

主动来流闭口箱梁气动力时频相关性

许 坤, 赵 林, 葛耀君, 曹曙阳

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于主动控制的多风扇和振动格栅装置模拟了 14 种同步二维湍流场, 同步测量了参考点处流场特性及相应断面气动力, 从时域和频域 2 个角度分析了荷载展向相关性与来流特性之间的关系, 研究发现, 来流相关性与气动力相关性并不相同; 气动力相关性之间也互不相同. 气动力相关性受来流特性影响显著, 在大积分尺度来流下, 脉动风及荷载空间相干函数并不满足传统 e 指数形式. 为了考虑来流特性对气动力相干函数的影响, 提出了一种相干函数模型, 较之传统模型, 该模型可以反映来流特性对空间相干函数的影响以及气动力与脉动风相干函数间的差异.

关键词: 主动风洞; 闭口箱梁; 气动力; 空间相关性

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

Time-frequency Coherences of Aerodynamic Loads on a Streamlined Bridge Girder in an Actively Controlled Wind Tunnel

XU Kun, ZHAO Lin, GE Yaojun, CAO Shuyang

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

Abstract: Altogether 14 different two-dimensional flow fields were simulated in an actively controlled wind tunnel by using multiple-fans and vibration grids. Flow features and aerodynamic loads were measured simultaneously through the simultaneous acquisition facilities. Relationships between spatial coherences of aerodynamic loads and incident flow features were studied in both time and frequency domains. Spatial coherences of both incident flows and aerodynamic forces varied with each other. Spatial coherences of aerodynamic loads were affected by incident flow features. Shape of spatial coherence versus frequency did not always satisfy the exponential law, especially under large scale oncoming flow conditions. A new imperial model was proposed to reflect the influence of incident flow features on the spatial coherences of aerodynamic loads, and to reflect the

differences between spatial coherences of aerodynamic loads and incident flows.

Key words: actively controlled wind tunnel; closed-box bridge deck; aerodynamic loads; spatial coherences

大跨度桥梁是具有线状特性的三维空间结构. 传统桥梁抗风研究更多集中于空间某“断面”的气动力表达及相应气动参数的识别, 由于该研究基于“片条”假设, 所以将二维气动力与三维结构分析方法相结合时需要考虑气动力的空间相关性^[1]. 目前气动力空间相关性被认为仅与水平来流有关, 并假定风荷载空间相关性与水平来流空间相关性一致. 随着桥梁跨度的增加, 结构对来流湍流空间相关性也越来越敏感. 且风荷载与结构三维流动有关, 考虑到竖向湍流的影响及来流沿桥梁展向的流动, 传统风荷载空间相关性的假设可能不再适用. 有必要对风荷载空间相关性进行深入研究, 以验证和改进传统风荷载空间相关性分析方法.

Davenport^[2]基于现场实测研究了水平来流空间相关性, 并最早提出用 e 指数模型描述来流随空间距离及频率变化的衰减规律. 后续又有许多学者基于被动风洞试验条件研究了不同来流条件下风荷载空间相关特性. 研究发现风荷载空间相关性与来流相关性并不一致, 某些情况下荷载相关性大于来流相关性, 且风荷载相关性不仅与空间距离及频率有关, 与来流特性以及断面形式等也有一定关系.

然而上述研究都是基于被动来流条件, 被动风洞由于自身特点, 无法准确控制来流特性, 如湍流积分尺度、湍流度等, 尤其是导纳的不稳定对相关性的存在较大影响, 容易引起一定的试验误差^[3]. 由于模型的存在, 无法直接测量参考点处流场特性, 往往需要在参考点的上游或模型的侧面进行测量. 在被动风

收稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(91215302, 51178353 和 51222809); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036300)

第一作者: 许 坤(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁结构抗风. E-mail: xukun_tj@163.com

通讯作者: 葛耀君(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁与结构抗风. E-mail: yaojunge@tongji.edu.cn

洞中,流场能量沿流动方向不断衰减,并且来流沿展向并不完全相关,测得的流场特性无法真实反映参考点处流场特性.而参考点处流场特性与结构受到的气动力密切相关,参考点处流场脉动直接影响来流瞬时有效攻角,继而直接影响结构断面气动力.因此对荷载空间相关性与来流特性之间关系进行精细化研究时需要准确测量参考点处流场特性.相对被动风洞,主动风洞具有一定的优势,它可以保证来流的可控性,使流场具有较好的稳定性^[4-5].此外,二维流场中风荷载与水平和竖向来流都密切相关,有必要研究二维同步来流条件下风荷载空间相关特性.

基于上述考虑,有必要对二维同步来流条件下风荷载空间相关性进行研究.利用日本宫崎大学多风扇风洞加装主动控制的振动格栅装置,对不同场地特性进行精细化模拟,利用同步测量装置和主动控制风洞中流场可控这一特性对参考点处流场特性及相应断面风荷载进行精确测量.探讨了二维同步来流条件下流场特性对荷载相关性的影响,并提出了考虑来流特性影响的新型相干函数模型.

1 相关性定义

脉动风场中湍流及风荷载相关性可以用时域内的相关系数或频域内的相干函数来描述.

1.1 相关系数

对于某一脉动分量,以空间两点水平脉动风为例,两点水平脉动风速的相关系数可以定义为

$$C_{or}(x_1, x_2) = \frac{u_1(x_1, t) \cdot u_2(x_2, t)}{\sigma_{u_1} \sigma_{u_2}} \quad (1)$$

式中: x_1, x_2 分别为空间第1和第2点位置; $u_1(x_1, t), u_2(x_2, t)$ 分别为第1和第2点水平方向脉动风速; $\sigma_{u_1}, \sigma_{u_2}$ 分别为第1和第2点脉动风速标准差; $\overline{u_1(x_1, t) \cdot u_2(x_2, t)}$ 表示对时间 t 求平均.一般而言,展向相关系数随展向距离的增加而变小,意味着展向相关性减弱.

1.2 相干函数

空间相干函数描述两点脉动风速或风荷载在频域上的相关特性,定义如下:

$$C_{oh,1/2}(f, \Delta x) = \frac{S_{R_1, R_2}(f, \Delta x)}{\sqrt{S_{R_1}(f)} \sqrt{S_{R_2}(f)}} \quad (2)$$

式中: f 为频率; $S_{R_1, R_2}(f, \Delta x)$ 表示距离为 Δx 的两点 R_1 和 R_2 脉动风速互谱密度; $S_{R_1}(f)$ 和 $S_{R_2}(f)$ 表示 R_1 和 R_2 脉动风速的自功率谱密度.

Davenport^[2]最早建议采用 e 指数模型描述来流空间相干性与频率、空间距离及来流平均风速之间的关系,如下所示:

$$C_{oh,1/2,x}(f, \Delta x) = \exp(-c_x \cdot \frac{f \cdot \Delta x}{U})$$

$$C_{oh,1/2,z}(f, \Delta z) = \exp(-c_z \cdot \frac{f \cdot \Delta z}{U}) \quad (3)$$

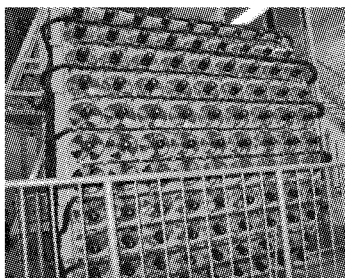
式中: Δx 为水平方向两点间距; Δz 为竖直方向两点间距; U 为平均风速; 参数 $c_x=8, c_z=7$.

后续又有许多学者基于 e 指数模型提出了许多改进形式.此外还有一些学者提出了基于 Von Karma 谱的空间相干函数模型,其中最具有代表性的是 Kimura 相干函数^[6].由于该种模型表达式冗长,实际工程应用并不多.

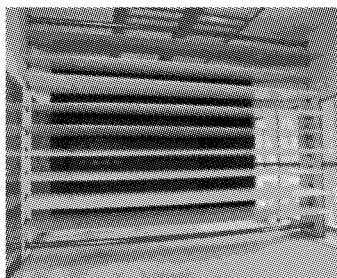
2 试验概况

2.1 二维同步风场模拟

试验在日本宫崎大学多风扇主动风洞中进行,如图1所示,该风洞为开口直流式矩形截面风洞,截面高度为1.804 m,宽度为2.538 m,最大风速可达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.水平风机由99个独立控制的风扇组成,可以充分模拟水平向的各种流场,并可以产生较大积分尺度的湍流^[4-5].然而采用多风扇这种单一主动模拟技术无法模拟竖向脉动分量,由前期研究^[7]知,在主动风洞中通过加装主动控制的振动格栅装置可以较好再现二维同步脉动风场.



a 多风扇湍流发生装置



b 振动格栅湍流发生装置



c 试验模型

图1 流场发生装置和测压试验模型

Fig.1 Flow-generation facilities and experimental model

水平向和竖向分别采用 Von Karman 谱及 Panofsky 谱作为目标风谱进行模拟,其形式分别如下所示:

$$S(f) = \frac{4 \cdot I^2 L_w / U}{[1 + 70.8 \cdot (f \cdot L_x / U)^2]^{5/6}} \quad (4)$$

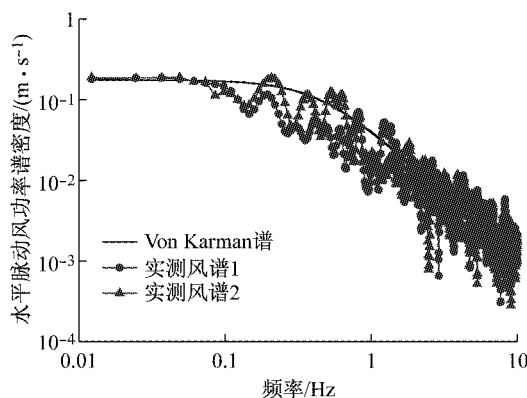
$$S(f) = \frac{\alpha \cdot u_*^2 / U}{\left(1 + \beta \cdot \frac{f}{U}\right)^2} \quad (5)$$

式中: $S(f)$ 为脉动风谱; I 为湍流度; L_w 为水平向湍流积分尺度; u_* 为摩擦速度; α 和 β 为与高度相关的参数。

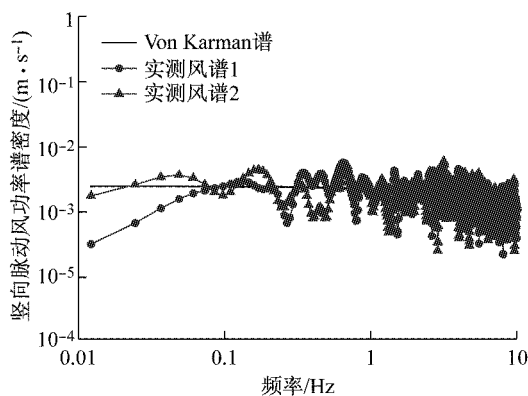
主动风洞模拟目标风场时,通过事先确定的来流特性并根据式(4)和式(5)可以得到目标风谱的幅值谱,相位谱则利用计算机随机生成的一组随机序

列来选取。选定相位谱后对目标风谱进行反傅里叶变换便可得到相应风速时程序列,既而确定相对应的计算机控制信号。由于风洞内气体惯性、电信号延迟、机械装置摩擦等原因,通过目标风谱生成的流场特性需要通过几次实时反馈修正以获得理想目标流场。文献[4]和文献[5]详细介绍了主动风洞流场反馈控制的原理和方法。由于桥梁断面气动力主要取决于断面高度处的来流特性,因此本试验只关注试验段断面高度处的流场特性。

多风扇结合振动格栅装置可较好模拟二维湍流场,试验段断面高度处模拟的水平向脉动风谱以及目标风谱如图 2 所示。



a 水平风谱与目标谱



b 竖向风谱与目标谱

图 2 试验风谱与目标谱

Fig. 2 The measured spectrums and target spectrums

2.2 参考点处风速修正

参考点处流场特性可影响结构风荷载进而影响荷载空间相关性。为了精细化研究来流特性对荷载相关性的影响,必须同步测量参考点处流场特性及相应断面气动力。由于节段模型的存在,无法直接测量参考点处流场特性。在被动风洞中往往测量上游或模型侧面流场特性并假定其与参考点处流场特性一致,这一假定与实际情况有一定偏差。本文基于主动风洞在给定参数下能稳定再现同一流场这一特性提出了一种参考点风速修正方法,可以较好再现参考点处真实流场特性。

对于同一组控制参数,主动风洞总是可以稳定再现相应于该参数的流场特性。基于此性质,将 2 个热线风速仪分别布置在参考点及其上部 45cm 位置处,同步测量足够时间后,对 2 组脉动风速时程进行频域分析,建立幅值、相位之间的变换关系。基于该变换关系可以由上部点的风速频谱信息得到下部点

风速频谱信息,转换到时域便得到下部点脉动风速时程。参考点风速修正过程如图 3 所示。

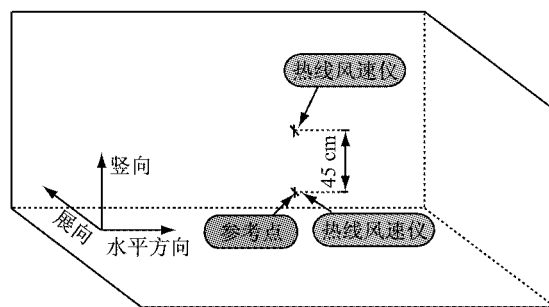


图 3 风速修正过程示意

Fig. 3 Schematic diagram of wind velocity modification

对于每种流场,都需要重复上述过程,进而建立相应于该流场的风速修正关系。利用上述修正方法可以通过上部位置测得的脉动风速较好再现下部参考点处脉动风速,如图 4 所示。

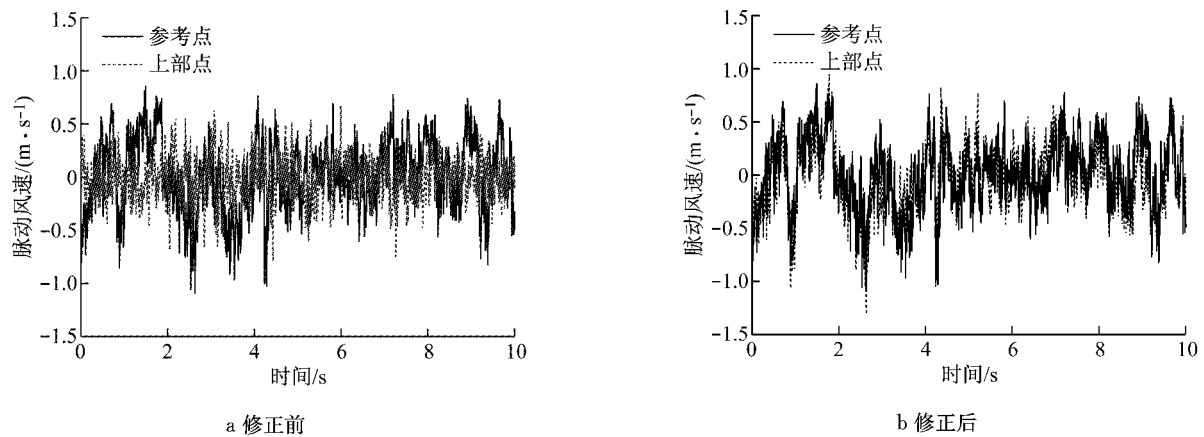


图4 参考点风速修正

Fig.4 Turbulent wind velocity modification on the reference point

2.3 测压点布置和试验工况

试验总共布置了5个不同间距测压断面,其中每个断面布置78个测压点.采样频率为200 Hz,采样时间100 s.测压断面间距和测压点的布置如图5所示.

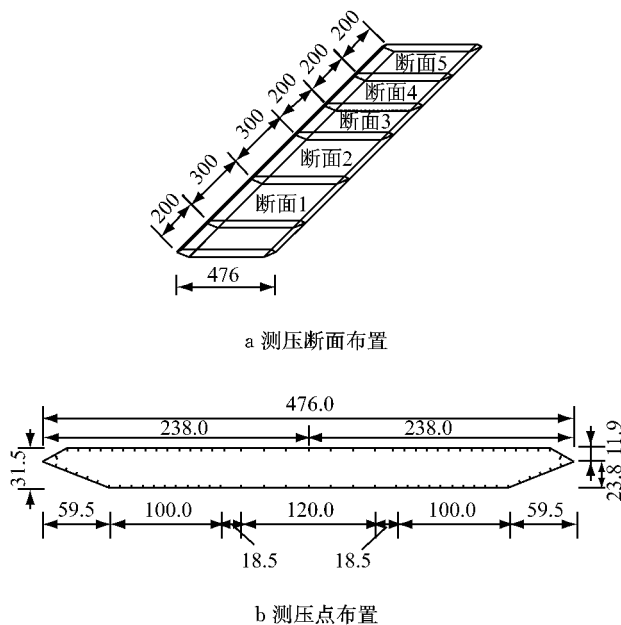


图5 测压断面间距和测压点布置(单位:mm)

Fig.5 Arrangement of pressure-measuring sections and tapping points (units: mm)

试验总共模拟了14种不同来流条件,针对每种试验工况,都利用上述风速修正过程建立了相应的修正关系.试验过程中利用同步测量装置对断面压力和相应参考点上部45 cm处脉动风速进行了同步测量.由于热线风速仪数量的限制,只针对断面1、断面2和断面4进行了同步测量.同步测量过程如图6所示.

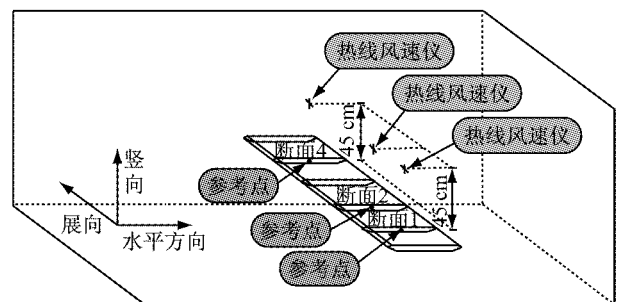


图6 同步测量过程示意

Fig.6 Schematic diagram of simultaneous measurement

3 试验结果分析

选取具有代表性的3组试验工况:工况1、工况2和工况8对荷载展向相关性与来流特性的关系进行说明.相应工况流场特性如表1所示.表中: I_u 和 I_v 分别表示水平和竖向湍流度; L_{wx} 表示竖向湍流积分尺度.

表1 不同试验工况下来流特性

Tab.1 Flow features on different experimental conditions

| 工况 | $U/(m \cdot s^{-1})$ | $I_u/\%$ | $I_v/\%$ | L_{wx}/m | L_{wz}/m |
|----|----------------------|----------|----------|------------|------------|
| 1 | 4.57 | 7.4 | 1.6 | 2.033 | 0.097 |
| 2 | 4.61 | 11.2 | 3.7 | 0.562 | 0.200 |
| 8 | 6.54 | 16.6 | 1.7 | 3.782 | 0.166 |

3.1 展向相关性时域分析

在时域范围内可以通过展向相关系数研究脉动风及气动力展向相关性.图7给出了3种工况下不同展向间距间的脉动风及气动力展向相关系数.其中 u_u, w_w, D_D, L_L, M_M 分别表示水平脉动风、竖向脉动风、气动阻力、气动升力以及气动扭矩间的展向相

关系数。

通过比较水平脉动风和气动阻力相关系数可以发现:气动阻力相关系数与水平来流特性密切相关。在大尺度湍流来流条件下,水平脉动风及气动阻力展向相关系数均接近于 1,如图 7 工况 1 和工况 8 中 u_u , D_D 所示。当水平来流积分尺度较小时,水平脉动风及阻力展向相关系数均较小,如图 7 工况 2 中 u_u , D_D 所示。3 种工况下,阻力相关系数随展向间距及来流特性的变化规律均与水平脉动风保持一致。

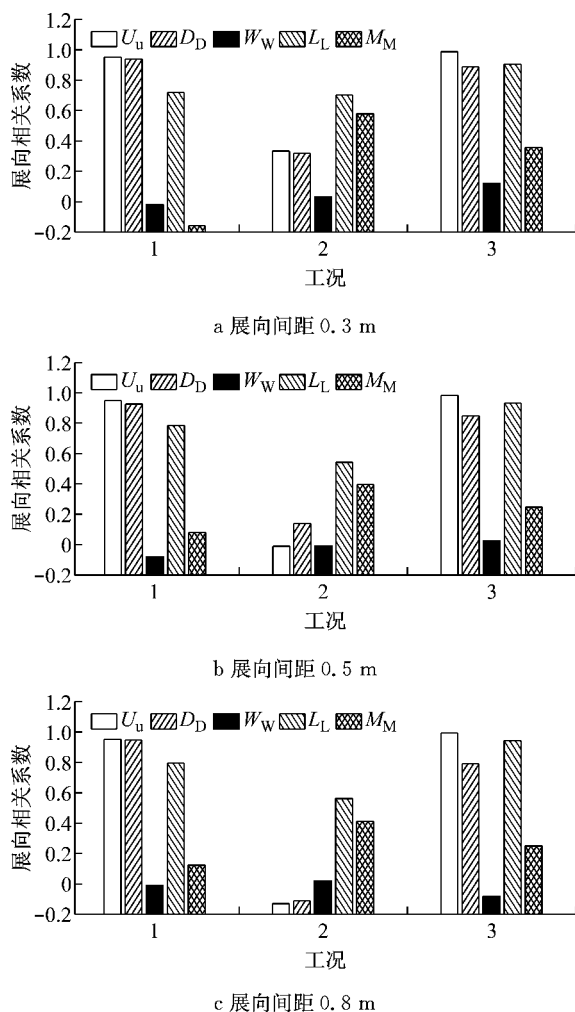


图 7 不同工况下来流湍流及断面气动展向相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients of incident flows and aerodynamic loads on different experimental conditions

气动升力和扭矩展向相关性与竖向来流特性有密切关系。工况 1 和工况 8 的水平来流积分尺度均远大于展向间距的情况下,由于工况 8 竖向湍流积分尺度大于工况 1,所以工况 8 中的 L_L 和 M_M 大于工况 1 中 L_L 和 M_M ;而对于工况 1 和工况 2,虽然工况 2 中水平来流积分尺度远小于工况 1,但是工况 2 中的 M_M 仍大于工况 1 中的 M_M ,且工况 2 中的 L_L

也仅在展向间距较大时略小于工况 1 中的 L_L ;比较工况 2 和工况 8,工况 2 中的 M_M 值均大于工况 8 中的 M_M 值,而工况 2 中的 L_L 值则略小于工况 8 中的 L_L 值。考虑到工况 2 中水平来流积分尺度远小于工况 1 和工况 8,而竖向湍流积分尺度大于工况 1 和工况 8,可以认为竖向来流特性对升力与扭矩展向相关性的影响大于水平来流特性的影响。此外,升力及扭矩展向相关系数均大于竖向来流展向相关系数,扭矩展向相关系数介于竖向来流与气动升力之间,这与其他学者基于被动风洞的试验结果一致^[8-10]。

3.2 展向相关性频域分析

试验还研究了上述 3 种来流条件下脉动风及气动力空间相干函数。图 8a 和图 8b 分别给出工况 1 和工况 2 条件下展向间距 $\Delta y = 0.8$ m 时水平和竖向来流空间相干函数。

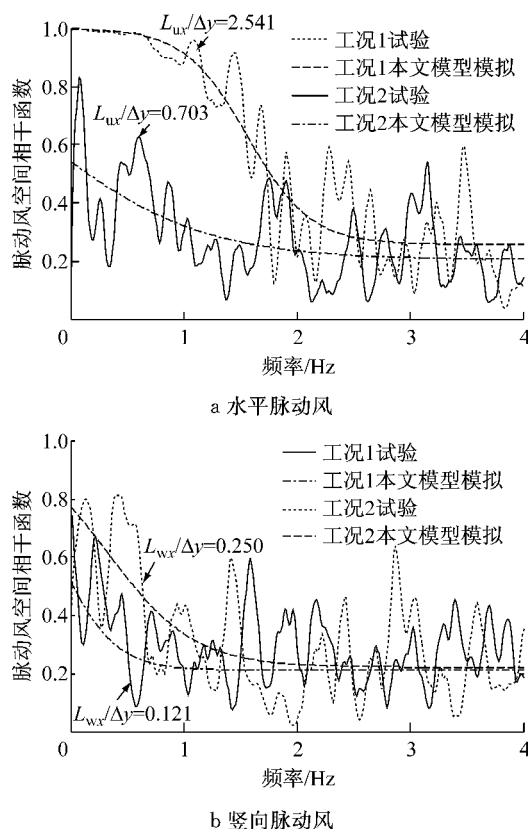


图 8 不同来流特性下水平及竖向来流空间相干函数

Fig. 8 Horizontal and vertical spatial coherences under different flow conditions

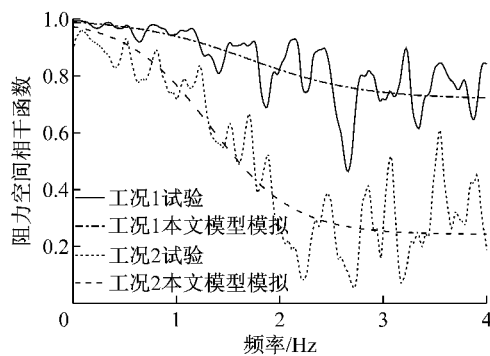
从图中可以看到:脉动风空间相干性与湍流积分尺度有关。当湍流积分尺度较大时,脉动风在低频部分表现出很强的展向相干性。空间相干函数随频率衰减的形式也不满足传统 e 指数形式,而是表现出反向 e 指数衰减的特性,如图 8a 中工况 1 所示。当湍流积分尺度较小时,空间相干函数的形式则服从

传统 e 指数形式,如图 8a 中工况 2 及图 8b 所示. 水平和竖向来流空间相干性都随着湍流积分尺度的增加而增大.

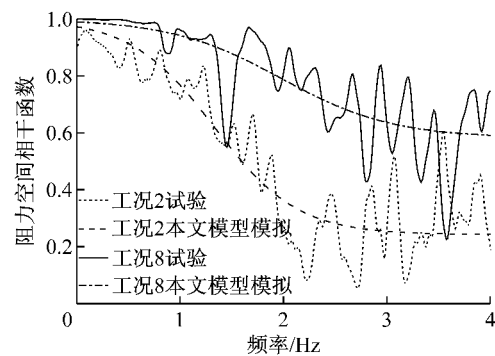
至于荷载空间相干函数,以展向间距 $\Delta y=0.8$ m 时 3 种工况下的气动力相干函数为例探讨来流特性对气动力相干函数的影响. 研究发现:阻力相干性与水平来流积分尺度有关,水平来流积分尺度越大,阻力相干性越好. 阻力相干函数形式同水平脉动风相干函数形式基本一致,且其数值大于水平脉动风,说明阻力空间相干性大于水平脉动风. 图 9a 和图 9b 比较了 3 种工况下展向间距 $\Delta y=0.8$ m 时的阻力相

干函数. 工况 1 和工况 8 中阻力相干函数在低频部分都表现出反向 e 指数衰减特性,而工况 2 中阻力相干函数则符合传统 e 指数形式.

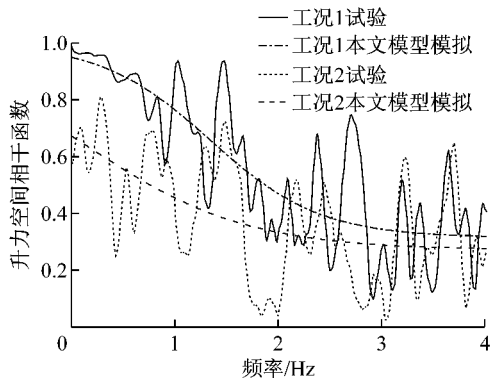
比较升力和扭矩空间相干函数可以发现:工况 2 中扭矩空间相干函数大于工况 1 和工况 8 中扭矩相干函数,扭矩空间相干函数的形式和竖向来流空间相干函数形式较为一致. 考虑到工况 2 竖向湍流积分尺度大于工况 1 和工况 8 而其水平向湍流积分尺度远小于工况 1 和 8,可以认为:扭矩空间相干函数受竖向湍流特性影响较大,其空间相干性随竖向湍流积分尺度的增加而增大,如图 9e 和图 9f 所示.



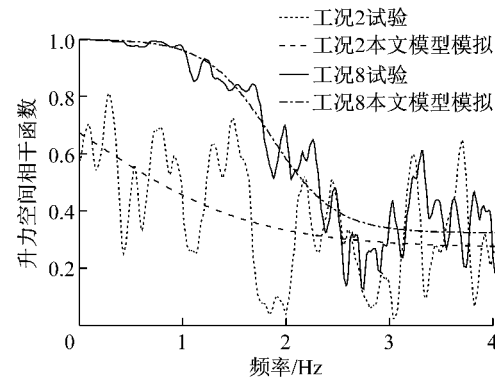
a 工况 1 和工况 2 阻力空间相干函数



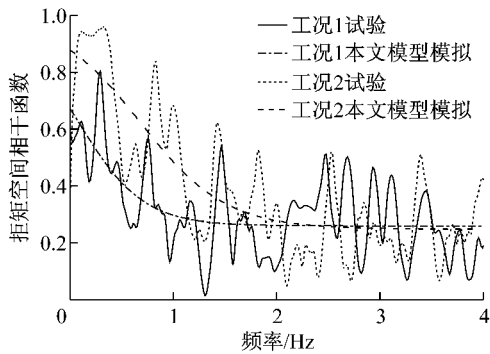
b 工况 2 和工况 8 阻力空间相干函数



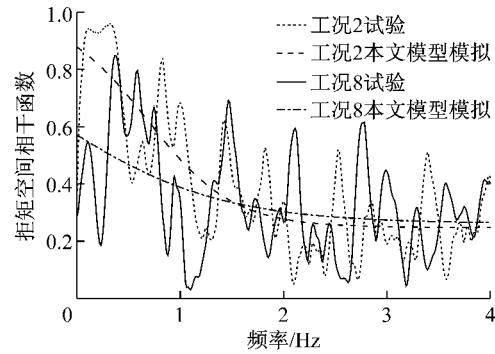
c 工况 1 和工况 2 升力空间相干函数



d 工况 2 和工况 8 升力空间相干函数



e 工况 1 和工况 2 扭矩空间相干函数



f 工况 2 和工况 8 扭矩空间相干函数

图 9 不同工况下断面气动力空间相干函数

Fig.9 Spatial coherences of aerodynamic loads under different experimental conditions

气动升力空间相干函数的形式介于水平来流空间相干函数和竖向来流空间相干函数之间. 升力空间相干性大于竖向来流和气动扭矩空间相干性. 当水平来流积分尺度很大时, 气动升力空间相干函数的形式和水平向来流空间相干函数形式接近, 水平来流积分尺度越大, 升力空间相干函数的形式越接近水平向脉动风. 如图 9c 中工况 1 和图 9d 中工况 8 所示. 可以认为: 升力空间相干性主要受竖向来流特性影响, 但是当水平来流积分尺度很大时, 水平来流特性对升力相干函数的影响不可忽略.

此外, 研究还发现: 在积分尺度接近的情况下, 湍流度的增加会导致荷载空间相干性降低, 湍流度对荷载相干性的影响小于积分尺度.

4 空间相干函数

传统理论假定气动力空间相干性与水平来流空间相干性一致, 并假定其随着空间距离和频率的增加呈 e 指数形式衰减. 然而上述研究表明: 某些来流条件下脉动风及气动力空间相干性随距离和频率的衰减不一定满足传统 e 指数形式. 因此, 本文提出了一种新型相干函数模型来考虑来流特性对荷载空间相干性的影响. 该模型可以模拟大尺度来流下相干函数在低频部分表现出的反向 e 指数形式以及较小尺度来流下的传统 e 指数形式. 如下所示:

$$C_{oh,1/2}(f, \Delta x) = c_1 + \frac{1 - c_1}{1 + \exp\left(c_2 \cdot \left(\frac{f \cdot B}{U}\right) - c_3 \cdot \left(\frac{L}{\Delta x}\right)^{c_4} - c_5 \cdot I\right)} \quad (6)$$

式中: B 为断面特征长度; $c_1 \sim c_5$ 为常参数; L 为水平或竖向积分湍流度.

上述研究表明: 3 个方向的气动力空间相干性受水平和竖向来流特性的影响互不相同, 同一来流条件下, 气动三分力空间相干性之间也彼此不同. 换言之, 气动力空间相干性取决于二维来流特性, 但是对不同方向气动力空间相干性, 水平和竖向来流特性的影响程度不同. 为充分反映二维来流特性对气动力空间相干性的影响, 需要考虑水平和竖向来流对不同方向气动力空间相干性的影响权重. 准定常理论中, 水平和竖向脉动对气动力的贡献通过静力三分力系数及其导数体现. 静力三分力系数及其导数的相对大小在阻力、升力以及扭转 3 个方向上并不相同, 这可以看作水平和竖向脉动在 3 个方向上对气动力的贡献权重不同. 因此, 可以采用静力三分力

系数及其导数来体现水平和竖向来流特性对气动三分力相干性的影响权重. 该影响通过下述定义的等效积分尺度和等效湍流度体现. 等效积分尺度 $L_{equal,x}$ 和等效湍流度 I_{equal} 定义如下:

对于气动阻力

$$\begin{cases} L_{equal,x} = \frac{c_d \cdot L_{ur} + c'_d \cdot L_{wx}}{c_d} \\ I_{equal} = \frac{c_d \cdot I_u + c'_d \cdot I_w}{c_d} \end{cases} \quad (7)$$

对于气动升力

$$\begin{cases} L_{equal,x} = \frac{|c_L| \cdot L_u + c'_L \cdot L_w}{c'_L} \\ I_{equal} = \frac{|c_L| \cdot I_u + c'_L \cdot I_w}{c'_L} \end{cases} \quad (8)$$

对于气动扭矩

$$\begin{cases} L_{equal,x} = \frac{c_m \cdot L_u + c'_m \cdot L_w}{c'_m} \\ I_{equal} = \frac{c_m \cdot I_u + c'_m \cdot I_w}{c'_m} \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_d, c_L, c_m 分别为阻力、升力、扭矩三分力系数; c'_d, c'_L, c'_m 分别为相应三分力系数的导数.

对于来流空间相干函数, 式(6)中的 L 和 I 采用来流本身的积分尺度和湍流度. 对于气动力空间相干函数, 式(6)中的 L 和 I 则通过式(7)、式(8)或式(9)计算得到. 采用上述等效积分尺度和湍流度可以充分反映同一来流条件下气动三分力相干函数之间的差异, 并且可以充分考虑水平和竖向来流特性对不同方向气动力相干性的影响.

图 5 所示的闭口箱梁断面静力三分力系数及其导数值如表 2 所示.

表 2 静力三分力系数及其导数

| Tab. 2 Static coefficients and their derivatives | | | | | |
|--|--------|---------|--------|-------|--------|
| c_d | c'_d | $ c_L $ | c'_L | c_m | c'_m |
| 0.039 | 0.002 | 0.012 | 0.098 | 0.004 | 0.030 |

利用表 2 中静力三分力系数及其导数可以得到相应于 3 个方向风荷载的等效积分尺度和等效湍流度, 结合试验数据并通过最小二乘拟合方法可以得到 $c_1 \sim c_5$ 的拟合值, 如表 3 所示.

表 3 相干函数中参数数值

Tab. 3 Values of fitting coefficients in spatial coherence function

| c_1 | c_2 | c_3 | c_4 | c_5 |
|-------|-------------|-------|-------|-------|
| 0.23 | 15.00~25.00 | 0.85 | 0.85 | 3.00 |

注: 对于脉动风速 c_2 取 20.00~25.00; 对于风荷载 c_2 取 15.00~20.00.

该新型相干函数模型可以反映同一来流条件下

脉动风及气动三分力空间相干函数之间的差异,并且可以模拟大尺度来流下空间相干函数在低频部分表现出的反向 e 指数形式以及小积分尺度来流下空间相干函数表现出的传统 e 指数衰减形式.该模型对不同来流条件下脉动风及气动力空间相干函数的模拟效果如图8和图9中本文模型模拟结果所示.需要指出,该模型对于试验模拟的二维脉动风及相应闭口箱梁断面气动力空间相干函数有较好的适用性,对于其他复杂来流或其他断面形式的适用性需要进一步试验研究和验证.

5 结论

基于日本宫崎大学主动控制风洞,结合多风扇和主动控制振动格栅装置,同步模拟了14种二维湍流场.利用主动风洞在给定条件下能稳定再现同一流场这一特性,同步精确测量了参考点处来流特性及相应断面风荷载.从时域和频域2个方面尝试研究来流条件对荷载空间相关性的影响,得到如下主要结论:

(1) 风荷载空间相关性与来流特性有关.积分尺度越大,荷载展向相关性越好,湍流度越大,荷载展向相关性越差,湍流度对荷载展向相关性的影响比积分尺度小.

(2) 在大积分尺度来流条件下,空间相干函数不符合传统 e 指数形式而是在低频部分表现为反向 e 指数形式.在小积分尺度来流条件下,空间相干函数符合传统 e 指数形式.

(3) 水平和竖向来流特性对气动三分力展向相关性的影响不同.阻力相关性主要受水平向来流影响,扭矩相关性主要受竖向来流影响.升力相关性也主要受竖向来流影响,但当水平向来流积分尺度较大时,水平来流的影响不能忽略.此外,升力和扭矩相关性均大于竖向来流相关性,这一规律不随来流条件而改变.

(4) 为了考虑不同方向来流特性对气动力空间相干性的影响,提出了一种新型相干函数模型.该模型可以较好反映来流特性对脉动风和风荷载相干函数的影响以及脉动风与风荷载相干函数间的差异.

然而,该新型模型仅适用于较低频率范围和较小空间距离情况.对于高频部分,该模型对荷载空间相干性的模拟偏保守.具体应用时,可以考虑低频部分采用本文相干模型,高频部分采用传统 e 指数模型.

本文仅进行了尝试性研究,存在一定的不足,将来需对不同断面形式和更复杂来流条件做进一步研究.

参考文献:

- [1] 张冠华,赵林,葛耀君.流线型闭口箱梁断面风荷载空间相关性试验研究[J].振动与冲击,2012,31(2):76.
ZHANG Guanhua, ZHAO Lin, GE Yaojun. Spatial correlation of wind loads for cross-section of a streamlined closed box girder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 76.
- [2] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Royal Meteorological Society, 1961, 87:194.
- [3] 葛耀君.大跨度悬索桥抗风[M].北京:北京人民交通出版社,2011.
GE Yaojun. Wind resistance of long span suspension bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [4] Nishi A, Kikugawa H, Matsuda Y, et al. Turbulence control in multiple-fan wind tunnels [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 861.
- [5] Cao S Y, Nishib A, Kikugawac H, et al. Reproduction of wind velocity history in a multiple-fan wind tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1719.
- [6] Kimura K, Fujino Y. Turbulence scale effects on buffeting forces of a flat hexagonal section[C]//Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering. Hong Kong: [s. n.], 1993: 637-642.
- [7] Zhao L, Cao S Y, Ge Y J, et al. Investigation of aerodynamic loading effects on typical streamline cross-section under active turbulence-generated conditions [C/CD] // The 13th International Conference on Wind Engineering. Amsterdam: [s. n.], 2011.
- [8] Larose G L, Mann J. Gust loading on streamlined bridge decks [J]. Journal of Fluids and Structures, 1998, 12(5): 511.
- [9] Larose G L, Tanaka H, Gimsing N J, et al. Direct measurements of buffeting wind forces on bridge decks [J]. Denmark Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/76: 809.
- [10] 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: 1431.