

Aerodynamic Characteristic Analysis of Box Girder Section in TSI Gusty Wind

Fei Huang, Lin Huang*, Junji Zhou

School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu Sichuan
Email: 1264411210@qq.com, *842405730@qq.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 10th, 2019; published: Dec. 17th, 2019

Abstract

The aerodynamic forces on box girder section and flow field are simulated by CFD (computational fluid dynamics) method in TSI (Technical Specifications for Interoperability) gusty wind at the angles of attack from -5° to $+5^\circ$. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations for 2D incompressible unsteady flow are integrated with RNG (Renormalized Group) $k-\varepsilon$ turbulence model in this research. The time histories of the aerodynamic forces on the box girder section in TSI gusty wind slowly fluctuate around the reference values based on the quasi-steady assumption, but the oscillation amplitudes at high angles of attack are relatively large. The sudden change of drag coefficient, the change of lift coefficient lagging the wind speed of the TSI gust, and the favorable and adverse pressure gradients are observed and analyzed.

Keywords

TSI Gusty Wind, Box Girder Section, Aerodynamic Characteristic, Numerical Simulation

TSI阵风作用下箱梁断面的气动特性分析

黄菲, 黄林*, 周俊吉

西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都
Email: 1264411210@qq.com, *842405730@qq.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月10日; 发布日期: 2019年12月17日

摘要

采用二维非定常不可压缩雷诺平均N-S方程结合RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 模拟分析了TSI (Technical Specifications for Interoperability)阵风以 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 攻角作用下箱梁断面的气动力及流场特性。TSI阵风作用过

*通讯作者。

程中,箱梁断面的气动力总体上围绕准定常假设的气动力做小幅波动,但较大风攻角时箱梁断面的气动力波动幅度较大。分析探讨了箱梁断面的阻力系数跳跃现象、升力系数变化滞后于TSI阵风风速变化、流场静压分布的顺压和逆压梯度特性等。

关键词

TSI阵风,箱梁断面,气动特性,数值模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

非定常风速的模拟通常有以下3种方法:1)阵风系数法将非定常风速简化为定常风速,采用风速峰值计算风荷载。对于动力响应不敏感的刚性桥梁结构可采用该方法。如,公路桥梁抗风设计中采用静阵风系数计算±3°风攻角内桥梁主梁的横向最大静阵风荷载[1][2]。2)频域方法基于风谱表达非定常的风速,然后在时域进行动力响应分析。该方法能够充分考虑结构与动力响应间的相关性[3]。3)理想阵风法采用时间相关确定阵风时程,采用积分法计算系统的动力响应。该方法可以快速获得系统的最大响应,不需要进行复杂的分析计算。TSI (Technical Specifications for Interoperability)阵风模型[4]就是其中一种,可以有效近似风速最大值邻域的随机过程,常用于横向风作用下列车的脱轨分析[5][6]、带风屏障的高架桥上的高速列车的气动特性分析[7]。在这些应用研究中,均基于准定常假设,直接应用静力三分力系数计算TSI阵风作用下列车的气动力。本文基于冻结湍流假设(frozen turbulence hypothesis)[8][9],应用FLUENT软件,采用CFD (Computational Fluid Dynamics)方法研究TSI阵风作用过程中箱梁断面的气动力及流场特性。

2. 物理模型

2.1. 阵风模型

本文采用仅考虑确定性阵风部分TSI阵风模型[4][7]。阵风风速 $V(t)$ 定义:

$$V(t) = \beta(t)U \quad (1)$$

式中, U 为相应的均匀来流风速,取 $U = 10 \text{ m/s}$; $\beta(t)$ 为考虑阵风效应的系数:

$$\beta(t) = \begin{cases} A + (A - 1)\sin(\pi t + 0.5\pi) & 1 \leq t \leq 1.5 \\ A + (A - 1)\sin(\pi t - 0.5\pi) & 1.5 \leq t \leq 2 \\ 2 - A - (A - 1)\sin(\pi t - 1.5\pi) & 3 \leq t \leq 3.5 \\ 2 - A + (A - 1)\sin(\pi t + 2.5\pi) & 3.5 \leq t \leq 4 \\ 1.0 & t \text{取其它值} \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为静阵风风速振幅,根据文献[4][7]取1.7。

2.2. 箱梁模型及计算域

参考文献[10]中的桥梁模型,箱梁断面如图1所示。风攻角采用 $\alpha = -5^\circ \sim +5^\circ$ 。CFD计算时取缩尺

比 1:40。为了防止箱梁断面附近的分离旋涡由外边界反射回流场、外边界附近的流场参数分布与外边界条件不相容,计算域(如图 2)取 $20B \times 30B$ 的矩形区域(B 为箱梁断面的计算宽度, $B = 0.30\text{ m}$), 以确保计算结果收敛。其中, 入口及上/下侧边界距离箱梁断面形心 $10B$ 、出口边界距离箱梁断面形心 $20B$ 。计算域边界定义: 入口边界为速度入口(velocity-inlet)、上下边界为对称边界(symmetry)、出口边界为压力出口 (pressure-outlet)、箱梁表面为无滑移壁面(wall)。自定义函数确定入口 TSI 阵风风速。

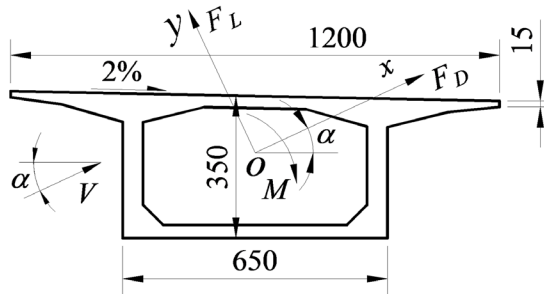


Figure 1. The section of box girder (unit: cm)
图 1. 箱梁断面(单位: cm)

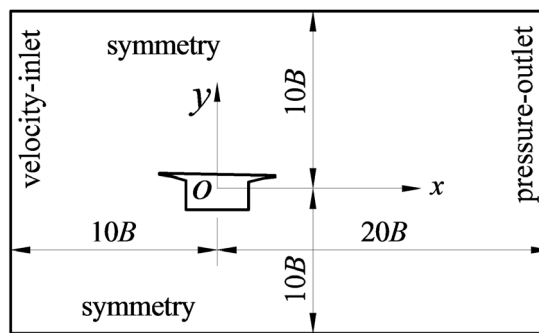


Figure 2. Numerical simulation domain
图 2. 数值模拟计算域

2.3. 气动力

定义风轴坐标系下均匀来流风速 U 以风攻角 α 作用时的箱梁断面的阻力系数 $C_D(\alpha)$ 、升力系数 $C_L(\alpha)$ 和力矩系数 $C_M(\alpha)$:

$$C_D(\alpha) = F_D(\alpha) / (0.5\rho U^2 BL) \quad (3a)$$

$$C_L(\alpha) = F_L(\alpha) / (0.5\rho U^2 BL) \quad (3b)$$

$$C_M(\alpha) = M(\alpha) / (0.5\rho U^2 B^2 L) \quad (3c)$$

式中, B 为箱梁断面的计算宽度, 取 $B = 0.30\text{ m}$; L 为箱梁的节段长度, 此处为二维断面, 取 $L = 1.0\text{ m}$; ρ 为空气密度, 取 $\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$; $F_D(\alpha)$ 、 $F_L(\alpha)$ 和 $M(\alpha)$ 分别为风轴坐标系下作用在箱梁断面上的阻力、升力和力矩(箱梁断面形心为扭转中心)(如图 1), 均取非定常计算结果的平均值。

定义风轴坐标系下 TSI 阵风以风攻角 α 作用时箱梁断面的阻力系数 $C_{D,G}(\alpha, t)$ 、升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 和力矩系数 $C_{M,G}(\alpha, t)$:

$$C_{D,G}(\alpha, t) = F_{D,G}(\alpha, t) / (0.5\rho U^2 BL) \quad (4a)$$

$$C_{L,G}(\alpha,t) = F_{L,G}(\alpha,t) / (0.5\rho U^2 BL) \quad (4b)$$

$$C_{M,G}(\alpha,t) = M_G(\alpha,t) / (0.5\rho U^2 B^2 L) \quad (4c)$$

式中, $F_{D,G}(\alpha,t)$ 、 $F_{L,G}(\alpha,t)$ 和 $M_G(\alpha,t)$ 分别为 t 时刻箱梁断面的阻力、升力和力矩,其正方向同图1所示的均匀来流作用下的静力三分力。

根据准定常假设, TSI 阵风作用下箱梁断面的阻力系数、升力系数和力矩系数的参考值 $C_{D,G0}(\alpha,t)$ 、 $C_{L,G0}(\alpha,t)$ 和 $C_{M,G0}(\alpha,t)$ 与均匀来流作用下的静力三分力系数存在如下关系:

$$C_{D,G0}(\alpha,t) = \beta^2(t)C_D(\alpha) \quad (5a)$$

$$C_{L,G0}(\alpha,t) = \beta^2(t)C_L(\alpha) \quad (5b)$$

$$C_{M,G0}(\alpha,t) = \beta^2(t)C_M(\alpha) \quad (5c)$$

3. 数学模型

3.1. 控制方程

采用有限体积法求解基于 Boussineq 涡黏性模型的二维非定常不可压缩雷诺平均 N-S 方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{ef} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{ef} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (6b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{ef} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{ef} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (6c)$$

式中, ρ 为空气密度, 取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; u 和 v 分别为流体沿 x 和 y 坐标轴方向的速度; t 为计算时间; $\tilde{p} = p + 2\rho k/3$, p 为空气静压, k 为湍流动能; $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$, μ 为空气的动力黏性系数, 取 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, μ_t 为空气的湍流黏性系数。

k 和 μ_t 由 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的运输方程[11]确定:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + S_k \quad (7a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + S_\varepsilon - R_\varepsilon \quad (7c)$$

式中, α_k 和 α_ε 分别代表 k 和 ε 的逆有效 Prandtl 常数; R_ε 代表平均应变率对湍流耗散率 ε 的影响; S_k 、 S_ε 和 R_ε 的详细定义参见文献[11] [12]。高雷诺数($\mu \ll \mu_t$)下, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 。本文采用的湍流模型常数: $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_v = 100$, $\alpha_0 = 1.0$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta \approx 0.012$, $C_\mu = 0.0845$ 。

3.2. 计算网格及时间步长

以风攻角 $\alpha = +4^\circ$ 为例, 由图3所示的3种网格计算均匀来流风速 $U = 10 \text{ m/s}$ 作用下箱梁断面的静力三分力系数, 对比分析计算结果后确定 TSI 阵风分析的计算网格。采用四边形结构化网格对计算域进行网格划分, 其中贴体网格高度根据文献[12] [13]确定。网格1的总网格数量为 62,828, 贴体网格高度为 1.0 mm, 计算得到 $y^+ \leq 13$ 。网格2在网格1基础上对尾流区域进行了网格加密, 总网格数量为 64,351。

网格 3 进一步将贴体网格高度减小到 0.5 mm, 并对箱梁表面附近区域进行了网格加密, 总网格数量为 109,060。采用迭代时间步长 0.0001 s 计算得到的 3 种网格下的箱梁断面的静力三分力系数差别不大, 与风洞试验结果[10]对比如表 1 所示。网格 1 可以满足计算精度要求。因此, 采用网格 1 的方式对其余风攻角下的计算域进行网格划分。

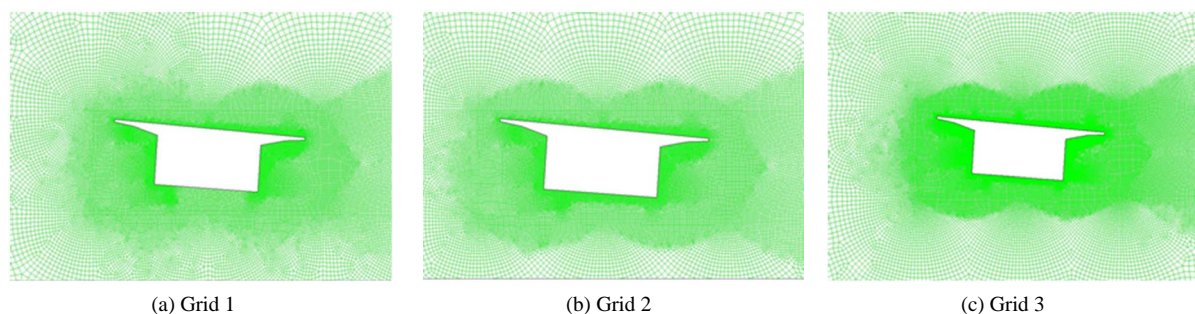


Figure 3. Local meshes of three grid schemes
图 3. 3 种网格局部图

Table 1. Comparison of the CFD results and wind tunnel test data of static coefficients of aerodynamic forces
表 1. CFD 静力三分力系数与风洞试验结果对比

三分力系数	试验结果[10]	网格 1		网格 2		网格 3	
		CFD 计算	相对误差	CFD 计算	相对误差	CFD 计算	相对误差
C_D	0.4127	0.4793	16.14%	0.4822	16.84%	0.4793	16.14%
C_L	0.4365	0.4814	10.29%	0.5025	15.12%	0.5266	20.64%
C_M	0.1157	0.1400	21.00%	0.1388	19.97%	0.1393	20.40%

进一步采用网格 1, 分别以迭代时间步长 0.00005 s 和 0.0005 s 计算箱梁断面的静力三分力系数。计算结果及相对于风洞试验结果的误差如表 2 所示。可以看到, 将迭代时间步长增大到 0.0005 s 后, CFD 数值计算的精度并没有受到明显的影响。因此, 本文的 CFD 计算均采用迭代时间步长 0.0005 s。

Table 2. Numerical results of static coefficients of aerodynamic forces at different iteration time steps
表 2. 不同迭代时间步长的静力三分力系数计算结果

迭代时间步长	C_D		C_L		C_M	
	CFD 计算	相对误差	CFD 计算	相对误差	CFD 计算	相对误差
0.00005 s	0.4791	16.09%	0.4691	7.47%	0.1394	20.48%
0.0001 s	0.4793	16.14%	0.4814	10.29%	0.1400	21.00%
0.0005 s	0.4796	16.21%	0.4823	10.49%	0.1401	21.09%

4. 箱梁断面的静力三分力系数验证

均匀来流风速 $U = 10 \text{ m/s}$ 以风攻角 $\alpha = -5^\circ \sim +5^\circ$ 作用, 计算得到箱梁断面的静力三分力系数总体上大于风洞试验结果[10], 相对误差 20% 左右, 如表 3 所示。计算误差可能来源于箱梁表面附近的气流分离和再附, 以及旋涡的脱落使得流场比较复杂, 影响了 CFD 数值计算的精度。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型及计算条件也限制了计算精度。CFD 计算结果总体上满足箱梁断面气动力的分析要求。

Table 3. Comparison of CFD results and wind tunnel data of static coefficients of aerodynamic forces
表 3. CFD 计算的静力三分力系数与风洞试验结果的对比

风攻角 (度)	C_D			C_L			C_M		
	CFD 计算	风洞试验[10]	相对误差	CFD 计算	风洞试验[10]	相对误差	CFD 计算	风洞试验[10]	相对误差
-5	0.4206	0.3290	27.84%	0.4839	0.4914	-1.53%	0.2271	0.1798	26.31%
-4	0.3913	0.3279	19.34%	0.6406	0.5820	10.07%	0.2259	0.1807	25.01%
-3	0.3931	0.3298	19.19%	0.8009	0.6438	24.40%	0.2193	0.1691	29.69%
-2	0.3778	0.3413	10.69%	0.8139	0.6366	27.85%	0.1733	0.1543	12.31%
-1	0.4047	0.3574	13.23%	0.7659	0.6041	26.78%	0.1625	0.1410	15.25%
0	0.4231	0.3709	14.07%	0.7060	0.5584	26.43%	0.1611	0.1298	24.11%
1	0.4340	0.3803	14.12%	0.6487	0.5032	28.91%	0.1461	0.1211	20.64%
2	0.4553	0.3920	16.15%	0.5882	0.4712	24.83%	0.1423	0.1173	21.31%
3	0.4714	0.4042	16.63%	0.5221	0.4513	15.69%	0.1378	0.1163	18.49%
4	0.4796	0.4127	16.21%	0.4823	0.4365	10.49%	0.1401	0.1157	21.09%
5	0.4873	0.4251	14.63%	0.4607	0.4109	12.12%	0.1386	0.1153	20.21%

5. TSI 阵风作用下箱梁断面的气动力及流场特性

5.1. 箱梁断面的气动力特性

当 TSI 阵风以风攻角 $\alpha = -5^\circ \sim +5^\circ$ 作用时, CFD 计算得到的阻力系数 $C_{D,G}(\alpha, t)$ 、升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 和力矩系数 $C_{M,G}(\alpha, t)$ 总体上分别围绕参考值 $C_{D,G0}(\alpha, t)$ 、 $C_{L,G0}(\alpha, t)$ 和 $C_{M,G0}(\alpha, t)$ 小幅波动, 但较大风攻角时三分力系数的波动幅度较大。以 $\alpha = 0^\circ, \pm 2^\circ, -4^\circ, \pm 5^\circ$ 风攻角为例, CFD 计算得到的阻力系数、升力系数和力矩系数时程曲线分别如图 4~6 所示。TSI 阵风作用下箱梁断面的气动力有以下基本特性。1) TSI 阵风作用下的阻力与准定常假设的阻力基本一致, 但负攻角较大时阻力系数波动幅度较大, 如图 4(c) 所示。在风速的峰/谷值时刻 $t = 1.5 \text{ s}, 3.5 \text{ s}$ 后, 阻力系数时程曲线 $C_{D,G}(\alpha, t)$ 存在明显的跳跃现象, 如图 4 所示。其原因在于 $t = 1.5 \text{ s}, 3.5 \text{ s}$ 时刻风速的导数 dV/dt 的理论值不存在。理论上, CFD 迭代计算的时间步长越小, 这种跳跃现象越明显。当风速 $V(t) < U$ 且风速减小到风速谷值附近时, 存在轻微负阻力现象, 如图 4(b) 和图 4(d) 所示。2) 正/负风攻角较大时, 阻力和升力系数时程的波动幅度较大。在风速 $V(t) > U$ 的区段, 即 $t \in [1, 2] \text{ s}$, 攻角 $\alpha = -4^\circ, -5^\circ$ 的阻力系数 $C_{D,G}(\alpha, t)$ 和攻角 $\alpha = -4^\circ, \pm 5^\circ$ 的升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 的波动幅度较大。但在风速 $V(t) < U$ 的区段, 即 $t \in [3, 4] \text{ s}$, 三分力系数时程曲线在风速谷值附近均有波动幅度减小趋势。3) TSI 阵风作用下升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 变化滞后于阵风风速变化。在 $V(t) < U$ 的区段, 风速由谷值逐步增大的初始阶段, 升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 明显小于 $C_{L,G0}(\alpha, t)$; 在风速上升的末段, 升力系数 $C_{L,G}(\alpha, t)$ 相对于 $C_{L,G0}(\alpha, t)$ 有一定程度的偏离, 如图 5(b)、图 5(d)。4) 风攻角较小时, 在风速 $V(t) < U$ 区段的风速上升末段力矩系数 $C_{M,G}(\alpha, t)$ 明显大于 $C_{M,G0}(\alpha, t)$, 如图 6(b)、图 6(d)。

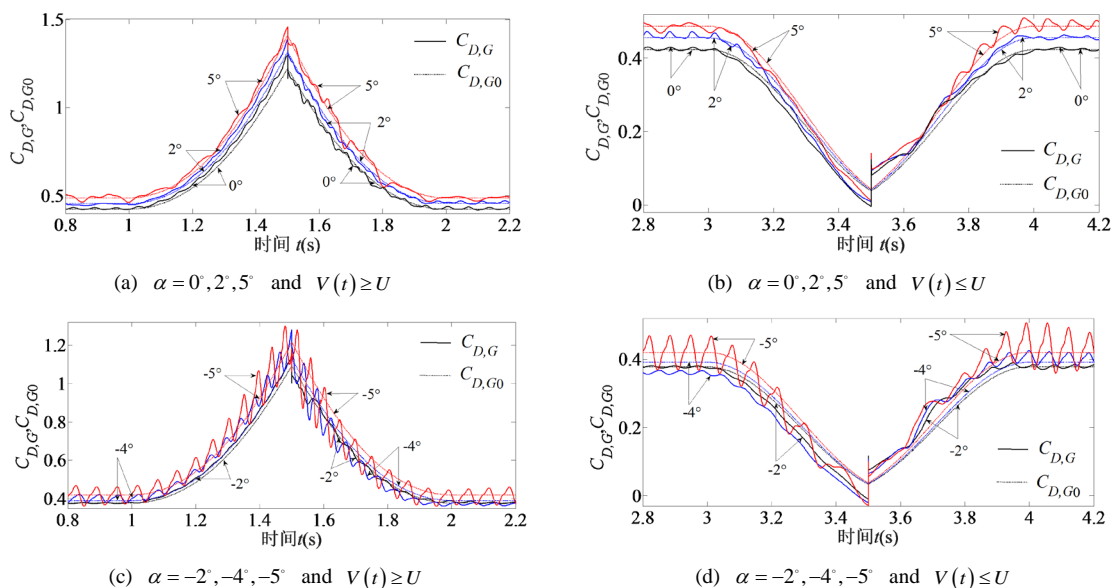


Figure 4. Time history of the coefficient of drag in TSI gusty wind

图 4. TSI 阵风作用下的阻力系数时程曲线

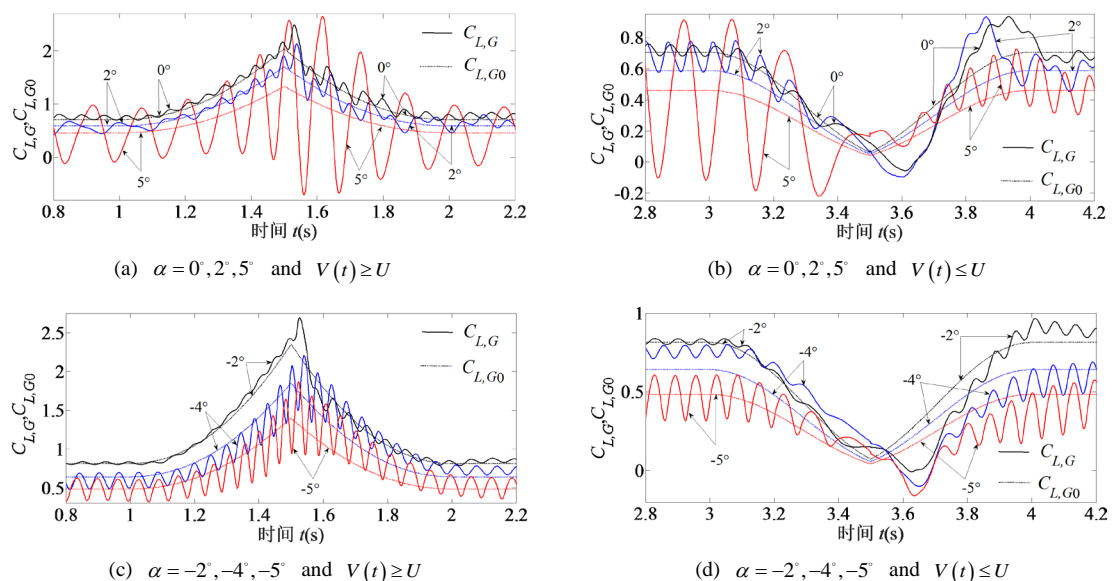


Figure 5. Time history of the coefficient of lift in TSI gusty wind

图 5. TSI 阵风作用下的升力系数时程曲线

5.2. 箱梁断面的绕流流场特性

以风攻角 $\alpha = 0^\circ$ 为例，TSI 阵风作用下计算得到的流场静压分布如图 7 (仅显示箱梁附近计算区域 $x \in [-1.0, 2.0]m$ ， $y \in [-1.0, 1.0]m$) 所示。箱梁断面的气动力计算仅考虑箱梁表面的静压的相对值，故流场入口的初始静压设置为零，出口设置为压力出口并且固定静压为 0 Pa。在风速大于均匀来流的时段 ($t \in [1.0, 2.0]s$)，箱梁表面的远场静压随计算时间增大而增大。当入口风速由 10 m/s 逐步增大到最大值 17 m/s 时 ($t \in [1.0, 1.5]s$)，CFD 计算得到的入口静压由 0 Pa 逐渐增大到约 245 Pa。当入口风速达到最大值 17 m/s 后，再计算 1 个迭代时间步，入口静压急剧下跌到约 -480 Pa；然后，入口风速逐步减小到 10 m/s

时($t \in [1.5, 2.0]$ s), 入口静压由约-238 Pa 逐步增大到 0 Pa。入口静压的跳跃正是前述箱梁断面的阻力系数在 $t = 1.5$ s 跳跃的原因。在阵风风速小于均匀来流的时段($t \in [3.0, 4.0]$ s), 箱梁表面的远场静压随计算时间增大而减小。当入口风速由 10 m/s 逐步减小到最小值 3 m/s 时, CFD 计算得到的入口静压由 0 Pa 逐渐减小到约-242 Pa。当入口风速达到最小值 3 m/s 后, 再计算 1 个迭代时间步, 入口静压急剧增加到约 482 Pa; 然后, 入口风速由最小值 3 m/s 逐步增大到 10 m/s 时($t \in [3.5, 4.0]$ s)时, 入口静压由约 242 Pa 逐步减小到 0 Pa。此处的入口静压跳跃也是前述箱梁断面的阻力系数在 $t = 3.5$ s 跳跃的原因。

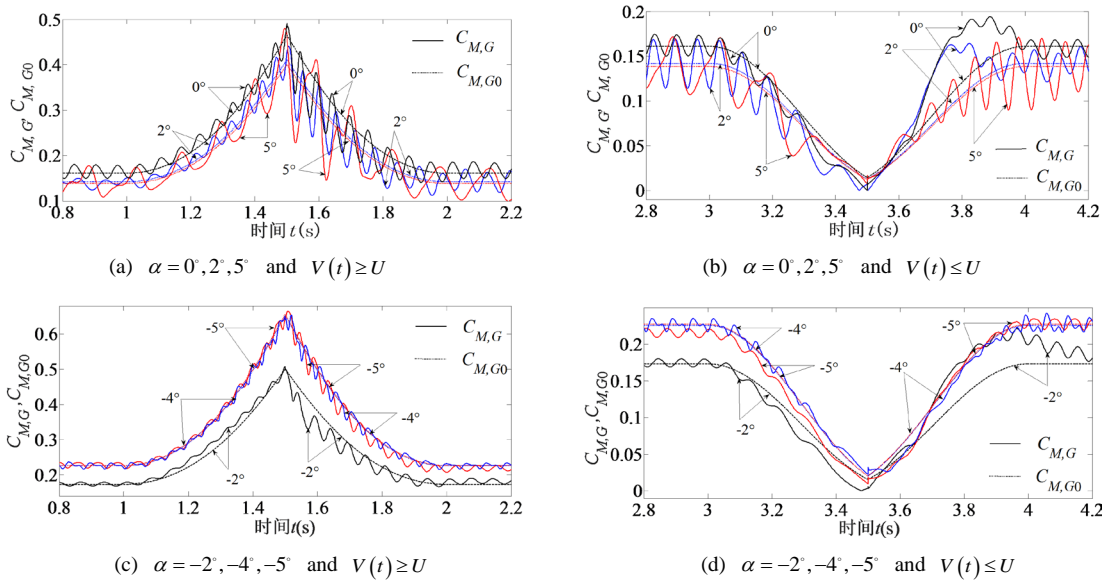
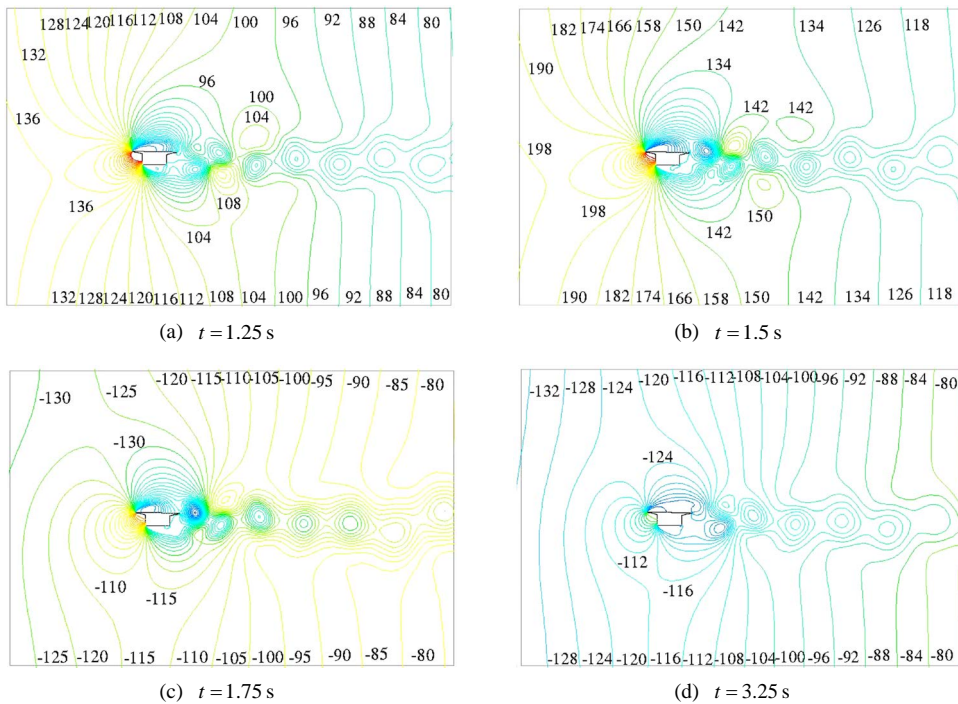


Figure 6. Time history of the coefficient of moment in TSI gusty wind
图 6. TSI 阵风作用下的力矩系数曲线



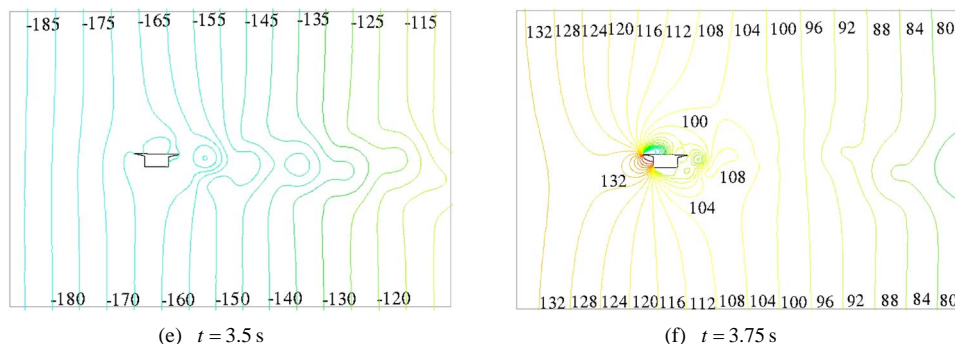


Figure 7. Static pressure distribution at angle of attack of 0° (unit: Pa)

图 7. 0° 风攻角静压分布(单位: Pa)

在风速增大时段($t \in [1.0, 1.5]s$, $t \in [3.5, 4.0]s$), 从入口到出口的流场静压整体上由正压逐渐减少到 0 Pa, 形成顺压梯度 $\partial p / \partial x < 0$, 造成箱梁表面的阻力增加; 在风速减小时段($t \in [1.5, 2.0]s$, $t \in [3.0, 3.5]s$), 从入口到出口的流场静压整体上由负压逐渐增加 0 Pa, 形成逆压梯度 $\partial p / \partial x > 0$, 造成箱梁表面的阻力减小。流场静压的总体特点与 N-S 方程的分析结果一致, 但入口静压在 TSI 阵风风速峰/谷值时刻发生跳跃可能不真实。在风速大于均匀来流风速的时段($t \in [1.0, 2.0]s$), TSI 阵风使得箱梁的尾流旋涡增强了; 而在阵风风速小于均匀来流风速的时段($t \in [3.0, 4.0]s$), TSI 阵风使得箱梁的尾流旋涡减弱了。其余风攻角下的静压分布的计算结果类似, 除风攻角绝对值较大时, 箱梁的尾流旋涡更强外。

箱梁尾流旋涡分布特点可以进一步从图 8 所示的 0° 和 $+5^\circ$ 风攻角下的速度分布对比图中看到。

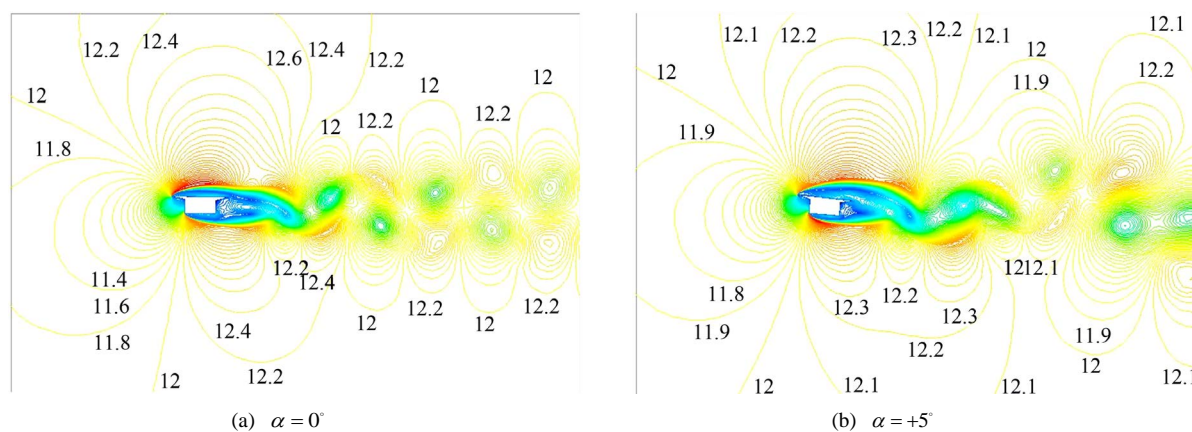


Figure 8. Comparison of velocity distribution at angles of attack of 0° and $+5^\circ$ at $t = 1.25 s$ (unit: m/s)

图 8. 0° 和 $+5^\circ$ 攻角在 $t = 1.25 s$ 时的速度分布对比(单位: m/s)

6. 结论

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟分析了 TSI 阵风以不同风攻角作用过程中箱梁断面的气动力及流场特性。分析得到以下主要结论: 1) TSI 阵风作用过程中箱梁断面的气动力总体上围绕准定常假设的气动力作小幅波动, 但风攻角较大时气动力波动幅度较大。2) CFD 计算得到的 TSI 阵风作用过程中箱梁断面的阻力系数在 TSI 阵风风速峰/谷值时刻存在跳跃、升力系数变化滞后于 TSI 阵风风速变化、流场整体静压存在顺压和逆压梯度等。TSI 阵风模型应用于箱梁的气动力数值模拟存在局限性, 将在后续的 CFD 数值模拟中改进。

基金项目

四川省教育厅重点项目(立项编号: 17ZA0367)、西华大学校重点项目(项目编号: Z1520610)、国家自然科学基金面上项目(项目编号: 51378442)资助。

参考文献

- [1] 同济大学. JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 陈艾荣, 黄鹏, 项海帆. 桥梁阵风风速系数研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 241-244.
- [3] Xu, Y.L. and Ding Q.S. (2006) Interaction of Railway Vehicles with Track in Cross-Winds. *Journal of Fluids and Structures*, **22**, 295-314. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.11.003>
- [4] BSI Standards Limited (2018) BS EN 14067-6 Railway Applications-Aerodynamics, Part 6: Requirements and Test Procedures for Cross Wind Assessment.
- [5] Proppe, C. and Wetzel, C. (2010) A Probabilistic Approach for Assessing the Crosswind Stability of Ground Vehicles. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, **48**, 411-428. <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.482158>
- [6] 曹亚博, 凌亮, 邓永权, 等. 强阵风环境下高速列车运行安全性研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 30-37.
- [7] 吴超, 杜礼明. 瞬态风场下带风屏障的高架桥上高速列车气动特性[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(2): 21-26.
- [8] Taylor, G.I. (1938) The Spectrum of Turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **164**, 476-490. <https://www.jstor.org/stable/97077>
<https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032>
- [9] Carrarini, A. (2006) Reliability Based Analysis of the Crosswind Stability of Railway Vehicles. Ph.D. Thesis, Technical University of Berlin, Berlin.
- [10] 刘钥, 陈政清, 张志田. 箱梁断面静风力系数的 CFD 数值模拟[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 133-137.
- [11] Yakhot, V. and Orszag, S.A. (1986) Renormalization Group Analysis of Turbulence I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*, **1**, 3-51. <https://doi.org/10.1007/BF01061452>
- [12] 黄林. 计算流体力学在桥梁风工程中的应用研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
- [13] Huang, L., Liao, H.L., Wang, B., et al. (2009) Numerical Simulation for Aerodynamic Derivatives of Bridge Deck. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **17**, 719-729. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.12.004>