

# 基于希尔伯特-黄变换的桥梁非线性气动力识别

张震<sup>1</sup>,周光伟<sup>2</sup>,陈昌萍<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 福建省风灾害与风工程重点实验室, 福建 厦门 361024;  
3. 泉州师范学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** [目的] 针对桥梁涡激振动过程中非线性气动力识别的问题进行研究。[方法] 提出了一种基于希尔伯特-黄变换的识别方法, 首先对桥梁的时程数据进行预处理, 再对处理后的数据使用经验模态分解法, 在得到主导的固有模态函数后, 结合随机减量法获得自由衰减曲线, 最后通过希尔伯特变换, 识别获取所需要的参数。[结果] 数值算例与风洞试验显示: 当桥梁处于涡振锁定区间内, 本文提出的方法可以准确地识别桥梁的非线性气动力。[结论] 一方面, 本文提出的识别方法, 可以很好地模拟出气动力的非线性形式。另一方面, 本文在识别过程中, 获得非线性气动力特性的相关结论: 在涡振锁定区间内, 桥梁的振动频率与固有频率接近; 同时, 桥梁的瞬时阻尼比与结构的瞬时振幅及风速有关。

**关键词:** 非线性系统; 瞬时频率; 希尔伯特-黄变换; 气动效应

中图分类号: U 441

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)02-0336-10

## Nonlinear aerodynamic identification of bridges based on Hilbert Huang transform

ZHANG Zhen<sup>1</sup>, ZHOU Guangwei<sup>2</sup>, CHEN Changping<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering, Xiamen 361024, China; 3. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** [Objective] A study has been conducted on the identification of nonlinear aerodynamic forces during the vortex-induced vibration (VIV) of bridges. [Methods] A method based on the Hilbert-Huang transform is proposed, and first preprocesses the bridge's time-history data. Then, the Empirical Mode Decomposition (EMD) method is applied to the processed data. After the dominant Intrinsic Mode Function (IMF) is obtained, the Random Decrement Technique (RDT) is combined to obtain the free-decay curve. Finally, required parameters are identified and obtained through the Hilbert transform. [Results] Numerical examples and wind tunnel experiments show that, when the bridge is located within the VIV lock-in range, the method proposed in this paper can accurately identify the bridge's nonlinear aerodynamic forces. [Conclusions] On one hand, the identification method proposed herein can well simulate the nonlinear form of aerodynamic forces. On the other hand, conclusions obtained in the identification process regarding characteristics of nonlinear aerodynamic forces include: within the VIV lock-in range, the vibration frequency of the bridge is close to its natural frequency; at the same time, the instantaneous damping ratio of the bridge is related to the instantaneous amplitude of the structure and the wind speed.

**Keywords:** nonlinear system; instantaneous frequency; Hilbert Huang transform; aerodynamic effect

收稿日期: 2024-05-27 录用日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(52178510); 福建省科技计划项目(引导性项目)(2021Y0042)

\* 通信作者: cpchen@hnu.edu.cn

引文格式: 张震, 周光伟, 陈昌萍. 基于希尔伯特-黄变换的桥梁非线性气动力识别[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(2): 336-345.

Citation: ZHANG Z, ZHOU G W, CHEN C P. Nonlinear aerodynamic identification of bridges based on Hilbert Huang transform [J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(2): 336-345. (in Chinese)



涡激振动是大跨度桥梁在低风速下出现的一种风致振动现象,同时也是一种具有自激和强迫性质的非线性系统<sup>[1]</sup>.非线性系统的参数识别一直是工程界的热点和难点.目前,对于桥梁涡激振动下的非线性气动力,主要依托于传统理论模型,基于经验公式(如 Scanlan 模型)通过气动导数描述涡振力与结构响应的线性/非线性关系.一般而言,准确计算响应时程的瞬时特性是精确识别其系统参数的前提.求解信号瞬时特性通常使用希尔伯特变换,同时希尔伯特变换在不同的领域得到了广泛的实践与应用<sup>[2]</sup>.Feldman<sup>[3]</sup>通过希尔伯特变换得到系统响应瞬时特性的估计公式,进而识别了非线性系统的类型.Huang 等<sup>[4]</sup>在希尔伯特变换的基础上,结合了经验模态分解法,提出了一种改进的希尔伯特变换,即希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT).Pai<sup>[5]</sup>将 HHT 应用到多种类型的非线性振动识别中,均取得了较好的识别精度.陈双喜等<sup>[6]</sup>采用 HHT 方法对列车进行了时频分析.孙旭峰等<sup>[7]</sup>和楼文娟等<sup>[8]</sup>将 HHT 和随机减量法相结合,分别识别了肋环型索穹顶结构和大跨度柔性屋盖结构的气动阻尼.近年来,基于 HHT 方法识别瞬时频率和瞬时阻尼比的研究已发展成熟.余嘉演等<sup>[9]</sup>利用 HHT 识别莫尔信号的瞬时频率,进而实现转角速率的测量.杨彦鑫等<sup>[10]</sup>通过 HHT 对地震信号进行处理,获得频率变化率与低频占比,确定场地液化的阈值.何杰等<sup>[11]</sup>运用 HHT,结合边际谱分析获取了风力机噪声时频的变化特征.Veltcheva 等<sup>[12]</sup>将海面高程的希尔伯特谱与波浪引起的船舶运动和力矩的希尔伯特谱进行比较,研究船舶响应的时频特性.Lei 等<sup>[13]</sup>使用 HHT 识别瞬时频率与幅值,获得隧道模型的信号边际谱,分析了隧道的动应变和边坡的加速度响应.

本文基于 HHT,首先介绍了桥梁涡激振动气动效应的识别方法;然后以一个 Scanlan 经验非线性模型为数值算例进行识别验证,研究其气动特性,得出一定的结论,最后通过风洞试验数据加以验证.

## 1 基于 HHT 的桥梁非线性气动力识别流程

针对桥梁非线性气动力识别问题,本文提出基于 HHT 的方法,具体步骤如下.

步骤 1 首先对数值模拟或风洞试验获得的时程数据进行一定的预处理,即平滑处理,常用的方法有滑动平均法、指数平滑法、低通滤波器和小波变换等,

本文采用滑动平均法.

步骤 2 将处理后的数据进行 EMD 分解,获得一个主要的 IMF,即 IMF1.

步骤 3 以 IMF1 为基础,结合随机减量法,进一步获得自由衰减曲线.

步骤 4 对自由衰减曲线做希尔伯特变换,提取所需要的参数,识别获得气动刚度项与气动阻尼项.

步骤 5 最后通过运动方程,计算获得桥梁的非线性气动力.

## 2 HHT 基本原理

HHT 是一种基于经验的数据分析方法<sup>[14]</sup>,主要由经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特谱分析(Hilbert spectrum analysis, HSA)两部分组成.

### 2.1 经验模态分解

EMD 是一种自适应的时间序列分析方法.它通过将复杂的数据集分解为一系列固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)来揭示数据中的内在模式和趋势.每个 IMF 是一个简单的振荡模式,具有单一的频率和一个总体上单调的幅值包络,经验模态分解的步骤如下.

1) 在数据集中识别所有的局部极值,用三次样条函数连接所有局部极值,用上、下包络形式显示.

2)  $x(t)$  上下包络的均值定义为  $m_1(t)$ ,原始数据  $x(t)$  和  $m_1$  之间的差值是第一个成分  $h_1$ ,即

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (1)$$

为使  $h_1(t)$  满足 IMF 的定义,必须重复多次抽取.若  $h_1(t)$  的包络均值为  $m_{11}(t)$ ,在下一个步骤中, $h_1(t)$  被当成数据处理:

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t). \quad (2)$$

按此方式,经过重复的抽取过程,重复  $k$  次, $h_{1k}(t)$  成为一个 IMF,即

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t). \quad (3)$$

然后,它被指定为  $c_1(t)$ :

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \quad (4)$$

随后, $c_1(t)$  可以从数据中被分离出来:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (5)$$

同时将剩余项  $r_1(t)$  看作是新的数据,并重复上述的抽取过程.其结果为

$$r_j(t) = r_{j-1}(t) - c_{j-1}(t). \quad (6)$$

最终,抽取过程通过如下事先确定的准则终止:成分  $c_n(t)$  或者剩余项  $r_n(t)$  变得足够小,小于连续序

列的预定值,或者当剩余项  $r_n(t)$  变成单调函数,从它之中不能再抽取任何 IMF. 将式(5)和(6)相加,最终得到

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t). \tag{7}$$

对此,就完成了数据的分解,分解为  $n$  个经验模态,并获得一个剩余项  $r_n(t)$ ,它既有可能是数据的趋势,也可能是个常数值.

### 2.2 希尔伯特谱分析

获得  $x(t)$  的内部模态函数后,对每个 IMF 使用希尔伯特变换,原始数据可被表示在如下式子的实部  $\Re$  中:

$$x(\omega) = \Re \left\{ \sum_{j=1}^n c_j(t) e^{i\int \omega_j dt} \right\}. \tag{8}$$

式(8)给出了每个 IMF 的幅度和能量时间函数. 利用 IMF 展开,振幅和频率被分离. 这种振幅的频率-时间分布被定义为希尔伯特幅度谱  $H(\omega, t)$ , 或简称为希尔伯特谱. 通过希尔伯特谱定义,可以定义边缘谱  $h(\omega)$  为

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt. \tag{9}$$

## 3 气动力识别的气动模型及数值算例

### 3.1 气动刚度的识别

对于浸入流体的系统,其运动方程可以表示为:

$$m(y'' + 2\xi\omega y' + \omega^2 y) = \frac{1}{2}\rho U^2 H \times f[y(t), y'(t), U], \tag{10}$$

式中: $y, y', y''$  分别是系统的位移、速度、加速度; $\xi$  为阻尼比; $\omega$  是结构的振动频率; $U$  是系统来流方向的流体流速,在这里指风速; $m$  为系统的单位质量; $\rho$  是流体的密度,在这里指空气的密度; $H$  是断面的特征长度,这里取桥梁断面高度  $D$  的 2 倍; $f$  是关于  $y$  和  $y'$  的非线性方程;与  $y(t)$  和  $y'(t)$  相关的项分别对应气动刚度项和阻尼项.

引入无量纲时间  $s = Ut/D$ , 无量纲位移  $Y = y/D$ , 并令  $\frac{WD}{U} = K_1$ , 式(10)可以转换为以下的无量纲形式:

$$Y'' + 2\xi K_1 Y' + K_1^2 Y = \frac{\rho D^2}{m} \times f[Y, Y', U]. \tag{11}$$

移项后:

$$Y'' + K_1^2 Y = \frac{\rho D^2}{m} \times f[Y, Y', U] - 2\xi K_1 Y' =$$

$$F[Y, Y']. \tag{12}$$

式(12)类似于单自由度弱非线性系统方程,根据 KBM(Krylov-Bogoliubov-Mitropdsky) 渐进法<sup>[15]</sup>,式(12)的解可以近似地表示为:

$$Y = Q(s) \cos \varphi(s), \tag{13}$$

故  $y(t)$  可表示为  $Q(t) \cos \varphi(t)$ ;  $Q(t)$  为瞬时振幅; $\varphi(t)$  为瞬时相位角.

瞬时相位  $\varphi(t)$  关于时间  $t$  的一阶导数,即瞬时频率为

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{14}$$

根据式(13)与式(14),同时利用 HHT,根据瞬时振幅  $Q(t)$  和瞬时频率  $\omega(t)$  一一对应的关系,即可获得以瞬时振幅为因变量,以瞬时频率为自变量的  $Q(\omega)$ ,即信号边缘谱.

### 3.2 气动阻尼的识别

对系统的原始信号进行 EMD 分解与随机减量法后,可以获得自由衰减曲线  $a(t)$ ,再对自由衰减曲线进行希尔伯特变换后可得

$$\bar{a}(t) = \frac{1}{\pi} K \int \frac{a(\tau)}{t - \tau} d\tau, \tag{15}$$

式中: $K$  为柯西主值; $\bar{y}(t)$  与  $y(t)$  构成一个复数序列

$$Z(t) = a(t) + i\bar{a}(t) = Q(t) \times e^{i\varphi(t)}, \tag{16}$$

其中, $Q(t)$  为幅值函数, $\theta(t)$  为相位角函数.

$$Q(t) = Q_0 e^{-\xi\omega_0 t}, \tag{17}$$

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0, \tag{18}$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}, \tag{19}$$

式中, $Q_0$  为初始振幅, $\omega_0$  为系统的特征频率.

对式(17)进行对数变换可得:

$$\ln Q(t) = \ln Q_0 - \xi\omega_0 t. \tag{20}$$

综上,一方面,利用 HHT,可以获得瞬时振幅  $Q(t)$  与瞬时相位角  $\varphi(t)$ ,对式(18)做最小二乘直线拟合,便可以获得所需要的角频率  $\omega$ . 再对式(20)做最小二乘直线拟合,便可以获得所需要的一  $\xi\omega_0$ . 最后结合式(19),即可求出所需的阻尼比;另一方面,根据式(19)和(20),可以解得瞬时阻尼比为

$$\xi(t) = \frac{\ln \frac{Q_0}{Q(t)}}{\omega t \sqrt{1 + \left[ \frac{\ln \frac{Q_0}{Q(t)}}{\omega t} \right]^2}}. \tag{21}$$

将瞬时振幅  $Q(t)$  与角频率  $\omega$  带入式(21)中,即可获得瞬时阻尼比. 根据瞬时振幅  $Q(t)$  和瞬时阻尼比  $\xi(t)$  一一对应的关系,即可获得以瞬时阻尼比为因变量、以瞬时振幅为自变量的  $\xi(Q)$ .

### 3.3 经验非线性模型

首先利用经验非线性模型<sup>[16]</sup>模拟桥梁断面涡激振动系统:

$$m(y'' + 2\xi\omega y' + \omega^2 y) = \frac{1}{2}\rho U^2 B [Y_1 (1 - \epsilon \frac{y^2}{B^2}) \frac{y'}{U} + Y_2 \frac{y}{B} + \frac{1}{2} C_L(K_1) \sin(\omega_0 t + \varphi)], \quad (22)$$

式中:  $K_1 = \frac{B\omega}{U}$ , 为折减频率;  $B$  为截面参考宽度;  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $\epsilon$  和  $C_L$  为待识别拟合的参数。

考虑到在涡振锁定区间内, 强迫振动的作用非常微小, 可以忽略不计, 对此, 式(22)可简化为:

$$m(y'' + 2\xi\omega y' + \omega^2 y) = \frac{1}{2}\rho U^2 B [Y_1 (1 - \epsilon \frac{y^2}{B^2}) \frac{y'}{U} + Y_2 \frac{y}{B}]. \quad (23)$$

此时, 式(23)只剩下气动刚度项与气动阻尼项。

### 3.4 数值算例

参考文献<sup>[17]</sup>, 取上述模型中的各个参数如下所示:  $m = 6.085 \text{ kg}$ ;  $f = 13.46 \text{ Hz}$ ;  $\xi = 0.0021$ ;  $B = 0.075 \text{ m}$ ;  $U = 8.5 \text{ m/s}$ ;  $Y_1 = 6.4245$ ;  $\epsilon = 1.833$ ;  $Y_2 = -5.70$ ;  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 。

同时, 引入无量纲时间  $s = Ut/B$ , 无量纲位移  $Y = y/B$ , 将上述系统转化为无量纲形式, 同时带入各参数数值, 可得

$$Y'' + 0.003127Y' + 0.5544Y = 0.00059624[6.4245(1 - 1.833Y^2)Y' - 5.7Y]. \quad (24)$$

利用四阶龙格-库塔法求解式(24), 给予该系统一个初始的无量纲位移, 设置初始位移为 0.2, 初始速度为 0, 生成一组“衰减-共振”曲线, 如图 1 所示。

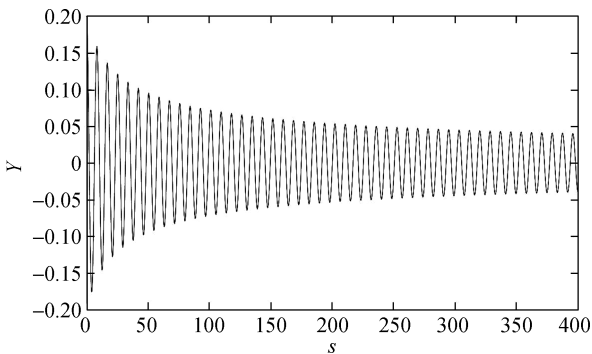


图 1 经验非线性模型模拟的“衰减-共振”位移时程

Fig. 1 The displacement time history of “a tenuation-resonance” simulated by empirical nonlinear model

获得时程数据后, 使用 HHT 对其气动力进行识别, 首先需要对得到的时程曲线数据进行一定的预处理,

即平滑处理, 但是此数据曲线是由模型直接进行模拟而获得的, 数据已很平滑, 无需再进行处理, 可以直接使用 EMD 法进行分解, 获得窄带的 IMF; 对上述数据进行 EMD 分解后, 可以得到多个频率不同的 IMF。

对于任意一组试验信号数据, 采用 EMD 的目的是为了将原始信号拆解成多个具有不同频率带的信号成分。随后, 对这些分离出的各个频率带信号进行频率特性的分析。然而, 在本数值研究案例中, 涉及的涡激振动位移时间序列本质上已经是一个频率带较窄的信号。当对其应用 EMD 方法时, 结果通常只会得到一个显著的主要 IMF, 即 IMF1。因此, 在随后的系统识别步骤中, 可以直接利用这个主要的 IMF1 来进行分析。

以 IMF1 为基础, 按照 3.1 节气动刚度的识别方法进行计算, 可以获得不同约化风速条件下的信号边际谱,  $U/(fD) = 0$  表示无风情况下结构的自振频率。如图 2 所示。

从图 2 可以看出: 系统的振动频率并不随着振动幅值的变化而变化, 在同一约化风速条件下, 系统的特征频率明显且唯一。同时, 随着约化风速的增加, 系统的振动频率不断地变化, 但变化的值相对于系统的振动频率而言较小。另外, 系统的振动频率均接近零风速条件下的系统振动频率。对此, 得出一定的结论: 在涡振锁定区间内, 系统的振动频率是唯一的, 与涡振幅值的变化无关, 即在风速条件一定的情况下, 流场对结构的附加刚度效应可以认为是一个定值。同时对比  $U/(fD) = 0$  的情况下的结构频率, 可以发现, 涡激振动的频率与结构的固有频率十分接近, 在一定的条件下, 气动刚度项可以忽略不计。

获得了不同约化风速条件下的信号边际谱后, 以  $U/(fD) = 9.91$  为例, 按照 3.2 节气动阻尼的识别对其进行瞬时阻尼特性的识别。

从图 3 的拟合结果可知:  $\omega = 84.73$  且  $-\xi\omega_0 = 0.178$ , 结合式(19), 得出阻尼比  $\xi = 0.0021003$ ; 其他风速情况下的阻尼比如表 1 所示。

由表 1 中可知, 识别出的阻尼比均在 0.0021 左右, 与所给的条件相符合, 即识别方法较为准确。同时再按照 3.2 节气动阻尼的识别对其进行瞬时阻尼特性的识别, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 瞬时阻尼比与结构振动的幅值有关, 在无风条件下, 瞬时阻尼比随结构振动幅值先减小后增加, 总体呈凹形增长趋势。在有风条件下, 随着幅值增长, 瞬时阻尼比随之呈波动越来越明显的线性叠加式增长, 波动性说明两者为非线性关系, 且随着振

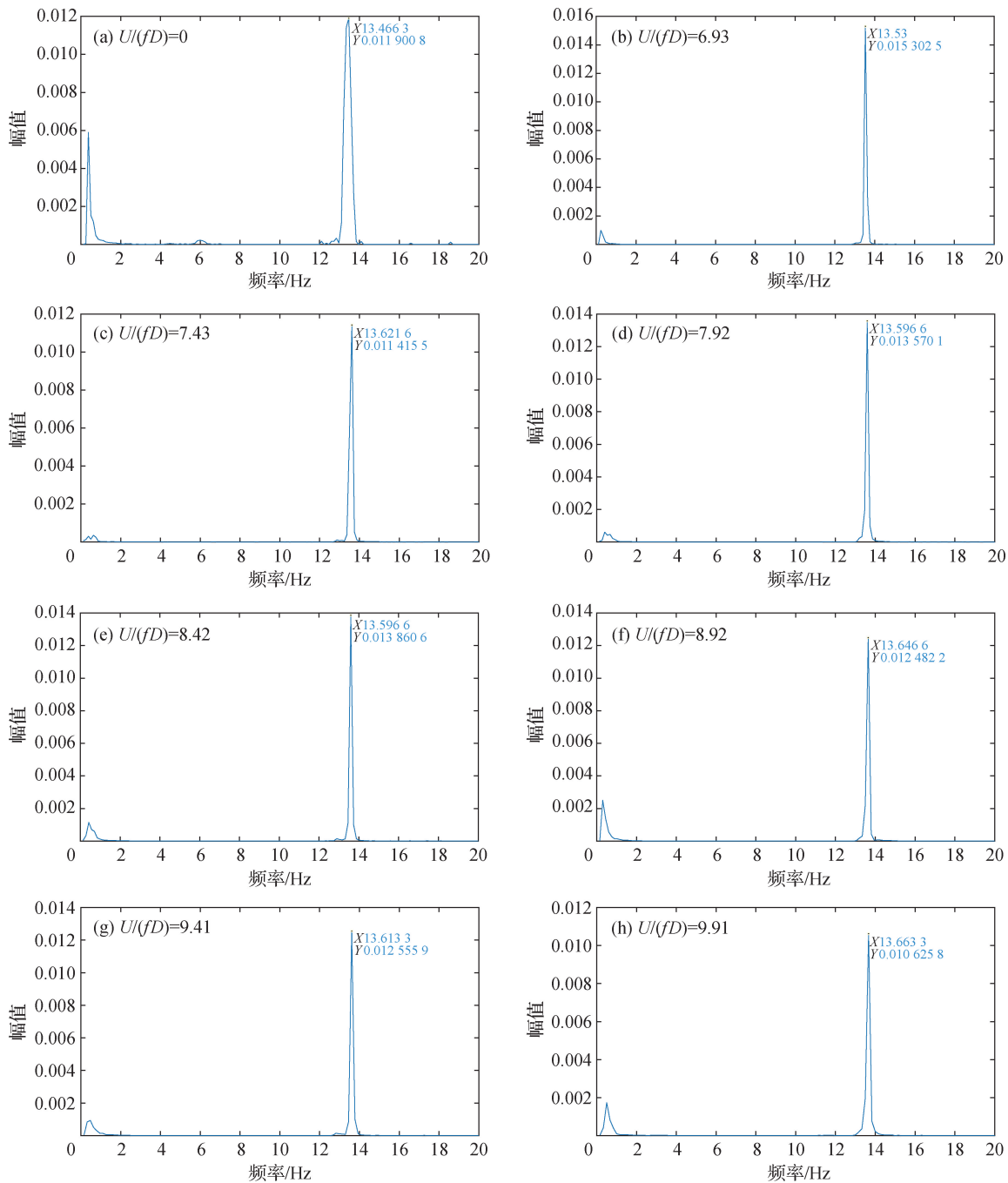


图 2 不同约化风速条件下系统的信号边际谱

Fig. 2 The marginal spectrum of the system signal under different reduced wind speed conditions

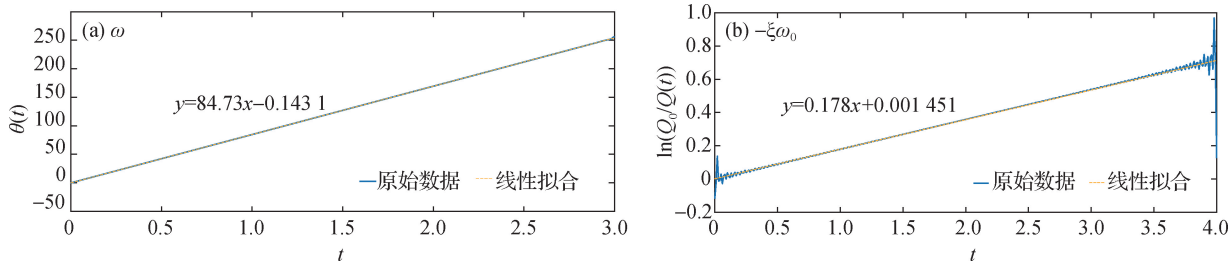


图 3  $\omega$  与  $-\xi\omega_0$  的拟合结果

Fig. 3 Fitting results of  $\omega$  and  $-\xi\omega_0$

表 1 不同约化风速下的阻尼比

Tab. 1 Damping ratio under different reduced wind speeds

$U/(fD)$	$\xi$	$U/(fD)$	$\xi$
6.93	0.002 100 1	8.92	0.002 100 2
7.43	0.002 100 2	9.41	0.002 100 1
7.92	0.002 100 1	9.91	0.002 100 3
8.42	0.002 100 1		

幅的增加,非线性更加明显.同时随着约化风速的增加,瞬时阻尼比随振幅变化的速率加快.对此,得出一定的结论:结构的瞬时阻尼比与结构的幅值及约化风速有关,有风情况下,幅值与瞬时阻尼比呈正相关趋势.

得到气动刚度与气动阻尼后,通过运动控制方程,可以很容易地计算出所需要的气动力,图 5 是当约化风速为 8.44 时,实际经验非线性模型与 HHT 识别出

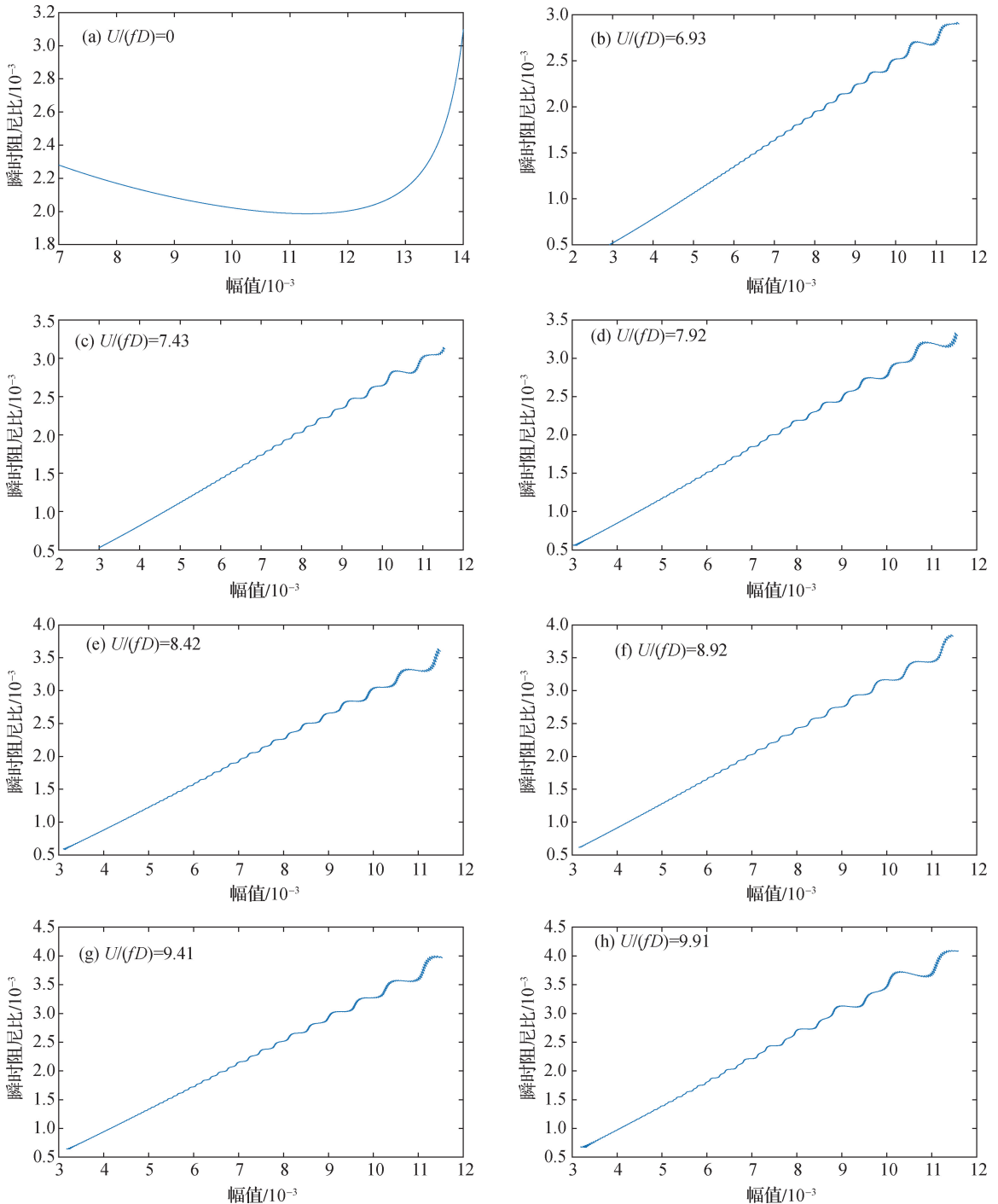


图 4 不同约化风速条件下瞬时阻尼比与幅值的关系

Fig. 4 The relationship between instantaneous damping ratio and amplitude under different reduced wind speed conditions

的气动力时程(包含忽略气动刚度项)。

从图 5 中可以看出:运用 HHT 识别出的气动力与经验非线性模型实际的气动力十分接近,说明该方法具有一定的准确性。同时,两者的曲线非线性形式也十分接近,说明该方法可以很好地再现气动

力的非线性特性。另一方面,对比忽略气动刚度项下气动力的情况,与经验非线性模型和 HHT 识别的气动力均十分接近,对识别气动刚度获得的结论加以证明:在一定的条件下,气动刚度项可以忽略不计。

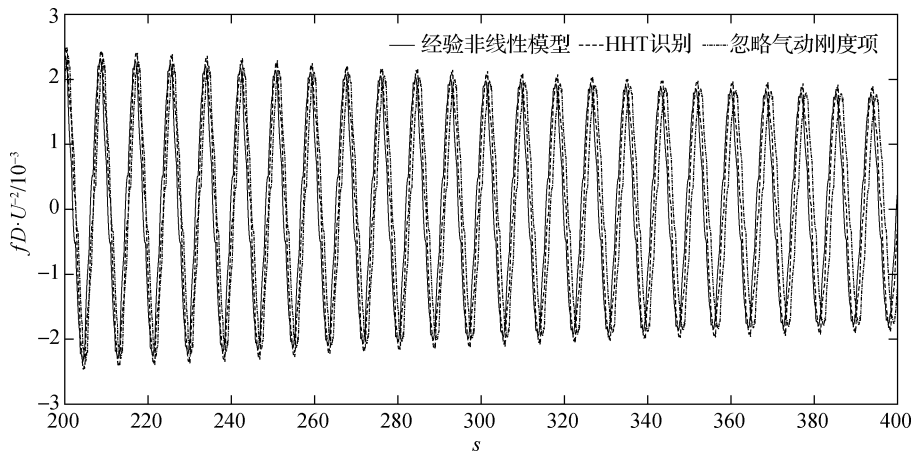


图 5 气动模型与气动识别的气动力时程比较

Fig. 5 Comparison of aerodynamic time history between aerodynamic model and aerodynamic identification

## 4 风洞试验数据及分析

### 4.1 风洞试验概况

用厦门某大桥主梁节段模型风洞试验的时程曲线验证本文方法的可行性与结论的正确性。试验在厦门理工大学风洞实验室进行。试验风速范围为 8~130 m/s, 激光位移计间距 1.6 m。在风攻角为 0°时,通过试验,可以得知:在风速为 24~26 m/s 范围内时,存在竖向涡振锁定现象(图 6)。本章取风速为 22, 24, 26 和 28 m/s 时程曲线进行处理分析。在设计桥梁节段模型前,实际阻尼的数值由桥梁的阻尼换算而成。在节段模型设计完成后,通过自由振动试验可以获得位移的自由衰减曲线,进而计算得到实际阻尼比。

### 4.2 预处理与经验模态分解

首先,进行风洞试验时,可能受收到噪音的干扰,针对突然出现的 irregular 噪音,采用滑动平均法对位移时程进行处理,减少或消除噪音的影响。同时,对于每个风速所对应的 4 组曲线数据加以平均处理,取 4 组数据的平均值来表示系统的位移。

由图 7 可知,滤波前后的数据信号基本一致,也可直接使用原始信号数据进行下一步的处理。

另一方面,对数据使用 EMD 后,可以获得多个 IMF,与 3.3 节一致,以主导 IMF1 为新数据基础进行

后续识别步骤。

### 4.3 随机减量法与希尔伯特变换处理

以 IMF1 为基础,使用随机减量法对其进行处理,再按照 3.1 节气动刚度的识别方法进行计算,可以获得不同风速条件下的信号边际谱。

从图 8 可以看出,识别出的频率在桥梁模型的实际竖弯频率 1.469 66 附近。同时,在涡振锁定区间内,系统识别出的频率更接近实际频率。在获得了不同风速条件下的信号边际谱后,可以按照 3.2 节气动阻尼的识别对其进行瞬时阻尼特性的识别,得表 2。

由表 2 可知,识别出的阻尼比均在 0.005 左右,与实际条件相符合,即识别方法较为准确。同时再按照 3.2 节气动阻尼的识别对其进行瞬时阻尼特性的识别,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,与 3.3 节所识别的结论基本一致。第四章的数值算例得到一定程度的验证。

## 5 结 论

本文所使用的方法可以准确地识别出桥梁的气动刚度与气动阻尼,进而获得桥梁的非线性气动力,并且可以很好地模拟出气动力的非线性形式,体现非线性特性。同时,在气动刚度的识别过程中,得到结论:

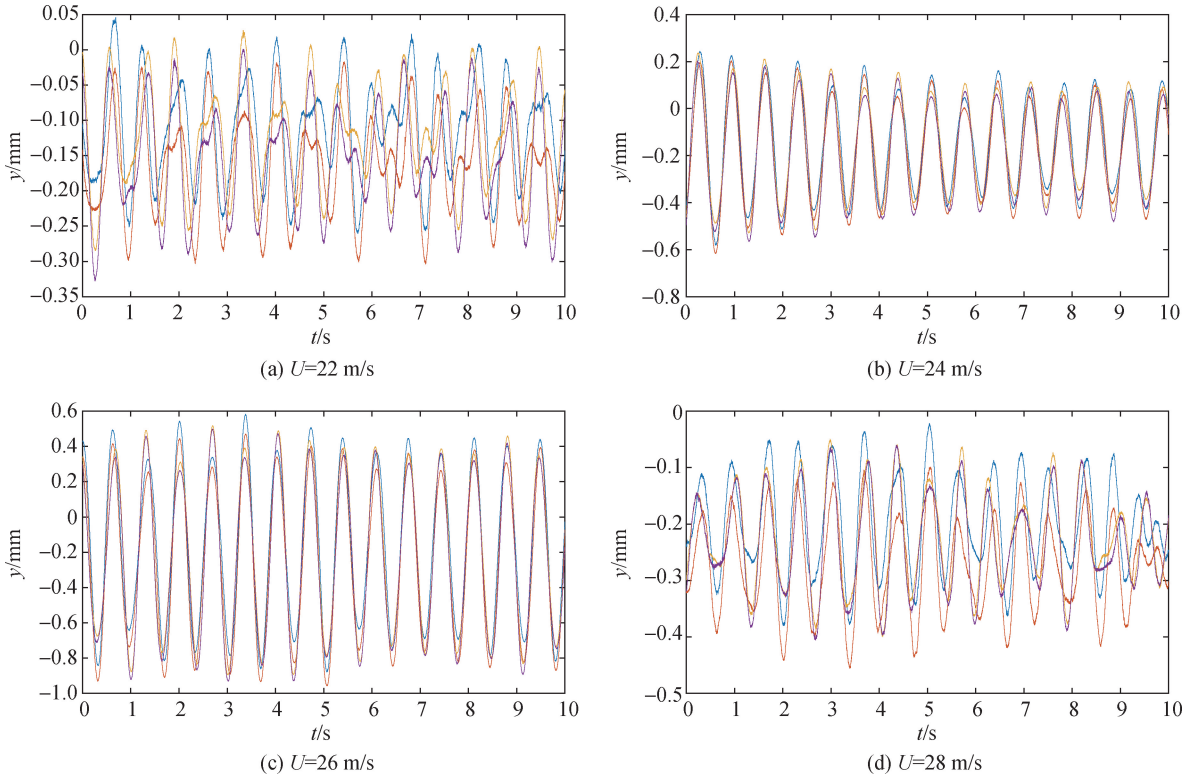


图 6 不同风洞试验风速条件下系统的位移

Fig. 6 The system displacement under wind tunnel test with different wind speed conditions

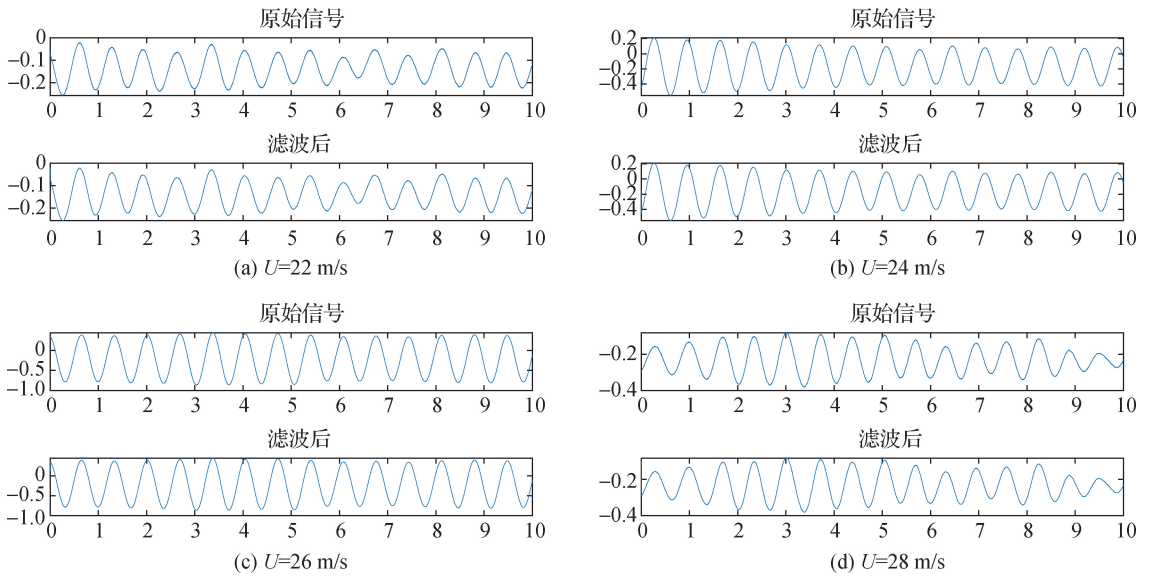


图 7 不同风洞试验风速条件下系统的位移(滤波前后对比)

Fig. 7 The system displacement under wind tunnel test with different wind speed conditions (comparison before and after filtering)

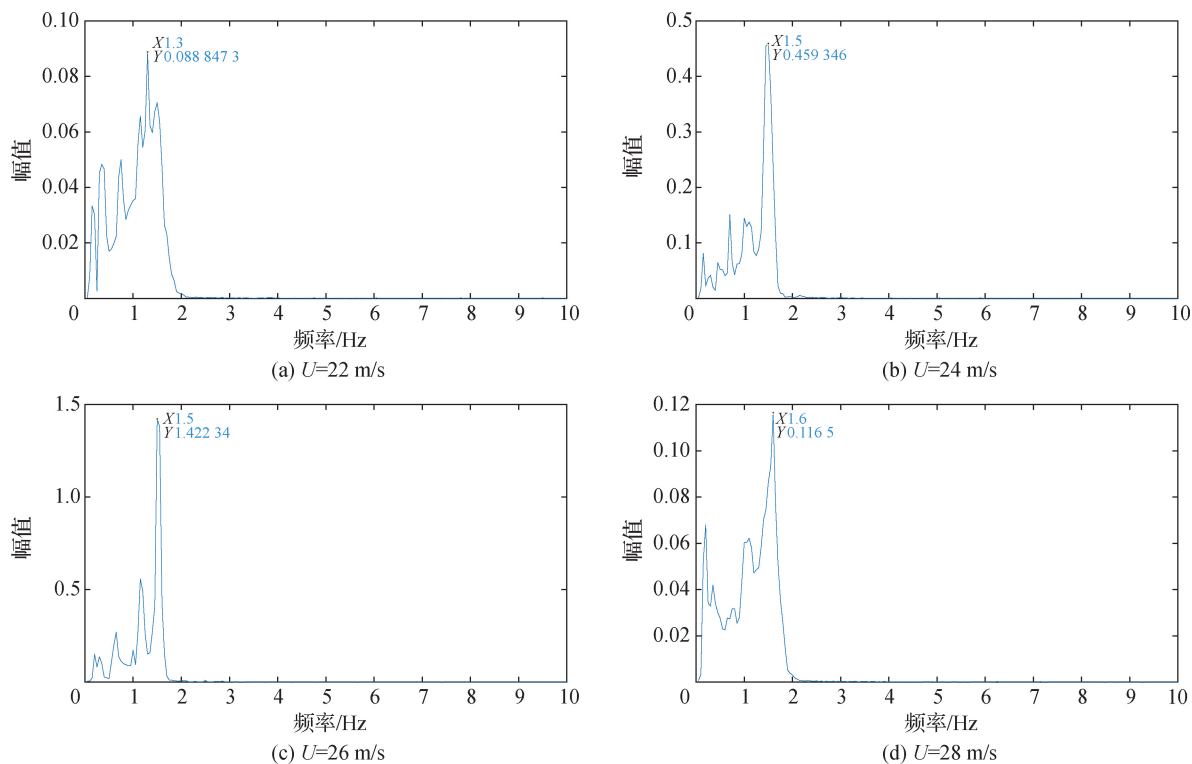


图 8 不同风洞试验风速条件下系统的信号边际谱

Fig. 8 The marginal spectrum of the system signal under wind tunnel test with different wind speed conditions

表 2 不同风洞试验风速下的阻尼比

Tab. 2 Damping ration under wind tunnel test with different wind speed conditions

风洞风速/(m · s <sup>-1</sup> )	$\omega$ /(rad · s <sup>-1</sup> )	$-\xi\omega_0$ /(rad · s <sup>-1</sup> )	识别阻尼比	实际阻尼比	误差/%
24	9.154	0.046 53	0.005 082 9	0.005	1.658
26	9.259	0.047 12	0.005 089 0	0.005	1.780

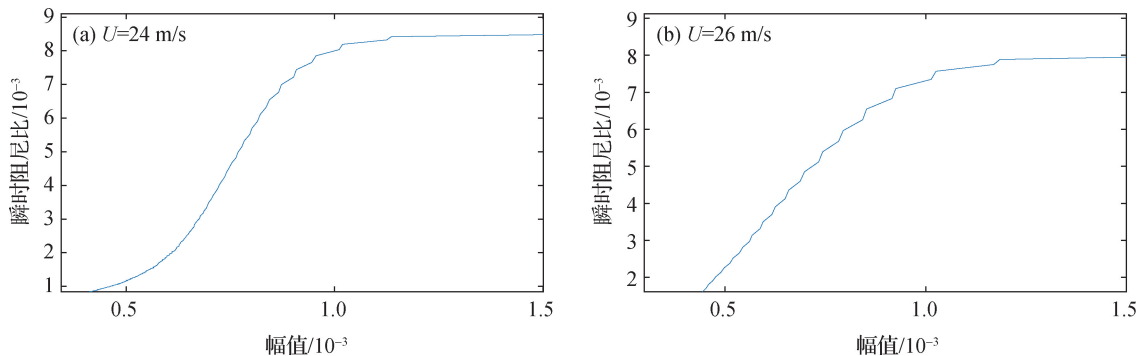


图 9 不同风洞试验风速条件下瞬时阻尼比与幅值的关系

Fig. 9 The relationship between instantaneous alamping ratio and amplitude under wind tunnel test with different wind speed conditions

在涡振锁定区间内,结构的振动频率与结构的固有频率十分接近,可以把流场的气动刚度效应认为是一个定值,在一定条件下,也可以直接忽略气动刚度项.在

气动阻尼的识别过程中,得到结论:结构的瞬时阻尼比与结构的瞬时振幅及风速均有关联,瞬时阻尼比与瞬时振幅呈正相关,风速会影响该正相关的趋势.

## 参考文献:

- [1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] KERSCHEN G, WORDEN K, VAKAKIS A F, et al. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(3):505-592.
- [3] FELDMAN M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform- I. Free vibration analysis method Freevib[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1994, 8(2):119-127.
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1988, 454(1971):903-995.
- [5] PAI P F. Nonlinear vibration characterization by signal decomposition[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 307(3/4/5):527-544.
- [6] 陈双喜,林建辉,陈建政. 基于希尔伯特-黄变换提取车辆轨道耦合系统时频特性[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(5):43-47.
- [7] 孙旭峰,孙宇坤,董石麟. 肋环型索穹顶结构的气动阻尼研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(8):37-41.
- [8] 楼文娟,卢旦,杨毅,等. 开孔建筑屋盖风振响应中的气动阻尼识别[J]. *空气动力学学报*, 2007, 25(4):419-424.
- [9] 余嘉演,朱维斌,黄垚,等. 基于希尔伯特-黄变换的转台角速率测量方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2024, (4):107-111.
- [10] 杨彦鑫,路华,林子云,等. 基于希尔伯特黄变换的场地液化识别方法研究[J/OL]. *灾害学*, 2024, 39(3):36-42.
- [11] 何杰,张世玮,孙兵川,等. 基于希尔伯特-黄变换的 2.2 MW 风力发电机噪声特征研究[J/OL]. *计量学报*, 2024, 45(12):1841-1848.
- [12] VELTCHEVA A, GUEDES S C. Analysis of wave-induced vertical ship responses by Hilbert-Huang transform method[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269:113533.
- [13] LEI H, WU H G, QIAN J G. Seismic failure mechanism and interaction of the cross tunnel-slope system using Hilbert-Huang transform [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131:104820.
- [14] HUANG N E, SHEN S S P. Hilbert-Huang transform and its applications [M]. 2nd ed. Hackensack: World Scientific Publishing company, 2014:1-15.
- [15] SCHMIDT G, TONDL A. Non-linear vibrations [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [16] EHSAN F, SCANLAN R H. Vortex-induced vibrations of flexible bridges[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116(6):1392-1411.
- [17] MARRA M, MANNINI C, BARTOLI G. Van der Pol-type equation for modeling vortex-induced oscillations of bridge decks [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(6/7):776-785.

(责任编辑:汪 军;校对编辑:任滢滢)