

# 异形钢塔合龙精确配切量计算方法及应用

王石磊<sup>1</sup>, 柯在田<sup>1</sup>, 高岩<sup>1</sup>, 李永生<sup>2</sup>, 杨冰<sup>3</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 2. 北京市公联公路联络线有限责任公司, 北京 100161;

3. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 提出了考虑已成合龙口架设偏差的空间扭曲型合龙段精确配切量计算方法。以合龙口特征点至合龙段端口棱线距离构造目标函数, 以合龙段满足架设偏差为约束条件, 基于内点罚函数法驱动优化模型, 精确计算合龙段各棱线配切量。通过连续72 h温度场与变形的关联分析, 确定合龙时机; 基于环境温度与温度场关联分析及天气预报, 考虑温度影响, 对配切量进行修正。最后, 通过合龙口及合龙段多特征点坐标采集, 计算合龙段配切量, 实现了钢塔零附加应力精确自然合龙。

**关键词:** 异形钢塔; 合龙; 配切量; 姿态优化; 温度场; 变形

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

deformation with 72 h measured data. The temperature influence correction method of the cutting length was proposed based on weather forecast and the correlation analysis on temperature field and ambient temperature. The steel pylon closure with zero additional stress and high precise came into fact due to closure segment cutting calculation method based on the coordinates of multi-feature points.

**Key words:** special-shaped steel pylon; closure control; cutting length; posture optimization; temperature field; deformation

## High Precision Cutting Length Calculation Method and Application of Special-shaped Steel Pylon with Closure Segment

WANG Shilei<sup>1</sup>, KE Zaitian<sup>1</sup>, GAO Yan<sup>1</sup>, LI Yongsheng<sup>2</sup>, YANG Bing<sup>3</sup>

(1. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Beijing Gonglian Highway Connection Line Company Limited, Beijing 100161, China; 3. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** An accurate cutting length calculation method for space-warped closure segment which considers the erection deviation of closure port was proposed. To obtain the optimization model driven by the internal penalty function method and calculate the ridge line cutting length of closure segment accurately, an objective function with distance between the characteristic points of closure port and the ridge lines of closure segment was constructed, and the constraints of the erection deviation of the closure segment were satisfied. The closure time was determined by the correlation analysis of the temperature field and

随着我国城市桥梁建设规模的与日俱增, 桥梁已被纳入城市建筑的构成元素。除满足基本的交通功能外, 桥梁还被赋予更多的象征功能和文化内涵, 美学需求更加突出, 因此具有复杂空间造型美学感染力的异形钢塔斜拉桥受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。桥梁钢塔架设可分为整体竖转法和逐节段架设法<sup>[4-6]</sup>。整体竖转法多适用于单柱式或轴线位于同一平面的双柱式中小型钢塔, 对于大型或空间造型突出的钢塔一般采用逐节段架设法。采用逐节段架设的双肢钢塔一般在塔顶设置合龙段, 受变形行为难以精准模拟、施工误差等因素影响, 合龙口成形时几何形态与目标状态存在一定偏差, 加之两侧合龙口距各结构体系温度位移零点位置较远, 合龙口形态受环境影响较大。合龙段一般为厂内预制构件, 姿态调整有限, 焊接工艺要求严格, 使得合龙成为钢塔架设过程中质量控制的重点与难点。钢结构桥梁合龙控制主要有合龙段精准配切和辅助工程措施两种方法。合龙段精准配切是指合龙前在特定温度环境下测量合龙口姿态, 考虑合龙时机的温度影响后对合龙段进行配切的方法<sup>[7-9]</sup>。由于合龙时温度难以精准预测,

收稿日期: 2019-05-29

第一作者: 王石磊(1985—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁与隧道工程检测技术。

E-mail: thilei@qq.com



论文  
拓展  
介绍

部分工程还考虑辅助工程措施,主要包括预留强制顶推的主动措施以适应合龙口姿态变换的不定性<sup>[10-12]</sup>和在双肢间设置临时横撑锁定合龙口姿态的被动措施<sup>[13]</sup>。上述辅助措施均为现场架设增加了工序,而且会在结构内产生附加内力,导致合龙后结构状态偏离设计目标。传统的钢结构合龙具有合龙口平行、合龙段为规则几何体的特点,合龙口的偏差主要通过合龙段沿长度方向进行一维配切予以调整,配切量易于计算。本研究中背景钢塔合龙口位于距地面120 m高空处,对配切精确性要求高,环境温度及温度场对合龙口空间姿态影响复杂,合龙段为空间扭曲造型和合龙口存在空间夹角的特点为合龙段

精确配切量计算带来较大困难。因此,提出了考虑已成合龙口架设偏差的空间扭曲型合龙段精确配切量计算方法。

## 1 工程背景

### 1.1 桥梁概况

北京长安街西延跨永定河特大桥主桥采用五跨高低双塔斜拉刚构组合体系,全长639 m,主跨280 m,为世界已建最高拱形钢塔斜拉桥,桥梁中线与河道中线斜交角为57.40°,为适应河道水流方向,塔柱双肢非一致倾斜,形成“迈步”效果,桥梁造型如图1所示。



图1 永定河特大桥效果图

Fig. 1 General view of Yongding River Bridge

### 1.2 钢塔特点

该桥钢索塔为双肢非一致倾斜、空间不对称扭转的变截面全焊接钢箱拱,塔高124 m,南北塔肢倾角分别为71.8°和62.0°,塔根顺桥向距离为25.1 m。整塔质量约为9 850 t,双肢各划分15个节段(N1—N15、S1—S15),含合龙段整塔共计31个节段。各节段在厂内组拼焊接后现场采用辅助支架法吊装架设,钢塔自重主要由塔身强度承担,辅助支架主要为索塔定位几何姿态调整及焊接操作提供支撑平台。高塔节段划分及支架布局如图2所示。

### 1.3 合龙段特点

合龙段与前续南北肢第15节段连接,呈空间扭曲造型,曲率变化突出,空间姿态如图3所示。图3中,浅色区段为合龙段。合龙段的质量约为100 t,左右(北肢和南肢)侧合龙口端面空间夹角为104.61°,与水平面空间夹角分别约为44.72°、42.56°。合龙段塔顶架设平面允许偏差为31 mm( $H/4\ 000$ ,  $H$ 为塔高),允许高差为20 mm。合龙段采用大型吊机进行吊装,柔性吊缆主动调整合龙段姿态的能力有限。

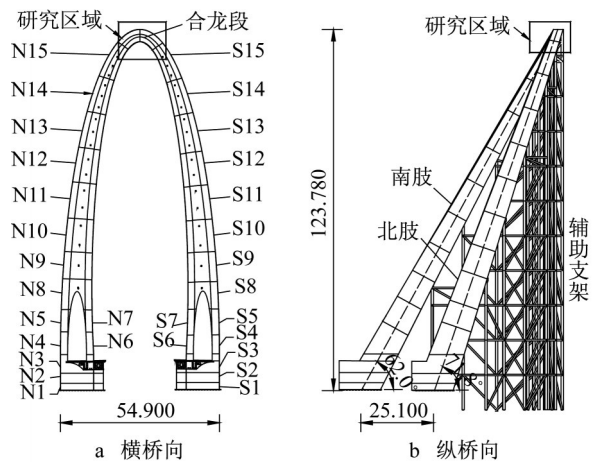


图2 钢塔多视图(单位:m)

Fig. 2 Different views of steel pylon(unit:m)

## 2 合龙段精确配切量计算方法

### 2.1 几何测量

对合龙口及合龙段几何形态测量是开展合龙段精确配切量计算的依据。背景钢塔几何测量特征点如图4所示。图4及下文中,下标“L”表示左侧,下标“R”表示右侧,下标“H”表示横隔板,下标“O”表示

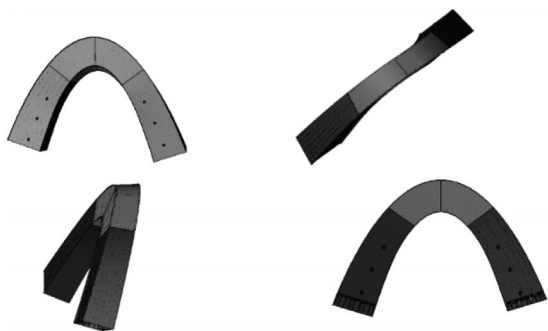


图3 钢塔合龙段多视图

Fig. 3 Different views of closure segment of steel pylon

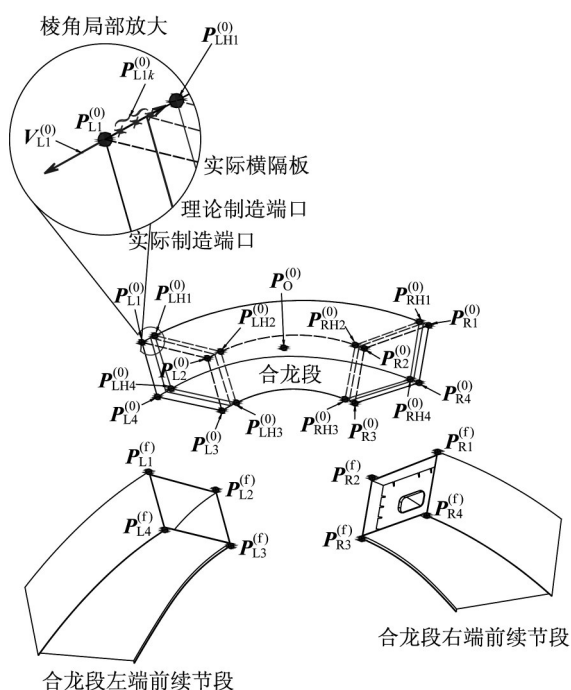


图4 几何形态测量点规划

Fig. 4 Arrangement of geometry feature points

合龙段架设偏差考核位置,下标“ $i$ ”表示左右侧棱线编号,下标“ $k$ ”表示棱线加密测点编号,上标“ $f$ ”表示处于固定状态的合龙口,上标“ $0$ ”表示合龙段初定位位置。合龙口几何形态主要由表征合龙段架设偏差局部刚度较大的棱线角点  $P_{L(R)i}^{(f)}$  组成,对于合龙段,需对与  $P_{L(R)i}^{(f)}$  匹配的点  $P_{L(R)i}^{(0)}$  进行测量。合龙段在制造过程中沿端口各棱线切线方向预留了配切余量。为获取合龙段实际几何状态,需沿端口局部棱线布设数个点  $P_{L(R)ik}^{(0)}$ 。基于  $P_{L(R)ik}^{(0)}$  可对棱线空间拟合,获取端口局部棱线单位方向向量  $V_{L(R)i}^{(0)}$ 。另外,为确保合龙段自身满足架设偏差,需构建一个表征合龙段架设位置的考核指标,使得架设完毕后塔顶  $P_0^{(0)}$  在架设偏差允许范围内。 $P_0^{(0)}$  是人为虚拟的空间位置,

需基于含制造偏差节段最优架设姿态计算。为此,需对表征节段制造偏差的特征点进行测量。由于  $P_{L(R)i}^{(0)}$  已含配切余量,无法表征制造偏差,因此选取端口第一道横隔板与壁板相交位置  $P_{L(R)H1}^{(0)}$  进行测量,计算含制造偏差的  $P_0^{(0)}$ 。

## 2.2 计算模型及步骤

考虑制造偏差的异形合龙段精确配切量计算可视为在合龙段自身满足架设偏差的前提下寻找一种空间最优姿态使得合龙段与两端合龙口壁板错边量最小,该问题可归结为数学优化问题,目标函数为合龙口特征点至合龙段对应棱线的距离之和,约束条件为表征合龙段架设姿态的特征点处于架设误差允许范围之内。模型标准表达式<sup>[14]</sup>如下所示:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x)$$

$$\text{s.t. } g_j(x) \geq 0, j=1, 2, \dots, t \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; $g_j(x)$ 为约束函数; $x$ 为决策变量; $t$ 为约束函数个数。目标函数与合龙段姿态变换参数相关,计算式如下所示:

$$\min f(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z) = \sum D_i \quad (2)$$

式中: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为待求平移参数; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为待求旋转参数; $D_i$ 为合龙口特征点至合龙段对应棱线的距离。

### 2.2.1 合龙段局部棱线拟合

获取合龙段局部棱线方程是计算合龙口特征点至合龙段对应棱线距离  $D_i$  的前提,考虑到配切余量一般为 50~200 mm,忽略局部曲率变化,可认为各棱线为一空间直线。基于合龙段几何测量的有限空间点  $P_{L(R)ik}^{(0)}$ ,采用最小二乘法正规方程进行拟合<sup>[15]</sup>,求得各棱线的空间直线方程及单位方向向量  $V_{L(R)i}^{(0)} = (a_i^{(0)}, b_i^{(0)}, c_i^{(0)})$ 。

### 2.2.2 合龙段初定位及姿态变换方程

合龙段几何形态在厂内临时坐标系中进行采集,在开始优化计算前,应对合龙段在桥梁控制坐标系内进行初定位,初定位计算方法为基于几何测量控制点  $P_{L(R)H1}^{(0)}$  按含制造偏差节段最优架设姿态计算方法进行求解<sup>[16]</sup>。

在获得合龙段最优架设姿态后,即可寻求建立目标函数的显示表达式。目标函数与合龙段姿态变换参数有关,合龙段姿态变换方程<sup>[17]</sup>如下所示:

$$P_{n \times m}^{(T)} = R_{n \times n} P_{n \times m}^{(0)} + T_{n \times 1}$$

$$V_{n \times m}^{(T)} = R_{n \times n} V_{n \times m}^{(0)} \quad (3)$$

式中: $P^{(0)}$ 为最优架设姿态特征点坐标矩阵; $P^{(T)}$ 为变换后特征点坐标矩阵; $V^{(0)}$ 为最优架设姿态棱线

单位方向向量;  $V^{(T)}$  为变换后棱线单位方向向量;  $R$  为空间旋转矩阵;  $T$  为坐标平移向量;  $n$  为维度,  $n=3$ ;  $m$  为特征点数。

在姿态变换前合龙段已完成初定位, 受到合龙段姿态优化需满足自身架设偏差的约束, 合龙段姿态优化的范围是有限的, 即  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  均为小角度。按照旋转矩阵  $R$  的构建方法对三角函数 Taylor 级数展开并忽略高次项<sup>[18]</sup>, 简化后  $R$  的表达式如下所示:

$$R(\omega) = R(\omega_z)R(\omega_y)R(\omega_x) \approx \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$T$  与合龙段刚性平移有关, 计算式如下所示:

$$T = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T \quad (5)$$

### 2.2.3 目标及约束函数构建

每次姿态优化伴随合龙段特征点坐标更新, 要求解已成合龙口特征点至当前姿态合龙段对应棱线的距离  $D_i$ 。由向量叉乘物理意义可知, 合龙口  $P_{L(R)i}^{(f)}$  至  $i$  棱线的距离计算式如下所示:

$$D_i = \frac{|(P_{L(R)i}^{(f)} - P_{L(R)i}^{(o)}) \times V_{L(R)i}^{(o)}|}{|V_{L(R)i}^{(o)}|}, i = 1, \dots, m \quad (6)$$

$P_{L(R)i}^{(f)}$  的坐标为  $(x_i^{(f)}, y_i^{(f)}, z_i^{(f)})$ ,  $P_{L(R)i}^{(o)}$  的坐标为  $(x_i^{(o)}, y_i^{(o)}, z_i^{(o)})$ ,  $V_{L(R)i}^{(o)}$  的坐标为  $(a_i^{(o)}, b_i^{(o)}, c_i^{(o)})$ 。求解式(6), 即可获得距离关于优化参数的显示表达式, 如下所示:

$$D_i^2 = \frac{(S_1 S_2 - S_3 S_4)^2 + (S_2 S_5 - S_3 S_6)^2 + (S_4 S_5 - S_1 S_6)^2}{S_1^2 + S_3^2 + S_5^2} \quad (7)$$

式(7)中各参数取值如下所示:

$$\begin{cases} S_1 = b_i^{(o)} - a_i^{(o)}\omega_z + c_i^{(o)}\omega_x \\ S_2 = x_i^{(o)} - x_i^{(f)} + \Delta X + y_i^{(o)}\omega_z - z_i^{(o)}\omega_y \\ S_3 = a_i^{(o)} + b_i^{(o)}\omega_z - c_i^{(o)}\omega_y \\ S_4 = y_i^{(o)} - y_i^{(f)} + \Delta Y - x_i^{(o)}\omega_z + z_i^{(o)}\omega_x \\ S_5 = c_i^{(o)} + a_i^{(o)}\omega_y - b_i^{(o)}\omega_x \\ S_6 = z_i^{(o)} - z_i^{(f)} + \Delta Z + x_i^{(o)}\omega_y - y_i^{(o)}\omega_x \end{cases}$$

基于式(2)及(7)即可构建目标函数。

钢塔合龙段姿态优化不等式约束  $g_j(x)$  为限定合龙段空间刚性位移的上下限, 约束函数如下所示:

$$\begin{aligned} \text{s.t. } B_{\Delta X} &\leq g(\Delta X) \leq U_{\Delta X} \\ B_{\Delta Y} &\leq g(\Delta Y) \leq U_{\Delta Y} \\ B_{\Delta Z} &\leq g(\Delta Z) \leq U_{\Delta Z} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $B$  表示各方向位移允许下限;  $U$  表示各方向位移允许上限, 平面允许偏差为 31 mm, 允许高差为 20 mm。

### 2.2.4 计算算法

背景问题约束函数为一次不等式约束, 目标函数为复杂的非线性函数, 决策变量数为 6, 因此难以采用数学解析方式获取目标函数的极值。对于含有约束条件的非线性目标函数最优化问题, 罚函数法是一种广泛有效的间接求解方法, 其核心思想是将约束非线性规划转化为一系列无约束问题, 求解这一系列无约束问题即可得到约束非线性规划的解, 按罚函数构成方式不同分为外点法和内点法两种<sup>[14]</sup>。对于本研究, 由于在优化计算开始前合龙段已按最优架设姿态进行了初定位, 决策变量位于可行域内, 因此采用内点罚函数法。

### 2.2.5 配切量计算

合龙口特征点  $P_{L(R)i}^{(f)}$  至合龙段空间姿态优化后  $i$  棱线投影点为推测错边量最小的点, 求得  $P_{L(R)i}^{(f)}$  在  $i$  棱线上的垂足即可确定各棱线切割位置。已知  $P_{L(R)i}^{(T)} = (x_i^{(T)}, y_i^{(T)}, z_i^{(T)})$  为合龙段姿态优化后棱线上的起点,  $V_{L(R)i}^{(T)} = (a_i^{(T)}, b_i^{(T)}, c_i^{(T)})$  为棱线单位方向向量,  $i$  棱线上垂足点  $P_{L(R)i}^{(p)}$   $(x, y, z)$  坐标计算式如下所示:

$$\begin{cases} x = ka_i^{(T)} + x_i^{(T)} \\ y = kb_i^{(T)} + y_i^{(T)} \\ z = kc_i^{(T)} + z_i^{(T)} \end{cases}$$

其中,

$$k = a_i^{(T)}(x_i^{(f)} - x_i^{(T)}) + b_i^{(T)}(y_i^{(f)} - y_i^{(T)}) + c_i^{(T)}(z_i^{(f)} - z_i^{(T)})$$

### 2.2.6 计算步骤

合龙段配切量计算步骤如图 5 所示。

## 3 合龙口变形敏感性分析

### 3.1 理论分析

针对合龙口变形敏感性进行分析, 分别研究环境及强制顶推两种因素对合龙口姿态的影响。环境因素主要考虑整体温度及温度场的作用, 结合典型 1 d 钢塔温度场实测结果, 计算结果如表 1 所示。表 1 中,  $X$  为东西方向,  $Y$  为南北方向,  $Z$  为高程。结果表明, 强制顶推力作用下合龙口主要沿施顶力方向变形, 其他方向不敏感。100 kN 施顶力可产生 18.5 mm 的相对变形。环境因素中南北肢间整体温差变形不敏感, 温度场是主要影响因素。3 °C 南北方向温

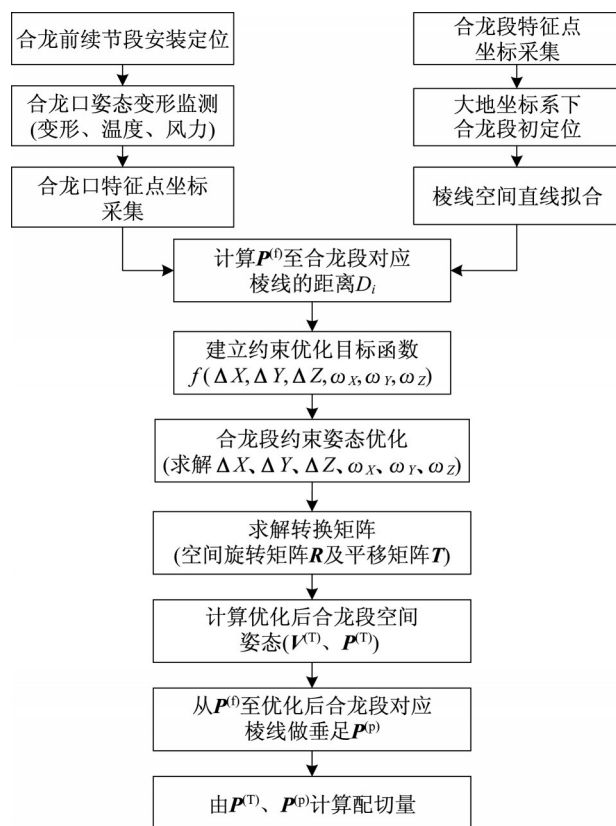


图5 合龙段配切量计算步骤

Fig. 5 Flow chart of cutting length calculation of closure segment

差合龙口南北相对变形为20.8 mm,东西相对变形为7.7 mm。南北相对变形影响两侧合龙口间距,东西相对变形影响顺桥向错位。考虑到强制顶推力的施加与解除会在结构内产生永久附加应力,因此充分利用合龙口变形受温度场作用较为敏感的特点,选择相对变形相对较小时采集合龙口姿态。以此状态作为合龙段配切的基准,选择相对变形较大时吊装,待环境温度达到合龙口姿态采集时刻时码固焊接。

3.2 实测结果

3.2.1 监测方案

为选定时机采集合龙口姿态、指导合龙段吊装,在合龙前针对合龙口姿态及钢塔温度场进行连续同步监测。合龙口姿态基于Leica Ts60全站仪

和配套监测系统监测,单侧合龙口设置3个观测点。钢塔温度采用施工监控布设的振弦式应变计(含测温元件)及采集设备自动监测,监测断面为图6a中G5、G11,每个监测断面设置10个测点,布局如图6b所示。监测时间为2019年1月4日至1月7日,周期为72 h,采集时间间隔为30 min,同时收集桥址附近气象站记录的气温、风速等资料,如图7所示。

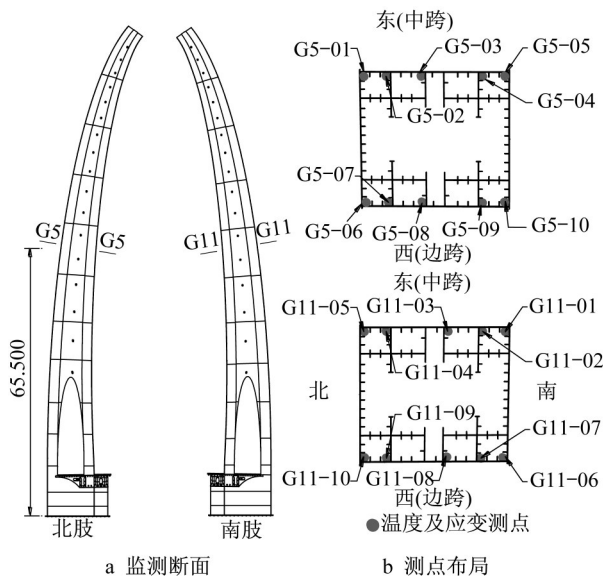


图6 钢塔监测断面及测点布局(单位: m)

Fig. 6 Monitoring sections and measured point arrangement of steel pylon(unit: m)

3.2.2 合龙口整体及相对变形

南肢合龙口变形历程如图8所示。图8中,DB表示东北角测点。监测表明,合龙口南北方向最大变形为43.5 mm,东西方向最大变形为23.9 mm,双向变形发展规律相似,每日14:00—15:00达到峰值,06:00达到谷值,20:00至次日06:00变化缓慢。

合龙口相对变形如图9所示。1月5日00:00到1月7日00:00相对变形存在周期性变化规律,但南北方向相对变形峰值相对1月4日14:00存在近20 mm 偏移。合龙口变形及结构温度场监测结果表明,合龙口最大相对变形为31 mm。对比监测结果

表1 合龙口变形敏感性分析

Tab. 1 Sensitivity analysis of closure interface deformation

项目	温差/℃	南肢变形/mm			北肢变形/mm			相对变形/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
南肢东西方向温度场	-1	-2.2	-2.3	0.6	-0.1	-0.1	0.1	-2.1	-2.2	0.5
南肢南北方向温度场	3	-7.5	-20.7	-2.3	0.2	0.1	-0.1	-7.7	-20.8	-2.2
南北肢整体温度场	3	9.4	-1.5	-0.1	10.2	3.3	0.3	-0.7	-4.8	-0.4
合龙口强制顶推力/kN	100	1.6	10.9	2.0	1.3	-7.7	1.6	0.2	18.5	0.5

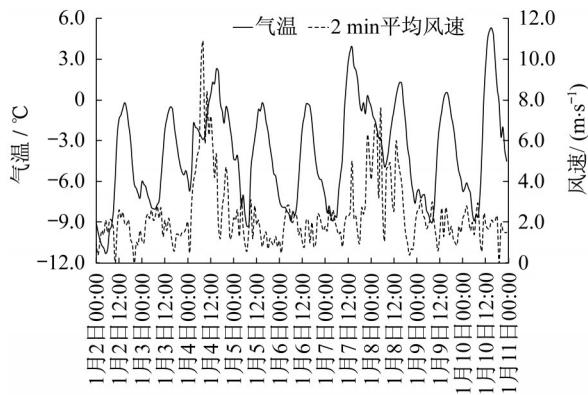


图7 桥址附近气象观测站逐小时气象观测记录  
Fig. 7 Hourly records of meteorological observation station nearest the bridge

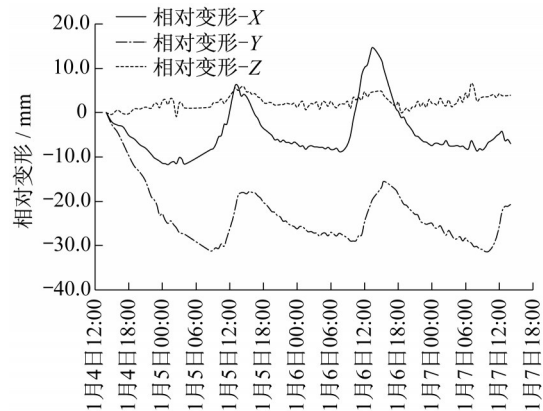


图9 合龙口相对变形历程  
Fig. 9 Relative deformation history between closure interfaces

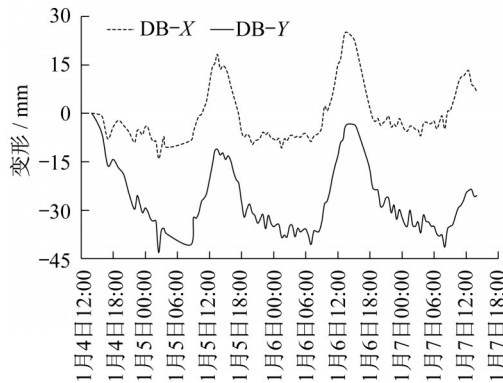


图8 南肢合龙口变形历程  
Fig. 8 Deformation history of closure interface of south branch

15:00为肢间南北场温差上行区间,合龙口相对变形变小, 14:00—15:00至20:00为肢间南北场温差下行区间,合龙口相对变形变大。

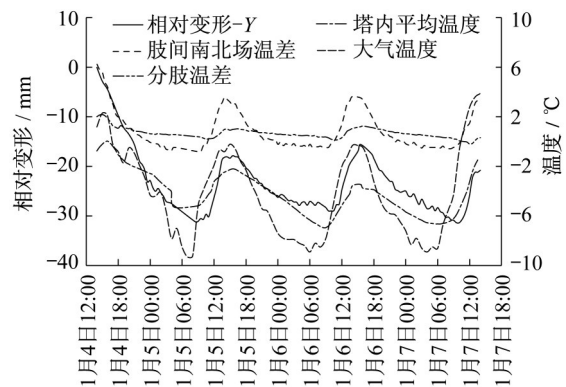


图10 温度与合龙口南北方向相对变形历程  
Fig. 10 History of temperature and relative deformation between closure interfaces in south direction

可知, 1月4日存在降温现象,即合龙口姿态采集及合龙段吊装除应考虑正常周期性变化外,还需考虑环境温度整体变化对合龙口姿态不可恢复的影响。

### 3.2.3 环境对合龙口相对变形的影响

监测周期内大气温度、塔内平均温度、肢间南北场温差、分肢温差与合龙口相对变形的时序关系如图10所示。由图10可知,因受南肢遮挡,北肢无法充分得到南向日照照射的影响,肢间南北场温差是影响相对变形的主要敏感因素。每日20:00至次日06:00肢间南北场温差基本为零,日出至14:00—

表2给出了合龙口南北方向相对变形与肢间南北场温差峰谷值的关系,上行区间单位温差影响值最大为3.3 mm,平均为3.0 mm,下行区间单位温差影响值最大为2.8 mm,平均为2.5 mm,小于上行区间单位温差影响值。

表2 肢间南北场温差与合龙口相对变形关系

Tab. 2 Relation of temperature field difference at south direction and relative deformation between closure interfaces

日期	区间	肢间南北场温差/°C		相对变形-Y/mm		影响值/(mm·°C <sup>-1</sup> )
		峰	谷	峰	谷	
1月5日	上行	3.6	-0.8	-18.3	-31.0	2.9
	下行	3.6	0.3	-18.1	-25.1	2.1
1月6日	上行	3.7	-0.5	-15.5	-28.9	3.3
	下行	3.7	0.0	-15.5	-25.9	2.8
1月7日	上行	3.3	-0.6	-20.7	-31.3	2.8

### 3.2.4 合龙时机选择及环境影响修正

监测表明,肢间南北场温差是合龙口相对变形变化的主要敏感因素,背景钢塔为围护钢箱结构,其温度场主要由太阳辐射吸收系数及照度、环境温度、表面传热系数等决定<sup>[19-21]</sup>。当天气状况相近时,如均为无(轻)风的晴天,环境温度与不同时段太阳辐

射照度是温度场的主要关联因素。图 11 给出不同监测日环境温度与肢间南北场温差的关系,规律如下所示:

(1) 单日内环境温度与肢间南北场温差近似为一复合曲线,复合曲线由上行段及下行段两部分组成,上行段上升速率大于下行段下降速率。

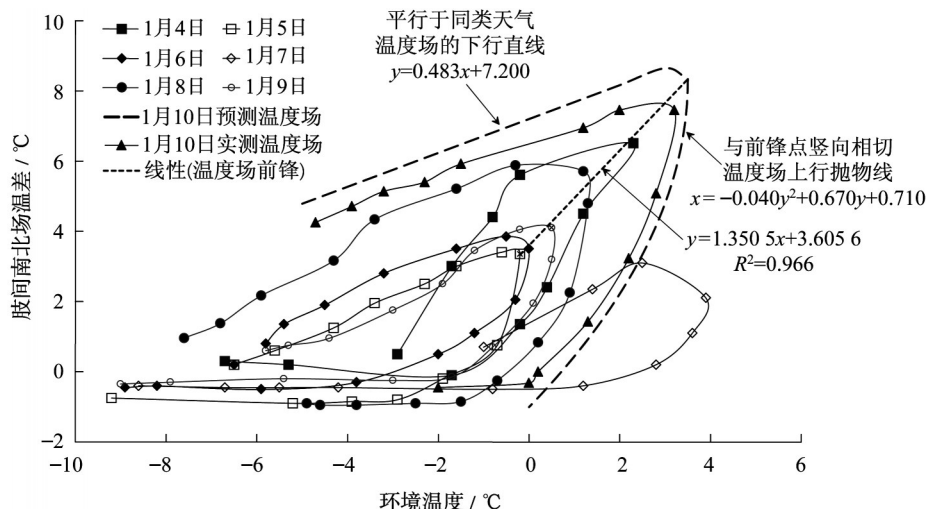


图 11 单日内肢间南北场温差与环境温度关系

Fig. 11 Relation of temperature field difference at south direction and atmosphere temperature during one day

(2) 上行段近似抛物线,下行段近似直线,上下行线交会点为复合曲线前锋点。

(3) 不同监测日上行线及下行线近似平行,前锋点随环境温度最大值近似呈线性分布。

结合天气状况研判,背景桥梁决定于1月10日吊装合龙,合龙口姿态采集时间为1月8日14:00—15:00,天气预报1月10日较1月8日最高温度上升约3℃,因此需考虑该变化对配切的影响。

基于不同日复合曲线前锋点随环境温度最大值近似呈线性分布的特点,推测1月10日肢间南北场温差峰值达8.3℃,与1月8日差值为2.6℃。结合表2中上行段单位温差变形影响值平均为3.0mm的信息,推测1月10日合龙口相对变形相对1月8日减少7.8mm,配切时应在1月8日测量数据的基础上考虑该温度影响修正值。实际操作时每侧分别沿南北方向考虑4mm修正量,温度影响对棱线*i*配切量修正如下所示:

$$\Delta_T = \Delta_S / b_i^{(T)} \quad (10)$$

式中: $\Delta_T$ 为考虑温度影响的合龙段棱线*i*切线方向配切量额外修正值; $b_i^{(T)}$ 为棱线*i*单位方向向量在大地坐标系南北方向(Y)的分量; $\Delta_S$ 为肢间南北场温差下配切量修正值, $\Delta_S = 4$ mm。图11同时给出了1

月10日环境温度及肢间南北场温差的实测结果,实测肢间南北场温差峰值为7.5℃,预测为8.3℃,温度影响修正可信。

## 4 合龙口变形敏感性分析

### 4.1 几何测量

2019年1月8日下午14:00—15:00对合龙口姿态进行了采集,各测点相对目标状态坐标偏差如图12所示。轴心平面最大偏差为18mm,高程最大偏差为16mm,合龙口架设允许平面偏差为30mm,允许高差偏差为±20mm,合龙口架设姿态满足要求。

对于厂内合龙段姿态测量,除采集棱线端点外,还对各棱线自端点向内250mm范围按50mm间隔采集坐标。为获取制造偏差、确定最优架设姿态,对横隔板与壁板交接处特征点进行采集。合龙段共设置了64个坐标采集点。

### 4.2 合龙段棱线拟合

基于最小二乘法对棱线按空间直线拟合,拟合后的方向向量及拟合偏差如表3所示,最大拟合偏差为2.33mm,拟合效果较好,说明在250mm的测量范围内棱线可近似为直线。

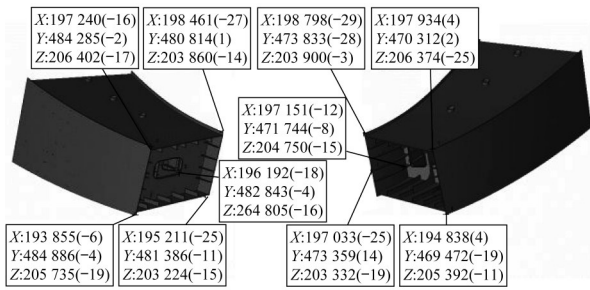


图 12 合龙口特征点坐标及架设偏差

Fig. 12 Feature point coordinates of closure interfaces and their deviations

4.3 配切量计算

按照合龙段配切量精确计算方法, 目标函数值随迭代计算的变化如图 13 所示, 优化参数计算结果如表 4 所示。配切量计算信息如表 5 所示。表 5 中, 配切量修正值指肢间南北场温差影响下的配切量。

配切后合龙段棱线垂足  $P^{(p)}$  与合龙口  $P^{(f)}$  坐标偏差估计如图 14 所示。从图 14 可见, 偏差最大为 28 mm, 合龙段塔顶  $P_o^{(T)}$  偏差为图 14 中的平移量, 因此架设姿态满足要求。

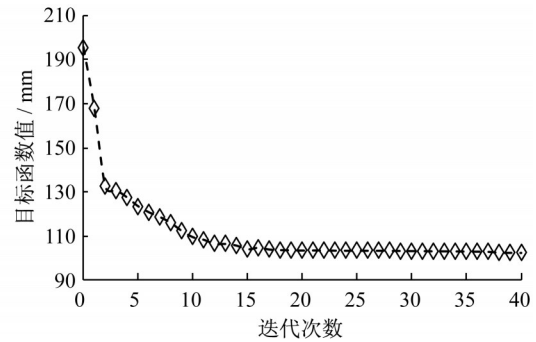


图 13 目标函数值迭代计算

Fig. 13 Change of objective function values with iterations

表 3 合龙段棱线局部单位方向向量拟合结果

Tab. 3 Fitting results of unit directional vector of closure edges

分项	$V_{R1}^{(0)}$	$V_{R2}^{(0)}$	$V_{R3}^{(0)}$	$V_{R4}^{(0)}$	$V_{L1}^{(0)}$	$V_{L2}^{(0)}$	$V_{L3}^{(0)}$	$V_{L4}^{(0)}$
$a_i^{(0)}$	-0.370 1	-0.390 4	-0.368 1	-0.387 8	-0.285 6	-0.268 2	-0.237 8	-0.247 3
$b_i^{(0)}$	0.597 2	0.625 4	0.596 1	0.575 0	-0.627 7	-0.656 9	-0.627 3	-0.610 3
$c_i^{(0)}$	0.711 6	0.675 6	0.713 6	0.720 4	0.724 2	0.704 6	0.741 6	0.752 6
拟合偏差/mm	2.21	1.79	2.18	2.33	1.79	1.87	1.38	0.99

表 4 优化参数取值

Tab. 4 Optimizing parameter values

平移/mm			旋转/( $10^{-3}$ rad)		
$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
-24.9	-28.1	-6.6	-1.61	1.35	-1.69

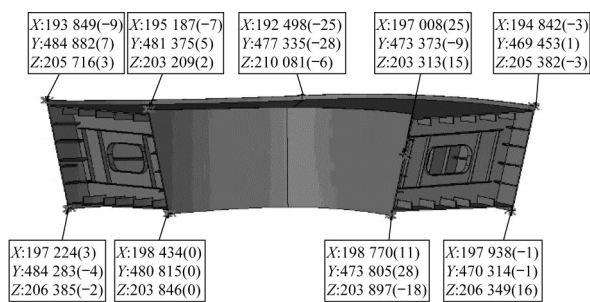


图 14 配切后合龙段与合龙口角点偏差估计

Fig. 14 Estimated coordinate deviation of closure segment and closure port after match cutting

合龙段于 1 月 10 日 06:00 起吊, 3 h 后顺利就位, 各壁板匹配状态如图 15 所示, 最大错边量为 13 mm。钢塔关键截面合龙前后一周内应力时程如图 16 所示。从图 16 可见, 消除温度影响后应力未见明

显的变化, 钢塔实现了零附加应力自然合龙。

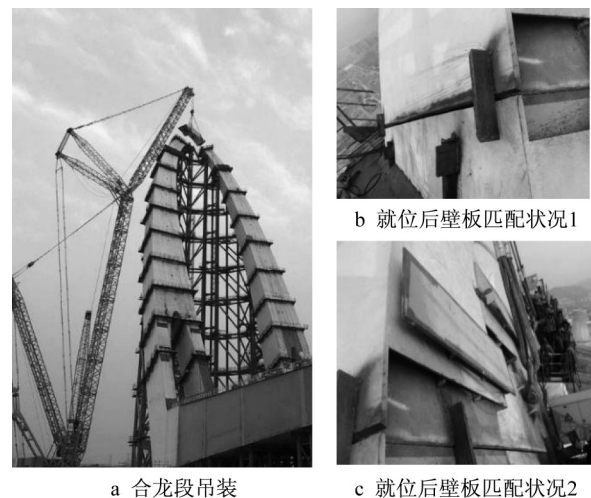


图 15 合龙段实际吊装状况

Fig. 15 Practical matching state of closure segment



表5 合龙段配切量计算信息  
Tab. 5 Cutting information of closure segment

棱线	$P_{L(R)j}^{(O)}$			$P_{L(R)j}^{(T)}$			$P_{L(R)j}^{(D)}$			配切量修正值/ mm
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
R1	198 831	473 777	203 806	198 821	473 770	203 802	198 781	473 833	203 878	113
R2	197 945	470 326	206 375	197 937	470 313	206 364	197 941	470 306	206 357	17
R3	194 848	469 465	205 387	194 843	469 448	205 371	194 839	469 454	205 378	17
R4	197 077	473 307	203 252	197 068	473 298	203 245	197 023	473 364	203 328	123
L1	198 480	480 875	203 779	198 458	480 867	203 786	198 434	480 815	203 846	89
L2	197 275	484 334	206 328	197 243	484 320	206 339	197 227	484 279	206 383	68
L3	193 888	484 951	205 661	193 856	484 932	205 669	193 840	484 889	205 719	75
L4	195 224	481 448	203 139	195 202	481 436	203 143	195 179	481 380	203 211	97

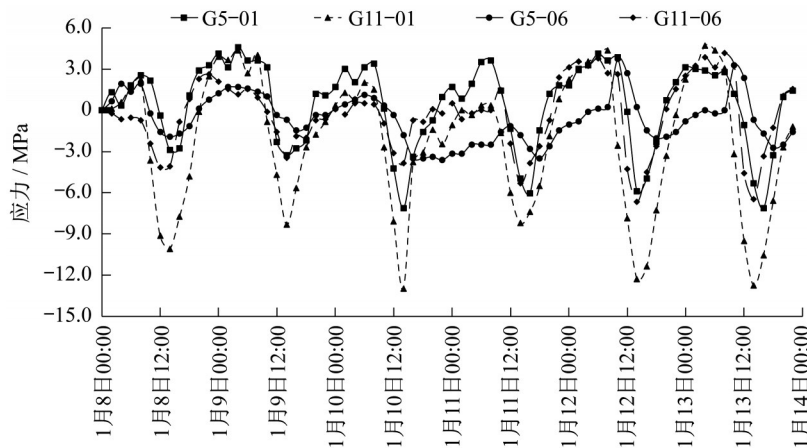


图16 钢塔关键截面应力历程

Fig. 16 Stress history at key section of steel pylon

## 5 结论

(1) 提出了考虑已成合龙口架设偏差的空间扭曲型合龙段精确配切量计算方法。该方法遵循合龙段与已成合龙口各壁板错变量最优的原则,采用已成合龙口特征点至合龙段端口多点拟合的局部棱线距离构造目标函数,以合龙段自身姿态处于架设误差范围内设置约束条件,基于内点罚函数法驱动优化模型以获取合龙段最优安装姿态,最终获得合龙段各棱线的精确配切量。

(2) 以背景桥梁钢塔合龙口变形敏感性分析为基础,指出钢塔合龙可利用合龙口变形受温度场作用较为敏感的特点,选择相对变形较小时进行合龙口姿态采集来确定合龙段配切的基准,选择合龙口相对变形较大时进行吊装。相对强制顶推,该方案可以减少合龙口附加应力,确保受力安全。

(3) 合龙口变形及结构温度场监测结果表明,合龙口最大相对变形为31 mm,肢间南北场温差是影响合龙口相对变形的主要因素,相似天气状况下合龙口相对变形呈以日为单位的周期性变化规律,

基于该特点确定了合龙口姿态采集及合龙段吊装时机。

(4) 环境温度与结构温度场关联分析结果表明,不同监测日肢间南北场温差前锋点与环境温度最大值近似呈线性分布。依据该特点及天气预报,对合龙当日肢间南北场温差进行了预测,指出合龙段配切应考虑气温变化导致的额外8 mm修正。

## 参考文献:

- [1] 张澎涛,范立础.城市河道桥型系列规划方法研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(12):1607.  
ZHANG Pengtao, FAN Lichu. Research on aesthetics planning of series bridges over urban rivers [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12):1607.
- [2] 俞志国.桥梁美学设计的现状和发展[J].城市道桥与防洪,2018(6):102.  
YU Zhiguo. Status and development of bridge aesthesi design [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(6):102.
- [3] TANG M-C. Forms and aesthetics of bridges[J]. Engineering, 2018,4(2):267.
- [4] 王辉,方兴,白玲,等.斜拉桥和悬索桥钢塔的架设[J].铁道

- 建筑,2007(7):4.
- WANG Hui, FANG Xing, BAI Ling, *et al.* Erection of steel pylons of cable-stayed bridges and suspension bridges [J]. Railway Engineering, 2007(7):4.
- [5] 柳鑫星,韦星屹,贾伟.超大型水中拱形钢索塔安装方案比选[J].公路,2014(7):196.
- LIU Xinxing, WEI Xingyi, JIA Wei. Comparison and selection of installation schemes for super large water arched steel pylons over the rivers[J]. Highway, 2014(7):196.
- [6] 潘军,徐瑜.港珠澳大桥九洲航道桥主梁及桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2016,46(6):1.
- PAN Jun, XU Yu. Key techniques for construction of main girder and pylons of Jiuzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(6):1.
- [7] 于祥敏,陈德伟.贵黔高速鸭池河特大桥梁钢桁梁合龙施工控制技术[J].桥梁建设,2017,47(6):101.
- YU Xiangmin, CHEN Dewei. Construction control techniques for closure of steel truss girder of Yachi River Bridge on Guiyang-Qianxi Expressway[J]. Bridge Construction, 2017, 47(6):101.
- [8] 张彦,狄谨,常彦虎,等.大榭第二大桥钢箱梁主跨合龙技术[J].公路,2013(9):311.
- ZHANG Yan, DI Jin, CHANG Yanhu, *et al.* Techniques for closure of steel box girder of Daxie 2nd Bridge [J]. Highway, 2013(9):311.
- [9] 勾红叶,蒲黔辉,韩冰,等.大跨度V形刚构拱组合桥的施工控制研究[J].土木工程学报,2013,46(S1):233.
- GOU Hongye, PU Qianhui, HAN Bing, *et al.* Study on construction control of long-span V-shape rigid frame composite arch bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1):233.
- [10] 易云焜,严和仲,赵聘鹏,等.厦漳跨海大桥北汉主桥配切-顶推合龙技术[J].桥梁建设,2013,43(4):49.
- YI Yunkun, YAN Hezhong, ZHAO Kunpeng, *et al.* Technique of cutting-pushing closure for north main bridge of Xiazhang Sea-Crossing Bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(4):49.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 赵晓晋,景强,贺拴海,等.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.
- ZHAO Xiaojin, JING Qiang, HE Shuanhai, *et al.* Construction techniques for closure of main girder of Qingzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Bridge Construction, 2017,47(5):117.
- [13] 何奇钦,王碧波.柳州白沙大桥主桥设计[J].桥梁建设,2018,48(4):96.
- HE Qiqin, WANG Bibo. Design of main bridge of Baisha Bridge in Liuzhou [J]. Bridge Construction, 2018,48(4):96.
- [14] 陈宝林.最优化理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2005.
- CHEN Baolin. Optimization theory and algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 李航.统计学习方法[M].北京:清华大学出版社,2012.
- LI Hang. Statistical learning method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [16] 王辉.南京长江三桥钢塔节段制造及整体预拼的三维仿形分析[D].北京:铁道部科学研究院,2007.
- WANG Hui. Fabrication technique and 3D shape simulation for integral pre-assembly of steel tower segments in Nanjing 3rd Yangtze River Bridge [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007.
- [17] 沈一兵.解析几何学[M].杭州:浙江大学出版社,2008.
- SHEN Yibing. Analytical geometry [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008.
- [18] 同济大学数学系.高等数学[M].6版.北京:高等教育出版社,2007.
- Department of Mathematics of Tongji University. Advanced mathematics [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [19] 范重,王喆,唐杰.国家体育场大跨度钢结构温度场分析与合龙温度研究[J].建筑结构学报,2007(2):32.
- FAN Zhong, WANG Zhe, TANG Jie. Analysis on temperature field and determination of temperature upon healing of large-span steel structure of the national stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007(2):32.
- [20] 林错错,王元清,石永久.露天日照条件下钢结构构件的温度场分析[J].钢结构,2010,25(8):38.
- LIN Cuocuo, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Analysis of the temperature field of steel members in sunshine [J]. Steel Construction, 2010,25(8):38.
- [21] 金砺.大跨钢结构非均匀温度场研究现状及展望[J].低温建筑技术,2015,37(6):82.
- JIN Li. Overview of study on non-uniform temperature field of large span steel structure [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015,37(6):82.