

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.023

## 装配式钢桁架桥三分力系数的数值仿真

张成龙, 王强, 何晓晖, 毛迪

(解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007)

**摘要:** 为克服风洞试验存在周期长、成本较高、设备复杂等不足, 采用数值模拟提取三分力系数方法对某型装配式钢桁架桥典型断面三分力系数进行分析。采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法, 对某型装配式钢桁架桥的三分力系数进行数值模拟。在对数值仿真结果与风洞试验结果对比分析的基础上, 对桥梁的 3 种典型断面三分力系数进行分析, 并给出 3 种典型断面的压力和速度分布图。结果表明: 该方法与风洞实验值吻合较好, 具有较好的可行性与可靠性, 能为该桥的抗风性能分析提供直接的数据支持, 并为桥梁结构优化提供参考。

**关键词:** 装配式钢桁架桥; 断面; 三分力系数; CFD; 数值仿真

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation on Tri-Component Force Coefficient of Fabricated Steel Truss Bridge

Zhang Chenglong, Wang Qiang, He Xiaohui, Mao Di

(College of Field Engineering, PLA University of Science &amp; Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** To overcome the long wind tunnel test cycle, the higher costs, complex equipment brought by wind tunnel test, we used numerical simulation method to analyze tri-component force coefficient of a certain fabricated steel truss bridge. By use the computational fluid dynamics method, the tri-component force coefficient of a certain fabricated steel truss bridge was simulated. Based on the comparison between the numerical simulation results and wind tunnel test results, the tri-component force coefficient of 3 typical cross-sections of the bridge was analyzed. The pressure and velocity distribution was obtained. The results show that this method agrees well with the wind tunnel test results and has good feasibility and reliability. It not only provides a direct data support for the analysis of the bridge wind resistance, but also provides a reference for the optimization of the bridge structure.

**Keywords:** fabricated steel truss bridge; cross-section; tri-component force coefficient; CFD; numerical simulation

## 0 引言

三分力系数是桥梁抗风研究中的重要参数。考虑到桥梁断面形状和风场特性的多样性, 一般采用风洞试验的方法进行提取三分力系数, 如同济大学对上海南浦大桥和杨浦大桥的风洞试验<sup>[1]</sup>。但是风洞试验的周期较长、成本较高、设备复杂和重复性不强等诸多问题, 给研究桥梁抗风稳定性带来诸多不便。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, 湖南大学刘玥<sup>[2]</sup>、同济大学周斌<sup>[3]</sup>等都对此有所研究。笔者采用 CFD 方法, 利用 CFD-ACE+流体软件对某型装配式钢桁架桥梁典型断面三分力系数进行分析, 给出了 3 种典型断面的压力和速度分布图, 利用风洞试验相关数据验证本方法的可靠性和可行性, 进一步为该桥的抗风性能分析提供了直接的数据支持, 同时为该桥梁结构的优化提供了参考意见。

## 1 CFD 的控制方程

计算流体力学(computational fluid dynamics,

CFD)是通过计算机数值计算和图像显示, 对包含有流体流动、热传导等相关物理现象的系统所做的分析。其基本思路为: 把在时间域及空间域上连续的物理量, 用一系列有限离散点上的变量值的集合来代替, 通过流体动力学控制方程建立有关这些离散点上变量之间关系的代数方程组, 然后求解代数方程组获得场变量的近似值<sup>[1]</sup>。通过这种数值仿真, 就可以得到断面的阻力、升力和力矩, 进而得到三分力系数。流体动力学控制方程<sup>[4-5]</sup>如下:

1) 连续性方程。

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

2) 雷诺方程。

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

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

收稿日期: 2013-11-02; 修回日期: 2013-11-28

作者简介: 张成龙(1989—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事舟桥装备技术相关研究。

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： $\rho$  是流体密度； $\mu$  是动力粘度； $\mu_t$  为湍动粘度； $u$ 、 $v$  是流体速度在  $x$ 、 $y$  方向上的分量； $p$  是作用在流体单元上的作用力； $F_x$ 、 $F_y$  是作用在流体微元体上的体力。

## 2 桥梁三分力系数

根据桥梁风工程相关理论，气动阻力系数  $C_H$ 、气动升力系数  $C_V$  和气动俯仰扭矩系数  $C_M$  的定义<sup>[6]</sup> 如下：

$$C_H = \frac{F_H}{1/2 \rho U^2 DL} \quad (6)$$

$$C_V = \frac{F_V}{1/2 \rho U^2 BL} \quad (7)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho U^2 B^2 L} \quad (8)$$

式中， $F_H$ 、 $F_V$ 、 $M$  分别为体轴系坐标下桥梁长度的阻力、升力和扭矩； $\rho$  为空气密度； $U$  为来流风速； $B$  为桥梁断面的宽度； $D$  为桥梁断面的高度； $L$  为桥梁长度。

## 3 桥梁三分力系数的数值仿真

笔者以某型装配式钢桁架桥为研究对象，提取主要典型断面，采用 CFD 方法，以 CFD-ACE+流体软件为技术平台，对其桥梁三分力系数以及周围风流场进行数值仿真。

### 3.1 几何模型的建立

模型装配式钢桥为桁架式结构，其主要结构主要分为上部结构、连接结构和下部结构组成。由于连接结构断面形式较为复杂，按其断面形式的不同，提取桥梁 3 个典型断面为研究对象。为消除尺寸效应带来的计算误差，对钢桁架桥典型断面模型进行 1:1 实体建模。断面模型示意图如图 1 所示。

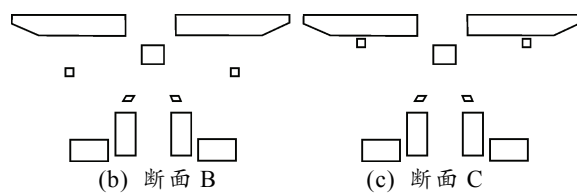
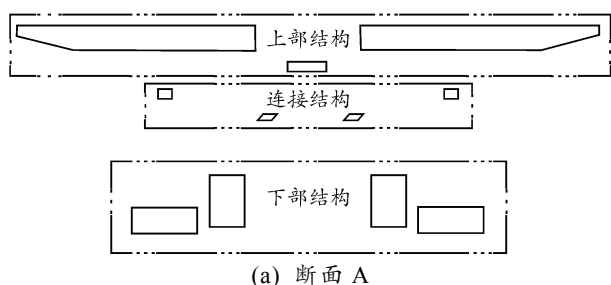


图 1 某型装配式钢桁架桥典型断面模型

### 3.2 计算域划分

为更好地捕捉到模型周围流场特性，计算区域取  $8B \times 14B$  的矩形 ( $B$  为断面模型宽)<sup>[7]</sup>，计算区域入口到主梁断面中心距离为  $5B$ ，出口至断面中心距离为  $9B$ ，上下距离断面中心各为  $4B$ ，计算区域如图 2 所示。

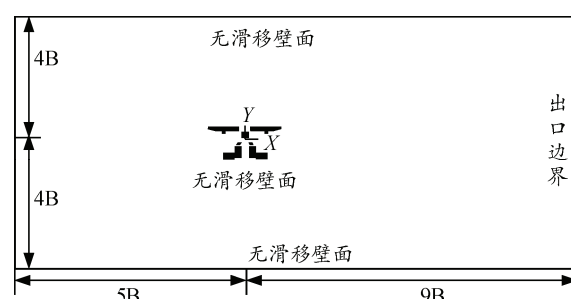


图 2 计算域示意图

### 3.3 网格划分

为兼顾计算仿真的准确度和计算效率，采用分区域结构网格划分，距离桥梁断面较近的计算域采用较为细密的结构网格，距离桥梁断面较远的计算域采用较为稀疏的网格，稀疏网格的面积约为细密网格面积的 9 倍，网格总体数量为 56 万，网格划分如图 3 所示。

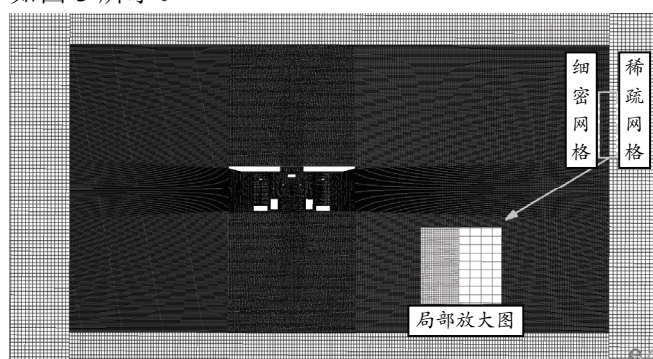


图 3 网格划分示意图

### 3.4 计算参数

计算采用流体计算模块 (Flow) 和湍流计算模块 (Turbulence)，运用定长分离求解器，选取  $k-\varepsilon$  方程模型，湍动能系数  $K$  取 0.01，耗散率  $D$  取 0.01。材料选用的介质为空气，密度为  $\rho = 1.1614 \text{ kg/m}^3$ ，空气的粘性系数为  $\mu = 1.846 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

入口设置为速度入口，试验风攻角由 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$ ，来流速度  $U=11 \text{ m/s}$ ，赋以静压力分布。

出口条件设置为压力出口。壁面条件设置为无滑移壁面<sup>[8]</sup>。

### 4 数值结果与分析

#### 4.1 三分力系数

图 4 给出了断面 A 数值仿真所得的三分力系数和风洞试验所得三分力系数对比图。

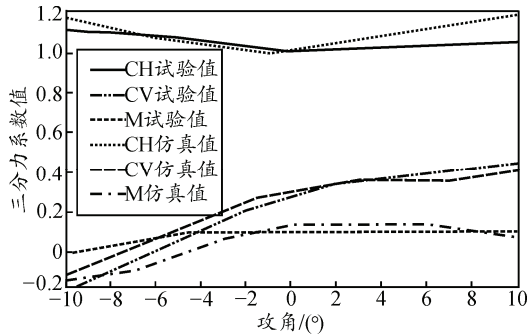


图 4 断面 A 三分力系数仿真值与风洞试验值对比图

由 4 图可知，三分力系数的仿真值与风洞试验值的总体变化趋势是一致的，各系数基本均相对  $0^{\circ}$  攻角对称分布，与理论认识相符，在一定程度上表明了本计算方法的可信性。随着攻角越大，两者之

间偏差越大，相较而言，气动升力系数在 $-10^{\circ} \sim -4^{\circ}$ 范围内偏差相对较大，最大偏差为 0.09；气动俯仰扭矩系数在 $-10^{\circ} \sim -2^{\circ}$ 范围内偏差相对较大，最大偏差为 0.095；气动阻力系数在  $2^{\circ} \sim 10^{\circ}$  范围内的偏差相对较大，其最大偏差为 0.11 随着攻角越大，两者之间偏差越大。考虑到流体计算的实际，该偏差可以为工程计算所接受度，能为工程分析提供依据。

在此基础上，进一步采用上述方法对另外 2 个断面进行了数值仿真，得到了 3 种断面的三分力系数的对比图，如图 5 所示。

由图 5 可知，3 种断面的三分力系数总体变化趋势基本相同，且数值大致相近。其中，气动阻力系数的最大偏差为 0.08，气动升力系数的最大偏差为 0.14，气动俯仰扭矩系数的最大偏差为 0.075。分析原因可知，虽然 3 种断面的结构总体差别不大，但主要差别就在于连接结构的位置不同。仿真结果表明了本计算方法的可信性，另外，对装配式刚桁架桥而言，连接结构位置的变化并没有给桥梁整体三分力系数带来较大影响，即对桥梁抗风性能的影响可以忽略不计，在进行桥梁抗风设计时选取任意一种截面进行研究即可，同时，在对连接结构进行优化设计时，可忽略抗风性能的制约因素。

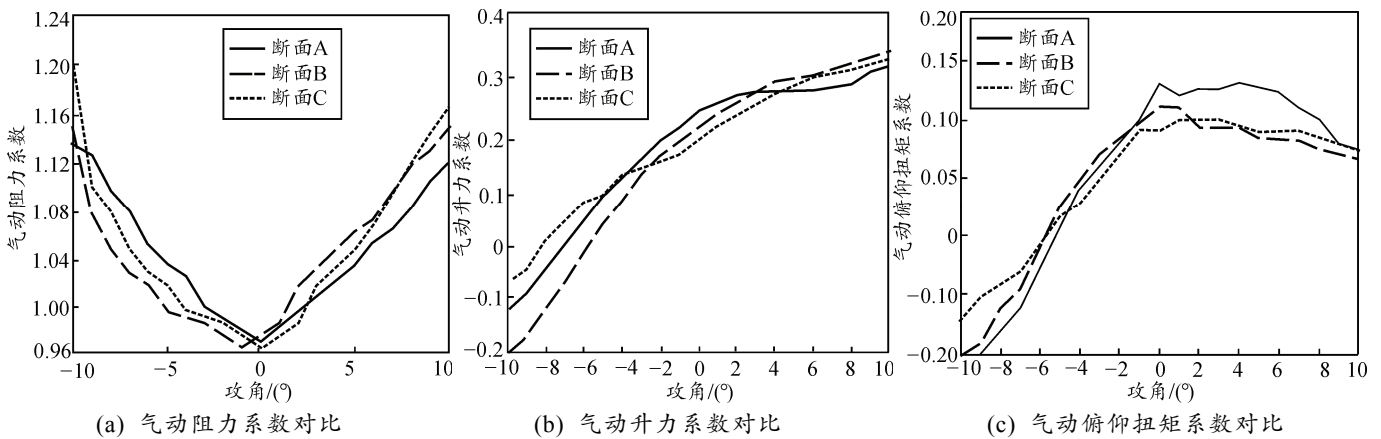


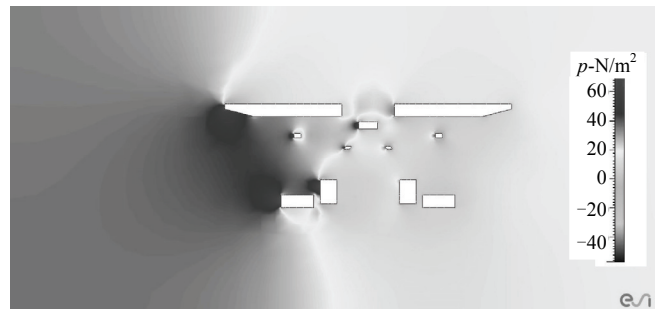
图 5 3 种断面仿真所得三分力系数对比

#### 4.2 压力场

图 6 给出了 3 种断面风场的压力云图。

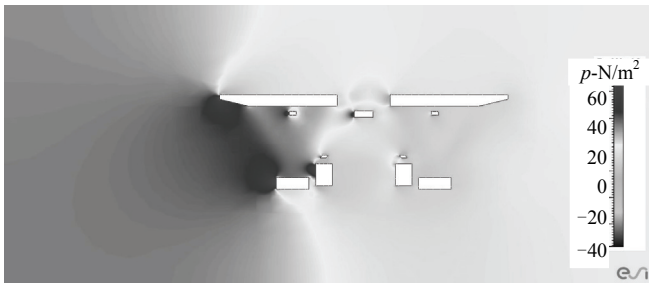
由图 6 可知，桥梁迎风面压力较大，最大压力约为  $70 \text{ N/m}^2$ ，背风面压力较小，且未出现明显的负压，这与理论认识是一致的。相比较而言，断面 B 的高压分布面积略小于断面 A 和断面 C，可知连接结构的位置对桥梁风流场压力分布略有影响，因此，桥梁模型在保证连接结构强度的同时，可进一步优化连接结构得位置，进而减少风场高压区域面

积，进一步减轻风给桥梁的局部带来的压力。

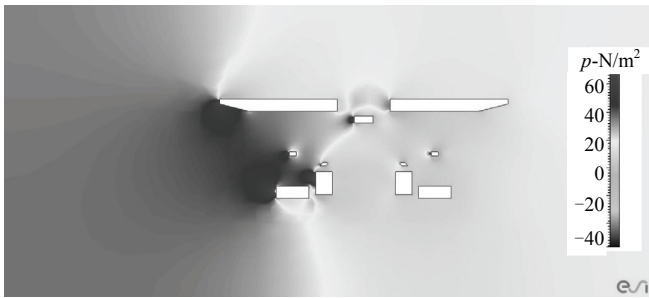


(a) 第 1 种断面风场的压力云图





(b) 第 2 种断面风场的压力云图

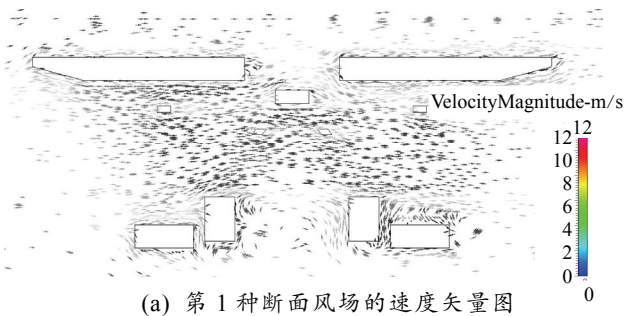


(c) 第 3 种断面风场的压力云图

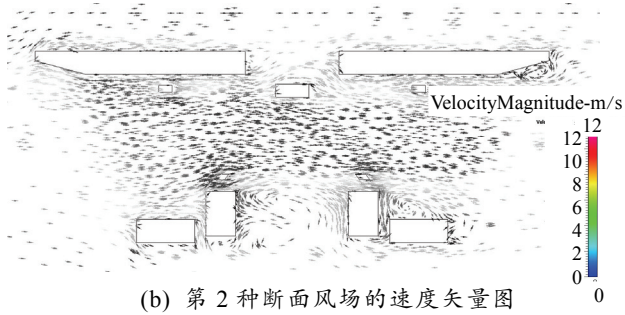
图 6 3 种断面 CFD 所得压力场分布图

### 4.3 速度场

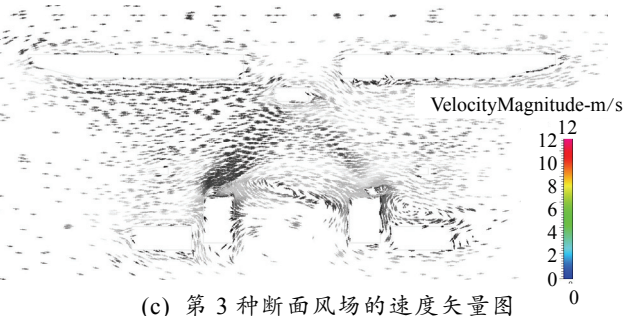
图 7 给出了 3 种断面风场的速度矢量图。



(a) 第 1 种断面风场的速度矢量图



(b) 第 2 种断面风场的速度矢量图



(c) 第 3 种断面风场的速度矢量图

图 7 3 种断面 CFD 所得速度场分布图

由图 7 可知，3 种断面的下部结构中间部位和桥梁背风面都有明显涡旋产生，这是由于下部结构相对而言顿体特性更为明显，在条件允许的情况下，应对桥梁模型的下部结构进一步优化，减缓涡流的产生。

### 5 结束语

笔者以某型装配式钢桁架桥为研究对象，对其 3 种典型断面进行 1:1 实体建模，采用合理的计算域划分和网格划分对断面进行风场数值分析，得到的不同风攻角下三分力系数与风洞试验数据对比，可知运用 CFD 方法和 CFD-ACE+软件平台模拟出的三分力系数与风洞实验值吻合较好，具有较好的可行性与可靠性，可运用于实际工程中。

通过对比 3 种断面模拟出的三分力系数，分析出 3 种断面的三分力系数互相偏差较小，连接结构位置的变化并没有给桥梁整体三分力系数带来较大影响，即对桥梁抗风性能的影响可以忽略不计，在进行桥梁抗风设计时选取任意一种截面进行研究即可，同时，在对连接结构进行优化设计时，可忽略抗风性能的制约因素。

给出的速度和压强分布图基本真实地反映了桥梁周围流场分布情况，验证了该研究方法，同时发现应进一步优化桥梁的连接结构和下部结构，以减少涡旋的产生。

### 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 刘玥. 连续钢结构桥梁的气动性能数值模拟研究[D]. 长沙：湖南大学硕士学位论文，2009：9-10.
- [3] 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：同济大学硕士学位论文，2009：20-21.
- [4] 何晓辉. 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.
- [5] 陈明亮，李志刚，鲍密. 基于 CFD 的炮口制退器结构特征量特性研究[J]. 兵工自动化，2013，32(1)：4-7.
- [6] 项海帆. JTG/T D60-10-2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2004：73.
- [7] 邱捷. 桥梁典型断面三分力系数雷诺数效应数值研究[D]. 湖南：中南大学，2010：34.
- [8] 葛耀君，周志勇，杨勇听，等. 马鞍山长江公路大桥(左汊)抗风性能研究(全桥气弹模型风洞试验)[R]. 上海：同济大学土木工程防灾国家重点实验室技术报告，2009：1-2.