

来流湍流度对圆柱绕流特性的影响

况中华

(上海大学 土木工程系,上海 200072)

摘要:采用大涡模拟方法,在雷诺数为 1.4×10^5 时,研究来流湍流度对圆柱绕流特性的影响规律。研究表明:湍流度会使得自由剪切层间的相互作用更加剧烈,使得流场的三维特性更为强烈;同时加强了尾流区湍流能量的相互传递,减少能量的耗散,从而延长了回流区长度。随着回流长度的增加,圆柱背风面的平均风压系数得以增大,最终导致圆柱阻力系数随之减小。在尾流湍流得到增强的同时,尾流区会形成多尺度的湍流,从而促使漩涡形成区形成大涡量的漩涡,导致尾流区的漩涡呈现多频率的脱落。

关键词:大涡模拟;圆柱绕流;湍流度;气动特性;涡脱

中图分类号:U441

文献标识码:A

Effects of inflow turbulence on the flow around a circular cylinder

KUANG Zhong-hua

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Effects of inflow turbulence on the flow around a circular cylinder have been studied using Large eddy simulation (LES) at Reynolds number of 1.4×10^5 . Results show that increased turbulence makes the free shear inter-layer interactions more intense, led to the flow's three-dimensional characteristics more intense. Moreover, turbulence reduces the energy dissipation, strengthens mutual transmission of wake turbulence energy, and thus prolongs the length of recirculation region. With increasing length of the recirculation, mean base pressure coefficients increased, resulting in the mean drag coefficient decreases. As the wake turbulence is enhanced the wake region will form enhanced multi-scale turbulent, which leads to appearing multiple frequencies in the power spectrum density of the wake flow.

Key words: Large eddy simulation; flow around circular cylinder; turbulence; aerodynamic characteristics; vortex shedding

圆柱绕流的湍流场在许多工程应用中有着很大的实际意义,如水力负荷海上桩和立管;索桥的风雨激振等。鉴于圆柱绕流问题在理论和工程中具有重大的意义,国内外许多学者围绕圆柱绕流问题作了许多的研究工作。早期的实验研究^[1-3]表明,边界层的流动机制取决于圆柱表面粗糙度,自由来流的湍流度,结构的长径比,风洞阻塞率以及雷诺数。前人对来流湍流度的影响研究并不多,Kwok^[3]曾通过风洞实验研究证明来流中的湍流有提高雷诺数和促进漩涡发展的效果。Tutor^[4-6]利用大涡模拟(LES)对三维圆柱绕流进行

模拟分析,研究证明湍流度对边界层的分离、转捩的发生影响很大。前人^[7-12]主要针对湍流度对边界层的影响进行分析研究流场特性的变化,本文在前人基础上分析讨论了尾流区涡街结构、能量及频率的变化,进一步研究了湍流度对整个流场特性的影响原理。

本文考虑了入口来流为均匀流、湍流度分别为0.6%及13%三种工况,通过大涡模拟方法(LES)进行模拟分析雷诺数为 1.4×10^5 的圆柱绕流,研究了来流的湍流度对圆柱壁面风压分布、气动力、尾流区涡脱频率及尾流区流场特性等的影

响规律。

1 数值计算方法

本文计算所采用的为三维大涡模拟(LES)的湍流模型。在大涡模拟方法中,利用滤波函数将 Navier - Stokes 方程进行滤波,并直接求解大尺度涡,而小尺度涡的影响则采用亚格子尺度模型(SGS)模拟。

经过滤波函数滤波后的不可压缩 Navier - Stokes 方程

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中 $\bar{U}_i$ - 滤波后速度分量; ρ - 流体密度; $\bar{P}$ - 滤波后压力; ν - 流体动力粘度; τ_{ij} - 亚格子应力张量。

亚格子应力 τ_{ij} 采用 Smagorinsky - Lilly 的亚格子尺度模型。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \sigma_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中 ν_t - 亚格子尺度的湍动粘度。

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

式中 $\bar{S} = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ 。

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中 Δ_i - 代表沿坐标轴 i 方向的网格尺寸; C_s - Smagorinsky 常数, 本文取 0.1。

2 计算模型

本文计算了雷诺数为 1.4×10^5 , 入口带有三种不同湍流强度的三维圆柱绕流。为了减小边界条件对计算的影响, 上游入口边界距离圆柱中心 $8D$, 圆柱上下两侧各取 $7D$, 为了让流体得到充分发展, 下游出口边界距离圆柱中心 $20D$, 圆柱展向长度取 $2D$, 见图 1。

入口边界采用速度入口 (velocity - inlet), 圆柱壁面采用无滑移边界 (no - slip wall), 上下两侧采用对称边界 (symmetry), 为了减小边界的影响, 模拟无限长圆柱, 圆柱展向边界采用周期性边界 (periodic), 出口边界采用自由出口 (free - outflow)。

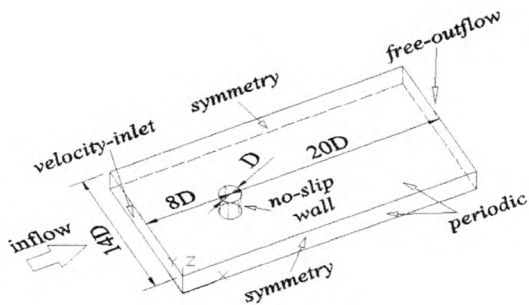
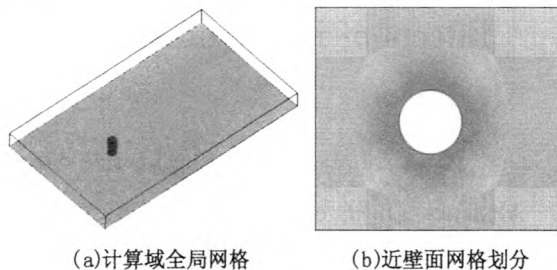


图1 计算模型示意图

Fig.1 Figure of computational model

计算域的网格划分为 $515 \times 258 \times 20$, 网格总数为 2 660 200, 如图 2 所示。圆柱周向采用 320 个节点划分, 近壁面最小网格尺寸达到 $1.5 \times 10^3 D$, 以便计算过程中能捕捉到小尺度的湍流变化。



(a) 计算域全局网格

(b) 近壁面网格划分

图2 计算域的网格划分

Fig.2 The mesh of computational field

3 计算结果分析

3.1 风压系数的分布

图 3 为圆柱壁面平均风压系数 (C_p) 及脉动风压系数 (C_p') 的周向分布, 是通过在壁面布置监测点监测数据处理而得。从图 3(a) 能发现: $\theta = 0$ 处, 即圆柱滞点处的风压系数达到最大值为 1, C_p 沿着圆柱周向逐渐减小, 当变化至 $\leq 60^\circ$ 或 $\geq 300^\circ$ 范围内, 风压系数的分布几乎一致。还可以看出, 最小风压系数 ($C_{p_{\min}}$) 会随着来流边界湍流度的增大而增大 ($|C_{p_{\min}}|$ 减小); 基压系数 (C_{p_b}) 也随着来流边界湍流度的增大而增大。

从图 3(b) 中可以看出, 均匀流和 $Iu = 0.6\%$ 有相同变化趋势: 在滞点处脉动风压系数达到最小值 0, 沿着周向慢慢增大, 达到峰值后逐渐下降最后趋于平缓。值得注意的是, 当湍流度 $Iu = 13\%$ 时, 其脉动风压系数的分布趋势与前两个工况有所不同: 滞点处的脉动风压系数不为 0, 同时 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 范围内脉动风压系数变化较平缓。

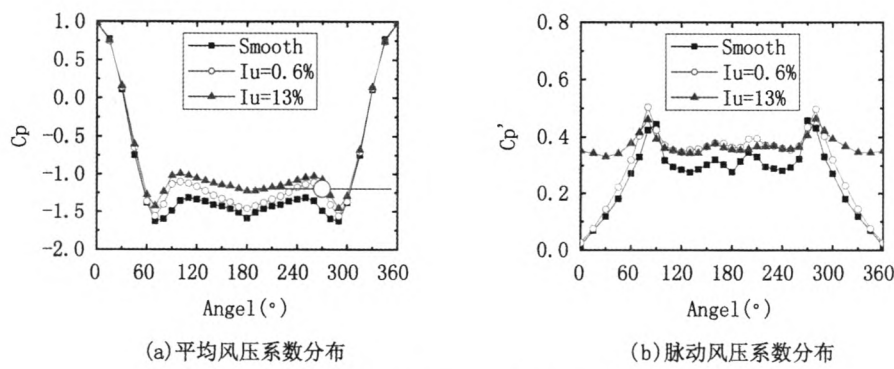


图3 湍流度对风压系数的影响

Fig.3 The effect of turbulence on wind pressure coefficients

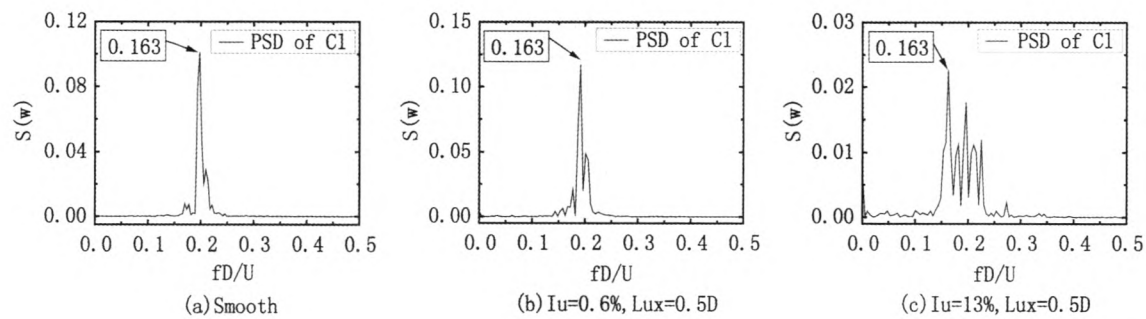


图4 升力系数的功率谱

Fig.4 The PSD of lift coefficient

表 1 气动特性表

Tab.1 Table of aerodynamic characteristic

工况	周向 网格数	展向 网格尺寸	湍流度 $I_u/\%$	湍流积分 尺度 Lux	St	平均阻力 系数 C_d	基压系数 $C_{pb}(180^\circ)$	分离角 $\theta/^\circ$	回流长度
case1	320	D/20	0	0	0.198	1.336	-1.59	89.92	0.753D
case2	320	D/20	0.6	0.5D	0.191	1.25	-1.458	84.5	0.762D
case3	320	D/20	13	0.5D	0.163	1.112	-1.226	83.36	0.963D

3.2 气动力分析

表 1 为均匀流 ($I_u = 0, Lux = 0$) 及不同湍流度情况下的气动特性表。

从表 1 发现,均匀流的阻力系数 (1.336) 与 Breuer^[4] 的计算结果相近 (Breuer, $C_d = 1.286 \sim 1.30$),但是与 Cantwell^[1] 在 1983 年所得到的实验结果 ($C_d = 1.237$) 有少许偏差。但是 case2 的 $C_d = 1.25$,与实验结果很接近,可能是由于实验当中很难保证入口来流为均匀流,来流带有较小的湍流,因此较小湍流的数值模拟更接近实验的均匀流结果。

同时,通过表 1 能发现阻力系数及斯托罗哈数 (St) 随着湍流强度的增强而减小,说明来流的湍流度会影响圆柱后的涡脱变化规律,减小涡脱

频率。然而,基压系数及尾流区的回流长度则是随着湍流度的加强而增大。

3.3 功率谱分析

图 4 是由圆柱升力系数的面平均时程数据进行 PSD 转换而得,观察上图能发现三工况升力均有一个主频脉动,即斯托罗哈数 (St),发现随着湍流度的增强, St 呈递减趋势;同时,可以看出随着湍流度的增加,升力系数的谱峰值个数也逐渐增加,说明随着湍流度的增强,升力会呈现多频率的脉动,即圆柱后的漩涡呈现多频率的脱落。

为了比较湍流度对圆柱上、下游流场的影响,本文分别在圆柱上游 (stagnation (−0.55, 0, 1)) 及下游 ($X/D = 1(1, 0, 1)$) 布置了两个测点以采集速度数据,如图 5。

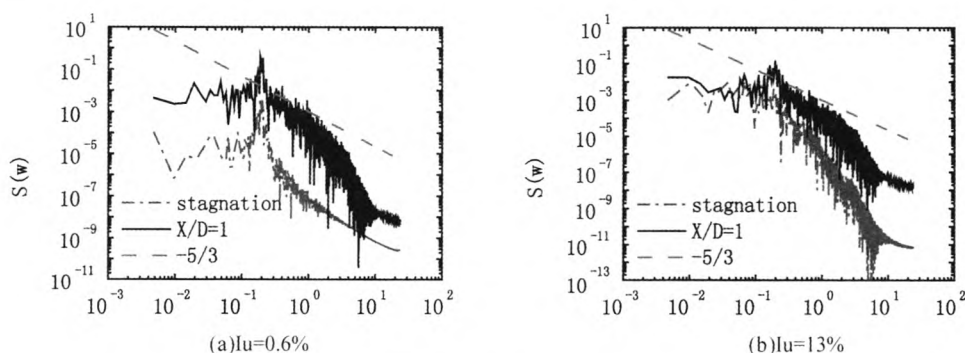


图5 不同湍流度的速度功率谱

Fig.5 The velocity's PSD of different turbulence

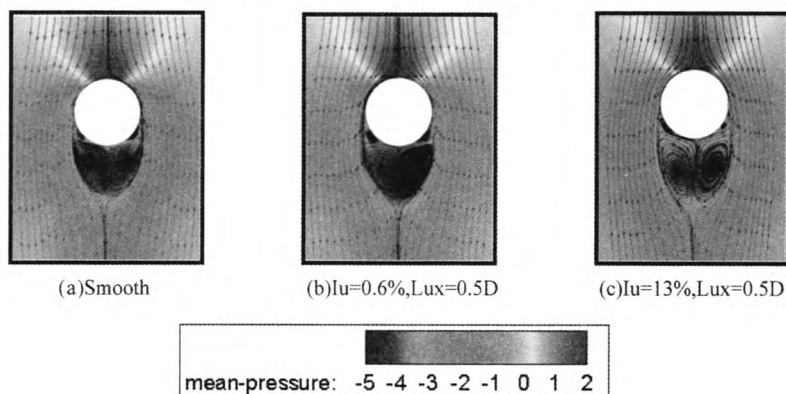


图6 不同湍流度的时均流线及时均压力云图

Fig.6 The time-average flow-line and static-pressure of different turbulence

观察图 5 发现,在高频率区域 $Iu = 13\%$ 含有更多能量,最多达到 $Iu = 0.6\%$ 的 10 倍,说明随着来流湍流度的增强,尾流区会产生更多高频率的湍流;两工况均含有满足 Kolmogorov 的 $-5/3$ 规律的惯性子区,该区域内的湍流主要是将能量传递给更小尺度的涡, $Iu = 13\%$ 的惯性子区范围大于 $Iu = 0.6\%$,近似位于 $fD/U = 0.1 \sim 1.2$ 之间,即在 $X/D = 1$ 处,相对于 $Iu = 0.6\%$, $Iu = 13\%$ 的湍流能量由低频向高频脉动传递的范围更大,说明 $Iu = 13\%$ 的尾流区含有多尺度的湍流,其尾流区湍流脉动更强,流场更为紊乱。

3.4 流线分析

图 6 描绘了不同湍流度情况下的流场流线及静压分布。图 6(a) 为均匀流下的时均流场分布,从图中能观察到,除滞点附近 ($-40^\circ \sim 40^\circ$) 为正压,圆柱附近的流场均呈现负压,尤其是在流体分离壁面后(分离角以后)由于流体回流,在尾流区产生了较高负压的回流区。比较图 6 能发现,三个工况的回流区的宽度、长度都有所变化,同时伴随着流场中的压力变化,由此能判定湍流度对回流区的影响较大进而影响了流场的气动特性。

将湍流来流与均匀流对比发现,随着湍流强度的加强,回流长度增长,与此同时,回流区的负压减小 ($|C_{pb}|$ 减小)。这说明,回流长度增长会使得回流区负压减小,圆柱壁面基压系数减小,从而导致阻力系数减小。这就证实了随着湍流度的加强,阻力系数会减小。

图 7(a) 为中心线上来流方向的时均速度曲线,观察上图能发现尾流区中心线上最小速度 U_{*min} 随着湍流度的增大而减小,并且 U_{*min} 的位置也伴随着湍流度的加强向下游偏移,这与图 6 中回流区漩涡中心向下游迁移相对应。说明,湍流度的加强会减小尾流区的最小速度,同时使得漩涡形成区中心向下游迁移。

图 7(b) 为中心线上湍动能的分布曲线,仔细观察图 7(b) 可以发现,在 $X/D = 1$ 附近湍动能均出现峰值,随着流体向下游发展湍动能逐渐耗散,最终变为层流。综合上诉说明在漩涡中心的湍动能达到最大值,同时随着湍流度的加强,最大湍动能也会逐渐增大;并且发现,随着湍流度的加强,下游湍动能耗散速率逐渐减小,尤其是 $Iu = 13\%$,能发现在 $4 \sim 8D$ 之间湍动能近乎不变,说明湍流度能抑制尾流区湍流能量的耗散。

3.5 涡量分析

图8为无量纲时间 $T^* = 286.3$ 时刻的瞬态Z向涡量分布,从图中能发现,随着湍流度的加强尾流区的涡量明显增多且涡量明显增强,尤其是湍流度较大时, $Iu = 13\%$ 远离圆柱的下游仍然能发现含有较高能量的涡,说明湍流能促进漩涡的形成。

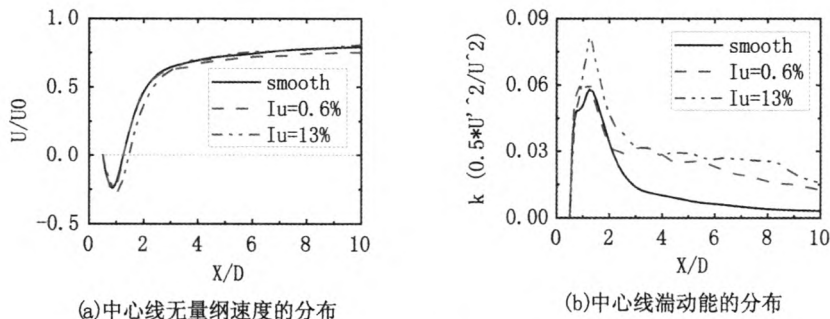


图7 湍流对中心线来流方向的影响

Fig.7 The effect of turbulence along center line

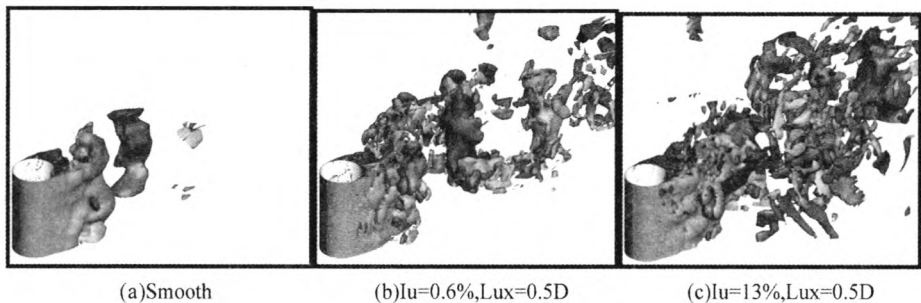


图8 Z向瞬态涡量图

Fig.8 Figure of instantaneous z-vorticity

4 结论

1)湍流度能促进自由剪切层间的相互作用,使得流场的三维特性更强烈,流场变得更为紊乱;同时湍流度能加强尾流区湍流能量的传递,抑制湍动能的耗散,从而延长了尾流区漩涡形成区。

2)随着来流湍流度的增强,尾流区的回流长度会逐渐增大,从而影响圆柱背风面压力的分布,使得基压系数增大,最终导致圆柱阻力系数随之减小。

3)来流的湍流度能促进尾流区漩涡形成区的发展。湍流度的增加,会使得涡脱频率减小,与此同时,尾流湍流得到增强,促使漩涡形成区形成大涡量的漩涡;尾流区会形成多尺度的湍流,最终导致产生多频率的涡脱形成。

比较图8可以发现,均匀流的漩涡能量沿着下游方向很快被耗散掉,而随着湍流度增强的下游大涡量的涡增多,说明湍流能给小尺度漩涡传递能量,抑制能量的耗散;同时,能观察到随着湍流度的增强,流场的三维特性更显著,上下剪切层间的相互作用更强,说明湍流度的增大能加强自由剪切层间的相互作用。

参考文献:

- [1] BRAIN CANTWELL, DONALD COLES. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder[J]. Fluid Mech, 1983, 26(136): 321 - 374.
- [2] M M ZDRAVKOVICH. Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1): 53 - 62.
- [3] KENNY C S KWOK. Turbulence effect on flow around circular cylinder[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 11(112): 73 - 81.
- [4] MICHAEL BREUER. A challenging test case for large eddy simulation - high Reynolds number circular cylinder flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(3): 648 - 654.

(下转第37页)

2) 在结构平面布置及柱截面刚度相同的情况下,异形柱框架结构的最大位移、层间位移角均小于等刚度矩形柱框架结构,结构的延性性能比等刚度矩形柱框架结构稍微差一些。

3) L型平面不规则异形柱框架结构在7度(0.15g)二类场地上,高度超过规范规定的限值的情况下仍然具有较好的抗震性能,能够满足人们对结构可靠度的要求。同时,其抗震性能优于同等条件下矩形柱框架结构的抗震性能。

参考文献:

- [1] 颜和平. 某高层建筑结构的规则性研究[D]. 广州:华南理工大学,2006.
- [2] 凌和海,王一功. L型平面不规则结构抗震设计分析

[J]. 广东土木与建筑,2011(3): 8-10.

- [3] 赵艳静. 钢筋混凝土异形柱结构体系理论与试验研究[D]. 天津:天津大学,2004.
- [4] 罗锋. 钢筋混凝土异形柱框架结构抗震性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [5] 杨军. 钢筋混凝土异形柱与矩形柱组合框架-剪力墙结构抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- [6] 鲍胜. 钢筋混凝土异形柱框架抗震性能分析[D]. 天津:河北工业大学,2006.
- [7] 王丹. 钢筋混凝土框架异形柱设计理论研究[D]. 大连:大连理工大学,2002.
- [8] JGJ186-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
- [9] JGJ149-2006, 混凝土异形柱结构技术规程[S].

(责任编辑 刘存英)

(上接第25页)

- [5] M TUTAR. Modeling of effect of inflow turbulence data on large eddy simulation of circular cylinder[J]. Journal of fluids engineering, 2007, 6(46): 134-141.
- [6] M TUTAR. Computational modeling of flow around a circular cylinder in subcritical flow regime with various turbulence models[J]. International Journal for Numerical Methods In Fluids, 2001, 12(23): 234-240.
- [7] 杜晓庆. 斜拉桥拉索风雨激振研究[D]. 上海:同济大学, 2003.
- [8] NIELS N SRENSSEN 3D CFD computations of transitional flows using DES and a correlation based transition model[J]. Wind Energy, 2011, 10(71): 325-334.
- [9] S H HUANG. A general inflow turbulence generator for large eddy simulation[J]. Journal of Wind Engineering

and Industrial Aerodynamics, 2010, 4(12): 34-46.

- [10] A C BENIM. RANS predictions of turbulent flow past a circular cylinder[C]. WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, 2007, 3(2): 12-24.
- [11] TETSURO TAMURA. LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 7(35): 157-168.
- [12] G. S CONSTANTINESCU. LES and DES Investigations of turbulent flow over a sphere at $Re = 10,000$ [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2003, 11(13): 56-67.

(责任编辑 刘存英)