

# 悬索桥锚跨张力控制方法研究\*

胡志坚, 黄健伟

武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063

**摘要:** 传统的索力调整方法未能有效考虑散索鞍偏角与锚跨张力之间的耦合关系, 具有一定盲目性和危险性。为安全快速地对悬索桥锚跨张力和散索鞍偏角进行调整, 基于散索鞍转动刚度, 研究了温度变化及边跨垂度偏差对散索鞍偏转角的影响。在此基础上, 结合某三塔悬索桥工程实践, 提出了一种考虑散索鞍转动效应的索力调整简化方法。实践结果表明: 温度变化是造成散索鞍偏转的主要原因; 推导出的温度变化及边跨垂度偏差与散索鞍偏角的关系式, 在工程实践中验证了其正确性及计算精度; 提出的锚跨张力调整简化方法, 能显著减少调整次数, 调索精度较高, 且有效避免索股发生滑移, 具有操作简单、节省工期以及安全性较高等优点。

**关键词:** 散索鞍转动刚度; 温度; 边跨垂度偏差; 索力调整; 散索鞍偏角

**中图分类号:** U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 04-0129-07

## Study on anchor span cable forces adjustment method of suspension bridge

HU Zhijian, HUANG Jianwei

School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

**Abstract:** The traditional cable forces adjustment method fails to consider the coupling relationship between the saddle angle and the anchor span cable forces effectively, which can be dangerous to some extent. In order to adjust the anchor span cable forces and the saddle angle of the suspension bridge in security and high speed, based on the rotation stiffness of saddle, the effects of temperature and sag deviation of side span on the saddle angle are studied. Combined with the practice of a three-tower suspension bridge, a simplified method of cable forces adjustment considering the rotation effect of the saddle is proposed. The results of practice show that: temperature change is the main reason for the deflection of the saddle. The relationship among the variation of temperature and the deviation of side span sag and the angle of splay saddle deflection is derived. Its correctness and calculation accuracy have been verified in the practice. The simplified method of cable forces adjustment can significantly reduce the adjustment times, thus a high cable adjustment accuracy is achieved, and can effectively prevent the cable strand from slipping, which has the advantages of simple operation, time saving and high safety.

**Key words:** rotating stiffness of saddle; temperature change; sag deviation of side span; cable forces adjustment; saddle angle

地锚式悬索桥主缆架设过程中, 锚跨索股张力控制应是悬索桥施工控制的重要内容<sup>[1-3]</sup>。为确保主缆索股在架设期间不发生滑移, 同时使成桥

主缆索力及散索鞍位置与设计值相符, 在主缆架设完成后必须对锚跨张力和散索鞍偏角进行调整。传统的索力调整方法未能有效地考虑散索鞍偏角

\* 收稿日期: 2020-03-16

录用日期: 2020-04-14

网络首发日期: 2020-09-15

作者简介: 胡志坚 (1974年生), 男; 研究方向: 桥梁设计理论与安全技术; E-mail: hzj@whut.edu.cn

通信作者: 黄健伟 (1994年生), 男; 研究方向: 桥梁结构分析; E-mail: huangjianwei@whut.edu.cn

与锚跨张力之间的耦合关系, 往往需要进行多次反复调整, 逐渐逼近设计状态, 具有一定的盲目性, 且每轮索力调整都需要反复装卸千斤顶, 操作繁琐, 延误工期<sup>[4]</sup>。

近年来, 众多学者对锚跨张力和散索鞍偏角的控制进行了一些研究。谭红梅等<sup>[5]</sup>指出温度变化对锚跨与边跨索力的影响不同, 会使索股两侧产生较大的不平衡力导致索股滑移, 但未分析不平衡力对散索鞍偏角的影响。唐茂林等<sup>[6]</sup>推导了索鞍移动刚度的计算公式, 但未考虑转动刚度, 不适用于摇轴式散索鞍。曾贤强<sup>[4]</sup>提出了一种根据实测散索鞍偏角与理论的差值, 确定索力调整量的方法, 但不能量化调整后温差和边跨垂度偏差对散索鞍偏角的影响以及调整量过大导致的索股滑移问题。沈锐利等<sup>[7]</sup>基于影响矩阵法建立了锚跨索弹性伸长量与散索鞍偏角的关系式, 提出了锚跨张力及散索鞍偏角施工调整的计算方法, 但该方法较为复杂。另外, 由于索股架设过程中, 边跨标高观测较为困难, 施工误差引起的边跨垂度偏差要明显高于中跨, 而锚跨较短时温差引起的散索鞍两侧不平衡力也相应增加。因此, 需要进一步开展散索鞍偏角因素和锚索索力调整简化方法研究。

本文基于散索鞍转动刚度, 分析了温度变化及边跨垂度偏差对散索鞍两侧不平衡力的影响, 导出了散索鞍两侧不平衡力与散索鞍偏转角的关系式, 提出了一种考虑散索鞍转动效应的索力调整方法。并结合具体工程实践, 验证了该方法的有效性。

### 1 散索鞍转动刚度

根据悬链线理论, 对于如图1所示的在自重作用下的柔性悬索段无应力长度为 $S_0$ , 索段截面积为 $A$ , 弹性模量为 $E$ , 沿索长方向自重集度为 $q$ , 两支点跨度为 $X$ , 高差为 $Y$ , 左端竖向反力为 $V$ , 右端竖向反力为 $V'$ 。左右两端水平张力相等, 设为 $H$ , 则有<sup>[6, 8]</sup>

$$X = \frac{HS_0}{EA} + \frac{H}{q} \left[ \ln \left( V + \sqrt{V^2 + H^2} \right) - \ln \left( V - qS_0 + \sqrt{(V - qS_0)^2 + H^2} \right) \right], \quad (1)$$

$$Y = \frac{qS_0^2 - 2VS_0}{2EA} - \frac{1}{q} \left( \sqrt{V^2 + H^2} - \sqrt{(V - qS_0)^2 + H^2} \right). \quad (2)$$

对式(1)、(2)求全微分得

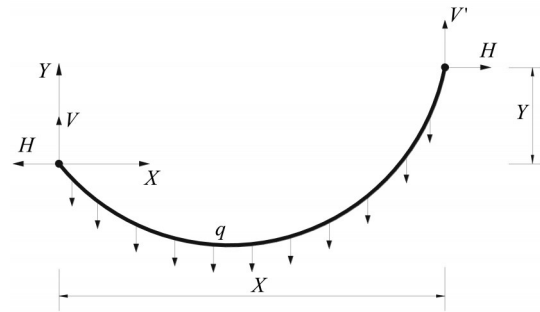


图1 自重作用下柔性悬索段受力图式

Fig. 1 Force diagram of flexible suspension section under the action of dead weight

$$\begin{aligned} dX &= \frac{\partial X}{\partial H} dH + \frac{\partial X}{\partial V} dV, \\ dY &= \frac{\partial Y}{\partial H} dH + \frac{\partial Y}{\partial V} dV. \end{aligned} \quad (3)$$

令

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{1}{\lambda} \frac{\partial Y}{\partial V}, \quad k_{12} = -\frac{1}{\lambda} \frac{\partial X}{\partial V}, \quad k_{21} = -\frac{1}{\lambda} \frac{\partial Y}{\partial H}, \\ k_{22} &= \frac{1}{\lambda} \frac{\partial X}{\partial H}, \quad \lambda = \frac{\partial X}{\partial H} \cdot \frac{\partial Y}{\partial V} - \frac{\partial X}{\partial V} \cdot \frac{\partial Y}{\partial H}, \end{aligned}$$

则

$$dH = k_{11}dX + k_{12}dY, \quad dV = k_{21}dX + k_{22}dY. \quad (4)$$

散索鞍受力如图2所示,  $\alpha$ 为散索鞍倾角, 锚跨主缆张力、竖向分力和水平分力分别为 $T_1$ 、 $V_1$ 、 $H_1$ , 边跨主缆张力、竖向分力和水平分力分别为 $T_2$ 、 $V_2$ 、 $H_2$ 。

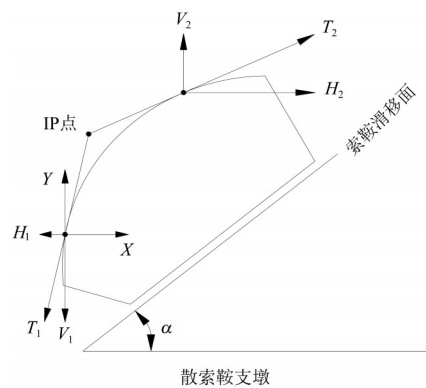


图2 散索鞍受力图式

Fig. 2 Force diagram of saddle

边跨、锚跨主缆内力在散索鞍滑动面上产生的不平衡分力为

$$F = (H_2 - H_1) \cos \alpha + (V_2 - V_1) \sin \alpha. \quad (5)$$

假设散索鞍沿滑移面移动距离 $ds$ , 由式(4)得主缆的内力变化为

$$dH = (k_{11} - k'_{11})dX + (k_{12} - k'_{12})dY,$$

$$dV = (k_{21} - k'_{21})dX + (k_{22} - k'_{22})dY. \quad (6)$$

由式(5)可得索鞍沿滑移面的不平衡力变化为

$$dF = dH \cos \alpha + dV \sin \alpha. \quad (7)$$

由

$$dX = ds \cdot \cos \alpha,$$

$$dY = dX \cdot \tan \alpha$$

可得索鞍沿滑移面的移动刚度为

$$\begin{aligned} K_t &= \frac{dF}{ds} \\ &= (k_{11} - k'_{11})\cos^2 \alpha + (k_{22} - k'_{22})\sin^2 \alpha \\ &\quad + (k_{12} - k'_{12} + k_{21} - k'_{21})\sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

由于散索鞍的偏转在主缆架设期间为小偏角, 可近似认为  $ds = \theta l_r$ ,  $l_r$  为 IP 点至散索鞍转动中心的距离, 故散索鞍的转动刚度为

$$\begin{aligned} K &= \frac{dF}{d\theta} \\ &= (k_{11} - k'_{11})l_r \cos^2 \alpha + (k_{22} - k'_{22})l_r \sin^2 \alpha \\ &\quad + (k_{12} - k'_{12} + k_{21} - k'_{21})l_r \sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

## 2 散索鞍偏角的影响因素

### 2.1 温度变化

**2.1.1 对锚跨张力的影响** 由于锚跨索股一般较短, 垂跨比很小, 可近似地将索股看作固定于散索鞍和锚头之间的直杆, 由温度变化引起的张力变化  $\Delta T_{mi}$  为

$$\Delta T_{mi} = \alpha_t \cdot E \cdot A \cdot \Delta t, \quad (10)$$

式中  $\alpha_t$  为索股的线膨胀系数;  $E$  为索股的弹性模量;  $A$  为索股截面积;  $\Delta t$  为温度变化值。

**2.1.2 对边跨张力的影响** 不同于锚跨, 边跨的垂跨比较大, 由温度变化引起索长改变而引起索股垂度变化的影响不可忽略, 因此边跨不能近似地看作两端固定的直杆<sup>[5, 9]</sup>。根据悬索桥的抛物线计算理论, 索长变化与垂度变化的关系式为

$$\Delta f = \frac{3\Delta s \sec^3 \alpha}{16n_1}, \quad (11)$$

$$\Delta s = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot s, \quad (12)$$

式中  $\Delta f$ 、 $\Delta s$  分别为垂度变化量和索长变化量;  $\alpha$  为边跨侧主缆的倾角,  $\alpha = \arctan(Cl/l)$ ,  $C$ 、 $l$  分别为索两端点竖直方向和水平方向的距离;  $n_1 = fl/l$ ,  $f$  为边跨的跨中垂度,  $s$  为索长。

将(12)代入(11), 得

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{3\alpha_t s}{16n_1 \cos^3 \alpha}. \quad (13)$$

将索的自重近似看作沿跨径方向的均布竖向

荷载  $q$ , 则水平张力随垂度变化的关系式为

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = -\frac{3ql^3 \sec^3 \alpha}{128f^3} \cdot \alpha_t \cdot s, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta T_{bi}}{\Delta t} = -\frac{3ql^3 \sec^4 \alpha}{128f^3} \cdot \alpha_t \cdot s, \quad (15)$$

式中  $\Delta H$ 、 $\Delta T_{bi}$  分别为温度变化造成边跨水平张力和索力的改变量, 其余符号含义同上。

由于实际架索时的温度一般不等于基准温度, 温度变化对边、锚跨索股索力影响不一样, 导致散索鞍两侧出现不平衡力, 从而使散索鞍产生偏转。

### 2.2 边跨垂度偏差

在实际主缆架设过程中, 各类施工误差会导致实际边跨垂度与设计值有偏差, 使得边跨侧主缆张力不等于设计张力, 在散索鞍两侧产生不平衡力, 使散索鞍产生偏转。

将主缆自重荷载近似看作沿跨径均布, 则主缆张力为

$$\begin{aligned} T(x) &= H \sqrt{1 + \left[ \frac{ql}{2H} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) - \frac{C}{l} \right]^2}, \\ H &= \frac{ql^2}{8f}. \end{aligned}$$

当  $x = 0$  时, 则边跨主缆张力为

$$T = H \sqrt{1 + \left( \frac{ql}{2H} - \frac{C}{l} \right)^2}. \quad (16)$$

边跨主缆张力  $\Delta T_{bf}$  与跨中垂度  $\Delta f$  的关系式为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_{bf}}{\Delta f} &= -\frac{ql^2}{8f^2} \sqrt{1 + \left( \frac{4f - C}{l} \right)^2} \\ &\quad + \frac{q(4f - C)}{2f \sqrt{1 + \left( \frac{4f - C}{l} \right)^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

当散索鞍解除临时约束后, 由于温度变化和垂度偏差带来的不平衡力  $\Delta T$  与散索鞍偏角  $\theta$  之间的关系式为

$$\theta = \frac{\Delta T}{K} = \frac{(\Delta T_{mi} - \Delta T_{bi}) + \Delta T_{bf}}{K}, \quad (18)$$

式中  $K$  为散索鞍转动刚度; 当架设温度高于基准温度时,  $\Delta T_{mi}$ 、 $\Delta T_{bi}$  均为正; 当实测边跨垂度高于设计垂度时,  $\Delta T_{bf}$  为正;  $\theta > 0$  时, 表示散索鞍相对于理论位置往边跨方向偏转。

## 3 锚跨张力调整方法

主缆索股架设完成后, 需要对锚跨索力进行精确调整, 使索力达到理论设计值, 散索鞍转动

至设计位置, 同时还要确保调整过程中不会出现索股滑移现象。

### 3.1 索力调整量计算

设主缆架设完成后, 散索鞍相对于设计位置偏转角实测值为 $\theta$ 。若索力调整时的温度和边跨垂度能与设计值相等, 则调整完成后散索鞍将偏转 $\theta$ 而回到设计位置; 若温度与边跨垂度达不到设计值, 散索鞍不会达到设计位置, 因此需要对 $\theta$ 进行修正。

据式(18)可知, 索力调整完成后散索鞍将偏转且

$$\theta' = \theta - \frac{(\Delta T_{mt} - \Delta T_{bt}) + \Delta T_{bf}}{K} \quad (19)$$

$\theta' > 0$  表示散索鞍向锚跨方向偏转。

在散索鞍转动过程中, 由于锚跨索股在散索鞍上的切点坐标变化导致的索力变化很小, 一般忽略不计, 则可认为散索鞍的转动使得锚跨索股弹性伸缩。由于散索鞍转动导致的第 $i$ 根索股的弹性伸缩量

$$\Delta L_i = \theta' \cdot r_n, \quad (20)$$

式中 $r_n$ 为第 $n$ 层索股在散索鞍转动时的转动半径。

设第 $i$ 根索股理论目标索力为 $T_{0i}$ , 当前实测索力为 $T_{si}$ , 索股弹性伸缩单位长度的索力变化量 $T_{di}$ 为

$$T_{di} = \frac{EA}{l_i}, \quad (21)$$

式中 $l_i$ 为第 $i$ 根索股的无应力长度。则该索股的索力调整量为

$$\Delta T_i = T_{0i} - T_{si} - T_{di} \Delta L_i. \quad (22)$$

上式即为考虑散索鞍转动情况下的单根索股的索力调整公式, 可以计算任意索股在当前状态下的索力调整量。对于锚梁式锚固系统, 索力调整的方式主要是增减垫板, 从而改变锚跨索股的弹性伸缩量。因此可以根据索力调整量求得所需增减垫板的厚度 $\Delta d_i$ 为

$$\Delta d_i = \frac{\Delta T_i l_i}{EA}. \quad (23)$$

### 3.2 索力调整量优化

通过式(23), 理论上可以一次性将索力调整至理论目标值, 散索鞍回到设计位置。但是, 对于单根索股, 若索力调整量过大, 可能会造成索股滑移, 因此需要确定每一轮次调整的极限值。

当某次调整中索力调整量大于在鞍槽中的摩擦力时, 索股会发生滑移, 影响边跨线形, 因此有必要对索股在鞍槽中的摩擦力进行研究。根据

《公路悬索桥设计规范》, 鞍槽内主缆抗滑移系数 $K_s$ 应满足

$$K_s = \frac{\mu \alpha_s}{\ln(F_{ct}/F_{cl})} \geq 2, \quad (24)$$

式中 $\mu$ 为索股与槽底或上下层索股间的摩擦系数, 取0.15。对于 $\mu$ , 文献[10]里根据华盛顿桥的实测情况, 认为 $\mu$ 取0.2已足够安全;  $\alpha_s$ 为主缆索股在鞍槽上的包角(弧度);  $F_{ct}$ 、 $F_{cl}$ 分别为索股紧边与松边的拉力。 $\mu$ 和 $K_s$ 的取值偏向保守, 在实际施工过程中, 安全系数可以适当减小, 一般取 $K_s \geq 1$ 即可<sup>[5]</sup>。取 $K_s=1$ , 代入式(24)并对公式两边取对数得

$$F_{cl} = F_{ct} \cdot \exp(\mu \alpha_s).$$

由此可知摩擦力

$$f_{\mu \max} = F_{ct} - F_{cl} = F_{ct} (1 - \exp(-\mu \alpha_s)). \quad (25)$$

在索力调整过程中, 要保证主缆索股不产生滑移, 分以下两种情况考虑:

① 当被调索股张力偏小时, 需进行张拉, 此时应保证张拉后的锚跨张力不大于边跨张力与散索鞍能提供的最大静摩擦力之和, 即

$$T_{si} + \Delta T_i \leq T_{b0} - \Delta T_{bt} + \Delta T_{bf} + f_{\mu \max}. \quad (26)$$

② 当被调索股张力偏大时, 需进行放松, 此时应保证放松后的锚跨张力与散索鞍能提供的最大静摩擦力之和不小于边跨张力, 即

$$T_{si} - \Delta T_i + f_{\mu \max} \geq T_{b0} - \Delta T_{bt} + \Delta T_{bf}. \quad (27)$$

式中 $T_{b0}$ 表示基准温度下边跨索股张拉力,  $\Delta T_{bt}$ 、 $\Delta T_{mt}$ 分别为由温度变化造成的边跨和锚跨索力变化量,  $\Delta T_{bf}$ 为由边跨垂度差异造成的索力变化量, 其余符号含义同上。

通过式(26)、(27)即可确定每轮次索力调整时各根索股的最大调整量。若按式(22)计算的调整量大于最大调整量时, 需要分轮次调整, 直至达到设计值。由于索力张拉过程中主要靠千斤顶的油压表进行控制, 存在施工误差, 同时垫板和锚梁的加工尺寸存在偏差, 因此在调整完成后需要再次对索力进行测试, 校核索力误差是否在设计容许范围之内, 如不满足, 应再次进行调整直至索力误差满足精度要求。索力调整计算的流程图见图3。

## 4 工程实例分析

### 4.1 工程简介

某三塔两跨悬索桥, 主缆跨度布置为(95 + 378 + 378 + 158)m, 主跨矢跨比1/9, 矢高42.0m,

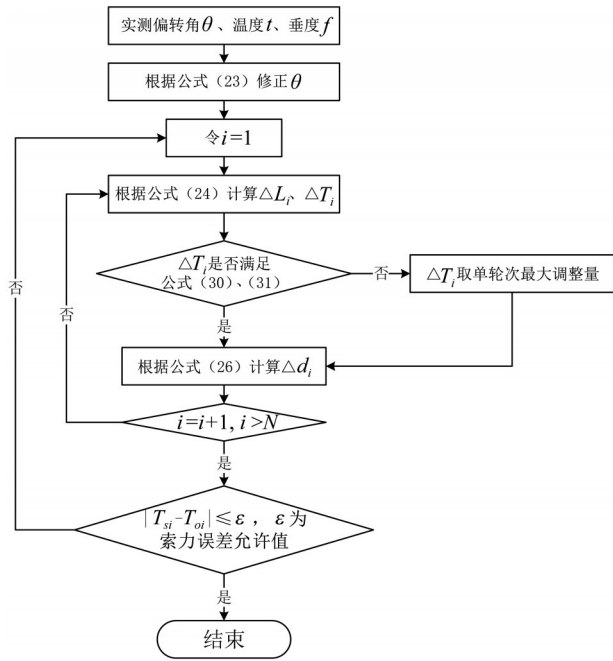


图3 索力调整计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of cable force adjustment

桥型布置图如图4所示。主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS)法形成,单根主缆由61根索股组成,每根索股由127丝直径为5.2 mm、公称抗拉强度为1860 MPa的锌铝合金镀层高强钢丝组成,全桥共两根主缆。单根索股面积 $A = 2\,695.8\text{ mm}^2$ ,弹性模量 $E = 2.04 \times 10^5\text{ MPa}$ ,线膨胀系数 $\alpha_t = 1.2 \times 10^{-5}$ 。在主缆架设过程中,大桥两端散索鞍相对于设计位置均往边跨发生了偏转,最大偏转角为 $0.040^\circ$ 。如图5,散索鞍锚跨侧支撑与鞍体间隙达2.1 mm。

4.2 相关参数取值及计算

以北边跨为例,跨径 $l = 94.477\text{ m}$ ,高差 $C = 56.021\text{ m}$ ,无应力长度 $S_0 = 168.011\text{ m}$ ,沿跨径方向线荷载 $q = 14.91\text{ kN/m}$ ,跨中垂度 $f = 2.679\text{ m}$ ,边跨近散索鞍处主缆水平分力 $H = 6\,209.623\text{ kN}$ ,竖向分力 $V = 2\,952.634\text{ kN}$ ,散索鞍倾角 $\alpha = 39^\circ$ ,IP点至散索鞍转动中心的距离 $l_r = 3\text{ m}$ 。

4.2.1 转动刚度 根据式(9),代入相关参数,

计算得到全部索股架设完成后的散索鞍转动刚度为 $7\,405.42\text{ MN/rad}$ 。

4.2.2 摩擦力 索股与槽底或上下层索股间的摩擦系数 $\mu = 0.2$ ,包角 $\alpha_s = 0.698$ ,索股紧边拉力 $F_{ct} = 133.5\text{ kN}$ ,根据式(25),计算索鞍在鞍槽中的最大静摩擦力 $f_{\mu\text{max}} = 17.5\text{ kN}$ 。

4.2.3 温度的影响 按照式(10),(15)计算温度变化对锚跨和边跨索股索力的影响分别为: $\Delta T_{mt}/\Delta t = -6.47\text{ kN/}^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_{bt}/\Delta t = -0.9\text{ kN/}^\circ\text{C}$ 。可以看出,当散索鞍固定时,温度变化对锚跨索力的影响远大于边跨。当温度变化为 $1^\circ\text{C}$ 时,散索鞍两侧单根索股不平衡力可达到 $5.57\text{ kN}$ 。本算例中索力调整时实测温度为 $29^\circ\text{C}$ ,则单根索股带来的散索鞍两侧不平衡力将达到 $50.13\text{ N}$ ,占初始索力的46%。

同时运用Midas Civil及本文理论方法分别计算温度变化在 $-20^\circ\text{C}$ , $-10^\circ\text{C}$ , $10^\circ\text{C}$ , $20^\circ\text{C}$ 时锚跨及边跨单根索股的索力变化量,如图6所示。可以看出,有限元计算结果与理论计算结果吻合。

4.2.4 边跨垂度的影响 根据式(17),代入相关参数,计算得边跨单根索股索力随垂度的变化量为 $-0.5\text{ kN/cm}$ 。通过边跨垂度控制,本项目实测的边跨垂度偏差为 $6\text{ cm}$ ,因此由于垂度差异造成的边跨索力变化量为 $3\text{ kN}$ 。

4.3 索力调整

以北锚跨1#索股为例,根据式(20),由散索鞍转动导致弹性伸缩量 $\Delta L_1 = 0.6\text{ mm}$ ;该索股单轮次的最大索力调整量 $\Delta T_{1\text{max}}$ 为 $15.5\text{ kN}$ 。索股弹性伸缩单位长度的索力变化量 $T_{d1} = 40.1\text{ kN/mm}$ 。

1#索股实测索力与理论值的差值为 $-5.1\text{ kN}$ ,根据式(22),则该索股的索力调整量 $\Delta T_1 = -5.1 - 40.1 \times 0.6 = -29.1\text{ kN}$ ,大于单轮次最大索力调整量,需要分两次调整,第一次调整量取 $15.5\text{ kN}$ ,所需增加的垫板厚度 $\Delta d_i = 0.4\text{ mm}$ 。

对其余索股进行了类似的调整,按式(22)计算的调整前索力调整量见图7。

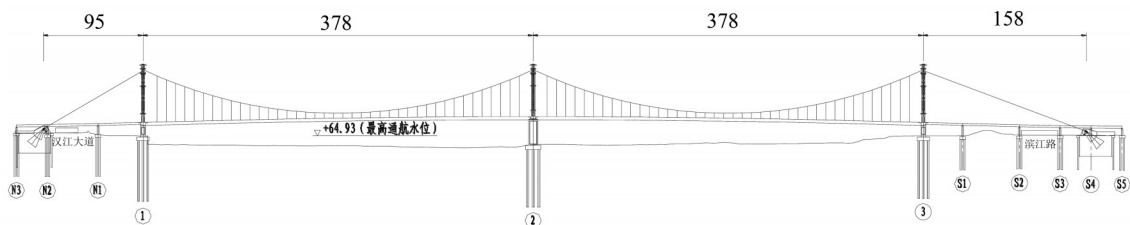


图4 桥型立面布置图(单位:m)

Fig. 4 Vertical layout of bridge (unit: m)



图5 索力调整前散索鞍偏角图

Fig. 5 Diagram of saddle deflection angle before cable force adjustment

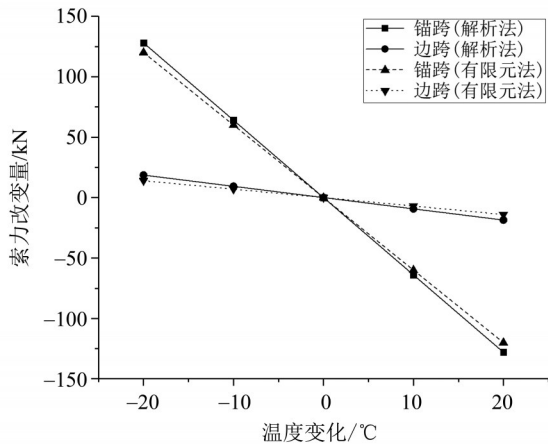


图6 锚跨及边跨索力与温度变化关系图

Fig. 6 Relationship between cable force and temperature of anchor span and side span

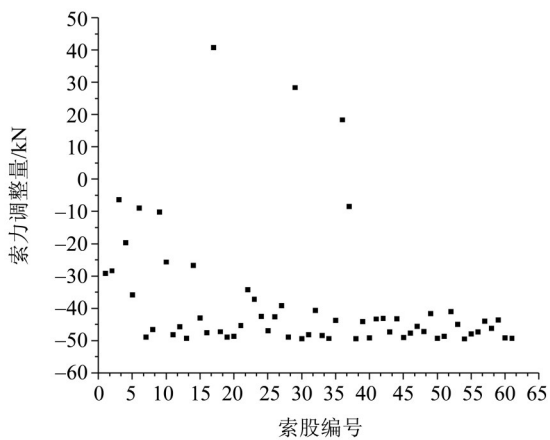


图7 索力调整量

Fig. 7 Cable force adjustment value

本项目共进行了三轮索力调整，各轮次索力调整结果如图8-10所示，可以看出，经过三轮调整后，索力偏差在3 kN以内，满足锚跨张力施工控制的精度要求。

通过以上的调整可以发现，新的锚跨张力调整方法可以考虑散索鞍转角与锚跨索力之间的耦

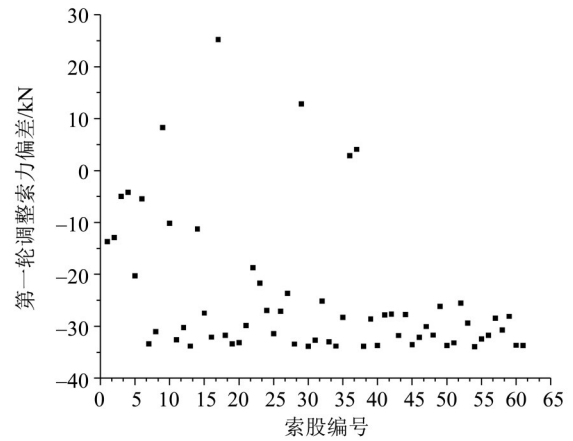


图8 第一轮调整索力与理论值偏差

Fig. 8 Deviation between cable force and theoretical value in the first round of adjustment

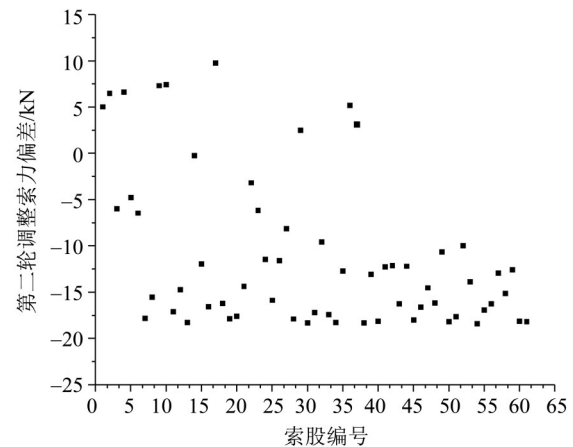


图9 第二轮调整索力与理论值偏差

Fig. 9 Deviation between cable force and theoretical value in the second round of adjustment

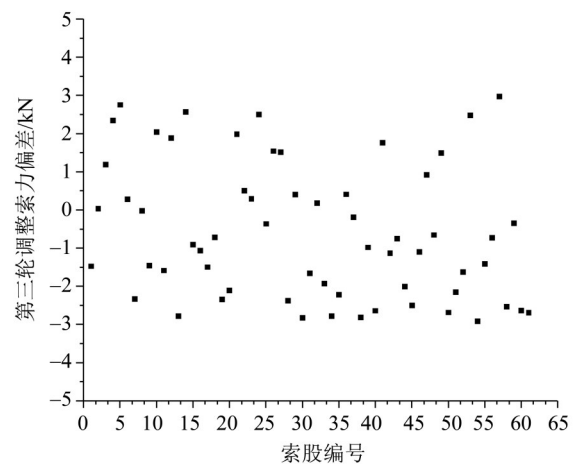


图10 第三轮调整索力与理论值偏差

Fig. 10 Deviation between cable force and theoretical value in the third round of adjustment

合关系,能显著减少调整次数,调索精度较高;同时,通过确定单次调整中的最大调整量,可以有效地避免索股发生滑移,保证边跨线形不发生改变;该法克服了传统调整方法的盲目性和危险性,能对锚跨张力进行有效的控制,具有操作简单、节省工期以及安全性较高等优点,可行性较好。

## 5 结 语

通过分析温度和边跨垂度偏差对散索鞍偏角的影响,结合某三塔悬索桥锚跨索股张力的调整实践,可以得到以下结论:

1) 温度变化对锚跨的影响远大于边跨,使得散索鞍两侧出现不平衡力,是造成散索鞍偏转的主要原因;

2) 本文基于散索鞍转动刚度,根据温度变化和边跨垂度偏差对散索鞍偏角的影响,推导出散索鞍偏角的计算公式,其正确性及计算精度已在工程实践中得到了印证;

3) 本文提出的考虑散索鞍转动效应的锚跨张力简化调整方法,具有显著减少调整次数、能有效避免索股发生滑移、节省工期以及调索精度较高的优点,已成功应用于工程实践。

### 参考文献:

- [1] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 悬索桥锚跨索股分析研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(12):45-49.  
LUO X H, XIAO R C, XIANG H F. Analysis study of anchor span strand for suspension bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(12):45-49.
- [2] 许汉铮,黄平明. 大跨径悬索桥主缆锚跨张力控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(5):32-34+41.  
XU H Z, HUANG P M. Cable tension control in anchor span of suspension bridge[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2002, 22(5):32-34+41.
- [3] 沈锐利,薛光雄. 悬索桥主缆丝股锚固力的计算方法探讨[J]. 桥梁建设, 2003(6):25-29.  
SHEN R L, XUE G X. Study of calculation methods for anchorage force of main cable wire strands of suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2003(6):25-29.
- [4] 曾贤强. 大跨度悬索桥锚跨索股振动特性及索力测试研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
ZENG X Q. A study on the vibration characteristics and cable force measurement of long span suspension bridges' anchor span cables[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [5] 谭红梅,肖汝诚. 不同温度下悬索桥锚跨索股的张力[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(9):122-126.  
TAN H M, XIAO R C. Strand tension in anchor-span suspension bridge at different temperatures[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(9):122-126.
- [6] 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 M L, SHEN R L, QIANG S Z. 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.
- [7] 沈锐利,王渊,王涛. 大跨度悬索桥锚跨索力及散索鞍偏角施工调整的计算方法[J]. 中国公路学报, 2017(5):81-88+103.  
SHEN R L, WANG Y, WANG T. Calculation method of adjustments of anchor span cable forces and saddle angle for long span suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017(5):81-88+103.
- [8] ANDREU A, GIL L, ROCA P. A new deformable catenary element for the analysis of cable net structures[J]. Computers & Structures, 2006, 84(29/30):1882-1890.
- [9] 刘扬,朱翼舟,王达. 悬索桥主缆索股锚跨张力控制研究[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(3):21-24.  
LIU Y, ZHU J Z, WANG D. Control research on wire strand tension of main cable of suspension bridge at anchor span[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(3):21-24.
- [10] 小西一郎. 钢桥(第五分册)[M]. 戴振藩,译. 北京:人民铁道出版社, 1981.

(责任编辑 王海蓉)