

doi: 10.7690/bgzd.2018.12.013

基于 CFD 的大跨度桥通航过程颤振稳定性分析

张顺锋, 何晓晖, 王 强, 张 胜, 徐 磊, 崔言伟

(解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007)

摘要: 大跨度桥的风致动力响应是抗风设计中的关键问题。为缩短装配式钢桁架桥的设计周期、降低成本, 采用数值模拟的方法对钢桁架桥通航过程颤振稳定性进行分析。采用计算流体力学与动网格技术建立数值风洞, 构建钢桁架桥通航过程的 2 维仿真模型, 模拟桁架桥通航过程的分状态强迫振动, 以 2 维 3 自由度耦合颤振分析方法为理论依据, 仿真分析某型装配式钢桁架桥通航过程的断面绕流场和桥梁上颤振自激励, 识别出颤振导数, 并得到通航过程颤振临界风速。结果表明: 仿真结果与风洞实验结果一致, 证明该方法是可行、可靠的, 可为以后工程应用奠定基础。

关键词: 计算流体力学; 装配式钢桁架桥; 分状态强迫振动; 动网格

中图分类号: TP15 **文献标志码:** A

Flutter Stability Analysis of Long-span Bridge Traffic Capacity Process Based on CFD

Zhang Shunfeng, He Xiaohui, Wang Qiang, Zhang Sheng, Xu Lei, Cui Yanwei
(College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Wind dynamic action to long-span bridge is the key problem in the wind resistant design. To shorten the design cycle and lower the cost of a fabricated steel truss bridge, and by use of the numerical wind tunnel established by computational fluid dynamics (CFD) and dynamic mesh technology, the 2-D numerical model of the fabricated steel truss bridge in the traffic capacity process is established. The detached-forced vibration of the traffic capacity process are simulated, based on two-dimensional 3 DOF coupling flutter method (2d-3DOF method), the flow field characteristics, flutter derivatives and critical flutter speed of the fabricated steel truss bridge in the traffic capacity process are obtained. The result shows that the result of numerical simulation is consistent with the wind tunnel experiment. So, the method is feasible and reliable. The foundation for its further application in practical projects is laid.

Keywords: computational fluid dynamics; fabricated steel truss bridge; detached-forced vibration; dynamic mesh

0 引言

随着工程保障能力的不断提高, 装配式桁架桥的跨度不断变大, 桥梁风致振动特别是颤振稳定性对整体安全性的影响越来越大, 所以对桥梁颤振导数与颤振临界风速的识别尤为重要。以风洞试验为手段对模型进行分状态强迫振动, 进而计算识别得出桥梁颤振导数与颤振临界风速仍是主要方法, 如祝志文^[1]、陈政清^[2]、Anina Sarkic 等^[3]均使用风洞试验的方法, 进行颤振导数的识别。但是风洞颤振实验的循环周期长、代价较大和可操作性不强等诸多问题, 给研究桥梁颤振稳定性问题带来很大阻碍。

随着计算流体力学的发展, 数值模拟提取三分力系数成为一种新的方法。它克服了风洞试验的上述缺点, 而且具有较强的可操作性和重复性, 西南交通大学张倩^[4]、中南大学胡赛龙等^[5]都对此有所

研究。笔者以某型装配式钢桁架桥通航过程为例, 采用 2 维 3 自由度耦合颤振分析方法, 结合计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 建立数值风洞, 使用仿真模型分状态强迫振动法, 得到了通航过程桥梁的颤振导数, 并计算得到了颤振临界风速, 进而分析了该型装配式钢桁架桥颤振机理, 为进一步优化该型桥梁结构, 提高其颤振稳定性奠定了基础, 同时也为该桥保障能力和安全通行提供了参考价值。

1 几何模型和网格划分

1.1 几何模型

模型大跨度装配式钢桁架桥的结构为桁架式结构, 其断面结构复杂, 主要典型截面结构主要分为上部结构、连接结构和下部结构。为降低尺寸测量带来的误差, 笔者对钢桁架桥通航过程典型断面

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51175511)

作者简介: 张顺锋 (1993—), 男, 河南人, 硕士, 从事液压传动与流体仿真研究。

模型进行原比例实体建模。断截面模型如图 1。

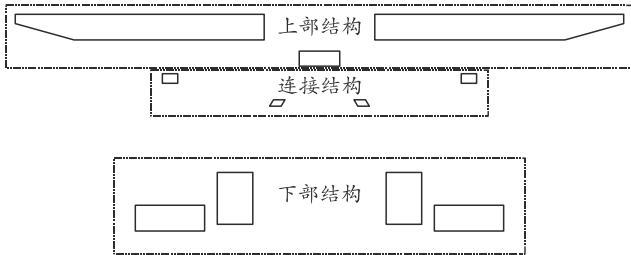


图 1 某型装配式钢桁架桥通载过程断截面模型

1.2 计算域划分

为全面得到数值风洞周围流场特性，计算区取 $8.5B \times 13B$ 的矩形 (B 为断面宽度)，计算区域入口到主梁截面对称面距离为 $4B$ ，出口至断面中心距离为 $10B$ ，上下距离截面对称面各为 $5B$ ，计算区如图 2 所示。

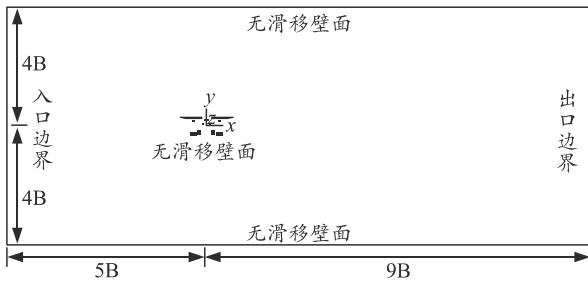
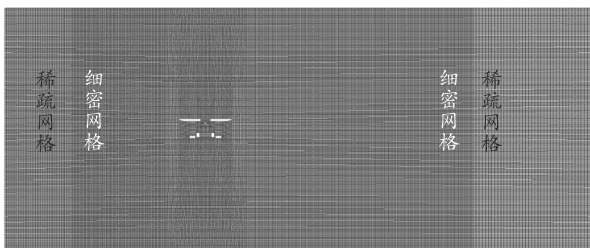


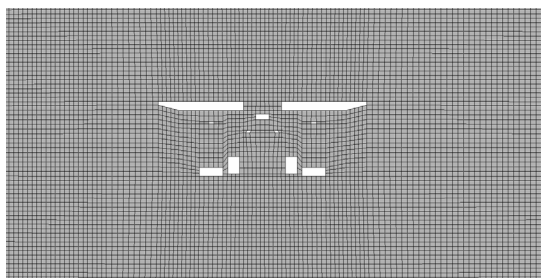
图 2 计算区

1.3 网格划分

为了数值模拟计算的准确性和计算效率，采用分块结构网格划分，距桥梁截面近的计算区使用较为稠密的网格，距桥梁断面远的计算区使用宽松的网格。网格分块如图 3 所示。



(a) 整体网格



(b) 局部网格

图 3 网格划分

2 CFD 控制方程

2.1 CFD 方程

1) 连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

2) 雷诺方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + F_y \quad (3)$$

3) $k-\varepsilon$ 湍流模型：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} C_k + C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (5)$$

式中： ρ 为流体密度； μ 为动力黏度； μ_t 为湍动黏度； u 、 v 为流体速度在 x 、 y 方向上的分量； p 为作用在流体单元上的作用力； F_x 、 F_y 为作用在流体微元体上的体力^[6]。

2.2 动网格技术与生成

为了模拟该节段模型做强迫振动时的气动力参数，笔者使用动网格分块技术，让截面以正弦规律来计算模型的强迫振动。网格运算过程中，流场内控制方程发生改变，一般采用数值积分方法来表达各运动方程^[7]：

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (6)$$

式中： ϕ 为通用变量，代表 u 、 v 、 p 等求解变量； Γ 为广义扩散系数，代表 μ_{eff} 、 $\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ 、 $\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$ ； S_ϕ 为 ϕ 的源项； \mathbf{A} 为面矢量； \mathbf{u}_g 为网格移动的迪卡速度矢量； ∂V 表示控制体积 V 的边界。

涉及到桥梁被动振动区域小，笔者使用分块弹性变形产生动网格块。该方法是在网格弹性范围变形中，将分块网格间的连线节点假定为节点的弹性点，初始网格的区域作为假定弹性点的稳态平衡点，边界节点的位移让全部与其连接的线产生对应的弹

性力。根据胡克定律，分块节点上的应力可表示为：

$$F_i = \sum_j^{n_i} k_{ij}(\Delta x_j - \Delta x_i) \quad (7)$$

式中： Δx_j 和 Δx_i 是节点 i 以及相邻节点 j 的位移； n_i 是与节点相邻的节点数； k_{ij} 是节点 i 及相邻节点 j 间的弹性因子。

数值模型作纯扭转被迫振动的周期频率为 $f=2$ Hz，幅值 $\alpha_0=2^\circ$ ，初始相位 $\varphi=0^\circ$ ，浮沉位移 $h=0$ m。数值模型作纯竖弯被迫振动的频率为 $f=2$ Hz，幅值 $h_0=0.01$ m，初始相位 $\varphi=0^\circ$ ，浮沉位移 $\alpha=0^\circ$ 。

3 边界条件与参数选取

计算使用流场计算组件 (Flow) 和紊流计算组件 (Turbulence)，运用定值分离求解器，选取 $k-\varepsilon$

两方程模型，湍动能系数 K 取 0.01，消散率 D 取 0.01。材料选用空气为介质，密度为 $\rho=1.1614$ kg/m³，空气的黏度系数为 $\mu=1.846 \times 10^{-5}$ kg/(m·s⁻¹)。

入口设置为速度进口，试验风攻角度为 0°，来流速度分别为 14、16、18、20、22、24 和 26 m/s 7 个试验风速，赋以静压力分布。

出口条件设置为压力出口。接触条件设置为无滑移运动壁面。

4 仿真结果分析

4.1 纯扭转运动仿真结果分析

模型作纯扭被迫运动的 1 个循环周期内的网格变化如图 4 所示，分别对应周期为 $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 、 T 时间。

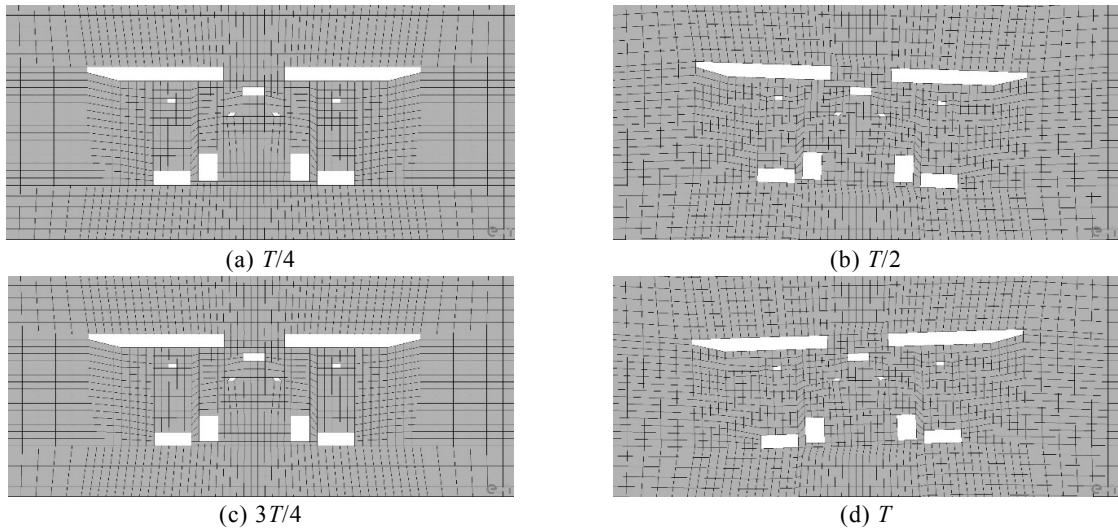


图 4 不同瞬时的计算网格

气动力变化趋于平衡态后，速度以 U 为 20 m/s 为例，图 5 为模型作纯扭转强迫运动的 1 个周期内

压强和速度分布，分别对应周期为 $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 、 T 时间。

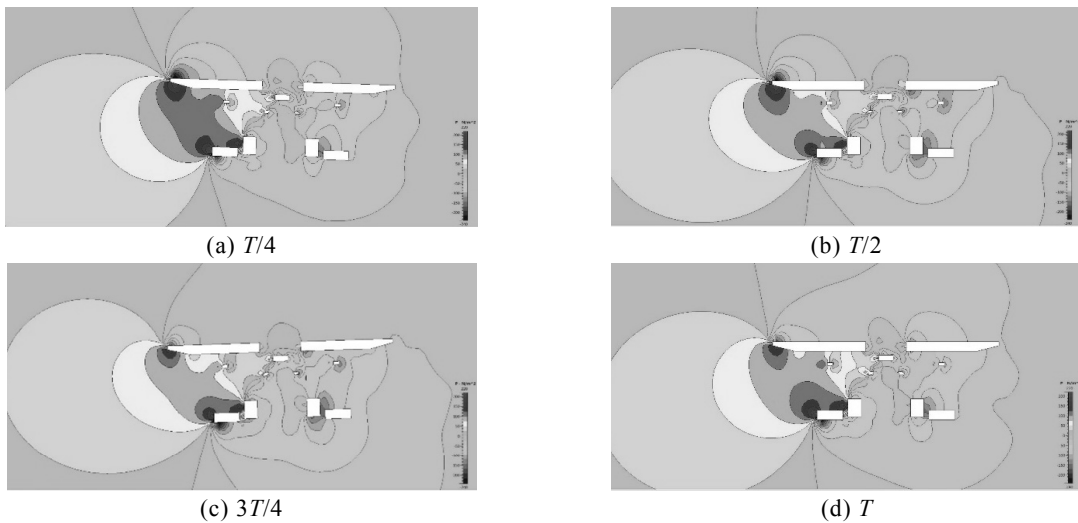


图 5 模型纯扭转强迫运动 1 个循环内压应力等值线

由图可以看出：从全部趋势上看桥梁迎风面有大的压应力，背风面有小的压应力。迎风面桥梁中部多为高压，在桥体端面出现最大风压力，约为 213 N/m^2 ，迎风面上部结构端面上沿和下部结构端面下沿出现较大负压，最大负压达到 -237 N/m^2 。纯扭转 1 个周期内，风压力场高低压分布区域无太大变化，数值上略有不同，其中模型顺时针扭转达到最大位置，即 $T/4$ 时，高压部分和负压部分较大；模型逆时针扭转达到最大位置，即 $3T/4$ 时，高压部分和负压部分相比同周期略小。

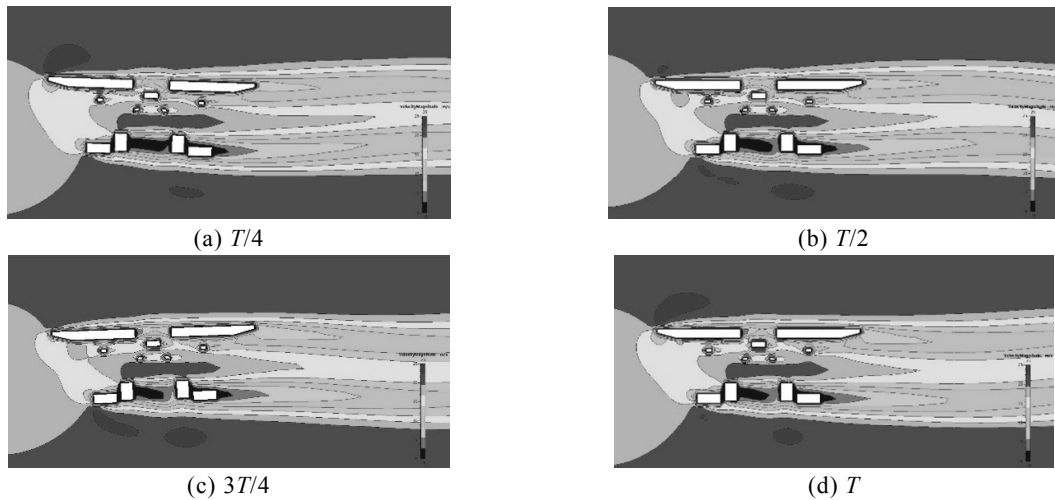


图 6 模型纯扭转强迫运动 1 个循环内速度等值线

4.2 纯竖弯运动仿真结果分析

纯竖弯运动仿真结果分析与纯扭转运动仿真结果近似，限于篇幅原因，不再赘述。

4.3 颤振导数与颤振激励分析

选取某型装配式桥梁节段模型在同济大学进行风洞试验^[8-10]，得到的颤振导数与 CFD 计算所得折算风速下数值分析模型的颤振导数如图 7 所示。其中 $v_r = U/fB$ 为折算风速， U 为来流风速， f 为振动频率， B 为模型宽。分析颤振导数可知：

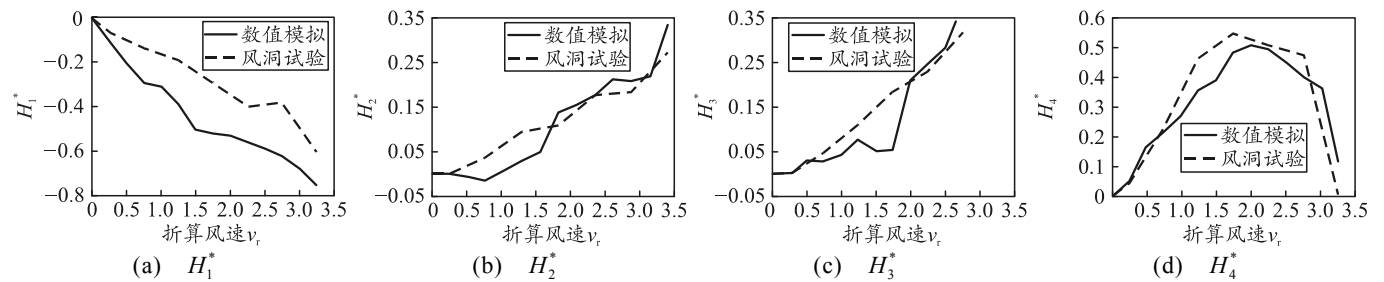
1) 装配式钢桁桥因断面结构形式较为复杂，其颤振导数与薄板断面形式的桥梁临界风速导数有明显差别： H_1^* 与 A_3^* 始终为负值，且随折算风速的增大不断减小。 H_2^* 、 H_3^* 、 A_1^* 和 A_2^* 始终为正值，

由图 6 可以看出：整体趋势上桥梁在流场中流线性较差，风阻现象较明显。流场在桥梁迎风端面上沿发生分离，上部结构迎风端面上沿流速呈加快趋势，最大至 25 m/s 左右，下沿呈减速趋势至 5 m/s 左右；下部结构迎风端面上沿呈减速趋势，下沿呈加速趋势。桥梁整体上部流体与下部流体在迎风端面分离后未在桥梁背风面汇合，其中由于桥梁下部结构较为复杂，桥梁下部的流体未能很好地附着桥体，而形成了较明显的涡旋。总体来看，桥梁的复杂结构在风流场中流线性较差，导致流场较为复杂。

且随折算风速的增大而不断增大。 H_4^* 和 A_4^* 随着折算风速先正向增大，到达峰值后开始减小，由正变负，然后继续负向减小。

2) 颤振导数的 CFD 数值计算值与风洞试验值一致性较好， A_1^* 和 H_4^* 的 CFD 数值计算值与风洞试验值的一致性有较大偏差，但偏差在允许范围内，说明文中数值仿真装配式钢桁桥颤振导数方法可行可靠。

3) 各个颤振导数其量级都接近，说明对于截面形式复杂的装配式钢桁桥来说，桥梁系统纯扭转强迫运动的 5 个气动阻尼与纯竖弯运动的 5 个气动阻尼都对桥梁颤振稳定性起直接影响作用，不可任意忽略其中之一。



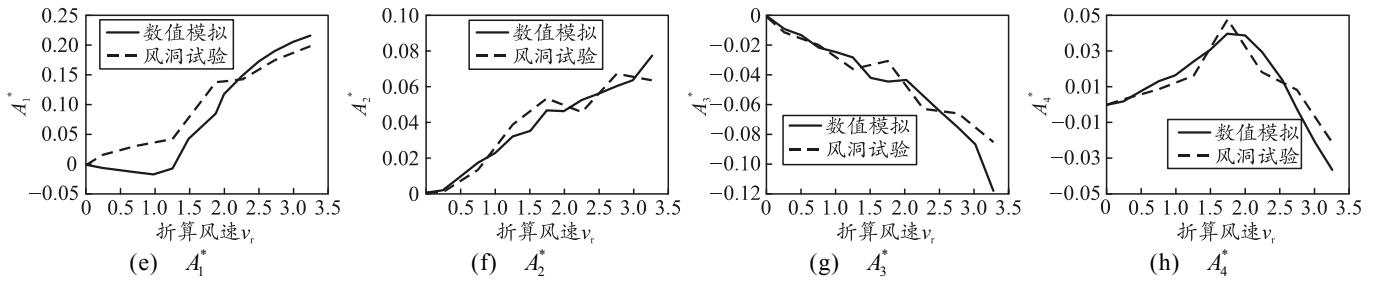


图 7 无量纲风速下颤振导数

4.4 颤振临界风速的计算

采用 Scanlan 风致振动临界风速计算方法^[11-12], 根据上述仿真得到的颤振风致导数, 可计算出桥梁的颤振临界风速, 其与风洞试验得到的颤振临界风速对比如表 1 所示。

表 1 颤振临界风速结果 m/s

工况	CFD 计算值	风洞试验值
风攻角 0°	16.3	18

计算值与阶段模型风洞实验值偏差为 $(18-16.3)/18=9.4\%$ 。其偏差在允许范围内, 说明笔者所述计算结果可行、可信, 可为下一步实际工程中奠定基础。

5 结论

1) 笔者给出的速度和压强分布区域图客观地反映了桥梁四周流域分布情况, 验证了该数值分析方法, 同时发现应该完善和改进设计桥梁的连接结构和下部结构的模型, 增加其流线型, 以减少抖振的产生。

2) 将 CFD 计算所得颤振导数与风洞试验所得颤振导数对比, 可知两者数据一致性较好, 进一步验证笔者研究装配式结构桥梁颤振稳定性的可操作性与可靠程度; 8 个颤振导数量级相近, 说明装配式钢桁桥颤振机理较为复杂, 桥梁系统纯扭转运动的 5 个气动阻尼与纯竖弯运动的 5 个气动阻尼都对桥梁颤振稳定性起直接影响作用, 不可任意忽略其中之一。

3) 通过文中方法计算出的某型装配式钢桁桥通航过程的颤振临界风速与其节段模型风洞试验测量得到颤振临界风速近似, 说明此仿真方法的可操作性强, 可靠程度高, 可为实际工程使用奠定基础。

参考文献:

- [1] SELVAM R P, GOVINDASWAMY S. A report on aeroelastic analysis of bridge girder section using computer modeling[R]. Fayetteville: Report of University of Arkansas for Mack Blackwell Transportation Center, 2001.
- [2] ANINA S, RUPERT F, RUDIGER H. Bridge flutter derivatives based on computed, validated pressure fields [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104(106): 141-151.
- [3] WANG W, LI M, CHEN X. Identification of aerodynamic derivatives for bridge sections by forced oscillation method[C]. Lubbock, Texas, USA: Proc. of the 11th International Conference on Wind Engineering, 2003: 309-316.
- [4] 胡赛龙, 郭文华. 横风中高速列车以及桥梁的气动特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009(6): 1008-1010, 1015.
- [5] 祝志文, 陈政清. 数值模拟桥梁断面气动导数和颤振临界风速[J]. 中国公路学报, 2004(3): 44-48, 53.
- [6] 张倩, 廖海黎. 桥梁主梁断面气动力特性的数值模拟研究[J]. 四川建筑, 2008(4): 83-84, 86.
- [7] 何晓晖. 基于动网格的液闸闸芯启闭中的液动力分析[J]. 解放军理工大学学报, 2011(5): 491-495.
- [8] 周斌. 基于 FLUENT 大涡模拟方法的桥梁断面启动参数识别[D]. 上海: 同济大学, 2009: 20-21.
- [9] 何晓晖. 粘性流中二维水翼局部空泡流的数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 2.
- [10] 牛华伟, 陈政清. 桥梁主梁断面 18 个颤振导数识别的三自由度强迫振动法[J]. 土木工程学报, 2014(4): 75-83.
- [11] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 297.
- [12] 项海帆. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T D60-10-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 73.