DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.026 文章编号:1671-2579(2025)02-0229-09

斜拉桥简支合龙调控理论及智能顶推方法

詹璐[1],陈常松[2*],凌李华[3],黄茛[4]

(1.湖北省交通规划勘察设计院股份有限公司,湖北 武汉 430051;2.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;3.湖南省高速公路集团有限公司,湖南 长沙 410005;4.广州城市职业学院 智慧城建学院,广东 广州 511370)

摘要:主梁合龙是斜拉桥实现内力和线形目标的关键工序。为解决斜拉桥施工过程中主梁合龙受力问题,该文基于桥梁自适应无应力构形控制法,分析了不同主梁简支合龙施工方法的力学特性,建立了计算简支合龙法合龙段制造尺寸的分析方法。以嘉鱼长江大桥为依托工程,提出了一种新型的智能顶推-简支合龙方法,分析了合龙后的主梁线形和结构受力结果,验证了所提合龙施工新方法的可行性。结果表明:实测线形与理论线形基本一致,所提出的合龙方法可操作性强,能保证较高的合龙精度。

关键词:斜拉桥;合龙控制;智能顶推;无应力构形;结构力学

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Regulation Theory and Intelligent Incremental Launching Method for Simply Supported Closure of Cable-Stayed Bridges

ZHAN Lu[1], CHEN Changsong[2*], LING Lihua[3], HUANG Gen[4]

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430051, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Expressway Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410005, China; 4. School of Smart Urban Construction, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 511370, China)

Abstract: Main girder closure is the key process for cable-stayed bridges to achieve internal force and alignment goals. Focusing on the stress problem of main girder closure during the construction of cable-stayed bridges, this paper analyzed the mechanical characteristics of different construction methods of simply supported closure of the main girder based on the adaptive unstressed configuration control method of bridges and established an analysis method for calculating the manufacturing size of closure segment in simply supported closure method. Moreover, it put forward a new intelligent incremental launching method for simply supported closure with Jiayu Yangtze River Bridge as the background and analyzed the main girder alignment and structural stress results after closure. Finally, it verified the feasibility of the proposed new closure construction method. The results show that the measured alignment is basically consistent with the theoretical alignment, and the proposed closure method has high operability and can ensure high closure accuracy.

Keywords: cable-stayed bridge; closure control; intelligent incremental launching; unstressed configuration; structural mechanics

0 引言

斜拉桥的主梁中跨合龙是其施工过程中的关键步骤,对于实现结构最终的内力和线形目标尤为重要[1-6]。合龙完成后,基本确定了斜拉桥内力和线形。合龙施工控制时,应保证斜拉桥的内力线形满足设计预期值[7-12],并将实际的成桥状态作为智能健康监测基础数据[13],因此,合龙施工的调控措施显得非常重要。但目前的研究对斜拉桥施工过程的主梁合龙分析和调控方法涉及并不多[14-15]。

收稿日期:2025-01-03(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278143);湖南省交通运输科技进步与创新计划项目(编号:202310)

作者简介:詹璐,女,硕士,高级工程师. E-mail:524873617@qq.com

***通信作者:**陈常松,男,博士,教授. E-mail:changsongchen@csust.edu.cn

目前,斜拉桥主梁最后合龙的方法主要有几何法与配切法两种。当采用几何法时,合龙段在工厂制作完成并运输至合龙现场,其制造尺寸由正装分析的无应力构形得到,并在合龙过程中不会改变。但为了适应合龙温度变化,合龙前悬臂主梁需要向边跨牵引或顶推,以提供足够的施工空间[16]。该方法已在苏通长江大桥和Stonecutters Bridge等大跨度斜拉桥上成功应用[17-18]。与几何法不同,配切法合龙段虽然也在工厂制造,但制造时会预留切割余量,合龙段运输至合龙现场后,需进行二次切割以适应合龙口尺寸。因此,这种方法更多地被应用于钢斜拉桥中。在实际运用中,上述两种方法合龙施工工序都比较复杂且存在一些不足,如几何法对施工全过程的拼装误差和温度误差缺乏有效的调整手段,为了保障合龙精度,通常需要在合龙部位布置压重及刚性支撑结构,而这类临时性的合龙辅助手段,导致了施工复杂性的提升及诸多不便。配切法同样需要这些临时合龙辅助装置,并且还需在现场切割合龙段,但因其现场制作精度较低且改变了合龙段的无应力尺寸,这影响了合理成桥状态的实现精度。

近年来,随着斜拉桥跨度的增大和结构体系的复杂化,其主梁的高精度合龙研究也越来越引起人们的重视。李乔等[17]基于几何控制法在苏通长江大桥上采用自适应控制进行主梁合龙;Morgenthal等[18]采用综合几何控制法对Stonecutters Bridge的主梁合龙进行控制。这些研究有助于提高传统合龙方法的安全性,改善其施工的便利性,但仍没有解决常规合龙方法的不足。因此,为克服上述两种常用合龙方法的缺点或不足,需要对斜拉桥主梁合龙的方法进行深入研究,建立方便快捷的合龙方法。本文在嘉鱼长江大桥和赤壁长江大桥主梁合龙实践的基础上,提出了一种新型的斜拉桥中跨主梁简支合龙法,建立了合龙段制造尺寸的精确计算方法,分析了新型智能顶推-简支合龙法的应用效果,以适应大跨度斜拉桥设计与施工的高精度要求。

1 简支合龙法成桥内力的调控理论

简支合龙法的概念来源于自适应无应力构形控制法。自适应无应力构形控制法应用于桥梁施工控制中,在文献[19-24]被提及,并阐述了其有3个基本的思想或出发点。

基于无应力状态构形控制理论的基本原理,斜拉桥在节段施工过程中的各类状态可由平衡方程式(1)表达:

$$[K]\{\delta\}=\{P\}+\{P_0\} \tag{1}$$

式中:$[K]$为当前状态下的总体刚度矩阵;$\{\delta\}$为位移向量;$\{P\}$为施加载荷向量;$\{P_0\}$为等效载荷向量。

如上所述,合龙段施工是实现合理成桥的关键阶段。提出的简支合龙法可以用图1(a)所示的三跨斜拉桥的例子来进行原理说明。采用两种不同的方法,即单缝合龙法和本文提出的新方法——简支合龙法来进行合龙段施工。为了研究新的合龙方法的可行性,进行了以下类比分析。

为了简明起见,选用图1(b)斜拉桥实体模型,其中跨主梁合龙施工阶段的内力及变形状态,可通过采用双边固定梁的分析方法来表述。主梁自重和架设荷载之和可假定为当量荷载为q的均匀分布荷载。最大悬臂AB和CD都有相同的长度l_1,合龙段BC的长度为l_2。恒载下合龙口的弯矩分布如图1(b)所示,图中的这个内力状态可认为是固支梁的合理成桥状态。因此,主梁在有应力下的曲率κ如下:

$$\kappa=0 \tag{2}$$

控制截面的弯矩如下:

$$M_A=m_1=M_D,M_B=m_2=M_C \tag{3}$$

式中:$m_1=\frac{1}{24}q(2l_1+l_2)^2$;$m_2=\frac{1}{24}q(8l_1^2+8l_1l_2-l_2)$。

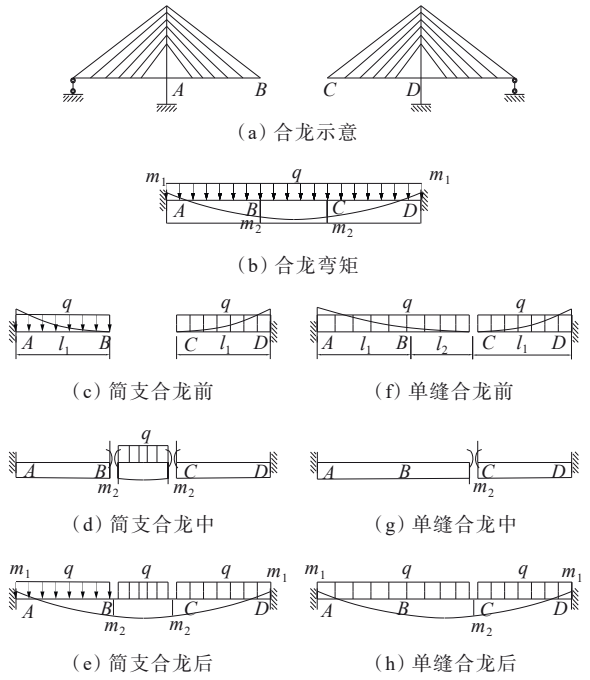
由此可得:

$$m_1+m_2=\frac{1}{2}ql_1(l_1+l_2) \tag{4}$$

为了研究合龙段架设过程中主梁弯矩和曲率的变化,首先研究了简支合龙法,然后对单缝法进行类似分析。

1.1 简支合龙法

两个最大悬臂AB和CD的部分结构如图1(c)所示,只有合龙段BC没有安装。最大悬臂梁中的弯矩如图1(c)所示,简支法合龙时的弯矩和曲率值见表1。采用悬臂等效,悬臂两端B和C均为零弯矩。在简支法合龙过程中,可以发现悬臂端与需要架设的合龙段之间有两个合龙接头。在图1(d)所示的安装过程中,合龙段BC由两台单独安装在两个悬臂端上的起重机提起,由于合龙段的自重,悬臂标高将下降。为了在此阶段实现合理成桥状态,应分别在两个合龙接头上施加两对力矩。相应的增量弯矩和增量曲率,出现在悬臂AB和CD中,如图1(d)和表1所示。最后与图1(b)所示的相同,合龙段具有如



(a) 合龙示意　(b) 合龙弯矩　(c) 简支合龙前　(f) 单缝合龙前　(d) 简支合龙中　(g) 单缝合龙中　(e) 简支合龙后　(h) 单缝合龙后

图 1　斜拉桥中跨简支和单缝合龙法的简化模型

Figure 1　Simplified models of mid-span of cable-stayed bridges with simply supported and single-seam closure methods

图 1(e)所示的弯矩分布，合龙后的内力与线形与设计状态一致。

1.2　单缝合龙法

对于采用单缝合龙法，合龙段 BC 的安装方式与标准梁段相同，如图 1(f)所示。与简支合龙法不同，这里只剩下一个接缝用于合龙安装[图 1(g)]。因此左侧最大悬臂长度发生了变化，而另一个最大悬臂 CD 仍然是长度 l_1。由于合龙段 BC 的整体自重施加在左侧悬臂端 B 上，因此两个悬臂端的标高存在明显差异。这是压重与拉索共同作用的结果，以保持两个悬臂端标高一致[图 1(f)]。此外，对所需的成桥状态同时施加一对力矩，如图 1(g)所示。图 1(h)所示的合龙后主梁具有与简支合龙法相同的弯矩分布，也与图 1(b)所示的成桥状态相同。此外，如表 2 所示，主梁合龙的曲率也可以达到零，主梁合龙后的内力和线形与设计状态一致。

基于自适应无应力状态构形控制原理，在悬臂主梁 AB 与 CD 段的悬拼施工全过程中，由于轴向及弯曲变形的偏差，其长度与曲率存在偏差。此外，当实际合龙温度与预期温度不符时，为了减小顶推或牵引主梁的位移并确保合龙后主梁的稳定性，可以调整合龙段的生产尺寸。因此，BC 段无应力尺寸的调整量实质上涵盖了两部分：一是悬拼误差的调整

表 1　简支法合龙时弯矩和曲率

Table 1　Bending moment and curvature during simply supported closure

项目	截面 A		截面 B	
	弯矩	曲率(M/EI)	弯矩	曲率(M/EI)
设计状态	m_1	0	m_2	0
① 无应力状态	0	$-m_1$	0	$-m_2$
② 最大悬臂	$\frac{1}{2}ql_1^2$	$\frac{1}{2}ql_1^2$	0	0
③ 简支合龙	$-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)$	$-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)$	m_2	m_2
①+②+③合龙完成	$0+\frac{1}{2}ql_1^2-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)=m_1$	$-m_1+\frac{1}{2}ql_1^2-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)=0$	$0+0+m_2=m_2$	$-m_2+0+m_2=0$

表 2　单缝合龙时弯矩与曲率

Table 2　Bending moment and curvature during single-seam closure

项目	截面 A		截面 C		截面 D	
	弯矩	曲率(M/EI)	弯矩	曲率(M/EI)	弯矩	曲率(M/EI)
设计状态	m_1	0	m_2	0	m_1	0
①无应力状态几何	0	$-m_1$	0	$-m_2$	0	$-m_1$
②最大悬臂	$\frac{1}{2}q(l_1+l_2)^2$	$\frac{1}{2}q(l_1+l_2)^2$	0	0	$\frac{1}{2}ql_1^2$	$\frac{1}{2}ql_1^2$
③单缝合龙	$-\left[m_2-\frac{1}{2}q(l_1+l_2)l_2\right]$	$-\left[m_2-\frac{1}{2}q(l_1+l_2)l_2\right]$	m_2	m_2	$-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)$	$-\left(m_2-\frac{1}{2}ql_1l_2\right)$
①+②+③合龙完成	m_1	0	m_2	0	m_1	0

量;二是合龙温度影响的调整量。

若主梁在合龙阶段的无应力参数发生变化,如合龙后结构体系的变化(例如塔梁临时约束的释放),可能导致结构内部受力状态及线形特征发生变化,其测算实体模型如图2所示。工程施工误差导致的主梁内力偏差,发生在塔梁临时约束解除之后。相应的内力变化如式5所示:

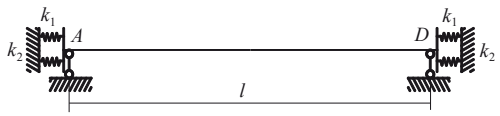


图2 塔梁临时固结解除的计算模型

Figure 2 Calculation model of temporary consolidation release of tower beams

$$M=-\mu EI\chi,F_N=-\eta EA\varepsilon_0 \tag{5}$$

式中:μ为M的修正因子;η为F_N的修正因子;χ为由线形偏差引起的曲率变化;ε_0为由梁长误差所导致的轴向应变;E为弹性模量;I为惯性矩;A为截面面积。

由此可得:

$$\mu=\frac{1}{1+EI/lk_1},\eta=\frac{1}{1+2EA/lk_2} \tag{6}$$

当合龙温度发生变化时,χ,ε_0可表示为:

$$\chi=-\frac{\alpha\Delta t}{h},\varepsilon_0=\alpha t_0 \tag{7}$$

式中:α为主梁的温度线性膨胀系数;Δt为主梁顶底板之间的温差;h为梁高;t_0为主梁形心处的温度变化。

2 合龙段制造尺寸的精确计算方法

简支合龙法要求合龙段尽量在工厂制造完成,现场不再进行梁段的切割和制造,这样一方面可以减少现场的施工工作量,另一方面可提高梁段尺寸的制造精度。但这对施工控制提出了更高的要求,也增大了技术难度,因此要求施工控制单位尽早地提供梁段尺寸制造指令。合龙段的制造尺寸应包含两个方面的修正量:合龙前悬臂拼装的施工误差和合龙温度与预设差异导致的温度修正量(该修正量可分成两部分,在梁段制造尺寸中仅计入部分值)。即合龙段制造尺寸=无应力理论尺寸+悬拼误差修正量+部分合龙温差修正量。

在合龙前的几个主梁节段施工时,主要通过多次测量精确的几何状态,然后利用回归分析识别出当前状态下主梁安装线形下尺寸误差。

2.1 合龙段的回归算法

实测数据的回归分析可采用如下方法:

$$\tilde{y}_s=at_s+b \tag{8}$$

式中:$\tilde{y}_s$为设计基准温度下纵桥向悬臂前端的实测计算坐标;t_s为设计标准温度;a、b为回归系数。

悬臂主梁误差值为:

$$\Delta y=\tilde{y}_s-y_s \tag{9}$$

式中:Δy为设计基准温度下悬臂前端测点坐标误差值;y_s为设计基准温度下桥纵桥向悬臂前端的理论计算坐标。

为了不影响施工进度,上述测试工作通常在钢箱梁精匹配后的焊接期间进行。上述预计合龙温度下的测点坐标误差值实际上是悬拼误差修正量。为了准确预计此修正量,可进行多次24 h的观测,并进行回归分析。此外,在实际操作时,如果合龙段两侧施工进度不一致,可先将合龙段一侧的修正切割量求出并提前切割。

2.2 合龙段长度的确定

图3展示了中跨合龙口两侧测点的具体布置情况。

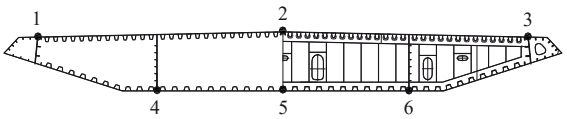


图3 钢箱梁制造时的测点布置图

Figure 3 Layout of measurement points for steel box beam during manufacturing

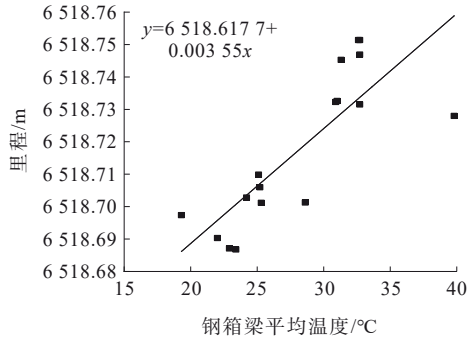
2.3 24 h温度影响分析

以嘉鱼长江大桥为依托工程,该桥中跨的梁段编号由北到南为:北侧NZ1~NZ30;合龙段ZH1;南侧SZ30~SZ1。在24 h的温度观测期间,采用两台全站仪同步测量北岸与南岸钢箱梁T2的里程位置,每隔2 h记录一次数据,得出不同温度下北岸NZ28处T2与南岸SZ29处T2之间的距离变化,结果如图4所示。

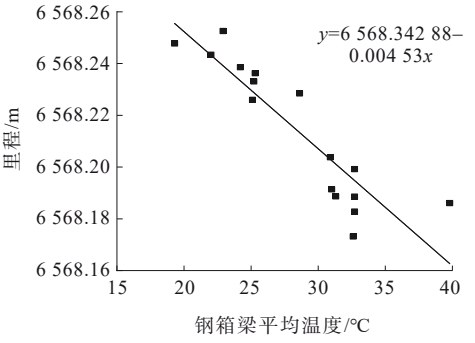
根据图4所示,当设计基准温度为15 ℃时,可利用图上提供的拟合公式计算出NZ28主梁T2与SZ29主梁T2之间的距离。扣除NZ29、NZ30及SZ30的长度后,确定合龙口的切割长度为-64.2 mm。

2.4 合龙段的切割

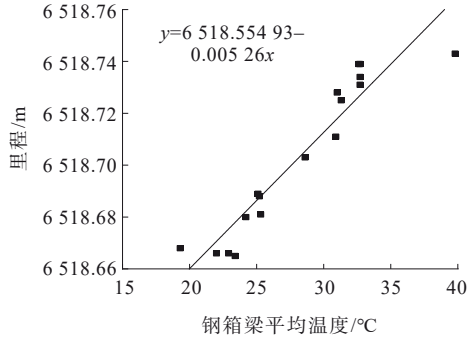
ZH1合龙梁段是在设计尺寸基础上,两边各预留20 cm的加工余量。在正式吊装该梁段之前,一旦接收到关于ZH1梁段生产制造的指令,箱梁制造厂



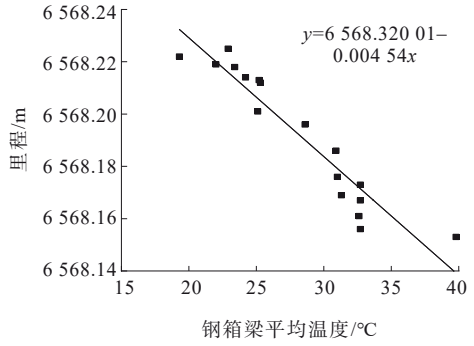
（a）北岸 NZ28 号梁 T2 里程-温度变化图



（b）北岸 NZ29 号梁 T2 里程-温度变化



（c）南岸 SZ28 号梁 T2 里程-温度变化



（d）南岸 SZ29 号梁 T2 里程-温度变化

图 4　合龙段距离预测

Figure 4　Distance prediction of closure segment

家将在工厂根据已安装梁段的施工误差，在消除温度影响后精确切割合龙段。

3　智能顶推-简支合龙法

与传统合龙方式相比，简支合龙法在合龙段质量较小的情况下更便捷。确定使用简支合龙法后，合龙方法体系中的另一个关注点是对牵引系统的选择。嘉鱼长江大桥首次采用智能顶推系统取代传统牵引系统，实现了智能顶推与简支合龙法的有效结合。

3.1　现有牵引方式分析

现有牵引方式主要为钢丝绳张拉和千斤顶顶推，现有技术存在的不足如下：

（1）对温度变化的敏感性强。无法自动补偿因温度变化产生的位移变化，因此只能在温度变化较小的夜间进行施工。

（2）需要外加大量施工工具及辅助构造。需提供许多临时固结，消耗资金巨大，影响桥梁的结构，同时使用完后还需要拆除，容易对结构产生二次伤害。

（3）无法双向调整，只能提供单向力。若有双向控制要求，实现难度很大。

（4）合龙精度低，同步性差。整个过程控制精度依赖于人工测量数据来施加作用力，合龙精度及同步性较差。

3.2　智能顶推系统及其合龙控制原理

针对现有合龙施工过程中存在的问题，提出一种主梁合龙用的智能顶推阻尼系统，如图 5 所示。智能顶推阻尼系统适用于大跨度、大位移、大吨位桥梁的合龙。它既有普通阻尼器的减震抗震功能，又有普通千斤顶的顶推功能，同时具备钢丝绳张拉以及千斤顶顶推方式所不具备的锁紧功能，可实现全天候智能合龙。

如图 5(a)所示，顶推阻尼器本体主要包括阻尼缸筒、顶推缸筒、活塞杆、活塞、耳板等。如图 5(b)所示的电控系统在合龙口处配有两个激光传感器，在阻尼器上配有位移传感器及压力传感器，并配有触摸屏显示器，可实时显示各阻尼器位置及压力等参数。如图 5(c)所示，液压动力系统包括泵站总成、油箱、控制阀、管路、温度传感器、压力传感器等。对每一只阻尼器，均配备进口高精度控制阀用于调节伸缩速度。

在合龙过程中，全天候智能顶推系统不断采集合龙口处两个激光传感器的距离信号，从而调整阻尼器的位移方向，调节两侧运行速度，进而使两侧的距离逐渐一致，保持在 2 mm 范围内。系统同时具

（a）顶推阻尼器本体

（b）电控系统

（c）液压动力系统

图5 智能顶推阻尼系统

Figure 5 Intelligent incremental launching damping system

有纠偏功能，可以调整合龙口两侧的间距一致。当达到设定位置时，系统停止运动并锁定。同时，在温度变化的情况下，系统根据检测的合龙口间距的变化自动补偿温度影响下的合龙口距离，保证合龙口距离不受温度变化的影响，真正满足全天候合龙需求。

4 工程应用

本文提出的智能顶推-简支合龙法已成功应用于嘉鱼长江大桥的合龙施工中，匹配精度达到毫米级，且在中国首次使用新型的智能顶推合龙系统，实现真正意义上的全天候合龙。

4.1 嘉鱼长江大桥及其合龙实施

嘉鱼长江大桥是一座主跨达920 m的双塔七跨连续非对称混合梁斜拉桥，其跨度配置为(70+85+72+73) m+920 m+(330+100)m。北侧边跨采用预应力混凝土箱梁，配置了3个辅助墩和1个分界墩，而中跨与南侧边跨则采用钢箱梁，南侧边跨设有1个辅助墩和1个分界墩，桥墩号分别为6#～13#。混凝土箱梁的总体长度为312.5 m，钢箱梁的总体长度为1 337.5 m。斜拉索选用高强度平行钢丝材质，采取双空间索面布置，其中，钢箱梁节段的标准索距设定为15 m，混凝土梁节段的索距则为8.5 m或9.0 m，最长的斜拉索长度达到494.635 m，最大索重为44 850 kg。该结构体系采用了纵向约束的半漂浮式设计，在索塔下横梁部位配置了竖向支撑及横向抗风支撑，辅助墩顶部安装了竖向支撑，而交界墩顶部则设置了具备横向限位功能的竖向支撑，桥型布置见图6。

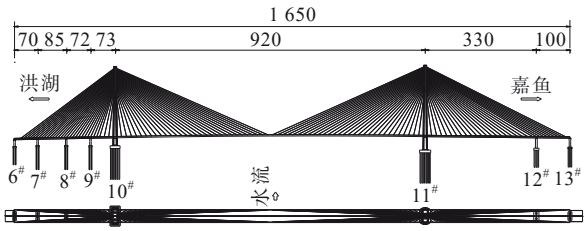


图6 嘉鱼长江大桥桥型布置(单位：m)

Figure 6 Layout of Jiayu Yangtze River Bridge (unit: m)

嘉鱼长江大桥主梁合龙采用简支合龙法(图7)，主桥纵向临时约束的解除和合龙口的调整采用全天候智能顶推系统，简化构造方便施工(图8)。

图7 嘉鱼长江大桥白天合龙现场

Figure 7 Daytime closure site of Jiayu Yangtze River Bridge

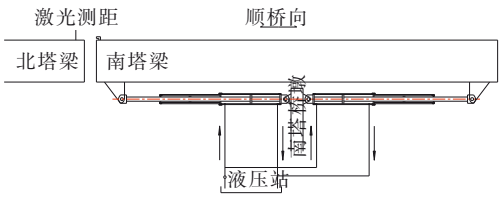
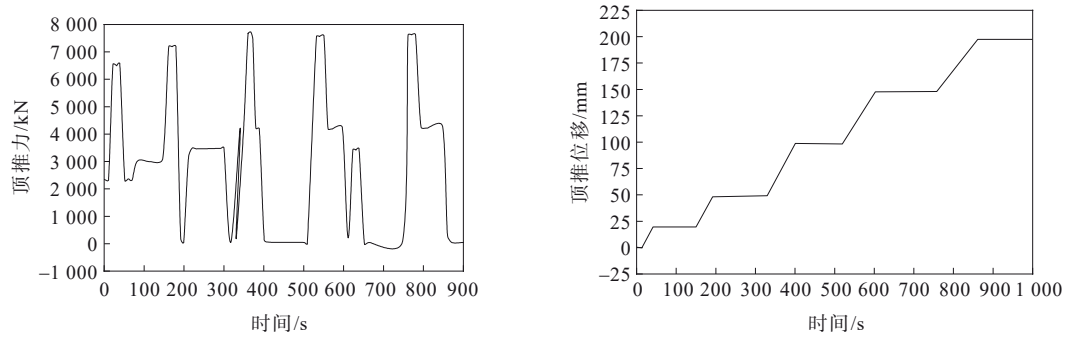


图8 嘉鱼长江大桥全天候智能顶推系统示意

Figure 8 All-weather intelligent incremental launching system of Jiayu Yangtze River Bridge

在合龙前实施了预顶推模拟，在合龙当天08:30开始进行合龙顶推操作，14:00开始焊接码板，20:00开始卸载并转换阻尼功能。整个合龙过程圆满完成。实现了白天顶推合龙操作。嘉鱼长江大桥合龙实施过程相关参数曲线如图9所示。



（a）顶推力与时间关系　　（b）顶推位移与时间关系

图9　嘉鱼长江大桥合龙实施过程相关参数曲线

Figure 9　Parameter curves related to implementation process of Jiayu Yangtze River Bridge closure

4.2　合龙段焊缝结果分析

采用本文方法成功控制了中跨合龙段的施工，其施工过程中焊缝分布情况见表3。

表3　合龙段施工过程中焊缝分布

Table 3　Distribution of welds during construction of closure segment　　mm

工况	位置	上游		下游	
		北侧焊缝	南侧焊缝	北侧焊缝	南侧焊缝
合龙段南、北两侧匹配后	顶板	6	6	12	8
	底板	12	14	15	15

由表3可知：合龙段两侧焊缝的宽度为6～15 mm，是非常理想的，完全满足焊接单位的工艺要求。

4.3　结构受力与变形分析

全桥的结构性合龙标志为中跨合龙段的施工完成，此时，塔梁之间的所有临时约束均已被解除，南塔（2台）和北塔（1台）桥面吊机已经拆除。嘉鱼长江大桥合龙并调索结束后，对线形、索力进行了通测。在索力调整完成后，对南北塔的塔顶偏位进行了测试，测试结果如表4和图10、11所示。

由表4测试数据来看，由于塔偏测试时受到温度及日照的影响，南北塔塔顶偏位实测值与理论塔偏值存在一定偏差，但基本也是可控的，达到了预期效果。

结合测试数据，主梁线形平顺，整体标高略高于理论标高，这对后期活载施加相对有利，索力百分比误差均在±5%之内，满足索力控制要求。

中跨主梁实测轴线最大偏差为+0.024 m（SZ26钢箱梁），钢箱梁实测标高值与理论值最大偏差为−0.074 m（NZ29钢箱梁）。尽管测试时考虑规避不稳定温度影响，但仍然存在高温因素影响。综合测试数据来看，南塔全桥主梁实测线形与理论线形基本一致，合龙控制效果完美。

5　结论

本文提出了简支合龙法对成桥内力的调控理论，建立了合龙段制造尺寸的精确计算方法，分析了新型智能顶推-简支合龙法的应用案例。得出以下结论：

（1）构建了桥梁自适应无应力构形控制法的控制模型和斜拉桥主梁简支合龙的力学模型，对斜拉桥合龙全过程进行了详细的模拟与分析，并采用这些关键结论指导斜拉桥的合龙施工。

（2）构建了一种用于计算简支合龙法中合龙段的制造尺寸的方法。此外，还详细推导了合龙段悬拼误差的修正量以及由合龙温差引起的修正量，为合龙段的计算提供理论依据，这是简支合龙法的关键技术。

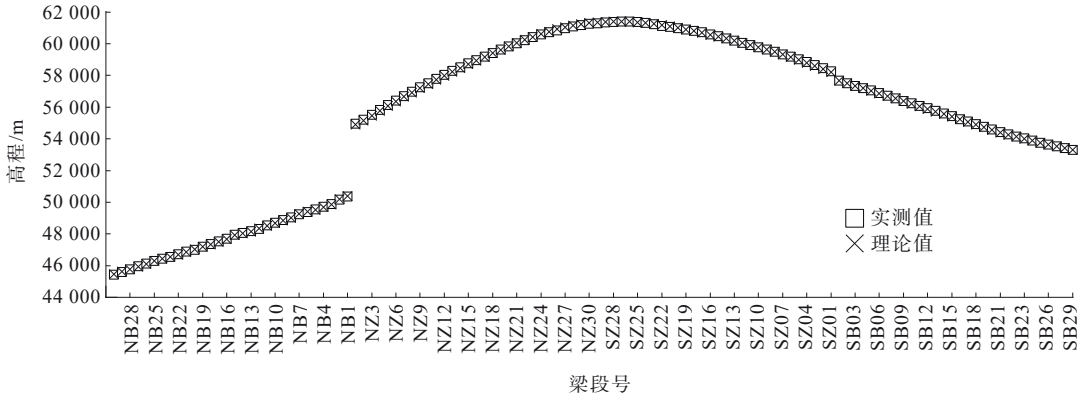
（3）分析了智能顶推-简支合龙法的应用情况。智能顶推-简支合龙法能够对斜拉桥主梁合龙时的

表4　南北索塔塔顶偏位控制点监测数据

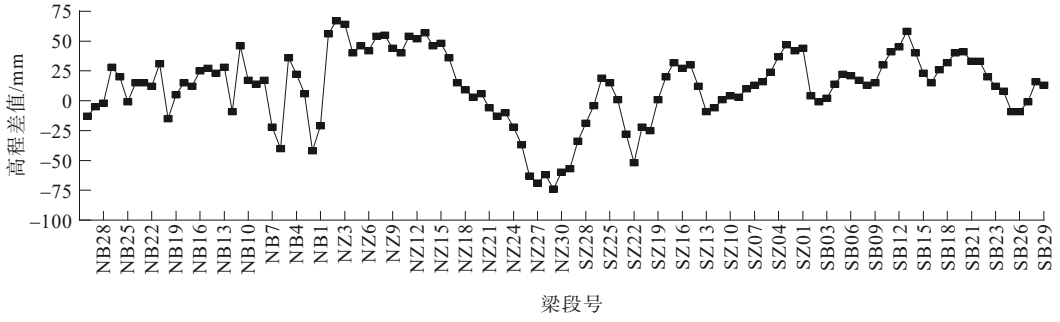
Table 4　Control point monitoring data of top offset of north and south towers

位置	工况	塔顶偏位实测值/mm	塔顶偏位理论值/mm	差值/mm	测试时间及天气温度
南塔塔顶	索力调整完成	197 014 944	197 014 967	−23	2019.06.26.19:00 多云 33 ℃
北塔塔顶		1 960 860 577	1 960 860 504	+73	2019.06.26.08:30 阴 29 ℃

注：“−”表示往小里程方向偏；“+”表示往大里程方向偏。



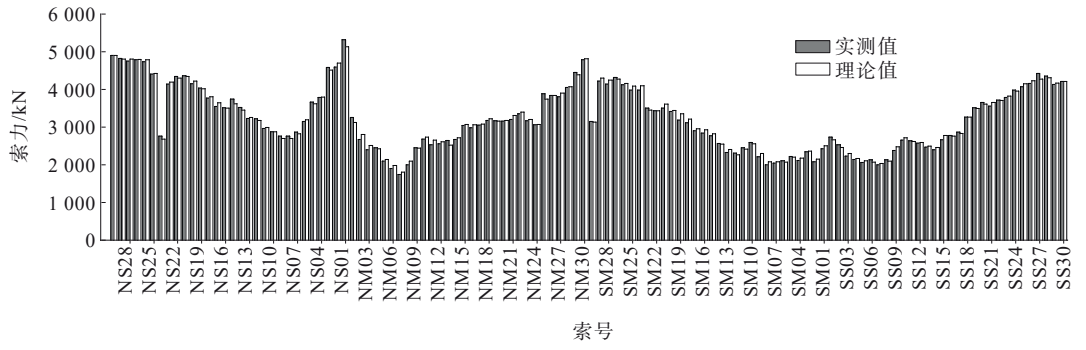
（a）全桥调索完成后主梁线形比较



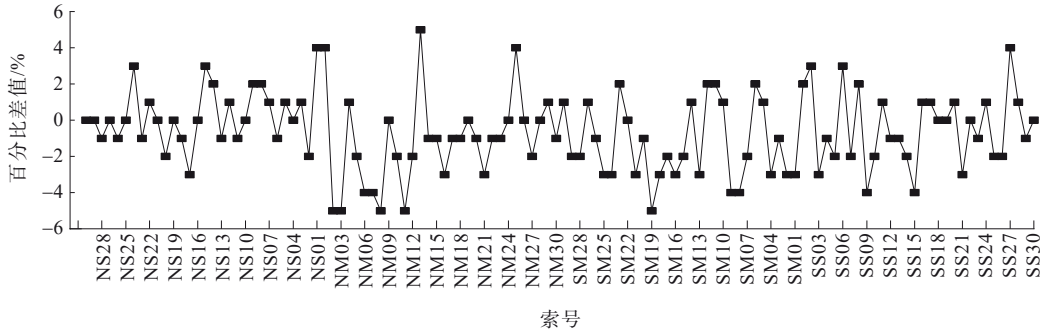
（b）全桥调索完成后主梁高程误差

图10 全桥调索完成后主梁几何线形

Figure 10 Geometric alignment of main girder after cable adjustment of whole bridge



（a）全桥调索完成后索力比较直方图



（b）全桥调索完成后索力百分误差

图11 全桥调索完成后索力比较

Figure 11 Comparison of cable forces after cable adjustment of whole bridge

各类误差进行合理调整,确保大跨度斜拉桥的高精度合龙。同时该技术在智能化顶推与简化的合龙工程施工流程(如省去劲性骨架及临时压重等措施)中,极大地便利了斜拉桥主梁的合龙作业,且合龙控制的成效较为显著。

参考文献:

References:

[1] 李平利.大跨度斜拉桥施工阶段几何非线性静力分析[D].成都:西南交通大学,2004.
LI Pingli. Static nonlinear analysis of long-span cable-stayed bridges in construct stage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2004.

[2] 钟继卫.斜拉桥合龙后索力最优调整的实现[J].世界桥梁,2002,30(4):43-44.
ZHONG Jiwei. Realization of optimal adjustment of cable force after cable-stayed bridge closure[J]. Foreign Bridges, 2002,30(4):43-44.

[3] 周外男,王令侠.芜湖长江公铁大桥主桥钢梁架设方案[J].桥梁建设,2018,48(1):1-6.
ZHOU Wainan, WANG Lingxia. Erection scheme for steel girder of main bridge of Wuhu Changjiang River Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction,2018,48(1):1-6.

[4] 石建华,朱运河,李卫华,等.武汉天兴洲公铁两用长江大桥斜拉桥施工监控[J].世界桥梁,2010,38(2):24-28.
SHI Jianhua, ZHU Yunhe, LI Weihua, et al. Construction monitoring and control of cable-stayed bridge of Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-Cum-Road Bridge [J]. World Bridges,2010,38(2):24-28.

[5] 涂光亚,颜东煌,陈常松,等.荆岳长江公路大桥中跨合龙施工技术[J].桥梁建设,2013,43(4):105-109.
TU Guangya, YAN Donghuang, CHEN Changsong, et al. Construction techniques for closure of central span of Jingyue Changjiang River Highway Bridge[J]. Bridge Construction,2013,43(4):105-109.

[6] 李琦,齐东春,杨虎,等.基于联合静动力修正的混凝土斜拉桥主梁挠度变化规律研究[J].中外公路,2024,44(1):111-118.
LI Qi, QI Dongchun, YANG Hu, et al. Deflection variation rule of main girder for a concrete cable-stayed bridge based on combined static and dynamic modification[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(1):111-118.

[7] 孟繁增.多塔斜拉桥合龙方法及其影响分析[D].成都:西南交通大学,2012.
MENG Fanzeng. Closure method of multi-tower cable-stayed bridge and its influence analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2012.

[8] 陈孔亮,叶健新,徐郁峰,等.独塔混合梁斜拉桥参数灵敏度分析[J].中外公路,2024,44(2):182-190.
CHEN Kongliang, YE Jianxin, XU Yufeng, et al. Parameter sensitivity analysis of single-tower cable-stayed bridge with mixed beam[J]. Journal of China and Foreign Highway,2024,44(2):182-190.

[9] 刘岸清,燕腾飞,郑鹏举,等.全漂浮空间框架塔斜拉桥参数敏感性分析[J].中外公路,2024,44(6):168-175.
LIU Anqing, YAN Tengfei, ZHENG Pengju, et al. Sensitivity analysis of parameters of cable-stayed bridges with full floating spatial frame[J]. Journal of China and Foreign Highway,2024,44(6):168-175.

[10] 曾余清.单索面斜拉桥合龙施工与控制技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
ZENG Yuqing. Study on closure construction and control technology of single cable plane cable-stayed bridge[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2013.

[11] 李伟.混合梁斜拉桥合龙控制及索力优化分析[D].武汉:武汉理工大学,2018.
LI Wei. Closure control and cable force optimization analysis of hybrid beam cable-stayed bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2018.

[12] 宋智丰.大跨度连续钢桁梁斜拉桥施工力学分析[D].合肥:合肥工业大学,2020.
SONG Zhifeng. Construction mechanics analysis of long-span continuous steel truss girder cable-stayed bridge[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2020.

[13] 闫昕,黄森炎,齐铁东,等.基于施工过程特征数据的桥梁结构初始状态评估方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(12):40-42.
YAN Xin, HUANG Senyan, QI Tiedong, et al. Research on initial state evaluation method of bridge structure based on characteristic data of construction process[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition),2012,8(12):40-42.

[14] 李乔,杨兴旺,卜一之.特大跨度斜拉桥变形的几何非线性效应分析[J].西南交通大学学报,2007,42(2):133-137.
LI Qiao, YANG Xingwang, BU Yizhi. Effect of geometric nonlinearity on deformation of extra-long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007,42(2):133-137.

[15] 何畏,唐亮,强士中,等.大跨度焊接钢箱梁斜拉桥施工控制技术研究及应用[J].桥梁建设,2002,32(5):14-18.
HE Wei, TANG Liang, QIANG Shizhong, et al. Research and application of the construction control technology in large span cable-stayed bridges with welded steel box girder[J]. Bridge Construction,2002,32(5):14-18.

[16] 李治仑,陈常松,曾国良.大跨度混合梁斜拉桥施工过程温度影响分析[J].中外公路,2021,41(5):164-168.
LI Zhilun, CHEN Changsong, ZENG Guoliang. Analysis on influence of temperature on construction processes of long-span cable-stayed bridge with composite girders[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(5):164-168.

[17] 李乔,卜一之,张清华.基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J].土木工程学报,2009,42(7):69-77.
LI Qiao, BU Yizhi, ZHANG Qinghua. Whole-procedure adaptive construction control system based on geometry control method[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7):69-77.

(下转第246页)