

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.030

## 南沙港铁路洪奇沥特大桥梁主梁合龙技术研究

高天驰<sup>1</sup>, 李周<sup>2\*</sup>, 蔡玉龙<sup>2</sup>, 郑荧光<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510665; 2. 中建科工集团有限公司)

**摘要:**南沙港铁路洪奇沥特大桥梁为主跨 360 m 的下承式连续钢桁梁柔性拱结构, 全桥采用先梁后拱的施工顺序, 主梁采用桥面吊机进行悬臂拼装施工, 通过顶落主梁各支点和纵移主梁的方式消除合龙口几何位置偏差。为保证主梁顺利合龙, 使用 Midas 有限元软件建立模型, 并且考虑了温度和桥面吊机等施工临时荷载, 确定了最佳的合龙方案。计算了顶落梁值、温度及桥面吊机站位等参数对合龙口线形的影响因子, 便于实际施工中对合龙口进行微调。验算了各施工阶段主梁应力值与刚度, 均满足要求。研究表明: 通过顶落主梁各支点和纵移主梁的方式可以实现连续钢桁梁的高精度无应力合龙, 缩短工期, 降低施工成本, 误差满足规范要求。

**关键词:**钢桁梁柔性拱桥; 无应力合龙; 顶落梁; 合龙温度; 吊装方式

## 1 工程概况

南沙港铁路洪奇沥特大桥梁为铁路钢桁梁柔性拱结构桥梁, 主跨为下承式连续钢桁梁柔性拱结构, 全桥长 998.8 m, 跨度布置为(138+360+360+138) m, 如图

1 所示。主梁为钢桁梁, 采用华伦式, 由两片主桁组成, 桁高 16 m, 桁间距 15 m, 宽跨比为 1/24。上下弦杆均采用焊接箱形截面, 腹杆根据受力分别采用工字形和箱形截面; 拱肋矢高 65.0 m, 采用箱形截面柔性拱; 吊杆按横截面方向布置双吊杆, 采用极限强度为 1 670 MPa 的高强度钢丝; 上弦杆、下弦杆、腹杆、节点

## 参考文献:

- \*\*\*\*\*
- [1] GUSTAFERRO A H, SELVAGGIO S L. Fire Endurance of Simply Supported Prestressed Concrete Slabs[J]. Journal of the Prestressed Concrete Institute, 1967, 12(1): 37-52.
  - [2] 唐皓. 钢筋混凝土桥梁火灾损伤与加固分析[D]. 湖北工业大学硕士学位论文, 2016.
  - [3] 王翠娟. 火灾模式下多梁式混凝土 T 型梁桥结构性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013.
  - [4] 李国强, 吴波, 蒋首超. 工程结构抗火研究进展与建议[J]. 建筑钢结构进展, 2010(5).
  - [5] 朱建明, 王晓纯, 魏东, 等. 火灾后混凝土构件的剩余刚度估计[J]. 工程力学, 2011(8).
  - [6] 郑文忠, 许名鑫, 王英. 钢筋混凝土及预应力混凝土材料抗火性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(4).
  - [7] 姚玲森, 项海帆, 顾安邦. 桥梁工程[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.

- [8] 陆洲导. 钢筋混凝土梁对火灾反应的研究[D]. 同济大学博士学位论文, 1989.
- [9] 谢金成. 预应力混凝土箱梁的抗火性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [10] 郑文忠, 陈伟宏, 侯晓萌. 火灾后配筋混凝土梁受力性能实验与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008(12).
- [11] 张岗, 刘天龙, 王翠娟, 等. 强度减损下混凝土箱梁预应力高温损失分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015(4).
- [12] 李国强, 吴波, 蒋首超. 工程结构抗火研究进展与建议[J]. 建筑钢结构进展, 2010(5).
- [13] 侯炜. 预应力混凝土箱梁结构抗火性能研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2014.
- [14] 于丽波, 董浩, 朱季, 等. 钢箱梁桥温度梯度模式拟合研究[J]. 中外公路, 2017(2).
- [15] 黄民水, 程劭熙, 卢海林, 等. 考虑温度影响的结构损伤识别基准有限元模型[J]. 中外公路, 2017(5).

收稿日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51678247)

作者简介: 高天驰, 男, 硕士研究生. E-mail: 1750703445@qq.com

\* 通信作者: 李周, 男, 博士, 高级工程师.

板采用 Q370qE 钢材,弹性模量为  $2.1 \times 10^5$  MPa,容许轴向应力为 210 MPa,容许弯曲应力为 220 MPa;上平联、下平联、横联、纵梁间连接角钢采用 Q345qD,弹性模量为  $2.1 \times 10^5$  MPa,容许轴向应力为 200 MPa,容许弯曲应力为 210 MPa;钢桁梁采用栓焊结合的整体节点。桥面系采用纵横梁明桥面,在两片钢桁下弦节点处设置横梁,横梁间通过 4 根纵梁相连,纵梁在横桥向间距 2 m,纵梁间通过系杆相连。

该桥采用先梁后拱的施工顺序,钢桁梁分节段悬臂拼装合龙后,在主梁上卧拼拱肋,吊装合龙;分批张拉吊杆,成桥后进行调索。钢桁梁最大悬拼距离为 98 m,钢梁安装施工难度大。该文主要介绍洪奇沥特大桥钢桁梁合龙的关键施工控制技术。

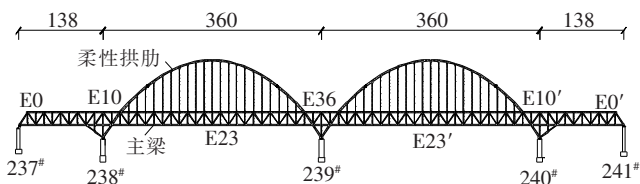


图1 跨度布置图(单位:m)

## 2 主梁无应力合龙方案

### 2.1 无应力合龙原理

钢桁梁无应力合龙,即通过工程措施使得合龙口处于无应力状态,即:

$$N=0, Q=0, M=0 \quad (1)$$

总体思路就是通过寻找不同体系转换临界状态,“模糊”不同体系的差别,使结构始终在一次成桥结构上进行加载和卸载,在弹性范围内,只要加载=卸载,结构成桥内力不变。

### 2.2 主梁合龙方案

主梁分别从边墩和中墩悬臂拼装,合龙口设置在中跨的跨中位置,由于中跨的跨度比较大,在中跨设置临时墩 L-1 和 L-2,临时墩 L-1 距离合龙口 68.5 m,L-2 距离合龙口 82 m。为克服悬拼末端沉降造成的高差,该桥采用将 237# 墩及临时墩 L-3 下落,临时墩 L-1 及临时墩 L-2 起顶的方式对合龙口进行调整。主梁施工示意图如图 2 所示。

洪奇沥水道钢桁梁柔性拱特大桥主梁合龙时,施工难点主要有:

(1) 合龙口杆件多,示意图如图 3 所示。杆件之间靠高强摩擦螺栓连接,在安装过程中出现误差调整

空间较小,要实现标高、里程及轴线 3 个方向的无应力合龙,精度要求高。

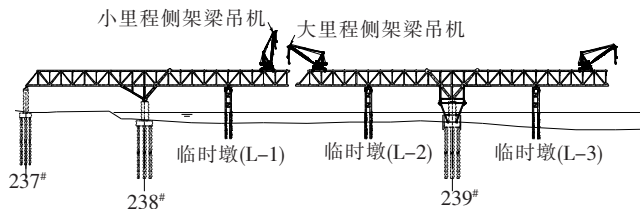


图2 主梁施工示意图

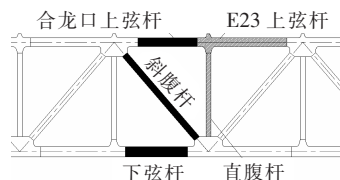


图3 合龙口示意图

(2) 悬拼跨度大,合龙口几何位置对调整措施、环境温度以及临时荷载较为敏感。

(3) 洪奇沥水道所在地气候较为炎热,合龙温度与设计基准温度相差较大,克服温度变化调整量较大,进一步提升了合龙的难度。

## 3 合龙施工控制技术

钢梁合龙前处于悬臂受力的最不利状态。合龙口调整时,不论是桥面吊机行进还是顶落梁的施工措施,都会对钢梁受力产生影响,因此,此阶段的监控工作非常重要,主要分为 3 部分:

(1) 通过理论分析,计算钢梁各位置的变形值,在实际施工时,密切关注合龙口的位移变化及其相对高差值。

(2) 通过理论分析,计算钢梁合龙过程中的应力状态,在实际施工时,密切关注关键杆件的应力变化情况,并与理论值进行对比。

(3) 通过理论分析,计算出在合龙口调整各阶段的支点反力,可以为现场施工时各支点处布设千斤顶提供指导,同时也可以通过现场千斤顶的油压表读数来验证理论值的精确性。

### 3.1 顶落梁调整措施

悬臂拼装导致合龙两侧存在转角,上弦杆与下弦杆的里程不同,即合龙口成“八字口”的状态,所以需要顶落梁对合龙口姿态进行调整。

采用将 237# 墩及临时墩 L-3 落梁,临时墩 L-1 及临时墩 L-2 起顶的方式对合龙口进行调整,合龙口调整示意图如图 4 所示。

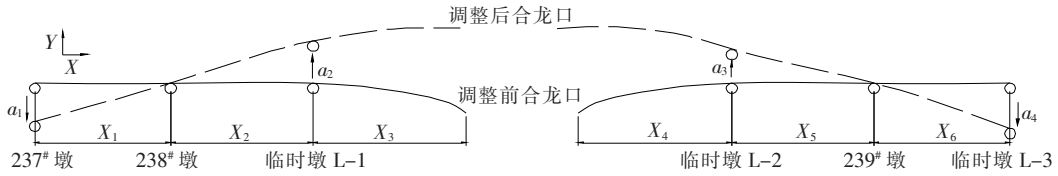


图 4 合龙口调整示意图

合龙前,主梁是连续梁结构,合龙口姿态调整时,为避免支点处反力和主梁内力过大,主梁采用刚体转动,则各支座的顶落梁值之间存在线性几何关系。如下式所示:

$$a_2 = a_1 \frac{X_2}{X_1}, a_3 = a_4 \frac{X_5}{X_6} \quad (2)$$

该文采用 Midas 软件建立主梁合龙的有限元模型,如图 5 所示,通过施加节点强制位移实现顶落梁的措施,各支点处顶落梁值对合龙口标高及里程的影响如表 1 所示。

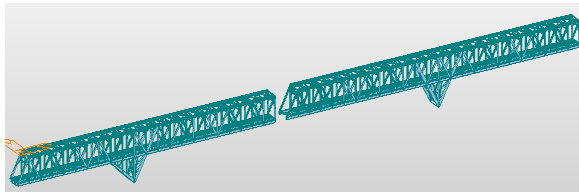


图 5 主梁合龙的有限元计算模型

表 1 各支点顶落梁值对合龙口标高及转角的影响

墩号	顶落梁值/ mm	标高变化/ mm	合龙口转角/ rad
237#墩( $a_1$ )	100	-6.8	0.000 026
临时墩 L-1( $a_2$ )	100	184.1	-0.000 012
临时墩 L-2( $a_3$ )	100	200.4	0.000 106
临时墩 L-3( $a_4$ )	100	-97.0	-0.000 013

表 1 中标高的负值为向下,正值为向上,转角的正值为图 5 中顺时针方向,负值为逆时针方向。从表 1 可以看出:237#墩及临时墩 L-3 落梁时,合龙口两侧标高上升,影响因子分别为 0.068 和 0.97;临时墩 L-1 和临时墩 L-2 起顶时,合龙口两侧标高增大,影响因子分别为 1.841 和 2.004。

根据顶落梁调整措施及各支点顶落梁值的影响因子的计算,可以确定各支点顶落梁值的大小。理论计算结果中,考虑了主梁自重与施工临时荷载的合龙口小里程侧的转角为 0.002 28,大里程侧的转角为 -0.002 67。为使合龙口两侧转角为零,并结合式(1)、(2)及表 1 的计算结果,各支点顶落梁值  $a_1$ 、 $a_2$ 、

$a_3$ 、 $a_4$  分别为 -37、27、28.5、-28.5 cm。

进行顶落梁前小里程与大里程合龙口标高值分别为 -17.4、-24.8 cm。各支点顶落梁值和合龙口标高值确定后,根据顶落梁值对合龙口两侧标高的影响因子可以计算出合龙口两侧的标高为:小里程侧  $h_1 = 29.79$  cm,大里程侧  $h_2 = 29.55$  cm,两侧理论高差为 0.24 cm。实际施工时,按计算的顶落梁值进行合龙口调整后,合龙口小里程侧标高的实测值为 29.84 cm,大里程侧标高实测值为 29.31 cm,合龙口两侧高差为 0.53 cm,小于合龙容许高差值 1 cm,满足合龙要求。顶落梁前后主梁理论与实测线形如图 6 所示。各施工阶段合龙口高程与高差变化如表 2 所示。

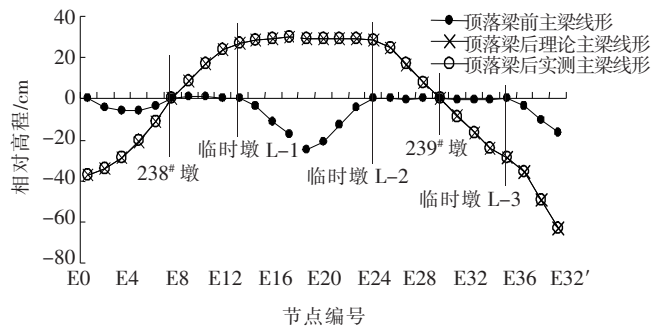


图 6 顶落梁前后主梁线形示意图

表 2 各施工阶段合龙口两侧相对高差变化

施工阶段	E22 高 程/cm	E23 高 程/cm	高差值/ cm	容许高 差值/cm
吊机行进前	-17.4	-23.8	6.4	
吊机行进后/ 顶落梁前(理论)	-17.4	-24.9	7.5	
吊机行进后/ 顶落梁前(实测)	-17.4	-24.8	7.4	
顶落梁后(理论)	29.79	29.55	0.24	1
顶落梁后(实测)	29.84	29.31	0.53	1

在最大悬臂状态下,钢桁梁合龙口最大理论变形值为 24.9 cm,最大实测变形值为 24.8 cm,全钢桁梁理论与实测线形最大变形误差为 0.3 cm(出现在顶落梁后 E16 和 E23 节点),小于容许变形误差值 1 cm,钢

桁梁强度和刚度状态良好。

钢梁各施工阶段的应力变化值如图7所示。从图7可以看出:在各个施工阶段钢梁内实测应力值与理论计算值吻合较好;其中合龙阶段实测最大应力值最大,为135.1 MPa,出现在临时墩L-2上弦杆位置,与理论计算值的误差为-3.64%;临时墩复位阶段实测最大应力值为96.2 MPa,出现在238#墩顶上弦杆位置,与理论计算值的误差为+2.85%,误差较小。且合龙调整阶段,钢梁的应力远小于容许应力值210 MPa,结构处于安全状态。

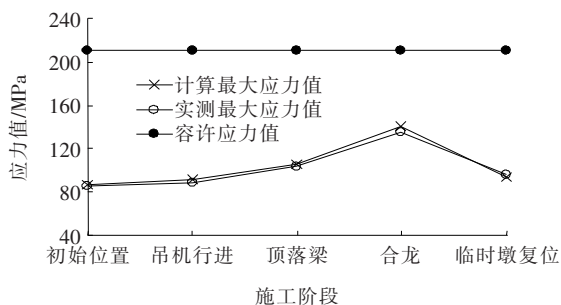


图7 钢梁各施工阶段的应力变化值

各支点计算与实测支反力结果如表3所示。从表3可以看出:支反力实测值与计算值误差较小,均在10%以内。除临时墩L-1支反力实测值略大于计算值外,其余墩顶实测值均小于计算值,千斤顶使用比例最高为60%,各支点结构安全,有限元计算结果准确,可以精确指导施工。

### 3.2 合龙温度影响

钢结构受温度的影响非常大,由于钢桁梁受到日晒比较均匀,所以温度对钢桁梁的影响主要在里程方向,温度影响下钢梁伸长量 $\delta$ 可按下式计算:

表3 各支点支反力结果

位置	千斤顶布设/t	计算最大支反力/t	实测最大支反力/t	实测误差比/%	千斤顶使用比例/%
237#墩	2 000	1 190	1 111	-7	56
238#墩	8 000	4 594	4 389	-4	55
临时墩L-1	6 200	3 392	3 638	7	59
临时墩L-2	7 200	4 052	3 943	-3	55
临时墩L-3	6 200	4 076	3 740	-8	60

$$\delta = \alpha \times L \times \Delta T \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为线膨胀系数,取 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ;  $L$ 为钢梁长度; $\Delta T$ 为温度差。小里程侧梁长度为304.5 m,大里

程侧梁长度为180 m,所以温度升高 $5^{\circ}\text{C}$ 时,合龙口小里程侧里程的变化值为0.9 cm,大里程侧里程的变化值为-1.5 cm,合龙口减小约2.4 cm,正值为沿着X轴正方向,负值为沿着X轴负方向。

在设计基准温度 $20^{\circ}\text{C}$ 条件下,合龙口理论长度为9.013 m,实测长度为8.987 m。从施工安全和温度变化趋势等方面综合考虑,确定合龙温度为 $32 \sim 38^{\circ}\text{C}$ (按照 $35^{\circ}\text{C}$ 考虑,合龙口误差在2 cm内可以通过施工措施进行调整),合龙口长度会减小约7.2 cm,合龙段会伸长约0.2 cm。综合考虑,将小里程侧钢梁向小里程方向纵移9.4 cm。在实际施工过程中,调整前、后理论合龙口长度与合龙段长度随温度变化如图8所示,里程实际合龙误差约为0.3 cm。

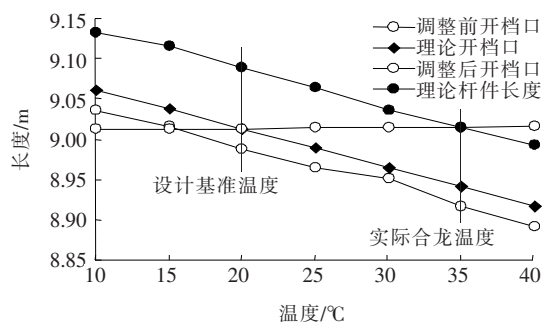


图8 合龙口与合龙段长度随温度变化关系

### 3.3 吊装方式影响

该桥小里程侧吊机总重210 t,大里程侧吊机总重240 t,合龙口单根下弦杆重量约为70 t,采用哪一侧吊机吊装合龙口杆件以及另一侧吊机的位置会直接影响合龙口的线形,对合龙工程有较大的影响,合龙口两侧吊机位置如图9所示。

由图9可以看出:大里程侧吊机吊装合龙杆件与小里程侧吊机吊装合龙杆件的区别在于小里程侧吊机需前移一个节间,即13.5 m。经有限元模型计算可知,大里程侧吊机吊装下弦杆时,合龙口大里程侧标高降低1.1 cm;小里程侧吊机吊装下弦杆时,合龙口小里程侧标高降低1.4 cm。

吊机位置选择需根据施工组织安排及合龙口线形控制的要求进行,该桥实际施工时选用大里程侧吊机吊装合龙段下弦杆,实测大里程侧合龙口标高降低1.0 cm。而前文的各支点顶落梁对合龙口标高的影响因素也是以此为基础进行计算。

## 4 结论

洪奇沥水道钢桁梁柔性拱特大桥具有跨度大、合



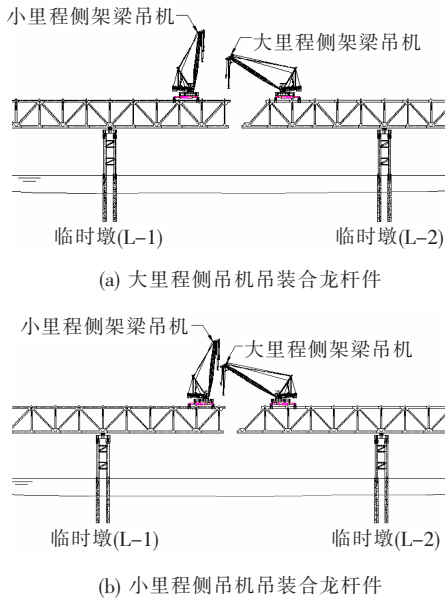


图 9 合龙口两侧吊机位置示意图

龙口多、安装精度高、受施工措施、合龙温度和临时荷载影响大的特点。采用顶落梁和对主梁进行纵移的方式对主梁进行无应力合龙,通过研究,得到以下结论:

(1) 根据主梁合龙口理论转角,确定了各支点的顶落梁值分别为:237#墩下落 37 cm,临时墩 L-1 上顶 27 cm,临时墩 L-2 上顶 28.5 cm,临时墩 L-3 下落 28.5 cm,调整后合龙口两侧理论高差为 0.24 cm,实测高差为 0.53 cm。

(2) 温度对主梁影响主要在里程方向,每升高 5℃,合龙口减小约 2.4 cm,考虑合龙温度影响后将小里程侧钢梁向小里程方向纵移 9.4 cm,实测合龙里程误差约为 0.3 cm。

(3) 吊装方式不同将对合龙口标高造成影响,使用大、小里程侧吊机对合龙段进行吊装时理论计算该侧合龙口分别下降 1.1、1.4 cm,实际施工中使用时大里程侧吊机进行吊装,实测大里程侧合龙口下降 1.0 cm。

通过对顶落梁值、温度及桥面吊机站位等参数的影响因子进行计算,可以为实际施工提供建议和指导,主要体现在以下几点:

(1) 确定了顶落梁值以后,根据现场需要,可以选择合适的时机进行调整,如在主梁架设至临时墩 L-1 和 L-2 时,将各支点标高调整到位,因为此时临时墩的支反力最小,只需较少的千斤顶就可以完成调整工

作,且调整时间可以根据现场情况灵活选择,既节约了工期,也降低了施工成本。

(2) 实际施工时,由于合龙温度等因素影响,合龙口线形处于动态变化的过程,而计算了温度的影响因子后,可以选择最佳合龙温度。

(3) 由于合龙口杆件采用高强螺栓连接,对合龙口线形的精度要求非常高,实际合龙时,通过顶落梁、温度、桥面吊机等综合措施对主梁线形进行微调,将合龙口的高差和纵向间距的误差均控制在 5 mm 以内。

洪奇沥水道钢桁梁柔性拱特大桥主梁已顺利完成高精度合龙,线形平顺,误差满足规范要求。该桥主梁合龙控制技术可以为类似工程提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 夏正春,严爱国,刘振标,等.南沙港铁路洪奇沥特大桥设计[J].世界桥梁,2019(4).
- [2] TB 10091—2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- [3] 黄剑锋,周洁,卢鹏.洪奇沥水道桥大跨度柔性拱施工方案研究[J].铁道建筑,2018(12).
- [4] 秦顺全.斜拉桥安装无应力状态控制法[J].桥梁建设,2003(2).
- [5] 朱立山,才振山,蒋雨骏.洞庭湖大桥两跨连续钢桁架加劲梁合龙方案研究[J].中外公路,2019(5).
- [6] 谭俊.无应力状态控制法在桥梁施工控制中的应用[J].公路,2016(4).
- [7] 施洲,胡豪,周文,等.大跨度混合梁斜拉桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2018(3).
- [8] 周银,张雪松,丁艳超.无应力状态法在大跨径拱桥施工中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018(8).
- [9] 贾建杰.钢桁梁桥施工过程中的无应力合龙方式[J].南阳理工学院学报,2017(4).
- [10] 于祥敏,陈德伟.贵黔高速鸭池河特大桥钢桁梁合龙施工控制技术[J].桥梁建设,2017(6).
- [11] 徐林,刘琪.基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究[J].中外公路,2019(1).
- [12] 龚玉华,梁森,陶路.坝陵河大桥钢桁加劲梁合龙关键技术[J].桥梁建设,2012(1).
- [13] 王红平,涂宏未,李元生.东莞东江大桥钢桁梁合龙技术[J].桥梁建设,2010(2).
- [14] 纪为详,陶路.山区大跨度悬索桥钢桁梁施工技术[J].桥梁建设,2012(3).