

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.001

# 基于频率法的单索玻璃幕墙索力模拟分析

黄音<sup>1a,1b</sup>, 孙瑜利<sup>1a</sup>, 程文星<sup>2</sup>, 徐诗童<sup>3</sup>

(1.重庆大学 a.土木工程学院, b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
2.云南水利水电职业学院, 昆明 650400; 3.中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016)

**摘要:**为研究频率法在单索玻璃幕墙拉索索力监测中的准确性,基于某单索玻璃幕墙索力监测项目,采用有限元软件 ANSYS 建立幕墙拉索在不同边界条件下的振动模型,分析模拟频率与实测频率之间的关系,结果表明:幕墙拉索的边界条件更接近两端固支,并且短索更明显;高阶频率( $n=3\sim 6$ )较低阶频率( $n=1\sim 2$ )更稳定。将幕墙拉索的实测频率与边界条件为两端固支的模拟频率( $n=3\sim 6$ )进行比对,得到弦理论公式的频率修正系数为 0.968,提出索力修正计算公式,其适用于长细比在 270~340 之间的单索玻璃幕墙拉索。采用弓式测力计法对修正公式进行验证,索力相对误差为 -5.4%,表明该修正公式能有效提高索力计算精度。

**关键词:**单索玻璃幕墙;幕墙拉索;模拟分析;修正公式

**中图分类号:**TU394;TU317+.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2018)11-001-07

## Analysis of cable force simulation for single cable glass curtain wall based on frequency method

HUANG Yin<sup>1a,1b</sup>, SUN Yuli<sup>1b</sup>, CHENG Wenxing<sup>2</sup>, XU Shitong<sup>3</sup>

(1a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, P.R.China; 2. Yunnan Water Resources and Hydropower Vocational College, Kunming 650400, P.R.China;  
3. CCTEG Chongqing Engineering Co. Ltd., Chongqing 400016, P.R. China)

**Abstract:** In order to study the accuracy of frequency method applied to monitoring the cable force of single cable glass curtain wall, based on the cable force monitoring project of some single cable glass curtain wall, finite element software ANSYS was used to establish the vibration model of the single cable glass curtain wall under different boundary conditions, and the simulated frequencies were compared with the measured frequencies. The results showed that the boundary condition of the curtain wall cable is closer to the fixed ends, and the shorter cable is more obvious; the higher order frequencies ( $n=3\sim 6$ ) are more stable than the lower order frequencies ( $n=1\sim 2$ ). The frequency correction coefficient was obtained by comparison of the measured frequency with the simulated frequency ( $n=3\sim 6$ ), and the number was 0.968 calculated by string theory formula. A modifier formula was proposed, which was suitable for the cable of single cable

收稿日期:2018-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078370)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51078370).

作者简介:黄音(1971—),男,重庆大学副教授,博士,主要从事预应力混凝土结构、结构检测与加固研究,(E-mail) hzxy20@163.com。

glass curtain wall whose ratio of length to diameter was between 270 ~ 340. The modifier formula was verified by the bow type dynamometer method, and the relative error of the cable force was  $-5.4\%$ , which showed that the calculation accuracy of the curtain wall cable force could be effectively improved by the modifier formula.

**Keywords:** single cable glass curtain wall; curtain wall cable; simulation analysis; modifier formula

近年来,单索玻璃幕墙结构大量运用于机场候机厅、写字楼等大型公共建筑中,预应力拉索是这种结构中的关键构件,能准确地监测拉索索力,对结构的安全施工和运行都具有非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

预应力拉索索力的测试方法有油压表法、传感器法、频率法、弓式测力计法(也称三点弯曲法)、磁通量法等。其中,频率法是基于弦振动理论<sup>[3-6]</sup>,由拉索的振动频率与其所受拉力之间的对应关系推算索力的一种方法<sup>[7-8]</sup>。该方法具有操作简单、快速、费用低等优点,是目前在桥梁拉索索力测试领域中应用最广泛的一种方法<sup>[9-11]</sup>。但是,在笔者的前期研究中发现,如果不加区分地照搬桥梁领域的频率法索力测试经验,将其应用于单索玻璃幕墙,测得的索力与其他方法测得索力之间存在明显误差。

为了研究频率法在玻璃幕墙索力测试中的误差来源,提高该方法的精确性,结合实际工程的测试情况,通过有限元分析,对玻璃幕墙中的频率法索力测试公式进行修正,其结果可为类似工程提供参考。

## 1 幕墙拉索索力计算

### 1.1 工程简介

某工程建筑平面分为指廊 A、B、C、D 区和中央大厅 E 区,其平面布置如图 1 所示。立面大跨度玻璃幕墙主要包括陆侧南立面、空侧东西北立面以及 4 个山墙立面等区域。

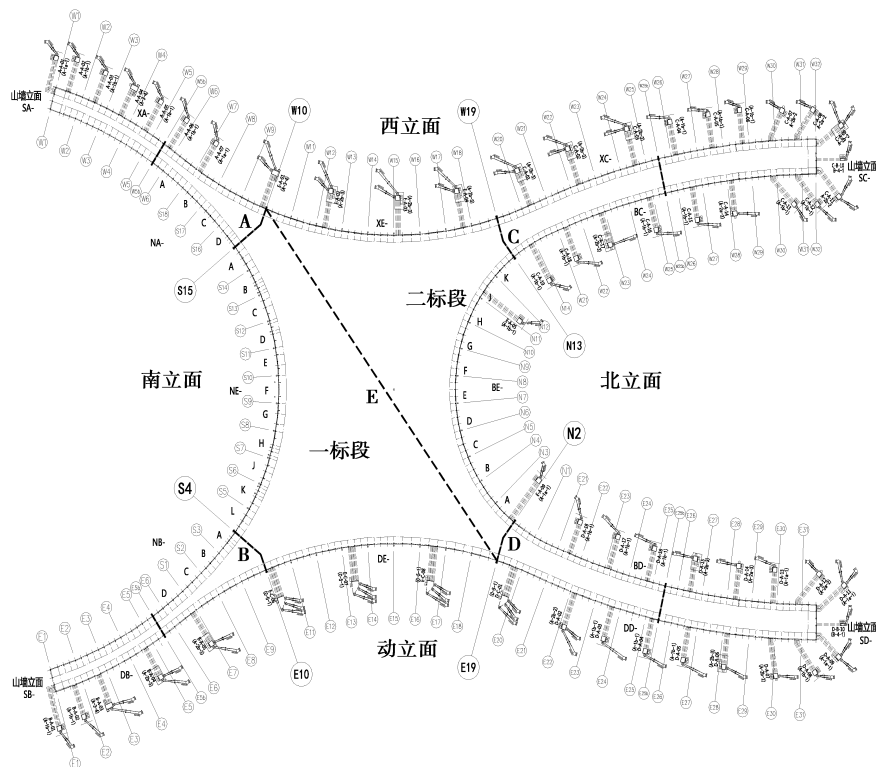


图 1 某工程平面布置示意图

Fig.1 The layout of an engineering project

文中选取仅长度条件不同的 2 组拉索(位于 B 指廊南立面的拉索 DB-S18、NB-S03 和位于 C 指廊的拉索 BC-S64、BC-S56)进行研究,以上各拉索的物理特性值见表 1。

表 1 单索玻璃幕墙拉索的物理特性

Table 1 The physical characteristics of single cable supported glass curtain wall

索 号	实测索长 $l/m$	直径 $D/mm$	金属断面面积 $A/mm^2$	弹性模量 $E/10^5 MPa$	单位长度质量 $m/(kg \cdot m^{-1})$
DB-S18	13.886	45	1 196	$1.1 \pm 0.1$	9.98
NB-S03	15.343	45	1 196	$1.1 \pm 0.1$	9.98
BC-S56	11.450	42	1 042	$1.1 \pm 0.1$	8.70
BC-S64	11.365	42	1 042	$1.1 \pm 0.1$	8.70

## 1.2 频率法基本理论

频率法的基本理论主要有弦理论和梁理论。

弦理论是将拉索简化为一根张紧的弦,两端铰接,忽略拉索抗弯刚度的影响,由此条件可得到张紧弦的索力<sup>[5-6]</sup>为

$$T_{tan} = 4ml^2 \left( \frac{f_n}{n} \right)^2, \quad (1)$$

式中: $m$  是幕墙拉索的单位质量; $l$  是索长; $f_n$  是自振频率, $n$  是频率阶次( $n=1 \sim 6$ )。

梁理论将拉索看作一轴向受拉的梁,考虑抗弯刚度的影响,当两端为铰支时,可得到考虑抗弯刚度的索力<sup>[12]</sup>为

$$T_{tbn} = 4ml^2 \left( \frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2}, \quad (2)$$

式中, $EI$  为拉索抗弯刚度,其余各符号意义同式(1)。

当两端为固支时,则无法求得拉索振动方程的解析解,目前仅有国内外的学者提出的相关经验公式<sup>[13-14]</sup>。

弦理论公式(式 1)的形式较梁铰支理论公式(式 2)更简洁,计算过程更简便,文中采用弦理论公式计算幕墙拉索索力值。

## 1.3 索力计算结果

通过现场实测得到拉索的振动响应时程曲线,并经过频谱分析得到以上各拉索的实测频率值见表 2。

表 2 拉索实测频率值

索 号	Table 2 Measured frequency value of the cable						Hz
	实测自振频率 $f_n$						
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	
DB-S18	7.6	16.0	20.8	28.0	35.4	43.2	
NB-S03	7.0	13.8	—	24.9	31.4	38.2	
BC-S64	9.0	16.5	24.5	33.0	42.0	51.0	
BC-S56	8.5	16.0	24.0	32.5	41.5	50.5	

采用弦理论计算公式(式 1)对幕墙拉索 DB-S18、NB-S03、BC-S64、BC-S56 进行索力计算,得到的索力结果见表 3。

计算采用弦理论公式得到的索力值  $T_{tan}$  与设计索力值  $T_0$  之间的偏差,结果见表 4。其中,幕墙拉索 DB-S18、NB-S03、BC-S64、BC-S56 的设计值分别为 359 kN、359 kN、286 kN、286 kN。

表 3 弦理论公式计算索力值

索号	弦理论计算实测索力 $T_{\text{tar}}$					
	$T_{\text{ta1}}$	$T_{\text{ta2}}$	$T_{\text{ta3}}$	$T_{\text{ta4}}$	$T_{\text{ta5}}$	$T_{\text{ta6}}$
DB-S18	444.6	492.6	370.0	377.2	385.8	399.0
NB-S03	460.5	447.4	—	364.2	370.6	380.9
BC-S64	364.1	305.9	299.8	305.9	317.1	324.7
BC-S56	329.6	292.0	292.0	301.2	314.3	323.2

表 4 弦理论公式索力值与设计索力值的偏差

索号	$(T_{\text{tar}} - T_0)/T_0$					
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
DB-S18	23.8	37.2	3.1	5.1	7.5	11.1
NB-S03	28.3	24.6	—	1.4	3.2	6.1
BC-S64	27.3	7.0	4.8	7.0	10.9	13.5
BC-S56	15.3	2.1	2.1	5.3	9.9	13.0

从表 4 可知,弦理论公式计算索力值  $T_{\text{tar}}$  与设计索力值  $T_0$  之间存在较大偏差,且计算索力值均比设计索力值偏大。

本工程对类似的预应力拉索 NB-S02、NB-S06 分别进行了油压表法、频率法同步测试。分析测试结果可知:采用频率法弦理论公式计算所得索力与油压表法测试所得拉索实际索力之间的相对误差分别为 20.9%、23.3%,即现有的频率法弦理论公式在计算单索幕墙拉索索力时存在较大误差,所得索力值明显偏大。

以上误差产生的原因来自弦理论公式的推导条件与单索玻璃幕墙拉索的实际情况之间的差异,如拉索的自重、边界条件、端部连接构造等,文中就其中边界条件这一因素的影响进行了研究。

## 2 有限元分析

### 2.1 幕墙拉索模型的建立

采用 LINK10 单元并将拉索边界条件全部约束模拟弦理论两端铰支的边界条件,采用 BEAM188 单元且将拉索边界条件全部约束模拟梁理论两端固支的边界条件。拉索钢绞线材料采用线性各向同性材料模型,不考虑材料的非线性性质,泊松比为 0.3,热膨胀系数为  $1.6 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,其余物理特性值见表 1。建立的有限元模型如图 2 所示。

拉索只有施加预张力后才能形成受力体系。文中采用降温法施加预应力,计算当量温降采用的公式为

$$\Delta t_i = \frac{T_0}{\alpha_0 \cdot EA}, \quad (2)$$

式中: $\Delta t$  为拟施加的温降; $T_0$  为设计索力; $E$  为幕墙拉索的弹性模量; $\alpha_0$  为幕墙拉索的热膨胀系数。

### 2.2 模态分析

将 ANSYS 建立的幕墙拉索有限元模型进行模态分析,计算得到幕墙拉索的模拟频率,并将其与实测频率进行比较,绘制折线图如图 3 所示。

从图 3 可以看出,幕墙拉索的实测频率明显更趋向于两端固支模拟频率,即幕墙拉索的边界条件更趋向于两端固支;并且,由仅长度条件不同的两组拉索 DB-S18、NB-S03 和 BC-S64、BC-S56 对比可知,长度越短的拉索边界条件越趋向于两端固支。现有弦理论公式的推导条件是将拉索边界条件简化为两端铰支,而幕墙拉索的实际边界条件是介于两端铰支和两端固支之间的,所以这样的简化会使索力计算值出现较大偏差,故

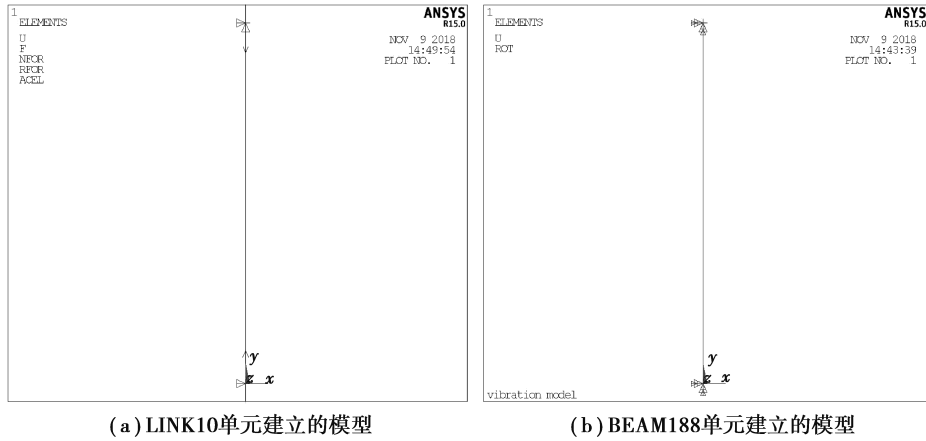


图 2 拉索有限元模型

Fig.2 The FEM of the single cable

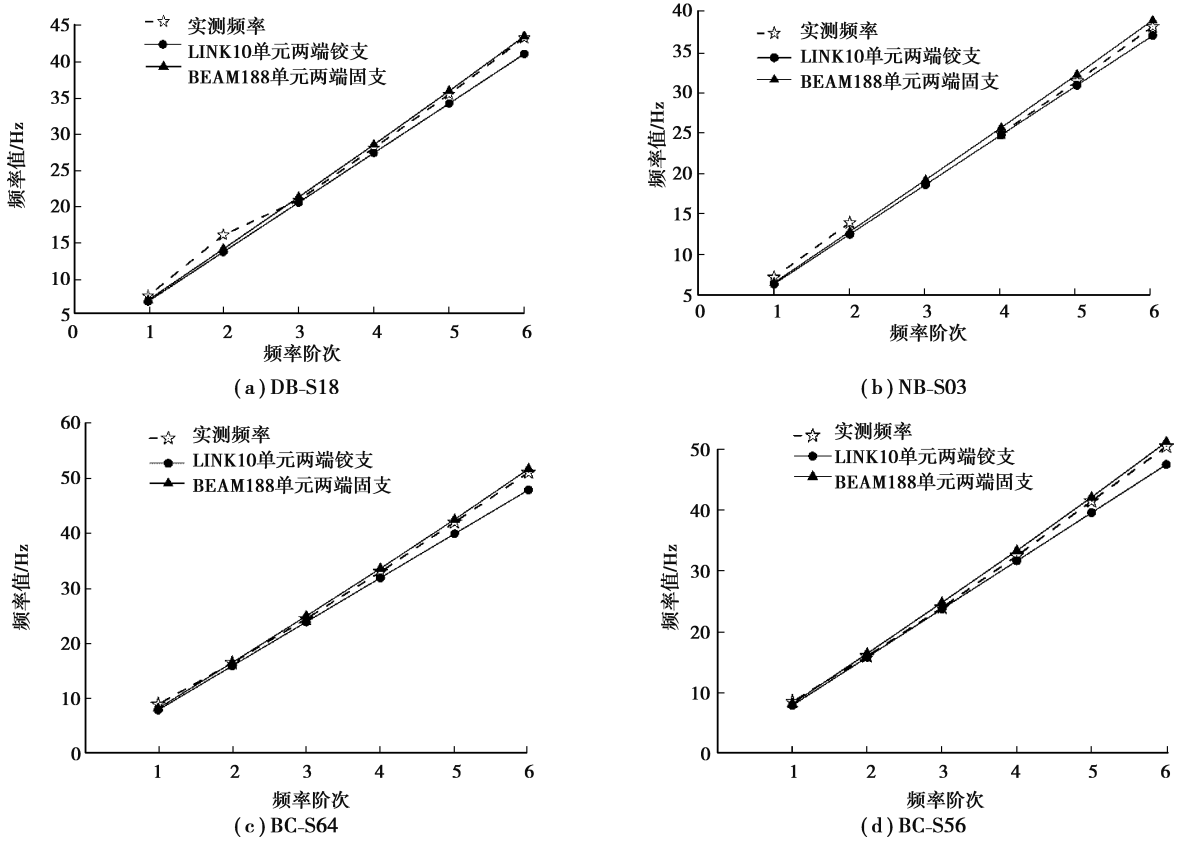


图 3 模拟频率与实测频率的比较

Fig.3 The comparison of simulated and measured frequencies

需要对弦理论公式进行修正。

由模拟频率与实测频率的对比结果可知,各拉索的实测低阶频率值( $n=1\sim 2$ )均出现比两端固支梁模拟频率值还大的现象,这说明拉索低阶频率受其他因素(如拉索的自重、端部的连接构造等)影响较大。故文中采用相对更稳定的高阶频率( $n=3\sim 6$ )来对公式进行修正。

### 3 弦理论公式的修正

#### 3.1 弦理论修正公式

文中采用修正频率的方法来修正弦理论索力计算公式,首先,计算幕墙拉索边界条件为两端铰支的

LINK10 单元模拟频率与实测频率的比值;然后,将其进行算术平均;最后,得到频率修正系数为 0.968,即弦理论修正公式为

$$T'_{\text{tan}} = 4ml^2 \left( \frac{0.968f_n}{n} \right)^2, \quad (3)$$

式中各符号意义同式(1)。

### 3.2 修正后索力计算结果

采用修正后的弦理论计算公式(式 3)对单索玻璃幕墙拉索 DB-S18、NB-S03、BC-S64 和 BC-S56 进行索力计算,得到修正后的索力值见表 5。

表 5 修正弦理论公式计算索力值

索 号	弦理论公式计算实测索力 $T_{\text{tan}}$					
	$T_{\text{ta1}}$	$T_{\text{ta2}}$	$T_{\text{ta3}}$	$T_{\text{ta4}}$	$T_{\text{ta5}}$	$T_{\text{ta6}}$
DB-S18	417.0	462.1	347.1	353.8	361.9	374.3
NB-S03	431.9	419.7	—	341.6	347.6	357.3
BC-S64	341.5	286.9	281.2	286.9	297.4	304.6
BC-S56	309.2	273.9	273.9	282.5	294.8	303.2

将表 5 中的拉索修正索力值  $T'_{\text{tan}}$  与其设计索力值  $T_0$  进行对比,计算得到索力的偏差,结果见表 6。

表 6 索力修正值与设计索力值的偏差

索 号	$(T_{\text{tan}} - T_0)/T_0$					
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
DB-S18	16.2	28.7	-3.3	-1.5	0.8	4.3
NB-S03	20.3	16.9	—	-4.8	-3.2	-0.5
BC-S64	19.4	0.3	-1.7	0.3	4.0	6.5
BC-S56	8.1	-4.2	-4.2	-1.2	3.1	6.0

由表 3 和表 6 的对比可知,由修正公式计算的索力值与设计索力值之间的偏差明显减小。

### 3.3 弦理论修正公式的验证

在本项目中除采用频率法外,还在现场条件具备的情况下对部分预应力拉索采用了弓式测力计法<sup>[15]</sup>和频率法进行同步测试。但由于现场条件受限,在上述 4 根幕墙拉索中仅对拉索 NB-S03 采用弓式测力计法进行了测量,其索力测试值为 377.7 kN,将其与拉索 NB-S03 的频率法弦理论修正公式计算所得的索力值进行比较,得到相对误差为 -5.4%,在可接受范围内,即文中提出的修正公式用于单索玻璃幕墙拉索进行索力测试是可行的。

### 3.4 弦理论修正公式的适用条件

拉索的索长、索径不同对频率法测试结果会产生影响。文中提出的修正系数是基于单索玻璃幕墙拉索 DB-S18、NB-S03、BC-S64 和 BC-S56 得到,以上 4 根拉索的长细比(索长与索径之比)分别为 308.59、340.96、272.62、270.59,故该修正公式适用于长细比在 270~340 范围内的单索玻璃幕墙拉索。

## 4 结论

以某单索玻璃幕墙拉索的索力监测项目为研究背景,采用 ANSYS 对幕墙拉索进行有限元建模得到拉索的模拟振动频率,将其与拉索实测振动频率进行对比分析,得到主要结论如下:

1)单索幕墙中拉索的索长、索径等与桥梁工程中的拉索存在差异,按现有频率法弦理论公式计算单索玻璃幕墙的拉索索力,存在较大的误差。

2)通过模拟振动频率与实测振动频率的对比可知,拉索的实际振动频率更接近两端固支梁的有限元分析结果,且短索更为明显。

3)采用 LINK10 单元模拟频率与实测频率相比并取算术平均值的方法得到频率修正系数为 0.968,修正弦理论计算公式。

4)采用弓式测力计法的索力测试值对修正公式进行验证,结果表明,文中提出的弦理论修正公式能较大地提高索力计算精度。

5)该修正公式适用于长细比在 270~340 范围内的单索玻璃幕墙拉索。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 刘军进,岳丽婕.玻璃幕墙张拉索杆支承结构体系受力特点及工程应用[J].建筑结构,2013,43(19):83-89.  
LIU Junjin, YUE Lijie. Structural characteristics and applications of tensioned cable and rod structure system of glass curtain[J]. Building Structure, 2013,43(19):83-89. (in Chinese)
- [ 2 ] Feng R Q, Ye Jihong, Yao Y C. A new type of structure: glass cable truss[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015,20(12):04015024.
- [ 3 ] 王博妮.关于特定情况下柔性索索力:频关系的研究[D].成都:西南交通大学,2012.  
WANG Boni. Study on the tension-frequency relationship of flexible cable in particular situation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2012.(in Chinese)
- [ 4 ] Mehrabi A B, Tabatabai H. Unified finite difference formulation for free vibration of cables[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(11):1313-1322.
- [ 5 ] Zui H, Shinke T, Namita Y. Improved practical formulas for estimation of cable tension by vibration method[J]. Journal of Structural Engineering, 1980,526(6):651-656.
- [ 6 ] Irvine H M, Caughey T K. The linear theory of free vibrations of a suspended cable[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1974,341(1626):299-315.
- [ 7 ] Yan B, Yu J, Soliman M, et al. Estimation of cable tension force independent of complex boundary conditions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015,141(1):06014015.
- [ 8 ] 孙永明,李惠.端部性质对频率法测量竖直拉索索力影响分析[J].工程力学,2013,30(8):10-17.  
SUN Yongming, Li Hui. Effect of extreme properties of vertical cable on the cable force measurement by frequency-based method[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 10-17. (in Chinese)
- [ 9 ] Kroneberger-Stanton K J, Hartsough B R. A monitor for indirect measurement of cable vibration frequency and tension [J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35(1):341-346.
- [10] Casas J R. A combined method for measuring cable forces: the cable-stayed alamillo bridge, spain [J]. Structural Engineering International, 1994,4(4):235-240.
- [11] Russell J C, Lardner T J. Experimental determination of frequencies and tension for elastic cables [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998,124(10):1067-1072.
- [12] Kim B, Park T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method[J]. Journal of Sound Vibration, 2007,304(3-5):660-676.
- [13] Zui H, Shinke T, Namita Y. Improved practical formulas forestimation of cable tension by vibration method [J]. Journal of Structural Engineering, 1980, 525(6):651-656.
- [14] 任伟新,陈刚.由基频计算拉索拉力的实用公式[J].土木工程学报,2005,38(11):26-31.  
REN Weixin, CHEN Gang. Practical formulas to determine cable tension by using cable fundamental frequency[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 26-31. (in Chinese)
- [15] 郭明渊,陈志华,刘红波,等.拉索索力测试技术与抗弯刚度研究进展[J].空间结构,2016,22(3):34-43.  
GUO Mingyuan, CHEN Zhihua, LIU Hongbo, et al. Research progress of cable force test technology and cable flexural rigidity[J]. Spatial Structures, 2016,22(3):34-43.(in Chinese)