

文章编号: 1674—8247(2021)03—0060—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.03.011

## 桥梁涡振幅值响应质量阻尼敏感性影响研究

周 帅<sup>1,2</sup> 邹云峰<sup>3</sup> 方 聪<sup>1</sup> 牛华伟<sup>2</sup>

(1. 中国建设股份有限公司, 北京 100013; 2. 湖南大学, 长沙 410082;  
3. 中南大学, 长沙 410075)

**摘 要:**为研究质量、阻尼对桥梁钝体构件涡振幅值响应影响的独立性和敏感性,本文以一组矩形截面杆件节段模型为基础,通过调整模型系统等效质量、阻尼、刚度,实现单参数研究工况设计,开展测振风洞试验,实测涡激共振振幅值响应并进行对比研究。试验实测了单参数变化节段模型系统等效质量、阻尼、以及相同 Scruton 数不同质量阻尼参数组合工况下的涡激共振响应曲线。研究表明:(1)相同 Scruton 数不同质量、阻尼量值组合对比工况中,实测涡振幅值大小各不相同,最大最小比值达到 2.7,涡振幅值质量、阻尼敏感性不相同;(2)质量、阻尼单参数对比研究工况中,实测涡振幅值随着质量、阻尼的增大而减小,权重系数不同,质量对于涡振幅值的影响程度大于阻尼;(3)提高等效质量是降低结构涡振幅值更为有效的措施。

**关键词:**钝体构件; 涡振幅值; 质量; 阻尼; 单参数

**中图分类号:**U441<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A

## On the Sensitivity of Mass Damp on the Amplitude Response of Vortex-induced Vibration for Bridges

ZHOU Shuai<sup>1,2</sup> ZOU Yunfeng<sup>3</sup> FANG Cong<sup>1</sup> NIU Huawei<sup>2</sup>

(1. China State Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** In order to study the independence and sensitivity of the influences of mass and damping on the amplitude response of vortex-induced vibration of the blunt members of bridge structure, this paper takes a section model of rod with rectangular section as the basis, designs several cases by adjusting the equivalent mass, damping, and stiffness of the model system for single parameter study, and carries out the wind tunnel tests to measure and compare the amplitude responses of vortex-induced resonance. The response curves of vortex-induced resonance of the model system with the change of single parameter (equivalent mass, damping, and stiffness), as well as those with different combinations of mass and damping but the same Scruton number, were plotted in the test. The results show that: (1) For the cases with different combinations of mass and damping but the same Scruton number, the measured vortex amplitude value varies accordingly, with the ratio of the maximum and the minimum values up to 2.7, and the sensitivities of vortex amplitude to mass and damping are different. (2) For the cases with the change of single parameter (mass and damping), the measured vortex amplitude decreases with the increase of mass and damping, with different weight coefficients, where the influence of mass on vortex amplitude is greater than that of damping. (3) Increasing the equivalent mass is a more effective measure to reduce the structural vortex amplitude.

收稿日期:2020-07-27

作者简介:周帅(1986-),男,高级工程师。

基金项目:国家自然科学基金(51708202),中建股份公司重点课题(CSECEC-2021-Z-26),湖南省科技创新计划(2019RS2051,2018JJ3577)

引文格式:周帅,邹云峰,方聪,等.桥梁涡振幅值响应质量阻尼敏感性影响研究[J].高速铁路技术,2021,12(3):60-65.

ZHOU Shuai, ZOU Yunfeng, FANG Cong, et al. On the Sensitivity of Mass Damp on the Amplitude Response of Vortex-induced Vibration for Bridges[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 60-65.

**Key words:** blunt member; vortex-induced amplitude; mass; damping; single parameter

随着现代桥梁抗风理论的进一步完善,颤振、驰振等一类发散性的风致振动在大跨度桥梁中得到了有效的防治。但涡激共振作为一类限幅流固耦合振动,在大长细比钝体桥梁构件中易发、频发,影响桥梁结构的正常使用,引发构件疲劳振动风险<sup>[1-2]</sup>。如何提高幅值的估算水平,准确预测工程结构的涡振幅值响应,提前制定好控制措施,将涡振幅值响应控制在可接受的量值范围内,成为了工程应用研究的方向之一<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内、外专家学者作了大量的研究,Euro Code<sup>[5-6]</sup>针对钝体桥梁构件的涡振幅值估算做了系统的研究工作,提出了基于质量阻尼参数(Scruton 数)为基础的幅值估算经验公式<sup>[7-8]</sup>。文献[9]认为涡激共振幅值是结构断面几何参数、质量阻尼参数的函数,涡振幅值与质量阻尼呈反比例关系。文献[10]的研究表明,质量、阻尼是影响涡振幅值的唯一参数,同时基于大量实测数据开展多项式拟合得出了基于质量阻尼参数和 Reynolds 数的涡振幅值估算经验公式。Tamura、Scanlan<sup>[11-12]</sup>等基于不同的涡激力模型同样得到了幅值估算公式,其中,涡振幅值与质量阻尼参数并非呈现明确的线性关系。文献[13-14]研究表明质量、阻尼对于涡激共振幅值的影响是不独立的,两者不能组合成 Scruton 数对涡振幅值进行评估。

综上所述,关于质量、阻尼参数对涡激共振幅值的影响独立性及权重敏感性有待进一步研究。本文基于一组矩形截面节段模型,通过调整模型系统质量、阻尼、刚度,在 Reynolds 一致的情况下,单参数变化等效质量和阻尼,开展测振风洞试验,实测涡激共振幅值响应,研究相关问题。

## 1 涡振幅值估算理论模型

单自由度涡激力模型涡激气动力可表述为:

$$P(t) = \frac{1}{2}\rho U^2 D C_L \times \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ ——涡激气动力;

$\omega$ ——振动圆频率;

$\psi$ ——结构位移响应与涡激力的相位差;

$t$ ——时间;

$\rho$ ——空气密度;

$D$ ——截面横风向尺寸;

$U$ ——来流速度;

$C_L$ ——升力系数均方根。

涡激共振状态下,结构振动卓越频率与尾流涡脱频率一致,相位相同,结构涡激共振位移响应可表

述为:

$$Y(t) = Y_{\max} \times \sin(\omega t + \psi) \quad (2)$$

式中: $Y(t)$ ——涡激振动位移响应;

$Y_{\max}$ ——位移响应幅值。

由结构动力学方程可得涡激在气动力作用下结构位移幅值为:

$$Y_{\max} = \frac{\int_0^h \varphi_n^T(x) P(t) dx}{M_n \omega_n^2} \times \frac{1}{2\xi_n} \quad (3)$$

式中: $h$ ——涡激力展向相关长度;

$\varphi_n(x)$ ——结构第  $n$  阶振型;

$M_n$ ——结构第  $n$  阶等效质量;

$\omega_n$ ——结构第  $n$  阶固有圆频率;

$\xi_n$ ——结构第  $n$  阶固有阻尼比。

结构第  $n$  阶振型无量纲涡振位移幅值为:

$$\begin{aligned} \frac{Y_{\max}}{D} &= \varphi_{n,\max}(x) \times \frac{\frac{1}{2}\rho U^2 C_L \int_0^h \varphi_n^T(x) dx}{m^* \int_0^L \varphi_n^2(x) dx \times (2\pi f_n)^2} \times \frac{1}{2\xi_n} \\ &= \frac{1}{S_c} \times \frac{1}{St^2} \times C_L \times \frac{\varphi_{n,\max}(x) \int_0^L \varphi_n(x) dx}{4\pi \int_0^L \varphi_n^2(x) dx} \times \frac{\int_0^h \varphi_n^T(x) dx}{\int_0^L \varphi_n(x) dx} \\ &= \frac{1}{S_c} \times \frac{1}{St^2} \times C_L K K_w \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $K$ ——结构第  $n$  阶模态振型修正系数;

$St$ ——结构横截面 Strouhal 数,  $St = f_n D / U$ ;

$m^*$ ——匀质结构每延米物理质量;

$S_c$ ——结构 Scruton 数,  $S_c = 4\pi m^* \xi_n / (\rho D^2)$ ;

$f_n$ ——结构第  $n$  阶模态固有工程频率;

$K_w$ ——相应的涡激力展向相关性系数。

式(4)为 Euro Code 涡振幅值估算经验公式的理论基础<sup>[15]</sup>,从式中可以看出,涡激共振幅值与 Scruton 数呈反比例关系,等效质量、阻尼比对涡振幅值的影响权重相同。

## 2 试验模型及参数

### 2.1 风洞试验模型

弹性悬挂刚性节段模型如图 1 所示。8 根竖向安装弹簧悬挂二维刚性节段模型,提供节段模型系统竖向刚度和扭转刚度。模型系统存在竖向(Heaving)、扭转(Pitching)、摇摆(Rolling)三种不同的振动形态,通

过调节悬挂弹簧的横向间距,提高扭转刚度,可以使模型振动为纯竖向(Heaving)振型。通过配重增减可以实现节段模型系统等效质量的调节,阻尼比的调节通过在弹簧缠绕胶带的方式实现。

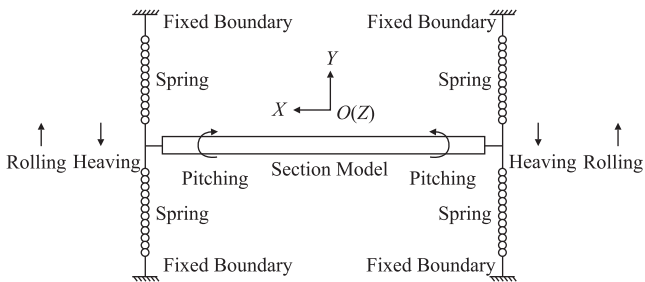


图 1 风洞试验节段模型系统图

矩形截面节段模型尺寸为 100 mm × 120 mm × 1 530 mm。调整模型截面至短边迎风、长边迎风状态,可实现截面宽高比  $B/D = 1.2$ 、 $0.83$  两组不同的试验工况。测振试验采用加速度传感器,4 个传感器布置在节段模型水平连杆上,分布在前后左右 4 个不同的位置,如图 2 所示。基于 4 个通道加速度响应的相位信息判别模型振动竖向(Heaving)、扭转(Pitching)、摇摆(Rolling)振型,取均值可得到竖向振动响应,取差值可分别得到扭转、摇摆振动响应。试验过程中,涡激共振锁定区间内,4 个加速度传感器时程曲线相位一致,模型振动为竖向振型,振动频率卓越(与竖向固有频率一致),为标准的单频简谐振动,可以方便地由加速度响应计算得到位移响应。

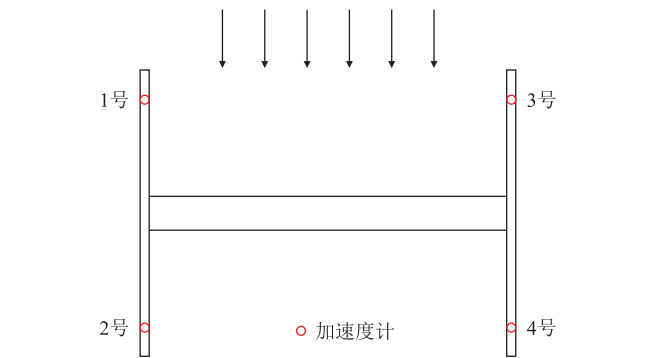


图 2 测振传感器安装图

2.2 主要工况及参数

通过调整节段模型系统等效质量、阻尼和刚度参数,可得到工况及参数列表如表 1 所示。等效质量分别为 12.66 kg/m、17.95 kg/m、24.60 kg/m 三组不同的量级,同步更换悬挂弹簧,对应调整等效刚度,使得不同质量参数下模型系统竖向(Heaving)固有频率一致,均为 2.93 Hz。竖向阻尼比分为 0.146%、0.200%、0.284%、0.500% 共 4 组不同的水平。优化

组合节段模型系统截面宽高比( $B/D$ )、质量、阻尼、弹簧刚度参数,实现 C1 ~ C16 共计 16 组不同的试验工况,Scruton 数范围 12.4 ~ 82.5,可以实现对单一变化质量参数、单一变化阻尼参数、以及 Scruton 数相同(24.1)不同质量阻尼参数组合工况下涡激共振幅值响应的对比研究。

表 1 研究工况及参数表

工况编号	系统截面宽高比 $B/D$	结构阻尼比 $\xi$ / %	每延米等效质量 $m^*$ / (kg/m)	单根弹簧刚度 $k$ / (N/m)	Scruton 数 $S_c$	实测频率 $f$ / Hz
C1	0.83	0.146	12.66	616	12.4	2.93
C2			17.95	852	17.6	
C3			24.60	1 181	24.1	
C4		0.200	12.66	616	17.0	
C5			17.95	852	24.1	
C6			24.60	1 181	33.0	
C7		0.284	12.66	616	24.1	
C8			17.95	852	34.1	
C9			24.60	1 181	46.8	
C10		0.500	12.66	616	42.5	
C11			17.95	852	60.2	
C12			24.60	1 181	82.5	
C13	1.2	0.500	12.66	616	42.5	2.93
C14			17.95	852	60.2	
C15			16.11	767	54.0	
C16			24.60	1 181	82.5	

注:  $S_c = 4\pi m^* \xi / \rho D^2$  ( $\rho$  为空气密度)

3 结果及分析

测振风洞试验实测到了表 1 所示的 C1 ~ C16 工况不同状态的风致振动响应,包括涡激共振锁定区间响应、涡激气动力与准定常驰振气动力耦合作用产生的“软驰振”响应以及发散性的驰振响应等不同状态响应,限于篇幅,本文将主要列举产生了涡激共振响应的试验工况,对比分析质量、阻尼参数对涡振幅值的影响。

3.1 质量参数影响

试验实测节段模型系统风致振动典型时程曲线及频谱如图 3、图 4 所示,对应 C13 工况涡激共振锁定区间幅值响应点,无量纲风速 11.9,无量纲位移幅值 0.176。加速度响应曲线显示基本为等幅振动状态,频谱分析卓越频率 2.93 Hz,与模型系统竖向固有频率一致,为单频振动状态。

对应 C13 ~ C16 工况,相同阻尼比( $\xi = 0.500\%$ ),不同等效质量( $m^* = 12.66$  kg/m、16.11 kg/m、17.95 kg/m、24.60 kg/m)组合参数下,无量纲风速 - 位移响应曲线如图 5(a)所示。随着风速的增加,风振响应曲线出现了涡激共振锁定区间和“软驰振响应”,涡激共振锁定区间放大如图 5(b)所示。从图 5 可以

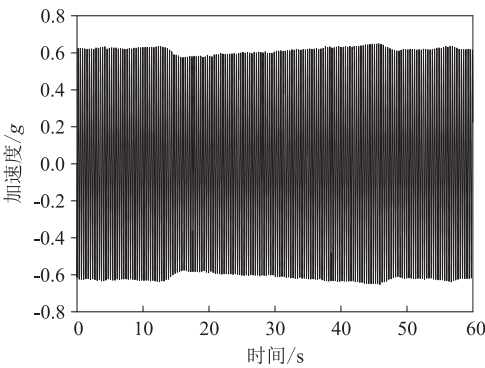


图 3 工况 C13 涡振幅值点时程图

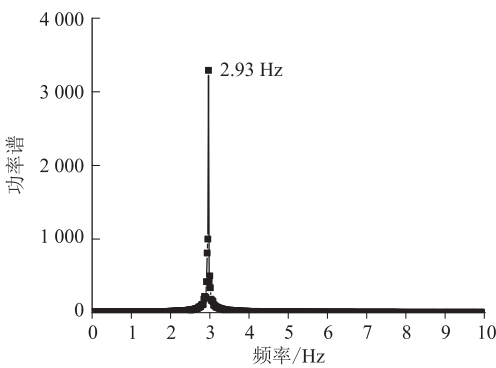
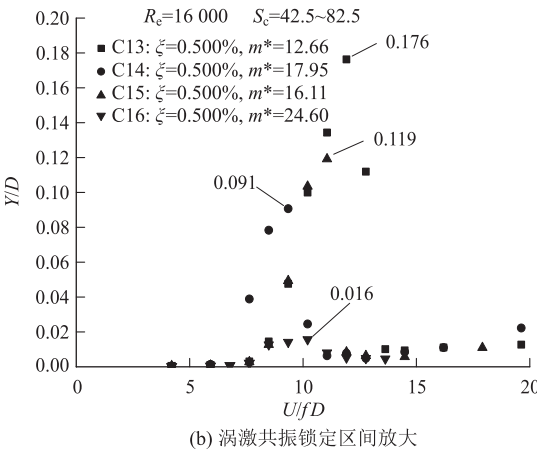
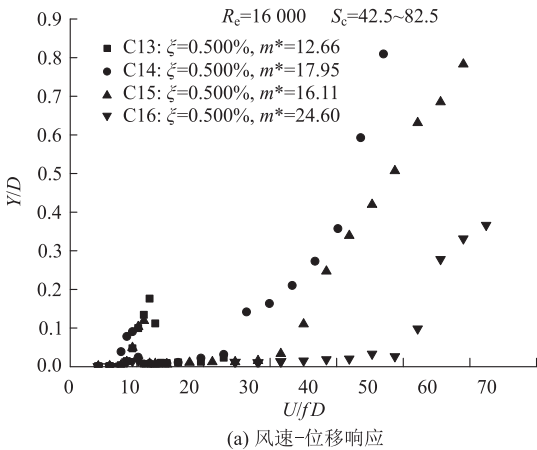


图 4 工况 C13 涡振幅值点频谱图



(a) 风速-位移响应

(b) 涡激共振锁定区间放大

图 5  $\xi=0.500\%$  不同质量响应对比图

看出,涡激共振幅值随着质量的增加而减小,等效质量参数量值由 12.66 kg/m 增大到 24.60 kg/m,增大比例关系为 1.9,实测涡振幅值由 0.176 降低到 0.016,幅值降低比例达到 11.0,涡振幅值的降低幅度远大于质量增加的幅度。

3.2 阻尼参数影响

单参数变化阻尼,实测涡激共振响应如图 6~图 8 所示。对应 C3、C6、C9、C12 工况,等效质量  $m^*=24.60\text{ kg/m}$ ,阻尼比分别为  $\xi=0.146\%$ 、 $0.200\%$ 、

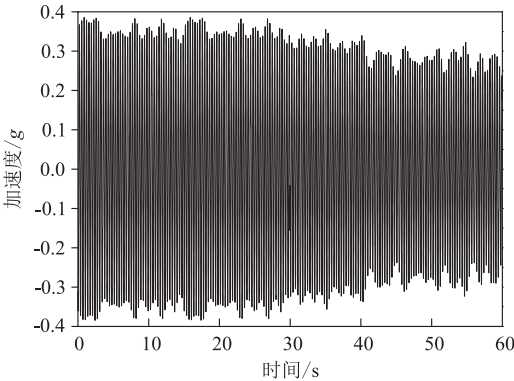


图 6 工况 C3 涡振幅值点时程图

0.284%、0.500%。典型的风致振动时程曲线如图 6、图 7 所示,对应 C3 工况涡激共振锁定区间最大幅值响应点,无量纲风速、幅值分别为 9.9 和 0.083,从图 7、图 8 可以看出,模型振动为单频振动,振动卓越频率与竖向固有频率一致,时程曲线为非等幅状态,有小幅的“拍现象”,通过对固定时长 60 s 取方差的方式对幅值响应进行评估。

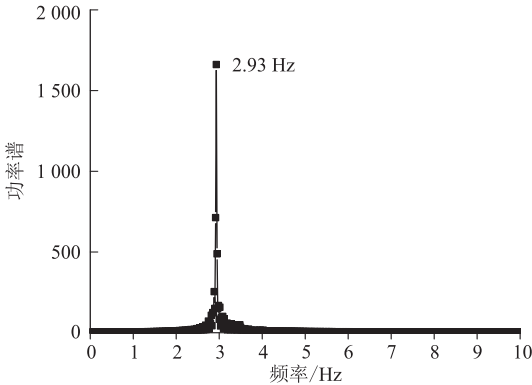


图 7 工况 C3 涡振幅值点频谱图

从图 8 可以看出,阻尼比变化范围较大,由 0.146% 增大到 0.500%,变化幅度达到 3.4 倍,对应

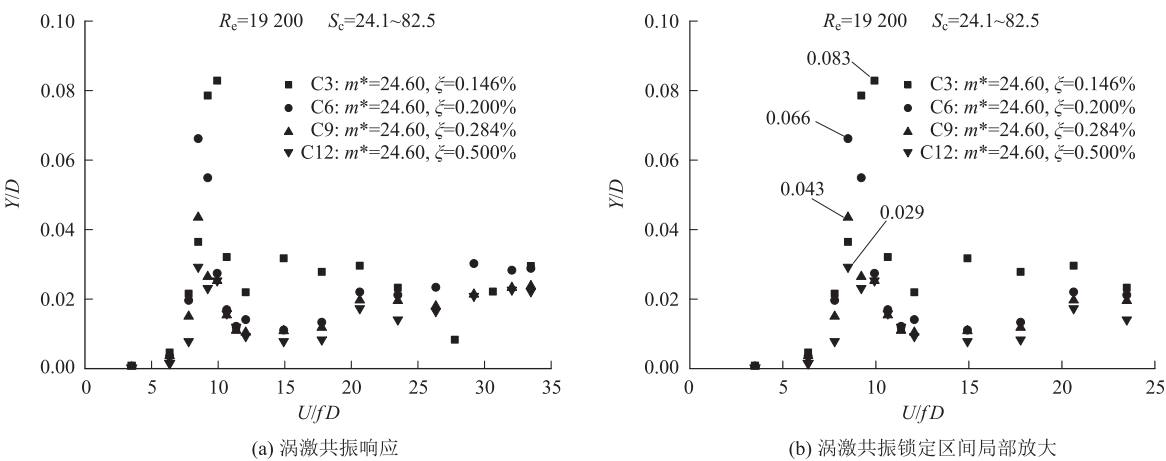


图 8  $m^*=24.60\text{ kg/m}$  不同阻尼响应对比和涡振响应图

实测涡激共振锁定区间内无量纲位移幅值响应从小到大分别为 0.029、0.043、0.066、0.083,最大、最小幅值比为 2.9,与阻尼增大幅度基本相当。

3.3 敏感性分析

从工况列表中选取相同 Scruton 数情况下 (24.1) 不同质量、阻尼参数组合工况风振响应曲线对比如图 9(a) 所示,涡激共振锁定区间局部放大如图 9(b) 所示。C3、C5、C7 工况,等效质量分别为  $m^*=$

24.60 kg/m、17.95 kg/m、12.66 kg/m,相应阻尼比分别为  $\xi=0.146\%$ 、 $0.200\%$ 、 $0.284\%$ ,质量阻尼参数组合下 Scruton 均为 24.1,其余结构和流场参数竖向固有频率、Reynolds 数、模型截面迎风高度、风攻角、紊流度等均相同。从图 9 中可以看出,无量纲涡激共振位移幅值响应分别为 0.031、0.049、0.083,最大、最小幅值比达 2.7,并没有因为 Scruton 数相同而呈现出涡振幅值相同的状态。

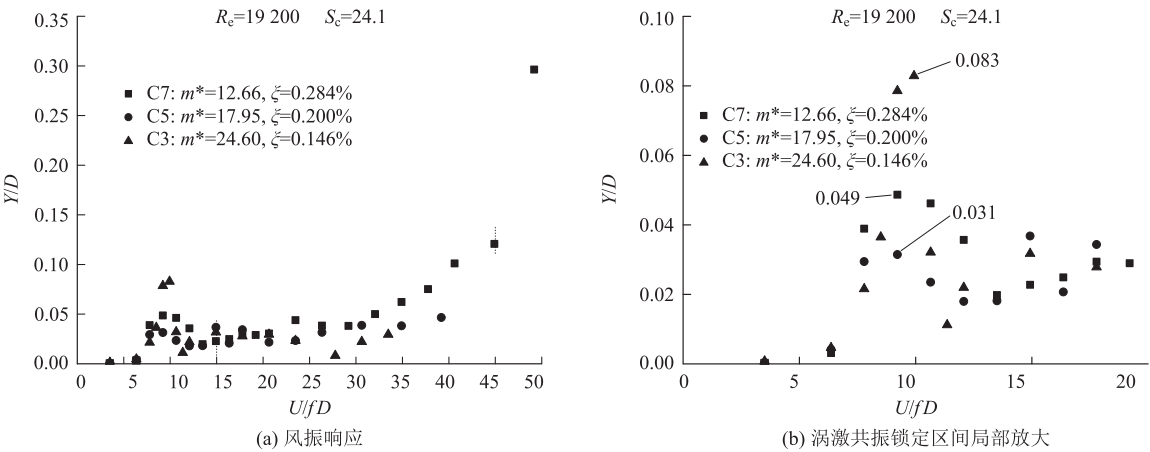


图 9  $S_c=24.1$  不同质量阻尼组合响应和涡振响应图

各工况对比风洞试验实测结果显示,涡激共振幅值响应随着质量、阻尼的增大而减小。将最小实测涡振幅值和单参数变化质量、阻尼进行归一化对比,得到敏感性分析如表 2 所示。表 2 中,计算值为基于 Euro Code 涡激共振幅值估算理论,得出位移幅值响应与质量、阻尼呈反比例关系,再根据各工况参数,以最小质量、阻尼为基础归一化的比值关系<sup>[15]</sup>。实测值为以各工况最小实测涡振幅值为基础归一化的比值关系。

从表 2 中可以看出,随着单参数从小到大变化

表 2 涡振幅值响应质量阻尼参数敏感性分析表					
序号	单参数变化质量( $m^*$ )幅值响应			单参数变化阻尼( $\xi$ )幅值响应	
	工况编号	计算值	实测值	工况编号	计算值
1	C13	1.9	11.0	C3	3.4
2	C14	1.4	7.4	C6	1.9
3	C15	1.3	5.7	C9	1.4
4	C16	1.0	1.0	C12	1.0

等效质量 ( $m^*$ ) 由 1.0 增大到 1.9,实测涡振幅值由 1.0 降低到 1/11.0,幅值降低幅度远大于质量增加的幅度,并非呈线性反比例关系。单参数增加阻尼比由

1.0 增至 3.4,实测涡振幅值由 1.0 逐步降低到 1/2.9,涡振幅值的降低幅度与阻尼的增加幅度基本相当。现有 Euro Code 涡激共振理论认为质量、阻尼对于涡激共振幅值的影响权重是一致的,将实测数据对比分析可知,涡激共振幅值的质量敏感性远大于阻尼敏感性。

## 4 结论

本文开展测振风洞试验,实测涡激共振幅值响应进行对比研究,得出以下主要结论:

(1) 实测涡振幅值响应随着质量、阻尼的增大而减小,定量比例关系分析表明涡振幅值响应的质量敏感性大于阻尼。

(2) 相同 Scruton (24.1) 数不同质量 (12.66 kg/m、17.95 kg/m、24.60 kg/m)、阻尼 (0.146%、0.200%、0.284%) 参数组合工况下,实测涡振幅值响应各不相同,最大最小幅值响应比值达到 2.7,验证了质量、阻尼参数对涡振幅值的影响权重不相同。

(3) 单参数变化节段模型系统等效质量,等效质量由 1.0 增大 1.9 倍,实测涡振幅值响应由 1.0 降低到 1/11.0,比例关系显著放大;单参数变化模型系统阻尼,阻尼由 1.0 增大到 3.4,实测涡振幅值由 1.0 降低到 1/2.9,比例关系基本持平。

## 参考文献:

[1] 周帅,曾永平,杨国静,等. 桥梁箱型吊杆涡振与驰振耦合振动的数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 84-90.  
ZHOU Shuai, ZENG Yongping, YANG Guojing, et al. Numerical Simulation on Coupled Vibration of Vortex-Induced Vibration and Galloping Vibration for Box Hangers of Bridges [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 84-90.

[2] ZHU Ledong, MENG Xiaoliang, DU Linqing, et al. A Simplified Nonlinear Model of Vertical Vortex-Induced Force on Box Decks for Predicting Stable Amplitudes of Vortex-Induced Vibrations [J]. Engineering, 2017, 3(6): 854-862.

[3] 张志田,陈政清. 桥梁节段与实桥涡激共振幅值的换算关系[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 77-82.  
ZHANG Zhitian, CHEN Zhengqing. Similarity of Amplitude of Sectional Model to that of Full Bridge in the Case of Vortex-Induced

Resonance[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 77-82.

- [4] 鲜荣. 大跨度桥梁沿跨向主梁涡激振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
XIAN Rong. Investigation of Long-Span Bridge Girder Spanwise Vortex-Induced Vibration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [5] EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on Structures-Parts 1-4: General Actions-Wind Actions[S].
- [6] HANSEN S O. Wind Loading Design Codes[EB/OL]. 2013.
- [7] MANNINI C, MARRA A M, MASSAI T, et al. Interference of Vortex-Induced Vibration and Transverse Galloping for a Rectangular Cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66: 403-423.
- [8] MANNINI C, MASSAI T, MARRA A M. Modeling the Interference of Vortex-Induced Vibration and Galloping for a Slender Rectangular Prism[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 493-509.
- [9] RUSCHEWEYH H. Practical Experiences with Wind-Induced Vibrations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1/2): 211-218.
- [10] GOVARDHAN R N, WILLIAMSON C H K. Defining the 'Modified Griffin Plot' in Vortex-Induced Vibration: Revealing the Effect of Reynolds Number Using Controlled Damping[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 561: 147.
- [11] TAMURA Y, AMANO A. Mathematical Model for vortex-Induced Oscillations of Continuous Systems with Circular Cross Section[C]// Wind Engineering 1983. Amsterdam: Elsevier, 1984: 431-442.
- [12] Emil Simiu, Robert H Scanlan. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design [M]. New York: John Wiley& Sons, 1996.
- [13] SARPKAYA T. Fluid Forces on Oscillating Cylinders[J]. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 1978, 104(3): 275-290.
- [14] SARPKAYA T. Hydrodynamic Damping, Flow-Induced Oscillations, and Biharmonic Response [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1995, 117(4): 232-238.
- [15] 周帅,陈克坚,陈政清,等. 大跨桥梁涡激共振幅值估算方法的理论基础与应用[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(5): 25-31.  
ZHOU Shuai, CHEN Kejian, CHEN Zhengqing, et al. Theoretical Basis and Practical Applications of Various Vortex-Induced Vibration Amplitudes Estimation Methods for Large-span Bridges [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 25-31.