

文章编号:1674-2974(2016)07-0016-09

# 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究<sup>\*</sup>

沈 炼<sup>1</sup>, 韩 艳<sup>1†</sup>, 蔡春声<sup>1,2</sup>, 董国朝<sup>1</sup>, 李春光<sup>1</sup>

- (1. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114;
2. 美国路易斯安那州立大学 土木与环境工程系, 路易斯安那 巴吞鲁日 70803)

**摘 要:**为准确模拟山区峡谷桥址处的三维紊流风场,以澧水大桥所在峡谷为工程背景,将现场实测风场用谐波合成法进行等效处理生成了满足峡谷风场特性的随机来流,然后基于对 Fluent 的二次开发,将生成的随机来流赋予大涡模拟的入口边界.通过对比本文方法和无脉动入口计算结果发现,本文方法更能体现山区峡谷风场的真实流态,最后在本文方法基础上对不同风向角作用下的山区峡谷桥址处风场进行了数值模拟,得到了峡谷桥址处风场的详细分布特性,可为山区峡谷地形紊流场精细化数值模拟提供参考.

**关键词:**山区峡谷;谐波合成;现场实测;脉动风速;大涡模拟

**中图分类号:**TU311.3

**文献标识码:**A

## Experiment and Numerical Simulation for Wind Field of a Long-span Suspension Bridge Located in Mountainous Canyon

SHEN Lian<sup>1</sup>, HAN Yan<sup>1†</sup>, CAI Chun-sheng<sup>1,2</sup>, DONG Guo-chao<sup>1</sup>, LI Chun-guang<sup>1</sup>,

- (1. Key Laboratory of Safety Control for Bridge Engineering of the Ministry of Education and Hunan Province, Changsha Univ of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
2. Dept of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State Univ, Baton Rouge, LA 70803, USA)

**Abstract:** It is known that a reasonable three-dimensional fluctuating inlet boundary condition plays an important role in the accurate numerical simulation of wind field in the mountainous area. Taking Li Shui Bridge as the engineering background in this paper, the fluctuating wind field satisfying the characteristics of the wind field in the mountainous area was generated based on field measuring data processed by the weighted amplitude wave superposition (WAWS) method. The fluctuating velocity data was used for the inlet boundary of Large Eddy Simulation (LES) by the secondary development of the commercial software FLUENT. The comparison of the computational results from the proposed method and the method without considering fluctuating inlet boundary shows that the method developed in this paper can better reflect the actual flow field in the mountainous area. Finally, the wind field of the bridge in the mountainous area under different wind directions was simulated. It is found that the proposed method provides a reference for the refined simulation of the fluctuation wind field in mountainous area.

**Key words:** mountainous canyon; weighted amplitude wave superposition (WAWS); field measure-

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-04-22

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51408061, 51278069, 51208067, 51178066), National Natural Science Foundation of China (51408061, 51278069, 51208067, 51178066);国家重点基础研究计划(973计划)项目(2015CB057706, 2015CB057705);长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(14KC07)

**作者简介:**沈 炼(1988-),男,湖南岳阳人,长沙理工大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: ce\_hanyan@163.com

ment; fluctuating wind field; large eddy simulation (LES)

随着国民经济的高速发展,越来越多的大跨度桥梁建成并投入使用.在复杂的峡谷地区,由于地形起伏大、地貌多样,风环境极为复杂,平原、海洋地区通常使用的各向同性地貌条件对山区峡谷地区风场的描述不再适用.桥址处风场受周边山体影响,有显著的非定常效应,风场脉动剧烈,紊流风引起的风致振动问题相比于跨江、跨海桥梁更突出,而目前人们对这些地区的脉动风场分布研究还相对较少,现有研究数据还不足以形成规范性的条文.因此,加强对山区峡谷桥址处的风特性认识已成为了广大研究者关注的焦点问题之一.目前,对山区峡谷风场的研究手段主要有现场实测、风洞实验和数值模拟.现场实测是对峡谷风场研究最为直接和有效的方法,许多学者<sup>[1-3]</sup>对其展开了工作,本文以澧水大桥所在峡谷为研究背景,用现场实测的方法对桥址所在峡谷进行了风速监测,然后运用谐波合成法将现场实测风场进行等效处理后赋给数值模拟的入口边界.现场实测数据虽然可为数值模拟和风洞实验提供宝贵的参考,但是其不足的是实验条件难以控制、投资较大、管理维护困难、监测周期长.与现场实测相类似,风洞实验也是山区峡谷风场研究的重要手段,风洞实验虽然具有多工况、可重复等优点<sup>[4]</sup>,但由于物理风洞本身尺寸的限制,对于大区域山体地形,即使将风洞试验模型比例缩小到最小尺度,在模型边界上仍然会出现人为的峭壁,同时,也无法保证来流入口边界条件(如风剖面、湍流度)与实际情况一致,从而导致结果失真,特别是在大比例模型试验中变换风向角时的计算准确性尤其值得商榷.

相比现场监测和风洞实验,计算流体动力学(CFD)方法发展很快,已被越来越多的研究者所应用.由于数值模拟不受时间和空间限制,具有可重复、消耗人力物力资源少等优点,许多学者<sup>[5-8]</sup>对其展开了研究.对于复杂山区峡谷风场,CFD虽然具备模拟大区域地形的优势,但依然存在一系列问题,如入口边界的合理给定问题,针对该问题的研究,Maurizi等<sup>[9]</sup>用1/10的斜坡作为气流过渡段来处理入口边界峭壁问题,但其斜坡形式较为简单,适用性有待验证;胡朋等<sup>[10]</sup>采用曲线过渡段的办法对峡谷入口进行处理,不足的是这种办法会引起人为的来流风攻角.相比平原或洋面风场,山区地形风场的数值模拟涉及分离流、高雷诺数湍流和强三维流动等复杂的空气流动,其核心是湍流问题.上述学者用雷诺平均湍流模型对其进行研究,其时均化过程

中丢失了大量的脉动信息.目前普遍认为比较有潜力的大涡模拟(LES)在计算风工程中体现出优越性<sup>[11]</sup>,但LES的合理脉动入口给定还有待进一步研究<sup>[12]</sup>,Uchida和Ohya<sup>[13]</sup>采用大涡模拟的方法对9.5 km×5 km区域范围内空气流动进行数值模拟,使用粗糙元制造脉动风,但其粗糙元的摆放产生的脉动风场可调性差,与实际的边界条件仍存在一些出入,而正确的入口脉动信息给定是计算结果正确性的重要保证,因此,山区峡谷风场特性数值模拟时入口边界条件中脉动的合理施加是当前数值模拟方法迫切需要解决的关键问题.

本文以澧水大桥所在峡谷为研究背景,建立了山区峡谷风场实时监测系统,对桥址上游及桥址附近风场进行了真实有效的记录,基于谐波合成法将监测的实际风场进行等效,通过对商业软件Fluent进行二次开发,较好地处理了山区峡谷风场数值模拟过程中脉动入口给定问题.同时用本文所提方法和无脉动入口计算结果进行对比后发现,本文所用方法更能体现山区峡谷风场的真实流态.最后在脉动入口边界条件基础上对不同风向角作用下的山区峡谷桥址处风场进行了数值模拟.

## 1 现场实测

### 1.1 工程背景

本文以张花高速澧水大桥所在峡谷为研究背景<sup>[14]</sup>.桥梁主跨为856 m,属典型的山区峡谷大跨径桥梁,桥位所处峡谷谷顶宽420 m,谷顶与谷底高差280 m,桥位布置如图1所示.



图1 桥位布置图

Fig. 1 Overall configuration of the bridge

### 1.2 风速监测系统

澧水大桥风速监测系统由观测站、桥塔站和桥跨站组成.观测站根据盛行风方向设立在桥址西南侧,位

于本文数值模拟入口附近,监测站风速仪布置在平坦地区,可认为其风场特性与数值模拟入口接近,其特性可为数值模拟的入口边界条件取值提供参考,风速监测仪布置高度离地面 10 m,如图 2 所示.



图 2 观测站风速仪

Fig. 2 Anemometer of the observation station

桥跨站由 3 个 Young 81000 三维超声风速仪组成,布置位置为盛行风方向同侧.桥塔站也沿高度布置了 3 个 Young 81000 三维超声风速仪,具体位置如图 1 所示(其中星形标识为风速仪安装位置),风速仪采样频率为 4 Hz.为了实现风速时程的实时观测,课题组利用 GPRS 无线传输系统,将现场风速实时数据远程传输至长沙理工大学风速采集中心.

1.3 峡谷处风场实测数据分析

为得到峡谷风场特性,通过对 2014 年 8 月的风速时程进行分析,得到了观测站和桥跨站的风玫瑰图,如图 3 所示.

从图中可以发现 8 月主导风向为西南风,风向与观测站风速仪布置方位一致.同时,对桥塔不同高度风速时程进行监测,得到了强风作用下风剖面  $\alpha$  值出现次数分布情况,如图 4 所示.从图中可以发现  $\alpha$  值呈正态分布,均值为 0.301 1,综合考虑澧水大桥桥位地形条件,本文  $\alpha$  值取 0.3.

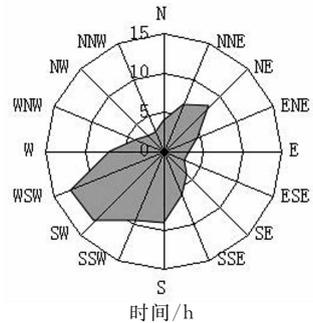
为使数值模拟来流风向角与现场实测保持一致,本文风速时程取自 2014 年 8 月 29 日观测站实测结果,通过对该天的风速取日平均,得到了该天的日平均风速为 4.43 m/s,日平均风向角约为  $180^\circ$ ,风速和风向角时程如图 5 所示,湍流强度用公式  $I_i = \frac{\sigma_i}{U} (i = x, y, z)$  进行求解,通过分析风速时程可得模拟当天的日平均湍流强度为 20.6 %.

对监测站风速进行风谱分析,时间步长采用 0.25 s,用 Kaimal 谱形式进行拟合,结果如图 6 所示.

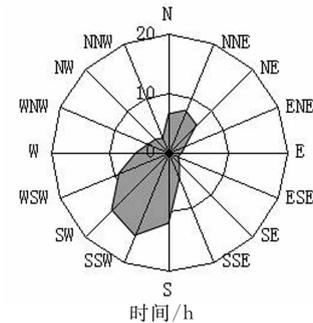
其功率谱拟合公式可表示为:

$$\frac{nS_u(n)}{(u^*)^2} = \frac{124f}{(1 + 28.5f)^{5/3}} \quad (1)$$

式中:  $S_u(n)$  为顺风向功率谱密度函数;  $n$  为风的脉动频率,  $f = nZ/U(Z)$ ;  $u^*$  为气流摩擦系数.



(a) 观测站风玫瑰图



(b) 桥跨站风玫瑰图

图 3 峡谷地区 8 月份风玫瑰图

Fig. 3 Wind rose diagram of the gorge area in August

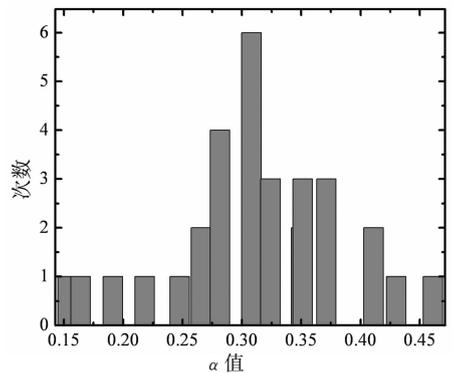
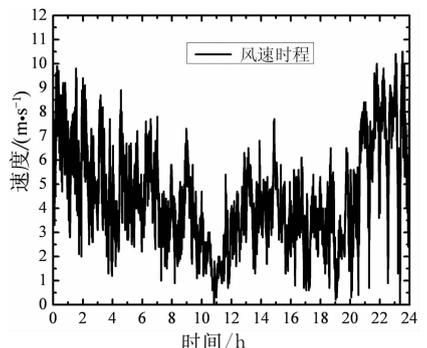
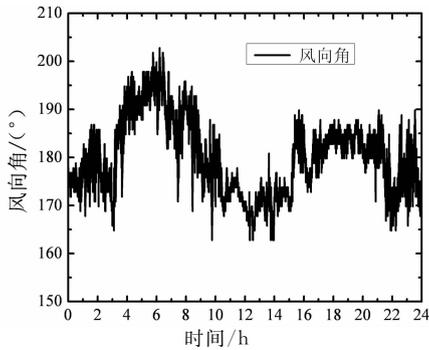


图 4 风剖面实测  $\alpha$  值次数分布图

Fig. 4 Frequency distribution of  $\alpha$  for field measured wind profiles



(a) 风速时程



(b) 风向角时程

图 5 风速与风向角时程

Fig. 5 Time history of wind speed and wind direction angle

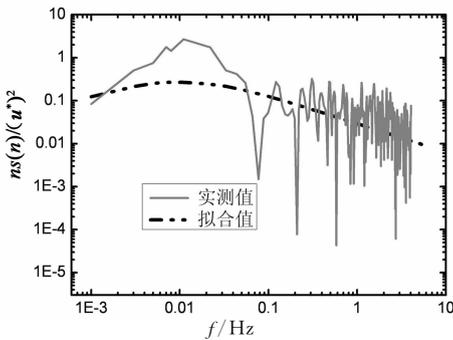


图 6 现场实测拟合功率谱

Fig. 6 Power spectrum fit by field measurement data

## 2 数值模型与计算参数

### 2.1 模拟区域与网格划分

几何模型建立过程中,首先通过空间地理数据云获得大范围的地形高程数据,然后用 Global Mapper 做进一步处理,从而得到目标区域的地形模型.山体模型采用实际尺寸,计算区域大小取  $10 \text{ km} \times 9 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ ,如图 7 所示.

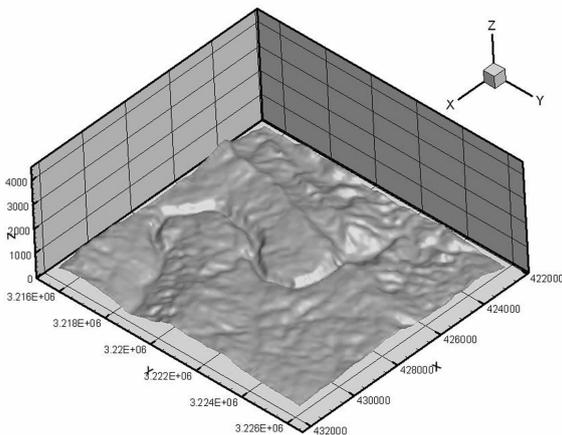


图 7 计算域示意图

Fig. 7 The computational domain

为保证计算精度,数值模型采用全六面体网格,网格在近地面进行加密,最底层网格高度为  $1 \text{ m}$ ,高度方向在近地面处网格延伸率为  $1.05$ ,远离地面网格延伸率为  $1.15$ ,总网格数为  $6\,752\,495$ ,计算网格通过了无关性测试,如图 8 所示.

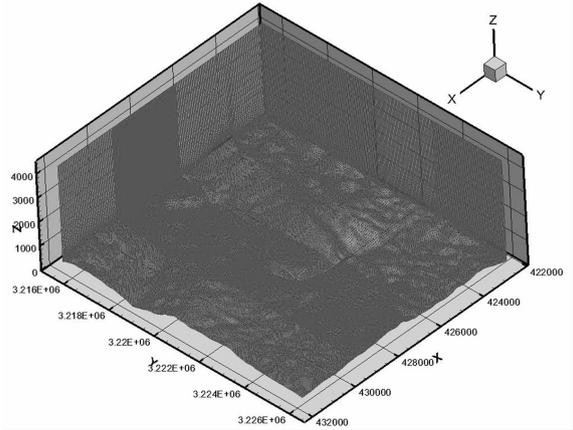


图 8 计算网格图

Fig. 8 The computational grid

### 2.2 边界条件与计算参数设置

本文数值模型入口处最低高程为  $164 \text{ m}$ ,桥跨站风速仪安装高度为  $505 \text{ m}$ ,桥塔站风速仪安装高度为  $620 \text{ m}$ ,为使峡谷风场入口速度尽量接近现场实测值,本文入口边界条件包含了平均风和脉动风两部分,平均风速采用分段函数形式给定,其中,近地面处采用指数率形式.为使风速在峡谷内的变化趋势接近实际情况,本文指数率变化段高度取  $836 \text{ m}$ .平均风剖面的具体表达形式为:当  $Z \leq 164 \text{ m}$  时,速度为  $0 \text{ m/s}$ ;当  $164 \text{ m} < Z < 1\,000 \text{ m}$  时,速度遵循指数率规律,其中  $\alpha$  取  $0.3$ ;当  $Z \geq 1\,000 \text{ m}$  时,速度为  $7.5 \text{ m/s}$ .具体可表示为:

$$\begin{aligned}
 &V = 0 \text{ m/s}, Z \leq 164 \text{ m}; \\
 &V = 7.5 \times \left( \frac{Z - 164}{1\,000 - 164} \right)^{0.3}, \\
 &164 \text{ m} < Z < 1\,000 \text{ m}; \\
 &V = 7.5 \text{ m/s}, Z \geq 1\,000 \text{ m}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

本文脉动风速是基于谐波合成法合成的,合成过程中功率谱根据观测站风速时程等效而来,因此,本文所用入口边界能够满足观测站的风场特性.通过编制 UDF 程序对商业软件 Fluent 进行二次开发<sup>[15]</sup>,将合成的随机风速时程赋给数值模型入口所对应的网格坐标,其中顺风向功率谱采用公式(1)所述形式,竖向功率谱采用 Lumley and Panofsky 谱,可表示为:

$$\frac{nS_w(n)}{(u^*)^2} = \frac{6f}{(1 + 4f)^2}, \tag{3}$$

$$u^* = \frac{KV(Z)}{\ln \frac{Z - z_d}{z_0}} \quad (4)$$

式中： $S_w(n)$  为脉动风竖向功率谱密度函数； $Z$  为地面高度； $K$  为无量纲常数，本文取  $K=0.4$ ； $z_0$  为地表粗糙高度，本文取  $z_0 = 1 \text{ m}$ ； $z_d = \bar{H} - z_0/k$ ， $\bar{H}$  为周围建筑物平均高度。

本文在数值模拟过程中，除入口边界条件采用用户自定义外，地表采用无滑移边界条件，顶面采用自由滑移边界条件，侧面采用对称边界，出口采用压力出口边界。求解方面，本文的 N-S 方程采用 PISO 方法进行求解，对流项和扩散项均采用二阶中心差分格式，用超松弛方法 (SOR) 求解压力 Poisson 方程，压力和动量松弛因子分别取 0.3 和 0.7，在满足柯朗数 (CFL) 的前提下，时间步长取 0.1 s。

### 2.3 监测点布置

数值模拟过程中，在主梁水平方向布置了 9 个风速监测点，竖向方向在 1/2 跨，3/5 跨，7/10 跨处分别布置了 20 个监测点，监测点具体位置如图 9 所示。

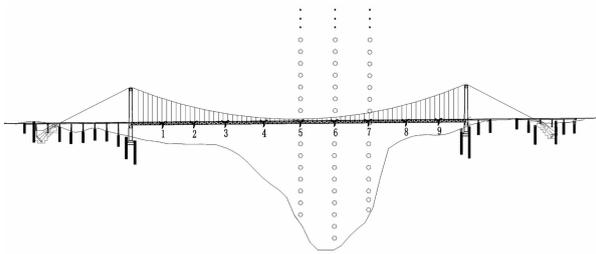
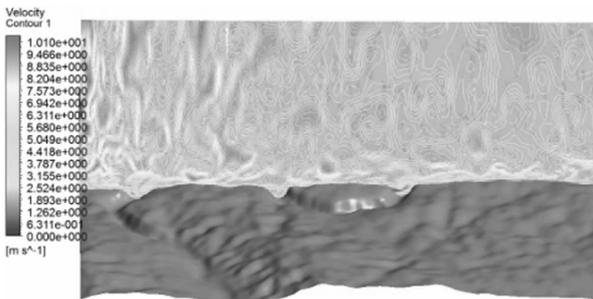


图 9 数值模拟过程中桥位处风速监测点布置图

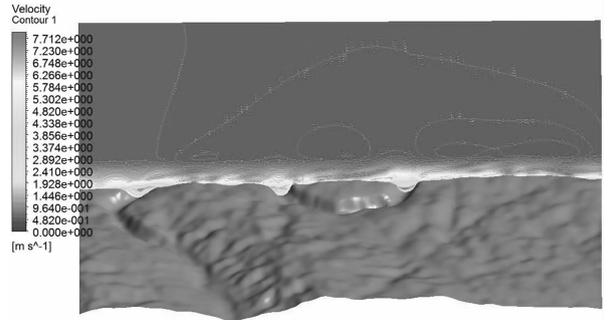
Fig. 9 Schematic diagram of monitoring point arrangement at the bridge span

## 3 结果验证

数值模拟考虑了 2 种工况，工况 1 为利用本文所提方法作为入口边界，工况 2 为不考虑脉动信息入口边界，2 种工况除入口边界条件不同外，其余边界条件与计算参数均保持一致。整个过程采用超线程 48 核工作站进行计算，2 种工况的速度云图如图 10 所示。



(a) 脉动入口边界作用下的速度云图



(b) 无脉动入口作用下的速度云图  
图 10 速度云图

Fig. 10 Velocity contour

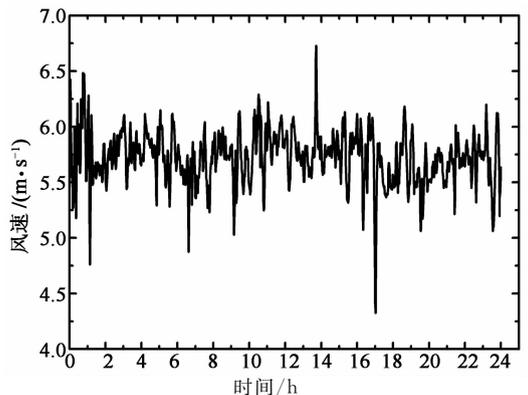
从图中可发现，考虑脉动入口的风场计算结果相比无脉动入口情况体现出了明显的脉动效应。对整体风速而言，两者在高度方向均能体现梯度效应，但对于局部风速，考虑脉动作用下的风场由于有漩涡的影响，最大值要大于不考虑脉动情况，出现的最大风速为 10.1 m/s，而不考虑脉动入口的最大风速为 7.7 m/s。

### 3.1 速度时程

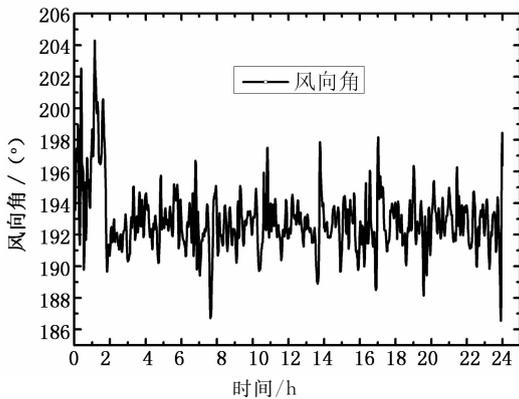
对数值模型中桥跨站风速仪和桥塔站风速仪安装的相同位置进行风速监测，用模拟结果与实测结果的平均值进行对比，其结果存在一些偏差，主要是由于入口边界条件无法跟实际保持完全一致和复杂地形中树木等障碍物改变了风场的局部特性。

### 3.2 湍流度

图 11 给出了工况 1 作用下桥址跨中的风速和风向角时程，根据上文中湍流强度剖面的定义计算出来，图 12 给出了工况 1 作用下桥塔站和桥跨站所在位置的湍流度剖面。从图中可发现近地面脉动情况要远大于远离地面处，当高度大于 1 000 m 后，湍流度值基本趋于稳定，主要原因是当高度大于 1 000 m 时风场没有受到山体地形影响。为了更好地说明本文所提方法的优越性，将 2 种工况作用下桥跨站和桥塔站的湍流度与实测值进行对比，见表 1。



(a) 工况 1 作用下主梁跨中风速时程



(b) 工况 1 作用下主梁跨中风向角时程

图 11 工况 1 作用下主梁跨中风速和风向角时程  
Fig. 11 Time history of wind speed and wind direction angle of mid-span of the main girder under case 1

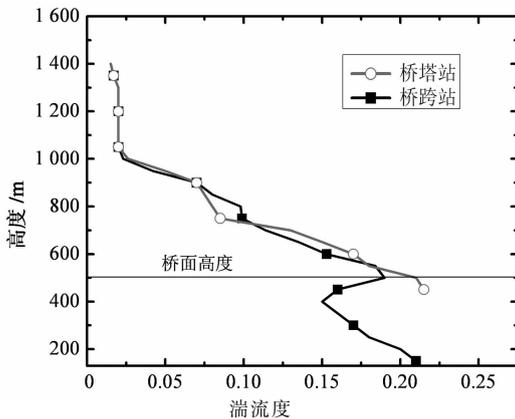


图 12 湍流度剖面

Fig. 12 Turbulent intensity profile

表 1 不同工况下湍流度值

Tab. 1 Turbulence under the different cases %

工况	桥跨站	桥塔站
不考虑脉动入口	11	10
考虑脉动入口	19	17
现场实测	23	21

从表中可发现考虑脉动入口作用下的湍流度要明显高于不考虑脉动情况,说明不考虑脉动风作用下桥址处风速波动较小,没有体现出良好的三维紊流特性.相比现场实测数据,考虑脉动信息作用下的模拟结果其吻合程度要明显优于不考虑脉动情况.但即使考虑了脉动入口边界,桥塔站和桥跨站湍流度相比现场实测结果还是偏小,主要原因有两点,一是现场实测风速属于阵风,离散大,而数值模拟的风场相对实测值更为连续;二是大涡模拟过程中由于亚格子模型和网格尺寸的影响,湍流度会出现耗散现象,因此导致湍流度值偏小.

### 3.3 功率谱及相关性

对不同入口来流作用下桥跨站和桥塔站的风谱

模拟值和实测值进行对比,结果如图 13 至图 16 所示.其中图 13 和图 14 分别为桥跨站顺风向和竖向的功率谱对比图,图 15 和图 16 分别为桥塔站顺风向和竖向的功率谱对比图.从图中可明显观察到考虑脉动入口边界条件模拟的功率谱能量值要明显大于不考虑脉动情况,且与实测谱吻合更好,特别是在

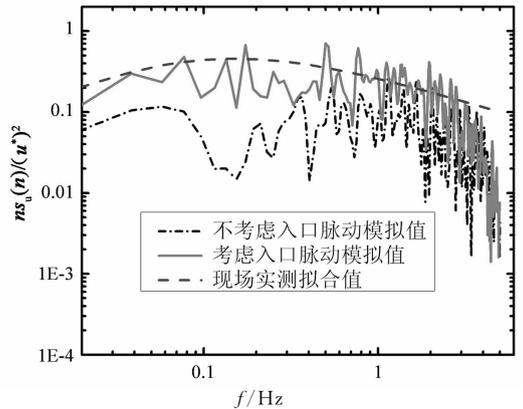


图 13 桥跨站顺风向功率谱对比

Fig. 13 Power spectrum of the longitudinal fluctuating wind velocity of the bridge span station

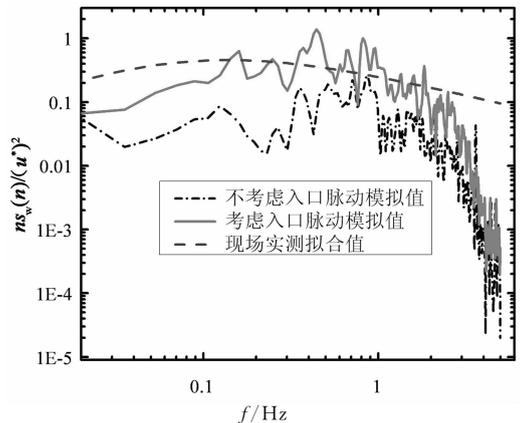


图 14 桥跨站竖向功率谱对比

Fig. 14 Power spectrum of the vertical fluctuating wind velocity of the bridge span station

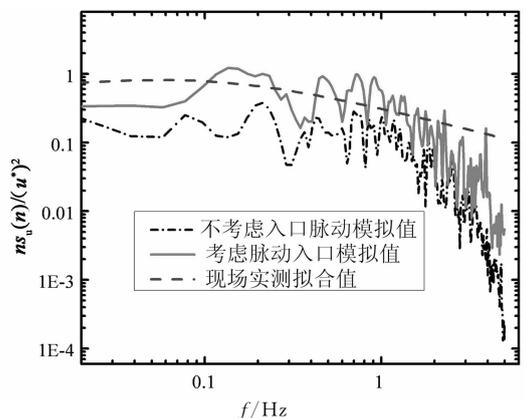


图 15 桥塔站顺风向功率谱对比

Fig. 15 Power spectrum of the longitudinal fluctuating wind velocity of the tower station

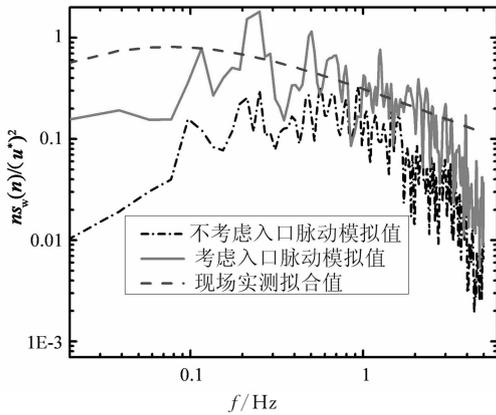


图 16 桥塔站竖向功率谱对比

Fig. 16 Power spectrum of the vertical fluctuating wind velocity of the tower station

大跨度桥梁抗风中所关注的频率段(0.1~1 Hz), 考虑脉动入口的数值模拟结果与现场实测值基本一致, 体现出了本文所提方法的正确性, 也证明了本文所用方法能较好地适用于山区大跨度桥梁. 在频率大于1 Hz后, 数值模拟的频率值相对实测结果出现下降, 主要原因是数值模拟过程中会出现频率衰减现象, 加密网格和优化大涡模拟亚格子模型会改善此问题. 与此同时, 本文对桥跨站与桥塔站2点的风速相关性进行了分析, 由于桥塔站和桥跨站2点相距600 m, 其相关性非常微弱, 几乎可以等效为相互独立情况.

#### 4 脉动入口作用下峡谷风场分析

将2种不同入口边界条件模拟结果与现场实测结果进行对比发现, 不论是在湍流度方面还是在风谱方面, 考虑脉动入口边界情况相比不考虑脉动情况其模拟结果具有较大的优势. 为得到不同风向角作用下峡谷桥址处的详细风场特性, 本文在考虑脉动入口边界条件的前提下, 以桥轴线方向为基准, 用7个不同风向角对桥址风场进行了分析, 每个风向角相隔20°, 如图17所示, 其中 $x, y$ 代表地形坐标系,  $x', y'$ 代表桥轴坐标系.

##### 4.1 不同风向角作用下计算结果

图18给出了不同工况作用下峡谷桥址风场的速度云图, 从图中可发现, 不同风向角作用下桥址处风速具有明显的差异, 在局部区域风速出现负值; 在同一风向角作用下随主梁位置不同风速也有所不同, 因此说明了复杂的山体地形对桥址处风场带来了很大的扰动.

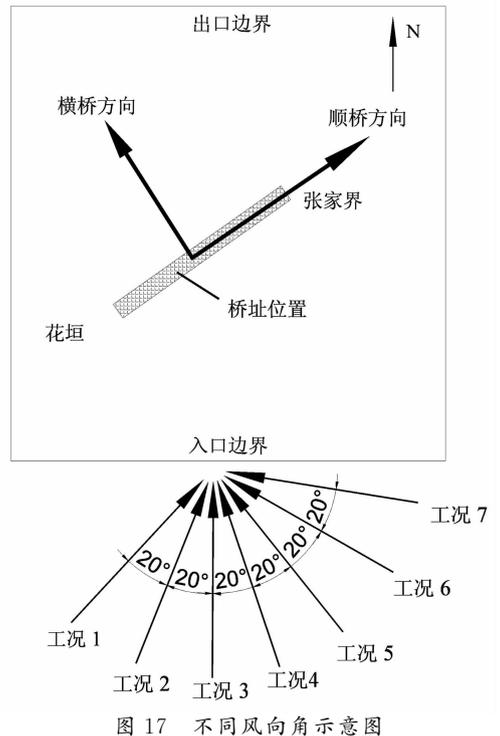


图 17 不同风向角示意图

Fig. 17 Sketch of the different wind directions

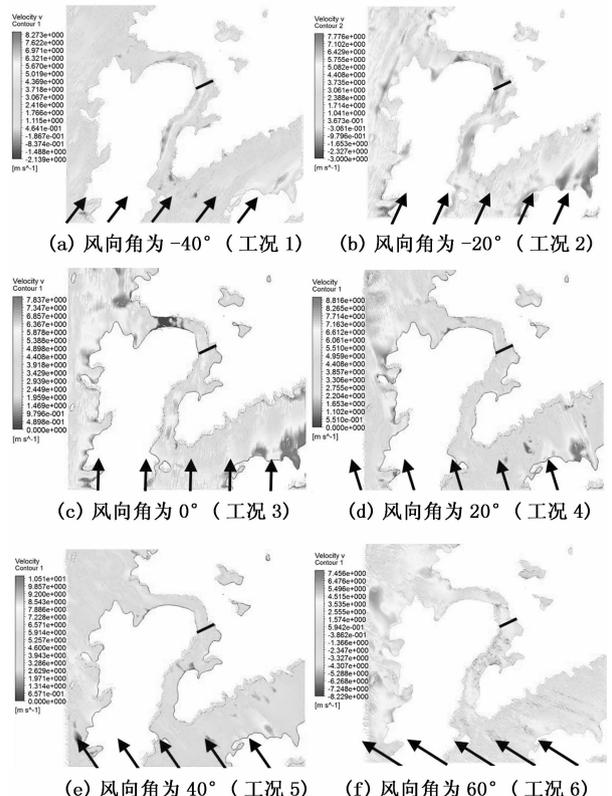


图 18 不同风向角作用下桥址处速度云图

Fig. 18 Velocity contour of the different wind direction angles

图19给出了工况1和工况5作用下主梁顺桥向、横桥向和竖向方向的风速分布情况. 这2种工况所对应的风攻角与风向角分布情况如图20所示, 从

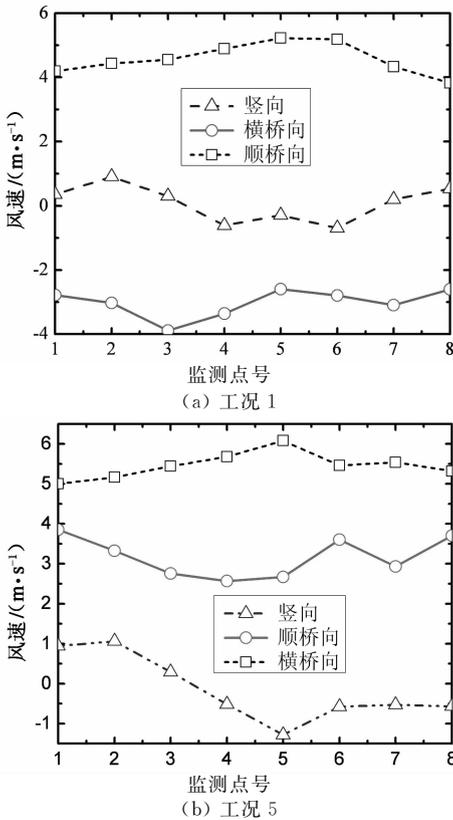


图 19 主梁处不同方向风速分布

Fig. 19 Wind velocity distribution along bridge deck

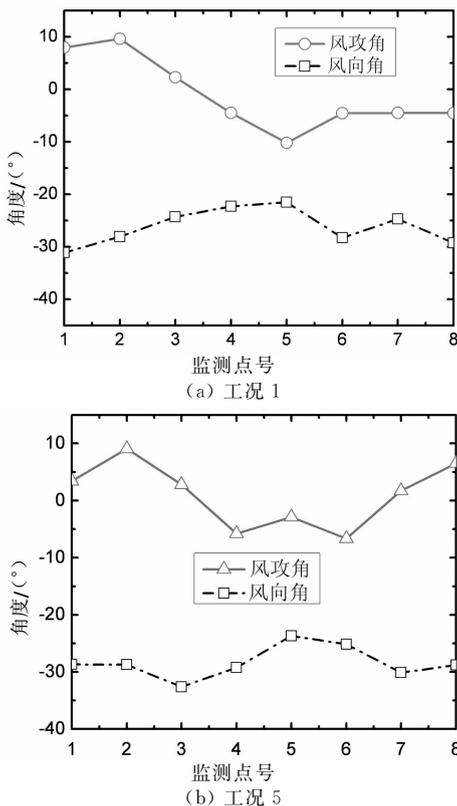


图 20 主梁处风向角与风攻角分布

Fig. 20 Wind direction and wind attack angle distribution along bridge deck

图中可发现,主梁跨中与端部风速在 3 个方向上均有所不同.同时,风向角和风攻角也具有明显的差异,工况 1 作用下主梁处的风攻角最大值为  $10.2^\circ$ ,最小值为  $-9.6^\circ$ ,波动范围较大,而风攻角又是桥梁风致振动响应中非常重要的参数之一,需引起重视.

#### 4.2 不同工况作用下风速放大系数与风剖面分析

图 9 中主梁 3~7 号风速监测点处于主梁结构振动、气动力较为显著的部位,对这 5 点的速度时程进行监测,然后取平均.风速放大效应系数为主梁所在位置的风速与主梁同一高度入口处风速的比值.本文对峡谷风速放大系数和峡谷横桥方向风速放大系数进行了分析,其中,横桥方向风速放大系数为风速通过三角分解后换算到主梁横向上的放大系数,各工况作用下风速放大系数与横桥方向风速放大系数见表 2.从表中可发现,风速放大系数均小于 1,因此表明桥址处没有出现峡谷加速效应,工况 1 和工况 2 作用下峡谷风速放大系数较大,主要原因是峡谷走向与来流风向一致,当峡谷走向与来流风向角偏差较大时,风速放大系数明显减小,因此表明峡谷风速放大效应主要受峡谷走向与来流风向影响.对于横向风速放大系数,工况 4 和工况 5 相对较大,是由于这 2 个工况下风向角与主梁轴线方向垂直,来流风未被三角分解而直接作用在主梁上,在风速相同时,此类风向角来流风作用在主梁上的风致效应更为明显,需引起重视.

表 2 不同风向角作用下桥址处风速放大系数  
Tab. 2 Wind speed amplification coefficient under different wind direction angles

工况	1	2	3	4	5	6	7
峡谷风速放大系数	0.950	0.930	0.840	0.800	0.730	0.500	0.360
横桥方向风速放大系数	0.166	0.496	0.649	0.860	0.816	0.647	0.260

对大跨度桥梁抗风而言,最为敏感的风速为作用在桥横向方向的风速.图 21 给出了不同风向角作用下桥址 3/5 跨位置经三角分解后作用在桥横向方向风速剖面图.

从图中可发现,在低于 1 200 m 时,风速沿高度变化无明显规律,主要原因是在 1 200 m 以下时风场受峡谷和山体等障碍物影响,风场紊乱,变化复杂.在高于 1 200 m 时,风速受地形因素影响较小,基本趋于稳定.通过分析发现在工况 5 作用下,主梁所受横向风速最大,工况 1 作用下最小,主要原因是风向与主梁轴线之间夹角所致,从所用工况结果可发现风向与主梁夹角越小,横桥向风速越小.

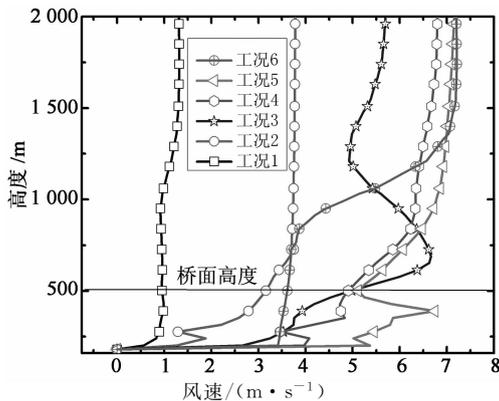


图 21 不同风向下 3/5 跨风剖面  
(经三角分解后作用在主梁横桥向方向剖面)

Fig. 21 Transverse wind velocity at 3/5-span under the incoming flow in different wind directions

## 5 结论

本文通过对澧水大桥所在峡谷风场进行现场实测与数值模拟,得到了以下成果和结论:

1)对澧水大桥桥址上游观测站进行风场现场实测,得到了观测站的风场特性,给山区峡谷地形风场数值模拟入口边界条件的选择提供了重要依据。

2)利用谐波合成法对桥址上游监测点风特性进行等效处理,基于对商业软件 Fluent 进行二次开发,提出了一种能满足当地实际风场特性的大涡模拟脉动入口边界给定方法。

3)对桥址处风场分析发现桥址水平方向和竖向方向风速变化差异较大;入口风向与峡谷走向之间夹角是影响峡谷加速效应的主要因素,入口风向和主梁轴线夹角是影响主梁受到横向风速大小的主要原因。

## 参考文献

[1] 朱乐东,任鹏杰,陈伟,等. 坝陵河大桥桥位深切峡谷风剖面实测研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(4): 15-21.  
ZHU Le-dong, REN Peng-jie, CHEN Wei, *et al.* Investigation on wind profiles in the deep gorge at the Balinghe bridge site via field measurement[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(4): 15-21. (In Chinese)

[2] 陈政清,李春光,张志田,等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 54-59.  
CHEN Zheng-qing, LI Chun-guang, ZHANG Zhi-tian, *et al.* Model test of wind field characteristics of long-span bridge site in mountainous valley terrain[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(3): 54-59. (In Chinese)

[3] 庞加斌,宋锦忠,林志兴. 山区峡谷桥梁抗风设计风速的确定方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 39-45.  
PANG Jia-bin, SONG Jin-zhong, LIN Zhi-xing. Determination method for wind-resistant design wind speed of mountainous-valley bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 39-45. (In Chinese)

[4] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristics study at the stonecutters bridge site: part I - Mean wind and turbulence intensities[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 22-36.

[5] 祝志文,张士宁,刘震卿,等. 桥址峡谷地貌风场特性的 CFD 模拟[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(10): 13-17.  
ZHU Zhi-wen, ZHANG Shi-ning, LIU Zhen-qing, *et al.* CFD simulation of wind field at bridge site on gorge terrain[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(10): 13-17. (In Chinese)

[6] NOMURA T. Prediction of large-scale wind field over complex terrain by finite element method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 947-948.

[7] YAMAGUCHI A, ISHIHARA T, FUJINO Y. Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 247-264.

[8] 李永乐,蔡宪棠,唐康,等. 深切峡谷桥址区风场空间分布特性的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 116-122.  
LI Yong-le, CAI Xian-tang, TANG Kang, *et al.* Study of spatial distribution feature of wind field over bridge site with a deep-cutting gorge using numerical simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 116-122. (In Chinese)

[9] MAURIZI A, PALMA J, CASTRO F A. Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the North of Portugal[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 76: 219-228.

[10] 胡朋,李永乐,廖海黎. 山区峡谷桥址区地形模型边界过渡段形式研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(2): 231-238.  
HU Peng, LI Yong-le, LIAO Hai-li. Shape of boundary transition section for mountains-gorge bridge site terrain model [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(2): 231-238. (In Chinese)

[11] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, VAN HEIJST G J F. CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: on the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 194: 422-434.

[12] 崔桂香,张兆顺,许春晓,等. 城市大气环境的大涡模拟研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(3): 295-328.  
CUI Gui-xiang, ZHANG Zhao-shun, XU Chun-xiao, *et al.* Research advances in large eddy simulation of urban atmospheric environment [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(3): 295-328. (In Chinese)

[13] UCHIDA T, OHYA Y. Large-eddy simulation of turbulent air flow over complex terrain[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 219-229.

[14] 刘熠. 山区峡谷桥址处风场特性实测研究与数值模拟[D]. 长沙:长沙理工大学土木与建筑学院, 2014: 25-35.  
LIU Yi. Mountain valley bridge site wind characteristics field measurement study and numerical simulation[D]. Changsha: School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, 2014: 25-35. (In Chinese)

[15] 沈炼,韩艳,蔡春声,等. 基于谐波合成法的大涡模拟脉动风场生成方法研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2015, 42(11): 64-71.  
SHEN Lian, HAN Yan, CAI Chun-sheng, *et al.* Research on generating method of fluctuating wind field of LES based on WAWS[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 64-71. (In Chinese)