

文章编号:1671-8879(2015)05-0057-08

大跨度悬索桥施工期主缆索股线形 区域分段控制法

王 达^{1,2}, 张永健³, 杨 琴^{1,2}, 刘 扬^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410064; 2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 湖南 长沙 410064; 3. 湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙 410001)

摘要:为实现对复杂温度环境下索股线形的精准控制,提出了基于悬索桥构造特点及地形特征的区域分段控制法,推导了索股垂度与长度、垂度与跨径、垂度与温度之间的关系表达式;可快速测定主缆索股温度场,计算出边、中跨的索股调整系数,继而确定索股调整量,实现索股线形的有效控制。研究表明:悬索桥施工过程中,主缆索股温度具有明显的时变性及随机性;根据控制精度要求及主缆索股材质特性,提出了等效温度法,从而提高了工作效率;边跨索股的调整系数具有较强的非线性特征,并随边跨索股垂度的变化而改变,而中跨的索股调整系数施工前后变化不大;结合桥位附近的地表地形,对主缆索股温度进行区域分段控制是合理可行的,提出的区域分段控制法效率高、精度好,且具有较强适用性。

关键词:桥梁工程;区域分段控制法;温度;主缆索股;调整系数

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Sub-regional and subsection linear control method during the construction of main cables strands for long-span suspension bridge

WANG Da^{1,2}, ZHANG Yong-jian³, YANG Qin^{1,2}, LIU Yang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410064, Hunan, China; 2. Key Laboratory for Safety Control of Bridge Engineering of the Ministry of Education and Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410064, Hunan, China; 3. Hunan Bureau of Expressway Administration, Changsha 410001, Hunan, China)

Abstract: In order to realize the precise control of the strands under complicated temperature condition, the sub-regional and subsection control method was proposed based on the structural characteristics and topographic features of suspension bridge. The expressions of relations between sag and length, sag and span, and sag and temperature were deduced. Then the temperature field of the strands could be determined rapidly with the proposed method, and the adjusted length of the strands could be calculated with the deduced relations. The results show

收稿日期:2015-04-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057701);国家自然科学基金项目(51308071,51378081);湖南省自然科学基金项目(13JJ4057);湖南省高校创新平台开放基金项目(12K076);国家留学基金委资助项目(201408430155);交通部应用基础研究项目(2015319825120);长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(201306)。

作者简介:王 达(1980-),男,湖南新邵人,副教授,工学博士,E-mail:yxwang2006@yeah.net。

that the temperature of the main cables strands has characteristic of time-variation and randomness. According to the requirements of control precision and the material properties of the main cable, the equivalent temperature method is put forward and proved to be efficient. The adjustment coefficients of side-span are highly nonlinear and easy to be affected with the changes of sag, while the adjustment coefficients of mid-span are more stable relatively. Considering the topography under the bridge site, the suggested sub-regional and subsection linear control method is reasonable and feasible for the temperature monitoring of the main cable strands. The results of the linear control for the main cable strands proves to be highly efficient, high-precision and applicable. 2 tabs, 12 figs. 17 refs.

Key words: bridge engineering; sub-regional and subsection control method; temperature; strands of main cable; adjustment coefficient

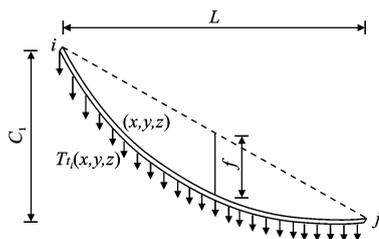
0 引言

悬索桥是超大跨径桥梁的首选桥型,主缆沿跨越方向分布的距离较长,被跨越的障碍物或构造物通常是江河、深谷或海峡等^[1-4],这些特殊的被跨越物使得悬索桥所处地形变得十分复杂,复杂的地形对应着复杂的局部气候环境,不同的局部气候环境对应着不同的大气温度场^[5-7]。大量工程实践及研究表明:悬索桥对温度变化极为敏感,其中主缆对温度的敏感程度表现得十分突出,尤其是在主缆施工过程中,主缆未成型、各组成索股处于自由状态^[8-9]。因此,主缆索股线形调整的最佳时段,通常选择在深夜零点至凌晨,尽量将环境温度影响降至最低,此举虽然有效地降低了环境温度的影响,但同时大幅地缩短了索股线形调整的时间,使得夜间索股线形调整的工作变得十分紧迫^[10-11]。因此,如何提高索股线形的控制调整效率显得十分重要,而索股线形的控制调整效率与计算方法的有效性、温度参数采集的实时性及准确性息息相关。

悬索桥索股以受轴向力为主,受温度荷载影响较大,施工过程中,索股线形受竖向荷载及温度荷载的高度耦合作用,对应的计算工作量巨大,加之索股调整控制的时间较短,显然一般计算方法不能满足现场施工要求。目前,悬索桥的计算理论主要有弹性理论、挠度理论和有限位移理论^[12],而在应用过程中,多以解析法与有限元法为主^[13-15]。可见,选择高效简洁的计算方法在索股调整控制过程中显得十分重要。为此,本文将基于既有悬索桥主缆施工控制的研究成果,提出一种悬索桥温度场测试控制方法,结合快捷计算方法,以实际工程为背景,对施工期索股线形进行控制研究。

1 主缆温度时变效应分析

采用有限元法对结构物内部时变温度进行分析时,在计算过程中可不受单元形状的影响。图1所示为索股在 t_i 时刻,任意 $k(x, y, z)$ 位置的温度,可用 T_{ki} 表示。



注: f 为计算矢高; C_i 为 i, j 锚固点之间的计算高度; L 为计算跨径。

图1 主缆索股线形

Fig. 1 Linear of main cable strands

若引入插值函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,可将该温度离散至相邻节点上,则 k 处,在 t_i 时刻的温度 T_{ki} 可通过插值函数以节点温度的形式表示为^[15]

$$T_{ki}(x, y, z) = f(T_{1t_i}, T_{2t_i}, \dots, T_{nt_i}) \quad (1)$$

式中: $T_{ki}(x, y, z)$ 为 k 处在 t_i 时刻的温度; T_{nt_i} 为第 n 号节点在 t_i 时刻的温度; $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为引入的插值函数。

基于实测值,并将其代入式(1)进行试算,即可得出插值函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的具体表达式,再引入形函数 N ,则索股内部温度可表示为^[11]

$$T = NT^e \quad (2)$$

式中: T 为索股整体温度矩阵; N 为被引入的形函数矩阵; T^e 索股单元温度矩阵。

大气环境中的热流量、大气温度及太阳辐射强度 s 之间的关系可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda(l_x \frac{\partial T}{\partial x} + l_y \frac{\partial T}{\partial y} + l_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \beta(T - T_a) - \alpha_s s \quad (3)$$

式中: λ 为混凝土热传导系数; T 为大气温度; n 为表面外法线方向; β 为中放热系数; T_a 为背阳处的气温; α_s 为热量吸收系数; s 为日辐射强度; l_x 、 l_y 、 l_z 为3个方向的余弦函数。

根据变分原理,可得到时变温度的泛函^[16]

$$\Pi(T) = \frac{\lambda}{2} \iiint_R \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz + \frac{1}{\alpha} \iiint_R \frac{\partial T}{\partial t} T dx dy dz + \int_c \left(\frac{1}{2} \beta T^2 - \beta T_a T \right) ds \quad (4)$$

若对索股单元进行精细化划分,即在单元足够小的条件下,式(4)可用各组成单元泛函值进行表述,即

$$\Pi(T) \cong \sum_e \Pi^e(T) \quad (5)$$

式中: $\Pi^e(T)$ 为各组成单元泛函。

对式(5)求解极小值时,即可得

$$\frac{\partial \Pi(T)}{\partial T_i} \cong \sum_e \frac{\partial \Pi^e(T)}{\partial T_i^e} = 0 \quad (6)$$

联立式(4)、式(5)及式(6),即可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi(T)}{\partial T_i} \cong \sum_e \frac{\partial \Pi^e(T)}{\partial T_i^e} &= \sum_e \left(\frac{1}{\alpha} \int_{R^e} \mathbf{N} \mathbf{N}^T dR \right) [\dot{T}]^e + \\ &\left(\int_{R^e} \lambda \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) dR + \right. \\ &\left. \int_s \alpha \mathbf{N} \mathbf{N}^T ds \right) T^e - \int_s \alpha T_a \mathbf{N}^T ds = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

令

$$\begin{cases} \mathbf{M}^e = \frac{1}{\alpha} \int_{R^e} \mathbf{N} \mathbf{N}^T dR \\ \mathbf{P}^e = \int_s \alpha T_a \mathbf{N}^T ds \\ \mathbf{K}^e = \int_{R^e} \lambda \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) dR + \\ \int_s \alpha \mathbf{N} \mathbf{N}^T ds \end{cases} \quad (8)$$

联立式(7)及式(8),即可得任意时刻温度刚度矩阵方程

$$\mathbf{M} \dot{T}_i + \mathbf{K} T_i = \mathbf{P}_i \quad (9)$$

式中: \mathbf{P}_i 为任意时刻 t_i ,温度作用下的单元节点荷载。

对式(9)进行求解,即可得出任意时刻 t_i 的节点温度。

2 主缆温度测试及线形调整

2.1 主缆温度区域分段控制

主缆施工期间,对于温度场的测试要求准确、同步、迅速,常规的方法虽然能满足一般施工条件要求,但对于复杂恶劣的特殊环境,常规的方法在使用过程中具有一定局限性。基于传统测试方法,提出了区域分段控制测试法,即首先将主缆沿跨径方向按边、中跨进行分区,再结合地形特点,将每跨进行分段,从而实现主缆沿跨径方向的区域分段,如图2所示。通过对每段主缆索股温度的同步监测,可得出整个主缆实时温度。

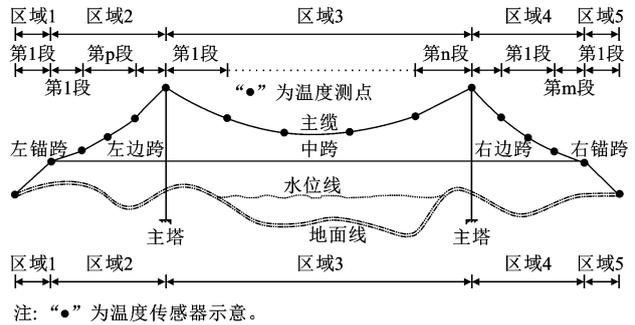


图2 实桥区域分段

Fig. 2 Sub-regional and subsection of bridge

根据图2所示的区域分段,在对应的分段控制点位置布置温度传感器,即可得出每段控制点温度 T_I 与 T_J ,现场实测数据分析结果发现,一般情形对于分段区间的索股端部温差不超过 1°C ,文献[1]及文献[15]的研究表明,索股温度梯度沿竖向分布温差也小于等于 1°C ,因此,当端点温差小于等于 1°C 时,即当控制点温度 T_I 与 T_J 差值较小时,对于 t_i 时刻第 k 段索股温度 T_{k_i} ,可取该段索股两端控制点温度的平均值进行等效计算,即

$$T_{k_i} = (T_I + T_J) / 2 \quad (10)$$

式中: T_I 及 T_J 分别为单段索股控制点 I 与 J 在 t_i 时刻的温度; T_{k_i} 为第 k 段索股在 t_i 时刻的等效温度。

根据胡克定律,温度作用下索股的伸长量与温度成正比,则索股的总伸长量可表示为索股各组成段的伸长量之和,即

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n \\ &= l_1 \Delta T_1 + l_2 \Delta T_2 + \dots + l_n \Delta T_n \\ &= \sum_{k=1}^n l_k \Delta T_k \end{aligned} \quad (11)$$

式中: ΔT_k 为第 k 段索股在 t_i 时刻的温度变化量; l_n 为第 n 段索股长度; Δl 为某区域范围内,在 t_i 时刻的索股总伸长量。

根据索股与温度之间的热胀关系,可得

$$\Delta l_{t_i} = l \Delta T_{t_i} \quad (12)$$

式中: ΔT_{t_i} 为索股在 t_i 时刻的温度变化量; l 为索股长度; Δl_{t_i} 为某区域范围内,在 t_i 时刻,索股总伸长量。

联立式(11)及式(12),即可求得当前区域范围内,索股的等效计算温度

$$\Delta T_{t_i} = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \Delta T_k}{l} \quad (13)$$

式中: ΔT_{t_i} 为某区域范围内索股在 t_i 时刻的等效计算温度变化量; l_k 为第 k 段索股长度。

2.2 主缆线形调整控制

悬索桥空缆状态下的线形为悬链线,可近似为抛物线,而抛物线主缆的长度计算,可表示为^[15-17]

$$\begin{aligned} S &= \int_0^L \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} dx \\ &= \frac{L^2}{16} \left[D_1 \sqrt{1+D_1^2} - D_2 \sqrt{1+D_2^2} + \right. \\ &\quad \left. \ln \left(\frac{D_1 \sqrt{1+D_1^2}}{D_2 \sqrt{1+D_2^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

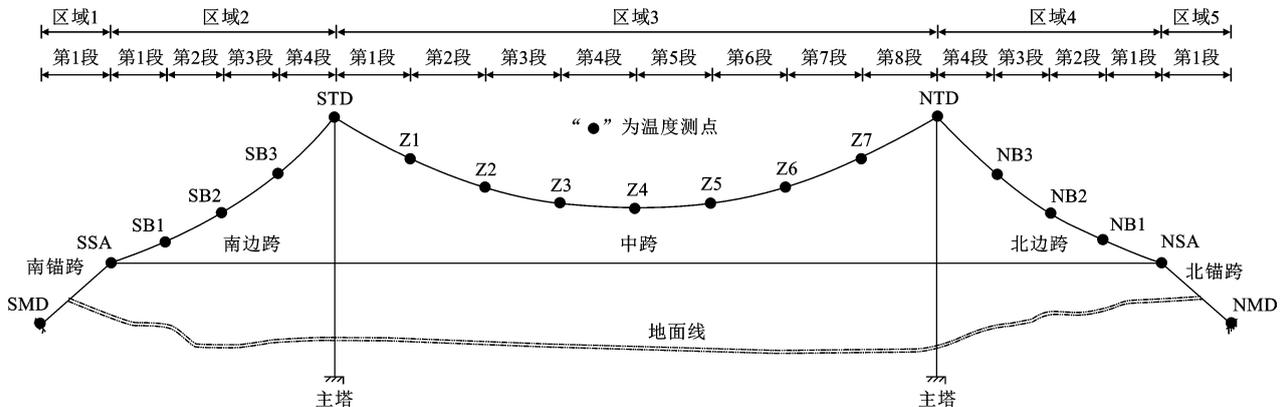
式中: $D_1 = \frac{4f+C_1}{L}$; $D_2 = \frac{C_1-4f}{L}$ 。

对式(14)进行微分求解,可得

$$\frac{df}{ds} = \frac{16n_f^2}{D_2 D_4 - D_1 D_3 - D_5 + 8n_f(D_3 + D_4)} \quad (15)$$

式中: n_f 、 n_c 、 D_3 及 D_4 为引入的过程变量,其值分别为 $n_f = \frac{f}{L}$; $n_c = \frac{C_1}{L}$; $D_3 = \sqrt{1+D_1^2}$; $D_4 = \sqrt{1+D_2^2}$; $D_5 = \ln(D_1 + D_3) - \ln(D_2 + D_4)$ 。

若将



注:“●”为温度传感器示意,SMD为南锚点温度测点,SSA为南散索鞍温度测点,SB为南边跨温度测点,STD为南塔温度测点,Z为中跨温度测点,NTD为北塔温度测点,NB为北边跨温度测点,NSA为北散索鞍温度测点,NMD为北锚固点温度测点。

图4 南溪大桥区域分段控制

Fig. 4 Sub-regional and subsection control of Nanxi bridge

$$ds = \alpha dTS_0 \quad (16)$$

代入式(15),即可求得

$$\frac{df}{dT} = \frac{16n_f^2 \alpha S_0}{D_2 D_4 - D_1 D_3 - D_5 + 8n_f(D_3 + D_4)} \quad (17)$$

式中: α 为主缆索股热膨胀系数; S_0 为主缆无应力下料长度。

3 工程应用分析

3.1 工程背景

南溪长江大桥位于四川省宜宾市南溪县境内,是宜泸高速的关键控制性工程,为川内第1座大跨度单跨悬索桥,堪称“蜀中第一跨”,如图3所示。大桥主跨820 m,钢箱加劲梁,矢跨比1:10,双向4车道;主缆采用镀锌高强平行钢丝预制索股,中跨87根索股、边跨89根索股,单股由127丝 $\phi 5.1$ mm的镀锌高强钢丝组成;南北岸分别为隧道锚及重力式锚;宜宾岸侧索塔高为132.80 m,泸州岸侧索塔高为144.82 m,门型结构,设1道横梁。

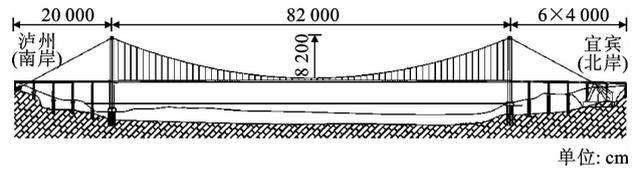


图3 南溪大桥总体布置

Fig. 3 Layout of Nanxi bridge

3.2 主缆线形施工控制

3.2.1 区域分段划分及温度测点布置

根据图3所示的地形及桥梁分跨特点,将主缆沿跨径方向划分为左锚跨、左边跨、中跨、右边跨及右锚跨5个区域,南北岸锚跨分为1段,边跨分为4段,中跨分为8段,如图4所示。

施工控制过程中,按图4划分的区域,在控制点处布置温度测点。上下游各对称布置19个温度测点,其中南北岸锚跨各1个、散索鞍各1个、南北边跨各3个、南北主塔顶部各1个、中跨7个。

3.2.2 温度数据监测分析

主缆基准索股施工期间,通过对上述控制点温度进行连续监测,可得出连续4 d,夜晚23点至次日凌晨5点的温度监测数据,如图5~图8所示。

对比分析图4所示的温度测点布置及图5~图8的温度监测数据可发现,夜间环境温度自晚上23点至次日凌晨温度逐渐降低,5点以后温度开始上升,监测结果与环境温度变化规律基本相符。

分析图5、图6温度分布规律可发现,阴天夜间同时刻,主缆锚跨位置温度最高,随着主缆高程的增大,索股温度自锚跨经边跨温度不断降低,至塔顶温度达到极小值;越过塔顶,索股温度自塔顶向中跨逐渐升高,在中跨四分点附近达到最高,再由1/4跨向中跨跨中逐渐降低;将南岸温度测点SB2数据与北岸温度测点NB2数据、南岸温度测点STD数据与北岸温度测点NTD数据,进行对比分析,可发现北岸温度明显高于南岸温度。

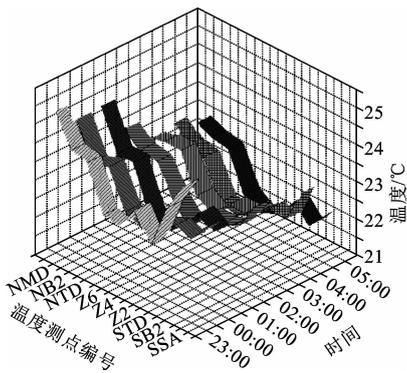


图5 温度监测数据(8月1日,阴)

Fig. 5 Temperature monitoring data (August 1st, cloudy)

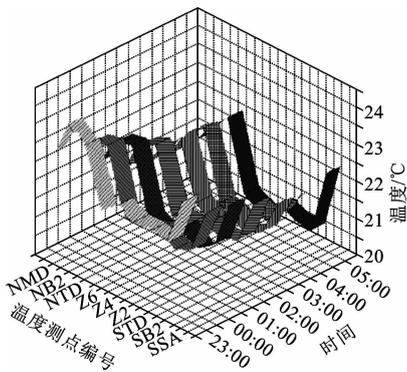


图6 温度监测数据(8月2日,阴)

Fig. 6 Temperature monitoring data (August 2nd, cloudy)

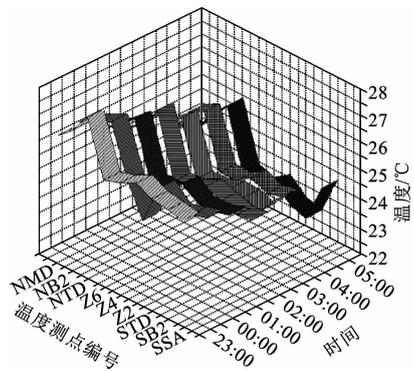


图7 温度监测数据(8月3日,晴)

Fig. 7 Temperature monitoring data (August 3rd, sunny)

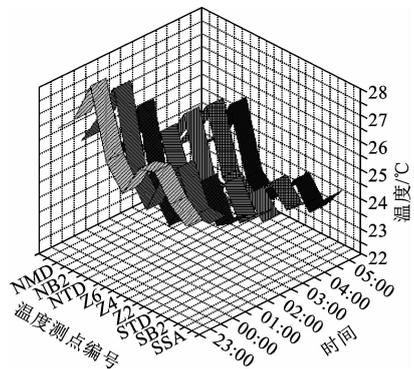


图8 温度监测数据(8月4日,晴)

Fig. 8 Temperature monitoring data (August 4th, sunny)

比较图7、图8温度数据,可发现晴天午夜环境温度仍居高不下,深夜零点左右索塔塔顶温度明显高于地面温度,温度自塔顶向两侧基本呈对称抛物线分布,但自23点至凌晨5点,塔顶温度降低的速度明显大于散索鞍附近的测点,究其原因是因为南溪长江大桥地处蜀南,横跨长江,夏季高温炎热,初夜江面水蒸气上升至塔顶附近高度,温度达最高,随着时间变化水气散尽,塔顶温度迅速降低。

3.2.3 温度等效计算

基于式(13),可对实时监测的温度数据进行实时等效分析,以图5~图8监测的数据为例,经计算可得出南北边跨及中跨在不同时刻的等效计算温度,分别如下页图9~图12所示。

对比分析图9~图12可发现,阴天时,中跨温度明显低于边跨;晴天时,中跨温度高于南边跨,但低于北边跨,总体来讲北边跨温度最高,由此可见,对于大跨度悬索桥,尽管结构具有对称性,但由于跨越障碍物的影响及地形的影响,对应的温度场具有很强的随机特性。

3.2.4 主缆线形调整控制

主缆索股线形的调整控制,按式(19)、式(21)进

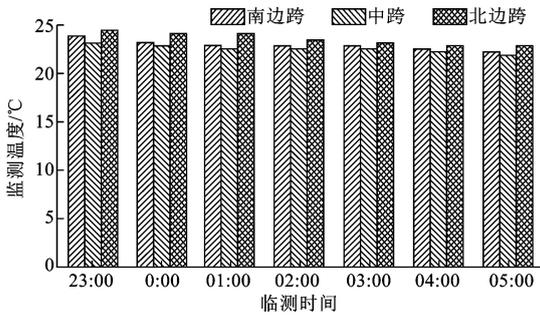


图9 监测温度等效(8月1日,阴)

Fig. 9 Equivalent of monitoring temperatures (August 1st, cloudy)

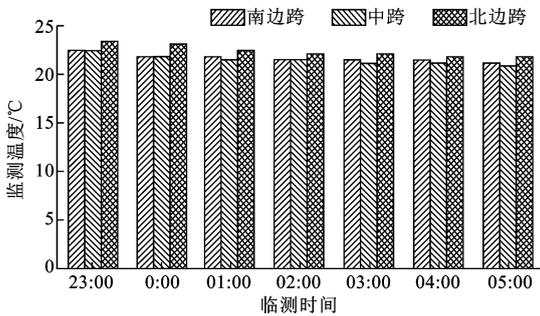


图10 监测温度等效(8月2日,阴)

Fig. 10 Equivalent of monitoring temperatures (August 2nd, cloudy)

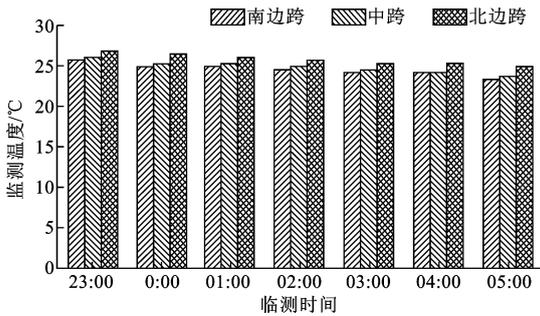


图11 监测温度等效(8月3日,晴)

Fig. 11 Equivalent of monitoring temperatures (August 3rd, sunny)

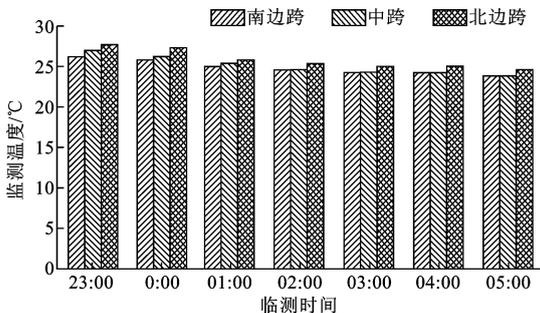


图12 监测温度等效(8月4日,晴)

Fig. 12 Equivalent of monitoring temperatures (August 4th, sunny)
行计算分析,可得出跨径、索长及温度变化对垂度的影响系数,如表1所示。

索股调整前后由于索股垂度将发生改变,对应

表1 索股调整系数

Tab. 1 Adjustment coefficients of cable

类别	垂度 f 为理论值			垂度 f 增大 0.5 m			
	f/m	L/m	C/m	f/m	L/m	C/m	
计算参数	分跨						
	南边跨	4.16	185.98	99.46	4.66	185.98	99.46
	中跨	73.61	812.68	0.01	74.11	812.68	0.01
	北边跨	3.47	169.17	90.34	3.97	169.17	90.34
调整系数	分跨	df/ds	df/dt	df/dL	df/ds	df/dt	df/dL
	南边跨	12.23	0.03	10.78	10.92	0.03	9.62
	中跨	2.15	0.02	2.10	2.14	0.02	2.09
	北边跨	13.33	0.03	11.75	11.65	0.03	10.27

索股调整系数也将发生变化。比较表1数据可发现,垂度调整前后,中跨索股调整系数的变化幅度不大,但边跨索股调整系数变化明显。以边跨调整系数 df/ds 为例,当边跨垂度增大 0.5 m 时,南边跨对应的调整系数 df/ds 减少 12%,北边跨调整系数 df/ds 减少 15%。其原因是因为中跨垂度较大,当垂度小范围内调整时,垂度的相对变化量较小,与之对应的调整系数变化较小,其变化幅度基本可以忽略;而边跨索股垂度本身就不大,当垂度改变时,垂度相对变化量较大,与之对应的调整系数变化量较大,其影响不可忽略。因此,在主缆施工过程中,中跨调整系数可视为不变值,边跨调整系数为动态变化值;可见,边跨索股长度与垂度之间的调整关系,若取不变值,将会出现边跨索股垂度反复调整的现象,因此,对于边跨调整系数的使用,应根据垂度调整前后的变化量综合考虑。

3.3 主缆线形控制结果分析

基于本文提出温度区域分段控制法,经计算分析得出各区段的等效温度,结合表1所示的主缆索股调整系数,快速计算高程差值,并计入主塔偏位引起的跨径变化对索股控制点标高的影响,确定索股长度的调整量,对架设过程中的索股标高进行调整控制。按此方法,先后对基准索股及普通索股的架设进行了有效的监测与控制,实际施工控制过程中基本上都是一步到位,极少出现反复调整的现象,大大提高了索股高程调整控制效率。以基准索股与成缆状态主缆线形为例,现将部分控制成果表述如下页表2所示。

比较表2所示的基准索股高程监测数据可发现,基准索股南边跨最大偏差 -9.6 mm,上下游相对高差 1.7 mm;中跨最大偏差 4.2 mm,上下游相对高差 5.8 mm;北边跨最大偏差 14 mm,上下游相对高差 9.4 mm;主缆线形监测数据则表明,成缆状

表 2 基准索股及主缆线形控制结果

Tab. 2 Control results of based strand and main cable

类型	高程	南边跨/m	中跨/m	北边跨/m
基准索股	上游侧实测	345.493 7	325.423 9	350.280 1
	理论控制值	345.501 6	325.422 3	350.266 1
	下游侧实测	345.492 0	325.418 1	350.270 7
主缆	上游侧实测	345.729 0	325.719 8	350.457 0
	理论控制值	345.719 0	325.712 8	350.471 0
	下游侧实测	345.736 0	325.720 8	350.457 0

态,北边跨上下游控制点标高实测值相比理论值分别高出 10 mm 及 17 mm,上下游相对高差为 7 mm;中跨上下游控制点标高实测值相比理论值分别高出 7 mm 及 8 mm,上下游相对高差为 1 mm;南边跨上下游控制点标高实测值相比理论值低 14 mm,上下游相对高差为 0 mm。依据文献[17]的规定,南溪桥基准索股的中跨允许偏差为 $\pm L/20\ 000$,即 ± 42 mm;边跨允许偏差为 $\pm L/10\ 000$,即南边跨 ± 17 mm、北边跨 ± 19 mm;上下游相对差值为 10 mm;其中主缆线形精度参照基准索股精度进行控制;对比南溪桥基准索股与主缆控制精度结果可知,基准索股及主缆线形的绝对高差及上下游相对高差,不仅满足文献[16]的精度要求,且具有较好的控制效果。

4 结 语

(1)悬索桥温度场的分布受地形及环境气候的影响较大,具有典型的时变特征,并具有很强的随机特性。

(2)提出的悬索桥架设过程中时变温度的等效计算方法,有效地减少了施工控制过程的计算工作量,提高效率,为索股线形的调整赢得宝贵时间。

(3)悬索桥主缆索股架设过程中,中跨索股调整系数可近视为不变值,但边跨调整系数为动态变化值,受边跨垂度变化影响较大,边跨线形调整过程中,应考虑垂度变化对边跨索股调整系数的影响。

(4)提出的区域分段控制法效率高、精度高,对于复杂地形及气候环境下的温度场监测具有较强的适用性。

(5)悬索桥所处地形复杂,太阳辐射、地表反射及空气对流等对其环境空间温度梯度影响十分明显;若能建立桥梁结构整体模型,对环境温度进行数值模拟,对整体结构进行实时同步热耦合分析,对丰富和发展桥梁结构的计算理论具有重要意义。

参考文献:

References:

[1] Choi D H, Gwon S G, Yoo H, et al. Nonlinear static a-

analysis of continuous multi-span suspension bridges [J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13 (1):103-115.

[2] Park D U, Kim N S. Back analysis technique for tensile force on hanger cables of a suspension bridge[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(5):761-772.

[3] Zhou L, Xia Y, Brownjohn J M W, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015(5):04015027.

[4] 任 伟,盖轶婷,王 锦. 混凝土自锚式悬索桥过程控制状态分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 45-51.

REN Wei, GAI Yi-ting, WANG Jin. Analysis of process control state about concrete self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3):45-51. (in Chinese)

[5] Kim W S, Laman J A. Integral abutment bridge response under thermal loading[J]. Engineering Structures, 2010, 32(6):1495-1508.

[6] Kim H K, Kim N S, Jang J H, et al. Analysis model verification of a suspension bridge exploiting configuration survey and field-measured data[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 17(5):794-803.

[7] Westgate R, Koo K Y, Brownjohn J. Effect of solar radiation on suspension bridge performance[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 20(5):04014077.

[8] 王 达,张永健,黄平明. 大跨度悬索桥主缆施工温度时变效应研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12): 72-77.

WANG Da, ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming. Temperature time-variable effect research on long-span suspension bridge during the main cable construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12): 72-77. (in Chinese)

[9] 刘来君,贺拴海. 索鞍无预偏施工悬索桥主缆的温度效应[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 21(1): 40-44.

LIU Lai-jun, HE Shuan-hai. Temperature effect on suspension bridge with non-pre-bias of cable-saddle [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 21(1):40-44. (in Chinese)

[10] 谭红梅,袁帅华,肖汝诚. 大跨度悬索桥的基准索股调整[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1):38-43.

TAN Hong-mei, YUAN Shuai-hua, XIAO Ru-cheng. The adjustment of datum strand of long-span suspension bridges[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 38-43. (in Chinese)

[11] Chatzis M N, Deodatis G. Modeling of very large in-

- teracting multiple-beam systems with application to suspension bridge cables[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(9): 1541-1554.
- [12] 谭冬莲. 大跨径自锚式悬索桥合理成桥状态的确定方法[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(2): 87-91.
TAN Dong-lian. Decision method on reasonable design state of self-anchored suspension bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(2): 87-91. (in Chinese)
- [13] 张志国, 邹振祝, 赵玉成, 等. 悬索桥主缆线形解析方程解及应用[J]. *工程力学*, 2005, 22(3): 172-177.
ZHANG Zhi-guo, ZOU Zhen-zhu, ZHAO Yu-cheng, et al. Solution of main cable shape equations of a suspension bridge and its application [J]. *Engineering Mechanical*, 2005, 22(3): 172-177. (in Chinese)
- [14] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(10): 76-80.
LUO Xi-heng, XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Detailed analysis of construction process of suspension bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(10): 76-80. (in Chinese)
- [15] 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 nonlinear analysis method for suspension bridge with hybrid beam and its application[D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [16] Moaveni S. 有限元分析——ANSYS 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Moaveni S. Finite element analysis-ANSYS theory and application[M]. Beijing: Electronics industry publishing house, 2008. (in Chinese)
- [17] JTGF 80/1—2012, 公路工程质量检验评定标准[S].
JTGF 80/1—2012, Quality inspection and evaluation standards for highway engineering[S]. (in Chinese)
- (上接第 56 页)
- [8] “公路桥梁车辆荷载研究”课题组. 公路桥梁车辆荷载研究[J]. *公路*, 1997(3): 8-12.
Research Group of Vehicle Load on Highway Bridge. Research of vehicle load on highway bridges[J]. *Highway*, 1997(3): 8-12. (in Chinese)
- [9] 童乐为, 沈祖炎, 陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. *土木工程学报*, 1997, 30(5): 20-27.
TONG Le-wei, SHEN Zu-yan, CHEN Zhong-yan. Fatigue load spectrum for urban road bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(5): 20-27. (in Chinese)
- [10] 王荣辉, 池春, 陈庆中, 等. 广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(12): 94-96.
WANG Rong-hui, CHI Chun, CHEN Qing-zhong, et al. Study on the model of the fatigue-loaded vehicles in Guangzhou trestle bridges[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2004, 32(12): 94-96. (in Chinese)
- [11] 潘鹏, 李全旺, 周怡斌, 等. 某公路大桥车辆荷载调查与局部疲劳分析[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(5): 94-100.
PAN Peng, LI Quan-wang, ZHOU Yi-bin, et al. Vehicle survey and local fatigue analysis of a highway bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(5): 94-100. (in Chinese)
- [12] 任剑, 赵人达, 毛学明. 公路桥梁疲劳荷载谱初探[J]. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(1): 34-37.
REN Jian, ZHAO Ren-da, MAO Xue-ming. Study of fatigue load spectrum for highway bridge[J]. *Sichuan Building Science*, 2007, 33(1): 34-37. (in Chinese)
- [13] 李昆, 孙开畅. 江阴长江公路大桥疲劳荷载车辆模型分析研究[J]. *山西建筑*, 2008, 34(15): 299-301.
LI Kun, SUN Kai-chang. Study on the model of the fatigue-loaded vehicles in Jiangyin Yangtse river highway bridge[J]. *Shanxi Architecture*, 2008, 34(15): 299-301. (in Chinese)
- [14] 李星新, 任伟新, 钟继卫. 西南山区高速公路桥梁标准疲劳车辆荷载研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15): 96-100.
LI Xing-xin, REN Wei-xin, ZHONG Ji-wei. Standard fatigue truck on montane speedway bridge[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 96-100. (in Chinese)
- [15] 孙守旺, 孙利民. 基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(2): 198-204.
SUN Shou-wang, SUN Li-min. Statistic model of vehicle loads for highway bridges[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(2): 198-204. (in Chinese)
- [16] GB/3730.1—2001, 汽车和挂车类型的术语和定义[S].
GB/3730.1—2001, Motor vehicles and trailers-types-terms and definitions[S]. (in Chinese)
- [17] 王元庆, 李继锐, 周伟. 道路车间时距分布探讨[J]. *重庆交通学院学报*, 2001, 20(1): 47-49.
WANG Yuan-qing, LI Ji-rui, ZHOU Wei. A study on headway distribution[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2001, 20(1): 47-49. (in Chinese)