

广州珠江黄埔大桥悬索桥钢箱梁焊接线形控制技术

周云岗,肖汝诚,张杨永,吴万忠,孙 斌

(同济大学 桥梁工程系,上海,200092)

摘要: 在大跨度悬索桥钢箱梁工地焊接施工中,钢箱梁长度和钢箱梁轴线是着重控制的两个关键焊接指标,钢箱梁焊缝宽度是实施调控的关键参数,调控措施是合理控制焊缝宽度。针对钢箱梁长度控制,将焊缝收缩试验与分阶段调整方法相结合,均匀调整若干条焊缝宽度,补偿由施工及焊缝收缩经验值产生的长度误差;针对钢箱梁轴线控制,根据焊接进程,通过设置上、下游焊缝宽度或控制上、下游焊缝收缩量,促成梁段微量偏转,迫使梁段渐进回归至理想位置。

关 键 词: 悬索桥;钢箱梁;工地焊接;钢箱梁总长度;桥梁中轴线;线形控制

中图分类号: U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-0696(2009)02-0195-04

Technology of Alignment Control for Site Welding of Steel Box Girder of Guangzhou Huangpu Pearl River Bridge

ZHOU Yun-gang XIAO Ru-cheng ZHANG Yang-yong WU Wan-zhong SUN Bin

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract There are two key factors during the site welding of the long-span suspension bridge. One is how to control the length; the other is how to control the center line of the steel box girder. They can be controlled effectively by the width of the weld, which is the key parameter during the site welding. Based on the welding test, the length of the steel box girder can be adjusted by adjusting the width of the weld in the different stage. The longitudinal axis of the steel box girder can be controlled by setting the width of the weld or controlling the contraction of the weld to make the steel box deflection and come to the axis of the bridge.

Key words suspension bridge; steel box girder; site welding; length of the steel box; axis of the bridge; alignment control

1 引 言

大跨度桥梁成桥线形的平顺度是评价大桥整体质量的关键指标,直接影响桥面行车的舒适度。箱梁焊接线形控制的主要内容有:①桥面纵坡坡度;②上、下游高程差;③箱梁总长度;④桥面中轴线。其中①②在钢箱梁吊装完成后,已按理论值调整定位,焊接阶段只须跟踪校核,若出现异常,可通过微调梁段高程及吊索长度解决,而③④影响因素众多,成为

焊接线形控制的重点,也是决定成桥线形的关键因素之一。

钢箱梁横截面焊缝数量庞大(图 1),焊接变形复杂多变,是影响③④的关键因素。近年来,我国在悬索桥钢箱梁焊接控制方面取得了一些实践经验^[1-5],但线形控制具体指导方法仍较少。本文结合广州珠江黄埔大桥南汉悬索桥钢箱梁焊接控制实践经验,阐述焊接阶段箱梁线形控制技术。

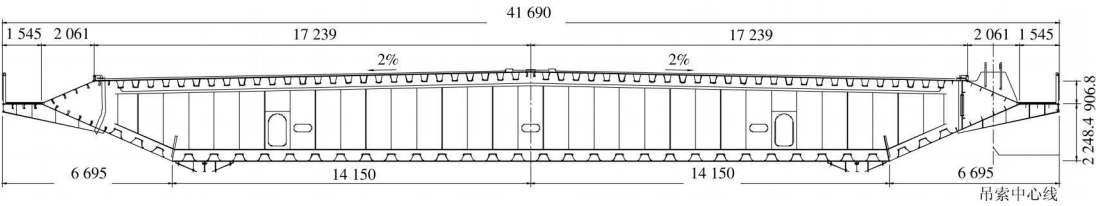


图 1 广州珠江黄埔大桥悬索桥箱梁标准断面

收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2008-11-18
作者简介: 周云岗(1980-),男,江苏淮安人,博士研究生,主要从事大跨度桥梁结构设计理论研究。

2 线形控制基本措施

钢箱梁吊装完成后, 其线形可通过微调吊索长度、钢箱梁两端高程、梁段间缝隙宽度进行调控。焊接线形控制措施主要围绕梁段间缝宽度制定。

梁段焊缝收缩不均匀性主要体现在不同梁段之间及同一梁段不同点之间, 而其对线形的影响主要体现在不均匀效应的累积。由此, 调控首要工作是划分调控阶段, 其须综合考虑施工进度及监控目标差值, 使施工作业面和施调空间相协调。本桥有 87 个梁段, 共 86 条焊缝, 综合考虑每条缝收缩经验值与实际值误差 (约 1.5 mm) 及工程进度, 本桥以中跨为中心, 南、北各取 10 条焊缝为一个控制阶段, 共分 5 个阶段。其中, 第 4 阶段南、北各设置 8 条缝, 第 5 阶段南、北各设置 5 条缝, 保证该阶段施调空间。

在每个阶段, 针对不同的调控对象, 采取不同的调控措施。钢箱梁长度调控措施是均匀调整焊缝宽度, 主要在以下两个方面实施:

- 1) 修正焊缝收缩量。通过焊缝试验获得焊缝收缩值, 以此为依据修正预设的经验值。
- 2) 阶段长度补偿。每个阶段完成后, 监测其长度误差, 在下一阶段加以补偿。

桥梁中轴线调控与箱梁焊接流程有关。普遍采取先焊梁段环缝 (包括面板、底板、上斜腹板、下斜腹板、人行道板纵向对接焊缝), 后梁段嵌补缝 (包括 U 肋嵌补段、环扁钢嵌补段、路缘石嵌补段), 两者之间通常有时间间隔。桥梁中轴线调控措施是通过调整焊缝宽度, 使梁段偏转。基于焊接流程具体调控措施有两点:

- 1) 环缝焊接前, 调整梁段上、下缝隙宽度, 使其偏转;
- 2) 环缝焊接后, 焊嵌补缝时, 通过控制焊接温度, 使其收缩量不一致形成偏转。

3 线形控制方法及实施

3.1 钢箱梁长度控制方法及实施

由长度调控措施可知, 在进行钢箱梁长度控制前, 须进行焊缝收缩试验^[1-3], 获得焊缝实际收缩量。根据焊缝试验值结果对梁段缝隙宽度进行修正, 修正方法如下:

- 1) 如果实际发生的焊缝收缩量等于预估经验值, 那么直接以梁段缝隙现状宽度作为焊缝宽度就可保证全部焊接完成后梁长恰好为理论控制值;
 - 2) 如果实际收缩量大于预估经验值, 则在焊接前适当调大梁缝宽度; 收缩量偏小则调小梁缝宽度。
- 由本桥焊缝试验成果可知, 梁段环缝收缩量均

值为 3.74 mm, 梁段焊缝总收缩量均值为 4.49 mm。本桥箱梁吊装时, 预估经验值为 3 mm。施焊时, 每条焊缝增大 1.5 mm, 以修正经验值误差。

尽管进行了梁段缝隙宽度修正, 由于施工误差及焊缝收缩的不确定性, 每阶段箱梁长度与理论长度之间仍有误差, 其值在下一阶段进行补偿, 方法如下:

- 1) 如果结果偏小 (即实际收缩量大于理论收缩量), 下一阶段应适当调大缝宽;
- 2) 如果结果偏大 (即实际收缩量小于理论收缩量), 下一阶段应适当调小缝宽。

本桥钢箱梁焊接过程长度控制如表 1。

表 1 钢箱梁焊接长度变化 /m				
控制阶段	焊后理论长度	焊后实测长度	差值	调整值
1 阶段一期	140.845	140.829	+ 0.016	+ 0.010
1 阶段二期	268.909	268.882	+ 0.027	+ 0.033
2 阶段	524.929	524.957	- 0.027	0
3 阶段	781.045	781.045	+ 0.000	0
4 阶段	985.943	985.862	+ 0.081	+ 0.060
5 阶段	1105.655	1105.584	+ 0.071	+ 0.040

注: 表中差值“+”表示缩短,“-”表示伸长。

表 1 中长度均为基准温度 20℃ 时基准长度。调整时, 如果单道缝隙宽度过大, 则会影响焊接质量及吊索线形, 所以进行缝宽调整时, 可将上一阶段误差量平均分配到几个梁段缝隙中。

本桥钢箱梁设计总长 1 105.68 m, 考虑桥面铺装会使钢箱梁伸长约 25 mm, 焊接完成后钢箱梁设计总长约 1 105.655 m。钢箱梁焊接全部完成后, 实测总长为 1 105.613 m, 与理论长度相差 42 mm, 长度误差满足监控目标, 即 + 300~ - 100 mm。

3.2 桥梁轴线控制方法及实施

理想情况下, 钢箱梁吊装完成后, 梁段满足两个条件: ①横轴相互平行; ②纵轴与桥梁中轴线重合。条件①表明梁段间缝宽沿横桥向相等, 条件②则确保每个梁段中心点位于桥梁中轴线上且横截面不发生偏转。桥梁轴线控制措施紧紧围绕这两个条件实施。

条件①主要依赖于严格的施工工艺。焊缝施焊前, 首先调整好梁段间焊缝宽度, 然后用马板将之固定, 两梁段横轴关系随之确定。可见, 条件①属于局部控制, 且不受误差累积效应的影响, 因而只要控制好各个梁段焊缝的施工精度, 消除温度等因素对梁段间缝宽的影响, 就能满足。

条件②与条件①不同, 属于整体控制, 且与梁段焊缝误差累积效应密不可分。理论上, 如果条件①得到满足, 条件②自动满足。然而, 施工误差不可避

免, 焊缝收缩量复杂多变, 随着焊接工作的不断推进, 梁段偏转显得越来越突出, 导致条件 ② 无法满足。

由条件 ② 的特点可知, 桥梁轴线控制须制定有效的测量方案, 及时获得施焊过程中梁段线形情况及焊接精度, 为调控工作提供初始参数。本桥钢箱梁在工厂制作时, 预先在梁段纵轴两端设置监测点。在焊接施工前, 对全桥钢箱梁进行复检并以此时测点数据为桥梁轴线初始状态。数据处理时, 取两测点横坐标平均值为梁段中心点坐标值, 取两测点横坐标差值来判断纵轴偏转大小, 如此处理, 可完全掌控条件 ②。

施工过程中, 随着各种误差的不断累积, 梁段轴

线偏差逐渐超出控制限值, 如图 2 中梁段 0 其中心点与桥梁中轴线相距为 d_0 (简称梁段偏心距), 其纵轴与桥梁中轴线形成夹角 β_0 (简称梁段偏转角), 此时需采取有效措施对梁段进行调控。

梁段轴线调控措施的本质是相同的, 具体实施方法视施焊进度决定。在环缝施焊前, 调控措施具体实施方法为保持梁段一端缝宽不变, 另一端增大 Δw (简称偏转量), 即以不变端端点为圆心, 转动角度 α (简称纠偏角), 如图 2 梁段 $m+1$ 。然而, 每个梁段施调空间很小, 往往不足以修复已产生的偏差, 故梁段轴线纠偏是一个精细而渐变的过程, 通常涉及若干梁段且须精心规划。

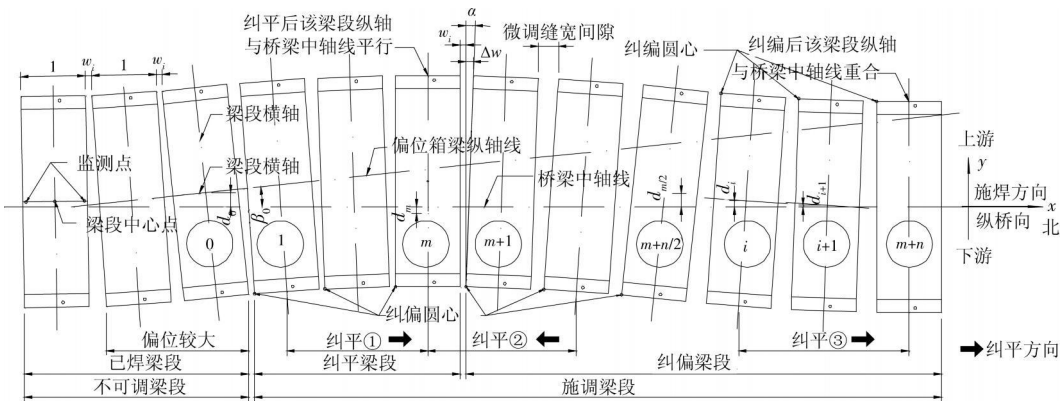


图 2 钢箱梁轴线纠偏示意

参与调控梁段的中心点轨迹与施调梁段数及纠偏角度密切相关。参与施调的梁段数越多, 其中心线轨迹就越圆滑、平缓, 相应的调控工作量也就越大。在参与调控梁段数相同的情况下, 通过选取不同纠偏角, 可获得不同的中心点轨迹。由此, 选择合适的施调梁段数及纠偏角, 对于调控工作至关重要。本文在确保梁段线形均匀变化的前提下, 从简化计算出发, 将梁段轴线调控分为纠平和纠偏两个阶段。梁段纠平的主要目的是将梁段纵轴渐进调整至与桥梁设计轴线平行, 如图 2 梁段 1 ~ m , 梁段 m 满足 $\beta_m = 0$; 梁段纠偏的主要目的是将梁段渐进调整至与桥梁设计轴线重合, 如梁段 $m+1 \sim m+n$, 梁段 $m+n$ 满足 $d_{m+n} = 0, \beta_{m+n} = 0$ 。进一步研究发现, 如果纠偏梁段数 n 取偶数, 则梁段纠偏可分解为针对偏位梁段 $m+n/2$, 分别向两个方向进行纠平, 如图 2 梁段纠平 ② 和 ③ 两者的区别为纠偏角度反向。据此特点, 可简化施调参数计算, 即按梁段纠平统一计算。

由施调方法可知, 两梁段横轴在施调前相互平行, 施调时, 后一梁段相对于前一梁段转动 α 。以桥梁中轴线为 x 轴, 施焊方向为正, 桥梁横向为 y 轴,

坐标系满足右手螺旋规则。根据梁段的施调方法, 可得施调后梁段 $i+1$ 中心点与梁段 i 中心点之间的位置关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{i+1} &= \beta_i + \alpha \\ d_{i+1} &= d_i + \frac{l}{2} \alpha + \left(\frac{B}{2} \alpha + l \right) \beta_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

推导时, 取 $\sin \beta_i \approx \beta_i, \cos \beta_i \approx 1, \sin \alpha \approx \alpha, \cos \alpha \approx 1$, 由于 $w_i \ll l$, 可忽略 w_i 的影响。式中, α, β 逆时针为正, d_0 位于 y 轴正向为正。

由式 (1) 可得初始梁段 0 与梁段 m 之间的位置关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_m &= \beta_0 + m \alpha \\ d_m &= d_0 - \frac{l \beta_0}{2} + \left(\frac{B}{2} \alpha + l \right) \left[m \beta_0 + m(m-1) \frac{\alpha}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

基于上述关系, 结合梁段纠平特点, 可得梁段纠平计算算法步骤如下:

- 1) 设定初值 $\beta_{\text{begin}} = \beta_0, d_{\text{begin}} = d_0$, 预估纠平梁段数 m 。
- 2) 按式 (2) 得 $\alpha = -\beta_0 / m$ 初定偏转角度。
- 3) 计算 $\Delta w = B \alpha$ 。如果 $\Delta w + m \max(w_j) < w_{\max}$

实施梁段纠平; 否则 $m = m + 1$ 返回步骤 2)。式中 $\max(w)$ 表示初始焊缝宽度最大值; w_{\max} 表示最佳焊缝宽度最大值。

4) 由式 (2) 计算 d_m 。

如前所述, 梁段施调参数计算, 可简化为 3 个梁段纠平计算, 只不过等效纠平 ②和 ③的初始参数依赖纠平 ①, 具体计算步骤如下:

1) 计算纠平 ①。根据梁段 0 的偏位参数 β_0 、 d_0 , 获得该阶段的纠偏参数 α_1 、 m 及 d_m 。

2) 计算纠平 ②。以梁段 $m + n/2$ 的偏位参数 $d_0 = d_{m+n/2} = \frac{d_m}{2}$ 、 $\beta_0 = \beta_{m+n/2} = m_2\alpha_2$ 、 $d_m = d_{m_2} = d_{m_1}$ 代入式 (2), 获得该阶段的纠偏角度 α_2 及 m_2 。其中, α_2 取 $\min(|\alpha_2|)$ 且 $\alpha_2 < 0$ 即顺转, $m_2 = n/2$, n 为参与纠偏梁段数。

3) 确定纠平 ③的调控参数。纠偏角 $\alpha_3 = -\alpha_2$ 、施调梁段数 $m_3 = m_2$ 。

4) 计算 $\Delta v = B\alpha$ 。纠偏时, 首先由纠偏角方向判断每条梁段焊缝作为纠偏圆心的端点, 然后按纠偏量实施纠偏, 纠偏顺序为梁段 $1 \rightarrow m_1 \rightarrow m_2 \rightarrow m_3$ 。

在环缝施焊后, 调控措施具体实施方法为在焊接嵌补缝时, 控制上、下游焊接温度, 使上、下游产生温差迫使上、下游焊缝收缩量不一致, 促使梁段偏转, 偏转趋势与上述调整相似, 取决于偏转梁段的偏心距及偏转角度, 比如 $d_0 > 0$ $\beta_0 > 0$ 则开始若干梁段上游焊接温度低于下游, 使上游收缩量小于下游, 类似图 2 梁段 $1 \sim m + n/2$, 其后再相反操作, 类似图 2 梁段 $m + n/2 \sim m + n$ 。通过该方法调控须跟踪测量钢箱梁中轴线变化趋势, 及时调整施焊策略, 确保箱梁中心点走势与既定目标相一致。

本桥在第 3 阶段焊接完成后, 梁段 B 30 中心点向上游偏 28 mm, 截面逆时转动 6 E-5 弧度, 根据上述方法, 计算其后续梁段纠偏参数如表 2。在实施

过程中, 跟踪测量受调梁段的偏位参数, 分析梁段的变化趋势。经分析发现, 随着调控工作的不断推进, 梁段偏心距及偏转角逐渐减小, 表明本文提出的调控方法切实可行, 且纠偏效果良好。

表 2 桥梁中轴线纠偏参数

项目	施调梁段数 n	施调梁 段编号	纠偏角 α	偏转量 Δv /mm
纠平	1	1	- 6E-5	2. 5
纠偏	8	2~ 5 6~ 9	- 1. 39E- 4 1. 39E- 4	5. 8

本桥钢箱梁焊接完成后, 桥梁轴线线形平顺、匀滑, 基本满足监控目标。

4 结 语

广州珠江黄埔大桥悬索桥钢箱梁焊接线形控制核心是钢箱梁总长度及桥梁中轴线, 其调整的关键点是合理设置梁段间缝隙宽度。对于钢箱梁长度, 通过均匀增大或减小梁段缝隙宽度, 修正焊缝收缩量误差及补偿阶段长度误差。对于桥梁中轴线, 通过偏转梁段措施, 促使其中心点逐渐回归到理论轴线上。本文介绍的线形控制技术, 在工程实践中取得了良好的效果, 保证桥梁线形连续、平滑、顺直。

参考文献:

[1] 梁肇伟, 郑凯锋. 中国虎门珠江悬索桥的钢箱梁及其吊装焊接 [J]. 钢结构, 1998, 13(3): 12- 15.
[2] 郑洪永. 悬索桥钢箱梁焊接缺陷的分析及预防措施 [J]. 铁道建筑, 2000(5): 26- 28.
[3] 夏克俭. 宜昌长江公路大桥钢箱梁工地焊接施工精度控制 [J]. 桥梁建设, 2002(2): 68- 70.
[4] 黄大元, 周昌栋, 宋官保, 等. 悬索桥钢箱梁工地焊接工艺与质量控制 [J]. 中外公路, 2002, 22(4): 36- 38.
[5] 周昌栋, 谭永高, 宋官保. 悬索桥上部结构施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.