

考虑摩阻力影响的悬索桥索鞍精确算法

贺拴海¹, 陈英昊², 李 源¹

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要:为了在悬索桥分析计算中精确模拟索鞍位置, 给悬索桥的设计、施工和监控等提供参考, 提出了一种索鞍位置的解析算法。该算法考虑了主缆与索鞍间摩阻力对索鞍位置的影响, 根据欧拉公式, 推导了摩阻系数的计算公式, 通过建立索鞍数学模型和胡克定律, 提出了主缆与索鞍间索鞍摩阻力计算方法。从力学和几何关系出发, 建立基于弹性悬链线和静力平衡方程的索鞍计算模型, 推导了基于初始索鞍位置坐标与平衡状态索鞍位置坐标间偏差的计算公式, 引入雅克比矩阵, 通过牛顿迭代法求解, 使得偏差小于某一允许限值, 即可认为索鞍单元位于平衡位置, 同时推导了索鞍单元的切向刚度矩阵。结合解析算法, 引入温度伸缩杆的概念, 给出了一种适用于有限元分析与数值算法相结合的索鞍模拟方法, 可用于精确模拟悬索桥索鞍在施工过程中的顶推, 提高主缆在施工过程中线形的计算精度, 将算法通过 MATLAB 程序进行迭代计算。最后, 通过 2 组算例对比验证了该算法的可靠性, 并通过改变摩阻力的取值, 分析了摩阻力对索鞍位置的影响趋势。研究结果表明: 提出的解析算法可精确模拟索鞍位置, 公式收敛性好; 摩阻力对索鞍位置的影响较小, 简化计算中可以忽略, 但在精确分析尤其是大跨、多跨悬索桥受力分析时, 应予以考虑。

关键词:桥梁工程; 悬索桥; 解析算法; 索鞍位置; 预偏量; 摩阻力

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.007

Exact algorithm for cable saddle of suspension bridge influences by frictional resistance

HE Shuan-hai¹, CHEN Ying-hao², LI Yuan¹

(1. Key Laboratory of Old Bridge Detection Reinforcement Technology Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To simulate the position of cable saddle in suspension bridge analysis and calculation precisely, and provide references for the design, construction, and monitoring of suspension bridges, an analytical algorithm were proposed. The influence of frictional resistance between the main cable and cable saddle on the cable saddle position was considered in the algorithm. The calculation formula of the friction coefficient was derived using Euler's formula. The mathematical model and Hooke's law of the saddle was established, and the calculation method of the friction between the main cable and saddle was determined. The cable saddle calculation

收稿日期: 2018-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878057); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161012);

广东省交通运输厅科技项目(科技-2016-02-16)

作者简介: 贺拴海(1962-), 男, 陕西洛川人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: heshai@chd.edu.cn.

model was determined on the basis of elastic catenary and static equilibrium equation, considering the relation between mechanics and geometry. The calculation formula was derived based on the deviation between the coordinates of the original cable saddle position and the position of cable saddle in balanced state. Jacobian Matrix was introduced to cyclically solve this problem through Newton's method, cyclic iteration significantly decreases the deviation value considering the prescribed limit, and the cable saddle elements were assumed to achieve balanced position. At the same time, the tangent stiffness matrix was deduced. A cable saddle simulation method which applicable to finite elements was proposed, and the concept of temperature retractable pole was used in simulating the cable saddle of suspension bridge during construction, combined with the analytical algorithm and numerical algorithm. The calculating accuracy of alignment of the main cable during construction was improved, and iterative computation of the MATLAB program was used. The reliability of the algorithm was validated, by comparing two examples, and the trend of the influence of frictional resistance in cable saddle position was demonstrated, by changing the value of frictional resistance. The results show that the proposed analytical algorithm can exactly simulate the cable saddle position, and has good convergence. The influence of frictional resistance on cable saddle position is negligible. Thus, it may be ignored in a simplified calculation. However, especially in force analysis for the long span and multi-span suspension bridges, the influence should be taken into account. 2 tabs, 7 figs, 27 refs.

Key words: bridge engineering; suspension bridge; analytical algorithm; cable saddle position; pre-deviation; frictional resistance

0 引言

主缆是悬索桥的主要承重构件,悬索桥完成后实际主缆线形与设计主缆线形是否一致,是评价悬索桥施工质量的重要依据^[1-2]。索鞍是悬索桥的重要组成部分,起到支撑和转向主缆的作用。索鞍的位置不准确,不但会影响悬索桥的主缆线形,还会给施工控制带来不可忽略的误差,导致主缆在索鞍附近坐标偏差大,甚至造成桥塔偏位^[3]。主缆架设完成后,主缆线形几乎无法调整,因此索鞍位置的精确计算是非常重要的。

悬索桥主缆与索鞍鞍座的切点在施工过程中是不断变化的,关于索鞍的空间位置确定研究较多。Pevrot 等通过建立悬索桥主缆的计算模型,由力学和几何关系顺延悬链线离合点得到交点^[4]。罗喜恒假定一个索鞍预偏量,建立主缆与索鞍在切点处的平衡方程,求得索鞍处主缆的无应力长度,通过不断修正主缆在索鞍上的切点确定索鞍的位置^[5],但其提出的算法需要通过试算不断修正假定的索鞍预偏量和主缆预索鞍切点位置直到满足算法收敛。李传习等通过主缆与索鞍分离计算,采用顺延悬链线交点定义法,推导了复合圆曲线索鞍位置的解析公式,给出合理的迭代初值,利用牛顿拉夫森算法得到复

合圆曲线索鞍位置,并给出了索鞍位置的近似算法^[6],但其提出的索鞍精确算法的雅可比矩阵达到 8 阶,且需要极为合理的约束条件和初值才能保证算法收敛。李传习还通过假定一个初始预偏量,以计算出的不平衡力(矩)系数小于容许值得到索鞍位置^[7]。王邵锐等在索鞍预偏量影响矩阵中计入了预偏量初值的影响,考虑了摩阻力对索鞍位置主缆应力长度的影响,根据索鞍处不动点,通过空缆状态索鞍与主缆几何和受力关系得到索鞍位置方程,采用牛顿拉夫森法,通过计算雅克比矩阵并修正初值使其满足索鞍位置精度要求^[8],其虽然考虑了摩阻力对索鞍位置的影响,但是缺少名义摩阻系数的定义和推导,且其雅克比矩阵达到 11 阶,计算代价大并同样需要较为精确的合理初值和约束条件才能保证收敛。李乔等通过模型试验详细研究了主缆与鞍座间摩擦力的组成,并给出了多塔悬索桥主缆与鞍座间名义摩阻系数的取值范围^[9-11]。

根据 McDonald 等提出的基于多个滑轮的绳索分析方法^[12]和魏建东等提出的分离式鞍座的索鞍分析方法^[13],本文基于上述已有研究,对主缆与鞍座摩擦特性进行详细分析,计入了摩阻力对索鞍位置的影响,借助一组内部变量的方法^[12-13],建立索鞍的计算模型,有效解决了上述已有研究中存在的

计算代价大、计算效率低和不易收敛等问题。

1 主缆与索鞍鞍座摩阻力

1.1 名义摩阻系数的确定

鞍座与主缆间的摩阻力主要由主缆与索鞍承缆槽底接触面的摩阻力 f_b 和承缆槽侧壁接触面的摩阻力 f_s 组成(图1)。部分悬索桥在安全储备不足的情况下,还会采用在鞍座槽内加设隔板的方式提高摩阻力^[14]。鞍座与主缆间的摩阻系数沿纵向是不同的,实际工程设计中,摩阻系数 μ 取一个综合各项因素的固定当量,名义摩阻系数即为上述几种摩阻力的综合表征值。

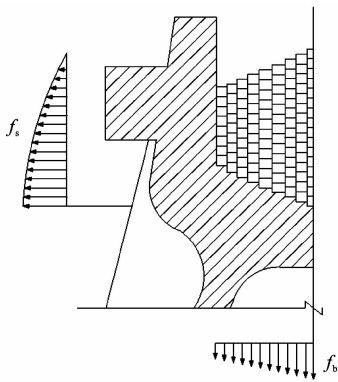


图1 承缆槽受力示意

Fig.1 Schematic of force on cable-bearing trough

主缆与索鞍接触段及微段示意如图2所示。图中, B 、 C 分别为主缆在鞍座上的左右切点, 切点 B 、 C 处主缆拉力分别为 T_1 、 T_2 , 切点对应圆心角为 θ 。取一微段 dl , 微段两端拉力分别为 $T+dT$ 和 T , 对应圆心角为 $d\theta$ 。

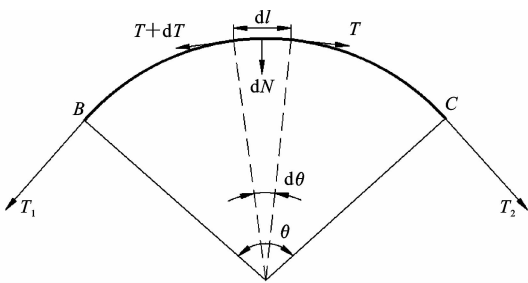


图2 主缆与索鞍接触段及微段示意

Fig.2 Schematic of contact segment and micro-segment of main cable and cable saddle

微段拉力产生的竖向压力 dN 为

$$dN = 2T \sin(d\theta/2) \approx T \sin(d\theta) \approx T d\theta \quad (1)$$

微段摩阻力 df 为

$$df = \mu dN = \mu T d\theta \quad (2)$$

由微段两端拉力差值 dT 与微段摩阻力 df 相等有

$$dT = \mu T d\theta \quad (3)$$

将式(3)沿着 BC 弧长进行曲线积分有

$$\int_{T_2}^{T_1} \frac{1}{T} dT = \int_0^\theta \mu d\theta \quad (4)$$

将式(4)积分得摩阻系数 μ 为

$$\mu = \frac{\ln(T_1/T_2)}{\theta} \quad (5)$$

主缆与承缆底槽的摩擦作用占主缆与鞍座总摩擦作用的绝大部分^[11,15], 计算中未考虑主缆与承缆槽侧壁接触面的横向水平压力。当主缆与索鞍间达到临界滑移状态时, 名义摩阻系数 $\mu_n = \mu$, 而名义摩擦因数是由材料摩阻系数和索鞍结构形式等共同决定的。

1.2 摩阻力的确定

索鞍计算模型示意如图3所示, 以索鞍圆弧形鞍槽的圆心 O 为原点建立坐标系 XOY 。实际工程中, 索鞍段主缆是不允许与索鞍完全脱离的, 一般在索鞍中心线附近将主缆与索鞍固定, 本文称之为索鞍不动点, 以 Q 表示, 为已知点。

为便于计算, 建立如图3所示的独立变量向量 $Z = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]$, 其中: Z_1 为左侧主缆在索鞍上的切点即左切点 B 处的主缆拉力 T_1 ; Z_2 为索鞍不动点 Q 沿圆弧逆时针绕原点 O 到左切点 B 的转角; Z_3 为索鞍不动点 Q 沿圆弧顺时针绕原点 O 到右切点 C 的转角; Z_4 为 IB 段主缆的无应力长度; I 、 J 分别为节点。

左切点 B 的坐标可由索鞍不动点 Q 表示为

$$x_B = -R \sin(Z_2 - \theta_Q) \quad (6)$$

$$y_B = R \cos(Z_2 - \theta_Q) \quad (7)$$

同理, 右切点 C 的坐标为

$$x_C = R \sin(Z_3 + \theta_Q) \quad (8)$$

$$y_C = R \cos(Z_3 + \theta_Q) \quad (9)$$

左、右切点到索鞍不动点的索段长度分别为

$$s_1 = R(Z_2 - \theta_Q) \quad (10)$$

$$s_2 = R(Z_3 + \theta_Q) \quad (11)$$

根据胡克定律, 考虑索鞍弧面与主缆间的摩擦^[8], 由式(6)~式(11)得到主缆与索鞍摩阻力 f 计算为

$$f = \frac{Z_1}{\mu(Z_2 + Z_3)} [1 - e^{-\mu(Z_2 + Z_3)}] \quad (12)$$

式中: x_B 、 y_B 分别为左切点 B 的水平和竖向坐标; x_C 、 y_C 分别为右切点 C 的水平和竖向坐标; θ_Q 为索

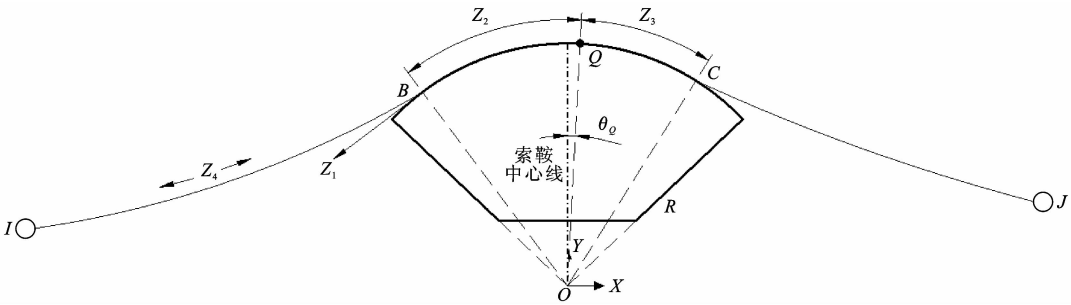


图 3 索鞍计算模型

Fig. 3 Calculation model for cable saddle

鞍不动点 Q 沿圆弧绕原点 O 到索鞍中心线的夹角;
 R 为索鞍弧面半径。

2 索鞍位置计算

2.1 基本假定

- (1) 主缆是理想柔性的, 既不能受压也不能受弯。
- (2) 主缆的材料符合胡克定律, 其应力应变符合线性关系。
- (3) 主缆的横截面面积在外荷载作用下变化微小, 计算时忽略微小变化的影响。

2.2 索单元用索端力表示的基本公式

基于基本假定, 主缆可用节点间沿其无应力长度均匀分布自重荷载作用下的弹性悬链线模拟, 如图 4 所示。将主缆弹性悬链线单元水平距离差 S 和竖直高差 H 用索端力表示, 其关系式分别为

$$S=g_1\left[\frac{1}{w}\ln\left(\frac{t_I-g_2}{t_J+g_4}\right)-\frac{L_0}{EA}\right]$$
 (13)

$$H=\frac{t_J-t_I}{w}\left(\frac{t_J+t_I}{2EA}+1\right)$$
 (14)

式中: g_1 、 g_2 分别为节点 I 处主缆张力的水平和竖

直分量; g_3 、 g_4 分别为节点 J 处主缆张力的水平和竖直分量; t_I 、 t_J 分别为节点 I 、 J 处的主缆张力; w 为单位长度主缆的质量; A 为主缆横截面面积; E 为主缆弹性模量; L_0 为节点间主缆无应力长度。

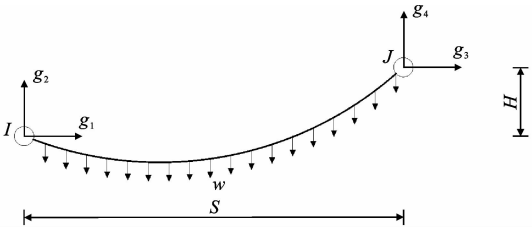


图 4 主缆弹性悬链线单元

Fig. 4 Elastic catenary element of main cable

2.3 索鞍位置确定

对于一段安放在索鞍上的主缆单元, 其处于平衡状态时左节点为 I , 右节点为 J , 其位置可根据索鞍不动点 Q 和独立变量 Z 取某一特定值唯一确定。当给定该主缆单元一个初始位置即给定一个初始独立变量 Z 时, 其左节点为 I' , 右节点为 J' , 如图 5 所示。设节点 I' 与 I 的水平偏差和竖直偏差分别为 r_1 、 r_2 , 节点 J' 与 J 的水平偏差和竖直偏差分别为 r_3 、 r_4 , 为方便迭代求解, 将偏差 $r_1 \sim r_4$ 组成偏差矢量 r 。

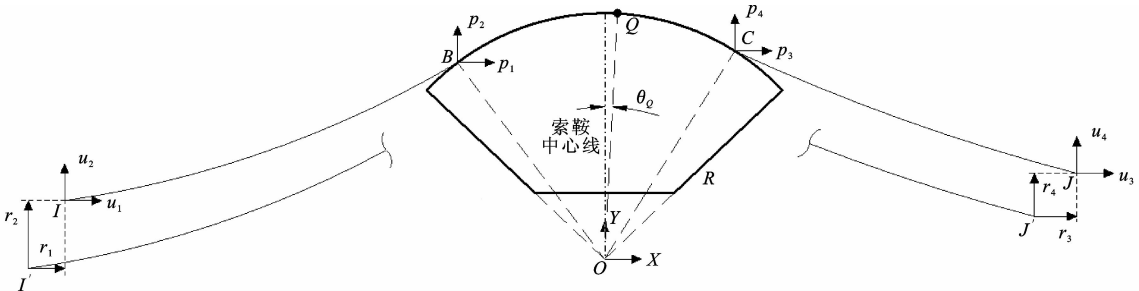


图 5 索鞍力和偏差示意

Fig. 5 Schematic of cable saddle force and deviation

根据索鞍不动点 Q 表示的切点坐标和摩阻力关系[式(6)~式(12)]及弹性悬链线的水平和垂直投影长度解析式[式(13)、式(14)], 可得到偏差矢量

r 的各分量为

$$r_1=x_I-\left\{R\sin(Z_2-\theta_Q)+p_1\cdot\right.$$

$$\left[\frac{1}{w} \ln \left(\frac{t_B - p_2}{t_I + u_2} \right) - \frac{L_1}{EA} \right] \} \quad (15)$$

$$r_2 = y_I - \left[R \cos(Z_2 - \theta_Q) - \frac{t_I - t_B}{w} \cdot \left(\frac{t_I + t_B}{2EA} + 1 \right) \right] \quad (16)$$

$$r_3 = x_J - \left\{ R \sin(Z_3 + \theta_Q) + p_3 \left[\frac{1}{w} \cdot \ln \left(\frac{t_C - p_4}{t_J + u_4} \right) - \frac{L_2}{EA} \right] \right\} \quad (17)$$

$$r_4 = y_J - \left\{ R \cos(Z_3 + \theta_Q) - \frac{t_J - (t_C + f)}{w} \cdot \left[\frac{t_J + (t_C + f)}{2EA} + 1 \right] \right\} \quad (18)$$

由主缆水平力及上下文关系有

$$t_B = Z_1 \quad (19)$$

$$t_C = Z_1 \frac{\cos(Z_2 - \theta_Q)}{\cos(Z_3 + \theta_Q)} \quad (20)$$

式中: u_1, u_2, u_3, u_4 分别为节点 I, J 对应的节点力; p_1, p_2, p_3, p_4 分别为切点 B, C 对应的内力; t_B 为左切点 B 处的主缆拉力; t_C 为右切点 C 处的主缆拉力; x_I, y_I 分别为节点 I 的水平和竖向坐标; x_J, y_J 分别为节点 J 的水平和竖向坐标; L_1 为左跨主缆 IB 间的无应力长度(即 Z_4); L_2 为右跨主缆 CJ 间的无应力长度。

根据牛顿迭代法,微小的独立变量增量 $\Delta \mathbf{Z}$ 产生微小的偏差增量 $\Delta \mathbf{r}$, 则 $\Delta \mathbf{r}$ 可由下式近似表示

$$\Delta \mathbf{r} \approx \mathbf{j} \Delta \mathbf{Z} \quad (21)$$

式中: \mathbf{j} 为 4 阶雅克比矩阵, 其元素 $j_{ij} = \partial r_i / \partial Z_j, i, j$ 分别取 1, 2, 3, 4。

使偏差减小的独立变量增量可表示为

$$\Delta \mathbf{Z} \approx \mathbf{j}^{-1} (-\mathbf{r}) \quad (22)$$

通过牛顿迭代法求解,直到各偏差量小于预期的限值,此时可认为索鞍单元位于平衡位置。

现推导索鞍单元的切线刚度矩阵。当节点产生微小的位移时,为了保持平衡,节点也会产生对应的微小节点力。根据胡克定律有

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{k} \Delta \mathbf{x} \quad (23)$$

式中: \mathbf{k} 为 4 阶单元切线刚度矩阵,其元素 $k_{ij} = \partial f_i / \partial x_j, i, j = 1, 2, 3, 4, f_i$ 为节点力; $\Delta \mathbf{x}$ 为节点坐标增量; $\Delta \mathbf{u}$ 为保持平衡产生的节点力增量。

节点力增量 $\Delta \mathbf{u}$ 可由独立变量 \mathbf{Z} 表示为

$$u_1 = -Z_1 \cos(Z_2 - \theta_Q) \quad (24)$$

$$u_2 = w L_1 - Z_1 \sin(Z_2 - \theta_Q) \quad (25)$$

$$u_3 = \left[Z_1 \frac{\cos(Z_2 - \theta_Q)}{\cos(Z_3 + \theta_Q)} + f \right] \cos(Z_3 + \theta_Q) \quad (26)$$

$$u_4 = w L_2 - \left[Z_1 \frac{\cos(Z_2 - \theta_Q)}{\cos(Z_3 + \theta_Q)} + f \right] \cdot \sin(Z_3 + \theta_Q) \quad (27)$$

节点力增量 $\Delta \mathbf{u}$ 与独立变量 \mathbf{Z} 的关系可表示为

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{b} \Delta \mathbf{Z} \quad (28)$$

式中: \mathbf{b} 为过程变量,其元素 $b_{ij} = -\partial u_i / \partial Z_j, i, j$ 分别取 1, 2, 3, 4, 可由式(24)~式(27)确定。

根据式(15)~式(18), $\Delta \mathbf{r}$ 和 $\Delta \mathbf{x}$ 存在如下关系

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{a} \Delta \mathbf{x} \quad (29)$$

式中: $\mathbf{a} = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$ 为 4 阶单位矩阵。

将式(21)、式(28)、式(29)代入式(23),可得到索鞍单元的切线刚度矩阵表达式为

$$\mathbf{k} = \mathbf{b} \mathbf{j}^{-1} \mathbf{a} \quad (30)$$

3 索鞍有限元模拟

在进行悬索桥的整体分析和施工过程计算时,通常要借助有限元分析软件。在进行有限元分析时,通常采用索鞍处主缆中心线的交点 IP 点简化模拟索鞍的方法^[16],该方法使得主缆在索鞍附近坐标与实际位置偏差很大,且不能考虑施工中主缆在索鞍上切点的变化^[17]。为解决上述问题,建立索鞍有限元离散模型如图 6 所示,结合本文算法,借助有限元分析软件,可达到悬索桥主缆精细化计算的目的。图 6 中,节点 1、3 分别为主缆在索鞍上的左、右切点;节点 2 为根据左右跨主缆线形确定的主缆在索鞍上的不动点;节点 5 为索鞍在桥塔上的锚固点;单元①、②为 2 个刚性杆;单元③为刚性温度伸缩杆;节点 2、4 之间采用刚性连接,也可考虑索鞍的刚度给定一个刚度量值; EI 为弹簧刚度。

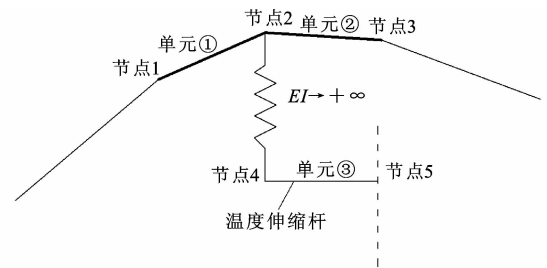


图 6 索鞍单元有限元离散

Fig. 6 Finite element discretization of cable saddle element

所谓温度伸缩杆,即人为给定温度伸缩杆热膨胀系数 α ,使得温度每上升或下降 1°C ,温度伸缩杆就伸长或缩短 1 m。模拟索鞍顶推时,可以通过改变温度伸缩杆单元③的温度达到顶推效果。吊索张拉及索鞍顶推过程中,主缆在索鞍上的切点会发生变化,可根据前文计算方法得到切点 1、3 的坐标修

正到有限元模型中。通过温度伸缩杆模拟顶推及手动修正切点 1、3 的位置,即可准确模拟悬索桥施工过程及合理成桥索鞍的精确位置,继而得到精确的主缆线形和索鞍预偏量。

4 算例验证

算例 1:山西汨河桥为三塔自锚式悬索桥,跨径布置为 50+80+168+168+80+50=596 m,主缆弹性模量 205 GPa,主缆截面面积 0.101 72 m²,索鞍半径 3.5 m,主缆单位长度质量 8.19 kN/m,主缆左标记点坐标为(−240.073,−38.016),索鞍不动点坐标为

(−168.470,0.018),主缆右标记点坐标为(−84.224,−32.435)。计算得到索鞍位置参数如表 1 所示。

算例 2:厦门海沧大桥为三跨连续钢箱梁悬索桥,跨径布置为 230+648+230=1 108 m,主缆弹性模量 200 GPa,主缆截面面积 0.408 98 m²,索鞍半径 5.5 m,主缆单位长度质量 32.91 kN/m,主缆左标记点坐标为(0.120,53.777),索鞍 IP 点坐标为(230,131.425),索鞍不动点坐标为(230.000,130.889),主缆右标记点坐标为(878.000,130.889),其他参数见文献[18]、文献[19],计算得到索鞍位置参数如表 2 所示。

表 1 三塔自锚式悬索桥索鞍位置

Tab. 1 Cable saddle position of three tower self-anchored suspension bridge

参数	设计采用	不考虑主缆与索鞍摩擦	考虑主缆与索鞍摩擦
左切点坐标(X_1, Y_1)	(−170.556 69, −1.752 20)	(−170.556 57, −1.7519 8)	(−170.556 75, −1.752 17)
右切点坐标(X_2, Y_2)	(−166.318 19, −1.672 45)	(−166.318 34, −1.672 23)	(−166.318 54, −1.672 03)
索鞍预偏量/cm	47.000	46.985	47.022

表 2 三跨连续钢箱梁悬索桥索鞍位置

Tab. 2 Cable saddle position of three span continuous steel box girder suspension bridge

参数	设计及监控采用	不考虑主缆与索鞍摩擦	考虑主缆与索鞍摩擦
左切点坐标(X_1, Y_1)	(227.661 67, 130.487 65)	(227.661 47, 130.487 55)	(227.660 69, 130.486 95)
右切点坐标(X_2, Y_2)	(232.416 43, 130.306 72)	(232.416 41, 130.306 68)	(232.415 72, 130.307 31)
索鞍预偏量/cm	54.500	54.492	54.557

注:设计及监控采用数据由文献[15]中得到。

本文算例通过 MATLAB 程序计算,算例结果表明其精确可靠,且在计算过程中迭代 3 次或 4 次即可收敛(容许偏差小于 1.0×10^{-6} m);考虑摩擦力的影响会增大索鞍预偏量。

根据本文算法,得到算例 1 的名义摩阻系数 $\mu_{n1}=0.24$,算例 2 的名义摩阻系数 $\mu_{n2}=0.25$,即其实际名义摩阻系数分别小于 0.24 和 0.25 时,主缆在该预偏量下会发生滑移。国内外很多学者对鞍座和主缆间的摩阻系数开展过研究和试验工作^[20-22],对同一桥梁试验得到的摩阻系数离散性较大。原因是试验模型与实际接触条件难以完全吻合,结构受力也有所不同。实际结构的名义摩阻系数很难达到 0.5,为分析摩阻系数与索鞍预偏量之间关系,结合文献[23]~文献[25],本文取 μ 为 0~0.6,考察其对索鞍预偏量的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可知:算例 1、算例 2 的索鞍预偏量均随名义摩阻系数的增大基本呈线性增大,且算例 2 的索鞍摩阻力对索鞍预偏量的影响比算例 1 大,这是由于算例 2 的主缆力较大及索鞍半径等参数不同导致的;两算例中摩阻力的影响均为毫米级,因此简化计算中可以

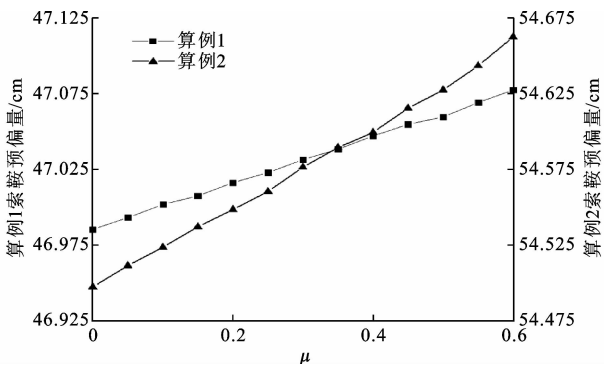


图 7 索鞍预偏量与摩阻系数关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of cable saddle pre-deviations and frictional resistance coefficients

忽略摩阻力对索鞍的影响;摩阻力对索鞍预偏量的影响仅为 0.1%,但其绝对值达到毫米级,且随着主缆力增大其影响呈增大的趋势,而主缆力与悬索桥跨径成正相关关系;根据文献[26]和瓯江北口三塔四跨悬索桥计算得到的结论,若施工期索鞍位置及索鞍顶推量计算不准确,造成成桥主缆偏差,中塔塔顶会出现很大的不平衡纵向水平力,该力会引起多跨悬索桥中塔与索鞍发生滑移、中塔两侧受力不均

等问题^[27];因此,在精细化计算尤其是大跨及多跨悬索桥分析计算中,应该考虑摩阻力对索鞍位置的影响。

5 结 语

(1)基于欧拉公式和胡克定律,推导了可考虑索鞍位置变化的主缆与索鞍摩阻力的计算公式;基于弹性悬链线理论,引入一组独立变量,提出了一种可考虑主缆与索鞍摩阻力的偏差算法,该算法收敛速度快,计算精度高。

(2)提出了一种由本文算法和有限元模拟相结合的悬索桥主缆与索鞍精确模拟方法,提高了悬索桥分析计算精度。引入温度伸缩杆的概念,可准确模拟悬索桥索鞍的顶推。

(3)对算例索鞍预偏量与摩阻系数的参数分析表明,索鞍预偏量随着摩阻力的增大呈线性增大,且增量较小(影响为毫米级),在简化计算中可忽略摩阻力的影响,但是在精确分析中,尤其是大跨及多跨悬索桥分析时应计入摩阻力对索鞍位置的影响。

(4)本文算法适用于平面索面悬索桥索鞍位置的精确计算,对于空间索面悬索桥索鞍位置的精确计算将是下一阶段的研究重点。

参考文献:

References:

- [1] 肖海波,俞亚南,高庆丰.自锚式悬索桥主缆成桥线形分析[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(11):1470-1473.
XIAO Hai-bo, YU Ya-nan, GAO Qing-feng. Analysis of finished main cable of self-anchored suspension bridges[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(11): 1470-1473.
- [2] 秦凤江,周绪红,梁博文,等.大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混结合段模型试验[J].中国公路学报,2018,31(9):52-64.
QIN Feng-jiang, ZHOU Xu-hong, LIANG Bo-wen, et al. Experiment on steel-concrete joint of hybrid girder of a long-span self-anchored suspension bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 52-64.
- [3] 龙关旭,黄平明,袁婷,等.非线性随机车流-自锚式悬索桥耦合振动分析系统[J].中国公路学报,2018,31(7):147-155.
LONG Guan-xu, HUANG Ping-ming, YUAN Ting, et al. Analytic system of nonlinear random traffic flow-self-anchored suspension bridge coupling vibra-

tion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 147-155.

- [4] PEVROT A H, GOULOIS A M. Analysis of cable structures[J]. Computers and Structures, 1979, 10(5): 805-813.
- [5] 罗喜恒.悬索桥主缆线形的鞍座影响[J].公路交通科技,2005,22(8):36-39,48.
LUO Xi-heng. Effect of saddle on cable shape of suspension bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8): 36-39, 48.
- [6] 李传习,王雷,刘光栋,等.悬索桥索鞍位置的分离算法[J].中国公路学报,2005,18(1):63-68.
LI Chuan-xi, WANG Lei, LIU Guang-dong, et al. Separate calculation method on suspension bridge saddle's position[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 63-68.
- [7] 李传习.混合梁悬索桥非线性精细计算理论及其应用[D].长沙:湖南大学,2006.
LI Chuan-xi. A refined non-linear analysis method for suspension bridge with hybrid beam and its application[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [8] 王邵锐,周志祥,高燕梅,等.悬索桥索鞍预偏量的牛顿-拉斐森算法[J].中国公路学报,2016,29(1):82-88.
WANG Shao-rui, ZHOU Zhi-xiang, GAO Yan-mei, et al. Newton-Raphson algorithm for pre-offsetting of cable saddle on suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 82-88.
- [9] 李乔,张清华,周凌远,等.武汉鹦鹉洲长江大桥主缆与中主鞍座间抗滑移试验研究报告[R].成都:西南交通大学,2011.
LI Qiao, ZHANG Qing-hua, ZHOU Ling-yuan, et al. The test report of slip behavior of cable against saddle for Yingwuzhou Yangtze River Bridge[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [10] 张清华,李乔.悬索桥主缆与鞍座间摩擦特性试验研究[J].土木工程学报,2013,46(4):85-92.
ZHANG Qing-hua, LI Qiao. Study on cable-saddle frictional characteristics of long-span suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 85-92.
- [11] 张清华,李乔,周凌远.悬索桥主缆与鞍座摩擦特性理论分析方法[J].中国公路学报,2014,27(1):44-50.
ZHANG Qing-hua, LI Qiao, ZHOU Ling-yuan. Theoretical analysis of cable-saddle friction characteristics for suspension bridges[J]. China Journal of Highway

- and Transport, 2014, 27(1): 44-50.
- [12] MCDONALD B M, PEYROT A H. Analysis of cables suspended in sheaves[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(3): 693-706.
- [13] 魏建东, 刘忠玉. 悬索桥结构分析中索鞍的精确模拟[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 114-118.
WEI Jian-dong, LIU Zhong-yu. A saddle model in finite element analysis of suspension bridges[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 114-118.
- [14] 叶觉明. 大跨度三塔悬索桥主缆系统施工技术创新及改进[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 6-12.
YE Jue-ming. Innovation and improvement of construction techniques for main cable systems of long span three-tower suspension bridges[J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 6-12.
- [15] 侯苏伟, 诸葛萍, 强士中, 等. 悬索桥 CFRP 主缆与鞍座间摩擦学性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 391-397.
HOU Su-wei, ZHUGE Ping, QIANG Shi-zhong, et al. Experimental investigation of friction properties between CFRP main cable and saddle of suspension bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 391-397.
- [16] 曹 竞. 潮河大桥基准索股架设计与控制[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2017, 29(3): 238-243.
CAO Jing. Calculation and control of datum strand erection of Chaohe Bridge[J]. Journal of Shenyang University: Natural Science, 2017, 29(3): 238-243.
- [17] 段茂军, 李建慧, 索小灿, 等. 混凝土自锚式悬索桥鞍座的精细化模拟方法[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2016, 38(6): 112-115, 123.
DUAN Mao-jun, LI Jian-hui, SUO Xiao-can, et al. Refined analysis method of saddle for self-anchored concrete suspension bridge[J]. Journal of Nanjing Technology University: Natural Science, 2016, 38(6): 112-115, 123.
- [18] 唐茂林, 沈锐利, 强士中. 大跨度悬索桥丝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.
TANG Mao-lin, SHEN Rui-li, QIANG Shi-zhong. 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.
- [19] 潘世建, 杨盛福. 东航道悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
PAN Shi-jian, YANG Sheng-fu. Cable suspension bridge over East Channel[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [20] TAKENA K, SASAKI M, HATA K, et al. Slip behavior of cable against saddle in suspension bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(2): 377-391.
- [21] HASEGAWA K, KOJIMA H, SASAKI M, et al. Frictional resistance between cable and saddle equipped with friction plate[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(1): 1-14.
- [22] 周凌远, 李 乔. 缆索与鞍座间的摩擦特性[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(2): 117-121.
ZHOU Ling-yuan, LI Qiao. Characteristics of friction between cable and saddle[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(2): 117-121.
- [23] 吉 林, 陈 策, 冯兆祥. 三塔悬索桥中塔主缆与鞍座间抗滑移试验研究[J]. 公路, 2007(6): 1-6.
JI Lin, CHEN Ce, FENG Zhao-xiang. Experimental study on anti-sliding between main cable and saddle of three tower suspension bridge[J]. Highway, 2007(6): 1-6.
- [24] 诸葛萍, 强士中, 任伟平, 等. 碳纤维主缆鞍座处抗滑移试验[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2011, 28(5): 395-399.
ZHUGE Ping, QIANG Shi-zhong, REN Wei-ping, et al. Experiment of slip behavior of CFRP cable against saddle[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2011, 28(5): 395-399.
- [25] DENG T, LUO X H. Study for reasonable value of friction coefficient between main cable and saddle[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(3): 72-76.
- [26] 李喜平. 三塔悬索桥结构行为特点研究[J]. 公路, 2013(5): 104-108.
LI Xi-ping. Study on structural behavior characteristics of three tower suspension bridge[J]. Highway, 2013(5): 104-108.
- [27] 陈永健, 房贞政, 张 超. 三塔自锚式悬索桥主索鞍约束体系研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 428-433.
CHEN Yong-jian, FANG Zhen-zheng, ZHANG Chao. Research on main saddle's restriction of self-anchored suspension bridge with three towers[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2011, 39(3): 428-433.