

文章编号: 1000-4750(2016)01-0039-08

矩形断面抖振力展向相关性的试验研究

李少鹏^{1,2}, 李明水^{1,2}, 马存明^{1,2}

(1. 西南交通大学风工程试验研究中心, 成都 610031; 2. 风工程四川省重点实验室, 成都 610031)

摘 要: 为了研究紊流作用下钝体的非定常气动力(抖振力), 以矩形断面为例, 通过测压试验研究不同紊流积分尺度下的非定常气动力的分布特性, 并结合理论分析方法研究了现有导纳识别方法的缺陷, 进而提出基于三维统计理论的两波数三维导纳初步识别方法。结果表明: 对于矩形这类钝体断面, 其在紊流下的抖振力特性与流线型箱梁(桥梁主梁)接近, 即抖振力的相关性高于脉动风速的相关性, 且与紊流积分尺度成正比。另外, 理论分析结果与实测数据间存在较大的差异, 进一步表明传统的二维导纳函数无法反映真实的非定常气动力展向分布情况, 而两波数的三维导纳则可揭示展向不同尺度漩涡都对抖振力的贡献。

关键词: 抖振力; 展向相关性; 风洞试验; 积分尺度; 气动导纳函数; 统计理论

中图分类号: U441.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0458

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SPAN-WISE CORRELATION OF BUFFETING FORCES ON A RECTANGULAR SECTION

LI Shao-peng^{1,2}, LI Ming-shui^{1,2}, MA Cun-ming^{1,2}

(1. Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the characteristics of unsteady aerodynamic forces (buffeting forces) on a bluff body, a rectangular cylinder is taken as an example. A pressure measurement technique was applied to study the span-wise buffeting force on the cylinder under turbulent flow with different integral length scales. The deficiencies of traditional 2-dimensional aerodynamic admittance were also studied by theoretical analysis, and a preliminary identification approach for 3-dimensional aerodynamic admittance based on statistical theory was proposed. The results show that the span-wise correlation of the buffeting force on rectangular section is larger than that of turbulence and is in proportion to integral length scale of wind fluctuations, which are similar to previous findings regarding streamlined bridge girders. The explicit difference between theoretical and tested results indicates that the traditional aerodynamic admittance can hardly reflect the span-wise distribution of unsteady aerodynamic forces. However, the 3-dimensional aerodynamic admittance with two-wave numbers can reveal the contributions of span-wise vortices with different dimensions to the buffeting force explicitly.

Key words: buffeting force; span-wise coherence; wind tunnel test; integral length scale; aerodynamic admittance function; statistical theory

抖振是由紊流中脉动部分引起的结构强迫振动。Davenport^[1]首次提出当脉动风尺寸与钝体结构特征尺寸相近或较小时, 会在其表面产生压力重分

布, 从而导致抖振力的空间相关性与脉动风的空间相关性不一致。因此, 研究抖振力的展向相关性对于改进抖振分析精度有重要意义。Roberts 和 Surry^[2]

收稿日期: 2014-05-30; 修改日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278435)

通讯作者: 李明水(1966—), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: lms_rcwe@126.com).

作者简介: 李少鹏(1986—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: lishaopeng0314@163.com);

马存明(1976—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: mcm@swjtu.edu.cn).

以及李明水等^[3]对各向同性紊流下抖振力的空间相关性进行了深入的理论研究,并提出脉动风互谱理论计算公式。Sankaran^[4]、Jakobsen^[5]、Kimura^[6]、Larose^[7-8]以及马存明等^[9]通过大量试验表明,在竖向脉动风的积分尺度与结构特征尺寸接近或更小时,抖振力的展向相关性高于脉动风的相关性。在Larose等的节段模型测压试验中,由于风洞试验段尺寸限制,其设置的试验段长度较小,其中,Larose模型试验段为长度0.3 m,马的试验段长度为0.48 m。由此可见,上述试验均没有反映较长展向间距内抖振力的相关性。同时,试验模拟的紊流积分尺度与模型特征尺寸相比也比较小,难以模拟实际结构在自然紊流中的非定常气动力分布情况。

从基础研究角度考虑,为了便于研究分析钝体断面的抖振力相关性,而又不失一般性规律,因而本文采用比较简单而又相对较“钝”的矩形断面作为试验研究对象。本文通过节段模型测压试验方法,对三种紊流场(由两种格栅和一种尖塔分别产生)中矩形断面的抖振力相关性及其气动导纳进行研究。其中节段模型试验段长度设为2.095 m,以便于研究较大展向间距内的抖振力相关性,同时,尖塔紊流场纵向积分尺度达0.975 m(竖向积分尺度0.329 m),与模型特征尺寸(宽度:0.4 m)相比非常接近,因而与其他学者研究相比,该试验可更为真实的模拟钝体在自然大气紊流场中的非定常气动力特性。最后,通过理论分析,进一步研究了抖振升力相关性较高的原因,并针对现有导纳识别理论的缺陷,提出两波数三维气动导纳的初步识别方法。

1 风洞测压试验

1.1 被动紊流场模拟方法

测压试验模型为宽高比4:1的矩形断面,模型采用铝制骨架,以ABS蒙皮,宽度400 mm,高度100 mm,长度2095 mm,在模型中部1095 mm范围内布置测压点。为增加间距组合个数,采用纵向不等间距布置测压点的方法。测压阀采用DSM-3400,每个测压阀具有64个测点,试验中采用五个测压阀以实现所有测点近似同步测量。为不干扰流场而将其置于模型内部,采样频率采用256 Hz。紊流场测量使用Cobra Probe风速仪,采用两个探头同步测量方法,从而得到不同间距下的紊流参数,采样频率同样采用256 Hz,采样时间180s。紊流场由两种格栅和一种尖塔分别产生。格

栅模拟紊流场在XNJD-1风洞模拟。格栅选取两种规格,一种孔距为215 mm×215 mm(I类流场),杆件厚度为25 mm,将格栅置于模型上游4.2 m处;另一种孔距为330 mm×330 mm(II类流场),每片杆件厚度70 mm,将格栅置于模型上游4.2 m处。尖塔模拟紊流场(III类流场)在XNJD-3风洞模拟,尖塔底部宽度0.5 m,顶部宽度0.07 m,高度4.3 m,尖塔之间的距离为2.8 m,尖塔置于模型上游23 m处(测压模型依旧为4:1的矩形,但对其展向测点加密)。在进行测压试验时,节段模型两端加端板以降低端部影响,并将模型两端置于两个刚性支撑上,以保证试验中模型不会出现自激运动。



图1 测压试验节段模型

Fig.1 Section model for pressure measurements

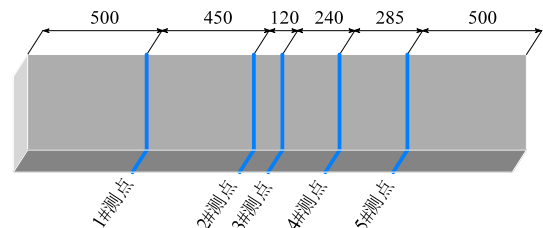


图2 模型测压点纵向布置图 /mm

Fig.2 Positions of the pressure taps along model

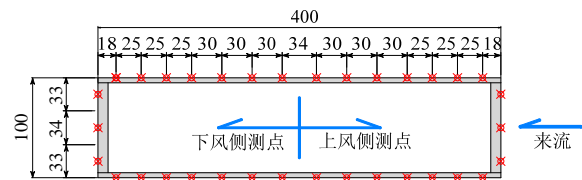


图3 模型测压点横向布置图 /mm

Fig.3 Positions of the pressure taps across section

1.2 紊流场基本参数

通过风场测试表明,格栅紊流场基本满足各项同性特性,尖塔紊流场基本满足水平各项同性假设,并均可用Von Karman谱很好的拟合。由于测压试验中刚性模型固定于某一特定高度处,而在此试验高度处,两种不同规格的风洞均可满足各向同

性假设,因而风洞尺寸对试验结果并无影响。以II类紊流场为例,如图4所示,格栅模拟紊流场可以用 Von Karman 很好的拟合。

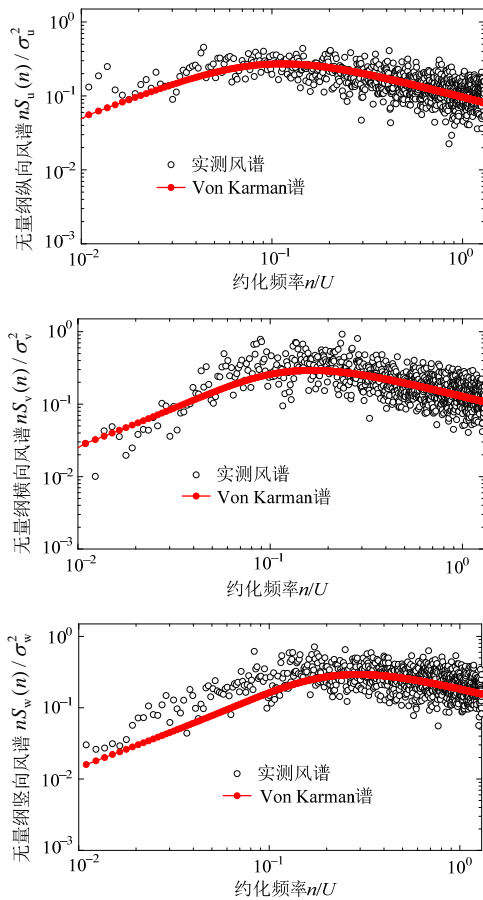


图4 脉动风谱(II类紊流场)

Fig.4 Spectrum of turbulence (type: II)

由于所测数据离散型较大,以直接积分法得到的脉动风积分尺度误差较大,因此本文以最小二乘法通过拟合 Von Karman 谱来得脉动风积分尺度,三种紊流场的紊流特性参数如表1所示。

表1 三种流场紊流特性

Table 1 Characteristics of turbulence for three exposures

流场 类型	积分尺度			紊流度		
	L_u/m	L_v/m	L_w/m	$I_u/(%)$	$I_v/(%)$	$I_w/(%)$
I类	0.065	0.025	0.025	3.9	3.0	3.0
II类	0.108	0.036	0.04	8.0	6.1	6.5
III类	0.975	0.348	0.329	11.0	9.2	8.3

注: L_u 为纵向积分尺度; L_v 为横向积分尺度; L_w 为竖向积分尺度;
 I_u 为纵向紊流度; I_v 为横向紊流度; I_w 为竖向紊流度。

1.3 抖振力空间分布特性

测压试验得到的是各个测点的压力时程信号,将这个压力信号沿断面积分并分解便可得到各断面的抖振力时程信号。利用 Pwelch 法对断面压力信号进行谱估计即可得到相应的抖振力谱。以II类

流场为例,试验所得的抖振升力谱以及抖振力矩谱如图5所示。

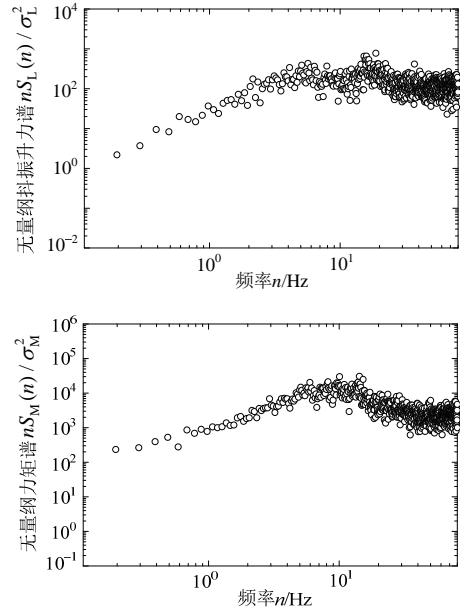


图5 抖振升力谱和抖振力矩谱(II类流场,3#断面)

Fig.5 Spectrum of lift buffeting force and torsional buffeting force (type: II, 3# section)

如图5所示,抖振升力在大约10 Hz~20 Hz频带所出现的一个较小的峰值,经研究表明是该峰值是由于下风侧测点引起的,越靠近下游,则该现象越明显,因而可以推断,该处的峰值是由于模型本身产生的漩涡在下风侧引起的压力脉动,即所谓的特征紊流成份。与来流紊流相比,特征紊流对抖振力的贡献较小,而且来流紊流还对其产生的涡脱有一定的干扰削弱作用^[10-11]。

为了研究抖振力各个频率成分的空间分布特性,这里定义抖振力标准相关谱^[12]如下所示:

$$\text{co-coherence}(\Delta y, n) = \frac{R[S_{12}(\Delta y, n)]}{S(n)} \quad (1)$$

式中: n 是频率; Δy 是展向间距; $R[\]$ 表示取实部; $S_{12}(\Delta y, n)$ 是两点的交叉谱; $S(n)$ 是点谱。

在“片条假设”成立的情况下,抖振力的相关性与脉动风的相关性相同,工程中常用的为 Davenport^[1]所推荐的指数形式的相关性模型:

$$\text{Coh}_L^{1/2}(\Delta y, n) = \exp(-cn\Delta y / U) \quad (2)$$

式中: U 是平均风速; c 为衰减因子,这里将其作为待识别参数来拟合抖振力的展向相关性。

由于紊流的三维特性,流经钝体的流场同样具有三维空间分布,因而可能导致“片条假设”失效^[7]。由于在0°攻角下,抖振升力及力矩主要由竖

向脉动分量贡献,因此, Kimura 等^[6]对含 Bessel 函数的竖向脉动风相干函数进行修正以拟合抖振升力的标准相关谱,该模型如下所示:

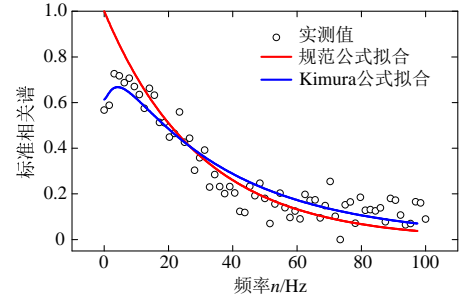
$$Coh_L(\Delta y, n) = 0.994 \left[\eta^{5/6} K_{5/6}(\eta) - \frac{\eta^{11/6} K_{1/6}(\eta)}{1 + 188.7 [n^a (bL_w^x / U)]^2} \right] \quad (3)$$

式中: $\eta = \frac{\Delta y}{bL_w} 0.747 \sqrt{1 + 70.8 \left[n^a \left(\frac{bL_w}{U} \right) \right]}$; K 为第二类修正贝塞尔函数; L_w 为竖向积分尺度; a 和 b 为待识别参数。

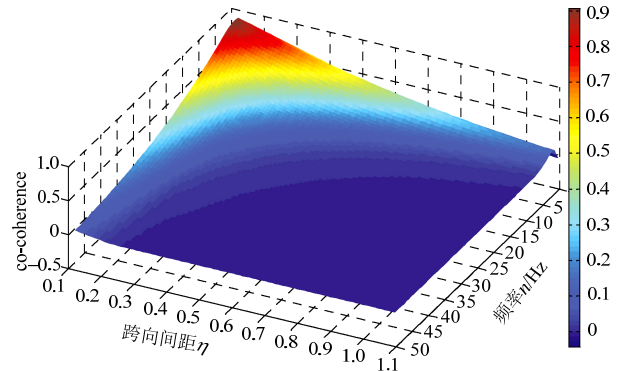
以 II 类流场为例,分别以上述两种模型拟合抖振升力的标准相关谱,计算结果如图 6 所示。

对于抖振升力标准相关谱,式(2)中参数 c 的拟合结果为 2.1; Kimura 模型中参数 a 、 b 的拟合结果分别为 1.52、0.92。

图 6(a)表明,两种抖振升力模型均可在高频部分较好的反映抖振力的相关性,然而在低频部分,规范指数模型则无法精确的模拟抖振力的相关性,而这个频带恰恰是我们所关心的。与之相比, Kimura 模型无论在高频还是低频,均能较好的模拟抖振升力的相关性。由图 6(b)可以看出,抖振升力的相关性与频率成反比,并随着间距的增大而迅速减小。抖振力矩也有类似的规律。



(a) 抖振升力标准相关谱及拟合结果(Δy=0.12 m)



(b) Kimura 模型拟合结果

图 6 抖振升力标准相关谱(II 类流场)

Fig.6 Normalized co-coherence of lift buffeting force (type: II)

另一种表示随机分量空间相关性的方式是通过计算两者之间的互相关系数,针对三种不同流场,计算结果图 7 所示。

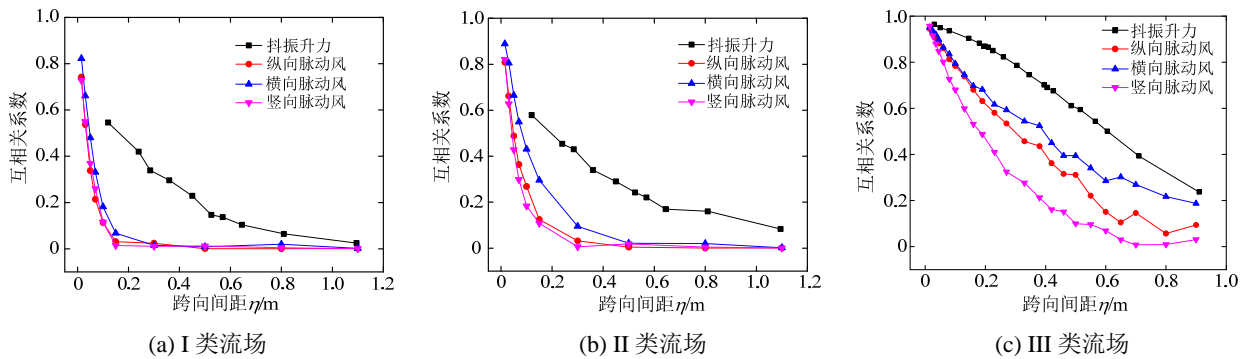


图 7 抖振力和脉动风互相关系数

Fig.7 Cross-correlation coefficients of buffeting force & wind fluctuations

由图 7 可以看出: 1) 横向脉动风速的展向相关性要高于纵向脉动分量的展向相关性,竖向脉动分量的展向相关性最低,这与 Larose 等所测紊流的相关性规律一致; 2) 在积分尺度与紊流度均不相同的紊流场中,抖振力的相关性不尽相同,然而其相同点是抖振升力的相关性要高于脉动风速的相关性。

由图 8 看出,抖振升力的展向相关性随着积分尺度的增大而增大;随着展向间距的增大而减小。

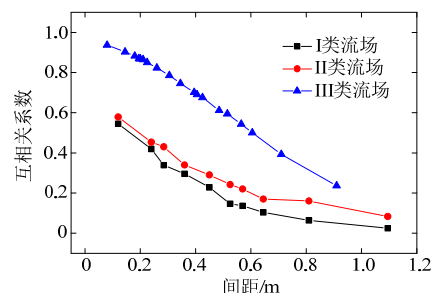


图 8 不同积分尺度下的抖振升力互相关系数

Fig.8 Cross-correlation of lift buffeting force with different integral scale length

1.4 矩形断面气动导纳函数

气动导纳函数可以视为线性系统的传递函数，对于不同脉动成分，其相应的气动导纳是有所差异的。然而识别不同脉动分量所对应的气动导纳在现有的技术条件下存在一定的难度，因而通常使用如下定义的断面等效气动导纳函数：

$$|\chi_i(n)|^2 = \frac{S_i(n)}{(\rho UB/2)^2 \{4C_i^2 S_u(n) + C_i'^2 S_w(n)\}} \quad (4)$$

式中： i 分别表示升力 L 和力矩 M ； C_i 表示结构断面的静力系数； C_i' 表示静力系数一阶导数。

通过考虑气动力的展向分布，Larose^[7]提出如下形式的三维导纳(3D-AAF)拟合形式：

$$\left| \chi_{LM} \left(f_r, \frac{L}{B} \right) \right|^2 = \frac{a(1+\sqrt{f_r})}{1+bf_r^2} \quad (5)$$

式中： f_r 为约化频率； $f_r = nB/U$ ； L 为紊流积分

尺度； $a = a_1(L/B)^{a_2}$ ， $b = a_3(L/B)^{a_4}$ ，其中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为待识别参数。

针对实际测量的断面气动导纳，可以通过最小二乘法对式(5)进行拟合以得到所谓的三维气动导纳(3D-AAF)。在拟合过程中 L 采用纵向积分尺度，计算结果如表 2 及图 9 所示。

表 2 气动导纳参数识别结果

Table 2 Identification of the aerodynamic admittance parameters

识别参数	升力			力矩		
	I类 流场	II类 流场	III类 流场	I类 流场	II类 流场	III类 流场
a_1	0.33	0.42	0.21	0.19	0.43	0.09
a_2	0.74	0.24	2.49	0.15	0.03	2.21
a_3	7.78	1.33	9.37	1.35	2.80	2.35
a_4	0.83	-0.24	3.22	-0.92	-0.48	3.11

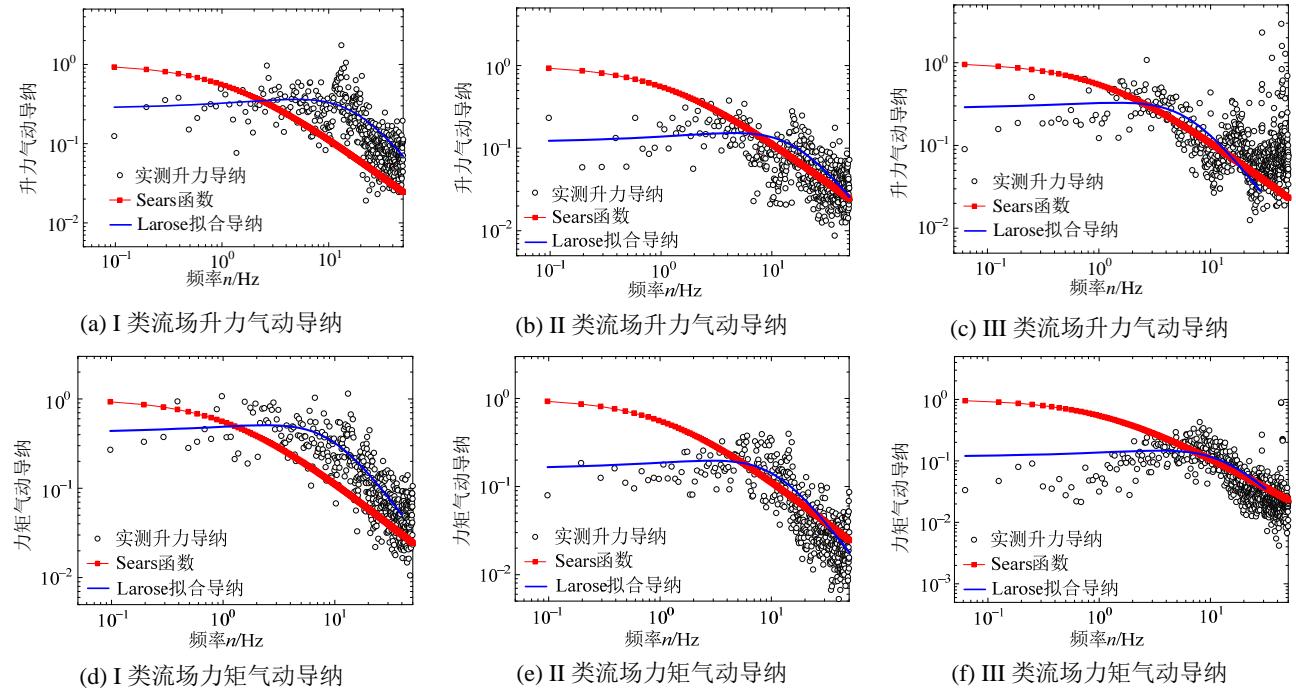


图 9 矩形断面升力气动导纳(3#断面)

Fig.9 Lift and torsional aerodynamic admittance of rectangular section (3# section)

由图 9 可以证实，工程中常用的 Sears 导纳在低频高估了钝体断面抖振力，而在高频部又不同程度低估了其值。同时，Larose 建议的 3D 气动导纳模型与断面实测气动导纳拟合良好，而气动导纳函数与紊流场之间的关系如图 10 所示。

如图 10 所示，气动导纳函数不仅与积分尺度有关，还与紊流的模拟形式有关(即紊流度)，结合 Larose 等的试验结合可以得到如下结论：1) 对于格栅模拟紊流场，气动导纳与紊流积分尺度成反比；2) 对于尖塔模拟紊流场，其在低频部分与尺度较小

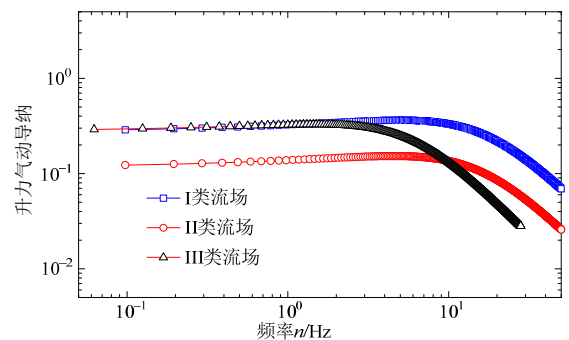


图 10 不同流场下的升力气动导纳
Fig.10 Aerodynamic admittance of lift buffeting force under different turbulent flow fields

的格栅紊流场结果接近，而在高频部分则与积分尺度较大的格栅紊流场结果接近，这可能与紊流度的差别有一定的关系，这需要进一步试验研究来验证。

2 矩形断面抖振力展向相关性理论计算结果

如果假定导纳函数为 1，则抖振力的相关性与竖向脉动风相关性近似相同(竖向脉动成分干扰)，然而试验结果显示抖振力的相关性要偏大，可能的原因便是气动导纳的引入。为了进一步研究“片条假设”的适用性，这里通过采用李少鹏等^[13]所建议的相关性理论分析方法计算钝体断面在上述试验条件下的抖振力展向相关性。

该方法基于随机振动基本原理，进而得到抖振力互相关系数的理论表达式：

$$\Phi_{jAB} = \frac{\text{Cov}_{jAB}}{\sigma_{jA} \sigma_{jB}} = \frac{2 \int_0^{+\infty} S_{jAB}(\omega) d\omega}{\sqrt{2 \int_0^{+\infty} S_{jA}(\omega) d\omega \times 2 \int_0^{+\infty} S_{jB}(\omega) d\omega}} \quad (6)$$

式中： Φ_{jAB} 为 A、B 两点的互相关系数($j=1$ 表示抖振升力， $j=2$ 表示纵向脉动分量， $j=3$ 表示竖向脉动分量)； Cov_{jAB} 为 A、B 两点的协方差； σ_{jA} 、 σ_{jB} 分别为 A 点或 B 点的均方根； S_{jAB} 为 A、B 两点的互谱； S_{jA} 、 S_{jB} 分别为 A、B 两点的点谱。

将任意脉动风谱代入式(6)即可得抖振力及脉动风的互相关系数一般性表达式：

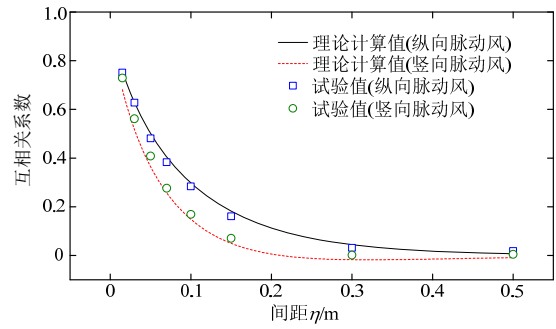
$$\Phi_{jAB} = 1 - \frac{|\eta| \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \psi(K, K_1) \cdot J_1\left(\frac{|\eta|}{z} K_1\right) dK_1 dK}{\mathcal{G}(K)} \quad (7)$$

式中： $j=1\sim 3$ ，意义同上； $\psi(K, K_1)$ 、 $\mathcal{G}(K)$ 为待定参数； $K = \frac{\omega z}{U}$ 为无量纲折减频率(对于自然大气紊流场， z 表示高度；对于风洞模拟紊流场， z 以纵向积分尺度 L_u 代替)。

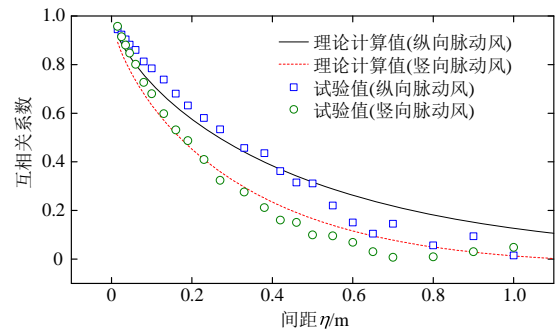
为了研究抖振力展向相关性较高的原因，本文利用风洞实际模拟风谱及实测气动导纳函数，根据式(7)，通过数值积分得到风洞被动模紊流中抖振力及脉动风的展向互相关系数。

为了验证该方法的有效性，首先利用该方法计算脉动风的互相关系数，以 II 类(格栅模拟紊流场)、III 类(尖塔模拟紊流场)流场为例，计算结果如图 11

所示。



(a) II 类流场



(b) III 类流场

图 11 脉动风互相关系数

Fig.11 Cross-correlation coefficient of wind fluctuations

如图 11 所示，理论计算结果与风洞试验测试结果吻合良好，表明利用该方法计算两个随机变量的互相关系数是合理有效的，同时也进一步说明风洞试验被动模拟紊流场近似满足各项同性假设。为了计算抖振力的互相关系数，这里以 III 类流场的抖振升力为例，将实测气动导纳、静力系数以及脉动风参数代入式(7)，即可得抖振升力的互相关系数如图 12 所示。

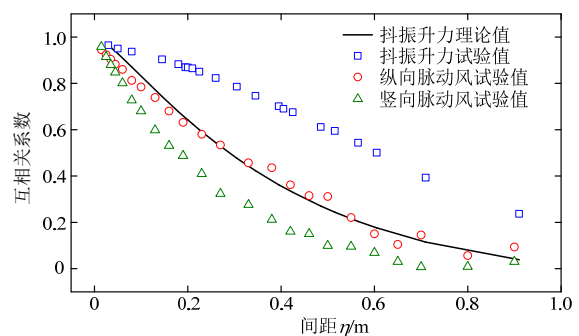


图 12 抖振升力互相关系数(III 类流场)

Fig.12 Cross-correlation coefficient of lift buffeting force (type: III)

由图 12 所示，在气动参数及紊流参数均采用实测值的情况下，抖振升力互相关系数的理论计算结果要远远小于试验测量值，而图 11 又表明该理

论方法是可靠有效的，那么可能的解释便是试验测量的截面等效气动导纳函数并没有准确的反映抖振力的展向相关性，即传统的二维导纳无法真实的反映抖振力的空间分布，也意味着 Larose 所提出的 3D-AAF 模型有一定的局限性。因此，有必要引入抖振力的展向相关性，同时借鉴三维紊流理论以得到真正意义上的“3D-AAF”，以此反映真实的空间流动特性。

3 两波数三维气动导纳初步识别方法

所谓的“三维导纳”需要反映紊流在流经钝体断面时所产生的复杂的空间流动特性，因而很难采用现有的流体分析理论得到三维导纳的通解，但是，参考 Taylor^[14]的三维紊流分析方法，借助节段模型测压试验，可得到空间展向两点的抖振力互功率谱，进而通过傅里叶变换方法，即可得到抖振力的两波数功率谱。以升力导纳为例，结合现有的三维紊流模型，可以得到如下形式的两波数三维气动导纳识别方法：

$$|\chi_L(k_1, k_2)|^2 = \frac{S_L(k_1, k_2)}{(\rho U b)^2 [C_L^2 S_u(k_1, k_2) + (C_L' + C_D)^2 S_w(k_1, k_2)]} \quad (7)$$

式中： k_1 ， k_2 是纵向以及展向波数； $k_1 = n_1 / U$ ， $k_2 = n_2 / U$ ； $|\chi_L(k_1, k_2)|^2$ 是两波数三维导纳； $S_L(k_1, k_2)$ 是两波数抖振力功率谱； $S_u(k_1, k_2)$ 、 $S_w(k_1, k_2)$ 分别表示两波数纵向脉动风和竖向脉动风功率谱； ρ 是空气密度； U 是平均风速； b 为钝体半宽； C_L 是钝体升力系数； C_L' 是升力系数导数； C_D 是阻力系数。

以 III 类流场为例，通过上述三维统计方法可以得到如下形式的两波数三维导纳以及互相关系数。

由图 13 可以看出，两波数三维导纳真实的反映了紊流作用下钝体抖振力的空间分布规律，与传统二维导纳相比，两波数三维导纳清楚的显示了展向不同尺度的漩涡对抖振力的贡献，对于抖振精细化分析有着重要的意义。图 14 显示基于两波数三维导纳所得的互相关系数与试验值吻合较好，表明由该方法识别的三维导纳能够较好的包含抖振力的展向相关性信息，从而证实了该理论的有效性。由于该识别方法依赖于风洞测压试验的精度并与紊流尺度、结构尺寸等参数有着内在的关系，因而有必要通过大量试验研究，从而对该方法进行进一步的完善。

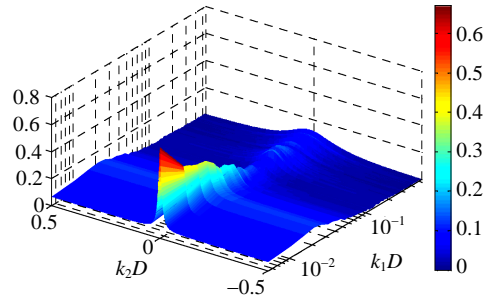


图 13 三维气动导纳(III 类流场)

Fig.13 Three-dimensional aerodynamic admittance (type: III)

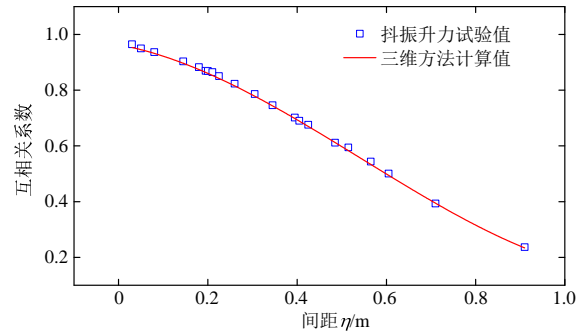


图 14 基于三维导纳的抖振升力互相关系数

Fig.14 Cross-correlation coefficient of lift buffeting force based on 3D aerodynamic admittance (type: III)

4 结论

本文通过风洞试验测压试验并结合相关性理论分析，对钝体断面抖振力的气动特性进行了详细研究，得到如下结论：

- (1) 矩形断面抖振力的相关性高于脉动风速的相关性，且与紊流积分尺度成正比；
- (2) 矩形断面气动导纳函数不仅与积分尺度有关，还与紊流模拟形式有关，对于格栅模拟紊流场，气动导纳与紊流积分尺度成反比；对于尖塔模拟紊流场，其在低频部分与尺寸较小的格栅紊流场结果接近，而在高频部分则与尺寸较大的格栅紊流场结果接近；
- (3) 传统的二维气动导纳函数无法真实反映抖振力的展向相关性，因而有必要通过引入抖振力的展向相关性，从而将传统的二维导纳扩展到三维空间，以反映真实的抖振力空间分布；
- (4) 基于统计理论得到的两波数三维气动导纳能够真实反映展向不同尺度漩涡对于抖振力的贡献，较好的包含了抖振力展向相关性信息，进而有助于了解紊流在钝体表面的真实流动特性。

参考文献：

[1] Davenport A G. The response of the slender, line-like

- structures to a gusty wind [J]. ICE Proceedings, 1962, 23(3): 389—408.
- [2] Roberts J B, Surry D. Coherence of grid generated turbulence [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1973, 99(6): 1227—1245.
- [3] 李明水, 贺德馨, 王卫华. 大跨度桥梁抖振响应的频域分析[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(1): 74—80.
Li Mingshui, He Dexin, Wang Weihua. Frequency domain analysis to buffeting response of long-span bridges [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(1): 74—80. (in Chinese)
- [4] Sankaran R, Jancauskas E D. Measurements of cross-correlation in separated flows around bluff cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1/2/3): 279—288.
- [5] Jakobsen J B. Span-wise structure of lift and overturning moment on a motionless bridge girder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 69/70/71: 795—805.
- [6] Kimura K, Fujino Y, Nakato H, et al. Characteristics of buffeting forces on flat cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69/70/71: 365—374.
- [7] Larose G L. The spatial distribution of unsteady loading due to gusts on bridge decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12): 1431—1443.
- [8] Larose G L, Mann J. Gust loading on streamlined bridge decks [J]. Journal of Fluids and Structures 1998, 12(5): 511—536.
- [9] 马存明. 流线箱型桥梁断面三维气动导纳研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Ma Cunming. 3D aerodynamic admittance response of streamlined box bridge decks [D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [10] 朱乐东, 赵传亮, 丁泉顺. 扁平箱主梁断面抖振力频谱特性以及桥梁方向相关性研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 96—101.
Zhu Ledong, Zhao Chuanliang, Ding Quanshun. Spectral characteristics and spanwise coherence of buffeting forces on a flat box-girder bridge deck [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 96—101. (in Chinese)
- [11] 张文明, 葛耀君. 考虑特征紊流影响的大跨度桥梁静风稳定分析方法[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 198—202.
Zhang Wenming, Ge Yaojun. An approach to aerostatic stability analysis of long-span bridges including effect of signature turbulence [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 198—202. (in Chinese)
- [12] ESDU 86010, Characteristic of atmospheric turbulence near the ground. Part III: Variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere) [S]. London: Engineering Sciences Data Unit, 1986.
- [13] 李少鹏, 李明水, 马存明, 廖海黎. 大跨度桥梁抖振力与脉动风速空间相关性的对比研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(6): 796—800.
Li Shaopeng, Li Mingshui, Ma Cunming, Liao Haili. Comparison of the spatial correlation of the buffeting force on long span bridge and wind fluctuations [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(6): 796—800. (in Chinese)
- [14] Taylor J. Manual on aircraft loads [M]. New York: Pergamon Press, 1965: 200.

(上接第 31 页)

- [11] Wang Y N, Zhao M H, Li Shihai, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method [J]. Science in China Series E-Engineering & Materials Science, 2005, 48(Suppl): 95—106.
- [12] Lanru Jing, Ove Stephansson. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering theory and applications [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007: 235—306.
- [13] Itasca Consulting Group Inc. UDEC (Universal Distinct Element Code), Version 4.0, User's Manual [M]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [14] 冯春, 李世海, 刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用[J]. 力学学报, 2011, 43(1): 184—192.
Feng Chun, Li Shihai, Liu Xiaoyu. Semi-Spring contact model and its application to failure simulation of slope [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(1): 184—192. (in Chinese)
- [15] Feng C, Li S H, Liu X Y, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(1): 26—35.