

文章编号:1671-6833(2009)04-0022-04

温度对悬索桥索股垂度的影响分析

任翔^{1,2}, 黄平明¹, 梅葵花¹, 庞志华³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
3. 北京公科固桥技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 针对悬索桥主缆索股线形对温度变化敏感的特点, 研究了主缆索股断面温度变化以及索塔塔身温度变化对索股线形的影响. 考虑主缆索股沿跨度为同一温度, 并根据无应力索长恒定不变的原理, 给出了空缆状态下索股温度变化与垂度关系的迭代方法, 以及温度导致的索塔偏位与索股垂度之间的相互影响, 及相应的修正方法. 比较了迭代修正法和有限元法分别计算得到的不同温差下索股垂度的改变量, 两种方法计算结果吻合较好, 最大偏差为 9 mm, 约为 3%. 分析表明, 运用迭代方法修正由于温差引起主缆索股垂度变化量是可行的.

关键词: 桥梁工程; 悬索桥; 温度效应; 索股线形; 垂度

中图分类号: U 448.25

文献标识码: A

0 引言

悬索桥在主缆架设阶段, 索塔和主缆都要受到外界日照温差的影响, 这种温差将会导致索塔和主缆的坐标与设计基准温度时的坐标产生较大的偏差, 从而影响到整个主缆索股的垂度和线形偏离设计值^[1-4]. 有关计算表明, 主缆跨度为 1 000 m, 失跨比 $f/l = 1/10$ 的悬索桥中跨主缆平均温度变化 1 °C, 对垂度的影响可达 30 mm^[5-7]. 所以, 主缆架设过程中, 应对索塔、索股实际温度进行现场测试, 准确分析温度效应, 实时调整因温度变化引起主缆索股线形的变化值, 对保证主缆架设精度有着极为重要的作用, 同时也是悬索桥施工控制的一项重要内容^[8-10].

笔者以四渡河悬索桥上部结构施工控制为背景, 分别给出了主缆和索塔塔身温度变化引起主缆索股垂度变化的修正值公式, 计算了主缆索股架设过程中的垂度修正值, 并与基于连续介质力学原理用广义非线性有限元方法编制的悬索桥结构分析系统 SBCC 计算结果进行对比分析, 以此来验证笔者提出的迭代方法的正确性.

1 主缆索股温度变化对其垂度的影响

假定索股温度变化不引起边、中跨索股张力变化. 如图 1 所示, 设计温度空缆状态下悬链线方程^[4-5]为

$$y = \frac{l}{2\zeta} \left[\operatorname{ch} \varphi - \operatorname{ch} \left(\frac{2\zeta x}{l} - \varphi \right) \right] \quad (1)$$

式中: $\varphi = \sinh^{-1} \left[\frac{\zeta c}{lsh\zeta} \right] + \zeta$, $\zeta = \frac{ql}{2H}$. H 为索股张力水平分力; l 为跨度; c 为主缆左右支点的高程差; q 为自重荷载.

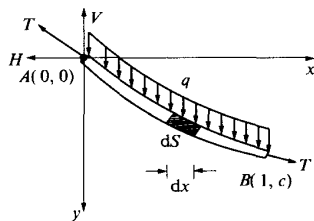


图1 索段示意

Fig.1 Scheme of cable segment

由式(1)可得到中跨垂度公式为

$$f_{\pi} = \frac{l}{2\zeta} \left[\operatorname{ch} \varphi - \operatorname{ch}(\zeta - \varphi) \right] \quad (2)$$

同时可得到弧长为

收稿日期:2009-03-30;修订日期:2009-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808018)

作者简介:任翔(1979-),男,内蒙古呼市人,长安大学博士研究生,主要从事桥梁结构理论研究, E-mail:renxiang798@163.com.

$$s = \int_0^s ds = \frac{l}{2\zeta} [\text{sh}(2\zeta - \varphi) + \text{sh}\varphi] \quad (3)$$

式(3)为中跨缆索的有应力总长计算公式。

在悬索 AB 中取一微分单元 ds , 得主缆自重下的弹性伸长为

$$\Delta s_q = \frac{T ds}{EA} = H \frac{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}{EA} dx,$$

$$T = H \sqrt{1 + (y')^2} = \frac{Hl}{2\zeta} [\text{sh}(2\zeta - \varphi) + \text{sh}\varphi].$$

式中: T 为主缆弦向张力; E 为弹性模量; A 为主缆断面积。

将其沿索长方向积分, 得

$$\Delta s_q = \int_0^s \frac{T}{EA} ds = \frac{ql^2}{4EA\zeta} + \frac{ql^2}{4EA\zeta^2} \left[\frac{1}{4} \text{sh}(4\zeta - 2\varphi) + \text{sh}2\varphi \right] \quad (4)$$

则主缆无应力长度为

$$s_0 = s - \Delta s_q = \frac{l}{2\zeta} [\text{sh}(2\zeta - \varphi) + \text{sh}\varphi] - \frac{ql^2}{4EA\zeta} \left\{ 1 + \frac{1}{\zeta} \left[\frac{1}{4} \text{sh}(4\zeta - 2\varphi) + \text{sh}2\varphi \right] \right\} \quad (5)$$

在非设计温度作用下的主缆无应力长度的另一种计算方法为

$$S_0' = S' - \Delta S_t - \Delta S_L \quad (6)$$

式中: S_0' 为非设计温度下主缆无应力长度; S' 为非设计温度下主缆有应力长度; ΔS_t 为温度引起的主缆伸长量; ΔS_L 为主缆拉力引起的弹性伸长。

由于主缆在非设计温度状态下的线形不能假定为悬链线^[5], 采用沿跨度方向的分段悬链线, 其方程^[1]为

$$y = \frac{l_i}{2\zeta_i} \left[\text{ch}\varphi_i - \text{ch}\left(\frac{2\zeta_i}{l_i}x - \varphi_i\right) \right] \quad (7)$$

$$\text{式中: } \varphi_i = \text{sh}^{-1} \left[\frac{\zeta_i c_i}{l_i \text{sh}\zeta_i} \right] + \zeta_i; \zeta_i = \frac{ql_i}{2H}$$

变形相容条件为

$$\sum_1^n c_i = c \quad (8)$$

索上任意一点应通过指定点, 假定跨中点为给定的失高坐标点。各索段有集中力作用点处满足受力平衡条件:

$$H \frac{dy_i}{dx_i} \Big|_{x_i=l_i} - H \frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}} \Big|_{x_{i+1}=0} = p_i \quad (9)$$

仅考虑主缆自重时, $p_i = 0$ 。

式(7)中主缆在非设计温度下的弧长为

$$S' = \sum \frac{l_i}{2\zeta_i} [\text{sh}(2\zeta_i - \varphi_i) + \text{sh}\varphi_i] \quad (10)$$

对应的主缆拉力引起的弹性伸长量为

$$\Delta S_L = \sum \left\{ \frac{ql_i^2}{4EA\zeta_i} + \frac{ql_i^2}{4EA\zeta_i^2} \left[\frac{1}{4} \text{sh}(4\zeta_i - 2\varphi_i) + \text{sh}2\varphi_i \right] \right\} \quad (11)$$

本文中, 主缆温度变化采用沿跨度方向为恒定值, 即 $\Delta t = k$ 。因此, 温度引起索长的变化量为

$$\Delta S_t = \int_0^s \alpha \Delta t dS = \sum \alpha \frac{kl_i}{2\zeta_i} [\text{sh}(2\zeta_i - \varphi_i) + \text{sh}\varphi_i] \quad (12)$$

由上述两种方式表达的主缆无应力总长是相等的, 因此有

$$s_0 = S_0' \quad (13)$$

式(13)是非线性方程, 需进行迭代计算。以中跨为例, 其迭代步骤为

(1) 假定一个 ζ ;

(2) 由式(3)和式(5)计算出 s 和 s_0 ;

(3) 根据式(7)、式(8)和式(9), 计算 c_i , 并使 $|\sum c_i - c| < \varepsilon$;

(4) 将第3步计算得到的 c_i 和假定的 ζ 代入式(6)、式(10)、式(11)和式(12)计算 S_0' ;

(5) 比较 $|s_0 - S_0'| < \varepsilon$ 是否满足要求 (ε 为给定的误差限)。如果 $|s_0 - S_0'| < \varepsilon$, 则停止迭代, 否则继续上述循环, 直至 $|s_0 - S_0'| < \varepsilon$ 为止。

按照中跨主缆垂度公式推导过程, 可得到边跨垂度计算式。

求得的 $f_{\text{中}} \sqrt{\lambda_{\text{边}}}$ 后, 即可求因温度变化引起主缆垂度的修正值。

2 索塔温度变化对主缆索股垂度的影响

若不考虑主缆的影响, 则索塔日照温差引起塔顶的水平位移可按裸塔计算, 模型见图2。

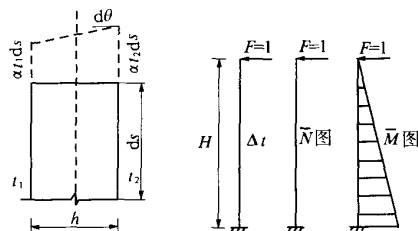


图2 索塔的温度模型

Fig. 2 Temperature model of bridge tower

假定塔身沿桥纵向两侧面的温度变化值分别为 t_1 和 t_2 , 则塔身温差 $\Delta t = t_2 - t_1$, 且假定在整个塔柱高度范围 H 内保持不变。塔柱温差引起塔顶总的水平位移 Δh 表示为

$$\Delta h = \sum \int \bar{N} \alpha \left(\frac{t_2 + t_1}{2} \right) ds + \sum \int \bar{M} \frac{\alpha (t_2 + t_1)}{h} ds$$

(14)

视温度沿塔高方面的变化非常小,故式(14)中的第 1 项近似取为零,最终得温度引起塔沿桥纵向水平位移为

$$\Delta h = \sum \int \bar{M} \frac{\alpha (t_2 - t_1)}{h} ds \frac{\alpha \Delta t}{2h} H^2$$
 (15)

式中:Δh 为塔顶偏位;α 为线膨胀系数;Δt 为塔身沿桥纵向温差;h 为索塔沿桥纵向宽度(对于变宽度,取平均值);H 为索塔高度。

实际上,索塔不是处于自由悬臂状态,索塔塔身温度变化引起的索塔偏位要受到主缆索股边、中跨水平张力的约束。因此,计算过程如下:

- (1) 按式(15)计算自由悬臂状态塔身温差引起的塔顶水平偏位 Δh₁;
- (2) 根据前述主缆线形的温度效应分析中算出的 ζ 值,计算作用在塔顶的不平衡水平张力 ΔH;
- (3) 按照悬臂结构计算水平力 ΔH 引起的塔顶偏位 Δh₂;
- (4) 改变中跨跨径为 L_中 + 2(Δh₁ + Δh₂),边跨跨径为 L_边 - (Δh₁ + Δh₂)。L_中 和 L_边 分别为设计温度下中跨跨径和边跨跨径。根据第 1 节的迭代方法,计算主缆中、边跨不平衡水平张力,重新进行上述计算,直至中、边跨水平力各自前后两次之差小于给定误差限;
- (5) 根据收敛的塔顶偏位和不平衡水平力,计算出此状态下中、边跨主缆的垂度。

3 算例

沪溶西高速公路四渡河特大桥是我国在建的一座主跨为 900 m 左右单跨双铰钢桁架加劲梁悬索桥,两边跨跨径分别为 113.65 m 和 207.18 m。主缆紧缆后的直径为 0.715 m。恩施岸索塔高 118.2 m,宜昌岸索塔高 113.6 m。四渡河特大桥总体布置见图 3 所示。

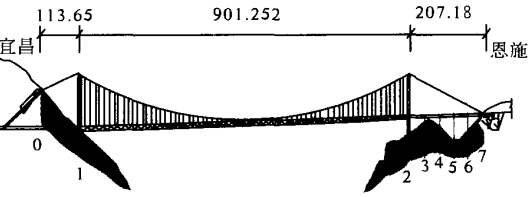


图 3 四渡河特大桥总体布置图(单位:米)

Fig.3 Structural drawing of Sidu river bridge(unit:m)

万方数据

3.1 主缆索股温度对索股垂度影响计算

按照第 1 节给出的迭代方法,编制了相应的计算软件,求解主缆索股在不同温差作用下(设计基准温度为 18 ℃)的中、边跨垂度改变量见表 1。

表 1 主缆索股温差引起垂度变化修正值

Tab.1 Main cable temperature leading to sagging variation

温差 /℃	垂度修正值/m		
	中跨	宜昌边跨	恩施边跨
3	0.060	0.038	0.053
2	0.040	0.025	0.035
1	0.020	0.013	0.018
0	0.000	0.000	0.000
-1	-0.020	-0.013	-0.017
-2	-0.041	-0.025	-0.035
-3	-0.059	-0.038	-0.053

由表 1 可知,主缆温度比设计基准温度每升高或降低 1 ℃,引起中跨主缆索股垂度变化量约为 ± 2 cm,宜昌边跨为 ± 1.3 cm,恩施边跨为 ± 1.8 cm。

3.2 索塔温度对主缆索股垂度影响计算

相关参数:宜昌岸索塔高 113.6 m,塔宽 6 m,恩施岸索塔高 118.2 m,塔宽 6 m,线膨胀系数 0.000 012。按照第 2 节所述的迭代方法,编制相应的软件计算得索塔塔身温度变化和主缆索股温度变化引起索塔偏位与索股垂度改变量的关系见表 2。

表 2 塔身温度变化引起主缆索股垂度改变量

Tab.2 Tower temperature leading to sagging variation

温差 /℃	索塔偏 位/m	垂度修正值/m		
		中跨	宜昌边跨	恩施边跨
3	0.032	0.063	0.250	0.210
2	0.023	0.045	0.179	0.148
1	0.011	0.022	0.086	0.072
0	0.000	0.000	0.000	0.000
-1	-0.011	-0.026	-0.086	-0.072
-2	-0.023	-0.045	-0.179	-0.148
-3	-0.032	-0.063	-0.250	-0.210

由表 2 可见,温度变化 1 ℃ 平均引起塔身偏位为 11 mm,而塔身偏位 1 mm 平均引起主缆垂度的改变量分别为:中跨 2 mm,宜昌边跨 7.8 mm,恩施边跨 6.5 mm。表明索塔塔身顺桥向温差对主缆索股垂度的影响较大,特别对两边跨

垂度影响显著.

3.3 温度对主缆索股垂度影响分析

将表 1 和表 2 计算得到的不同温差下索股垂度改变量与有限元程序 SBCC 计算结果进行对比分析,结果见表 3. 从表 3 可以看出,笔者提出的迭代计算法计算不同温差下的索股垂度改变量,与有限元程序 SBCC 计算结果吻合较好,最大偏差为 9 mm,约为 3%.

表 3 迭代法和 SBCC 程序计算结果比较
Tab.3 Comparison computed results between iteration method and SBCC program

温差 /℃	温度影响索股垂度修正值/m					
	中跨跨中		宜昌边跨跨中		恩施边跨跨中	
	迭代法	有限元法	迭代法	有限元法	迭代法	有限元法
3	0.123	0.119	0.288	0.297	0.263	0.270
2	0.085	0.082	0.204	0.210	0.183	0.186
1	0.042	0.040	0.099	0.103	0.090	0.091
0	0	0	0	0	0	0
-1	-0.046	-0.041	-0.099	-0.103	-0.089	-0.092
-2	-0.086	-0.082	-0.204	-0.210	-0.183	-0.187
-3	-0.122	-0.119	-0.288	-0.297	-0.263	-0.270

4 结论

笔者提出的修正温差引起的主缆索股垂度变化量的迭代方法,迭代速度快、计算精度高,并通过编制相应的软件程序,使计算较有限元程序更为方便、快捷.同时也从理论上解决了计算主缆索股、索塔塔身温度变化引起索股垂度变化的复杂

问题.

参考文献:

[1] 狄瑾,武隽.自锚式悬索桥主缆线形计算方法[J].交通运输工程学报,2004,4(3):38-43.

[2] 张永水,罗红,王祖华.温度对悬索桥空缆线形的影响分析[J].重庆交通学院学报,2005,24(5):21-24.

[3] 梅葵花.关于悬索桥施工控制中几个问题的探讨[J].桥梁建设,2005,(3):52-54.

[4] 黄平明,梅葵花,徐岳.大跨径悬索桥主缆系统施工控制计算[J].西安公路交通大学学报,2000,20(4):19-22.

[5] 沈慧,陈常松,颜东煌.非均匀变温场中主缆初始位形的迭代计算[J].长沙交通学院学报,2006,22(3):40-43.

[6] 林一宁.悬索桥架设期间主缆温度测试研究[J].桥梁建设,1997,(3):58-66.

[7] 沈锐利.悬索桥主缆系统设计与架设计算方法研究[J].土木工程学报,1996,29(2):3-9.

[8] 刘来君,贺拴海,宋一凡.大跨径桥梁施工控制温度应力分析[J].中国公路学报,2004,17(1):53-56.

[9] 李杰,李娜.自锚式悬索桥自由振动研究[J].郑州大学学报:工学版,2008,29(1):61-65.

[10] 张伟,潘方.悬索桥主缆的次应力分析[J].郑州大学学报:工学版,2005,26(4):29-32.

Influence of Temperature on Main Cable Sagging of Suspension Bridge

REN Xiang^{1,2},HUANG Ping-ming¹,Mei Kui-hua¹, PANG Zhi-hua³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Beijing Gongke Bridge Technology Co. Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: In view of the at characteristic that the cable shape is very sensitive on the temperature in the process of main cable erection. Influence of the temperature changes on main cable section and bridge tower to the cable shape was researched. According to invariable temperature models of the cable, correction methods of temperature changes leading to sagging variation under the unloaded cable condition were proposed based on length of non-stress wire strand is equal, and computational method about temperature changes of bridge tower section to give rise to cable sag variable values was given. Sagging values with methods of iteration are in agreement with the results of finite element program SBCC in different temperature conditions, and the maximum deviation value is 9 mm and is about 3%. It shows that the correction methods on temperature changes leading to sagging variation are feasible to adjust suspended cable shape.

Key words: bridge engineering; suspension bridge; temperature effect; suspended cable shape; sagging