

# 考虑抗风索作用的简易吊桥动力响应分析

吕成林, 缪宏兵

(江苏中基工程技术研究有限公司, 江苏 南通 226003)

**摘要:** 简易吊桥作为非永久性使用桥梁, 往往忽略动力特性分析。基于云南怒江某简易吊桥, 建立动力特性及地震响应分析模型, 分析了有无抗风索作用下的吊桥模态情况及内力、位移分布特性等。结果表明, 在有抗风索的情况下吊桥自振频率明显提高, 地震荷载作用下的主梁受力性能及位移约束大大改善。

**关键词:** 简易吊桥; 抗风索; 动力特性

**中图分类号:** U442      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-5322(2016)01-0074-05

我国西南山区独有的地貌情况, 致使交通不便, 尤其在广大的山区, 居民相对分散, 出行比较困难, 严重阻碍了当地社会经济的发展。随着国民经济的不断发展, 如何改变当地落后的交通状况, 解决人们出行问题已经成为促进山区经济发展的一个重要问题。架设桥梁是解决山区交通问题的一个重要办法, 而修建连续刚构或拱桥等大跨径桥梁, 不仅工期长、造价高, 而且远远超出当地交通需求; 小跨径窄桥面简易吊桥, 造价低廉, 建造速度快, 跨越能力强, 方便在山区修建, 能较好地解决山区交通问题。

但是, 山区往往地震活跃, 并且部分沟壑气流活动剧烈。针对桥梁安全、经济及相关抗震要求, 有必要对其结构进行动力响应分析。本文以一座示范性简易吊桥为依托, 结合西南地区架设悬索

吊桥的特殊要求, 对窄桥面简易吊桥进行动力响应分析, 研究其动力性能, 探索该型桥梁地震动力作用的受危害程度<sup>[1]</sup>, 为在我国西南山区修建及健康检测该类型桥梁提供参考。

## 1 工程概况

该小跨径窄桥面悬索桥是位于云南省怒江东岸的一座农用柔性吊桥, 接省道 S228 线 K287 + 937 处。桥梁立面如图 1 所示。主缆跨径 136 m, 矢高 11.33 m, 矢跨比 1/12; 跨中设 1.0 m 拱度, 纵向线型按抛物线分配。桥面宽度: 净 3.5 m + 2 × 0.5 m, 限单车通行, 限载 15 t。车辆荷载标准采用《公路桥涵设计通用规范》<sup>[2]</sup> 中的汽车—15 级标准车, 车辆限速 5 km/h。



图 1 吊桥立面图

Fig. 1 Bridge elevation

## 2 吊桥有限元分析

### 2.1 计算方法与有限元模型的建立

在对桥梁进行结构动力特性分析时,通常采用有限元法进行。动力分析时需要建立结构的刚度矩阵和质量矩阵。建立单元刚度矩阵时,常通过形函数来表示单元内各节点的位移,而质量矩阵则根据研究的需要,一般采用一致质量矩阵就可以得到比较精确的振型。

一般结构的动力方程为<sup>[3]</sup>:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\dot{\delta}\} + [C]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $\{\delta\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\ddot{\delta}\}$ 分别为  $n$  阶位移、速度和加速度向量, $\{F\}$ 为外荷载向量。

求解结构自震特性时,常常将 $[C]$ 、 $\{F\}$ 视为零而忽略阻尼的影响,故有自由振动方程、频率方程如下:

$$[K]\{\delta\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = 0; [K] = \omega_i^2[M]\{\phi_i\} \quad (2)$$

式中: $\omega_i^2$ 为特征值, $\{\phi_i\}$ 为第  $i$  阶模态的振型向量。

求解结构的特征值问题,常用子空间迭代法,即通过 Rayleigh - Ritz 法缩减自由度,并且采用迭代法使得计算过程中阵型不断精确。

本桥基于 Midas/Civil 有限元软件,对于缆索,拟用桁架单元。考虑主缆索和吊杆在恒载作用下的几何刚度,主缆索在吊杆节点处离散,用 Ernst 公式对杆单元的弹性模量进行修正,考虑垂度效应<sup>[4]</sup>。桥面系采用梁格模型,纵梁采用空间梁单元,充分地考虑横向弯曲和扭转及刚度分布。索塔的横梁和塔柱用空间梁单元模拟,单元划分较细,以符合动力分析的特点。对于边界条件,桥塔底部按固结约束处理。缆索锚固处按固定处理;主缆通过索鞍固定于索塔顶部,鞍座的模拟采用刚性主从连接,释放纵向位移约束<sup>[5]</sup>。

为了分析抗风索的影响,在利用 Midas 软件进行特征值计算及动力特性分析时,采用了两种模型,以便进行对比(见图2)。

模型1:简化模型。抗风索未建模型,只作为均布荷载作用于加劲梁。

模型2:详细模型。模拟真实的抗风索,建立抗风索模型。

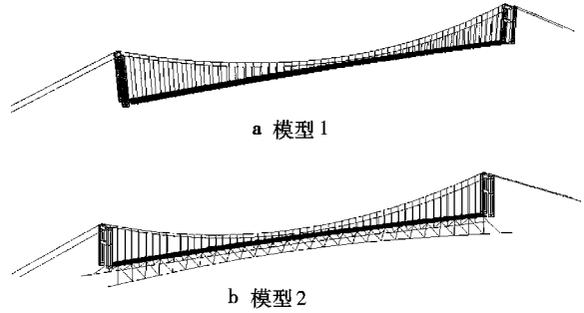


图2 两种计算模型

Fig. 2 Two computational models

### 2.2 动力特性结果及分析

悬索桥加劲梁的主要振型有横弯、竖弯、扭转和纵飘<sup>[6-8]</sup>。为了直观比较两种模型的动力特性,在 Midas - Civil 的特征值分析结果中,分别提取两种模型加劲梁主要振型的前几阶振型,如表1~表3所示,振型频率变化趋势如图3~图5所示。

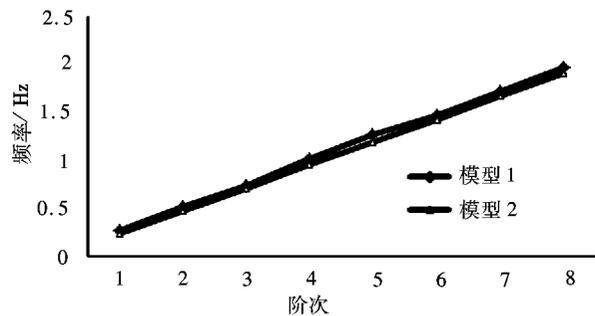


图3 两种模型横弯振型频率变化趋势

Fig. 3 The variation trend of the transverse bending frequency of two models

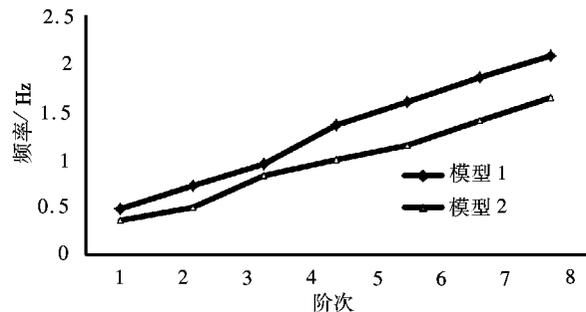


图4 两种模型竖弯振型频率变化趋势

Fig. 4 Two models of vertical bending mode frequency variation trend

表 1 两种模型横弯振型对比

Table 1 Comparison of two models of transverse bending vibration mode

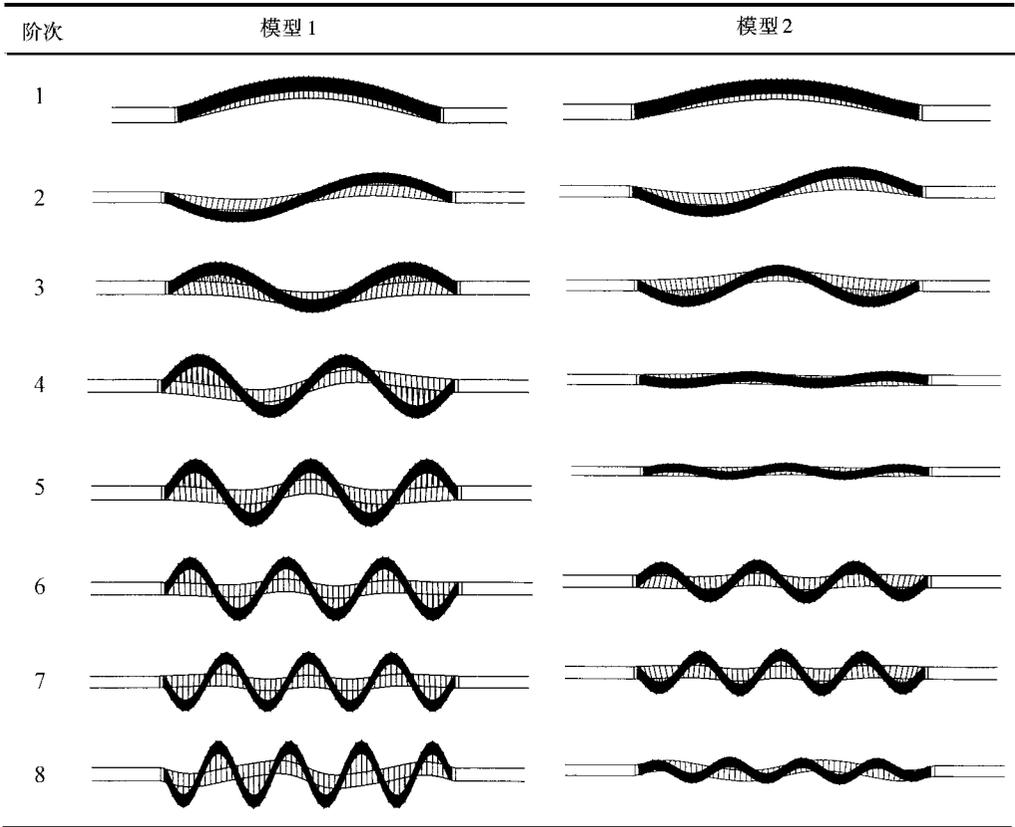
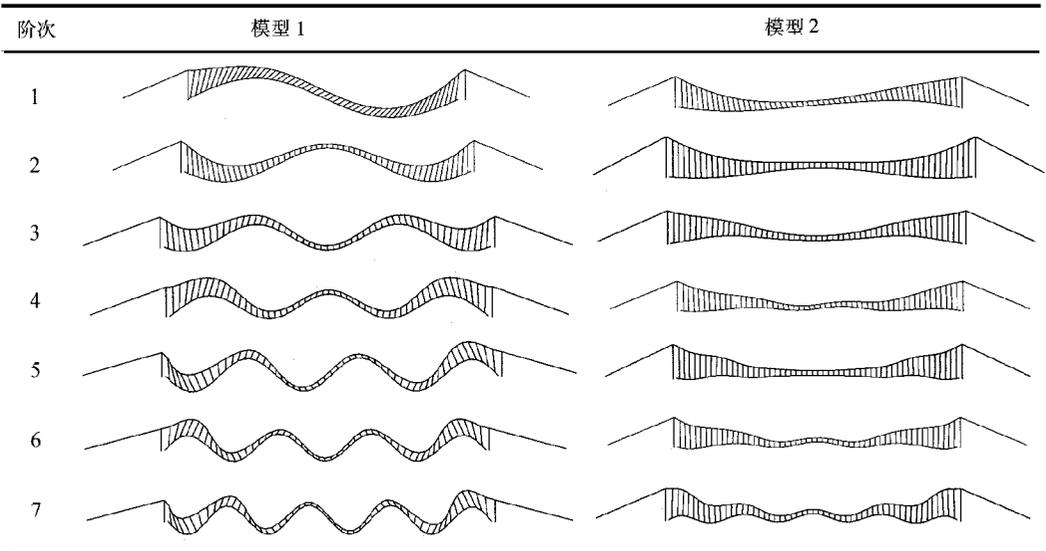


表 2 两种模型竖弯振型对比

Table 2 Comparison of two models of vertical bending mode



通过对比可知:简易吊桥动力特性明显,图 3 ~ 图 5 的横弯、竖弯及扭转振型的一阶频平均不超过 0.5,各振型基频均较低;在所有的振型中,加劲梁振型最先出现,随后是主缆索振型,最后是索塔振型,并且高阶振型影响显著;对于加劲梁和主

缆索的频率,显现抗风索的情况明显有所提高,在横弯、竖弯、扭转等主要振型中,竖弯振型频率提高最大,扭转振型次之,横弯振型相比最小,但是抗风缆索对索塔影响不明显,振型频率几乎没有发生变化,表明有抗风索的加劲梁比无抗风索

表 3 两种模型扭转振型对比  
Table 3 Torsional vibration model of two models

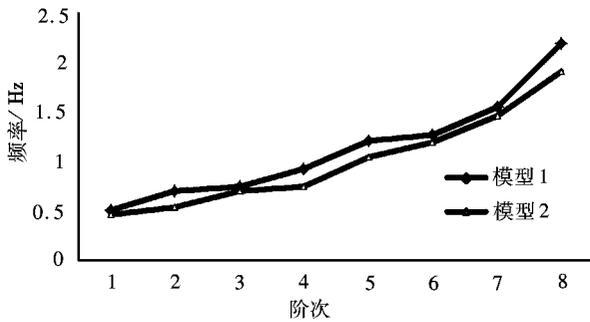
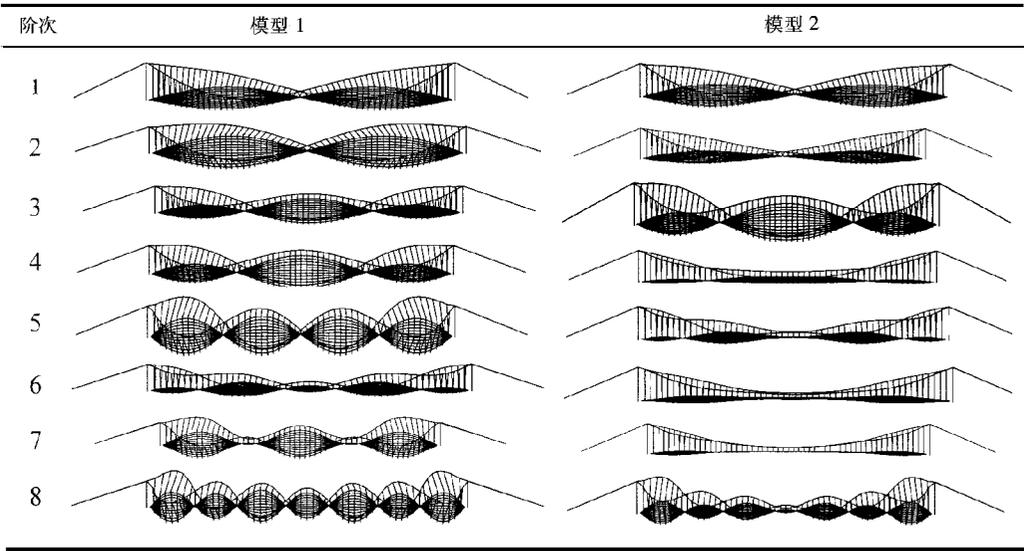


图 5 两种模型扭转振型频率变化趋势

Fig. 5 Two kinds of models for torsional vibration frequency change

的加劲梁刚度有所提高,此结果与实际情况相符合。根据自由振动平衡方程,提高刚度,频率可能提高或不变;增加质量,频率可能降低或不变。两侧有抗风索的情况下,加劲梁相当于增加了约束、提高了刚度和振动频率,但是索塔的刚度没有受到抗风索的影响。

### 2.3 地震反应结果及分析

两种模型在  $E_1$ 、 $E_2$  级地震作用下内力及位移变化分别如表 4、表 5 所示。由表 4 可知,有抗风索时,结构在地震作用下的总体反应相对较弱。具体如下:对于索塔内力,抗风索的影响较小,增幅不足 1.5%;对加劲主梁截面的地震内力反应,弯矩变化率比较明显,同时主梁轴力减小显著,降

表 4 两种模型地震作用对比(内力)  
Table 4 Comparison of response spectra of two models (internal force)

截面	内力	$E_1$ 地震			$E_2$ 地震		
		模型 1	模型 2	变化率	模型 1	模型 2	变化率
塔底截面	轴力 $N/kN$	121.110	122.820	1.412%	356.130	361.250	1.438%
	纵向剪力 $F_{sz}/kN$	46.340	46.580	0.518%	136.280	137.000	0.528%
	横向剪力 $F_{sy}/kN$	49.080	49.280	0.407%	142.890	144.950	1.442%
	横向弯矩 $Mz/kNm$	196.730	196.750	0.010%	572.510	578.680	1.078%
	纵向弯矩 $My/kNm$	474.290	474.330	0.008%	1394.950	1395.100	0.011%
加劲梁 1/4 截面	轴力 $N/kN$	8.600	6.440	-25%	25.240	18.960	-25%
	竖向弯矩 $My/kNm$	0.160	0.130	-19%	0.620	0.390	-37%
主梁跨中截面	轴力 $N/kN$	11.100	8.050	-27%	32.550	23.680	-27%
	竖向弯矩 $My/kNm$	0.130	0.060	-54%	0.480	0.170	-65%
	横向弯矩 $Mz/kNm$	0.110	0.070	-36%	0.320	0.220	-31%
主跨缆索	轴力 $N/kN$	11.958	15.200	27%	43.144	54.841	27%
边跨缆索	轴力 $N/kN$	12.669	15.913	26%	45.231	57.413	27%

表 5 两种模型反应谱分析对比(位移)

Table 5 Comparison of response spectra of two models (displacement)

截面	方向	$E_1$ 地震			$E_2$ 地震		
		模型 1	模型 2	变化率	模型 1	模型 2	变化率
塔顶	顺桥向 X/mm	3.076	3.076	0.00%	9.046	9.046	0.00%
	横桥向 Y/mm	1.358	1.358	0.00%	3.953	3.995	1.06%
	竖向 Z/mm	0.025	0.026	4.00%	0.075	0.076	1.33%
主跨 1/4 处	顺桥向 X/mm	30.463	4.926	-83.83%	89.564	14.488	-83.82%
	横桥向 Y/mm	31.178	25.13	-19.40%	91.636	73.912	-19.34%
	竖向 Z/mm	12.884	6.538	-49.25%	39.781	19.231	-51.66%
主跨跨中	顺桥向 X/mm	30.494	4.898	-83.94%	89.656	14.407	-83.93%
	横桥向 Y/mm	42.612	35.757	-16.09%	125.258	105.167	-16.04%
	竖向 Z/mm	6.309	4.913	-22.13%	24.379	14.45	-40.73%

幅约 25% ;塔顶缆索内力增加明显,  $E_1$  地震下塔顶缆索内力提高 26% ,  $E_2$  地震作用下提高 27% 。

由表 5 可知,有抗风索作用时,吊桥在 seismic 荷载作用下的位移约束比较明显,其中主梁顺桥向降幅约 84% 。

综上所述,在地震作用下有抗风索时,吊桥加劲主梁的轴力降低明显,主缆索内力大幅增加,而索塔内力虽有所增加但是增加不大;位移普遍降低,其中顺桥向的位移降低最明显。所以抗风索对加劲主梁是有利的,有助于减小地震作用的轴力,使得位移减小,但是缆索设计需进一步加强。

#### 参考文献:

- [1] 孙强,刘国坤,许海哲,等. 金东大桥抗震分析与研究[J]. 中外公路,2014,34(4):102-104.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥隧设计通用规范:JTGD60-2015[S]. 人民交通出版社,2015.
- [3] 乔云强. 索道桥的动力特性分析及振动控制[J]. 城市道桥与防洪,2010,10(10):51-53.
- [4] 韩海峰,杨虎根. 人行索道桥主索和抗风索的设计与计算[J]. 交通节能与环保,2014(2):64-66.
- [5] 李龙安. 大跨度桥梁动力特性近似计算分析[J]. 人民长江,2000,31(1):52-54.
- [6] 张宏斌,孔宪京,张哲. 自锚式悬索桥动力特性分析[J]. 公路交通科技,2004,21(7):66-69.
- [7] 宁晓骏,李睿,叶燎原,等. 桥梁自振特性的计算及研究[J]. 云南交通科技,2002,18(2):27-30.
- [8] 粟森,戴公连,刘柯. 无吊杆人行悬索桥设计研究[J]. 铁道科学与工程学报,2013,10(4):41-46.

## Simple Dynamic Response Analysis Considering the Effect of Wind Cable Suspension Bridge

LÜ Chenglin, MIAO Hongbing

(Jiangsu Zhongji Engineering & Technology Research Co., Ltd, Nantong Jiangsu 226003, China)

**Abstract:** Simple suspension bridge as non permanent bridge, tend to ignore the dynamic characteristics analysis. Based on a simple suspension bridge on the Nu River in Yunnan, the analysis model of dynamic characteristics and seismic response is established to analyze wind cable of suspension bridge modal and the internal force and displacement distribution characteristics such as. The results showed that the wind cable suspension bridge self vibration frequency increased significantly and the stress performance and displacement constraint of main girder greatly improved under seismic loading.

**Keywords:** simple suspension bridge; wind resistant cable; dynamic characteristics

(责任编辑:张英健)