

扁平双边肋主梁桥梁断面气动导纳 互功率谱识别方法探讨

李思翰¹, 文水兵²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海同豪土木工程咨询有限公司, 上海 200092)

摘要: 以湖北荆沙长江大桥为背景, 通过紊流场测力试验对气动导纳的互功率谱识别法进行了研究。通过与传统方法比较, 发现互功率谱法计算得到的等效气动导纳整体上偏低, 且低于 Sears 函数, 但随折减频率变化的趋势上看, 与传统算法无明显差异。由互功率谱法计算得到的复气动导纳计算抖振力, 并进行频谱分析, 与实测抖振力自功率谱比较发现, 计算得到的抖振力自功率谱随折减频率变化的趋势与实际抖振力自功率谱吻合较好, 但存在一定数量上的差异。通过对紊流度为 6%、10%、20% 的三种紊流场中 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 风攻角下计算值与实验值的比较发现, 计算抖振力谱与实际抖振力谱的相对差异没有随紊流度和来流风攻角变化而变化的趋势, 且相对差值较为稳定。

关键词: 抖振力; 气动导纳; 互功率谱法; 扁平双边肋主梁; 频谱

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2009)02-0178-05

Discussion on Aerodynamic Admittance of Flat Double-Girder Bridge Decks through Cross-Correlation Spectrum Recognition

LISihan¹, WEN Shuibing²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

2. Shanghai Tonghao Civil Engineering Consulting Co. Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract On the basis of simulation of structure of Jingsha River Yangtze Bridge, the aerodynamic admittances are studied by means of cross-correlation spectrum recognition with data gotten from segmental modeling's dynamic wind-tunnel experiment in turbulence flow. Through comparison with traditional method, it is found that aerodynamic admittances gotten by cross-correlation spectrum recognition are less than traditional ones and Sears function on quantity in general, although both results had the same trend of change with the rise of reduced frequency. The buffeting force is calculated through complex aerodynamic admittances, and the spectrum analysis is also carried out. Comparing with those data measured from experiments, it is found that both of them have the same trend of change with the rise of reduced frequency, although they have certain differences in quantity. Through the comparison of buffeting force spectra in different turbulence flow, whose turbulence intensity are 6%, 10%, 20% respectively, with the consideration of different wind attack angle ranging from -5° to $+5^\circ$, it is found that the difference of quantity between results calculated by complex aerodynamic admittances and those measured from experiments are steady and almost independent on the change of wind attack angle and turbulence intensity.

Key words buffeting force; aerodynamic admittance; cross-correlation spectrum recognition; flat double-girder bridge decks; spectra

1 前言

在桥梁抗风的研究中, 桥梁抖振的研究受到众多学者的关注。作为一种随机限幅振动, 如不加以控制会使桥梁结构产生疲劳, 同时会影响到桥上的

行车舒适度。在对这种振动的研究中, 设计阶段能够预测抖振力并检验设计是否合理是工程师关心的重点。随着研究的深入, 对抖振力的研究主要分为了频域研究和时域研究, 在频域研究中, 主要是通过

收稿日期: 2008-11-11

作者简介: 李思翰 (1983-), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗风研究方面的工作。

采用准定常理论建立抖振力模型, 并引入了气动导纳函数对抖振力模型进行修正, 使其能够描述随机非定常气动力。在随后的研究中, 出现了多种研究气动导纳的方法, 并多以 Sears 函数作为衡量标准, 其中采用脉动风和抖振力的互功率谱计算复气动导纳, 并进一步得到等效气动导纳用以衡量对准定常气动力模型修正程度的方法, 是近来比较新的一个概念。本文在湖北荆沙长江大桥节段模型测力试验的基础上, 对互功率谱方法和传统方法计算出的气动导纳函数进行了比较, 并经过抖振力谱分析对气动导纳函数的互功率谱识别法进行探讨。

2 气动导纳的互功率谱识别方法

自 Davenport 在 20 世纪 60 年代建立气动导纳概念之后, 抖振分析都是在准定常理论的基础上引入气动导纳函数加以修正, 并采用如下的抖振力表达式:

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L(\alpha) \chi_{Lu} \frac{u(t)}{U} + (C'_L + C_D) \chi_{Lw} \frac{w(t)}{U} \right] \tag{1}$$

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_D(\alpha) \chi_{Du} \frac{u(t)}{U} + C'_D \chi_{Dw} \frac{w(t)}{U} \right] \tag{2}$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_M(\alpha) \chi_{Mu} \frac{u(t)}{U} + C'_M \chi_{Mw} \frac{w(t)}{U} \right] \tag{3}$$

式中, B 为桥面宽度; $u(t)$ 、 $w(t)$ 为顺风向和竖向风速脉动分量; C 为静力三分力系数; C' 为三分力系

数导数; χ 为气动导纳。
互功率谱识别方法通过建立风速脉动分量和抖振力之间的互相关函数并得到互功率谱, 最终求解 6 个复气动导纳。

以升力导纳为例, 求 $L(t)$ 和 $u(t)$ 、 $w(t)$ 的互相关函数:

$$R_{Lu}(\tau) = \frac{1}{2} \rho U B \left[2C_L(\alpha) \chi_{Lu}(\omega) R_u(\tau) + (C'_L(\alpha) + C(\alpha)) \chi_{Lw}(\omega) R_{wu}(\tau) \right] \tag{4}$$

$$R_{Lw}(\tau) = \frac{1}{2} \rho U B \left[2C_L(\alpha) \chi_{Lu}(\omega) R_{uw}(\tau) + (C'_L(\alpha) + C(\alpha)) \chi_{Lw}(\omega) R_w(\tau) \right] \tag{5}$$

对式 (4)、式 (5) 两端进行傅立叶变换得升力和脉动风速两个分量之间的互功率谱为:

$$S_{Lu}(\tau) = \frac{1}{2} \rho U B \left[2C_L(\alpha) \chi_{Lu}(\omega) S_u(\tau) + (C'_L(\alpha) + C(\alpha)) \chi_{Lw}(\omega) S_{wu}(\tau) \right] \tag{6}$$

$$S_{Lw}(\tau) = \frac{1}{2} \rho U B \left[2C_L(\alpha) \chi_{Lu}(\omega) S_{uw}(\tau) + (C'_L(\alpha) + C(\alpha)) \chi_{Lw}(\omega) S_w(\tau) \right] \tag{7}$$

联立求解方程 (6)、方程 (7), 可得升力气动导纳的两个分量:

$$\chi_{Lu}(\omega) = \frac{S_w(\omega) S_{Lu}(\omega) - S_{wu}(\omega) S_{Lw}(\omega)}{\rho U B C_L(\alpha) [S_u(\omega) S_w(\omega) - S_{wu}(\omega) S_{uw}(\omega)]} \tag{8}$$

在物理意义不利于 Sears 函数进行比较, 赵林^[1]、陈晓东^[2]等提出了等效气动导纳的概念, 有利于将修正程度和 Sears 函数进行比较。仍以升力导纳为例, 等效气动导纳的公式如下:

$$\chi_{Le}(\omega) = \frac{S_u(\omega) S_{Lw}(\omega) - S_{uw}(\omega) S_{Lu}(\omega)}{\frac{1}{2} \rho U B [C'_L(\alpha) + C_D(\alpha)] [S_u(\omega) S_w(\omega) - S_{wu}(\omega) S_{uw}(\omega)]} \tag{9}$$

式中, $S_u(\omega)$ 、 $S_w(\omega)$ 分别为脉动风速水平和竖向分量自功率谱函数; $S_{wu}(\omega)$ 、 $S_{uw}(\omega)$ 为脉动风速分量的互功率谱函数, 且互为共轭复数; $S_{Lu}(\omega)$ 、 $S_{Lw}(\omega)$ 分别为脉动升力和脉动风速水平、竖向分量之间的互功率谱函数。由于这样求出的复气动导纳

$$|\varphi_{LL}(K)|^2 = \frac{4C_L^2(\alpha) |\chi_{Lu}|^2 S_u(K) + (C'_L(\alpha) + C_D(\alpha))^2 |\chi_{Lw}|^2 S_w(K)}{4C_L^2(\alpha) S_u(K) + (C'_L(\alpha) + C_D(\alpha))^2 S_w(K)} \tag{10}$$

为了比较方便, 以下用升力为例, 给出气动导纳函数计算的传统方法, 即假设同一抖振力在两个分量上的气动导纳相等 (如 $\chi_{Lu} = \chi_{Lw} = \chi_L$), 计算公式如下:

$$|x_L|^2 = \frac{S_L}{\frac{1}{4}\rho U^2 B^2 \left[4C_L^2 S_u + (C'_L + C_d)^2 S_w \right]}$$

(11)

3 测力试验简介

本文所采用的实验模型为文水兵^[3]在进行抖振力研究中所采用的扁平双边肋主梁断面模型, 节段模型测力试验于同济大学土木工程防灾国家重点试验室 TJ-1 号边界层风洞进行。模型缩尺比为 1:80。图 1 和图 2 分别为模型安装示意图和安装在风洞中的实物图。

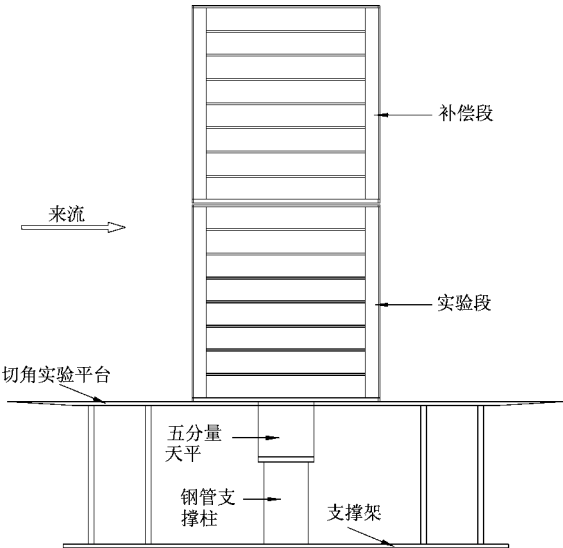


图 1 模型安装



图 2 风洞中的实物

为了减小风洞底面的边界层效应以及测力支架对流场的干扰, 在离风洞底面高 300 mm 处安装了一道外径为 1 000 mm 的圆形平板。

4 气动导纳函数的比较

根据测力试验的数据, 分别以式 (10)、式 (11) 计算气动导纳并以 Sears 函数为基准进行比较。限于篇幅, 以下只给出紊流度为 10% 的流场下的试验结果比较。

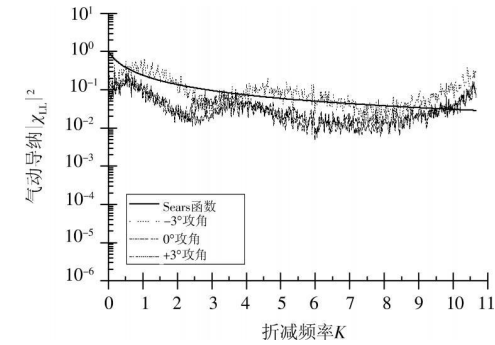


图 3 升力气动导纳

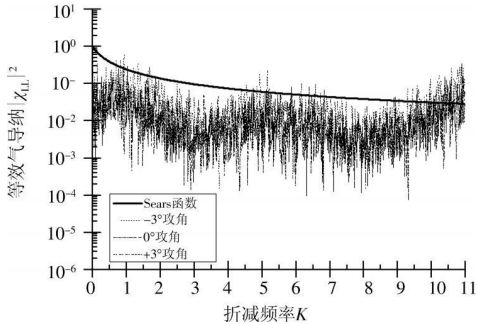


图 4 等效升力气动导纳

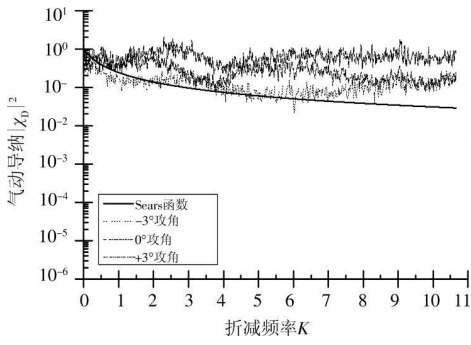


图 5 阻力气动导纳

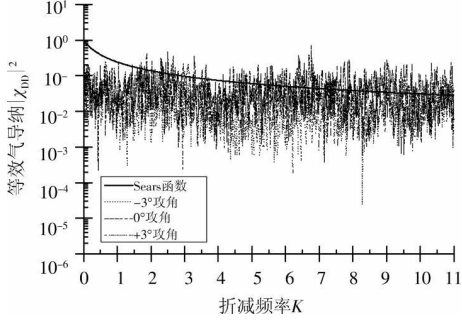


图 6 等效阻力气动导纳

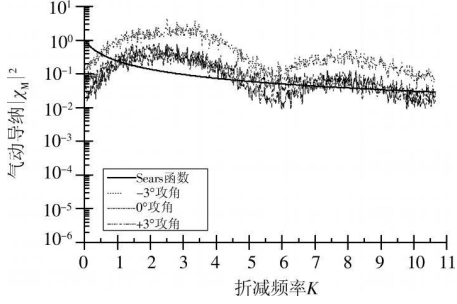


图 7 扭矩气动导纳

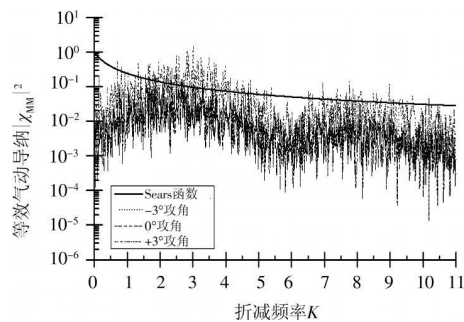


图 8 等效扭矩气动导纳

以上各图中,图 3 图 5 图 7 分别为升力气动导纳、阻力气动导纳、扭矩气动导纳,图 4 图 6 图 8 分别为升力等效气动导纳、阻力等效气动导纳、扭矩等效气动导纳。从图中比较发现等效气动导纳总体上比传统方法计算得到的气动导纳明显偏小,且基本小于 Sears 函数。同时从导纳函数随折减频率变化的趋势上看,两种方法没有明显差异。从图 4 图 6 图 8 中可以发现,等效气动导纳较之以前互功率谱法计算的复气动导纳更易于与 Sears 进行比较。同时与传统方法计算得到的气动导纳有相同的变化趋势,但是,两种方法计算出的导纳函数在数量上存在明显差异。由于气动导纳的计算最终目的是服务于抖振力计算,那么根据实测抖振力计算得来的导纳函数,最终还需要通过比较计算抖振力和实测抖振力进行检验。传统气动导纳计算中导纳函数是直接通过实测抖振力自功率谱计算得来,这就意味着抖振力和导纳函数具有直接的传递关系,而在采用互功率谱计算导纳函数的方法中,实测抖振力和脉动风速进行了互谱计算后,再计算得到复导纳函数,意味着抖振力和导纳函数之间不是直接的传递关系,那么反向验证这种传递是否会造成“信息损失”或“失真”就可以对该方法进行进一步的评估。

5 抖振力计算比较

以下通过用互功率谱法计算得到的气动导纳计算抖振力,并进行功率谱分析,与实际测量的抖振力自功率谱进行比较:

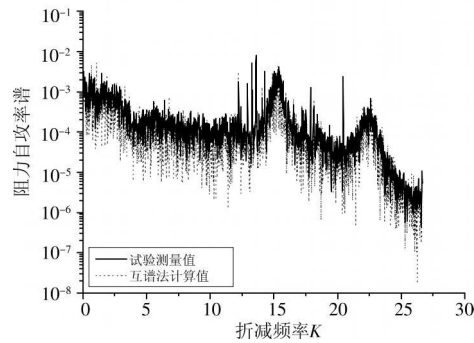


图 9 阻力 0°风攻角自功率谱

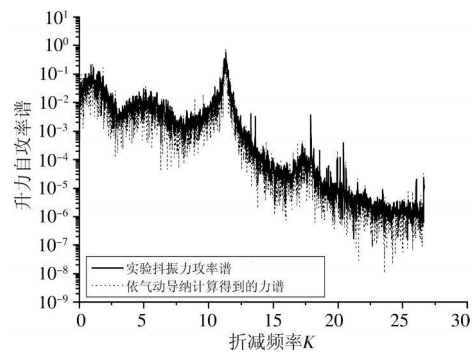


图 10 阻力 0°风攻角自功率谱

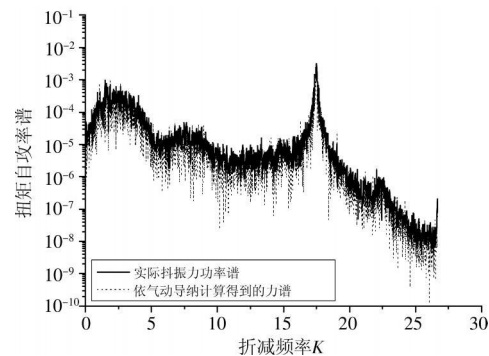


图 11 阻力 0°风攻角自功率谱

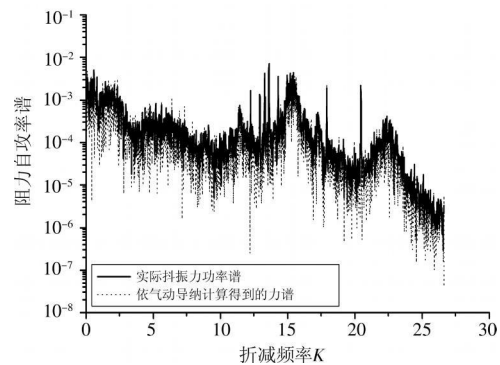


图 12 阻力 + 3°风攻角自功率谱

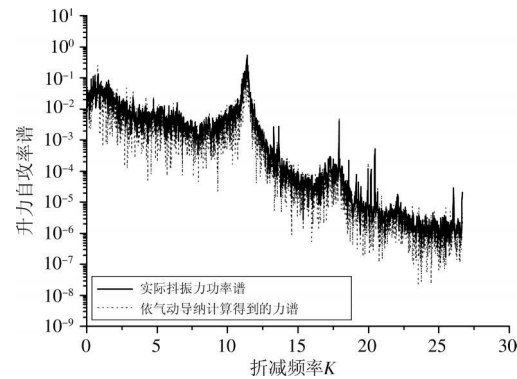


图 13 阻力 + 3°风攻角自功率谱

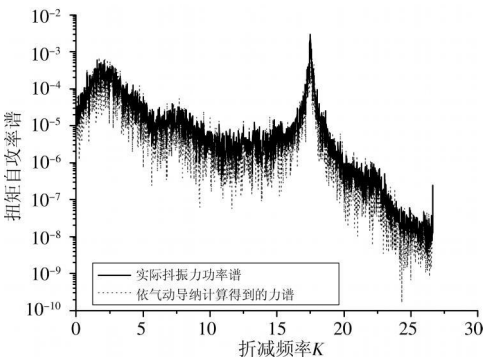


图 14 阻力 + 3°风攻角自功率谱

图 9~图 11 中为 0°风攻角下的抖振力功率谱比较,图 12~图 14 为 + 3°风攻角下的抖振力自功率谱比较。限于篇幅此处只给出了这两种情况的功率谱比较,但其规律具有普遍性。从图中可以发现,由复气动导纳计算得到的抖振力功率谱与实测抖振力功率谱在趋势上能够较好的吻合,但却存在一定数量上的差异。通过对 6%、10%、20% 紊流场中 - 5°风攻角至 + 5°风攻角抖振力功率谱的比较,这种差异并没有随着攻角的改变而有所变化,且在 3 种紊流场中差异的相对量值非常接近。以下给出 3 个流场中抖振力自功率谱相对差值的统计表格:

表 1 不同紊流度流场中各风攻角下计算功率谱和测量功率谱值幅值的相对偏差度

紊流度 %	风攻角							偏差度统计量 %		
	5°	- 5°	- 3°	- 1°	0°	1°	3°	最大	最小	平均
	偏差度 %							值	值	值
6	35.8	34.9	36.8	35.6	35.7	24.6	35.3	37.1	4.0	34.1
10	36.0	38.1	37.8	37.0	37.8	37.3	37.7	39.1	35.7	37.4
20	37.4	35.3	37.1	37.2	36.0	37.1	36.2	38.7	34.0	36.6

表 1 中的偏差度定义为复气动导纳计算得到的抖振力功率谱的模与实测抖振力谱幅值的相对差值,其公式为:

$$\Delta = \frac{|S_{FFM} - |S_{FFC}||}{S_{FFM}}$$

(12)

其中, S_{FFM} 为测量抖振力自功率谱; $|S_{FFC}|$ 为复气动导纳计算得到的抖振力自功率谱的模。

从表 1 中可以发现,由复气动导纳计算得到的抖振力功率谱与实测抖振力功率谱的相对差异,随攻角和紊流度无明显变化,且总体相对偏差度都在

35% 左右。由于互功率谱法中抖振力和风速脉动分量的测量时,模型所在流场受到模型本身几何外型的干扰作用,正是这种对结构扰流产生的特征紊流作用信息反映不全面,致使模拟的抖振力功率谱幅值偏低低于实际抖振力功率谱幅值。

6 结 论

- 1) 采用等效气动导纳函数在物理意义上明确了气动导纳函数整体上,作为修正准定常表达式描述非定常气动力的系数作用,利于与 Sears 函数进行比较。
- 2) 等效气动导纳函数普遍小于传统算法的气动导纳函数,且总体低于 Sears 函数。
- 3) 复气动导纳计算得到的抖振力功率谱幅值总体低于实测抖振力功率谱幅值,相对偏差度约为 35% 左右,且这种偏差度随风攻角和紊流度变化较小。
- 4) 这种偏差程度是否在其他形式的桥梁断面中普遍存在还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 赵 林,葛耀君,李鹏飞. 气动导纳函数互谱识别方法注记 [C] /第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2008

[2] 陈晓东, 葛耀君. 流线型主梁断面的气动导纳互谱识别 [J]. 上海应用技术学院学报, 2007, 7(4): 285-289

[3] 文水兵, 朱乐东, 丁泉顺. 扁平双边主梁桥梁断面抖振力及气动导纳频谱特性研究 [J]. 结构工程师, 2008, 24(3): 96-101.

[4] 靳欣华, 项海帆, 陈艾荣. 桥梁结构气动导纳研究回顾及其新进展 [J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(2): 1-5

[5] Zhu L D. Buffeting Response of Long Span Cable-Supported Bridges under Skew Winds: Field Measurement and Analysis [D]. Hong Kong The Hong Kong Polytechnic University, 2002

[6] Davenport A G. Buffeting of suspension bridge by storm winds [J]. Structural Engineering, ASCE, 1962, 88(6): 233-268

[7] Scanlan R H. The action of flexible bridge under wind II: buffeting theory[J]. Sound and Vibration, 1978, 60(2): 201-211.