

连续钢箱梁桥顶推施工主梁线形修正方法研究

郝笛笛^{1,2}, 缪长青^{1,2}, 方诗圣³

(1.东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
2.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 3.合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:为提高顶推施工钢箱梁桥主梁线形控制精度,提出一种线形偏位向量转换方法,该方法对理想状态下的传递矩阵法进行了修正,可实现对顶推施工钢箱梁纵轴线水平向偏位与竖向偏位的阶段性矫正。建立用以识别钢箱梁线形状态的空间坐标系,以钢箱梁节段两端控制点水平坐标与高程为基本变量,基于已拼装梁段上各控制点实际坐标与设计坐标差,构造梁段线形偏位向量与偏位平方和表达式;通过求解偏微分方程极值,对已拼装梁段线形进行计算转化,得到整体线形偏位离散度最低时的“转换线形”;比较“转换线形”与“理论线形”,对待拼装梁段拼装线形进行修正。实际工程应用表明,采用该方法控制顶推施工钢箱梁拼装线形,成桥阶段全桥顶推段主梁线形轴线水平向偏位值低于 5 mm,竖向偏位值低于 15 mm,永久墩处梁段轴线水平向偏位与竖向偏位分别低于 4 和 10 mm,线形控制精度满足规范要求。

关 键 词:顶推施工;钢箱梁桥;线形控制;传递矩阵法;偏位向量

中图分类号:U445.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2023)04-0712-10

对于分阶段施工钢箱梁桥,无应力线形控制精度是衡量成桥质量的重要指标^[1-3],其线形控制可分解对梁段立面、平面与横断面的无应力线形控制^[4]。传统顶推施工法中钢箱梁无应力线形匹配多以理论标高进行控制,梁段安装时参照无应力线形,这种直接以理论标高为标准的线形控制方法包含了对预制梁段制造误差的纠正,但难以解决已拼装梁段梁轴线水平倾角的偏位问题^[5]。采用顶推施工方法的钢箱梁节段为异位拼装,过程中伴随结构体系不断转化,线形偏位难以避免,如果不进行及时修正,落梁后可能因梁体强迫位移产生较大残余应力,降低梁体的受力安全性^[6]。

为此许多学者较早地针对如何实现分阶段控制桥梁的无应力线形问题,从理论方法和施工控制方面开展研究。秦顺全^[7]推导了分阶段施工梁桥的过程状态与成桥状态的联系,通过桥梁最终状态的内力与线形关系来求解施工中间状态的内力与线形。李传习、董创文等^[4,8]针对传统顶推施工线形控制方法的不足相继提出了“矩形法”、“带直角梯形法”,通过调节梁段制造线形参数达到线形控制的目的。之后李传习等^[9]在分析了“矩形法”、“带直角梯形法”的特点和适用性基础上进一步提出“等高等邻边法”,并结合“传递矩阵法”与“相位变换法”对拼接梁段进行预测、控制及线形矫正。熊正强^[10]采用“传递矩阵法”对顶推施工中各工况线形进行预测和控制,并作了计算参数选取、线形状态矩阵、偏位修正的理论研究,其线形控制理论在实际工程中得到应用。周凌宇等^[11]针对预制箱梁分阶段拼装提出了空间位置不重合坐标系间转换方法,减小了相邻梁段在拼装阶段因整体与局部坐标系转换产生的拼装偏位。但启联等^[12]基于驻值原理推导了描述不同阶段拼装梁段最终线形与结构刚度、外荷载及无应力状态量之间关系的控制方程,并借助其中参量进行施工阶段的线形控制。蔺鹏臻等^[13]借助有限元方法获取了主梁拼装阶段吊索内力与位移间的影响系数,对柔性拱桥拼装线形进行

动态控制。

上述研究方法多清晰简明,却也有相应局限,如“矩形法”、“带直角梯形法”、“等高等邻边法”对梁段制造精度有较高要求,梁段制造误差需要在拼装过程中予以考虑和修正;“相位变换法”等对线形偏位的修正集中在少数梁段,未分析说明局部线形偏位对整体线形的影响,缺少较明确的评估指标。“传递矩形法”在结构分析与现代工程控制领域得到大量应用^[14-17],具有易理解和易实现编程等优点,由于顶推施工钢箱梁桥采用异位拼装方式,施工过程中实际线形偏位规律难以掌握,现有研究中采用的“传递矩阵法”主要为针对主梁竖向线形的控制,其递推关系未考虑已拼装梁段的水平向线形偏位和线形修正问题,李传习、但启联等^[9,12]已对该问题作出探讨,仍缺少从整体结构角度对已拼梁段线形偏位逐步修正方法及对已拼梁段无应力线形的适时评价。

对于采用顶推法施工连续钢箱梁桥,已拼装梁段的线形偏位不可逆转^[18],待拼梁段应考虑主梁线形偏位修正。因此,及时、有效地评估实际线形偏位影响,是调整后续施工线形参数的重要步骤,也是实现高精度线形控制的重要环节。综上,提出一种“线形偏位向量转换法”,对理想状态下的传递矩阵法进行动态修正。以拼装完成的梁段上控制点实际偏位(相比设计线形)分布离散度作为评估指标,构造相应偏位向量及平方和表达式,通过求解偏微分方程极值,对已拼梁段线形进行计算转化,对钢箱线形轴线水平向偏位与竖向偏位的阶段性矫正。

1 线形控制理论

1.1 理想状态下线形控制理论公式推导

对于分阶段顶推施工钢箱梁桥,一般按“以折代曲”的思路,将加工成直线型的梁段,采用含有角度的拼装方式拟合设计线形^[19]。首先,对理想状态下线形控制理论公式进行推导,构造如图 1 所示坐标系,以各拼装钢箱梁段中轴线两端节点为控制点,设 K_i 为梁段 i 尾端控制点编号,坐标为 (X_i, Z_i, H_i) , X_i, Z_i 分别为平面顺桥向、横桥向水平坐标, H_i 为高程,则梁段 $K_i K_{i+1}$ 线形可由梁端控制点 K_i, K_{i+1} 坐标确定。

拼装平台上的梁段线形可视为无应力状态线形^[5,8],当梁段远离拼装平台后,受自重、支承点变

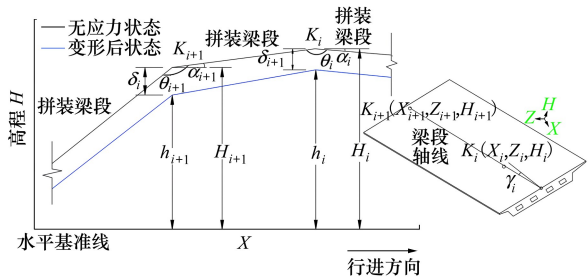
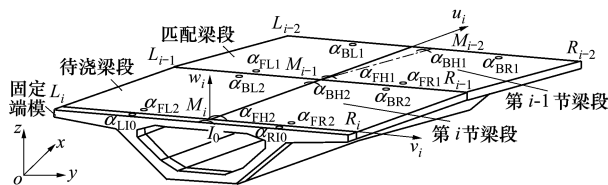


图 1 主梁无应力状态线形及变形后线形示意图

化、抄垫调整等综合影响发生变形(主要表现为竖向挠曲),设变形后控制点 K_i 高程为 h_i ,则理想状态(无线形偏位)下有 $h_i = H_i - \delta_i$, H_i, δ_i 分别为该状态下无应力状态线形对应的高程和理论下挠变形。不妨设某阶段钢箱梁无应力状态变形后的线形为梁段在此工况下的“理论线形”,则通过求得控制点变形 δ_i ,可得到钢箱梁无应力状态线形下的控制点 K_i 坐标。

已有研究表明,采用精细化有限元方法能够以较高精度预测钢箱梁控制点 K_i 下挠变形 δ_i ^[5],得到已拼装梁段的“理论线形”。假定已拼装梁段数为 i ,首段梁号为 1,尾段梁号相应为 i ,设该工况下控制点 K_i 状态向量 $V_i = \{H_i, X_i, Z_i, \alpha_i, \theta_i, \gamma_i\}^T$,其中 H_i, X_i, Z_i 为控制点坐标, α_i 为实际梁段 i 轴线水平角, θ_i, γ_i 分别为梁段 i 与待拼梁段 $i+1$ 轴线竖向夹角与水平夹角,见图 2。



(整体坐标系: $o-xyz$;局部坐标系: $M_i-u_i v_i w_i$)

图 2 整体与局部坐标系示意图^[20]

此外设传递因子 k_i, n_i, j_i ,满足 $\alpha_{i+1} = k_i \alpha_i, \theta_{i+1} = n_i \theta_i, \gamma_{i+1} = j_i \gamma_i$ 。其中 k_i, n_i, j_i 可由钢箱梁无应力状态线形与“理论线形”确定,有

$$\begin{Bmatrix} H_{i+1} \\ X_{i+1} \\ Z_{i+1} \\ \alpha_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ \gamma_{i+1} \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{i+1}\sin(\) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & l_{i+1}\cos(\) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & l_{i+1}\sin(\) \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ X_i \\ Z_i \\ \alpha_i \\ \theta_i \\ \gamma_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\sin(\) \cdot n_i = \sin n_i, \cos(\) \cdot n_i = \cos n_i, n_i \in (\alpha_i, \theta_i, \gamma_i)$, 进一步地, (1) 式可表达为

$$V_{i+1} = KV_i$$

K 为状态向量传递矩阵。通过以上相邻控制点间的传递关系, 可求得在“理论线形”下各工况中待拼梁段 $i+1$ 中控制点 K_{i+1} , 即确定了控制点拼装位置。

1.2 线形偏位评估与理论修正

1.2.1 线形偏位评估与偏位向量转换

(1) 式仅在无线形偏位时成立, 对于顶推施工钢箱梁桥, 拼装阶段梁段实际线形与“理论线形”难以达到一致, 因此考虑 (1) 式需要修正。工程中造成主梁线形偏位原因有多种, 如梁段制造偏差、焊接温度作用等, 且偏位值往往具有随机性和不稳定性, 但通过精密测量设备可实现对施工过程中主梁控制点坐标及钢箱梁间相对角度等关系数据进行精确获取, 达到追踪实际线形状态的目的。

现有研究中对于梁段拼装线形修正较多以调节相邻数节待拼梁段线位来矫正主梁局部线形偏

位^[8], 此类线形修正方式可能使得成桥阶段不同梁段控制点高程偏位值呈现出较大离散性, 造成落梁时主梁因强迫位移产生较大残余应力。因此, 线形修正应考虑局部线形偏位对整体线形控制的影响。

为能够有效确定梁段空间坐标信息并达到控制拼装线形的目的, 需定义合理的坐标系。周凌宇等^[20]考虑了整体坐标系和局部坐标系空间位置不重合问题, 将局部坐标系中的误差变换到整体坐标系中, 降低了局部坐标系转换误差影响, 见图 2。

对于采用整体和局部坐标系转换方法, 每一拼装阶段均需要将待拼梁段局部坐标转换至整体坐标系, 当梁段划分较多时, 计算量随之增加, 同时拼装误差难以及时准确地转换至整体坐标系中, 易降低线形控制精度。由于坐标系统的选取不影响主梁的空间线形状态, 可将坐标系原点设置于已拼装梁段上, 并通过相对坐标关系得到主梁实际线形和偏位值分布。综上, 以行进方向首段梁头控制点 K_1 为原点, 构造笛卡尔三维坐标系 (见图 3)。设某一工况下已拼装梁段数为 i , 梁段实际线形已知 (通过控制点相对坐标得到), 分别构造主梁轴线水平向偏位向量 e_z 与轴线竖向偏位向量 e_h

$$e_z = \{z, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_i\}^T \quad (2)$$

$$e_h = \{h, \Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_i\}^T \quad (3)$$

式中: $\Delta z_i, \Delta h_i$ 为实测控制点 K_i 水平向偏位与竖向偏位值; h 为首段梁前侧控制点高程。如图 3 所示,

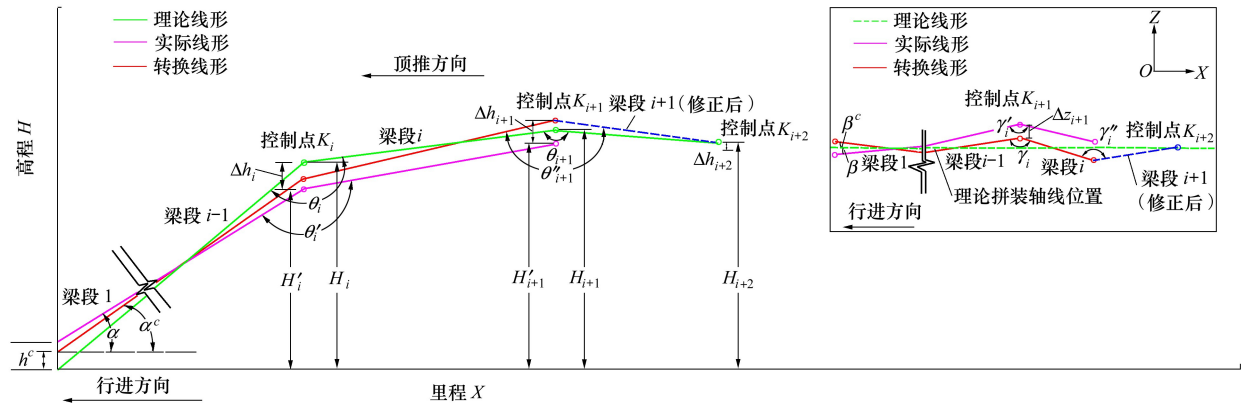


图 3 不同状态线形空间关系示意图

实际已拼钢箱梁无应力状态下相邻梁段间竖向夹角 θ'_i 与水平夹角 γ'_i 可视为定值, 可通过测得的控制点坐标数据获得。

因此, 在该工况下, $1 \sim i$ 节梁段实际线形与理论线形均为已知, 以 z, β, h, α 为自由变量, 根据几何

关系求得各控制点高程偏位 z_i, h_i 与 z, β, h, α 关系如 (4) ~ (5) 式所示

$$\Delta z_i = z - Z_i + \sum_{l=1}^i \{l_l \times \sin[\sum_{m=1}^l \gamma_{m-1} + \beta - (m-1)\pi]\}, i \geq 1 \quad (4)$$

$$\Delta h_i = h - H_i + \sum_{t=1}^i \{ l_t \times \sin[\sum_{m=1}^t \theta_{m-1} + \alpha - (m-1)\pi] \}, i \geq 1 \tag{5}$$

根据(4) ~ (5) 式,分别构造出已拼装梁段控制点水平向偏位值平方和表达式 $R(\gamma,z)$ 与竖向偏位值平方和表达式 $E(\alpha,h)$ 为

$$R(\gamma,z) = \sum_1^i \Delta z_i^2 \tag{6}$$

$$E(\alpha,h) = \sum_1^i \Delta h_i^2 \tag{7}$$

$R(\gamma,z), E(\alpha,h)$ 均只含 2 个自由变量,根据数理统计理论, $R(\gamma,z), E(\alpha,h)$ 值可反映该阶段主梁实际轴线水平及竖向线形与理论线形拟合的优良程度或离散度,当 $R(\gamma,z), E(\alpha,h)$ 达到最小水平时整体线形偏位离散程度最弱,认为整体线形控制最佳,且满足控制方程

$$\frac{\partial R(\gamma,z)}{\partial \gamma} = 0, \quad \frac{\partial R(\gamma,z)}{\partial z} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial E(\alpha,h)}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial E(\alpha,h)}{\partial h} = 0 \tag{9}$$

根据以上偏微分方程求得线形偏位平方和公式 $E(\alpha,h), R(\gamma,z)$ 最小时 $\gamma^c, z^c, \alpha^c, h^c$ 值对应的线形状态,设为“转换线形”(见图 3),求得的“转换线形”可由主梁实际线形在平面 HOX, ZOY 下通过刚性平移与转动得到。“转换线形”下各控制点偏位向量 e_z^c 与 e_h^c 使得 $R(\gamma,z), E(\alpha,h)$ 值最小,已拼装梁段的线形偏位向量也相应被转换。

1.2.2 线形修正

求得的“转换线形”中梁段 i 尾部控制点 K_{i+1} 与

当前工况下理论线形中梁段 $i+1$ 尾部节点(控制点 K_{i+2})作为实际待拼梁段 $i+1$ 梁头拼装定位点,可确定实际梁段 $i+1$ 定位坐标,完成线形修正(见图 3),同时,修正后的主梁线形中 $R(\gamma,z), E(\alpha,h)$ 值保持不变,即梁段增加而整体线形偏位离散度保持最小。此时控制点状态向量 V_{i+1} 中 Z_{i+1}, H_{i+1} 增加修正增项 $\Delta Z_{i+1}^c, \Delta H_{i+1}^c$ (将求得变量 $\gamma^c, z^c, \alpha^c, h^c$ 代入(4) ~ (5)式计算得到)。设修正向量

$$V^c = \{ 0, \Delta H_{i+1}^c, \Delta Z_{i+1}^c, 0, 0, 0 \}^T \tag{10}$$

修正后待拼梁段控制点 K_{i+1}, K_i 状态向量传递关系为

$$V_{i+1} = K V_i + V_c \tag{11}$$

计算得“转换线形”后不需对实际梁段空间线形状态进行调整,仅通过待拼梁段控制点高程调节,使其与现有梁段末节线位夹角与“转换线形”一致即可。

2 工程应用

2.1 背景介绍

合肥某跨高速连续钢箱梁桥采用顶推法施工,主桥由 140 m(40 m+60 m+40 m)三跨连续等高钢箱梁构成,钢材等级 Q345,箱梁为单箱四室断面,腹板间呈封闭箱型,箱梁高 2.6 m,上部宽 19.40 m,下部宽 12.56 m,桥面板为正交异性结构。主梁竖曲线半径为 3 000 m,其起点坡度为 -2.385%,终点坡度为 2.462%;主梁横坡为单向坡,坡度为 2%。主桥与既有高速交角 77°,如图 4 所示。

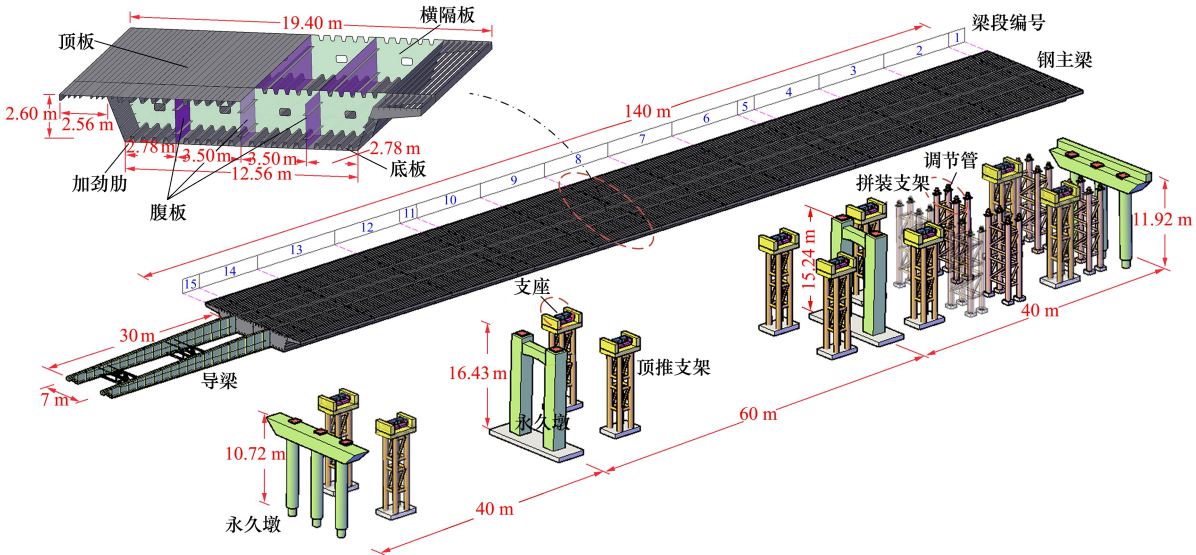


图 4 施工关键结构布置

钢箱梁桥沿纵向分 15 节拼装,顶推段为 1~12 节,长度 112.8 m;原位拼装段为 13~15 节,长度为 27.2 m。顶推施工分 6 个施工阶段,详见表 1,根据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020),钢箱梁安装后的线形允许偏差值见表 2。

表 1 不同施工阶段工况内容

施工阶段	工况
1	安装拼装支架、顶推支架
2	吊装 12~15 号梁段与导梁,顶推前进 26 m
3	吊装 9~11 号梁段,顶推前进 21.6 m
4	吊装 7~9 号梁段,顶推前进 27.2 m
5	吊装 4~6 号梁段,顶推前进 22.3 m
6	拆除部分或全部导梁,完成落梁,吊装 1~3 号梁段

表 2 钢箱梁安装后允许偏差^[21]

项目	允许偏差/mm
轴线偏位	主梁轴线 10
	相邻横梁中线相对偏差 5
梁底标高	墩台处梁底 ±10
	两孔相邻横梁相对高差 5
支座偏位	支座纵、横线扭转 1
	固定支座顺桥向偏差 20

2.2 线形控制与实施效果

2.2.1 理论线形计算

为获取较高精度的理论线形,结合钢箱梁结构特点,基于 ANSYS 建立如图 5 所示的钢箱梁桥精细化三维板壳有限元模型(单元类型为 4 节点 shell181,非缩减积分,材料采用双线性随动硬化本构),全模型单元数为 102 209,节点数为 150 701。计算考虑了重力与桥面施工荷载作用,同时,在钢箱梁支承点处建立弹性垫块^[22],避免因约束直接施加于模型节点而产生应力集中现象,降低求解精度。利用生死单元技术实现不同阶段钢箱梁节段的拼装与拆卸。

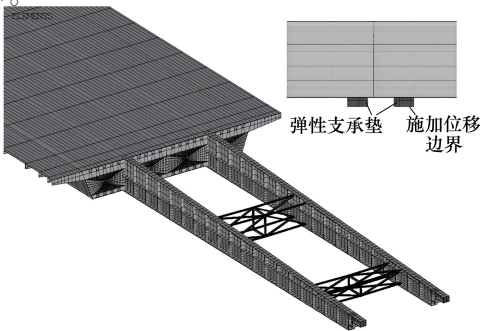


图 5 有限元模型

计算得各拼装工况下远端梁段理论变形,如图 6 所示。每一顶推阶段到位时,通过调节支架上抄垫块高度,使支座力与计算得反力基本一致,实现主梁结构与有限元计算数据的良好对接。

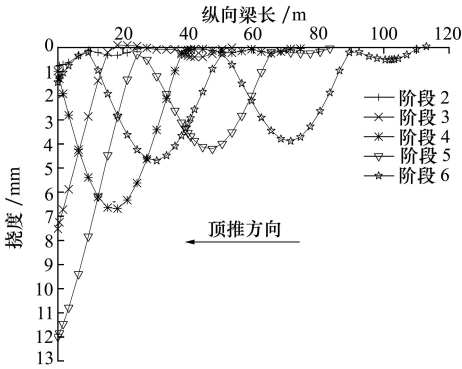


图 6 不同阶段主梁下挠变形曲线

2.2.2 监控点布设

根据施工环境特点,实际线形控制点选布于桥面,为能准确测出主桥轴线竖向线形与水平线形,选择地面参考坐标点 $C_1 \sim C_3$,如图 7 所示。

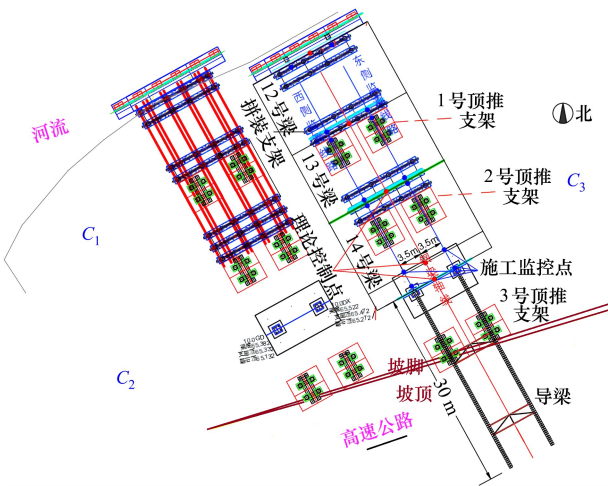


图 7 主桥平面监控点布设示意图

采用 TrimbleS9 全站仪,沿主梁纵向布设 2 条监测线路,分别位于梁中轴线东、西侧,与梁中轴线水平距 3.5 m,两监测线路对称布置测点,其中第 5, 11, 15 梁段布设 2 处测点,其他梁段布设 4 处测点。各控制测点距拼接焊缝 1 m,如图 8 所示,全桥控制点测点共计 42 个。



图 8 主梁线形监控点实物图

2.2.3 线形控制效果

以第三阶段钢箱梁拼装线形控制为例,在第二阶段顶推到位后,测得 12~15 钢箱梁节段上控制点水平偏位向量 $e_z = \{7.2, 4.1, -3.2, -2.2, 6.2, 5.5, 6.1\}^T$ 与竖向偏位向量 $e_h = \{6.0, -19.7, -26.3, -6.3, -6, 1.9, 21.5\}^T$, 将 e_z, e_h 分别代入(6)~(7)式,进一步求得控制点水平向偏位平方和为 189.6, 竖向偏位平方和为 1 657.3。根据“线形偏位向量转换方法”与(8)~(9)式求出转换线形下的 $\alpha^c, h^c, \gamma^c, z^c$ 分别为 $2.3^\circ, 1.7 \text{ mm}, 1.4^\circ, -0.9 \text{ mm}$, 将 $\alpha^c, h^c, \gamma^c, z^c$ 代入(4)~(5)式得到待拼梁段下控制点 6, 7, 8 修正值 $\Delta H_{i+1}^c, \Delta z_{i+1}^c$ 。其中:控制点 6 修正值分别为 $2.13, 0.84 \text{ mm}$; 控制点 7 修正值分别为 $1.24, 0.71 \text{ mm}$; 控制点 8 修正值分别为 $0.97, -0.22 \text{ mm}$, 构成最终修正向量 V^c , 代入(1)和(10)式, 求出修正后拼装控制点坐标。“转换线形”下 12~15 段钢箱梁控制点偏位向量为 $e_h = \{4.3, -11.1, -14.5, -16.8, -12.2, 8.1, 14.5, 17.1\}^T, e_z = \{6.3, 5.3, -2.52, -2.8, 5.8, 4.3, 5.2\}^T$, 控制点偏位平方和分别为 161.1, 1 351.3, 较第二阶段顶推完成时分别降低约 15%, 18%, 各控制点线形偏差离散度有效减低。

根据图 9~10 监测结果, 主梁轴线水平向偏位

与轴线竖向偏位分布离散程度呈降低趋势, 偏位值趋于稳定、均匀化, 阶段性线形控制效果良好: 第 2~5 阶段顶推到位, 轴线水平向偏位峰值分别为 7.2, -4.8, 5.4, 4.7 mm; 主梁纵轴线竖向线形偏位峰值分别为 -26.3, 26.3, 17.3, -14.7 mm, 线形偏位总体保持下降趋势, 相邻阶段最大偏位值降低 9 mm。

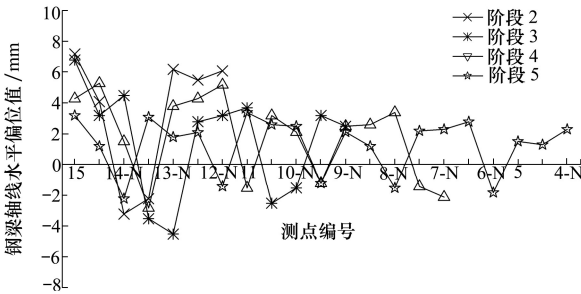


图 9 各阶段主梁轴线水平向偏位曲线

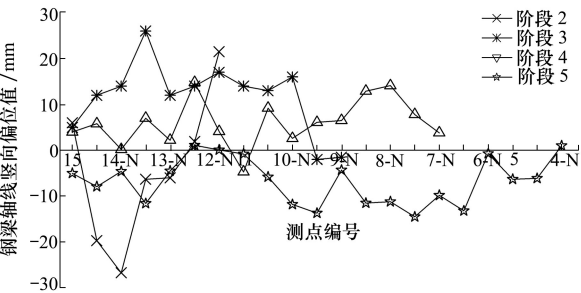


图 10 各阶段主梁轴线竖向偏位曲线

为进一步验证提出的“线形偏位向量转换方法”在顶推施工法中主梁线形控制的有效性, 采用文献[19]线形控制方法(未考虑局部偏位对整体线形影响的线形修正方法)对上述工程主桥线形进行预测与控制。图 11~12 分别为采用 2 种方法进行线形控制时得到的第五阶段主梁轴线水平向偏位与竖向偏位分布, 表 3 为梁段理论匹配位置控制点坐标数据。

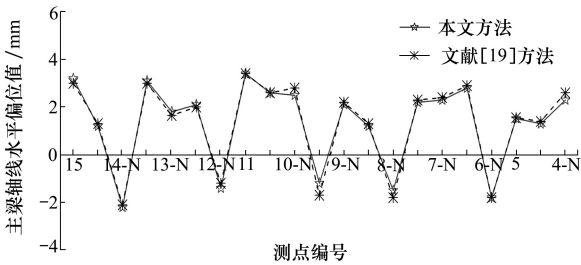


图 11 主梁轴线水平向偏位

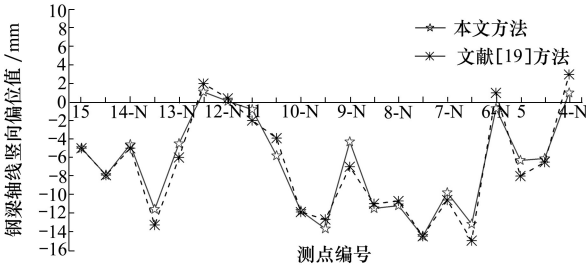


图 12 主梁轴线竖向偏位

表 3 梁段理论匹配位置控制点坐标

控制点编号	理论坐标/mm		本文方法/mm		文献[19]方法/mm	
	X	H(绝对高程)	X	H(绝对高程)	X	H(绝对高程)
15(基准点)	0	67 430	3.2	67 425	2.9	67 425
14-S	0	67 439	1.2	67 431	1.3	67 431
14-N	0	67 665	-2.2	67 660	-2.2	67 660
13-S	0	67 672	3.1	67 660	3.3	67 659
13-N	0	67 854	1.1	67 850	1.6	67 848
12-S	0	67 859	2.0	67 860	2.2	67 861
12-N	0	67 991	-1.4	67 991	-1.2	67 991
11	0	68 021	3.1	68 020	3.4	68 019
10-S	0	68 026	1.6	68 020	2.7	68 022
10-N	0	68 127	2.5	68 115	2.8	68 115
9-S	0	68 130	-1.2	68 116	-1.8	68 117
9-N	0	68 186	1.5	68 182	2.2	68 179
8-S	0	68 187	1.2	68 176	1.3	68 176
8-N	0	68 183	-1.5	68 172	-1.8	68 172
7-S	0	68 181	1.6	68 167	2.3	68 167
7-N	0	68 116	2.3	68 106	2.4	68 105
6-S	0	68 113	2.8	68 100	2.9	68 098
6-N	0	68 002	-1.8	68 001	-1.9	68 003
5	0	67 969	0.7	67 963	1.5	67 961
4-S	0	67 964	1.3	67 958	1.5	67 958
4-N	0	67 824	2.3	67 825	2.7	67 827

结果显示:主梁纵轴线各控制点水平偏位值均在±5 mm 内,且 2 种方法下各控制点处水平偏位值相近,采用文献[19]方法得到的主梁梁端处控制点水平偏位值较本文方法稍大;主梁轴线各控制点处竖向偏位值均在±15 mm 内,其中采用本文提出的“线形偏位向量转换方法”得到的主梁线形中各控制点竖向偏位值整体小 1~2 mm,竖向偏位平方和为 1 461.0,而采用文献[19]方法得到主梁线形中的控制点偏位平方和为 1 599.9,偏位值分布离散性更明显。分析原因为,采用文献[19]方法对待拼装梁段线形进行预测控制时未考虑局部线形偏位对整体线形的影响,使得成桥时主梁线形偏位分布更为离散,且偏位值较大。

如图 13,采用提出的“线形偏位向量转换方法”

对本工程主梁线形偏位进行动态修正,成桥时主梁轴线测点竖向偏位低于 15 mm,水平偏位低于 5 mm,永久墩处梁段控制点线形偏位低于 10 mm,线形控制精度满足规范要求。

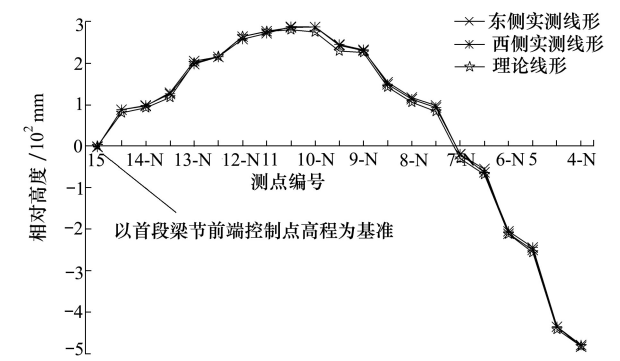


图 13 成桥主梁轴线竖向线形

3 结 论

为提高顶推施工钢箱梁桥主梁线形控制精度,提出一种“线形偏位向量转换法”,对理想状态下的传递矩阵法进行修正,可实现对顶推施工中钢箱梁线形偏位的阶段性矫正,理论方法已在实际工程得到应用。结论如下:

1) 本文推导了分节段拼装钢箱梁桥顶推施工中各梁段偏位值与变量偏位转角及高度的表达式,构建了衡量整体线形偏位程度的平方和公式,通过求解偏微分方程极值,求得整体线形偏位离散程度

最小时的空间线形状态,得到理想状态下的传递矩阵法的修正项,改善了现有线形控制方法缺少从整体结构角度对已拼梁段线形偏位逐步修正的不足之处。

2) 实际工程应用表明,成桥时全顶推段主梁整体线形竖向偏位低于 15 mm,轴线水平向偏位低于 5 mm,永久墩处梁段线形竖向偏位与轴线水平向偏位分别低于 10 和 4 mm,线形控制精度满足规范要求。

3) “线形偏位向量转换法”计算理论完整,易于编程,可针对不同施工环境对方法进行调节转换,为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 刘海东,侯文崎,罗锦.短线节段预制拼装桥梁几何线形三维控制方法[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4): 769-778
LIU Haidong, HOU Wenqi, LUO Jin. Three-dimensional geometric alignment control method for short-line matching segmental precast girder assembling bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(4): 769-778 (in Chinese)
- [2] WU J, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Geometry control simulation for long-span steel cable-stayed bridges based on geometrically nonlinear analysis[J]. Engineering Structure, 2015, 90: 71-82
- [3] 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 (in Chinese)
- [4] 李传习,王琛,董创文,等.基于相位变换的顶推曲梁桥自适应无应力构形控制[J].中国公路学报,2014,27(2): 45-53
LI Chuanxi, WANG Chen, DONG Chuangwen, et al. Control of self-adaptive unstressed configuration for incrementally launched curved girder bridge based on phase transformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 45-53 (in Chinese)
- [5] 王俊,李传习.变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工临时墩标高调整方案确定[J].中外公路,2011,31(3): 177-182
WANG Jun, LI Chuanxi. Deine the adjustment scheme of temporary pier elevation of variable curvature vertical curve steel box girder[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2011, 31(3): 177-182 (in Chinese)
- [6] 林建平,汪劲丰,陈春雷,等.槽形组合钢梁桥顶推施工线形控制[J].桥梁建设,2014,44(4): 102-106
LIN Jianping, WANG Jinfeng, CHEN Chunlei, et al. Geometric shape control of trough steel girder composite bridge constructed by incremental launching method[J]. Bridge Construction, 2014, 44(4): 102-106 (in Chinese)
- [7] 秦顺全.分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J].桥梁建设,2008(1): 8-14
QIN Shunquan. Unstressed state control method for bridges constructed in stages[J]. Bridge Construction, 2008(1): 8-14 (in Chinese)
- [8] 董创文,李传习,王琛.考虑相位变化及组拼高程误差的顶推梁体无应力线形的实现[J].土木工程学报,2013,46(8): 74-82
DONG Chuangwen, LI Chuanxi, WANG Chen. Achieving unstressed geometry of incrementally launched girders considering phase shift and elevation deviation during assembly[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 74-82 (in Chinese)
- [9] 李传习,周群,董创文.顶推钢箱梁的梁段制造构形与无应力线形实现[J].公路交通科技,2018,35(5): 40-48
LI Chuanxi, ZHOU Qun, DONG Chuangwen. Fabrication configuration and unstressed geometry achievement of beam segment of incrementally launched steel box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(5):

- 40-48 (in Chinese)
- [10] 熊正强. 变曲率竖曲线连续钢梁桥顶推施工线形控制研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 187-191
XIONG Zhengqiang. Study on linear control of continuous steel beam vertical curve[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(4): 187-191 (in Chinese)
- [11] 周凌宇, 郑恒. 基于坐标变换的短线预制梁段匹配误差调整[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 71-76
ZHOU Lingyu, ZHENG Heng. Matching error adjustment of girder segments precast by short line match method based on coordinate transformation[J]. Bridge Construction, 2016, 46(5): 71-76 (in Chinese)
- [12] 但启联, 秦顺全, 魏凯, 等. 基于平面梁单元的分阶段成形结构线形控制方程[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 42-47
DAN Qilian, QIN Shunquan, WEI Kai, et al. Equation for geometric shape control of structure formed in stages based on plane beam elements[J]. Bridge Construction, 2017, 47(4): 42-47 (in Chinese)
- [13] 蔺鹏臻, 刘应龙, 何志刚. 高速铁路连续钢桁柔性拱桥的施工线形控制[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 45-50, 73
LIN Pengzhen, LIU Yinglong, HE Zhigang. Construction alignment control of continuous steel truss girder and flexible arch bridge of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(11): 45-50, (in Chinese)
- [14] 陆卫杰, 芮筱亭, 贡来峰, 等. 受控线性多体系统传递矩阵法[J]. 振动与冲击, 2006(5): 24-27, 31, 189
LU Weijie, RUI Xiaoting, YUN Laifeng, et al. Transfer matrix method for linear controlled multibody system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006(5): 24-27, 31, 189 (in Chinese)
- [15] 孙建鹏, 李青宁. 曲线桥分析的精细传递矩阵法[J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 196-199, 234
SUN Jianpeng, LI Qingning. Precise transfer matrix method for struture analysis of curved bridge[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 196-199, 234 (in Chinese)
- [16] 王海涛, 金慧, 张景元, 等. 地铁隧道施工引起邻近埋地管道位移计算的传递矩阵法[J]. 铁道学报, 2019, 41(10): 93-98
WANG Haitao, JIN Hui, ZHANG Jingyuan, et al. Transfer matrix method for calculating displacement of adjacent buried pipeline caused by subway tunnel construction[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 93-98 (in Chinese)
- [17] 程霖, 杨成永, 马文辉, 等. 地铁隧道开挖引起的管线变形计算与试验研究[J]. 华中科技大学学报, 2022, 50(4): 7-13
CHENG Lin, YANG Chengyong, MA Wenhui, et al. Deformation calculation and experimental study on buried pipes induced by subway tunnel excavation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2022, 50(4): 7-13 (in Chinese)
- [18] 陈晓冈. 运营高速铁路无砟轨道桥梁移梁纠偏技术研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(4): 62-66
CHEN Xiaogang. Research on the technology of ballastless track bridge deviation rectification by shifting beam in high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(4): 62-66 (in Chinese)
- [19] HUANG Y, ZHENG H H, WNG M, et al. Geometry control technology of transition curve section in cross-sea bridge erected by precasting segment grider[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256/257/258/259: 1548-1553
- [20] 周凌宇, 郑恒, 侯文崎, 等. 短线预制箱梁节段线形误差的改进调整法[J]. 华中科技大学学报, 2016, 44(9): 99-104
ZHOU Lingyu, ZHENG Heng, HOU Wenqi, et al. Improved adjustment method for linear error of precasting segmental box girder by shor-line match method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2016, 44(9): 99-104 (in Chinese)
- [21] 中交一公局集团有限公司. 公路桥涵施工技术规范[S]. JTG/T3650-2020
- [22] 陆新征, 江见鲸. 用 ANSYS Solid 65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J]. 建筑结构, 2003(6): 22-24
LU Xinzheng, JIANG Jianjing. Analyze the complex stress of concrete composite members with ANSYS solid 65 unit[J]. Building Structure, 2003(6): 22-24 (in Chinese)

Updating method on geometric shape control of continuous steel box girder bridges by incremental launching construction

HAO Didi^{1,2}, MIAO Changqing^{1,2}, FANG Shisheng³

(1.Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3.College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A new method of deviation vector transformation of geometric shape was proposed to improve the accuracy on geometric shape control of continuous steel box girder bridges by incremental launching construction. The method correct the transfer matrix method in the ideal state where the lateral and vertical deviations of longitudinal axis at the segments can be adjusted periodically. By firstly constructing a spatial coordinate system for identifying the geometric shape of the box bridge and taking the elevation and horizontal coordinates of the control points at both ends of the installed bridge segment as the basic variables, the actual and design coordinates of the control points will be obtained in the constructed coordinate system, constructing the vector of deviation system on geometric shape and the sum of vector squares, and then the extremum problem of the partial differential equation is solved to obtain the "transformed shape" with the lowest dispersion of overall deviation. The modified term appended to transfer matrix method aforementioned for bridge segment to be installed can be obtained ultimately by deriving from the "transformed shape" and "designed shape". Engineering practice shows that the horizontal and vertical maximal deflections on the axis of the whole bridge at post construction are less than 5 and 15 mm, respectively, by using the proposed method to control the geometric shape of a continuous steel box girder bridge by incremental launching construction method, meanwhile, the horizontal and vertical deflections on the axis of the segments above the permanent piers are less than 4 and 10 mm, respectively. The theoretical method has been verified with good effect in requirement of the code.

Keywords: incremental launching construction; steel box girder bridges; geometric shape control; transfer matrix method; shape deviation vector

引用格式: 郝笛笛, 缪长青, 方诗圣. 连续钢箱梁桥顶推施工主梁线形修正方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(4): 712-721
HAO Didi, MIAO Changqing, FANG Shisheng. Updating method on geometric shape control of continuous steel box girder bridges by incremental launching construction[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(4): 712-721 (in Chinese)