) m 钢箱桁组合连续梁上跨京沪高铁,全长 146 m,采用异位支架拼装后转体方法施工。钢箱桁梁采用三角桁,桁高 9~16 m,主桁宽 11.5 m,墩顶处主桁中心线高 16 m,每节长 12 m。钢桁梁上弦、腹杆为箱形截面,杆件采用整体节点板焊接形式。主梁采用鱼腹式扁平钢箱结合梁,单箱 5 室断面。梁中心线处高 2.5 m,混凝土桥面板厚 0.25 m,钢箱梁高 2.25 m,桥面宽 25.4 m。

# 2 预拱度

采用“先箱后桁”的拼装方案,即按照从桥梁两端向中间对称的顺序进行拼装。为了补偿在恒载+1/2 静活载作用下的变形,通过调整桥梁下方的支架标高来预设预拱度。从桥梁左端至跨中,下弦节点处的预拱度依次设置为 0.0、29.0、45.8、48.7、38.3、18.5 mm,直至跨中的 0.0 mm,以平衡结构的变形,确保桥梁的线形和受力性能。

在预拱度调整过程中,应始终遵循“先调整下弦杆,后微调上弦杆”的原则。由于下弦杆长度变化对结构竖向位移的影响更显著,因此首先调整下弦杆控制结构的整体线形。在完成下弦杆的调整并拼装后,对结构的线形进行监测,根据监测结果对上弦杆进行微调。

采用几何法对下弦杆的长度进行调整,节点  $i$  和  $i+1$  的预拱度分别为  $\delta_i$  和  $\delta_{i+1}$ ,原节间长度为  $L$ ,调整后杆件实际长度为  $L'$  可近似由勾股定理确定。

$$L' = \sqrt{L^2 + (\delta_{i+1} - \delta_i)^2} \quad (1)$$

由于预拱度差  $\Delta\delta = \delta_{i+1} - \delta_i$  远小于下弦杆长度  $L$ ,定义变形量  $\varepsilon = \frac{\Delta\delta}{L}$ 。对  $\sqrt{1 + \varepsilon^2}$  在  $\varepsilon=0$  处进行二阶泰勒展开,

$$\sqrt{1 + \varepsilon^2} = 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^4}{8} + L \quad (2)$$

忽略高阶微量  $\varepsilon^4$ ,

$$\sqrt{1 + \varepsilon^2} \approx 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \quad (3)$$

下弦杆的理论调整量  $\Delta L_{理}$  为

$$\Delta L = L' - L \approx \frac{(\delta_{i+1} - \delta_i)^2}{2L} \quad (4)$$

因节点刚接效应,理论值  $\Delta L_{理}$  需增大 1.05~1.2

倍,即实际量  $\Delta L_{实}$  为

$$\Delta L_{实} = (1.05 \sim 1.2) \Delta L_{理} \quad (5)$$

# 3 工程预拼

预拼装对钢箱桁结构桥梁施工质量至关重要<sup>[10]</sup>,钢箱桁各单元均在中铁九桥池州分厂制造并完成节段总装,再拆分成方便汽运运输至桥位的钢构件单元。结合三维扫描技术和精细的预拼工艺,可以有效保证工厂预拼装钢结构的精度。当发现构件尺寸有误时,即可在预拼装场地进行尺寸修正和调整,避免在高空调整,降低高空作业难度和加快安装速度,确保桥梁工地安装的顺利。

## 3.1 下弦杆

首先,在胎架上铺设底板单元,确保底板的水平度和直线度达到规定标准。接着,进行隔板单元的拼装作业,严格控制各隔板单元之间的间距和垂直度。在检测确认无误后,将这些隔板单元与底板单元进行点焊固定。随后,安装腹板单元,细致检验其垂直度及开档尺寸。最后,安装顶板单元,严格把控顶板单元的线型和箱口尺寸,确保整体结构的质量与美观(见图 1)。

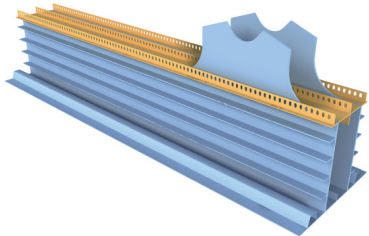


图 1 下弦杆组拼

## 3.2 钢箱梁

首先在胎架上定位两节段下弦杆,检测其水平度、平面度等项点,合格后将弦杆与胎架固定。画隔板、边腹板和顶底板拼装定位线。根据定位线,拼装底板单元,保证腹板与底板的垂直度,合格后将下弦杆与底板点焊固定。依次拼装隔板单元(见图 2),确保隔板与腹板,以及隔板与底板的线形和垂直度均符合要求后,将各构件单元点焊固定。

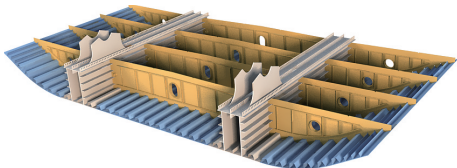


图 2 安装隔板

在安装鱼腹梁顶面的三块顶板单元之后(见图 3),需调整第一节段整体箱梁的线形与角度。经过

精确校验并确保各项指标均达到合格标准后,对首节段钢箱梁的所有焊缝进行焊接作业。这一过程不仅确保了结构的精准对接,也为后续施工环节打下了坚实的基础。

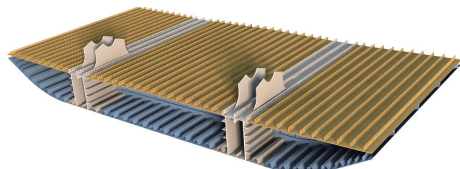


图3 安装顶板

依次将边腹板安装在鱼腹梁的两侧,在确认边腹板与对应隔板的相对位置对齐后,随即开展边腹板与隔板间焊缝的焊接作业。至此,钢箱梁第一节段安装完成。

依序完成后续各节段钢箱梁的拼装与焊接。安装箱梁匹配连接件,匹配件间预留箱梁对接焊缝收缩量。检验合格后,对钢箱梁进行解体脱胎,将后一段梁段移至胎架首部段为母梁,继续拼装下一轮次箱梁。将钢梁拆成运输节段,转运至涂装车间、厂内存放。

### 3.3 钢桁架

采用“3+1侧拼”技术进行试组装。具体来说,“3”指的是将三根杆件进行侧向对接,构建成一个复合单元,其中两段作为基准,第三段则依据这两段的位置进行精确对齐和调整。“1”代表在上述三段基本组装完成后,追加第四段(即“+1”),与之前的三段融合,形成一个连贯的整体结构单元。

首先在平整场地搭设胎架,并采用水平仪找平,确保整体平面度误差控制在 $\pm 3$  mm以内。按设计的线形放置地样线,并将经过3+1试拼过的下弦杆节段系统线与地样线对齐,然后开始安装斜腹杆。在腹杆杆件端口安装匹配件时,需严格按照钢结构焊接规范进行操作。样冲标示应清晰准确,以确保配切梁段非基准边的精确度。同时,匹配件间需预留适当的对接焊缝收缩量,以符合工程施工质量验收标准,确保焊接质量和结构安全。待两根斜腹杆安装完毕后,开始安装上弦杆端匹配件。至此,完成一轮次上弦杆试拼(见图4)。

依次重复上弦杆轮次拼装(见图5),在配切梁段环节,重点在于精确处理非基准边的切割处理。同时,为了适应焊接过程中的热收缩现象,在匹配连接件间预留了适量的对接焊缝收缩量,旨在提高焊接接头的稳定性和整个结构的长期可靠性。

完成上弦杆“3+1侧拼”后,进行线型复检。检验

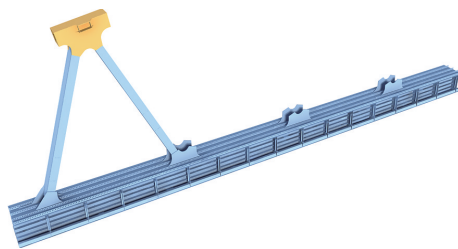


图4 安装上弦杆端匹配件

合格后,将前面3段钢梁移出胎架,尾段为母梁,继续拼装后续的上弦杆,直至全桥上弦杆试拼完成。将已完成拼装的杆件拆成运输节段,转运至车间进行涂装作业。

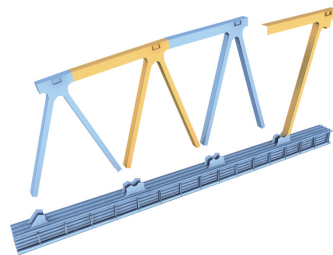


图5 钢桁拆分

“3+1侧拼”方案通过基准杆定位和分轮次复检,有效控制平面度误差在 $\pm 3$  mm内,提升拼装速度20%~25%。但该方案面临前期准备复杂、工艺协同严格及拆分运输挑战,需高精度胎架和三维扫描技术支持,精确计算预留收缩量,并确保运输节段的接口保护和重组精度。总体上,此方案在复杂桥梁建设中优势明显,但需精细管理和技术协同以优化初期成本和工艺复杂性。

## 4 现场拼装

### 4.1 钢箱梁

转体桥采用钢箱桁组合梁结构,其“强箱弱桁”特性使“先箱后桁”<sup>[11]</sup>的拼装方法尤为合适。“先箱后桁”这一顺序既保障了工程进度和组装精度,也有效降低了施工安全风险。考虑运输方式和现场条件和施工方法等因素,单个运输单元长度原则上不超过14 m,单个运输节段重量不超过45 t。钢箱梁被划分为13个纵向段,每段再细分为9个横向节,总计形成117个节段,如图6所示。

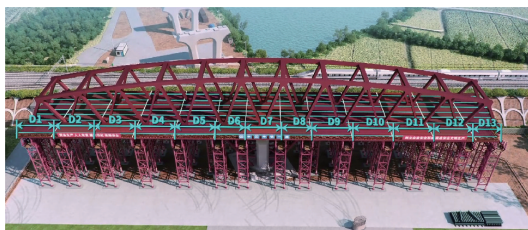


图6 节段划分



对于顺桥向的箱梁安装,采取从中间向两侧对称推进的方式。首先安装位于主墩墩顶的 D7 节段。随后,依序对称安装剩余的节段,分别是 D8、D6、D9、D5、D10、D4、D11、D3、D12、D2、D13,直至 D1 节段。

4.2 钢桁梁

待钢箱拼装完毕,随即开始其上部的钢桁架安装。每根腹杆、弦杆,以及上平联均构成一个节段,共计 86 个节段。钢桁采用从两端往中间的顺序对称架设,按照“3+1 侧拼”的方式依次安装 2 根斜腹杆和上弦杆端匹配件,从而形成一个三角形稳定单元(见图 7)。



图 7 “3+1 侧拼”

钢桁梁节点部位的接头板、节点板与腹杆、平联杆之间的连接方式均为全熔透焊接。焊缝质量要求高、焊接量大,易产生焊接变形和应力集中<sup>[12-13]</sup>。因此,杆端预先焊接一对辅助定位的钢码板(见图 8),钢码板在杆件制造初期即被固定在杆端,从而避免了在后续装配过程中的复杂定位步骤。同时,为了进一步提高焊接作业的便捷性与效率,杆件端部提前切割一个矩形孔洞。孔洞宽度与杆件宽度一致,孔高约 400 mm,恰好满足焊工操作焊枪所需的空



图 8 钢码板

间。这不仅便于焊工深入杆件内部进行焊接作业,而且矩形孔洞的存在还有助于焊接过程中的散热和烟雾排放,有效减少焊接区域的热量积聚。

端的钢码板才能被拆除。

5 转体施工关键技术

在桥梁正式转体之前,需进行试转。其目的是检验设备性能、搜集转体关键数据,并发现潜在问题,确保后续正式转体顺畅进行。梁体悬臂端与京沪高铁栅栏的间距为 4.7 m,试转角度以不侵入栅栏为原则,得出理论最大值为 3.7°。但考虑到现场安全因素,实际选择 3°作为试转角度。采用 ZLD2000 型连续千斤顶进行转体,若桥梁仍无法转动,则启用 4 台 YCW150A 型千斤顶组成的助推系统辅助转体。

正式转体过程中,桥梁将按照顺时针方向旋转,目标转体角度为 67°,千斤顶牵引速度为 0.088 m/min,梁体的转动角速度为 0.017 rad/min,理论转体时间 67 min。当转体距设计位置仅剩 50 cm 时,采用点牵引法就位,在撑脚与助推反力支座之间横向对称放入 2 道 I40a 工字钢对转体进行限位,使工字钢横梁与撑脚的接触点即被设定为转体操作的最终位置,防止过转。图 9 为完成转体后的钢箱桁组合梁。



图 9 转体完成

6 结 语

(1)在工厂对钢箱和钢桁进行预拼装,并在验收合格后拆解运输至桥梁施工地点,能有效降低高空作业的难度,并显著提升安装效率。

(2)对于沿桥纵向的钢箱,应采取从中间向两侧对称进行的安装策略,而横向箱梁的安装应按照从远离京沪高铁的一侧逐步向靠近京沪高铁一侧的顺序进行。

(3)钢桁架的安装采用从两端向中间对称推进的方式,按照“3+1 侧拼”的模式逐次架设桁架杆件,确保了结构的均衡与稳定。

(4)运用钢码板和杆端开口技术,有效解决了杆件定位的难题和焊接操作空间的限制,提升了施工的精准度和便捷性。

(5)为确保桥梁转体施工安全可控,确定试转角度为 3°。该角度满足梁端与既有京沪高铁栅栏保持

4.7 m安全净距的要求。正式转体施工采用顺时针方向旋转,转角为 $67^{\circ}$ ,转动角速度为 $0.017\text{ rad/min}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 周涛,邓宇,陈晓虎,等.大跨度钢箱桁组合连续梁桥涡振性能研究[J].工程力学,2023,40(2):213-221.
- [2] 郭胜,文丽娜,赵智,等.西南山区耐候钢箱组合梁桥设计要点[J].城市道桥与防洪,2024(7):109-114.
- [3] 胡军,赵全成.蒙华铁路洞庭湖特大桥主桥钢梁架设关键技术[J].桥梁建设,2019,49(2):103-108.
- [4] 张金红,康源,张小宇,等.大跨三片式钢箱桁拱桥结构参数敏感性分析[J].水力发电,2024,50(11):52-56.
- [5] 郭星亮.大跨度斜拉桥钢箱桁梁架设关键技术研究[J].高速铁路技术,2022,13(2):104-108.
- [6] 任成龙.焊接顺序和焊接方向优化在管线钢焊接中的应用[J].焊

接技术,2024,53(9):85-88;146.

- [7] 王瑾怡.钢箱桁组合连续梁桥受力特性及参数分析[D].广州:华南理工大学,2021.
- [8] 李凯.钢结构桥梁检测与加固技术分析[J].运输经理世界,2024(17):60-62.
- [9] 张清华,李俊,崔闯,等.钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J].中国公路学报,2024,37(5):246-266.
- [10] 刘爱林,钟亮,赵泽华.商合杭高铁芜湖长江公铁大桥箱桁组合梁立体试拼装工艺[J].中国铁路,2020(6):26-30.
- [11] 张晔芝,杨毅,易伦雄.洞庭湖铁路斜拉桥先箱后桁两步施工法研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2557-2564.
- [12] 邢扬,杨翠屏,徐向军.钢桥箱梁节段制造新技术研究[J].金属加工(热加工),2024(9):41-44.
- [13] 谢小芳.钢桥面板横隔板交叉细节围焊处应力强度因子分析[J].西部交通科技,2024(11):170-171;179.

(上接第219页)

该工程的成功实施可为类似工程沉井下沉施工提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 罗维高,林惠庭,黄伟英,等.软土地基28.4 m深沉井不排水下沉法施工技术[J].特种结构,2022,39(5):113-119.
- [2] 黄彪.砂土层中沉井不排水与排水下沉结合施工技术[J].江西建材,2022(6):230-231.
- [3] 梁严俊,王杰.滨海软土地质条件下较大型沉井设计与施工探讨[J].城市建筑,2013(12):228-229.
- [4] 左俊杰.砂、卵石地质条件下沉井施工技术的应用——以遂宁某污水厂进水泵房施工为例[J].城市道桥与防洪,2023(6):195-198;249.
- [5] 程栋柱.沉井在软土地区的设计施工措施[J].城市道桥与防洪,2019(4):149-152.
- [6] 陆浩,朱浩宇,贺洁星,等.沉井施工对周围环境影响规律及加固

效果分析[J].中国市政工程,2020(6):67-71.

- [7] 林海.深层搅拌桩帷幕止水技术在沉井施工中的应用[J].建筑安全,2020(3):55-58.
- [8] 赵敏杰.超深沉井下沉周边环境效应与控制措施[J].建筑施工,2020,42(6):1079-1084.
- [9] 孙建海,樊云,陈挺,等.沉井在上海某综合管廊中的应用实例与分析[J].城市道桥与防洪,2019(10):207-211.
- [10] 朱志峰.进水泵房沉井施工与质量控制[J].建材与装饰,2017(48):26-27.
- [11] 林志.沉井施工工艺探讨[J].四川水泥,2020(11):186-187.
- [12] 陈国平.软土地基沉井下沉施工技术及应用[J].施工技术,2017(增刊2):353-356.
- [13] 韩宝祥.浅述取水泵房沉井下沉质量控制措施[J].水利建设与管理,2015(12):47-49.
- [14] 朱海燕.沉井结构在某污水提升泵站中的应用研究[J].山西建筑,2022,48(9):69-72.