

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202204192024101966

文章编号:1674-599X(2024)05-0015-07

引用格式:田仲初,唐林平.考虑索鞍移动的悬索桥顶推量确定方法研究[J].交通科学与工程,2024,40(5):15-21.

Citation: TIAN Zhongchu, TANG Linping. Method for determining the pushing value of suspension bridge considering the movement of cable saddle[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 15-21.

考虑索鞍移动的悬索桥顶推量确定方法研究

田仲初,唐林平

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:基于分段悬链线理论,考虑顶推前后主索鞍绝对位置的改变,提出一种顶推量确定方法,该方法可使顶推施工后桥塔塔顶偏位达到指定值。通过有限元软件对比分析了不同顶推量下桥塔塔顶偏位的变化情况以及每次顶推主索鞍绝对位置的改变量占顶推量的比值情况,并将此方法应用到超量顶推方案顶推量的确定中。研究结果表明:基于该方法计算得到的顶推量,可以使桥塔塔顶偏位在顶推后或者顶推后某个施工阶段达到指定值。研究成果可为悬索桥索鞍顶推施工中桥塔塔顶偏位精准控制提供参考。

关键词:悬索桥;分段悬链线理论;顶推量确定;指定偏位值

中图分类号:U445

文献标志码:A

Method for determining the pushing value of suspension bridge considering the movement of cable saddle

TIAN Zhongchu, TANG Linping

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Based on the segmental catenary theory and considering the change of absolute position of main cable saddle before and after pushing, a method for determining pushing value was proposed, which can help the bridge tower top reach the specified deviation after pushing. A comparative analysis was conducted on the changes of the top deviation of the bridge tower under different pushing values, as well as the ratio of the absolute position change of the main cable saddle to the pushing value for each pushing, by using finite element software, and the proposed method was applied to determine the pushing value of the over-pushing scheme. The results show that based on the pushing value calculated by this method, the top deviation of the bridge tower can reach the specified value after pushing or at a certain construction stage after pushing, which provides a reference for precise control of the top deviation of bridge tower in the pushing construction for cable saddle of suspension bridges.

Key words: suspension bridge; segmental catenary theory; determination of pushing value; specified deviation

悬索桥主索鞍顶推量与顶推时机是主梁架设施工控制中涉及结构安全的非常重要的控制量。在悬索桥主梁架设过程中,边中跨不平衡水平力不

断增大,但主索鞍与塔顶处于临时固结状态,不平衡水平力由桥塔依靠自身刚度来承受,因此需要对主索鞍进行顶推,释放桥塔所承受的水平力,以确

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078058)

通信作者:田仲初(1966—),男,教授,主要从事大跨径桥梁施工新技术与施工控制方面的研究工作。E-mail:847581163@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

保桥塔处在安全范围内^[1]。主索鞍顶推量与顶推时机的合理性决定着主梁架设过程中桥塔结构的安全性。何为等^[2]对索鞍顶推、索鞍自由滑移、索鞍不顶推这三种情况下的结构状态进行了对比,提出了索鞍顶推小步长、多步数的顶推原则。王达等^[3]通过分析索鞍常规顶推、索鞍不顶推、索鞍自由滑移三种顶推方式,得出超量顶推的优化施工方案。赖敏芝等^[4]通过分析主索鞍不同顶推方案的差异,在索鞍容许偏位范围内优化了主索鞍顶推时机和顶推量。牛登辉等^[5]推导了自锚式悬索桥索鞍预偏量的算法,并进行了四种索鞍顶推方案的比选,同时给出了体系转换过程中的索鞍顶推原则。叶龙祥等^[6]提出了一种能正装分析地锚式悬索桥主索鞍顶推的方法,探究了地锚式悬索桥主索鞍顶推规律。以上学者对主索鞍的顶推方案做了大量的计算分析与对比研究,但研究内容多为顶推方案制定的原则,对于每次顶推的精确顶推量却鲜有研究。目前,在实际施工中多以桥塔塔顶偏位量作为顶推量,并未考虑主索鞍移动对桥塔塔顶偏位的影响,无法实现对桥塔塔顶偏位的精准控制。

主索鞍顶推后,各跨间的不平衡水平力发生改变,主索鞍的绝对位置也会随之发生改变,并移动到一个新的平衡位置^[7]。由于顶推量等于主索鞍绝对位置的改变量与桥塔塔顶偏位改变量之和^[8],如不考虑主索鞍绝对位置的改变,只以桥塔塔顶偏位量作为顶推量,会使得桥塔塔顶偏位在顶推后并不能完全回正。本文考虑了主索鞍绝对位置的改变,基于分段悬链线理论,提出一种可用于求解达到桥塔塔顶偏位指定值所需顶推量的计算方法,为悬索

桥顶推施工中桥塔塔顶偏位的精准控制提供了参考,增大了施工过程中的桥塔安全性。

1 计算理论

1.1 悬链线理论

主缆自重沿索为恒量,主缆曲线在自重作用下呈悬链线,且满足线性应力应变关系。图1为一段柔性索结构,由索段自重形成的均布荷载为 w ,缆索横截面面积为 A ,弹性模量为 E 。索段跨度为 ΔX ,高差为 ΔY ,无应力长度为 S_0 。以左侧端点为坐标原点,建立直角坐标系,左端水平分力为 H ,竖向分力为 V 。右端水平分力为 H' ,与 H 相等,竖向分力为 V' 。

在分析计算过程中,采用以下3条假定:1) 主缆为线弹性材料,服从虎克定律;2) 主缆是理想的柔性索结构,只承受拉力且不计截面抗弯刚度对缆形的影响;3) 变形前后主缆横截面积的变化不计。

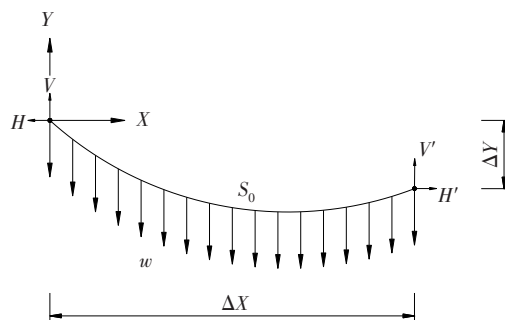


图1 均布荷载作用下主缆受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force on main cable under uniform load

则主缆曲线方程满足^[9]:

$$\Delta X = \frac{HS_0}{EA} + \frac{H}{w} \left[\ln(V + \sqrt{V^2 + H^2}) - \ln(V - wS_0 + \sqrt{(V - wS_0)^2 + H^2}) \right] \quad (1)$$

$$\Delta Y = \frac{wS_0^2 - 2VS_0}{2EA} - \frac{1}{w} \left[\sqrt{H^2 + V^2} - \sqrt{H^2 + (V - wS_0)^2} \right] \quad (2)$$

1.2 分段悬链线理论

在集中外荷载作用下主缆的受力形式相当于许多索段相连^[10]。图2为集中荷载作用下主缆受力示意图。在图2中,悬索上共有 $n + 1$ 个连接点(包括端点),作用力除沿索曲线均匀分布的自重 w 外,还有 $n - 1$ 个竖向集中荷载 $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, n - 1)$ 和 $n - 1$ 个横向集中荷载 $F_i (i = 1, 2, 3, \dots, n - 1)$ 。

图3为集中荷载作用下索段受力示意图。对第 i 段悬索进行分析^[11],可知:

$$H_i = H_{i-1} - F_i \quad (3)$$

$$V_i = V_{i-1} - wS_{0i} - P_i \quad (4)$$

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X_i \quad (5)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta Y_i \quad (6)$$

其中:

$$\Delta X_i = \frac{H_{i-1}S_{0i}}{EA} + \frac{H_{i-1}}{w} \left[\ln(V_{i-1} + \sqrt{V_{i-1}^2 + H_{i-1}^2}) - \ln(V_{i-1} - wS_{0i} + \sqrt{(V_{i-1} - wS_{0i})^2 + H_{i-1}^2}) \right] \quad (7)$$

$$\Delta Y_i = \frac{wS_{0i}^2 - 2V_{i-1}S_{0i}}{2EA} - \frac{1}{w} \left[\sqrt{H_{i-1}^2 + V_{i-1}^2} - \sqrt{H_{i-1}^2 + (V_{i-1} - wS_{0i})^2} \right] \quad (8)$$

式中: H_i 、 H_{i-1} 分别为第*i*段悬索右侧和左侧的水平分力; V_i 、 V_{i-1} 分别为第*i*段悬索右侧和左侧的竖向分力; H_0 、 H_n 分别为最左端和最右端端点的水平分力; V_0 、 V_n 分别为最左端和最右端端点的竖向分力; X_i 、 Y_i 为第*i*分点的坐标; ΔX_i 、 ΔY_i 分别为第*i*-1分点和第*i*分点之间的沿*X*、*Y*轴方向的距离。

由此可见,只要确定了悬索各索段的无应力长度、各分点荷载、端点的水平分力与竖向分力,就可以通过式(3)~(4)计算出悬索各分点的内力,通过式(5)~(6)计算出各分点的位置。

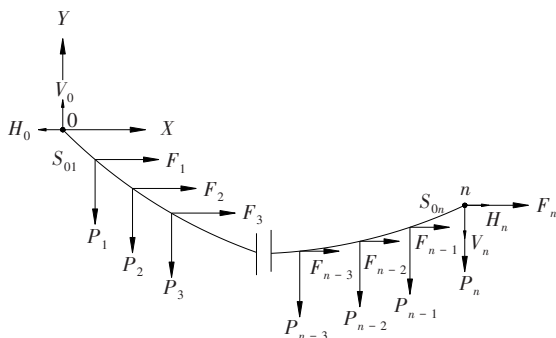


图2 集中荷载作用下主缆受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force on main cable under concentrated load

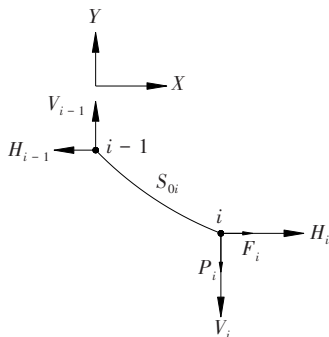


图3 集中荷载作用下索段受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force on cable segment under concentrated load

2 主塔偏位指定值所需顶推量的计算原理

在悬索桥顶推施工后,桥塔塔顶偏位会发生改变,桥塔依靠自身刚度承受的各跨间不平衡水平力也会随之发生改变,主索鞍绝对位置也会因此移动到新的平衡位置。由于主索鞍绝对位置改变量与桥塔塔顶偏位改变量之和始终等于顶推量,仅以桥塔塔顶偏位改变量作为顶推量,不考虑顶推过程中主索鞍绝对位置的改变,会导致顶推后桥塔塔顶偏

位不能达到指定值。本文基于分段悬链线理论,考虑主索鞍绝对位置的改变,提出一种确定顶推量的方法,该方法可使得顶推后的桥塔塔顶偏位达到指定值。

对于悬索桥某个确定的施工阶段,顶推前后各索鞍之间的高差*h*,任意跨的各个分点(索夹)所承受的荷载*P_i*和*F_i*,以及各分点间的无应力长度*S_{0i}*(可根据成桥状态求得)均为已知值。由上述分段悬链线理论可知,任意跨主缆两端的水平距离*l*与高差*h*只与其端点的水平分力*H*与竖向分力*V*有关。

$$l = \sum_{i=1}^n \Delta X_i = F_1(H, V) \tag{9}$$

$$h = \sum_{i=1}^n \Delta Y_i = F_2(H, V) \tag{10}$$

由于*h*为已知量,由式(10)可知:

$$V = f(H) \tag{11}$$

将式(11)代入式(9),得:

$$l = F_1(H, f(H)) = G(H) \tag{12}$$

由此可见,对于悬索桥某个确定施工阶段,任意跨主缆两端水平分力*H*只与索鞍间的水平距离*l*有关。对于一个*N*跨悬索桥,则存在*N*-1个主索鞍。*L_i*为当前施工阶段第*i*跨索鞍间的水平距离,可根据式(12)求出第*i*跨的水平力*H_i*。图4为主索鞍受力示意图,图中*T_i*、*T_{i-1}*均为主缆所受合力。对第*i*个主索鞍进行水平方向受力分析,可以得出:

$$H_{i+1}(L_{i+1}) = Q_i + H_i(L_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \tag{13}$$

式中:*Q_i* = *E_iδ_i*为各主塔所受不平衡水平力;*E_i*为第*i*个桥塔水平抗推刚度;*δ_i*为第*i*个桥塔塔顶偏位量。

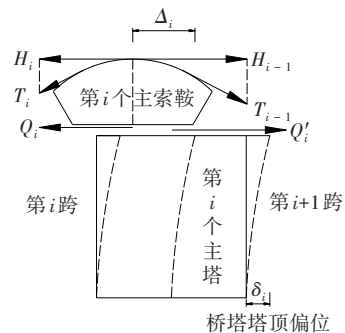


图4 主索鞍受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of force on the main cable saddle

若*L'_i*为成桥状态下各索鞍间的水平距离,为已知值,显然有:

$$\sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N L'_i \quad (14)$$

当各桥塔顶推后所需设定的桥塔塔顶偏位量 $\delta_i (i = 1, 2, 3, \dots, N - 1)$ 确定时, 联合式 (13) ~ (14), 得到含 N 个未知量 $L_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 的 N 个方程组成的方程组, 求解该方程组, 即可求得顶推后在设定的桥塔塔顶偏位量 δ_i 下各跨的跨径 L_i 。根据 $\Delta_i + \delta_i + L_i = L'_i$, 可以计算出顶推后的主索鞍偏置量设置值 Δ_i , 顶推前后 Δ_i 的变化量即为顶推量, 其为各主索鞍中心线与所在主塔中心线之间的距离。

也可使用 MATLAB 软件根据分段悬链线理论编制程序, 迭代求解各跨间索鞍的水平距离 L_i , 求得顶推前后的 Δ_i , 步骤如图 5 所示。

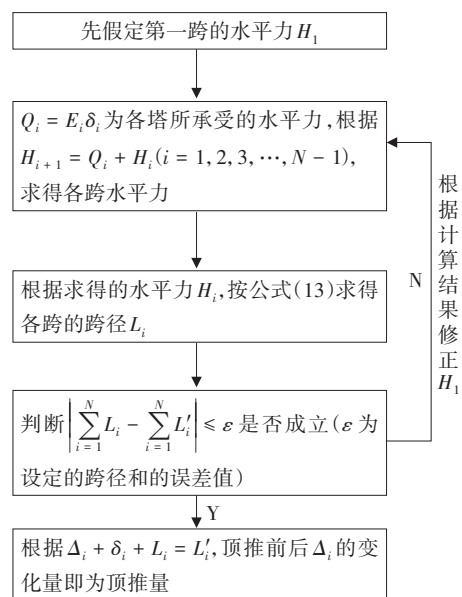


图5 顶推量求解步骤

Fig. 5 Solving steps of pushing value

3 算例对比验证

3.1 工程概况

重庆长寿经开区大桥(原名重庆长寿长江二桥)是长寿城市路网系统南北向交通主干道中跨越长江的重要节点工程。长寿经开区大桥主桥为主跨 739 m 的单跨简支钢箱梁悬索桥, 中跨理论垂度为 81.113 m, 垂跨比为 1:9, 主缆中心间距为 32.5 m, 每根主缆为 75 股, 每股含 127 根 $\varnothing 5.1$ mm 镀锌高强钢丝, 吊索纵向间距为 12.0 m, 近塔吊索距塔中心线 15.5 m。南、北桥塔为钢筋混凝土门形框架, 塔柱采用梯形空心截面, 塔柱壁厚由上至下分段变厚。加

劲梁采用扁平流线形钢箱梁, 正交异形板桥面, 梁高 3.5 m, 宽 34.0 m。桥型布置如图 6 所示。

3.2 吊装方案及有限元模型建立

3.2.1 吊装方案

全桥主跨划分成 62 个梁段, 编号从北到南依次为 S30 ~ S0, S0' ~ S30'。在实际施工过程中, 钢箱梁在北岸侧的深水区定点起吊, 起梁孔位于北岸侧的 S4 ~ S6 梁段正投影区, 吊装方案见表 1。

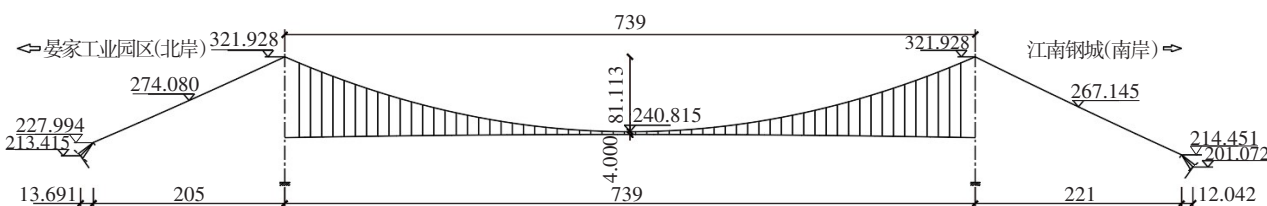


图6 主桥桥型布置图(单位:m)

Fig. 6 Layout of main bridge type (unit: m)

表1 钢箱梁吊装方案

Table 1 Installation scheme of steel box girder

步骤	工作内容
1	对称吊装 S0 ~ S3(S0' ~ S3')
2	逐榀吊装 S7, S8, S4', S5'
3	南北轮流吊装 S9 ~ S27(S6' ~ S24')
4	逐榀吊装 S25', S26', S27'
5	对称吊装 S28, S30(S28', S30')
6	对称合龙 S29', S29

3.2.2 有限元模型建立

运用 Midas/Civil 有限元分析软件建立全桥模型, 主缆与吊索采用索单元模拟, 截面面积采用净面积计算, 主梁采用空间梁单元, 按照施工阶段以及设计图纸划分单元数量。在边界条件中, 塔梁交界处设竖向支撑、横向限位约束, 不设纵向约束。索鞍与桥塔的连接采用刚臂单元模拟(图 7), 通过更改单元 1 的温度来改变主索鞍与主塔的相对位置, 模拟主索鞍预偏的设置与顶推施工^[12-13]。

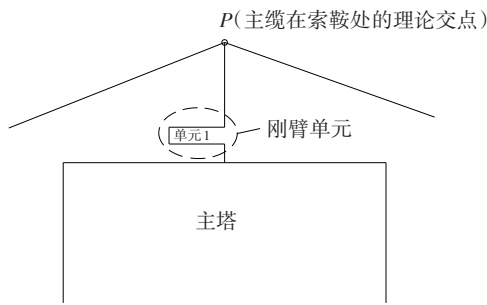


图7 刚臂单元模拟示意图

Fig. 7 Schematic diagram of rigid arm element simulation

采用点荷载施加索夹及吊点结构荷载,二期通过梁单元荷载进行施加,全桥一期荷载为 159.04 kN/m,二期荷载为 60.60 kN/m。将全桥结构离散为 493 个节点、480 个单元,有限元模型如图 8 所示。

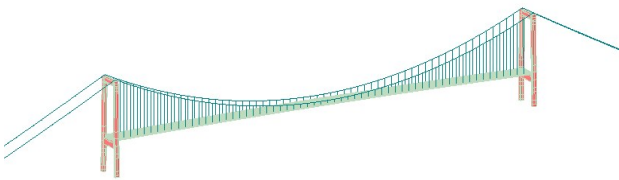


图8 全桥有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the bridge

3.3 不同顶推量下桥塔塔顶偏位量分析

为了验证本文方法计算出的顶推量在顶推后能否使桥塔塔顶达到指定的偏位量,并对比两种不同顶推量下的桥塔塔顶偏位量的变化情况,本文运用 Midas/Civil 有限元软件计算分析了两种不同顶推量在相同顶推时机下的桥塔塔顶偏位量、主索鞍绝对位置的改变量占顶推量的比值。方案 1 以桥塔塔顶偏位量为顶推量,方案 2 的顶推量由本文方法计算得出。计算结果如图 9~11 所示。

由图 9 可知,方案 1 以桥塔塔顶偏位量作为顶推量,在顶推后桥塔塔顶偏位仍然存在,无法使得桥塔在顶推后完全回正,在顶推后北塔最大偏位量为 1.6 cm,南塔为 2.2 cm(以向中跨偏位为正,向边跨偏位为负)。方案 2 以本文方法计算得到顶推量,在顶推后桥塔塔顶偏位基本为零,达到了预期中顶推后桥塔完全回正的控制目标,说明该方法是可行的。由图 10 可知,在不改变顶推时机的情况下,方案 2 的南、北桥塔塔顶偏位在整体主梁架设阶段均比方案 1 的小,方案 2 增大了桥塔的安全储备。由图 11 可知,主索鞍绝对位置的改变量占顶推量的比值在第一次顶推时最大,随着顶推阶段的推进,该比值逐渐减小。由此可见,在实施钢箱梁吊装前期

的顶推时,以桥塔塔顶偏位量作为顶推量,桥塔无法完全回位的现象较为明显,因此需要考虑主索鞍绝对位置的改变以进行顶推量的精确计算。

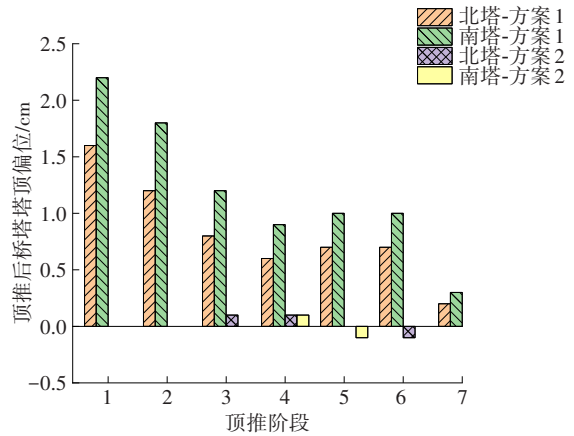


图9 不同方案下主索鞍顶推后桥塔塔顶偏位值对比图

Fig. 9 Comparison diagram of tower top deviation after main cable saddle pushing in different schemes

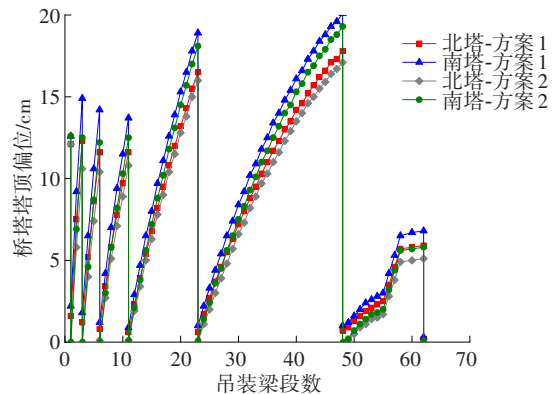


图10 不同方案下塔顶偏位量随梁段吊装数目变化情况图

Fig. 10 Variation of tower top deviation with the number of beam hoisting in different schemes

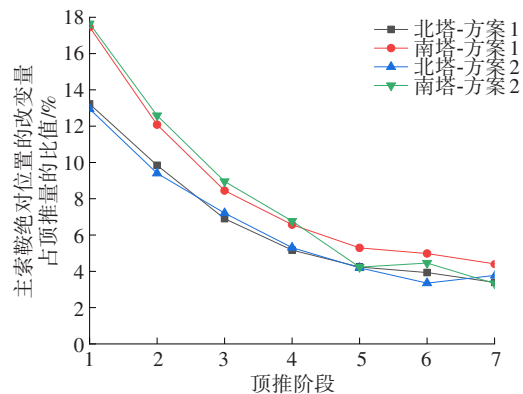


图11 不同方案下主索鞍绝对位置改变量占顶推量比值的

Fig. 11 Variation of the ratio of absolute position change of main cable saddle to pushing value in different schemes

4 超量顶推方案顶推量的确定

在超量顶推方案中,顶推前后桥塔塔顶偏位量变化较大,各跨之间的不平衡水平力变化也十分显著,顶推前后主索鞍的绝对位置将发生较大改变。若仅以桥塔塔顶偏位的改变量作为顶推量,不考虑

主索鞍绝对位置的改变,会使得顶推后桥塔塔顶偏位量不能达到指定值。本文根据桥塔塔顶偏位限值,对上述桥梁的顶推方案进行优化,并以每次顶推后或顶推后某个施工阶段的桥塔塔顶偏位量达到指定值为目标,按照本文方法计算每次的顶推量,计算结果见表2。

表2 顶推过程相关数据表

Table 2 Data table related to pushing process

施工阶段	位置	主索鞍偏位量设置值/cm	顶推量/cm	顶推前桥塔塔顶偏位量/cm	顶推后桥塔塔顶偏位量/cm	顶推后桥塔塔顶偏位量指定值/cm	钢箱梁吊装数
空缆	北塔	105.4		0.1	0.1		0
	南塔	121.1		0.0	0.0		
顶推1	北塔	74.4	31.0	12.1	-15.0	-15.0	1
	南塔	87.8	33.3	12.6	-15.1	-15.0	
顶推2	北塔	47.4	27.0	10.4	-15.0	-15.0	8
	南塔	55.6	32.2	14.8	-15.0	-15.0	
顶推3	北塔	17.5	29.9	15.3	-13.4		33
	南塔	19.7	35.9	19.3	-15.0		
吊装完成	北塔	17.5		0.0	0.0	0.0	62
	南塔	19.7		0.1	0.1	0.0	

优化后的顶推方案共进行了三次顶推,前两次顶推量计算的目标是顶推后塔顶偏位值为指定值,第三次顶推量计算的目标是钢箱梁吊装完成后主塔偏位值为零。根据表2中的顶推量,运用Midas/Civil有限元软件分析超量顶推方案中南、北桥塔塔顶偏位量的变化情况,结果如图12所示。由图12可知,使用本文方法计算得到的顶推量,对于前两次顶推,在顶推后塔顶偏位值均能达到指定值。第三次顶推是以钢箱梁吊装完成后桥塔塔顶偏位量为零作为目标,本文方法计算出的顶推量在钢箱梁吊装结束后,可使桥塔塔顶偏位达到完全回正的目标,这也验证了本文方法的可行性。

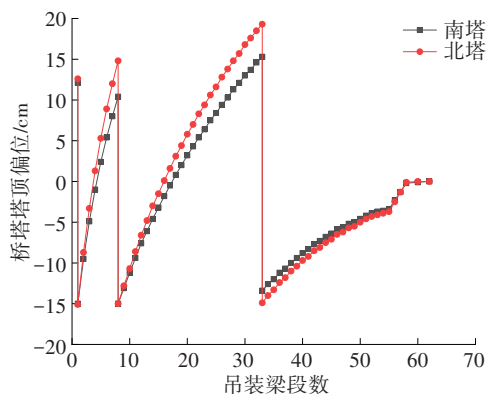


图12 超量顶推方案下桥塔塔顶偏位量变化情况图

Fig. 12 Diagram of tower top deviation in over-pushing scheme

5 结论

本文基于分段悬链线理论,考虑主索鞍顶推前后绝对位置的改变,通过公式推导,对悬索桥主索鞍建立力学平衡方程组,并通过求解方程组得到了可达到桥塔塔顶偏位指定值的顶推量,同时给出了迭代求解该方程组的方法。主要结论如下:

1) 根据本文方法求得的顶推量,在顶推后可以使得桥塔塔顶偏位量达到指定值。在不改变顶推时机的前提下,本文方法求得的顶推量可使得桥塔塔顶偏位量在整个主梁架设阶段较小,这将增大塔顶偏位的安全储备。

2) 随着钢箱梁吊装数目的增多,主索鞍顶推前后绝对位置的改变量占顶推量的比值逐渐减小,因此在钢箱梁吊装的前期顶推中,当以桥塔塔顶偏位量为顶推量时,主塔无法完全回位的现象较为明显,因而需进行顶推量的精确计算。

3) 在超量顶推方案中,主索鞍绝对位置的改变量较大,应用本文方法计算得到的顶推量可以精确地使桥塔塔顶偏位量达到指定值。在实际施工过程中,按照该顶推量可一次顶推到位,减少顶推施工过程中的顶推次数。

参考文献(References):

- [1] 王方立, 徐林, 杜朝阳, 等. 马普托大桥索塔容许偏位及主索鞍顶推分析[J]. 公路, 2020, 65(8): 192-196.
WANG Fangli, XU Lin, DU Zhaoyang, et al. Analysis of allowable deviation of pylon of Maputo Bridge and jacking of main cable saddle [J]. Highway, 2020, 65(8): 192-196.
- [2] 何为, 项贻强, 徐兴. 悬索桥施工中索鞍顶推的小步快跑原则[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 134-138. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.01.024.
HE Wei, XIANG Yiqiang, XU Xing. Frequent short steps saddle pushing principle in suspension bridge construction [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 134-138. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.01.024.
- [3] 王达, 汪威, 王磊. 悬索桥主索鞍超量顶推施工控制分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.01.006.
WANG Da, WANG Wei, WANG Lei. Analysis of the construction monitoring during the main cable saddle over pushing for the suspension bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.01.006.
- [4] 赖敏芝, 周伟, 罗明. 悬索桥施工期间主索鞍顶推优化方案研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 122-125. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.025.
LAI Minzhi, ZHOU Wei, LUO Ming. Study on optimization scheme of pushing main cable saddle of suspension bridge during constructions [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 122-125. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.025.
- [5] 牛登辉, 蔡送宝. 自锚式悬索桥索鞍预偏及顶推控制方法研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 107-110. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2018.08.029.
NIU Denghui, CAI Songbao. Study on pre-deviated amount and pushing control method of cable saddle for self-anchorage suspension bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(8): 107-110. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2018.08.029.
- [6] 叶龙祥, 柯红军. 地锚式悬索桥主索鞍顶推控制研究及实例分析[J]. 公路与汽运, 2020(3): 106-109. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.03.026.
YE Longxiang, KE Hongjun. Research and case study on saddle top push control of ground anchor suspension bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(3): 106-109. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.03.026.
- [7] 齐东春, 王昌将, 沈锐利, 等. 悬索桥施工中鞍座顶推的研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(7): 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.07.015.
QI Dongchun, WANG Changjiang, SHEN Ruili, et al. Saddle pushing analysis in suspension bridge construction [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12(7): 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2010.07.015.
- [8] 张晨星, 田仲初. 悬索桥钢箱梁吊装阶段主缆索力计算方法[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 91-97. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.014.
ZHANG Chenxing, TIAN Zhongchu. Calculation method of main cable force in hoisting stage of steel box girder of suspension bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 91-97. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.014.
- [9] 唐茂林, 沈锐利, 强士中. 大跨度悬索桥股架设线形计算的精确方法[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2001.03.020.
TANG Maolin, SHEN Ruili, QIANG Shizhong. An accurate calculation method for erecting curves of wire strands of long suspension bridges [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(3): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2001.03.020.
- [10] 张征, 黄才良, 张哲. 自锚式吊拉组合桥主缆成桥线形计算及程序开发[J]. 公路, 2009, 54(12): 1-5.
ZHANG Zheng, HUANG Cailiang, ZHANG Zhe. Calculation and program development of finished main cable shape of self-anchored cable-stayed suspension bridge [J]. Highway, 2009, 54(12): 1-5.
- [11] 唐茂林, 强士中, 沈锐利. 悬索桥成桥主缆线形计算的分段悬链线法[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 87-91. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-8360.2003.01.018.
TANG Maolin, QIANG Shizhong, SHEN Ruili. Segmental catenary method of calculating the cable curve of suspension bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 87-91. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-8360.2003.01.018.
- [12] 张海顺, 王玉银. 悬索桥吊索张拉及索鞍顶推降温法数值分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(11): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2017.11.009.
ZHANG Haishun, WANG Yuyin. Cooling method numerical analysis of suspender cable tension and cable saddle pushing [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(11): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn. 1006-2106.2017.11.009.
- [13] 李传习, 周群, 柯红军, 等. 双塔单跨混合梁自锚式悬索桥缆梁同步施工方案[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 41-48.
LI Chuanxi, ZHOU Qun, KE Hongjun, et al. Cable-girder synchronous construction scheme of self-anchored suspension bridge with double-tower single-span hybrid beam [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(2): 41-48.

(责任编辑:石月珍)