

近流线型梁断面绕流的数值模拟

光子龙, 张 宏

长安大学理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年9月21日; 录用日期: 2021年10月22日; 发布日期: 2021年11月2日

摘 要

以大跨桥梁中常用的近流线型箱梁断面为研究对象, 通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟方法, 对断面流场特性进行分析。并利用Fluent软件对近流线型主梁断面绕流进行数值模拟, 得到 $-6^{\circ}\sim+6^{\circ}$ 风攻角范围内风轴坐标下的静力三分力系数, 并经后处理软件处理得到 $\pm 5^{\circ}$ 风攻角下桥梁断面的流场分布示意图(包括压强分布图、流速分布图及流线图)。分析结果表明: 风攻角为主梁断面三分力系数的影响因素, 且随着风攻角的增大, 阻力系数先减小后增加, 升力系数逐渐增加, 扭矩系数逐渐减小。

关键词

CFD, 三分力系数, 桥梁工程, 数值模拟

Numerical Simulation of Flow around a Near Streamlined Beam Section

Zilong Guang, Hong Zhang

School of Science, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 21st, 2021; accepted: Oct. 22nd, 2021; published: Nov. 2nd, 2021

Abstract

Taking the nearly streamlined box girder section commonly used in long-span bridges as the research object, the flow field characteristics of the section are analyzed through the numerical simulation method of computational fluid dynamics (CFD). And use the Fluent software to numerically simulate the flow around the cross-section of the nearly streamlined main girder, and obtain the static mean aerodynamic force coefficient under the wind axis coordinate within the range of $-6^{\circ}\sim+6^{\circ}$ wind attack angle, and the post-processing software processes to obtain $\pm 5^{\circ}$ Schematic diagram of flow field distribution of bridge section under wind attack angle (including pressure

distribution diagram, velocity distribution diagram and streamline diagram). The analysis results show that the wind attack angle is the main factor affecting the mean aerodynamic force coefficient of the beam section, and as the wind attack angle increases, the drag coefficient first decreases and then increases, the lift coefficient gradually increases, and the torque coefficient gradually decreases.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Mean Aerodynamic Fore Coefficient, Bridge Engineering, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CFD 是近年来快速发展的一种研究方法, 该方法基于流体动力学的基本理论, 借助计算机技术来模拟桥梁结构的流场分布以及风 - 结构的相互作用。目前 CFD 技术可以按实际的风环境进行仿真和模拟, 能直观的表现出桥梁结构周围的流场特征[1]。在桥梁模型进行风洞试验前, 可以通过 CFD 技术对其进行数值模拟, 为试验方案的可行性进行预测, 避免因试验方案错误造成资源浪费[2]。利用计算流体力学软件 Fluent, 对某近流线型主梁断面绕流进行仿真模拟, 计算静力三分力系数, 并用后处理软件 Tecplot 得到 $\pm 5^\circ$ 攻角下箱梁断面的压强、速度分布图和流线图。

2. 静力三分力系数

对于处于静止风场中的桥梁断面而言, 来流经过断面必然发生绕流, 从而在断面表面产生风压。根据伯努利方程:

$$P + \rho U^2 = \text{常数} \quad (1)$$

气流速度较快的点的风压将小于速度较慢者, 从而整个绕流场存在压力差。沿断面竖向对压力进行积分则可得到升力荷载, 沿横向积分可得到阻力荷载。此外, 由于升力、阻力作用点一般与断面形心不一致, 断面还存在扭矩荷载。作用在断面的升力、阻力及扭转力矩就是所谓的静力三分力[3]。在风轴坐标系下, 断面的静力三分力如图 1 所示:

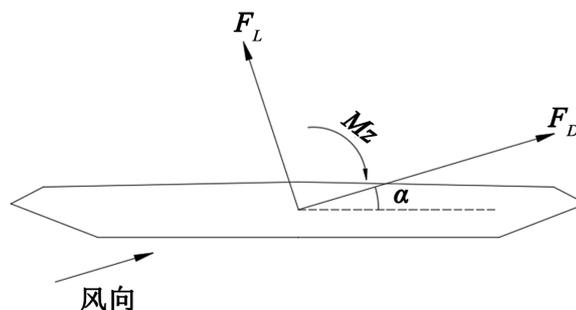


Figure 1. Static mean aerodynamic force coefficient in wind axis coordinates
图 1. 风轴坐标下的静力三分力

在其他条件不变的情况下, 形状类似的几个截面的静力三分力与其特征尺寸成比例, 因此引入无量纲的静力三分力系数来描述相同形状截面所共有的静力风荷载特性。断面在风轴坐标系下的静力三分力系数计算式为:

$$\text{阻力系数: } C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D} \quad (2)$$

$$\text{升力系数: } C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 B} \quad (3)$$

$$\text{扭矩系数: } C_M = \frac{M_T}{0.5\rho U^2 B^2} \quad (4)$$

式中: F_D 为单位长度桥梁的阻力(N); F_L 为单位长度桥梁断面的升力(N); M_T 为单位长度桥梁断面的扭矩(N·m); ρ 为空气的密度(kg/m^3); D 为桥梁断面的高度(m); B 为桥梁断面的宽度(m); U 为来流风速(m/s) [4]。

3. 主梁断面绕流的数值模拟

背景工程以某主跨 1098 m 的悬索桥为研究对象, 该桥梁断面采用闭口近流线型钢箱梁, 梁宽 38.6 m, 高 3.5 m。通过 Fluent 软件对主梁断面流场进行数值模拟, 为了减少计算工作量, 采用缩尺比 1:50。1:50 的缩尺比下主梁断面的尺寸见图 2。

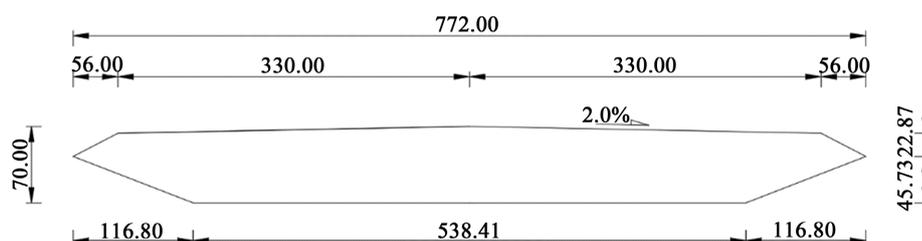


Figure 2. Dimensions of the main beam section after scaled down (unit: mm)

图 2. 主梁断面缩尺后尺寸(单位: mm)

3.1. 计算域的选取

为了减小边界对桥梁断面周围流场的影响, 即气流经过桥梁断面后产生的分离涡打到断面后方边界再反射回来, 影响原来流场。以及为了使外边界附近流场参数分布能够与边界条件相容, 确保模拟时获得较好的收敛结果。在模拟时计算域取 $12B \times 6B$ 的矩形区域(B 为模型断面宽), 入口距断面形心 $4B$, 出口距断面形心 $8B$, 上下边界距截面形心 $3B$ [5] [6] [7] [8]。计算域尺寸见图 3。

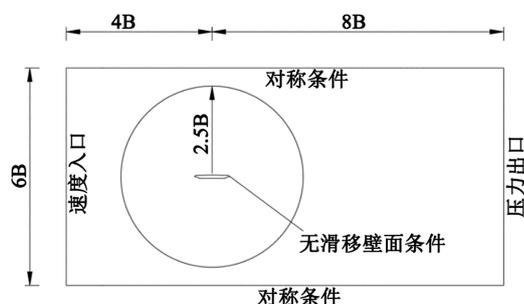


Figure 3. Schematic diagram of computational domain

图 3. 计算域示意图

3.2. 湍流模型及边界条件设置

采用 SST k- ω 湍流模型。空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ，分子运动粘度系数为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。由于主梁外形沿主跨方向不变，处理为二维，流动为定常不可压，静力按定常处理，不考虑温度的影响。桥梁断面为无滑移壁面；进口采用速度入口条件，其中速度大小为 7 m/s ，湍流强度为 5%，湍流粘度为 10%；出口采用压力出口边界，流体出口压力为 0；上下边界均采用对称边界[9] [10] [11] [12]。

3.3. 网格划分

采用 Pointwise 软件，对计算域进行网格划分。为考虑计算精度，在主梁断面模型附近采用非结构化网格以适应复杂的变化，其余区域采用结构化网格。在主梁断面外先设置边界层(取 0.02 mm)。靠近桥梁断面的区域网格适当加密，远离桥梁断面的区域网格适当稀疏，中间区域合理过渡，最终网格数目为 133,680 个[13] [14]。网格划分如图 4 和图 5 所示。

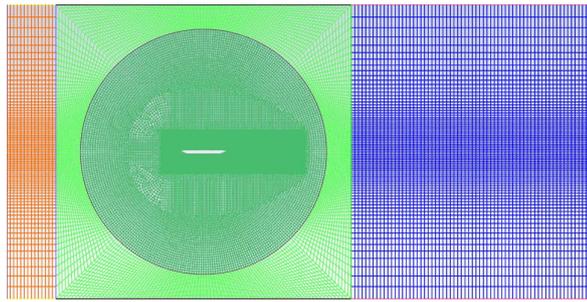


Figure 4. Schematic diagram of the overall grid of the flow field around a streamlined beam section
图 4. 近流线型梁断面绕流流场整体网格示意图

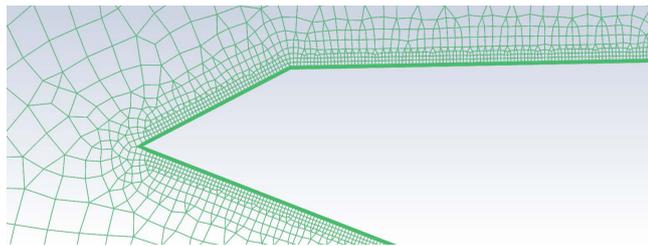


Figure 5. Schematic diagram of the local grid of the flow field around a streamlined beam section
图 5. 近流线型梁断面绕流流场局部网格示意图

4. 计算结果

4.1. 静力三分力系数模拟结果

图 6 为 $-6^\circ \sim +6^\circ$ 风攻角范围内风轴坐标下，阻力系数、升力系数和扭矩系数随风攻角变化示意图。

从图 6 中可以得到以下结论：

- 1) 风攻角为影响桥梁结构静力三分力系数的影响因素，且对升力系数影响最明显；
- 2) 阻力系数随着风攻角的增加先减小后增加：在风攻角由 -6° 变化到 0° 过程中，阻力系数变化趋势较大，而风攻角由 0° 变化到 $+6^\circ$ 过程中，阻力系数变化相对平缓；阻力系数在风攻角为 0° 时为 0.2512；
- 3) 风攻角由 -6° 增加到 $+6^\circ$ 过程中，升力系数逐渐增加；
- 4) 风攻角由 -6° 增加到 $+6^\circ$ 过程中，扭矩系数逐渐减小，且基本为线性关系；当风攻角为负值时，扭矩系数为正值；当风攻角为正数时，扭矩系数为负值。

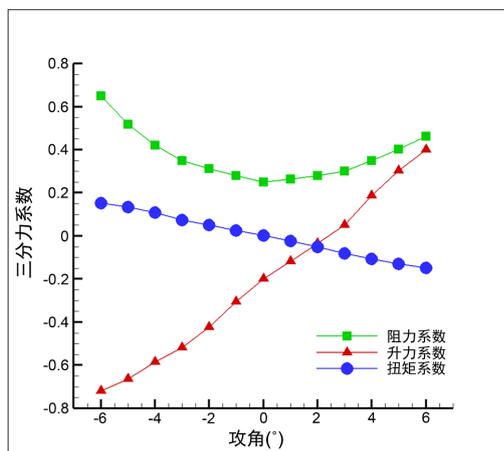


Figure 6. Schematic diagram of the mean aerodynamic force coefficient of a streamlined section changing with the angle of attack of the wind

图 6. 近流线型断面三分力系数随风攻角变化示意图

4.2. 流场分布示意图

经软件 Tecplot 后处理得到 $\pm 5^\circ$ 风攻角下梁断面的流场分布示意图(包括压强分布图、流速图和流线图)。如图 7 和图 8 所示。

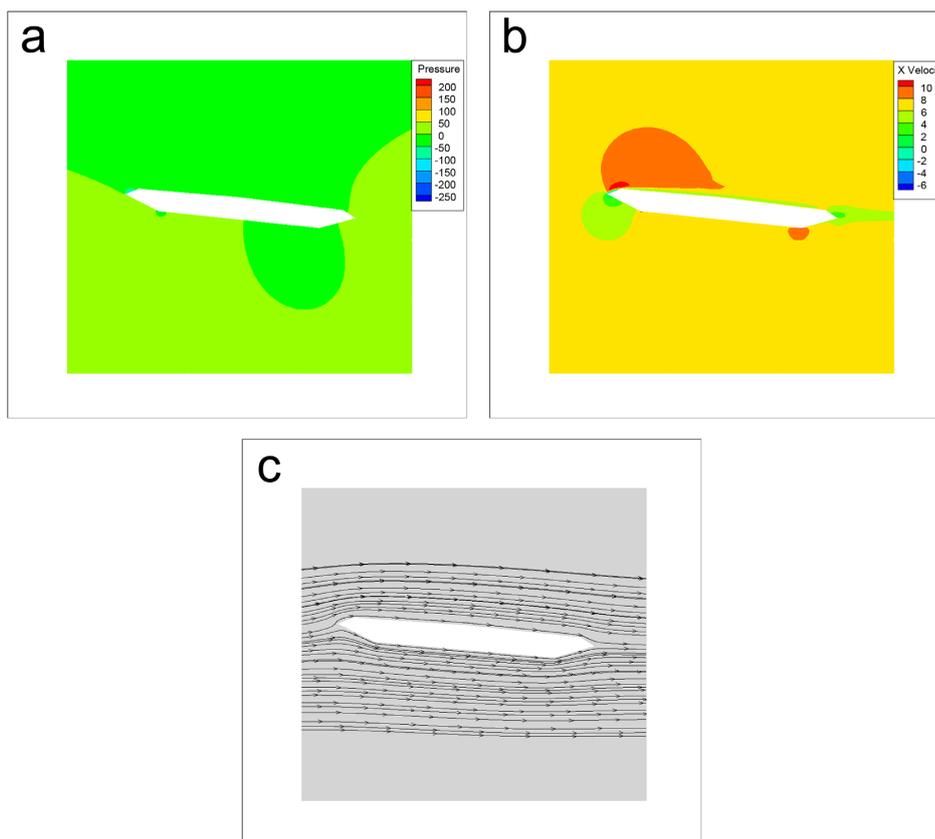


Figure 7. Schematic diagram of flow field distribution of nearly streamlined section at $+5^\circ$ wind attack angle. (a) Pressure distribution map; (b) Flow rate graph; (c) Streamline diagram

图 7. $+5^\circ$ 风攻角下近流线型断面流场分布示意图。(a) 压强分布图; (b) 流速图; (c) 流线图

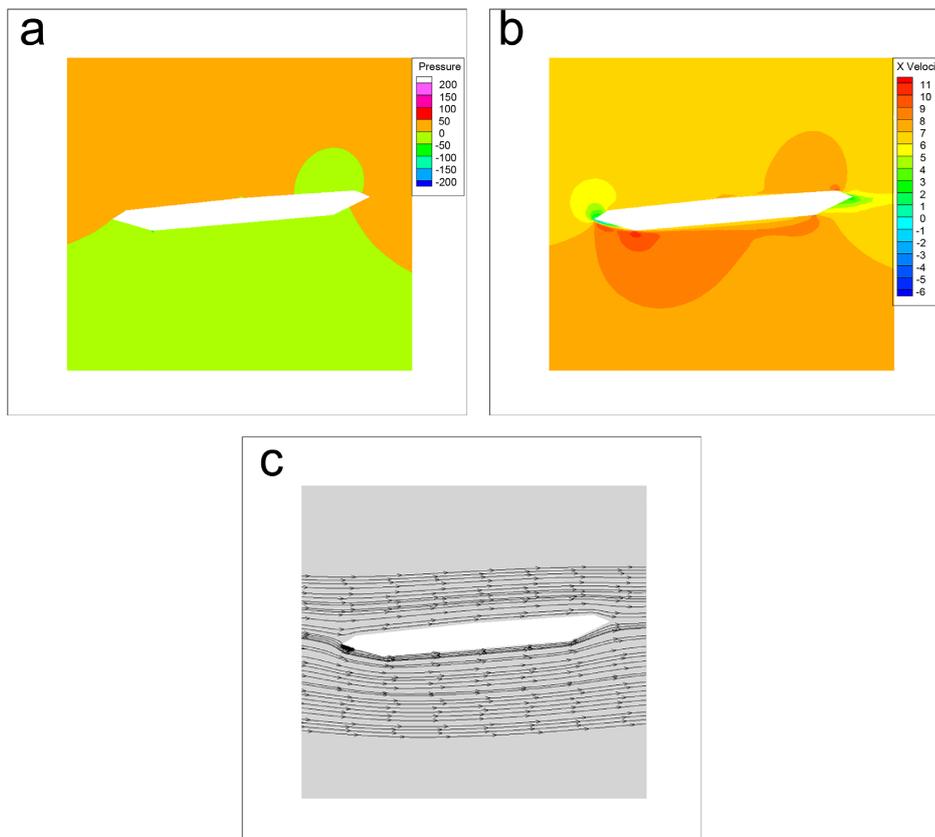


Figure 8. Schematic diagram of flow field distribution of nearly streamlined section at -5° wind attack angle. (a) Pressure distribution map; (b) Flow rate graph; (c) Streamline diagram

图 8. -5° 风攻角下近流线型断面流场分布示意图。(a) 压强分布图; (b) 流速图; (c) 流线图

从图 7 和图 8 中可以得到以下结论:

- 1) 对压强分布图而言, 当来流风速流经截面时, 在截面的迎风面出现了较大的高压区, 而在截面的顶部和底部都出现了负压区;
- 2) 对流速图而言, 对气流受到阻碍速度明显减小;
- 3) 对流线图而言, 断面尾流区没有出现涡脱现象;
- 4) 能直观显示主梁断面周围的流场特性。

5. 结语

桥梁断面静力三分力系数是计算桥梁静风荷载的重要参数, 在桥梁风工程研究中具有重要意义。本文通过数值模拟对某悬索桥的主梁断面静力三分力系数进行研究, 得到以下结论:

- 1) 通过合理的建模和设置参数, Fluent 能够获得该断面的三分力系数关于风攻角的变化规律;
- 2) 风攻角为影响桥梁结构静力三分力系数的影响因素, 且对升力系数影响最明显;
- 3) 随着风攻角的增大, 阻力系数先减小后增加, 升力系数逐渐增加, 扭矩系数逐渐减小;
- 4) 该仿真结果可为实际风洞试验方案提供参考。

参考文献

- [1] 曹曙阳. 计算流体力学在风工程中的应用[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集(上册). 2009: 15.

-
- [2] 陈廷君. 采用 CFD 方法的钝体桥梁断面风阻系数研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3] 吴瑾, 夏逸鸣. 土木工程结构抗风设计[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 124.
- [4] 陈艾荣. JTG-T. 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [5] 原学明. 桥梁典型截面静风系数数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [6] 李薇, 胡兆同, 李加武, 张茜. 桥梁断面三分力系数数值模拟[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 37-40+45.
- [7] 谭红霞, 陈政清. CFD 在桥梁断面静力三分力系数计算中的应用[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 68-72.
- [8] 张志田, 张显雄, 陈政清. 桥梁气动力 CFD 模拟中湍流模型的应用现状[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 1-8.
- [9] 安里鹏, 李德建, 王元礼, 袁鹏. 基于 CFD 方法的高墩大跨箱梁桥静风力系数参数影响研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(1): 143-149+188.
- [10] 王锋. 基于 CFD 对大跨度连续桥梁抗风性能分析[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 83-86+167.
- [11] 汪家继, 樊健生, 聂建国, 杨小刚, 李连友. 大跨度桥梁箱梁的三分力系数识别研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 95-104.
- [12] 肖鸿治. 高速铁路典型桥梁断面静力三分力系数研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [13] 项海帆, 葛耀君. 现代桥梁抗风理论及其应用[J]. 力学与实践, 2007(1): 1-13.
- [14] 应旭永. 大跨度桥梁颤振性能的数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.