

考虑减振器弹性刚度时拉索张力的计算分析

吴 晓¹, 赵均海², 黄志刚¹, 杨立军¹

(1. 湖南文理学院 土木建筑工程学院, 湖南 常德 415000; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:为了提高装置减振器斜拉索张力的测试精度,在考虑减振器弹性刚度影响的基础上,建立了装置减振器拉索的振动微分方程。利用 Laplace 变换即可方便求得拉索的振型函数,结合减振器弹性刚度的中间支承条件,可得到拉索的频率特征方程,利用此频率特征方程就可以求得拉索的频率或张力。由于该方法求得的是精确解析解,因此其计算结果可以用来检验其他工程近似方法的计算精度。研究结果表明:斜拉索的抗弯刚度对斜拉索张力计算的影响不大,所以斜拉索张力计算可以忽略抗弯刚度的影响;减振器弹性刚度对减振器弹性刚度“较大”的斜拉索张力计算影响较大,对减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算影响并不十分显著,因此在减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算中可以不计减振器弹性刚度的影响。

关键词:桥梁工程;减振器;弹性刚度;斜拉索;张力;频率特征方程

中图分类号:U411.5

文献标志码:A

Calculation and analysis of cable tension considering elastic stiffness of oscillating damper

WU Xiao¹, ZHAO Jun-hai², HUANG Zhi-gang¹, YANG Li-jun¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve test accuracy of tension of cable with oscillating damper, the vibration differential equation of cable with oscillating damper was established, considering the influence of elastic stiffness of oscillating damper. The vibration shape function of the cable was easily obtained by using the Laplace transform, and the frequency characteristic equation of the cable was obtained with the intermediate support conditions of elastic stiffness of oscillating damper. Then the frequency or tension of cable was obtained by using the frequency characteristic equation. Since the solution obtained by this method is exactly analytical, the results of this method can be used to test the calculation accuracy of other engineering approximate methods. The research results show that the bending cable stiffness has little effect on the cable tension, so the calculation of cable tension can ignore the bending stiffness; the effect of damper elastic stiffness on the cable tension is connected with the magnitudes of damper stiffness, and it increases along with the level of damper stiffness. So the damper elastic stiffness effect is

negligible when damper elastic stiffness is small. 2 tabs, 1 fig, 12 refs.

Key words: bridge engineering; oscillating damper; elastic stiffness; cable; tension; frequency characteristic equation

0 引言

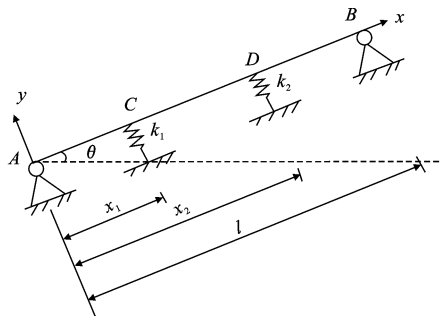
斜拉桥以其结构受力性能好,跨越能力大、结构造型多姿多彩、抗震能力强及施工方法成熟等特点,在桥梁工程中得到了越来越多的应用。在现代斜拉桥中,一般选用较多数量的斜拉索,以致每根索可由单股索制成。这种索易于安装替换,而且对加劲梁提供了连续支承。斜拉索拉力是斜拉桥工作状态评估的重要依据,目前拉力测试的最常用方法是基于环境振动的频率法。大跨度斜拉桥拉索容易发生风振、风雨激振等现象,为了抑制拉索的大幅振动,一般采取在桥面和拉索间设置减振器的方法,而减振器对拉索的固有频率有一定影响,会使频率法测量拉索张力的精度产生偏差。所以,测量拉索张力时应考虑减振器的弹性刚度。文献[1-5]考虑了减振器弹性刚度,首先将装有减振器的斜拉索分为3段,再根据振动方程及连续条件得到超越频率特征方程,然后计算减振器的等效刚度,并利用 Matlab 把超越方程近似化简得到等效长度,再根据斜拉索的等效长度和减振器的等效刚度选择斜拉索张力近似计算公式。文献[6-11]利用振动频率法考虑刚度及支承条件,研究了单跨拉索张力与频率的关系。采用等效长度研究安装减振器装置拉索张力是有其局限性的,所得结果也是近似解,而且还需用有限元法检验。为此,本文在考虑减振器弹性刚度和拉索弯曲刚度的基础上,采用 Laplace 变换推导了拉索的振动函数,得到频率特征方程,所得结果是精确解析解。计算结果可用来检验其他工程近似方法计算结果的精度和工程实测结果的误差。

1 考虑弯曲刚度时拉索张力

文献[12]已经证明并得出结论,对于张紧的斜拉索可以忽略垂度所引起的非线性影响。对于图1所示装有减振器的斜拉索,由振动理论可知考虑弯曲刚度时,其振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + C \frac{\partial y}{\partial t} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (1)$$

式中: EI 为拉索弯曲刚度; C 为阻尼系数; T 为拉索张力; m 为拉索单位长质量; $q(x, t)$ 为外载荷; t 为时间变量。



注: l 为斜拉索弦长; x_1 、 x_2 为减振器的横坐标; θ 为斜拉索的水平倾角。

图1 有减振器的拉索

Fig.1 Cable with oscillating damper

当图1所示拉索做固有振动时,减振器的支反力即为作用在拉索上的外载荷,可表示为

$$q(x, t) = k_1 y(x_1, t) \delta(x - x_1) + k_2 y(x_2, t) \delta(x - x_2) \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 为减振器的弹性刚度; $y(x, t)$ 为动位移; $\delta(x - x_i)$ 为狄拉克函数。

假设拉索固有振动时,动位移为

$$y(x, t) = Y(x) \varphi(t) \quad (3)$$

把式(2)、式(3)代入式(1)中分离变量可得

$$\frac{d^4 Y}{dx^4} - \beta^2 \frac{d^2 Y}{dx^2} - \alpha^4 Y = \frac{k_1}{EI} Y(x_1) \delta(x - x_1) + \frac{k_2}{EI} Y(x_2) \delta(x - x_2) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = 0 \quad (5)$$

式中: $\beta^2 = \frac{T}{EI}$; $\alpha^4 = \frac{m\omega_0^2}{EI}$; $\xi = \frac{C}{2m\omega_0}$; ω_0 为斜拉索的固有频率。

由式(5)可以求得 $\varphi(t)$ 表达式为

$$\varphi(t) = e^{-\xi\omega_0 t} [a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)] \quad (6)$$

式中: $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$; a 、 b 可利用初始条件确定。

狄拉克函数及阶跃函数的运算规则为

$$\delta(x - x_i) = \begin{cases} \infty, & x = x_i \\ 0, & x \neq x_i \end{cases} \quad (7)$$

$$H(x - x_i) = \begin{cases} 1, & x > x_i \\ 0, & x \leq x_i \end{cases} \quad (8)$$

$$L[\delta(x - x_i)] = e^{-sx_i} \quad (9)$$

$$L^{-1}\{e^{-sx_i} L[f(x + x_i)]\} = H(x - x_i) f(x) \quad (10)$$

式中: s 为拉氏变量,对式(4)进行 Laplace 变换可得

$$L(Y) = \frac{(s^2 - \beta^2)sY(0)}{s^4 - \beta^2 s^2 - \alpha^4} + \frac{(s^2 - \beta^2)Y'(0)}{s^4 - \beta^2 s^2 - \alpha^4} + \frac{sY''(0) + Y'''(0)}{s^4 - \beta^2 s^2 - \alpha^4} + \frac{k_1 Y(x_1) e^{-sx_1} + k_2 Y(x_2) e^{-sx_2}}{EI(s^4 - \beta^2 s^2 - \alpha^4)} \quad (11)$$

对式(11)进行 Laplace 逆变换可得

$$Y(x) = A \operatorname{sh}(\lambda_1)x + B \operatorname{ch}(\lambda_1)x + C \sin(\lambda_2)x + D \cos(\lambda_2)x + \frac{k_1 Y(x_1)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x - x_1)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x - x_2)}{\lambda_2} \right] H(x - x_1) +$$

$$Y(x) = \frac{k_1 Y(x_1)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left\{ \frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_1) \operatorname{sh}(\lambda_1)x}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} + \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x - x_1)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x - x_1)}{\lambda_2} \right] H(x - x_1) \right\} + \frac{k_2 Y(x_2)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left\{ \frac{\sin(\lambda_2)(l - x_2) \sin(\lambda_2)x}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_2) \operatorname{sh}(\lambda_1)x}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} + \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x - x_2)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x - x_2)}{\lambda_2} \right] H(x - x_2) \right\} \quad (14)$$

由于图 1 所示装有减振器拉索的中间支承条件为

$$Y(x)_{x=x_1} = Y(x_1), Y(x)_{x=x_2} = Y(x_2) \quad (15)$$

把式(14)代入式(15)中可以得到

$$Y(x_1) = \frac{k_1 Y(x_1)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x_1}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_1) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_1}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right] + \frac{k_2 Y(x_2)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \cdot \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_2) \sin(\lambda_2)x_1}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_2) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_1}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right]$$

$$Y(x_2) = \frac{k_1 Y(x_1)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x_2}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_1) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_2}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} + \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x_2 - x_1)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x_2 - x_1)}{\lambda_2} \right] + \frac{k_2 Y(x_2)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_2) \sin(\lambda_2)x_2}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_2) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_2}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right] \quad (16)$$

所以,由式(16)可以得到图 1 所示拉索的频率特征方程为

$$(A_{11} - 1)(A_{22} - 1) = A_{12}A_{21} \quad (17)$$

$$\text{式中: } A_{11} = \frac{k_1}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x_1}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_1) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_1}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right];$$

$$A_{12} = \frac{k_2}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x_1}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_2) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_1}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right];$$

$$A_{21} = \frac{k_1}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_1) \sin(\lambda_2)x_2}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_1) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_2}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} + \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x_2 - x_1)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x_2 - x_1)}{\lambda_2} \right];$$

$$A_{22} = \frac{k_2}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\sin(\lambda_2)(l - x_2) \sin(\lambda_2)x_2}{\lambda_2 \sin(\lambda_2)l} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(l - x_2) \operatorname{sh}(\lambda_1)x_2}{\lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1)l} \right].$$

当拉索参数确定后,利用式(17)即可求出拉索的张力。由以上推导可以看出,本文推导出的式(14)、式(17)是图 1 所示装有减振器拉索的精确解析式。

2 算例分析

为了说明本文方法在实际工程中的应用,以及检验其他方法的计算精度,以文献[5]提供的 1 组斜

$$\frac{k_2 Y(x_2)}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)EI} \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda_1)(x - x_2)}{\lambda_1} - \frac{\sin(\lambda_2)(x - x_2)}{\lambda_2} \right] H(x - x_2) \quad (12)$$

$$\text{式中: } \lambda_1^2 = \frac{\sqrt{\beta^4 + 4\alpha^4} + \beta^2}{2}; \lambda_2^2 = \frac{\sqrt{\beta^4 + 4\alpha^4} - \beta^2}{2}.$$

图 1 所示拉索的边界条件为

$$x=0, Y(0)=0, Y''(0)=0;$$

$$x=l, Y(l)=0, Y''(l)=0 \quad (13)$$

利用式(12)、式(13)可以求得图 1 所示拉索的振型函数为

拉索为例,来进行分析讨论。斜拉索的具体计算参数见下页表 1。按照表 1 提供的斜拉索计算参数,采用式(17)计算所得张力见下页表 2。

对表 2 进行分析可知,文献[5]给出的近似解计算精度很高,与本文精确解的误差很小。本文是在考虑了斜拉索抗弯刚度的基础上来研究斜拉索的张力计算,而文献[5]是在忽略斜拉索抗弯刚度的基础上来研究斜拉索的张力计算,把本文的计算结果与

表 1 斜拉索计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of cables

索号	$m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	l/m	x_1/m	x_2/m	$I/10^{-6}\text{m}^4$	$E/10^{11}\text{Pa}$	ω_0/Hz	$k/10^6(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
A1	33.8	37.22	1.191	36.029	1.476	1.95	4.056	6.2
A2	33.8	43.41	1.215	42.195	1.476	1.95	3.265	6.2
A3	33.8	52.34	1.204	51.136	1.476	1.95	2.614	6.2
A4	37.1	59.41	1.188	58.222	1.779	1.95	2.185	6.2
A5	37.1	67.68	1.218	66.462	1.779	1.95	1.968	6.2
A6	37.1	75.26	1.204	74.056	1.779	1.95	1.812	6.2
A7	43.2	82.99	1.162	81.828	2.412	1.95	1.592	6.2
A8	43.2	90.15	1.172	88.978	2.412	1.95	1.429	6.2
A9	43.2	97.94	1.175	96.765	2.412	1.95	1.314	6.2
A10	43.2	105.42	1.160	104.260	2.412	1.95	1.225	6.2
A11	43.2	113.06	1.244	111.816	2.412	1.95	1.183	6.2
A12	43.2	121.05	1.210	119.840	2.412	1.95	1.097	6.2
A13	43.2	128.77	1.159	127.611	2.412	1.95	1.012	6.2
A14	43.2	136.23	1.226	135.004	2.412	1.95	0.974	6.2
A15	43.2	143.92	1.151	142.769	2.412	1.95	0.960	6.2

表 2 斜拉索张力

Tab. 2 Tensions of cables

索号	文献[5]考虑减振器 影响索力/N	文献[5]未考虑 减振器影响索力/N	本文考虑减振器 影响索力/N	文献[5]考虑 减振器影响与未考虑 减振器影响的误差/%	本文考虑减振器 影响与文献[5]考虑 减振器影响的误差/%
A1	2 833 108	3 081 239	2 829 300	8.76	0.13
A2	2 517 258	2 715 955	2 515 100	7.89	0.09
A3	2 373 102	2 530 785	2 373 100	6.64	0.00
A4	2 363 105	2 500 667	2 361 500	5.82	0.07
A5	2 508 962	2 632 721	2 504 800	4.93	0.17
A6	2 646 393	2 759 807	2 633 800	4.29	0.48
A7	2 909 446	3 016 348	2 903 900	3.67	0.88
A8	2 771 790	2 867 739	2 760 200	3.46	0.42
A9	2 773 811	2 861 901	2 760 400	3.18	0.49
A10	2 799 794	2 881 787	2 787 700	2.93	0.43
A11	3 012 288	3 091 229	3 000 002	2.62	0.41
A12	2 973 951	3 047 099	2 971 300	2.46	0.09
A13	2 867 015	2 934 500	2 863 300	2.35	0.13
A14	2 977 492	3 042 336	2 976 000	2.18	0.05
A15	3 234 774	3 298 591	3 233 200	1.97	0.05

文献[5]等研究的计算结果进行比较可知,斜拉索的抗弯刚度对张力计算影响不大,所以斜拉索张力计算可以忽略抗弯刚度的影响。

文献[5]在考虑了斜拉索抗弯刚度的基础上,采用能量法推导出了减振器弹性刚度“较小”斜拉索的等效索长计算公式即张力计算公式;采用弦振动理论推导出了减振器弹性刚度“较大”斜拉索的等效索长计算公式即张力计算公式;对于特定的减振器弹性刚度既不“较小”又不“较大”,也推导出了斜拉索

的等效索长计算公式即张力计算公式。本文则在考虑斜拉索抗弯刚度的基础上,推导出了斜拉索的频率特征方程即张力计算的通式。由表 2 可以看出,减振器弹性刚度对表 1 中的减振器弹性刚度“较大”的斜拉索张力计算影响较大,对表 1 中的减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算影响并不是十分显著,因此在减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算中可以不计减振器弹性刚度的影响。

但是,文献[1-5]等研究给出的拉索张力近似计

算公式在实际工程中使用并不很方便。首先,要把装有减振器的斜拉索分为 3 段,再根据振动方程及连续条件得到超越频率特征方程,然后计算减振器的等效刚度,并利用 Matlab 把超越方程近似化简得到等效长度,再根据斜拉索的等效长度和减振器的等效刚度选择斜拉索张力近似计算公式,且需利用其他方法来验证斜拉索张力近似计算公式的精度。

由以上计算推导可知,本文方法无需对装有减振器的斜拉索进行分段,利用 Laplace 变换即可方便求得拉索的振型函数,结合减振器弹性刚度的中间支承条件,可得到拉索的频率特征方程。本文推导出的装有减振器的斜拉索振型函数式(14)及斜拉索频率特征方程式(17),在小挠度状态下都是精确解析解。所以,本文方法计算结果可以用来检验其他工程近似方法的计算结果和工程实测结果的误差精度。

3 结 语

(1)本文是在考虑了斜拉索抗弯刚度的基础上来研究斜拉索的张力计算,而文献[5]是在忽略斜拉索抗弯刚度的基础上来研究斜拉索的张力计算,将本文计算结果与文献[5]等研究的计算结果进行比较可知,斜拉索的抗弯刚度对斜拉索张力计算影响不大。

(2)减振器弹性刚度对减振器弹性刚度“较大”的斜拉索张力计算影响较大,对减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算影响并不十分显著,因此在减振器弹性刚度“较小”的斜拉索张力计算中可以不计减振器弹性刚度的影响。

(3)本文首次推导了装有减振器的斜拉索在小挠度状态下的振型函数及频率特征方程的精确解析解,为检验其他计算斜拉索张力的工程近似方法的计算精度提供了理论方法和依据。

参考文献:

References:

- [1] 黄 侨,胡健琛,黄志伟,等.考虑减振装置弹簧刚度的斜拉索等效索长及索力测量[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(4):724-728.
HUANG Qiao, HU Jian-chen, HUANG Zhi-wei, et al. Equivalent length of stayed-cable considering spring stiffness of damping device and measurement of cable-force[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(4): 724-728. (in

Chinese)

- [2] 马文刚,黄 侨,陈晓强,等.基于两次等效索长的斜拉索力量测[J].公路交通科技,2011,28(9):66-70.
MA Wen-gang, HUANG Qiao, CHEN Xiao-qiang, et al. Cable force measurement of cable-stayed bridge based on twice equivalent cable length[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 66-70. (in Chinese)
- [3] 唐盛华,方 志.考虑中间支撑的拉索等效索长计算方法[J].振动与冲击,2013,32(7):82-87.
TANG Sheng-hua, FANG Zhi. Equivalent cable length calculation method considering influence of intermediate supports[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 82-87. (in Chinese)
- [4] 雷 凡,杨吉新.考虑减振器影响的斜拉桥索力计算[J].交通科技,2008,226(1):1-3.
LEI Fan, YANG Ji-xin. Calculation on cable force of cable stayed-bridge with the influence of shock absorber[J]. Transportation Science & Technology, 2008, 226(1): 1-3. (in Chinese)
- [5] 林 立,张 雷,瞿志豪,等.斜拉桥索力检测中受减振器影响的等效索长计算方法[J].上海应用技术学院学报:自然科学版,2008,8(3):215-219.
LIN Li, ZHANG Lei, QU Zhi-hao, et al. A plan for equivalent cable length calculation with the influence of dampers on inspection of cable tension[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2008, 8(3): 215-219. (in Chinese)
- [6] 甘 泉,王荣辉,饶 瑞.基于振动理论的索力求解的一个实用计算公式[J].力学学报,2010,42(5):983-987.
GAN Quan, WANG Rong-hui, RAO Rui. Practical formula for estimation on the tensional force of cable by its measured natural frequencies[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(5): 983-987. (in Chinese)
- [7] 孙永明,孙 航,任 远.频率法计算匀质竖直拉索索力的实用公式[J].工程力学,2013,30(4):211-218.
SUN Yong-ming, SUN Hang, REN Yuan. Practical formulas to calculate tensions of vertical cable with uniform properties by frequency method[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 211-218. (in Chinese)
- [8] 王荣辉,郑楷柱,刘长海.基于频率法的短索索力实用计算公式[J].科学技术与工程,2009,9(11):2988-2991.
WANG Rong-hui, ZHENG Kai-zhu, LIU Chang-hai. Practical formulas for estimation of short cable ten-

(下转第 115 页)