

文章编号: 1000-8241(2016)06-0657-05

# 中贵管道乌江悬索跨越主缆的施工控制

张勤<sup>1</sup> 詹胜文<sup>2</sup>

1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司

**摘要:** 乌江管道悬索跨越主缆重力刚度偏小、柔性较大,主缆架设线形受散索套定位、索鞍预偏量、环境温度和跨度的影响较大,调索困难。为了精确调整索股线形,基于无应力状态理论,建立了索股无应力长度和线形精确迭代求解算法,综合考虑温度、跨度等因素,快速有效地控制索股到空缆的高程。采用参数变化法,分析温度和跨度对索股线形和锚跨张力的影响,用于索股调整完毕后的稳定性观测及其线形随温度、跨度变化的规律性校验。施工观测结果表明:该工程上下游索股的相对或绝对高程偏差均满足施工技术规范要求。该迭代算法在乌江管道悬索跨主缆施工中适应性好,计算速度快,监控工作效率高,是管道悬索跨越主缆索股架设和调整的一种有效方法。(图5,表3,参13)

**关键词:** 乌江悬索跨越; 无应力长度; 温度; 跨度; 施工监控; 主缆调索

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.06.017

## Control on construction of the main cable for Wujiang suspension crossing of Zhongwei-Guiyang Pipeline

ZHANG Qin<sup>1</sup>, ZHAN Shengwen<sup>2</sup>

1. Central and Southern China Municipal Engineering Design &amp; Research Institute Co. Ltd.;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation

**Abstract:** The main cable for suspension crossing of Wujiang Pipeline is characterized by low gravity stiffness and high flexibility. It is hard to be adjusted since its shape is greatly influenced by the positioning of anchorage cable sleeve, pre-bias of cable saddle, ambient temperature and span. In order to precisely adjust the suspended cable shape, based on the unstressed state theory, this paper establishes the precise iterative algorithm for non-stress length and shape of cable strand, which comprehensively considers the factors like temperature and span and can control and adjust the elevation between cable strand and free cables quickly and effectively. Parameter variation method is adopted to analyze the possible impacts of temperature and span on the suspended cable shape and cable tension, so as to observe the stability after the adjustment of cable strand and verify the changes of cable shape with temperature and span. The construction observation result shows that both relative and absolute elevation deviations of the cable strand in upstream and downstream of this project meet the requirements of technical specification. This iterative algorithm adapts well in the construction of main cable for suspension crossing of Wujiang Pipeline. With advantages of fast calculation and high monitoring efficiency, this algorithm is an effective and reliable analysis method for building and adjusting cable strand for suspension crossing of pipelines. (5 Figures, 3 Tables, 13 References)

**Key words:** Wujiang suspension crossing, non-stress length, temperature, span, construction monitoring, adjustment of main cable

乌江管道悬索跨越是中卫—贵阳联络线的控制性工程,主跨采用310 m的悬索结构,是目前国内油气同桥(怒江跨越主跨320 m,澜沧江跨越主跨280 m)跨度较大的管道桥之一<sup>[1-2]</sup>,跨径布置(75+310+95)m,全长480 m,主缆矢跨比1/10。相比公路悬索桥,管道悬

索跨越主缆重力刚度较小,结构柔性大,施工过程线形变化大,结构几何非线性强烈,且施工过程中的误差不能在成桥后进行调整。该桥在基准索股架设前一周的温度记录显示,早中晚的温差变化较大。环境温度、日照、索鞍中心距、支座高差、后锚点以及散索套位置等

因素均会影响主缆基准索股的架设高程,温度和跨径的微小变化会引起索股线形的显著变化。管道悬索跨越的主缆架设精度决定了成桥的精度,一般索股均是相对于基准索股架设的,因此基准索股的施工线形控制是整个管道悬索跨越施工控制的关键。

结构施工控制的核心原理是构件的质量守恒与无应力尺寸不变原理,利用成桥理论计算各跨索股的无应力长度<sup>[3-6]</sup>,再计算设计温度下的索股架设线形,接着利用参数公式法求解温度和跨度对各跨跨中索股中心标高的影响系数,从而进行施工控制<sup>[7-9]</sup>。基于索股的无应力长度不变原理,考虑温度和跨度对索长的增量,以悬链线精确求解公式建立迭代程序,并编制相应程序用于基准索的实时调索工作;再利用各跨跨中控制点高程修正公式,对索股架设完毕后稳定性观测结果进行校验,并将索股的四分点或八分点处的观测结果作为辅助校验。

## 1 线形计算控制

乌江管道悬索跨越在架设基准索股后,其索型可视为一条两端锚固的悬链线,索股自重 $q(x)$ 可视为沿该索形的竖向均匀分布(图1)。假定该索为无抗弯刚度的柔性索,且服从线弹性定律,由于自重荷载引起索内钢丝的轴向应力较小,故忽略泊松效应引起的钢丝截面微小变化,则该线型为一标准的悬链线方程<sup>[10-11]</sup>:

$$y = \frac{1}{c} \operatorname{ch}(cx+a) + b, c = -\frac{q}{H},$$

$$a = \operatorname{sh}^{-1} \left[ \frac{hc}{2\operatorname{sh}(cl/2)} \right] - \frac{cl}{2}, b = -\frac{1}{c} \operatorname{cha} \quad (1)$$

式中: $H$ 为索股的水平张力,kN; $h$ 为两支座高差,m; $a$ 、 $b$ 为由边界条件决定的常数; $l$ 为两支座中心平距,m。

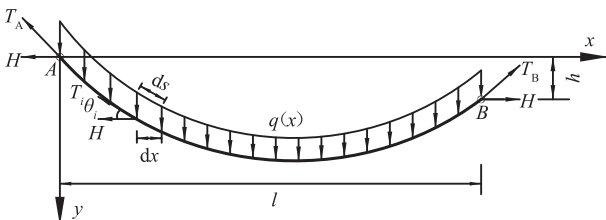


图1 荷载沿索型竖向均布分析图

该悬链线在任一点的导数为 $y'(x) = \operatorname{sh}(cx+a)$ ,索内任一点张力 $T = H \operatorname{ch}(cx+a)$ 。取沿索形的微段 $ds$ ,则应力弧长与无应力长关系为 $ds = \left(1 + \frac{T}{EA}\right) ds_0$ ,其中:

$EA$ 为索的轴向抗拉刚度,kN; $E$ 为弹性模量,kN/m<sup>2</sup>; $A$ 为索截面积,m<sup>2</sup>。取 $\varepsilon = H/(EA)$ ,则微段 $ds$ 的无应

力长度 $ds_0 = \frac{\sqrt{1+(y')^2}}{1+\varepsilon\sqrt{1+(y')^2}} dx$ 。采用换元法对 $ds_0$

积分,令 $u = cx+a$ , $\operatorname{ch}u = (e^u + e^{-u})/2$ ,则:

$$s_0(x) = \int_0^x \frac{\operatorname{ch}(cx+a)}{1+\varepsilon\operatorname{ch}(cx+a)} dx$$

$$= \frac{1}{c} \left( \frac{u}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2}} \ln \frac{\varepsilon e^u + 1 - \sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon e^u + 1 + \sqrt{1-\varepsilon^2}} + C_1 \right) \quad (2)$$

取 $\gamma(x) = \varepsilon \exp(cx+a) + 1$ , $\beta = \sqrt{1-\varepsilon^2}$ ,则 $x$ 点处的无应力长度可以简化为:

$$s_0(x) = \frac{x}{\varepsilon} - \frac{1}{c\varepsilon\beta} \left[ \ln \frac{\gamma(x)-\beta}{\gamma(x)+\beta} - \ln \frac{\gamma(0)-\beta}{\gamma(0)+\beta} \right] \quad (3)$$

式(3)即为标准悬链线无应力长度精确计算公式<sup>[11]</sup>。

在基准索股架设时,可以利用式(3)进行基准索股的调索与监控工作。式(3)涉及主要参数有: $H$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $h$ 、 $q$ 、 $f$ 、 $l$ 、 $s_0$ 、 $t_0$ 、 $\Delta t$ 和 $\alpha$ ,将这些变量纳入统一函数 $\phi$ ,即 $\phi = \phi(H, E, A, h, q, f, l, s_0, t_0, \Delta t, \alpha)$ 。通过分析,函数 $\phi$ 中存在相关变量,选取一组独立非相关变量,可确定基准索股空缆线形。如选取 $f$ 、 $s_0$ 作为输出结果,可以得出在特定温度 $t_0 + \Delta t$ 下的 $f$ 、 $s_0$ 分别为:

$$f = y(l/2) - h/2 \quad (4)$$

$$s_0(l) = \frac{l}{\varepsilon} - \frac{1}{c\varepsilon\beta} \left[ \ln \frac{\gamma(l)-\beta}{\gamma(l)+\beta} - \ln \frac{\gamma(0)-\beta}{\gamma(0)+\beta} \right] \quad (5)$$

显然函数 $\phi$ 中的参数 $EA$ 、 $q$ 、 $\alpha$ 由索股特性决定, $\Delta t$ 由施工环境决定; $h$ 在中跨为塔顶索两鞍处 $P$ 点(虚交点)的高程差,在边跨为塔顶索鞍处 $P$ 点与散索套中心处的基准索股中心点的高程差; $l$ 在中跨为塔顶索鞍处两 $P$ 点间的平距,在边跨为塔顶索鞍处 $P$ 点到散索套中心处的基准索股中心点的平距; $h$ 和 $l$ 应包含索鞍预抛高、预偏量和施工偏差,施工过程中均采用实测值;锚跨则是通过索股锚下张力来控制。

## 2 线形迭代算法

在给定的基准温度和设计成桥状态下,索股在各跨的无应力长度理论上是确定的。在参数确定后,基准索股的线形也是确定且唯一的。将式(2)转换成

因变量为  $H$  的函数,该函数是隐式函数,显示表达和直接求解  $H$  均较困难,需采用迭代试算方法对  $H$  进行求解,当试算  $H$  值使得各跨索股的无应力长度与成桥设计值相等时,则为  $H$  的解。理论计算时,主索鞍上索股分跨点为  $P$  点,索股在鞍槽内实际分跨点为  $E$  点(图 2),因此在迭代过程中需要对主索鞍处索股无应力长度进行修正。

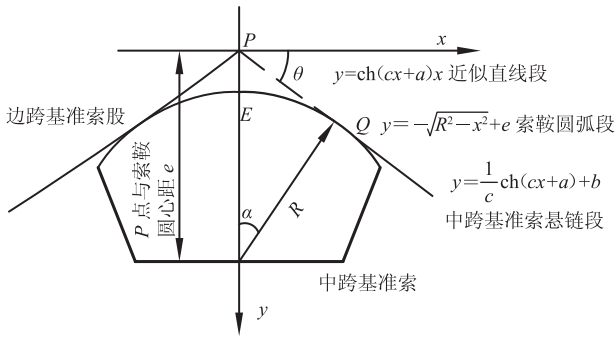


图 2 主索鞍处切点修正示意图

主索鞍的鞍槽半径  $r$ ,索股等效直径  $d$ ,基准索股在鞍槽处的轴心半径为  $R$ ,则  $R=r+d/2$ 。鞍槽内的索股在第一象限的方程为  $y=-\sqrt{R^2-x^2}+e$ 。以中跨的基准索股为例,构筑迭代算法进行计算。在  $P$  点与切点  $Q$  之间的索股虚拟段考虑为近似直线(图 2)。

考虑主索鞍处修正的迭代算法:①给定按抛物线理论计算的初始值  $H$ ;②解析确定中跨悬链线  $y$  和在两支座处切线  $y'(x)$ ;③通过方程组

$$\begin{cases} y = \text{sh}(cx+a)x \\ y = -\sqrt{R^2-x^2} + e \end{cases}$$

求解两主索鞍上索股与索鞍的切点  $Q$  坐标  $(x_Q, y_Q)$ ;④按式(3)分别求出两索鞍处的  $P$  点到切点  $Q$  的无应力长度  $S_3, S_4$ ,定义其和为  $S_1$ ;⑤分别计算索鞍顶点  $E$  到切点  $Q$  的基准索的有应力弧线长  $S_5, S_6$ ;⑥基准索股在切点  $Q$  处的张力可表示为  $T=H\text{ch}(cx+a)$ ,两切点  $Q$  处的索股张力分别为  $T_1=H\text{ch}(cx+a)$  和  $T_2=H\text{ch}(d+a)$ ,根据线弹性公式  $l_s=l/(1+T/EA)$ ,求出索鞍圆弧段的索股无应力长度值分别为  $S_7, S_8$ ,定义其和为  $S_2$ ;⑦经主索鞍修正后的中跨无应力长度值  $S_0=s_0(l)-(S_1-S_2)$ ;⑧将  $S_0$  与设计成桥理论状态的无应力长度  $S_d$  比较,设定容许误差  $W=0.0005\text{ m}$ ,使  $\Delta S_0=|S_0-S_d|\leq W$  成立;⑨当⑧中的容许误差未满足时,取  $H=H+\Delta H$ ,索股的水平张力增量  $\Delta H$  的选取与  $\Delta S_0$  有关,设为  $\Delta H=\xi\Delta S_0$ ,将新的  $H$  值带入②中重新计算。当  $H$  试算初值较真值小时,不断调整相关系数

$\xi$ ,试算结果表明:该迭代算法是单调不增函数,则⑧中的  $\Delta S_0$  必定是收敛的,中跨  $\xi=0.85$  和边跨  $\xi=25.0$  时,收敛速度较快。

### 3 线形调整控制

根据式(3)、式(5)及迭代算法,可以求解基准索股架设的各种线形。在调索阶段,环境平均温度通常与设计基准温度不一致,因此还须考虑温度的修正值。索是典型的一维线弹性结构,当温度变化  $\Delta t$  时,其弹性伸长量为  $\Delta S=\alpha S_d \Delta t$ ,  $S_d$  为基准温度下索股无应力长度设计值,则考虑温度伸长量后的索股无应力长度为  $S=S_d(1+\alpha\Delta t)$ 。

通常在调索时,以实测索股跨中高程来计算索的矢高和无应力长度,一般采用以下两种方法进行调索:①通过直接求解索长放缩量  $\Delta L$  进行调索。将以上迭代算法中第 7 步增加输出跨中附近实测点的高程  $y_c$ ,迭代  $H$ ,当跨中索股中心点高程计算值与实测值  $y_m$  之差小于  $W$ ,即  $|y_c-y_m|\leq W$ ,  $W=0.0005\text{ m}$  时收敛,即可得到本跨在实测温度下的无应力长度  $S_m$ ,将其与同温度下的目标无应力长  $S_d(1+\alpha\Delta t)$  比较,得到索长调整量  $\Delta L=S_m-S_d(1+\alpha\Delta t)$ 。当  $\Delta L$  为正,为收索量; $\Delta L$  为负,为放索量。②利用跨中垂度变化量  $\Delta f$  和索长收放量  $\Delta L$  的关系进行调索<sup>[12]</sup>,索股在中跨为  $\Delta L=\Delta f/[(15-40n^2+288n^4)/16n(5-24n^2)]$ ,  $n=f/l$  为垂跨比;边跨需考虑索股倾角  $\theta$ (图 2),  $\Delta L=\Delta f/(3\sec^3\theta/16n)$ 。通过计算,乌江跨越在基准索股目标线形下的跨中索股轴心标高变化量与索长收放量的关系为:中跨为  $\Delta L=\Delta f/2.05$ ,南边跨  $\Delta L=\Delta f/9.70$ ,北边跨为  $\Delta L=\Delta f/8.34$ 。以中跨为例,当索长增加(或减小)  $1\text{ cm}$  时,跨中索股标高降低(或升高)约  $2.05\text{ cm}$ 。调索时,先确定索股实测标高与理论标高差  $\Delta f$ ,则调索量  $\Delta L$ 。当  $\Delta f$  为正,则为从边跨向中跨放入索量  $\Delta L$ ;反之,为中跨向边跨放出量。南北边跨调整关系与中跨同理。施工中先调整中跨,再分别调整两边跨。计算结果表明,中跨、南北边跨的索量收放关系在目标线形位置  $\pm 30\text{ cm}$  范围内均具有较高精度。

乌江跨越在调索中,两种方法结合使用,相互验证。先使用方法 2 将基准索调整到目标线形附近,再采用方法 1 精确调整,可以使基准索形快速调整到理论目标线形。

### 4 温度和跨度观测

采用式(3)、式(5)及迭代算法,保持无应力长度、温度不变,跨径变化,可以得出跨中标高变化量与跨径变化量的关系,计算得到跨径变化量在±4 cm之内,每变化0.2 cm时的跨中索股标高与跨径变化量关系(图3);保持跨径不变,温度变化(转化为索股无应力长度变化)时,可以得出跨中标高与温度变化的关系,计算得到实际温度在0~32℃之间每变化1℃时的跨中索股标高与温度关系(图4)。

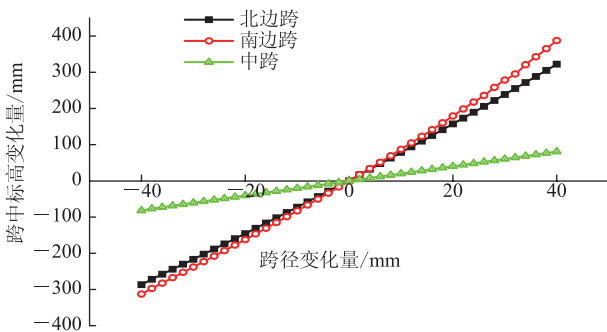


图3 跨中标高变化量与跨径变化量的关系

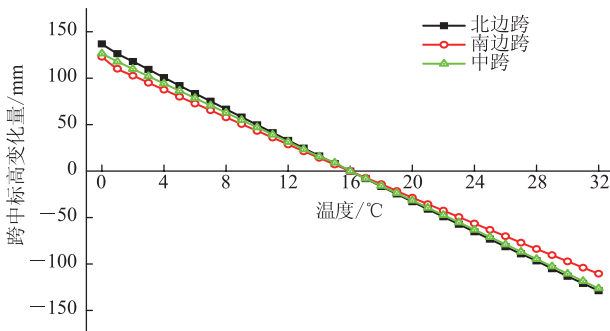


图4 跨中标高变化量与温度的关系

各跨跨中标高变化量与温度跨度变化量均呈线性关系。对数据进行回归分析,得知中跨线性度非常好,相关系数 $R^2=1.0$ ,即完全线性关系。南北边跨采用二次多项式拟合较线性拟合优,相关度 $R^2$ 非常趋近于1.0(表1)。因此,在进行两边跨的温度和跨度修正时,选择二次多项式拟合修正公式进行计算。

锚跨则以基准索的锚下张力来控制,南北锚跨设计形式一致,理论上南北锚跨索股张力应相同,但南北锚跨跨径因施工误差、散索套定位差异,使得各跨锚固张力不一致。在基准温度16℃下,南北锚头中心索股的理论控制张力为69.89 kN。乌江跨越设定主缆最底缘索股为基准索股,在散索套处偏离中心索股2.6°,再考虑锚跨跨径差异,计算出南北锚跨基准索股锚下控

表1 基准索股各跨中标高的跨度温度修正公式

类别	修正公式		相关系数 $R^2$	
	跨度	温度	跨度	温度
中跨	$2.021 D$	$-7.877 T+125.98$	1.0	1.0
南边跨 线性回归	$8.628 D+1.249$	$-7.167 T+116.02$	0.996 7	0.999 4
南边跨 二次多项 式回归	$0.023 D^2$ $+8.628 D-0.534$	$0.018 T^2$ $-7.757 T+119.07$	0.999 9	0.999 9
北边跨 线性回归	$7.585 D+7.497$	$-8.253 T+133.16$	0.999 8	0.999 8
北边跨 二次多项 式回归	$0.010 D^2$ $+7.585 D+1.721$	$0.014 T^2$ $-8.712 T+135.53$	1.0	1.0

注: $D$ 为跨度变化量,跨度减小为负,增加为正,m; $T$ 为索股实测温度,℃。

制张力分别为71.68 kN和71.25 kN。计算得出2~30℃内每变化2℃时,各温度下的基准索股锚固张力(图5),采用线性拟合和二次多项式拟合,得到温度修正计算公式(表2)。为了现场施工使用方便,选用线性修正公式,则南北锚跨张力随温度影响系数为:南边跨 $-0.281$  kN/℃,北边跨 $-0.239$  kN/℃。

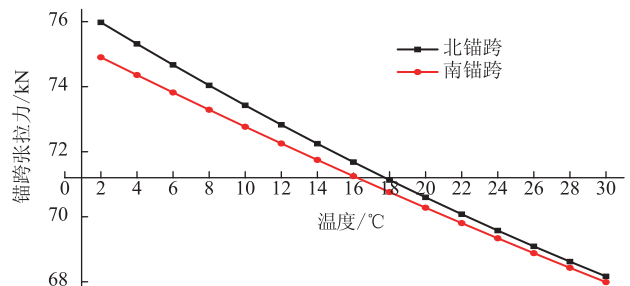


图5 锚跨索张力与温度变化关系

表2 基准索股锚跨张力的温度修正公式

类别	温度修正公式		温度相关系数	
	线性	二次多项式	线性	二次多项式
南锚跨 张力	$-0.281 T$	$0.002 T^2-0.343 T$ $+76.656$	0.996 5	1.0
北锚跨 张力	$-0.239 T$	$0.001 T^2-0.279 T$ $+75.938$	0.998	1.0

基于各跨的温度、跨度修正公式和锚跨张力修正公式,进行乌江悬索跨越基准索的施工调索工作。在设计基准温度16℃下,各跨跨中基准索股中心修正高程 $Z=Z_0+\Delta Z(D)+\Delta Z(T)$ , $Z_0$ 、 $Z$ 分别为各跨跨中索股中心理论计算高程和修正后计算高程,再将 $Z$ 与跨中实测高程比较,可以得到绝对高程差。调索完毕后,对索股线形进行测量(表3),结果表明:乌江悬索索股的最大绝对高程差为+5 mm,各跨上下游索股相对高程差最大为7 mm,满足JTGT F50-2011《公路桥涵施工技术规范》<sup>[13]</sup>规定的悬索中跨绝对高程差小于

表3 基准索股各跨跨中标高最终监测结果

类别	无应力长度 /m	跨径 /m	实测平距 /m	理论高程 /m	实测高程 /m	温度 /°C	温度修正 /m	跨度变化 /m	跨度修正 /m	绝对高程差 /m
中跨上游	317.508 7	310.516	155.152	794.092	794.000	28	-0.094 6	-0.001	-0.002	0.004 6
中跨下游	317.508 7	310.516	155.083	794.092	793.993	28	-0.094 6	-0.001	-0.002	-0.002 6
南边跨上游	64.997 8	60.310	39.890	805.026	804.936	28	-0.084 0	0.001	-0.008 3	0.002 1
南边跨下游	64.997 8	60.310	39.884	805.028	804.941	28	-0.084 0	0.001	-0.008 3	0.005 1
北边跨上游	86.477 8	80.164	30.057	809.690	809.584	28	-0.097 4	0.001	-0.005 8	-0.003 0
北边跨下游	86.477 8	80.164	30.029	809.705	809.597	28	-0.097 4	0.001	-0.005 8	-0.004 8

155 mm, 相对高程差小于 10 mm 和边跨误差为中跨两倍的要求。

## 5 结论

乌江悬索跨越主缆架设时, 散索套定位、环境温度、各跨跨度对索股架设线形影响较大。尤其是调整索股时的温度和跨度的变化, 增大了精确调索的难度。基于悬链线理论, 建立基准索股线形的快速精确迭代求解算法。将温度增量转化为索股无应力长度增量, 将跨径增量直接考虑到索股实时跨径内, 从而迭代求解该温度、跨径下的索股线形, 用于指导现场边中跨的主缆索股的架设和调索工作。采用参数变化法, 回归分析出边中跨的主缆基准索股空缆线形随温度、跨度的变化公式, 用于调索完毕后的索股稳定性观测和索股线形随温度、跨度变化的规律性验证。在锚跨分析中, 散索套的定位对锚跨跨径影响是一次性的, 主要影响锚跨索股的水平夹角; 锚跨温度变化量则考虑为锚跨索股的无应力长度的增量。锚跨按直线线形并考虑索股实际夹角后, 进行线弹性分析, 得到后锚控制张力和张力随温度的变化量, 用于指导锚跨施工和调整边跨索股线形。乌江悬索跨越索股的稳定性观测结果表明, 该算法指导的上下游索股的相对高程和绝对高程均满足施工技术规范要求。施工实践表明, 该算法施工适应性强, 计算速度快, 监控工作效率高, 是一种有效的关于管道悬索跨越主缆索股架设和调整的计算和分析方法。

### 参考文献:

- [1] 詹胜文, 冯义军, 伍兴中, 等. 中缅油气管道跨越双管同桥的可行性分析[J]. 油气储运, 2012, 31(11): 827-829.  
ZHAN S W, FENG Y J, WU X Z, et al. Feasibility analysis on the overhead crossing in one pipe-bridge for Sino-Myanmar Oil/Gas Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(11): 827-829.
- [2] 史航, 曾志华, 左雷斌. 中缅油气管道澜沧江桥隧工程穿越总体设计[J]. 油气储运, 2014, 33(10): 1034-1038.  
SHI H, ZENG Z H, ZUO L B. Overall design of Lantsang bridge and tunnel crossing project for the Myanmar-China Oil and Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(10): 1034-1038.
- [3] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究[J]. 土木工程学报, 1996, 29(2): 3-9.  
SHEN R L. Calculation methods for design and erection of cable curve of suspension bridge[J]. Journal of Civil Engineering, 1996, 29(2): 3-9.
- [4] 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.
- [5] 唐茂林, 强士中, 沈锐利. 悬索桥成桥主缆计算的悬链线方法[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 87-91.  
TANG M L, QIANG S Z, SHEN R L. Segmental catenary method of calculating the cable curve of suspension bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 87-91.
- [6] 肖勇刚, 吴坤平. 悬索桥成桥主缆线形计算研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(4): 33-38.  
XIAO Y G, WU K P. Determination of main cable shape under dead load state of suspension bridge[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 4(4): 33-38.
- [7] 唐茂林, 王昌将, 沈锐利. 西埃门大桥基准索股架设监控与分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 532-536.  
TANG M L, WANG C J, SHEN R L. Monitoring and analysis of datum strand of the houmen suspension bridge[J]. Journal of

(下转第 666 页)

- networks[D]. Austin: University of Texas at Austin, 1981: 181-183.
- [9] HANSEN C T, MADSEN K, NILSEN H B. Optimization of large networks[J]. Mathematical Programming, 1991(52): 41-45.
- [10] 张启阳, 史培玉, 李玉星. 基于遗传算法的油气混输管网参数优化[J]. 石油规划设计, 2004, 15(3): 25-28.  
ZHANG Q Y, SHI P Y, LI Y X. Optimization of parameters for combined oil and gas pipelining networks based on genetic algorithm[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2004, 15(3): 25-28.
- [11] 娄红洋, 张宏波, 许铁红, 等. 油气混输管网参数优化研究[J]. 河南石油, 2006, 20(2): 87-88.  
LOU H Y, ZHANG H B, XU T H, et al. Study on parameter optimization of combined network of pipeline[J]. Henan Petroleum, 2006, 20(2): 87-88.
- [12] 李卫华, 李长俊. 基于遗传算法的天然气集输管网参数优化设计[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 158-160.  
LI W H, LI C J. Parameter-optimized design of gas gathering and transmission system by heredity solution[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 158-160.
- [13] GOLDBERG D E, KOU C H. Genetic algorithms in pipeline optimization[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1987, 1(2): 128-141.  
(收稿日期: 2015-05-11; 修回日期: 2015-10-10; 编辑: 杜娟)

**作者简介:** 刘钊, 男, 工程师, 1987年生, 2013年硕士毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业, 现主要从事长输天然气管道调控工作。地址: 北京市东城区东直门北大街9号中国石油大厦B1906, 100007。电话: 15101149388, Email: liuzhao248@sina.com

(上接第 661 页)

- Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(4): 532-536.
- [8] 薛光雄, 沈锐利, 先正权, 等. 悬索桥基准丝股线形的确定与测控[J]. 桥梁建设, 2004(4): 4-6.  
XUE G X, SHEN R L, XIAN Z Q, et al. Determination, measurement and control of datum wire strand geometry of suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2004(4): 4-6.
- [9] 李海, 先正权, 沈良成, 等. 润扬大桥悬索桥主缆索股垂度调整方法[J]. 桥梁建设, 2004(4): 36-39.  
LI H, XIAN Z Q, SHEN L C, et al. Method of adjusting cable strand sagging for suspension bridge of Runyang Bridge[J]. Bridge Construction, 2004(4): 36-39.
- [10] 陈常松, 陈政清, 颜东煌. 悬索桥主缆初始位形的悬链线方程精细迭代分析法[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 62-68.  
CHEN C S, CHEN Z Q, YAN D H. Accurate iteration method to calculate the initial states of main cables of suspension bridges[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 62-68.
- [11] 张志国, 张晓民, 邹振祝. 悬索无应力索长精确解[J]. 东北公路, 2003, 26(4): 86-87.  
ZHANG Z G, ZHANG X M, ZOU Z Z. Exact solution of the unstressed cable length for suspension cable[J]. Northeast Highway, 2003, 26(4): 86-87.
- [12] 钱冬生. 大跨悬索桥的设计与施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1997: 45-47.  
QIAN D S. Design and construction of long-span suspension bridges[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1997: 45-47.
- [13] 中交第一公路工程局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T F50-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 167-180.  
CCCC First Highway Engineering Co. Ltd.. Technical specifications for construction of highway bridges and culverts: JTG/T F50-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011: 167-180.  
(收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2016-05-19; 编辑: 潘红丽)
- 作者简介:** 张勤, 男, 助理工程师, 1988年生, 2014年硕士毕业于西南交通大学桥梁与隧道工程专业, 现主要从事公路与城市桥梁设计研究工作。地址: 湖北省武汉市解放公园路41号, 430010。电话: 15680552265, Email: 731382095@qq.com