

宁波中兴大桥主桥钢梁架设关键技术

叶嘉庭

(宁波市公共工程建设中心有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘要: 宁波中兴大桥受建设条件限制,主桥设计为主跨400 m矮塔斜拉桥。主梁采用混合梁结构。钢梁架设采用“边跨梁段滑移+中跨梁段桥面吊机悬拼”的总体方案,设中跨合龙口。边跨梁段利用浮吊起吊,采用曲线滑移法就位安装;中跨有索区钢梁采用悬臂拼装,无索区钢梁扣索辅助悬拼;中跨合龙采用配切合法。实践结果表明:大桥梁段工业化生产与滑移、液压提升等架设技术的结合,有效保障了主梁结构整体性和施工安全性。

关键词: 矮塔斜拉桥;钢箱梁;滑移施工;悬臂拼装;合龙技术

中图分类号: U445;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0361-05

Key Erection Techniques for Steel Girder of Main Bridge of Ningbo Zhongxing Bridge

YE Jiating

(Ningbo Public Engineering Construction Center Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

Abstract: Subject to the constraints of the construction conditions, the main bridge of Ningbo Zhongxing Bridge is designed as a low-pylon cable-stayed bridge with main span of 400 m. The girder is a composite structural girder. The steel girder is erected by an overall scheme of “sliding of the side span beam segment + cantilever assembly of the middle span beam segment by crane on the bridge deck” with a mid-span closure joint. The side-span beam segments are hoisted by a floating crane and erected in place by the curved sliding method. For the mid-span, the steel girders in the cable area are assembled by cantilever, and the steel girder in the cable-free area is assisted in cantilever assembly with the use of clamps. The mid-span closure is achieved through the cut-to-fit method. Practical results demonstrate that the integration of industrialized production of bridge segments with the erection techniques such as sliding and hydraulic lifting effectively ensures the structural integrity and construction safety of the girders.

Keywords: low-pylon cable-stayed bridge; steel box girder; sliding construction; cantilever assembly; closure technique

0 引言

矮塔斜拉桥又称索辅梁桥,是一种主梁和拉索相结合的组合体系桥梁,该桥型适用范围可以总结为:超过梁桥的经济跨径而用斜拉桥又不经济时,如跨径200~300 m范围;桥址靠近机场区,建筑高度受飞行净空限制,矮塔斜拉桥的优势更加明显^[1]。

我国已建矮塔斜拉桥的主梁多以预应力混凝土箱梁为主,一般采用悬臂现浇施工^[2]。随着主跨跨径的增大,如何精准、安全地进行主梁架设成为施工关键技术。2016年建成的主跨380 m榕江矮塔斜拉桥,其边跨混凝土梁采用搭设支架现浇施工;次边跨

及中跨钢箱梁悬拼安装^[3]。本文背景工程宁波中兴大桥为主跨400 m矮塔斜拉桥,主梁采用钢箱梁与叠合梁组成的混合梁,该结构形式在矮塔斜拉桥中属首次应用,有必要对混合梁安装过程中的施工难点和系统解决方案进行介绍,为该类型桥梁施工提供参考。

1 工程总体概况

1.1 主桥结构

宁波中兴大桥是跨甬江的特大型市政桥梁工程。主桥受庄桥机场60 m航空限高、一跨过江等建设条件限制,采用主跨400 m矮塔斜拉桥,是国内外最大跨度矮塔斜拉桥之一^[4]。大桥采用塔梁固接、塔墩分离的结构受力体系,见图1。主梁采用混合梁方案,中跨为整体式钢箱梁,边跨为钢箱叠合梁。本项目人非通道结构悬挑布置于主梁底缘,在主桥范

收稿日期: 2025-10-28

作者简介: 叶嘉庭(1989—),男,学士,工程师,从事城市道路、桥梁建设与管理工作。

围与主梁结构共体^[5],见图2。主塔设计为V形钢塔柱,竖向倾角 25° ,塔顶设中间横梁平衡边、中跨索

力,桥面以上塔高 37 m ^[6]。大桥布设36对斜拉索,索面呈扇形布置,拉索水平倾角 $13^\circ\sim 33^\circ$ 。

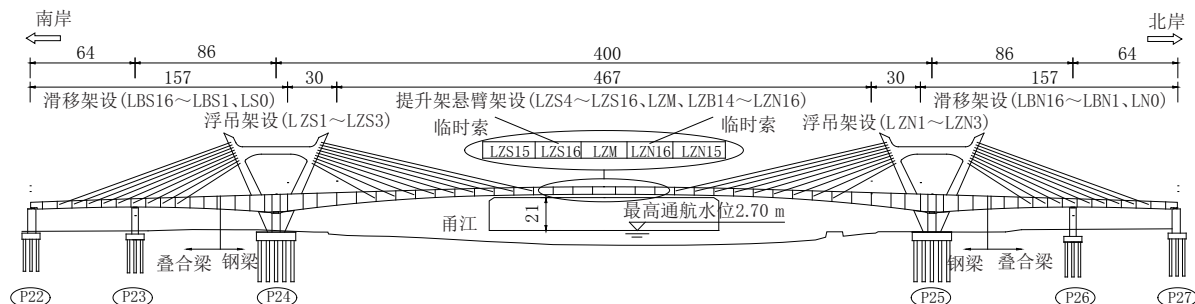


图1 中兴大桥主桥立面布置(单位:m)

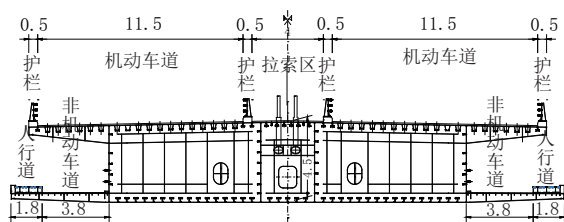


图2 主桥标准断面布置(单位:m)

1.2 施工条件分析

主桥工程水域属于甬江口内河段,常水位水深 10 m 以内,水流平顺,水流条件对船舶的正常通航影响较小。大桥跨越甬江主航道,江面宽约 330 m ,南、北两岸大堤之间宽度约 400 m 。根据行洪及通航论证,施工期间航道不中断。中兴大桥毗邻庄桥军用机场,大桥位于机场 60 m 航空限高范围,施工方案需考虑航空限高制约。大桥东侧为轨道交通3号线,满足管理部门的保护要求是制定施工方案时必须考虑的重要因素之一。

2 钢梁架设总体规划

2.1 钢梁节段划分

主桥边跨 116.5 m 区段范围采用钢-混叠合梁,梁高 $4.48\sim 7.72\text{ m}$,标准节段长度为 9 m ,节段重量 $100.7\sim 179.0\text{ t}$ ^[7]。中跨及部分边跨区段采用钢箱梁,总长度 467 m ,跨中无索区长 86 m ,梁高 $4.5\sim 10.5\text{ m}$,标准节段长度为 12 m ,重 $207.6\sim 469.0\text{ t}$;跨中合龙段长 14 m ,重 284.2 t ^[8]。

2.2 钢梁架设总体方案

由于主桥东侧已建轨道盾构与桥墩最小距离仅 9 m ,前期对边跨龙门吊安装和滑移安装方案进行了安全、成本、政策处理等多维度论证,最终确定边跨梁段滑移安装^[9]。另外,主桥边跨采用叠合梁+箱内配重以提升边跨锚固压重效率,这一结构特点决定中跨梁段采用悬臂拼装架设不仅技术、经济竞争性

强,而且可以满足水上施工航道不中断等管理要求。综上,提出了“边跨梁段滑移+主塔同步竖转+中跨梁段桥面吊机悬拼”的组合式建造安装方案^[10],上部结构主要安装步骤如下:

(1)搭设边跨滑移承重支架及滑道;

(2)边跨节段(LBS16~LBS1、LBN16~LBN1)和主墩上部节段(LS0、LN0)由中跨向边跨方向滑移就位安装;

(3)浮吊安装中跨节段(LZS1~LZS3、LZN1~LZN3);

(4)桥面搭设拼装胎架,卧拼主塔节段,后进行同步竖转安装;

(5)采用液压提升架逐段提升钢梁节段,并配套安装斜拉索,拆除边跨已脱空的支架;

(6)安装合龙段。

2.3 滑移承重支架和滑移轨道布设

在主桥边跨及中跨1~3号梁段范围布设滑移承重支架。滑移起始段支架兼作吊装平台^[11]。滑移承重支架根据钢梁节段重量和施工边界条件进行设计,分为排架和塔架两种结构形式。靠近主墩位置的钢箱梁载荷较大,采用排架结构,立柱为单排 $\phi 426\text{ mm}$ 钢管柱,纵桥向间距 6 m ,横桥向间距 2 m ;叠合梁区段采用塔架结构,格构柱由 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 布置的 $\phi 426\text{ mm}$ 钢管柱组成,格构柱之间纵桥向间距 $7.5\sim 11\text{ m}$ 。两排滑移支架横桥向中心间距 18.6 m ,互相独立不连接。支架基础采用桩承台基础。滑移支架布置见图3。

塔架和排架结构顶设置分配梁。排架结构柱顶分配梁顶部铺设三拼HN700 $\times$ 300型钢作为轨道梁,塔架结构柱顶分配梁顶部铺设三拼HN588 $\times$ 300型钢作为轨道梁。轨道梁每根型钢上方通长铺设滑移钢轨,并采用卡板与H型钢上翼缘连接。轨道投影长度总计 183 m ,根据梁底曲线变化,将轨道梁及钢轨分段拟合曲线。

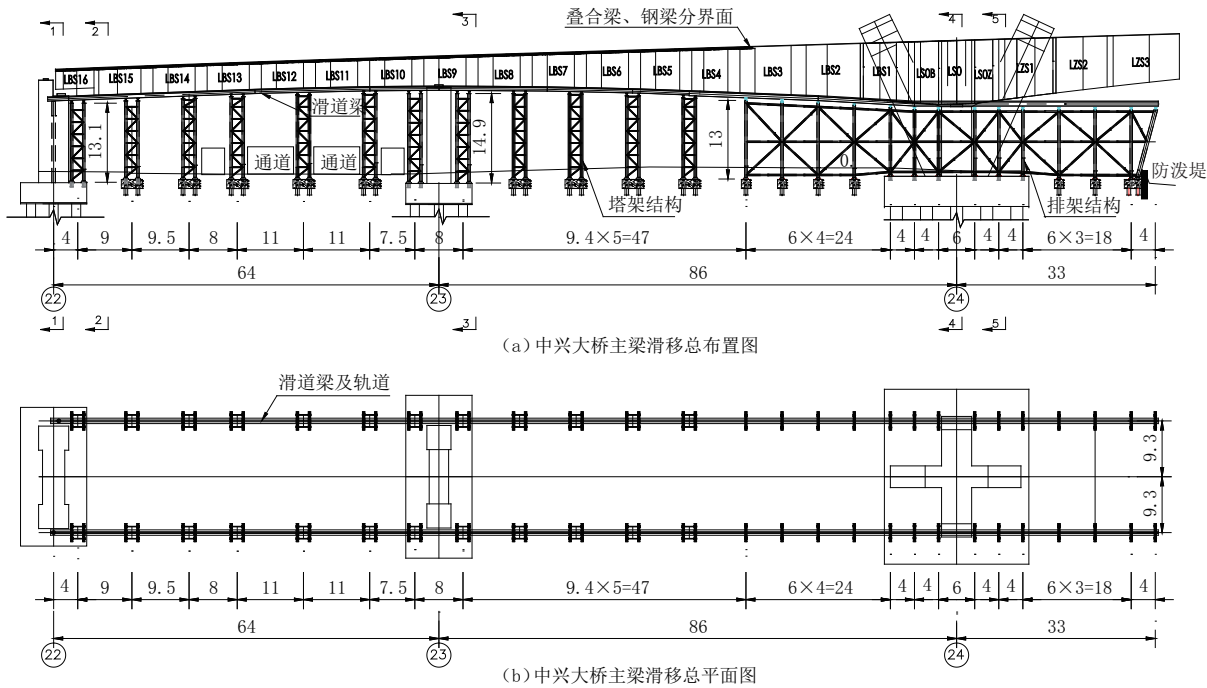


图 3 滑移钢梁分段及承重支架布置图(单位:m)

2.4 液压滑移系统

液压滑移系统由计算机同步控制系统、液压泵站、液压爬行系统及滑靴系统构成^[8]。滑靴系统由上部滑靴、下部滑靴、竖向油缸和钢垫板组成。滑靴连接梁段和动力爬行设备,为适应本工程曲线轨道坡度,滑靴可转幅度为 10°,下部滑靴焊连导行梁,可有效避免在轨道转角处发生卡顿。钢垫板布置于箱梁底部,与横隔板严格对齐。滑靴系统见图 4。

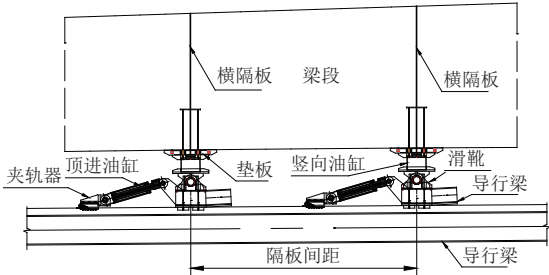


图 4 滑靴及动力系统布置示意图

液压爬行系统由夹轨器和顶进油缸组成。顶推油缸与滑靴后端耳板相连,以提供梁段向前滑移驱动力。根据各滑移点的液压油缸参数以及滑移速度布置液压泵站和专用电箱。在液压油缸内布置油缸行程传感器和压力传感器,并将各类型传感器与各自的通信模块连接,最终与现场实时网络控制系统的连接后,形成计算机同步控制系统布置^[11],见图 5。

2.5 吊装设备选型

本工程主梁采用浮吊吊装作业主要分为两大部分:配合滑移作业的边跨节段;浮吊直接吊装安装的

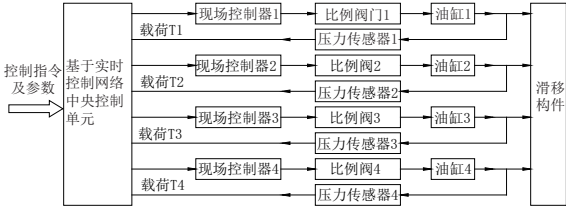


图 5 负载同步控制框图

中跨 1~3 号节段。综合考虑吊装箱梁节段重量,现场的作业环境等因素,选用 600 t 浮吊完成箱梁节段现场垂直提升作业。

中跨 4~16 号节段和合龙段采用悬臂拼装架设,选用 350 t 轻量化桥面吊机起吊安装^[12]。

3 钢梁架设重难点

主桥主梁采用边跨滑移、中跨悬拼的施工工艺,架设各阶段的重难点如下。

- (1)主桥边跨节段和主墩上部节段钢梁设计为变高度梁,采用曲线滑移工艺进行安装,滑移同步性是控制重点。本工程采用同步控制系统,滑移过程中观测同步位移传感器,监测同步情况。
- (2)主跨跨中无索区长 86 m,梁高仅 4.5 m;拼装过程中,单侧最大悬臂长度达 193 m,结构整体刚度小,桥梁线形控制难度大。施工过程中线形可调整措施少,若出现较大误差,结构位移和内力无法达到合理成桥状态,进而会影响后续节段安装和合龙。
- (3)合龙段采用两侧桥机对称吊装,吊装变形大,合龙口高差需小于 2 cm。此外,合龙段位断面,

包含上下层桥面,合龙控制点多达12个,需通过有效措施保证合龙精度。

4 钢梁架设方案

4.1 边跨钢梁架设方案

主桥边跨节段(LBS16~LBS1、LBN16~LBN1)和主墩上部节段(LS0、LN0)均采用曲线滑移工艺,由中跨向边跨方向滑移就位安装^[8]。

(1)节段吊装:运梁船将钢梁节段水运进场抛锚就位,采用600 t浮吊将梁段依次提升至滑移承重支架的滑移轨道或起始段吊装平台上。吊装LZS1/LZN1节段(重469 t)为最危险工况,经分析复核,浮吊船吊杆选用60°仰角,在甬江高潮位平潮阶段进行起吊落梁,满足吊装需求。

(2)节段滑移:对油缸复位情况、泵站、计算机控制系统进行全面检查就绪后开始正式滑移,将油缸分级加载至100%额定推力开始梁段滑移。滑移过程中需对以下内容进行重点监测:各滑移点位移的准确数值,控制系统通过信号控制爬行误差,保证位

移和推进力同步;夹紧器与滑移轨道的夹紧状况。

(3)节段就位:待梁段滑移至设计节段位置后,在节段梁底放置落梁砂箱,完成节段梁就位。

本工程滑移安装节段共38个,节段重100.7~460 t;实际滑移速度为4~5 m/h,最大可达10 m/h,最长滑移距离157 m。实践表明,长距离曲线滑移安装技术具有速度快、安全性好和经济性高的特点。

4.2 中跨钢梁架设方案

主桥中跨326 m范围内钢梁采用悬臂拼装,包含26个节段(LZS4~LZS16、LZN16~LZN4)。等高节段和变高节段均采用两台液压提升架,从两侧向跨中同步进行提升,吊点布置于横隔板所对应的桥面板上。梁段提升吊装初步到位后,通过纵向调位千斤顶和桥面调平油缸对节段进行三向调节与已安装节段精确匹配。梁段精确就位后,完成工地焊接,待焊缝检验合格,液压提升架即可前移并张拉该梁段斜拉索,随后重复起吊下一节梁段。

根据施工控制分析,中跨钢梁节段直接悬臂拼装合龙(方案一),成桥阶段主梁弯矩分布见图6,中跨有索区最大负弯矩 -4.61×10^5 kN·m,位于近四分跨位置;跨中正弯矩 1.15×10^5 kN·m。主梁中支点至四分跨之间负弯矩较大,主要原因是主梁无索区长,随着节段向跨中悬拼,负弯矩累积增大。

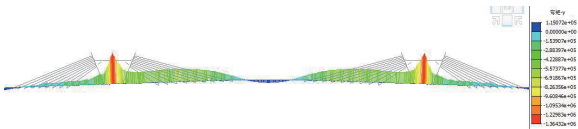


图6 方案一:成桥阶段主梁弯矩图(单位:kN·m)

由表1知,主梁架设和运营阶段,四分跨附近区段应力水平高,主力组合下压应力227 MPa,已超限,而跨中无索区段最大应力111 MPa,钢材不能充分利用。此外,中跨无索区悬拼过程中,竖向最大切线拼装变形接近3.0 m,成桥线形控制风险大。故调整施工工艺以减小四分跨负弯矩,优化内力分布和线形控制是中跨主梁架设阶段的重难点。

表1 主梁架设和运营阶段应力和变形

成桥方案	主梁结构状态	应力/MPa				变形/mm
		四分跨上缘	四分跨下缘	跨中上缘	跨中下缘	悬臂端或跨中
方案一:直接悬拼	最大单悬臂	123	-183	—	—	-2 955
	成桥阶段	116	-191	-38	45	-3 722
	运营阶段(恒+活)	139	-227	-94	111	—
方案二:超张拉及临时索辅助悬拼	最大单悬臂	58	-130	—	—	-1 530
	成桥阶段	80	-146	-81	96	-2 642
	运营阶段(恒+活)	96	-182	-136	162	—

通过施工便利性和经济性比选,提出超张永久索和设置临时扣索辅助成桥控制方案(方案二),主要工序如下:中跨15号节段安装后,安装临时索并张拉至目标索力;安装16号节段对跨中6~9号拉索超张拉;安装合龙段;拆除临时索,放张6~9号索。该方案下,成桥阶段弯矩图如图7所示,相较于方案一,四分跨负弯矩降低28%,跨中弯矩增加114%;跨中最大位移2.642 m,较直接悬拼成桥减小1.08 m。

由表1知,施工阶段及运营阶段,主梁应力水平改善,材料抗力得到有效利用。因此,方案二作为中跨无索区钢梁架设的最终实施方案。



图7 方案二:成桥阶段主梁弯矩图(单位:kN·m)

4.3 钢梁合龙方案

主梁中跨配切合龙施工,主要工序如下^[13,15]:

(1)中跨主梁节段采用桥面吊机提升,悬臂拼装至16号节段后,连续48 h观测合龙口各测控点间距和高程。由于合龙段重达284 t,采用免压重合龙观测,减少合龙工序和工期。

(2)根据合龙口观测数据,对中跨合龙段进行配切^[13]。有别于常规的直线配切法,本工程采用折线配切方法,即确定配切基准长度(合龙段中线长度),综合考虑各测控点预测焊缝宽度,采用以配切基准长度端点为交点的折线进行配切^[14]。以南岸悬臂段LZS16底板为例,采用直线配切时,4道腹板处的焊缝宽度10~19 mm;采用折线配切,焊缝宽度均为10 mm,合龙口精度控制更高(见图8)。

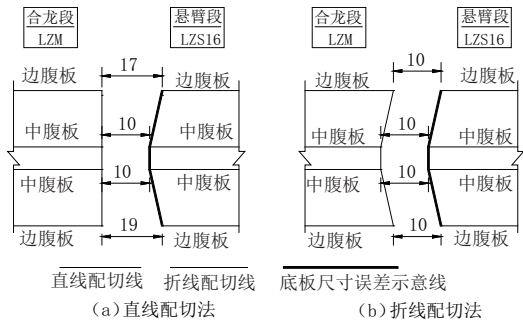


图8 直线配切与折线配切对比^[13](单位:mm)

(3)选择合适的时机,采用四台桥面吊机将吊装合龙段准确嵌入合龙口。对节段标高、轴线平面位置、环缝宽度进行调整满足要求后,对环缝临时焊接马板固定。

(4)按底板、腹板、顶板顺序,快速对称施焊合龙环焊缝并进行探伤,实现中跨合龙(见图9)。



图9 主桥中跨合龙完成

监测数据表明:最终合龙口高差6 mm、环焊缝宽度9~15 mm、轴线偏差8 mm,结构安装线形满足既定目标,实现了高精度合龙。

5 结 语

本工程充分考虑航空限高、水上施工航道不中断和近邻轨道盾构安全保护等严苛的施工制约因素,采用“边跨梁段滑移+中跨梁段桥面吊机悬拼”的总体架设方案。边跨梁段滑移架设与原计划选用的大跨度门式起重机架梁方案比较,可免除对相邻盾构的保护,具有较高的经济性与安全性。针对中跨超长无索区悬拼变形过大难题,提出超张拉与扣索辅助悬拼的变形及内力控制技术;通过采用免压重合龙观测、合龙段折线精细配切等多项技术措施,实现高精度架设。大桥梁段工业化生产与滑移、液压提升等架设技术的结合,有效保障了主梁结构整体性和施工安全性。

参考文献:

[1] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
[2] 施文杰.矮塔斜拉桥在国内外的发展与实践[J].现代交通技术,2012,9(3):22-25.
[3] 王雷,陈政清,梁立农,等.榕江大桥总体设计[J].中外公路,2016,36(4):144-149.
[4] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.宁波中兴大桥施工图设计文件[Z].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2016.
[5] 何武超,谢波.中兴大桥人非过江系统设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2022(9):67-70.
[6] 何武超.宁波中兴大桥V形主塔设计关键技术[J].中国市政工程,2022,221(2):12-16.
[7] 江震,何武超,马磊.斜拉桥组合梁桥面板体内体外预应力体系比选研究[J].中国市政工程,2019,203(2):126-128.
[8] JTG T D64-01—2015 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
[9] 张波,顾小岗.宁波中兴大桥陆上跨钢梁施工安装方案比选[J].上海公路,2024,172(1):62-66.
[10] 吴永敏.中兴大桥V型主塔竖转施工技术[J].城市道桥与防洪,2021(2):123-125.
[11] 吴永敏.中兴大桥变截面钢梁曲线滑移施工技术[J].城市道桥与防洪,2021(1):143-145.
[12] 王文炯,吴波,娄东东,等.宁波中兴大桥轻量化桥面吊机设计及应用[J].城市道桥与防洪,2020(9):154-156.
[13] 江震.宁波中兴大桥钢箱梁主跨合龙技术[J].城市道桥与防洪,2019(10):132-134.
[14] 赵晓晋,景强,贺拴海.港珠澳大桥青州航道桥主梁合龙施工技术[J].桥梁建设,2017,47(5):117-121.
[15] JTG T3651—2022 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范[S].