

引用本文:郝键铭,张尧尧,舒鹏.大跨度非对称悬索桥的颤振稳定性研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):84-93.

HAO Jian-ming, ZHANG Yao-yao, SHU Peng. Study on Flutter Stability of Long-span Asymmetric Suspension Bridges[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 84-93.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05063

大跨度非对称悬索桥的颤振稳定性研究

郝键铭¹, 张尧尧¹, 舒鹏²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 重庆市市政设计研究院有限公司, 重庆 400020)

摘要:为了研究大跨度非对称悬索桥在不同非对称类型下的颤振稳定性,以主跨为628 m的某主缆不等高支承悬索桥为工程背景,基于全模态的三维频域颤振分析方法对悬索桥进行颤振稳定性分析。利用ANSYS建立了主缆不等高支承(支承高差0~40 m)和边跨跨度非对称(边跨跨度差0~40 m)悬索桥有限元分析模型,并编制相应双参数搜索迭代的APDL计算程序进行三维颤振稳定性分析。结果表明:在构造不等高支承悬索桥时,随着支承高差的增大,低阶模态频率变化较小,高阶模态范围逐渐减小;弯扭频率比随着支承高差增加而不断减少,高差越大弯扭频率比降低越快;桥梁颤振临界风速随着支承高差增大而不断降低,使得由于主缆不等高支承高差所引起的非对称结构形式对大跨度悬索桥梁结构的颤振稳定性有所降低;在构造边跨跨度非对称悬索桥时,弯扭频率比随着边跨跨度差增加而减小;随着支承跨度差的不断增大,悬索桥梁结构的颤振临界风速不断减小,但减小幅度很小,影响不大,在边跨跨度差较小时几乎可以不考虑对悬索结构的颤振稳定性影响。

关键词:非对称悬索桥;颤振稳定性;扭转频率比;颤振临界风速

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0084-10

Study on Flutter Stability of Long-span Asymmetric Suspension Bridges

HAO Jian-ming¹, ZHANG Yao-yao¹, SHU Peng²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400020, China)

Abstract: In order to study the flutter stability of long-span asymmetric suspension bridge under different asymmetric types, a suspension bridge with unequal height support and main span of 628 m was taken as the engineering background. The flutter stability of the suspension bridge was analyzed based on the full modal three-dimensional frequency domain flutter analysis method. The finite element analysis model of suspension bridge with unequal height support (height difference was 0-40 m) of main cable and asymmetric side span (side span difference was 0-40 m) was established by ANSYS, and the corresponding two-parameter search iterative APDL calculation program was compiled for three-dimensional flutter stability analysis. The results show that when the unequal height suspension bridge is constructed, with the increase of the bearing height difference, the low-order modal frequency changes little and the high-order modal

收稿日期:2022-05-14

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102210108)

作者简介:郝键铭(1991-),男,陕西绥德人,讲师,工学博士,E-mail:jianminghao@chd.edu.cn.

range decreases gradually. The bending-torsion frequency ratio decreases with the increase of the support height difference. The larger the height difference, the faster the bending-torsion frequency ratio decreases. The critical wind speed of bridge flutter decreases with the increase of support height difference, which makes the flutter stability of long-span suspension bridge structure decrease due to the asymmetric structure caused by the unequal height difference of main cable. When constructing side span asymmetric suspension bridge, the bending-torsion frequency ratio decreases with the increase of side span difference. With the increase of the difference of supporting span, the flutter critical wind speed of suspension bridge beam structure decreases, but the difference is very small, almost no effect. When the difference of side span is small, the flutter stability of suspension cable structure can be almost ignored.

Key words: asymmetric suspension bridge; flutter stability; torsional frequency ratio; flutter critical wind speed

0 引言

随着中国经济的不断发展以及西部大开发的深入推进,公路铁路网向西部快速发展,而桥梁工程在公路铁路网中占比越来越高。中国西部地区地形、地貌、风环境复杂多变,因此桥梁结构具有和东部、中部地区显著不同的特点^[1]。在山区峡谷地形条件下通常采用大跨度桥梁,悬索桥以其结构简单、受力明确、跨径愈大材料耗费愈少桥梁造价愈低等特点成为大跨径桥梁的首选之一^[2]。目前在国内外已修建的桥梁中跨度在1 000 m以上的桥梁大多数为悬索桥。由于峡谷地区地质复杂,无法建设完全对称的悬索桥,本着因地制宜的原则建造了一些主塔塔高非对称、边跨跨径不等的非对称、主缆非对称及结构构造等不对称的大跨度悬索桥^[3]。中国已建成的非对称悬索桥梁有西堠门大桥(跨径非对称)、四渡河特大桥(主塔塔高非对称)、坝陵河特大桥(边跨非对称且锚碇非对称)、普立特大桥(主缆支承非对称)等。随着非对称悬索桥修建数量逐渐增加,桥梁结构形式也变得复杂多样;与对称结构相比,非对称悬索桥在静力方面,主缆的索长和无应力索长会随着非对称结构敏感性参数非线性变化^[3],桥梁矢跨比的变化会使结构整体刚度发生改变,从而影响非对称悬索桥在不同荷载作用下的响应^[4];在动力方面,桥梁的弯扭频率比和整体刚度会随着非对称结构敏感参数的增加而降低^[5]。桥梁的整体刚度和阻尼比的下降使得非对称悬索桥对风荷载的作用更加敏感^[6]。因此,在研究大跨度非对称悬索桥时,抗风问题是研究桥梁稳定性的关键。

颤振在大跨度桥梁设计和施工中始终是需要考虑的关键因素之一^[7]。当大跨度桥梁结构受到的风

速大于颤振临界风速时就会发生颤振失稳,对大跨度悬索桥的破坏性极大,所以在大跨度桥梁的分析中必须考虑颤振的影响^[8]。目前研究桥梁颤振的方法主要有风洞试验、数值模拟和颤振分析理论等方法^[9],风洞试验的计算精度高,节段模型风洞试验依然是获取气动导数的主要手段^[10]。但由于传统试验方法对试验设备精度需求高、试验模型耗材费用高、可重复性较差等问题,在进行求解大量颤振数据试验模拟还是具有一定局限性。计算流体动力学(CFD)具有可重复性强、耗费少等特点,不仅可以解决风洞试验存在的一些问题,还可以模拟风洞试验中无法实现的一些环境条件,虽然存在的一些收敛性较差等问题并不能使其完全取代传统风洞试验,但其求得的结果仍然是具有较高的精度^[11]。随着颤振理论不断完善,桥梁颤振分析理论的研究逐渐趋于精细化,发展了三维频域颤振分析方法,三维颤振稳定分析主要采用频域和时域两种方法。因为频域法在计算过程中具有较好的计算效率,在颤振分析中得到广泛的应用和发展^[12]。三维颤振频域分析方法大体可分为多模态颤振分析方法和全模态分析方法。多模态颤振分析方法是基于桥梁的固有模态,把结构响应看作是各阶模态的响应叠加。全模态分析法是基于桥梁的有限元模型,在物理坐标上进行频域分析。同时,完善了动风下气动力和结构非线性效应对颤振的影响的三维时域颤振计算理论,明确了悬索桥颤振的动力学机理^[13]。

目前,国内外学者对悬索桥颤振稳定性分析已取得很大成就,但对于非对称悬索桥的颤振稳定性还没有系统性的研究和分析理论。同时,非对称大跨度悬索桥其结构特殊性对颤振稳定性的影响尚未有明确的理论指导,所以有必要对此类悬索桥的颤

振稳性进行研究。笔者以主跨 628 m 的某主缆高差非对称悬索桥为例,基于全模态的三维频域颤振分析方法,研究了主缆支承不等高非悬索桥和边跨跨度非对称悬索桥在风荷载作用下颤振稳定性问题,并与相应的对称结构进行了对比分析,研究大跨度桥梁的非对称性对颤振稳定性的影响。

1 悬索桥颤振分析理论及数值方法

颤振是一种自发性的自激振动,主要是由于振动结构能够在流动的空气中不断吸收能量,而该能量又大于结构阻尼在振动中所耗散的能量^[14]。桥梁发生颤振的形态与主梁断面的气动外形相关^[15],当气流经过流线型主梁断面时,气流的流动速度主要影响或改变了流线型断面扭转和弯曲自由度运动之间的振幅及相位关系,引起不同自由度之间的耦合振动和气动负阻尼,从而发生弯扭耦合颤振。

1.1 频域三维颤振分析

Scanlan^[16]提出了半逆求解法,用于求解桥梁结构的颤振临界风速及颤振频率。基于模态坐标的三维颤振计算方法在计算桥梁断面颤振自激力时引入 18 个颤振导数,从而扩展到三维颤振桥梁分析计算模型。桥面主梁单位长度受到的气动升力 L 、气动阻力 D 和气动扭矩 M 的影响,可以分别表示为竖向位移 h 、扭转位移 α 的函数,即

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{2}\rho U^2(2B)(KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + \\ &K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B}) \\ D &= \frac{1}{2}\rho U^2(2B)(KP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + \\ &K^2 P_4^* \frac{p}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B}) \\ M &= \frac{1}{2}\rho U^2(2B^2)(KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + \\ &K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: U 为来流风速; B 为主梁横向宽度; ρ 为流场气体密度; $K = \frac{B\omega}{U}$ 为折算频率, ω 为振动角频率; h 、 p 、 α 分别为主梁断面的竖向、侧向和扭转振动位移; \dot{h} 、 \dot{p} 、 $\dot{\alpha}$ 分别为竖向、侧向和扭转振动方向上的运动位移速度; H_i^* 、 A_i^* 、 P_i^* 为加劲梁段面的颤振导数。

1.2 基本方程

当主梁断面在均匀场中,此时只考虑气动自激力的作用影响,其颤振基本方程可以表达为各自由

度的惯性力、阻尼力、弹性力和外荷载力的平衡方程。令结构位移向量为 δ ,则运动方程为

$$M_s \ddot{\delta} + C_s \dot{\delta} + K_s \delta = F \quad (2)$$

式中: $\ddot{\delta}$ 、 $\dot{\delta}$ 分别为结构的加速度向量和速度向量; F 为外部荷载向量(包括气动阻尼力 F_d 和气动刚度力 F_s); M_s 为结构质量矩阵; K_s 为结构刚度矩阵(包括弹性刚度矩阵 K_e 和几何刚度矩阵 K_g); C_s 为结构阻尼矩阵(结构质量矩阵 M_s 和结构刚度矩阵 K_s 的线性叠加)。

对于一座受到横风作用的大跨度桥梁,颤振分析时外荷载仅有自激气动力,即

$$F = F_d + F_s = A_d \dot{\delta} + A_s \delta \quad (3)$$

式中: A_d 、 A_s 为由颤振导数组成的矩阵。

将式(2)代入到式(3)得到振动方程为

$$M \ddot{\delta} + C \dot{\delta} + K \delta = 0 \quad (4)$$

式中: M 为系统质量矩阵, $M = M_s$; K 为系统刚度矩阵, $K = K_s - A_s$; C 为系统阻尼矩阵, $C = C_s - A_d$ 。

在求解颤振方程式(4)时,假定发生颤振时结构振动幅值足够小。结构位移向量可以假设为

$$\delta = \varphi e^{\lambda t} \quad (5)$$

式中: $\lambda = (-\xi + i)\omega$, ξ 为桥梁结构振动的对数衰减率; φ 为桥梁复模态振动响应; t 为时间。

将式(5)代入式(4)中可得到一个线性方程组,其中 $e^{\lambda t}$ 显然不等于零,要使得方程组有非零解,则方程系数矩阵行列式必然为零,此时便把桥梁结构颤振稳定转变为求解结构振动方程广义特征值问题,即

$$\lambda C \varphi + K \varphi = -\lambda^2 M \varphi \quad (6)$$

根据特征值的实部中的对数衰减率 ξ 值便可判断结构某个振动时刻响应;当 $\xi > 0$ 时,桥梁结构颤振振动是有阻尼衰减,结构整体阻尼值为正; $\xi = 0$ 时,桥梁结构颤振振动处于颤振临界风速状态,阻尼值为零; $\xi < 0$,桥梁整体结构阻尼为负,结构颤振振动处于发散状态。

1.3 数值方法

基于颤振频域法中的全模态分析原理机进行非对称悬索桥三维颤振稳定分析,具体实现分析方法参考的是胡峰强等^[17]提出的最小频率法进行双参数搜索迭代的全模态分析^[18],其具体的物理意义是悬索桥梁结构振动发散所对应的复模态阻尼比都可能是负值,但是逐渐从临界状态到达振动发散状态时所对应的桥梁结构颤振振动角频率应满足最小能量原理基本条件,所以所有复模态阻尼比为负值的发散颤振振动所对应的振动角频率最小值才能满足

最小能量原理这一基本条件^[19-20]。基于 ANSYS 编制相应的双参数 APDL 语言搜索分析程序步骤流程如下:

(1) 建立悬索桥成桥模型,分析其成桥静力状态和动力特性并提取前 20 阶频率 $\omega_i (i=1, 2, \dots, 20)$ 。

(2) 利用 Maxtrix27 单元的整合系统有限元模型,以表格形式存储导入主梁断面在 0° 风攻角的颤振导数。

(3) 给定初始搜索的风速 U_{first} 和风速增量 ΔU 。

(4) 假定系统的第 i 阶振动角频率 ω_i^0 。

(5) 根据计算风速和振动频率确定 Matrix27 的刚度和阻尼矩阵,进行阻尼特征值分析。

(6) 根据对比计算的第 i 对特征值的虚部和试算值 ω_0 进行判断,当 $|I_m \lambda_i - \omega_i| / I_m \lambda_i > 0.001$ 时令 $\omega_0 = I_m \lambda_i$ ($I_m \lambda_i$ 为虚部角频率, ω_0 为初始模态频率),重复步骤 5 和步骤 6; 否则进入下一步。

(7) 对所有考虑的前 20 个复特征值重复步骤 4~6。如果所有特征值的实部小于 0, 则令 $U = U_{\text{first}} + \Delta U$, 重复步骤 4~7; 否则满足要求。

2 非对称悬索桥的结构敏感参数

2.1 主缆非对称悬索桥结构敏感性参数

为了便于分析主缆非对称悬索桥的动力特性,通过改变主缆支承高差来研究不同高差对颤振稳定性的影响。主缆非对称悬索桥如图 1 所示。本文定义了非对称敏感参数 ϵ 来表示主缆不等高支承高差与悬索桥主跨跨度的比值,即 $\epsilon = h/L_2$, 通过参数 ϵ 来反映结构非对称性对悬索桥动力特性的影响。

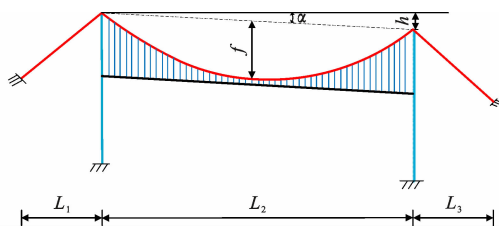


图 1 主缆非对称悬索桥结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Main Cable Asymmetric Suspension Bridge Structure

2.2 对称悬索桥结构敏感性参数

为了便于分析边跨非对称悬索桥的动力特性,通过改变边跨跨度差来研究对颤振稳定性的影响。边跨非对称悬索桥结构示意图如图 2 所示。本文定义了边跨跨度非对称敏感参数 m 和 n , 其中 m 为右边跨跨度与左边跨跨度的比值,即 $m = L_3/L_1$, n 为右边跨跨度与中跨跨度的比值,即 $n = L_3/L_2$, 通过

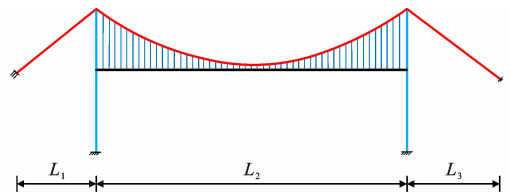


图 2 边跨非对称悬索桥结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Side-span Asymmetric Suspension Bridge Structure

改变非结构敏感参数 m 、 n 来分析不同边跨跨度差对非对称悬索桥的颤振稳定性影响。

3 大跨度非对称悬索桥颤振分析

基于 ANSYS 分析对大跨度悬索桥进行全模态颤振频域法分析,求其颤振临界风速和对应频率。同时构造主缆支承不等高和边跨跨径不等的非对称形式的悬索桥,从而进一步分析非对称结构悬索桥对颤振临界风速的影响。

3.1 实桥颤振有限元分析

以主跨为 628 m 的某主缆不等高支承非对称悬索桥为工程实例。桥梁总长为 1 040 m, 跨径布置为 166 m + 628 m + 166 m, 桥梁加劲梁为扁平流线型钢箱梁, 宽为 28.5 m, 高为 3 m。主缆矢跨比为 1/10, 主缆横向间距为 26 m, 顺桥向吊索标准间距为 12 m。桥梁总体布置图和主梁断面图如图 3 所示。两主塔为钢筋混凝土空心薄壁结构。桥梁建设时由于地形的影响, 两主塔横向底部高差均为 15 m, 纵向塔顶高程差为 10.362 m。桥梁有限元模型如图 4 所示。在计算实桥成桥状态的颤振稳定性前, 先分析悬索桥的动力特性, 掌握结构的固有振动特性。特别是高模态自振频率对悬索桥的抗弯刚度有较大的影响^[21]; 动力特性分析是颤振稳定性分析的基础, 计算得出成桥状态的基频为 0.123 Hz。

在悬索桥振动过程中, 由于选取一阶正对称竖弯和一阶正对称扭转作为主要控制振动响应, 悬索桥的一阶正对称竖弯频率为 0.225 67 Hz, 一阶正对称扭转频率为 0.537 45 Hz。一阶正对称竖弯振型如图 5 所示, 一阶正对称扭转振型如图 6 所示。

基于分离强迫振动法数值模拟在 CFD 模拟得出 0° 风攻角下成桥状态的颤振导数, 如图 7 所示。同时, 对实际悬索桥的三维模型进行了颤振分析计算。对比成桥状态主梁断面在来流风攻角为 0° 与施工阶段主梁断面分别在来流风攻角为 $+3^\circ$ 、 -3° 、 0° 三种情况下的颤振风速数值计算结果如表 1 所示。可以发现, 当来流风攻角为负时悬索桥梁结构

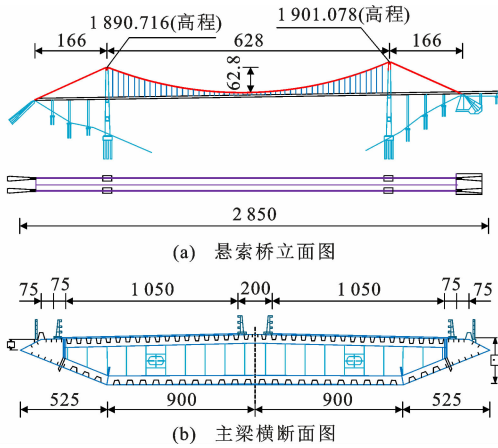


图3 悬索桥立面及主梁横断面(单位:m)

Fig.3 Suspension Bridge Elevation and Main Girder Cross Section (Unit:m)

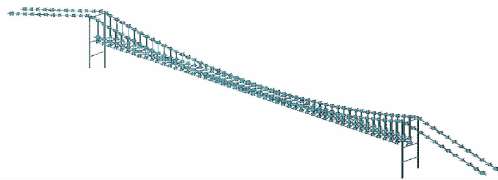


图4 非对称悬索桥有限元模型

Fig.4 Finite Element Model of Asymmetric Suspension Bridge

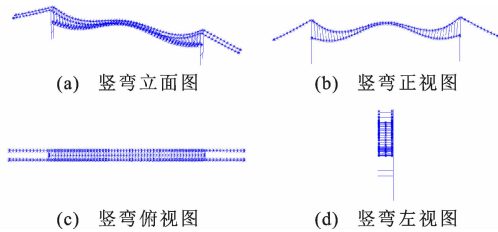


图5 一阶正对称竖弯

Fig.5 First Order Orthosymmetric Vertical Bend

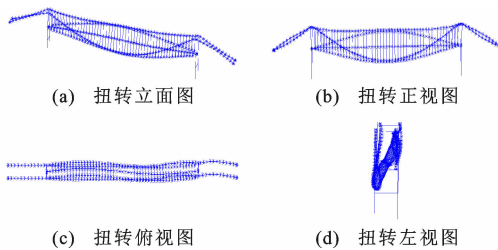


图6 一阶正对称扭转

Fig.6 First Order Orthosymmetric Torsion

颤振临界风速增大,稳定性增加;来流攻角为正时颤振临界风速减小,稳定性减弱。

基于 CFD 数值模拟识别的成桥状态的主梁颤振导数,在 ANSYS 中采用 MATRIX27 矩阵单元模拟气动力自激力。为了反映全桥在颤振过程中随风速增加的振动响应,选择搜索一阶正对称竖弯和

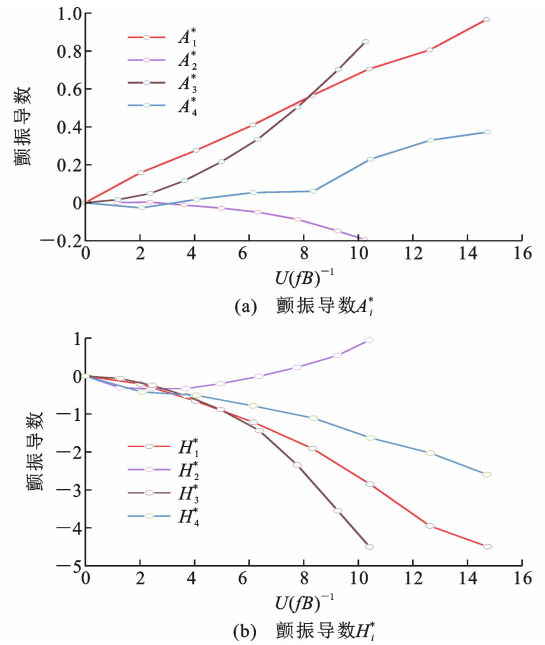


图7 成桥状态 0°风攻角下的颤振导数

Fig.7 Flutter Derivatives at 0° Wind Attack Angle in Bridge State

表1 主梁断面颤振临界风速数值模拟结果

Table 1 Numerical Simulation Results of Flutter Critical Wind Speed of Main Beam Section

主梁计算工况	颤振临界频率/Hz	折算风速	颤振临界风速/(m·s ⁻¹)
0°成桥断面	1.374 7	10.110 9	93.816 8
0°施工断面	1.456 3	7.892 7	93.816 8
+3°施工断面	1.443 2	7.820 1	85.297 7
-3°施工断面	1.459 8	8.059 2	88.916 8

一阶正对称扭转随风速 0~120 m·s⁻¹ 的变化过程,如图 8 所示。从图 8 可以看出:一阶竖弯阻尼比随风速的增加而逐渐减小,当风速大于颤振临界风速时基本保持不变,一阶竖弯频率随风速的增加而增加但增加量比较小;一阶扭转阻尼比随着风速的增加先减小后增加,当接近颤振临界风速 103 m·s⁻¹ 时阻尼比由负值变为正值;一阶扭转频率随着风速的增加而减小。将本文数值计算分析结果与风洞试验报告三维分析结果进行对比,如表 2 所示。经过对比发现,颤振临界风速与试验颤振临界风速相对误差为-4.09%,误差较小。

3.2 主缆支承不等高非对称悬索桥

为研究主缆不等高支承的高差对大跨度悬索桥颤振稳定性的影响,基于实桥在其他参数不变的条件下,设计构造建立完全对称悬索桥结构和改变主缆支承高差 h 形成高差为 0~40 m 的不对称悬索桥桥梁结构,进一步分析支承高差的不对称结构对颤

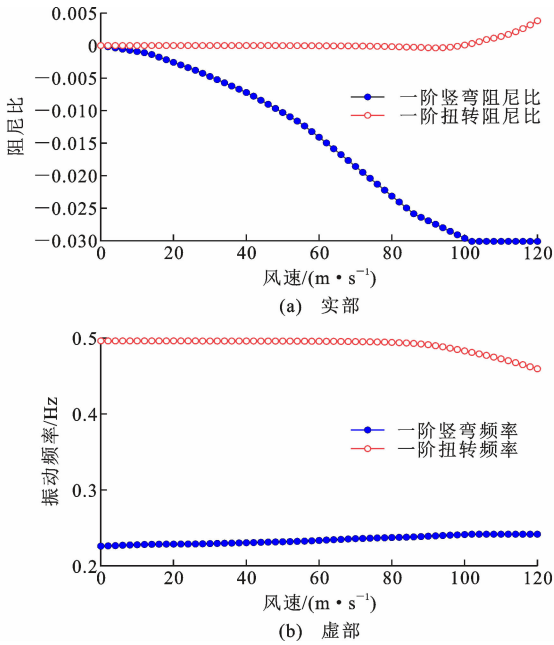


图 8 复特征值随风速的变化

Fig. 8 Variation of Complex Eigenvalues with Wind Speed

表 2 颤振临界风速误差

Table 2 Error of Flutter Critical Wind Speed

风攻角/(°)	数值计算临界风速/(m·s ⁻¹)	风洞试验临界风速/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
0	103	107.4	-4.09

振稳定性的影响。主缆支承不等高非对称悬索桥如图 9 所示。

在进行颤振临界风速的求解前,对支承高差为 0~40 m 主缆不等高的非对称悬索桥成桥状态进行了前 20 阶自振特性分析,通过对比不等高支承悬索桥的自振频率对比发现,当桥梁为完全对称结构时,各阶频率自振最大,随着高差的变化增大,桥梁结构在低阶模态范围内的频率变化比较小,在高阶模态范围内的自振频率随着高差的逐渐增大而减小,从而在一定程度上降低了结构刚度。非对称悬索桥的一阶反对称竖弯基频和扭转基频不随主缆支承高差的变化而变化,而正对称竖弯基频和扭转基频受主缆支承高差的影响而逐渐减小。在分析支承高差与频率的关系时,选取一阶正对称竖弯和一阶正对称

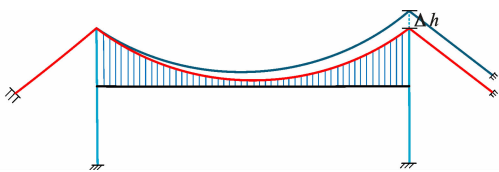


图 9 主缆支承不等高非对称悬索桥

Fig. 9 Asymmetrical Suspension Bridge with Unequal Height of Main Cable Support

扭转作为颤振分析中的主要控制振动响应,其扭转振动频率和竖弯振动频率的比值对悬索桥梁颤振稳定性有很大的影响,其具体不同支承高差下的弯扭频率比如图 10 所示。通过弯扭频率比随支承高差变化结果可以看出,对称结构的悬索桥梁弯扭频率比最大,在 0~20 m 之间,高差与弯扭频率比减小较少,在 20~40 m 之间,随着高差支承的增大,弯扭频率比减小更快。弯扭频率比的减小表明,随着高差的逐渐增大,非对称悬索桥的整体刚度逐渐减小。

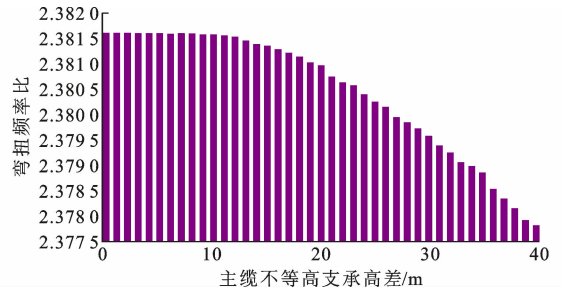


图 10 弯扭频率比随支承高差的变化

Fig. 10 Variation of Bending-torsion Frequency Ratio with Supporting Height Difference

基于三维全模态颤振方法对不同高差的悬索桥进行颤振稳定性分析,风速范围为 0~120 m·s⁻¹、迭代风速为 0.5 m·s⁻¹,利用多项式拟合得到颤振临界风速随主缆支承高度的变化曲线,如图 11 所示。

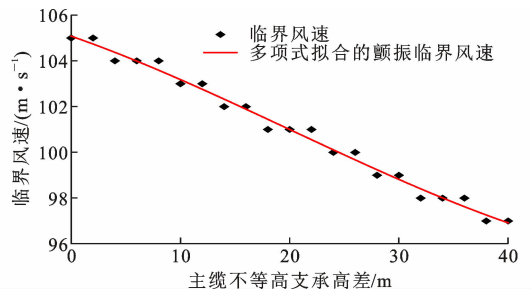


图 11 颤振临界风速随支承高差的变化

Fig. 11 Variation of Flutter Critical Wind Speed with Support Height Difference

从图 11 可以看出:主缆支承不等高非对称悬索桥对桥梁的颤振稳定性具有一定的影响,随着支承高差的不断增大颤振临界风速不断降低。与完全对称结构相比,实桥的颤振临界风速降低了 1.9%,高差为 40 m 非对称悬索桥颤振临界风速降低了 7.6%。因此,随着支承高差的逐渐增大,悬索桥结构的非对称逐渐显著,主缆支承非对称悬索桥的整体刚度不断下降,桥梁结构整体颤振稳定性也随着支承高差增加而降低。利用多项式拟合的颤振临界风

速的常规残差如图 12 所示。通过图 12 进一步证明了多项式拟合结果的可靠性。

3.3 边跨主缆跨度非对称悬索桥

主缆作为悬索桥的主要承重构件,其成桥线性会影响到结构整体刚度和稳定性。在复杂地形中本着因地制宜的原则,修建了一些边跨主缆跨度非对称悬索桥。由于两边跨跨度不同,导致悬索桥主缆不对称,进一步影响其成桥状态的桥梁整体刚度和颤振稳定性。本文基于完全对称悬索桥(166 m+628 m+166 m)构造出边跨跨度相差 0~40 m 跨度

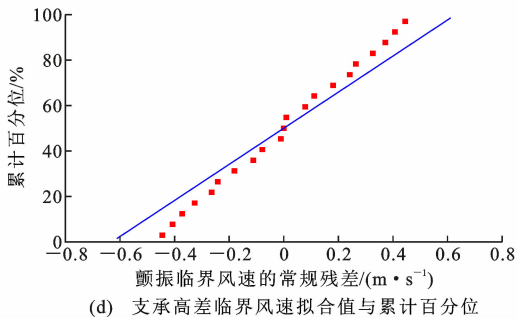
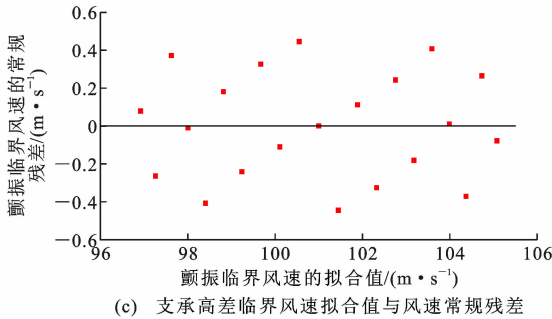
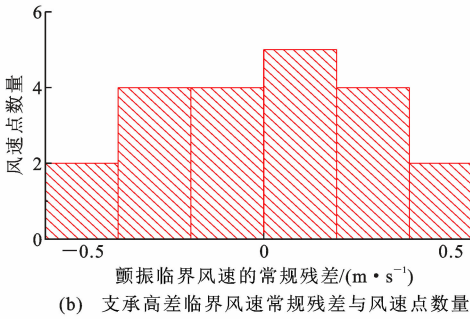
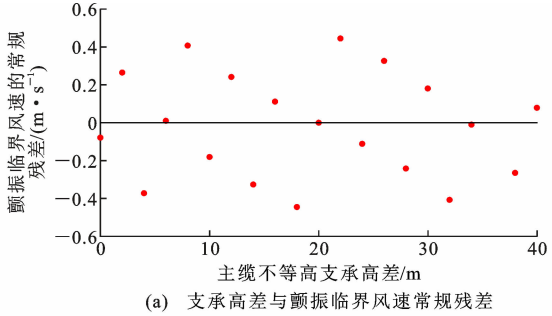


图 12 颤振临界风速随支承高差变化的常规残差
Fig. 12 Conventional Residual of Flutter Critical Wind Speed with Support Height Difference

差的非对称悬索桥,如图 13 所示。

在进行颤振临界风速的求解前,对跨度相差 0~40 m 的边跨非对称悬索桥成桥状态进行了前 20 阶自振特性分析,通过对比边跨非对称悬索桥的自振频率对比发现,当桥梁为完全对称结构时,各阶频率自振最大,随着边跨跨度差的变化增大,桥梁结构在低阶模态范围内的频率变化较小,在高阶模态范围内的自振频率随着支承高差的逐渐增大而减小,从而在一定程度上降低了结构刚度。选取一阶正对称竖弯和一阶正对称扭转作为颤振分析中的主要控制振动响应,通过弯扭频率比随边跨跨度差变化结果(图 14)可以看出,对称结构的悬索桥梁弯扭频率比最大,随着边跨跨度差的增加,弯扭频率比也不断减小。

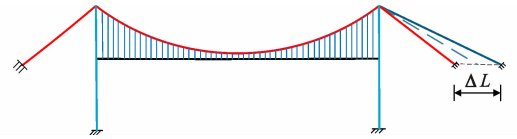


图 13 边跨非对称悬索桥

Fig. 13 Side-span Asymmetric Suspension Bridge

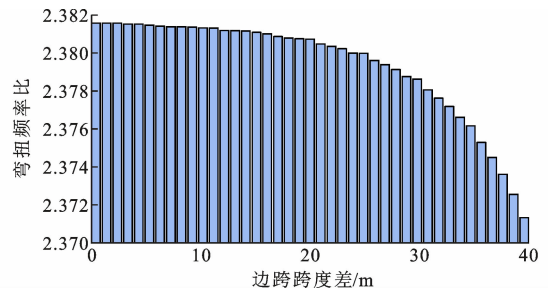


图 14 扭弯频率比随边跨跨度差的变化

Fig. 14 Variation of Bending-torsion Frequency Ratio with Side Span Difference

为了进一步明确主缆边跨跨度不等的非对称结构形式是悬索桥梁结构颤振稳定性有影响,对不同边跨跨度差值下的非对称悬索进行了三维全模态颤振计算分析,求得了其颤振临界风速和颤振频率,如图 15 所示。颤振临界风速的常规残差如图 16 所示。可以看出:随着边跨跨度差值的不断增大,非对称悬索桥梁结构的颤振临界风速随边跨跨度差的增大先保持不变,在边跨跨度差值大于 15 m 后,颤振临界风速不断减小,但减小量依然较小。边跨跨度差值 20 m 的非对称悬索桥梁结构与对称悬索桥颤振临界风速结果减小了 0.95%。边跨跨度差值 30 m 的非对称悬索桥梁结构与对称桥梁悬索桥颤振临界风速结果相等,风速减小了 1.9%,边跨跨度差值 40 m 的非对称悬索桥梁结构与对称悬索桥颤振

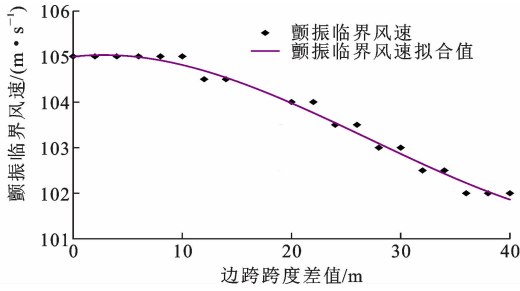
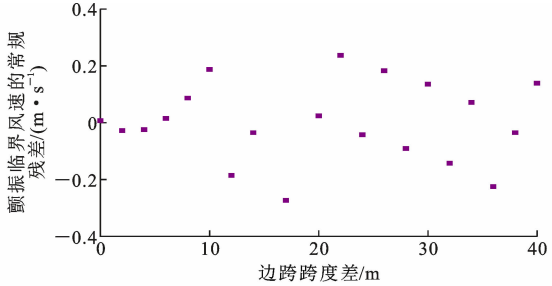
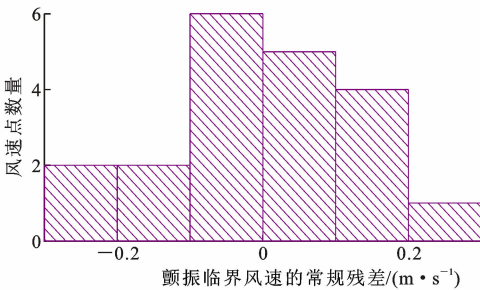


图 15 颤振临界风速随边跨跨度差的变化

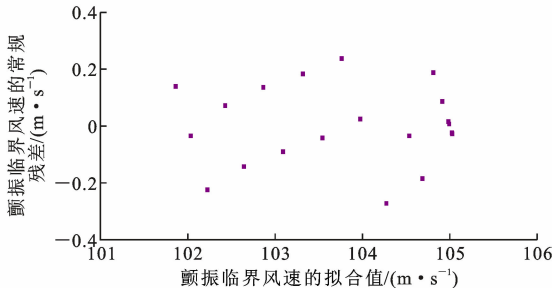
Fig. 15 Variation of Flutter Critical Wind Speed with Side Span Difference



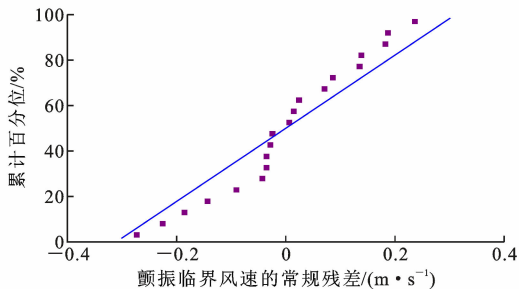
(a) 边跨跨度差与颤振临界风速常规残差



(b) 边跨非对称临界风速常规残差与风速度点数量



(c) 边跨非对称临界风速拟合值与风速常规残差



(d) 边跨非对称临界风速拟合值与累计百分位

图 16 颤振临界风速随边跨跨度差变化的常规残差

Fig. 16 Conventional Residual of Flutter Critical Wind Speed with Span Difference of Side Span

临界风速结果减小了 2.8%，减小差值很小，几乎影响不大。因此当悬索桥梁存在主缆边跨跨度不相等的非对称构造时，在边跨差值较小时主缆边跨跨径的非对称组合布置对悬索桥颤振稳定性影响很小，甚至可以不考虑边跨主缆不对称对悬索桥的颤振稳定性影响。

3.4 主缆不等高且边跨不等非对称悬索桥

为研究主缆不等高支承高差和边跨跨度差对大跨度悬索桥颤振稳定性的影响，以主缆不等高支承高差为 40 m 和边跨跨度差为 40 m，进一步分析不对称结构对悬索桥颤振稳定性的影响。在两种最不利因素组合作用下，悬索桥颤振临界频率和阻尼比随风速变化如图 17 所示。

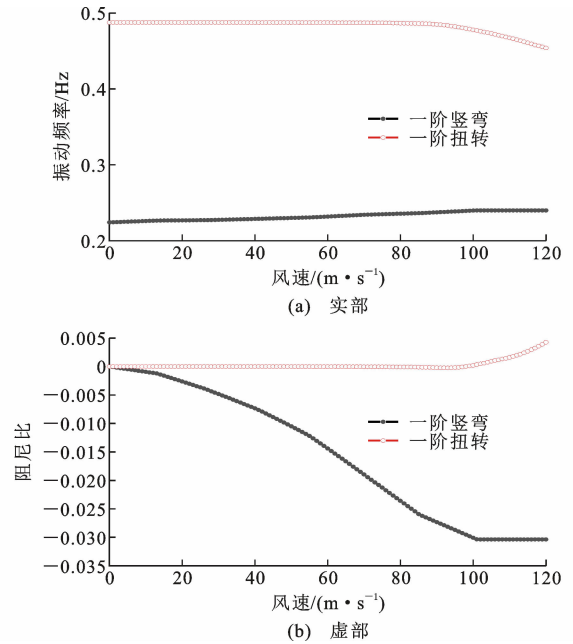


图 17 复特征值随风速的变化

Fig. 17 Variation of Complex Eigenvalues with Wind Speed

从图 17 可以看出：一阶竖弯阻尼比先不断减小，在达到颤振临界风速后趋于稳定；一阶扭转阻尼比随着风速的增加先减小后增加，当接近颤振临界风速 96 m·s⁻¹ 时阻尼比由负值变为正值；一阶扭转频率随着风速的增加而减小。

在不同工况作用下悬索桥颤振结果对比如表 3 所示。随着主缆支承高度差和边跨跨度的增加，悬索桥的弯扭频率比颤振临界风速不断减小。同时考虑两种最不利工况时，与对称悬索桥相比，弯扭频率比减小 0.67%，颤振临界风速减小 8.57%，与边跨跨度不等对比颤振临界风速减小 5.88%，与主缆支承不等高对比颤振临界风速减小 1.03%。因此，考虑两种工况时支承高差对不对称悬索桥的颤振稳定

表3 不同工况下悬索桥颤振结果对比

Table 3 Comparison of Flutter Results of Suspension Bridges Under Different Working Conditions

桥梁类型	弯扭频率比	颤振临界风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	颤振临界 频率/Hz
对称悬索桥	2.382	105	0.477 80
边跨差 40 m	2.378	102	0.477 10
支承高度差 40 m	2.378	97	0.482 60
高差 40 m+边跨差 40 m	2.366	96	0.479 71

性更大,边跨跨度差的影较小。

4 结 语

(1)在构造主缆不等高支承非对称悬索桥时,随着支承高差的增大,低阶模态频率变化较小,高阶模态范围逐渐减小。弯扭频率比随着支承高差不断增加而减少,支承高度差越大,弯扭频率比减小越快;在构造边跨主缆非对称悬索桥时,弯扭频率比随着边跨跨度差不断增加而减小。

(2)从不同等高支撑非对称悬索桥梁颤振分析结果看出:随着支承高差增大,弯扭频率比逐渐减小,其颤振临界风速也逐渐降低,支承高差最大 40 m 的非对称结构与完全对称的大跨度悬索桥梁结构相比,颤振临界风速降低了 7.6%。随着主缆支承高度差的增大,主缆支承非对称悬索桥的整体刚度不断下降。主塔随支承高差增大引起的非对称结构形式使得大跨度悬索桥梁结构的颤振稳定性有所降低。

(3)从主缆支承非对称悬索桥梁颤振结果看出:随着支承跨度差的不断增大,悬索桥梁结构的颤振临界风速不断减小,但边跨跨径差 40 m 的非对称悬索桥梁结构与对称桥梁结果相比,风速减小了 2.8%,减小幅度很小,影响不大。因此当悬索桥梁存在主缆边跨跨度不相等的非对称构造时,在一定范围内主缆边跨跨度的非对称组合布置对悬索桥颤振稳定性影响很小,在边跨跨度差较小时几乎可以不考虑对悬索结构的颤振稳定性影响。

(4)以主缆不等高支承高差 40 m 与边跨跨度差 40 m 作为最不利工况时,与对称悬索桥相比,颤振临界风速减小 8.57%,与边跨跨度不等相比,颤振临界风速减小 5.88%,与主缆支承不等高相比,颤振临界风速减小 1.03%。同时考虑两种最不利工况时,主缆不等高支承的因素对非对称悬索桥颤振稳定性影响更大。

参考文献:

References:

- [1] 刘建新,李加武. 中国西部地区桥梁风工程研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):32-39.
LIU Jian-xin, LI Jia-wu. Study of Wind Project of Bridge in Western Area of China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 32-39.
- [2] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
ZHOU Meng-bo. Suspension Bridge Handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [3] 杨国俊. 非对称悬索桥静力性能及动力特性分析[D]. 西安:长安大学,2016.
YANG Guo-jun. Analysis of Static Behavior and Dynamic Property for Asymmetry Suspension Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [4] 杨国俊,杜永峰,唐光武,等. 大跨度非对称悬索桥振动基频的参数敏感性分析[J]. 土木工程学报,2018, 51(增1):72-79.
YANG Guo-jun, DU Yong-feng, TANG Guang-wu, et al. Sensitivity Analysis of Parameters for Vibration Frequency of Long-span Asymmetric Suspension Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(S1): 72-79.
- [5] 唐茂林,宋 晖,林 恰,等. 矢跨比对悬索桥受力的影响分析[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):24-28.
TANG Mao-lin, SONG Hui, LIN Qia, et al. Influence Analysis of Rise-span Ratio on Force of Suspension Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 24-28.
- [6] 段 玮. 大跨径非对称支撑悬索桥静风稳定性分析[D]. 西安:长安大学,2016.
DUAN Wei. Aerostatic Stability of Asymmetrical Long-span Suspension Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [7] 周 继. 大跨度悬索桥成桥状态颤振分析[D]. 成都:西南交通大学,2011.
ZHOU Ji. Flutter Analysis of Long-span Suspension Bridge During Completed Stage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [8] 张新军,赵晨阳. 大跨度悬索桥颤振的三维精细化分析[J]. 振动与冲击,2019,38(14):246-253.
ZHANG Xin-jun, ZHAO Chen-yang. 3D Refined Flutter Analysis of Long-span Suspension Bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(14): 246-253.
- [9] 张 倩. 桥梁主梁断面颤振导数的数值模拟研究

- [D]. 成都:西南交通大学,2008.
- ZHANG Qian. Research on Flutter Derivatives of Bridge Girder Sections by Numerical Simulation[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2008.
- [10] 祝志文,陈政清. 数值模拟桥梁断面气动导数和颤振临界风速[J]. 中国公路学报,2004,17(3):41-45,50.
- ZHU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing. Numerical Simulations for Aerodynamic Derivatives and Critical Flutter Velocity of Bridge Deck[J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(3):41-45,50.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- WANG Fu-jun. Computational Fluid Dynamics Analysis:Principle and Application of CFD Software[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [12] 胡建华. 大跨度自锚式悬索桥结构体系及静动力性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- HU Jian-hua. The Research on Structural System and Static-dynamic Mechanics Performance of Long-span Self-anchored Suspension Bridges [D]. Changsha: Hunan University,2006.
- [13] 廖海黎,王 骑,李明水. 大跨桥梁颤振分析理论研究进展[J]. 中国公路学报,2019,32(10):19-33.
- LIAO Hai-li, WANG Qi, LI Ming-shui. Advance on Flutter Analytical Theory of Long Span Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10):19-33.
- [14] 项海帆,葛耀君,朱乐东,等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- XIANG Hai-fan, GE Yao-jun, ZHU Le-dong, et al. Modern Theory and Practice on Bridge Wind Resistance[M]. Beijing:China Communications Press,2005.
- [15] 葛耀君. 大跨度悬索桥抗风[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- GE Yao-jun. Wind Resistance of Long Span Suspension Bridges [M]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [16] SCANLAN R H. The Action of Flexible Bridges Under Wind, I:Flutter Theory[J]. Journal of Sound and Vibration,1978,60(2):187-199.
- [17] 胡峰强,陈艾荣. 全模态颤振分析的实用方法[J]. 公路交通科技,2007,24(2):77-79.
- HU Feng-qiang, CHEN Ai-rong. Full-mode Flutter Analysis with Double Parameters and Its Realization in ANSYS[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(2):77-79.
- [18] 胡晓伦. 大跨度斜拉桥颤抖振响应及静风稳定性分析[D]. 上海:同济大学,2006.
- HU Xiao-lun. Flutter, Buffeting and Aerostatic Stability Analysis for Long-span Cable-stayed Bridges[D]. Shanghai:Tongji University,2006.
- [19] 华旭刚,陈政清. 基于 ANSYS 的桥梁全模态颤振频域分析方法[J]. 中国公路学报,2007,20(5):41-47.
- HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing. Full-mode Flutter Frequency Domain Analysis Method of Bridge Based on ANSYS[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(5):41-47.
- [20] HUA X G, CHEN Z Q, NI Y Q, et al. Flutter Analysis of Long-span Bridges Using ANSYS[J]. Wind and Structures,2007,10(1):61-82.
- [21] 严 琨,沈锐利,唐茂林. 大跨度悬索桥主缆抗弯刚度模型试验[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):41-46.
- YAN Kun, SHEN Rui-li, TANG Mao-lin. Model Experiment on Bending Stiffness of Main Cable of Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2010,27(3):41-46.