

文章编号:1673-2049(2016)02-0071-06

# 大跨度斜拉桥斜拉索无应力长度计算方法

田俊<sup>1,2</sup>, 王文炜<sup>1</sup>, 宋一凡<sup>3</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**通过对影响斜拉索无应力长度的施工阶段各种因素的敏感性参数进行分析, 确定了影响斜拉索无应力长度的显著因素; 综合各种影响因素, 建立了斜拉索无应力长度精确计算方法。结果表明: 主塔的预偏位、主塔的动态变位、主梁的预拱度、主梁的预抬高、主梁的动态变位、温差、斜拉索弹性模量误差以及计算斜拉索弹性伸长修正值所选用的荷载均为敏感性影响因素; 建议的方法可以精确地计算斜拉索的无应力长度, 避免出现长索无法调整索长的状况。

**关键词:**大跨度斜拉桥; 斜拉索; 无应力长度; 计算方法; 施工控制

**中图分类号:**U448.27 **文献标志码:**A

## Calculation Method for Unstressed Length of Stay Cables in Long-span Cable-stayed Bridges

TIAN Jun<sup>1,2</sup>, WANG Wen-wei<sup>1</sup>, SONG Yi-fan<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;  
2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China;  
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The sensitivity parameters of various factors that influenced unstressed length of stay cables in different construction stages were analyzed and the most important influence factors were confirmed. Considering various influence factors, the calculation method for unstressed length of stay cable was given. The results show that the pre-deviation and dynamic displacement of main towers, pre-camber, prearranged height and dynamic displacement of main girders, temperature difference, elastic modulus error of stay cables, the load values which are used to calculate modified elastic elongation of stay cables are all the most sensitive factors. The proposed method can accurately calculate the unstressed length of stay cables, and avoid the situation that the length of long cables cannot be adjusted.

**Key words:** long-span cable-stayed bridge; stay cable; unstressed length of cable; calculation method; construction control

## 0 引言

斜拉索无应力长度是斜拉桥施工控制的一个重要参数。对于长度小于 100 m 的斜拉索, 一般情况

下锚具的富余长度(锚圈在锚杯上的调整长度)大于各种施工阶段因素引起的修正长度,《公路斜拉桥设计规范》(JTJ 027—96)<sup>[1]</sup>(以下简称《规范》)推荐的计算长度基本能够满足实际工程调整索长的要求。

收稿日期:2015-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51078079)

作者简介:田俊(1985-),男,山东临沂人,青岛理工大学讲师,东南大学工学博士研究生, E-mail: tianjunbridge@163.com。

然而,对 100 m 以上的斜拉索,富余长度小于各种施工阶段因素引起的修正长度,《规范》推荐的计算长度在实际工程中存在过短的现象,当前通常采用“宁长勿短”的原则进行克服。

各国学者对斜拉索无应力长度计算进行了相关的理论研究,计算方法主要有悬链线法、抛物线法和有限元法(或迭代法)<sup>[2-13]</sup>。悬链线法理论上计算精度非常高,但因其是超越函数,很难直接应用于实际工程。抛物线法是对悬链线理论的近似修正,即对悬链曲线展开级数式的前几项进行近似修正。有限元法(或迭代法)是把悬索解析和有限元(或力学解析)相结合,把斜拉索假设为只受拉力的柔索,建立柔索单元各力素与几何变量的关系方程,通过迭代计算求解。尽管上述各种计算方法的理论计算精度均较高,但未考虑影响斜拉索无应力长度的施工阶段的各种因素。为此,本文提出斜拉索无应力长度

的精确计算方法,避免出现应用长索时无法调整索长的状况。

### 1 工程概况

山东临沂市开罗大桥全长 1 437.66 m,主桥桥长 430 m,主桥桥面宽度 30 m;主桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,跨径组合为 100 m+230 m+100 m;主梁、主塔采用 C50 混凝土。主梁采用双肋截面,标准梁段的梁高为 2.5 m。主塔总高度为 114.65 m,桥塔整体呈花瓶型。斜拉索呈空间扇形分布,在塔上竖向间距为 2.5~4 m,在梁上纵桥向间距分别为 2.5,3.0,4.5,6.5,7,7.5 m,全桥共 112 根斜拉索,5 种锚具类型:PESM7-151,PESM7-163,PESM7-187,PESM7-199,PESM7-211。主桥的总体布置如图 1 所示。

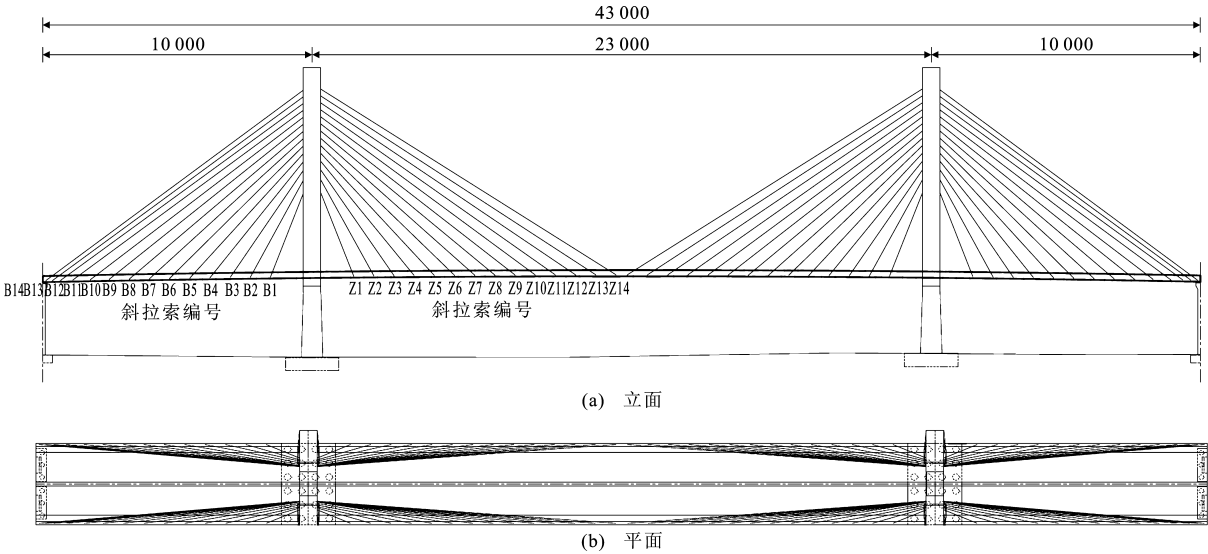


图 1 主桥总体布置(单位:cm)  
Fig.1 General Layouts of Main Bridge (Unit:cm)

### 2 影响斜拉索无应力长度的施工因素分析

为了精确计算斜拉索无应力长度,除了考虑斜拉索的弹性伸长修正、垂度修正及张拉端与锚固端锚杯长度构造因素外,还需要考虑施工阶段的各种影响因素,如主塔的动态变位、主塔的预偏位、主梁的预拱度、主梁的预抬高、主梁的动态变位、温差、斜拉索材料参数误差以及计算斜拉索弹性伸长修正和垂度修正选用的荷载。本文以临沂市开罗大桥为工程背景,对上述各因素进行了敏感性参数分析。斜拉索分别取长度最短的 Z1 索、中等长度的 Z8 索、

长度最长的 Z14 索。

#### 2.1 主塔位置

##### 2.1.1 主塔纵桥向动态变位

在施工过程中,主塔在纵桥向不平衡荷载作用下将发生纵桥向的变位。在施工阶段转换过程中,主塔纵桥向的变位将发生变化,即发生纵桥向的动态变位。

主塔动态变位对斜拉索无应力长度的影响如表 1 所示。从表 1 可以看出,主塔动态变位对中、长索无应力长度的影响较大。因此,斜拉索无应力长度计算时应考虑在初次张拉斜拉索的施工状态下主塔纵桥向的动态变位对索长的影响。

表 1 主塔与主梁变位对斜拉索无应力长度的影响

Tab.1 Effects of Deflections of Main Towers and Girders on Unstressed Length of Stay Cables

索编号	长度基数 $L_0$ /m	主塔纵桥向动态变位值/m	主塔动态变位索长修正值 $L_{td}$ /m	主梁动态变位值/m	主梁动态变位修正值 $L_{ld}$ /m	主梁预抬高值/m	预抬高索长修正值 $L_{ly}$ /m
Z1	38.872	0.018	0.006	0.039	0.031	0.023	0.018
Z8	87.904	0.092	0.069	0.121	0.067	0.013	0.007
Z14	133.043	0.162	0.136	0.145	0.078	0.155	0.084

2.1.2 主塔纵桥向预偏位

对于斜塔斜拉桥,为保证成桥后主塔达到预期的设计线形,主塔在爬模施工或滑模施工过程中需要设置纵桥向预偏位,而预偏位改变了主塔在斜拉索张拉时原设计的几何位置;对于直塔斜拉桥,施工过程中不存在主塔纵桥向预偏位,不需要考虑此因素的影响。

2.2 主梁位置

2.2.1 主梁预拱度

斜拉桥的整体结构刚度相对较小,在活载作用下主梁将产生较大的挠度。根据《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65-01—2007)<sup>[14]</sup>和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[15]</sup>的相关规定,主梁施工阶段需要设置预拱度,预拱度改变了主梁在斜拉索张拉时原设计的几何位置。当设计的成桥线形已包含主梁的预拱度时,不考虑此因素影响。

2.2.2 主梁动态变位

悬臂施工阶段,在自重、挂篮荷载、临时施工荷载、临时配置荷载及临时拉索荷载等共同作用下,主梁将产生较大的竖向变位。在施工阶段转换过程中,主梁的竖向变位值将发生变化,即主梁发生竖向的动态变位,所以在初次张拉斜拉索的施工状态下需要考虑主梁竖向动态变位对索长的影响。为使主梁成桥后达到预期的设计成桥线形,施工过程中需

要设置主梁预抬高。预抬高同样也改变了主梁在斜拉索张拉时原设计的几何位置。

主梁动态变位、预抬高对斜拉索无应力长度的影响如表 1 所示。从表 1 可以看出:主梁的动态变位对中、长索的无应力长度影响较大;预抬高对长索的无应力长度影响较大。因此,斜拉索无应力长度计算时应考虑主梁的动态变位和预抬高的影响。

2.3 温差影响

目前斜拉桥均采用成品斜拉索,斜拉索下料加工在缆索工厂的室内完成,工厂室内温度与斜拉索现场张拉时的温度存在一定的温差。对于主梁悬臂浇筑的斜拉桥施工周期一般较长,斜拉索在工地现场的张拉过程中要经历夏、冬两季。

温差对斜拉索无应力长度的影响如表 2 所示。从表 2 可以看出:30℃温差对短索的影响较小,可以被忽略;温差对中、长索的影响较大。因此,温差较大时,对于中、长索的无应力长度计算时应考虑温差的影响。

2.4 斜拉索材料参数误差

斜拉索的材料参数与《规范》的标准值存在一定的误差。材料参数误差对斜拉索无应力长度的影响如表 3 所示。从表 3 可以看出:自重误差对斜拉索无应力长度的影响很小,可以忽略;弹性模量误差对斜拉索无应力长度有一定的影响,斜拉索无应力长度计算时应考虑弹性模量误差的影响。

表 2 温差对斜拉索无应力长度的影响

Tab.2 Effect of Temperature Difference on Unstressed Length of Stay Cables

索编号	线膨胀系数	长度基数 $L_0$ /m	温差Ⅰ/℃	温差Ⅱ/℃	温差Ⅲ/℃	温差Ⅰ索长修正值/m	温差Ⅱ索长修正值/m	温差Ⅲ索长修正值/m
Z1	$1.20\times10^{-5}$	38.872	10	20	30	0.005	0.009	0.014
Z8	$1.20\times10^{-5}$	87.904	10	20	30	0.011	0.021	0.032
Z14	$1.20\times10^{-5}$	133.043	10	20	30	0.016	0.032	0.048

表 3 材料参数误差对斜拉索无应力长度的影响

Tab.3 Effect of Material Parameter's Error on Unstressed Length of Stay Cables

索编号	长度基数 $L_0$ /m	弹性模量增大比例/%	自重增大比例/%	弹性模量增大 1.5%索长修正值/m	自重增大 2%索长修正值/m
Z1	38.872	1.5	2	0.002	0.000
Z8	87.904	1.5	2	0.004	0.000
Z14	133.043	1.5	2	0.006	0.001

2.5 计算弹性伸长修正值和垂度修正值选用的合理荷载

为满足悬臂施工阶段主梁与主塔的局部受力、整体受力及挂篮受力等方面的要求,斜拉索通常要经历若干次张拉后达到初张力值。为研究计算弹性伸长修正值和垂度修正值选用的荷载对斜拉索无应力长度的影响,选取初张力、成桥索力作为计算荷载

表 4 荷载对斜拉索无应力长度的影响

Tab. 4 Effects of Loads on Unstressed Lengths of Stay Cables

索编号	长度基数 $L_0/\text{m}$	初张力/ kN	成桥索力/kN	初张力的弹性 伸长修正值/m	成桥索力的弹性 伸长修正值/m	不同荷载的弹性 伸长修正差值/m	初张力的垂度 修正值/m	成桥索力的垂度 修正值/m	不同荷载的垂度 修正差值/m
Z1	38.872	2 680	3 235	0.090	0.109	0.019	0.000	0.000	0.000
Z8	87.904	2 673	4 023	0.165	0.248	0.083	0.001	0.000	0.001
Z14	133.043	2 673	4 594	0.221	0.380	0.159	0.004	0.001	0.003

3 斜拉索无应力长度精确计算方法

综合各种影响因素,斜拉索无应力长度的计算简图如图 2 所示,精确计算公式如式(1)所示

$$L=L_0-\Delta L_e+\Delta L_f+\Delta L_{td}+\Delta L_{ty}+\Delta L_{ld}+\Delta L_{ly}+\Delta L_{lg}+\Delta L_t+[L_2/2+2H^L/3-L_3]\times 2+3d$$
 (1)

式中: $L$  为斜拉索无应力下料精确长度; $\Delta L_e$  为弹性伸长修正值; $\Delta L_f$  为垂度修正值; $\Delta L_{td}$  为施工阶段主塔纵桥向动态变位修正值; $\Delta L_{ty}$  为主塔预偏位的修正值; $\Delta L_{ld}$  为施工阶段主梁动态变位的修正值; $\Delta L_{ly}$  为主梁预抬高的修正值; $\Delta L_{lg}$  为主梁预拱度的修正值; $\Delta L_t$  为温差影响的修正值; $L_1$  为锚杯张拉端内螺纹深度; $L_2$  为锚圈高度; $H^L$  为锚杯长度; $d$  为钢丝直径。

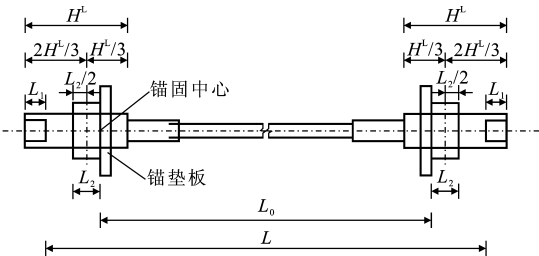


图 2 斜拉索无应力长度计算简图

Fig. 2 Calculation Diagram of Unstressed Length of Stay Cable

弹性伸长修正值及垂度修正值的计算公式分别为

$$\Delta L_e=L_0\frac{\sigma}{E}$$
 (2)

$$\Delta L_f=\frac{\omega^2L_x^2L_0}{24T^2}$$
 (3)

式中: $\sigma$  为斜拉索初张应力; $E$  为斜拉索的实际弹性

进行研究。不同荷载对应的斜拉索弹性伸长修正值、垂度修正值如表 4 所示。

从表 4 可以看出,计算弹性伸长修正值选用的荷载对斜拉索无应力长度影响较大,计算垂度修正值选用的荷载对斜拉索无应力长度影响很小,可以忽略。因此,将初张力作为弹性伸长修正值的计算荷载较为合理。

模量; $T$  为斜拉索初张力; $L_x$  为  $L_0$  的水平投影长度; $\omega$  为斜拉索单位长度质量。

4 算例分析

4.1 有限元模型

采用 MIDAS/Civil8.05 软件建立主桥空间有限元模型。混凝土梁、主塔均采用梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟,并考虑垂度引起的非线性影响,对其弹性模量进行修正。主梁的模拟采用单梁梁格法,即主梁纵桥向采用单梁法模拟,横桥向采用梁格法模拟。对于施工阶段的全过程分析,一共定义了 132 个施工阶段。空间有限元计算模型如图 3 所示。

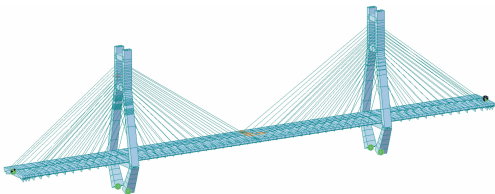


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite Element Calculation Model

4.2 斜拉索无应力长度计算

对斜拉桥的 Z1~Z14 斜拉索,分别采用斜拉索无应力长度精确计算方法和《规范》推荐的方法进行计算。对于主塔纵桥向动态变位、主梁动态变位、主梁预抬高的取值,均采用有限元模型的理论计算值。温差的影响根据实际工程的具体情况进行计算。由于斜拉索分两批次加工,即夏、冬两季,对 Z1~Z6 斜拉索进行 10℃ 温差修正,对 Z7~Z14 斜拉索进行 30℃ 温差修正。表 5 为 2 种方法的具体影响因素。

2 种方法计算的斜拉索无应力长度、各种施工

表 5 2 种方法的影响因素

Tab. 5 Influence Factors of Two Methods

施工阶段的影响因素	《规范》推荐方法	精确计算方法
主塔预偏位	未修正	未修正
主塔动态变位	未修正	修正
主梁预抬高	未修正	修正
主梁动态变位	未修正	修正
温差	修正	修正
计算弹性伸长荷载	设计成桥索力	初张力
计算垂度修正值荷载	设计成桥索力	初张力
斜拉索弹性模量	《规范》标准值	实测值
斜拉索自重	《规范》标准值	实测值

阶段因素引起的索长修正值及锚具调节长度如表 6 所示。从表 6 可以看出:斜拉索长度越长,各种施工

表 6 不同方法计算的斜拉索无应力长度

Tab. 6 Unstressed Lengths of Stay Cables Calculated by Different Methods

索编号	锚具类型	《规范》推荐方法 计算长度/m	精确计算方法 计算长度/m	各种施工因素索 长修正值/m	锚具调节长度/m	锚具调节长度与施工因素 索长修正值的差值/m
Z1	PESM7-151	39.272	39.342	0.070	0.105	0.035 0
Z2	PESM7-151	45.693	45.736	0.043	0.105	0.062 0
Z3	PESM7-163	52.398	52.452	0.054	0.120	0.066 0
Z4	PESM7-163	59.087	59.149	0.062	0.120	0.058 0
Z5	PESM7-163	65.998	66.068	0.070	0.120	0.050 0
Z6	PESM7-163	73.428	73.514	0.086	0.120	0.034 0
Z7	PESM7-187	80.858	80.969	0.111	0.105	−0.006 0
Z8	PESM7-187	88.225	88.383	0.158	0.105	−0.053 0
Z9	PESM7-199	95.585	95.753	0.168	0.115	−0.053 0
Z10	PESM7-199	103.004	103.171	0.167	0.115	−0.052 0
Z11	PESM7-211	110.525	110.703	0.178	0.098	−0.080 5
Z12	PESM7-211	118.084	118.206	0.122	0.098	−0.024 5
Z13	PESM7-211	125.651	125.806	0.155	0.098	−0.057 5
Z14	PESM7-211	133.268	133.444	0.176	0.098	−0.078 5

(2)综合各种影响因素,建立了斜拉索无应力长度精确计算方法。计算结果表明,对于长度大于 100 m 的长索,按本文建议的方法计算的索长更接近实际工程所需的真正长度,避免了长索的无应力下料长度存在过短的状况。虽然本文建议的方法比《规范》推荐的方法计算精度更高,但计算工作量将会大量增加,主要是增加了施工阶段全过程分析的有限元建模工作。

参考文献:  
References:

[ 1 ] JTJ 027—96,公路斜拉桥设计规范(试行)[S].  
JTJ 027—96,Design Specifications of Highway Cable Stayed Bridge(on Trial)[S].

阶段因素引起的索长修正值越大;当斜拉索长度大于 80 m 时,锚具调节长度将小于各种施工阶段因素引起的修正长度,因此《规范》推荐的计算长度对于 Z7~Z14 斜拉索存在长度过短的现象。综上所述,对于大跨度斜拉桥的斜拉索,精确计算方法计算的索长更接近实际工程所需的真正长度。

5 结 语

(1)本文指出了对于索长大于 100 m 的斜拉索按《规范》推荐方法计算的长度在实际工程中存在过短的原因,即锚具调节长度小于各种施工阶段因素引起的修正长度。对影响斜拉索无应力长度的各种施工阶段因素进行敏感性参数分析,确定了影响显著的因素。

[ 2 ] 郝超,裴岷山,强士中.大跨度斜拉桥拉索无应力长度的计算方法比较[J].重庆交通学院学报,2001,20(3):1-3.  
HAO Chao, PEI Min-shan, QIANG Shi-zhong. Comparison of Algorithm for Calculating Non-stress Length of Cable in Long-span Cable-stayed Bridges [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(3):1-3.  
[ 3 ] 张佐安.PC 斜拉桥施工控制索长的确定[J].公路交通技术,2002(4):40-42.  
ZHANG Zuo-an. Determination of Control Cable Length of PC Cable-stayed Bridge[J]. Technology of Highway and Transport, 2002(4):40-42.  
[ 4 ] 李春茂,郎宏继,胡景祥.沈阳市富民桥斜拉索长度计算方法[J].桥梁建设,2004,34(增):28-30.

- LI Chun-mao, LANG Hong-ji, HU Jing-xiang. Calculation Methods of Stay Cable Length of Fumin Bridge in Shenyang[J]. Bridge Construction, 2004, 34(S): 28-30.
- [5] 邵旭东, 张欣, 李立峰. 斜拉索索状态的精确计算[J]. 中南公路工程, 2005, 30(1): 33-35, 43.  
SHAO Xu-dong, ZHANG Xin, LI Li-feng. Accurate Calculation of Cable State of Cable Stayed Bridge[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(1): 33-35, 43.
- [6] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 基于精确解析解的索单元[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 445-450.  
LUO Xi-heng, XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Cable Element Based on Exact Analytical Expressions[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4): 445-450.
- [7] 秦顺全. 桥梁施工控制——无应力状态法理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
QIN Shun-quan. Bridge Construction Control: Unstressed State Method Theory and Practice[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [8] 方志, 李学有. 斜拉索无应力长度求解及成品索长合理确定[J]. 桥梁建设, 2009, 39(4): 54-58.  
FANG Zhi, LI Xue-you. Calculation of Unstressed Length and Reasonable Determination of Finished Length of Stay Cable[J]. Bridge Construction, 2009, 39(4): 54-58.
- [9] 田俊. 空间扭索斜拉桥合理成桥状态与合理施工状态耦合分析方法[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
TIAN Jun. Coupling Analysis of Rational Completion Stage and Rational Construction Stage of Space Twist Cable-stayed Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10] 汪峰, 刘沐宇. 斜拉桥无应力索长的精确求解方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 49-52.  
WANG Feng, LIU Mu-yu. An Accurate Method for Determining Unstressed Cable Length in Long Span Cable Stayed Bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(7): 49-52.
- [11] 苑仁安, 秦顺全. 无应力状态法在钢绞线斜拉索施工中的应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(3): 75-79.  
YUAN Ren-an, QIN Shun-quan. Application of Unstressed State Method to Construction of Steel Strand Stay Cable[J]. Bridge Construction, 2012, 42(3): 75-79.
- [12] 谷利雄, 林桢楷, 王荣辉. 斜拉索无应力索长的实用迭代算法[J]. 中外公路, 2012, 32(1): 149-151.  
GU Li-xiong, LI Zhen-kai, WANG Rong-hui. Practical Iterative Algorithm for Unstressed Length of Stay Cables[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(1): 149-151.
- [13] 刘扬, 龙华. 成品柔性拉索下料长度计算[J]. 华东公路, 2013(1): 92-93.  
LIU Yang, LONG hua. Calculation of Cutting Length of Finished Flexible Cable[J]. East China Highway, 2013(1): 92-93.
- [14] JTG/T D65-01—2007, 公路斜拉桥设计细则[S].  
JTG/T D65-01—2007, Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge[S].
- [15] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].  
JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridge and Culverts[S].