

IEC阵风与紊流共同作用下的流场特性分析

周俊吉, 唐逸

西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都
Email: 1119247804@qq.com

收稿日期: 2020年10月30日; 录用日期: 2020年11月12日; 发布日期: 2020年11月19日

摘要

采用大涡模拟(LES)的方法求解不可压缩流体连续方程和N-S方程, 对格栅紊流场的均匀性, 以及IEC阵风与紊流共同作用下的流场特性进行了数值模拟分析。通过分析格栅紊流流场特性参数, 得出本文格栅流场在格栅下游4 m处的均匀性达到要求。IEC阵风与格栅紊流场结合较好, 可用于后续桥梁断面特性的研究。

关键词

数值模拟, 格栅紊流场, 流场特性参数, IEC阵风

Analysis of Flow Field Characteristics under the Combined Action of IEC Gust Wind and Turbulence

Junji Zhou, Yi Tang

School of Civil Engineering Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu Sichuan
Email: 1119247804@qq.com

Received: Oct. 30th, 2020; accepted: Nov. 12th, 2020; published: Nov. 19th, 2020

Abstract

The large eddy simulation (LES) method is used to solve the incompressible fluid continuity equation and Navier-Stokes equation. The uniformity of grid-generated flow field, and the flow field characteristics under the combined action of IEC gust wind and turbulence are numerically simulated and analyzed. By analyzing the characteristic parameters of the turbulent flow field of the grid, it is concluded that the uniformity of the grid flow field at 4 m downstream of the grid meets

the requirement. IEC gust wind is well combined with grid turbulent flow field, which can be used for further study of bridge cross-section characteristics.

Keywords

Numerical Simulation, Grid-Generated Flow Field, Flow Field Characteristic Parameters, IEC Gust Wind

Copyright © 2020 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

风工程研究中, 常采用主动模拟和被动模拟两类方法来模拟自然环境中风的紊流特性。主动模拟分为振动格栅[1]、振动尖塔[2]和多风扇风洞[3]等方法, 被动模拟分为被动格栅[4]、尖劈[5]和粗糙元[6]等方法。在风洞实验中, 一般采用在风洞入口处布置被动格栅的方式来模拟均匀紊流场。张明月[7]利用风洞试验的手段研究了测点与格栅间距、格栅板宽度以及单元格栅边长等对风参数的影响规律。文水兵[8]通过改变格栅板宽度以及间距的方式, 调试出了 A、B、C 三类地貌的紊流强度。

随着计算机技术的日渐成熟, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics)技术在风工程中的运用越来越多。且较风洞试验而言, 数值模拟具有较强的灵活性、流场可观测和成本低等特点, 成为了一种验证风洞试验的可靠手段。鲍泽辰等[9]将粗糙元、扰流杆以及格栅三者结合, 采用 LES 的方法, 模拟了 C 类地貌的风场特性。杨荣菲等[10]通过 LES 的方法, 探讨了格栅稠度、来流风速以及格栅表面粗糙度, 对格栅紊流场特性参数的影响。Torrano 等[11]使用 LES 方法对被动格栅紊流场进行了数值模拟, 并得出结论, y^+ 在 30~300 之间也可以得到较好的流场特性参数。验证了运用 LES 紊流模型模拟格栅紊流场的可行性。

理想化的阵风模型可分为 TSI 阵风模型和 IEC 阵风模型[12]等, 但有研究表明将 TSI 阵风模型运用于桥梁抗风研究存在不足[13]。IEC 阵风模型是国际电工委员会制定的 IEC61400-1 标准中提出的, 其主要特点表现为风速在短时间内减小到最小值, 接着又急剧增大达到最大风速值, 随后又在极短时间内迅速下降再次变为最小值, 最后恢复为阵风发生前的速度。赵元元[14]利用流体力学前处理软件 Gambit 建立起 1.0 MW 风机的叶片的三维模型, 并通过 UDF 用户自定义函数接口将极端运行阵风函数程序导入 Fluent 中作为流场入口条件, 验证了 CFD 方法模拟极端运行阵风的正确性。Storey 等[15]基于国际风轮机设计标准 IEC61400-1 建立了一种极端相关阵风模型, 使用数值模拟中的 LES 方法模拟了一组风力机在极端瞬态风条件下的运行情况。基于此, 本文将运用 CFD (Computational Fluid Dynamic) 中 LES 的方法, 通过 Fluent 的 UDF 接口将 IEC 阵风模型作为流场入口风速条件, 将格栅紊流场与 IEC 阵风模型结合, 研究其可行性以及流场特性。

2. 紊流特性参数

紊流场的特性参数主要包括紊流强度、紊流积分尺度以及脉动风速功率谱等。

2.1. 紊流强度

紊流强度是紊流场中最简单但使用最多的参数, 紊流强度是指风速根据空间和时间而变化的程度, 通常定义为脉动风速的标准差和脉动风速的平均值之比。

$$I_u = \frac{U_{rms}}{\bar{U}} \quad (1)$$

式中: U_{rms} 为脉动风速的标准差, \bar{U} 为脉动风速的平均值。

2.2. 紊流积分尺度

紊流积分尺度是度量紊流场中某一方向上漩涡尺寸平均值的一个指标。格栅紊流场中有包括顺流向、横向以及垂直三个方向的漩涡, 每一个漩涡又有 x 、 y 、 z 三个方向的尺度, 因此紊流积分尺度一共有九个。紊流积分尺度可由顺流向相邻两点的互相关函数定义, 以顺流向的积分尺度为例, 其表达式可写为:

$$L_u^z = \frac{1}{U_{rms}^2} \int_0^\infty R_{u_1 u_2}(z) dz \quad (2)$$

式中: U_{rms}^2 是脉动风速 u_1 和 u_2 的方差; $R_{u_1 u_2}(z)$ 是顺流向相邻两点 $u_1 = (x_1, y_1, z_1, t)$ 和 $u_2 = (x_1, y_1, z_1 + z, t)$ 脉动风速的互相关函数, 其中 t 是时间。但在处理数据过程中, 常常引用泰勒紊流冻结假说[16]假设, 即假设漩涡在紊流场中是以平均速度向下游迁移。此时, 脉动风速 $u_1 = (z_1 + z, t)$ 则可以改写为 $u_1 = (z_1, t + \tau)$, $z = \bar{U} \times \tau$ 。公式也可改写为:

$$L_u^z = \frac{1}{U_{rms}^2} \int_0^\infty R_u(t) d\tau \quad (3)$$

式中: $R_u(t)$ 是脉动风速 $u_1 = (z_1, t + \tau)$ 的自相关函数。在数据处理过程中, 由于自相关系数比较小, 会导致泰勒假设有比较大的误差。因此, 通常取(3)式的积分上限为 $R_u(t) = 0.05U_{rms}^2$ 。

2.3. 脉动风功率谱

脉动风功率谱表述的是, 紊流的运动能量在不同频率上的分布情况。经过多年来国内外学者对理论与试验的研究, 目前有多种类型的脉动风速谱, 对于顺流向的脉动风功率谱, 常用 Von Karman 谱[17]来描述脉动风速的特性。

$$\frac{nS_u(z, n)}{u_*^2} = \frac{4\beta f}{(1 + 70.8f^5)^{5/6}} \quad (4)$$

$$f = \frac{nL_u^x}{U} \quad (5)$$

式中: $S_u(z, n)$ 是顺流向脉动风速功率谱密度函数; z 是地面或水面以上的高度, 单位(m); n 是顺流向风的脉动频率; u_* 是摩阻速度(剪切速度), 单位(m/s); β 为摩阻速度修正系数; L_u^x 为紊流积分尺度, 单位(m); U 为平均风速, 单位(m/s)。

3. 计算模型

3.1. 格栅几何尺寸

便于将数值模拟结果与 TJ-2 风洞试验数据做对比, 本文选用的格栅尺寸与风洞试验中的格栅尺寸相同, 水平和竖向单元格栅板条宽度 a 均为 15 cm, 格栅板条围成正方形的中心孔, 水平和竖向板条之间的净距 b 均为 45 cm。格栅局部示意图如图 1 所示, 水平和竖向均有四个格栅孔, 格栅整体示意图如图 2 所示。

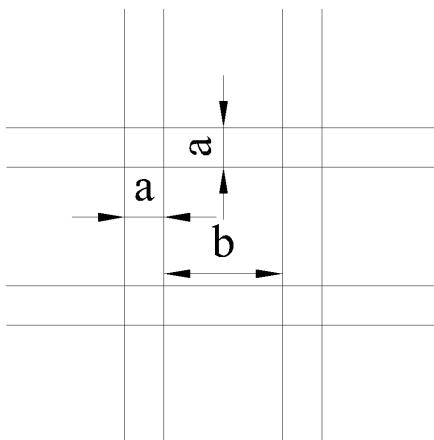


Figure 1. Partial schematic diagram of the grid
图 1. 格栅局部示意图

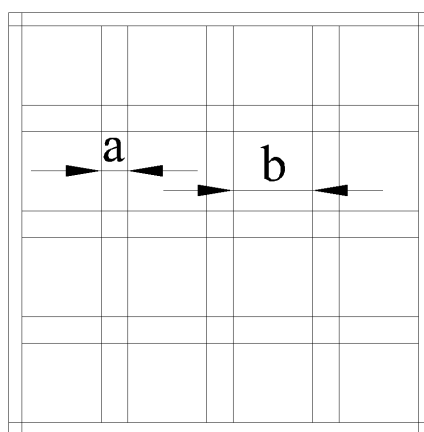


Figure 2. Schematic diagram of the whole grid
图 2. 格栅整体示意图

3.2. 模型建立及网格划分

数值模拟格栅紊流场计算域采用三维长方体计算域，宽度为 2.4 m，高度为 2.4 m，长度为 10.5 m，格栅放置于距流场入口 4.5 m 处。坐标原点位于流场入口的左下方，顺流方向为 z 正方向，竖直方向为 y 轴，向上为正，水平方向为 x 轴，由笛卡尔右手法则确定。计算域示意图如图 3 所示。

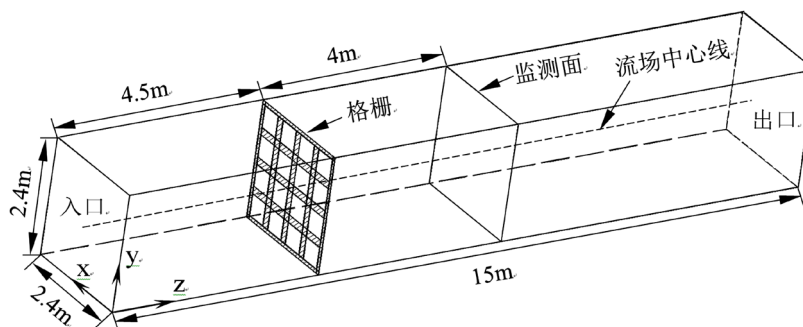


Figure 3. Schematic diagram of calculation domain
图 3. 计算域示意图

本文利用 Fluent 前处理软件 Gambit 对整个流场域进行网格划分。在格栅附近由于流动比较复杂, 为保证结果的精确性, 因此需要划分较精细的网格。贴体网格首层高度为 0.75 cm, 以 1.02 的增率沿 z 轴增加。在格栅附近采用非结构化网格对流场域进行划分, 其余流场域采用结构化网格划分。格栅附近网格划分示意图如图 4 所示, 整个计算模型网格数量约为 330 万。

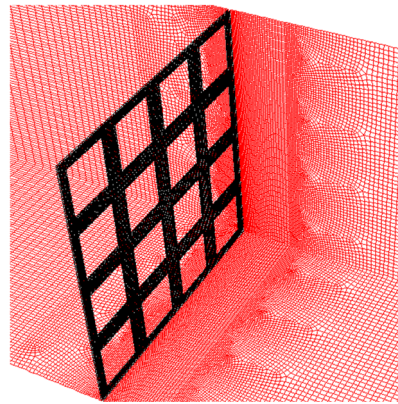


Figure 4. Mesh generation near the grid
图 4. 格栅附近网格划分

本文采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)湍流模型模拟格栅紊流场。LES 湍流模型是通过滤波的方式, 把格栅流场中的旋涡分解为大尺度和小尺度旋涡。对于大尺度的旋涡, 采用直接计算的方法。而对于小尺度的旋涡, 采用亚格子尺度(Sub-Grid Scale, SGS)模型进行模拟。在 FLUENT 求解器中, 基于有限体积法(Finite-Volume Method, FVM)求解经过滤波处理后的不可压缩流体连续方程和 Navier-Stokes 方程。亚格子尺度模型采用 Smagorinsky-Lilly 亚格子尺度模型, Smagorinsky 常数 C_s 取 0.1 [11]。运用 SIMPLE 算法解决压力与速度耦合问题, 压强方程采用二阶迎风差分格式(Second Order Upwind), 动量方程采用有界中心差分格式(bounded central differencing)。迭代时间步长取为 0.001 s, 共计算 20,000 步, 即计算总时长为 20 s。计算域的详细边界条件如表 1 所示。

Table 1. Boundary conditions

表 1. 边界条件

位置	边界条件
入口	Velocity-inlet, $U = 10$ m/s
出口	Pressure-outlet
格栅	No slip wall
前后面	Symmetry
上下面	Symmetry

监测面位于流场下游, 距格栅 4 m 处。监测点间距为 0.4 m, 均匀布置于监测面内, 监测点位置如图 5 所示。每个监测点记录 z 方向的风速, 采样频率为 1000 Hz, 采样点数为 20,000。

4. 紊流结果分析

本文从每个监测点获得的风速时程曲线进行分析, 处理得到格栅紊流场的特性参数。由于流场在刚开始计算时不稳定, 导致风速时程曲线的数据没有太大使用价值, 因此本文在处理数据时, 省去了前两秒的风速时程数据。典型风速时程曲线如图 6 所示。

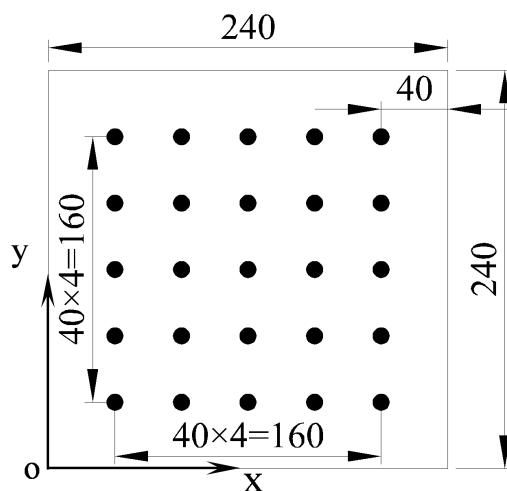


Figure 5. Layout of monitoring points (unit: cm)
图 5. 监测点布置图(单位: cm)

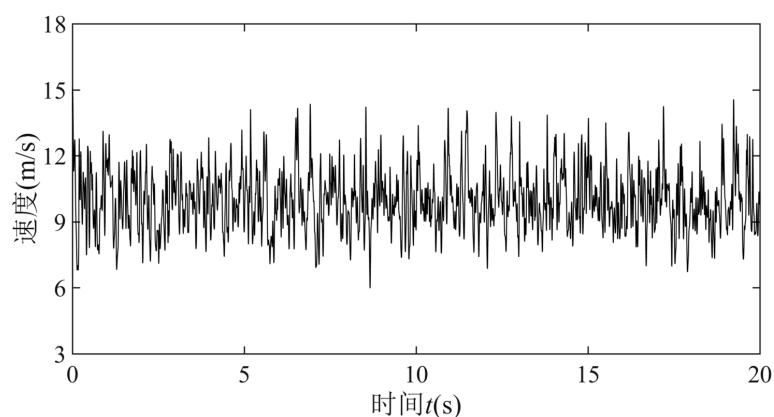


Figure 6. Wind speed time history curve
图 6. 风速时程曲线

图 7 为格栅紊流场的流线图, 可以看出在格栅前为均匀流场。当经过格栅时, 由于格栅条是离散布置的, 因此, 均匀流场被格栅打乱, 在格栅后方形成了紊乱的流场。但经过一段距离的发展和扩散之后, 流场又恢复了均匀性。

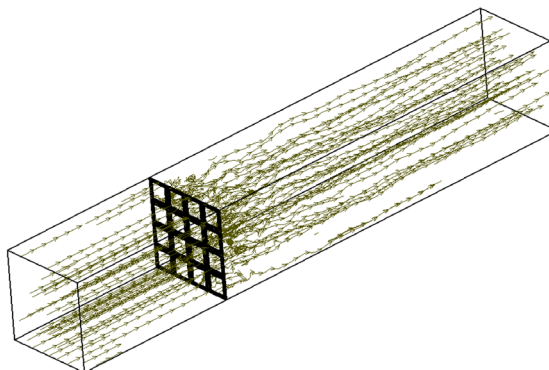


Figure 7. Streamline of flow field
图 7. 流场流线图

4.1. 紊流强度

格栅紊流场是由均匀流通过格栅装置后形成的, 由于格栅条是离散布置的, 因此均匀流刚通过格栅时, 紊流特性是及其不均匀的。但旋涡经过一段距离的扩散, 紊流特性的均匀性逐渐改善, 形成各项同性的均匀紊流。本文通过对监测点的风速时程曲线分析得到的紊流强度, 来验证格栅紊流场的均匀性。

表 2 给出了监测面上个点的坐标及紊流强度值, 紊流强度最小值为 13.4%, 最大值为 14.9%, 平均值为 14.3%, 标准差为 0.004。由此可知, 该格栅流场在距格栅 4 m 的下游处, 流场已经达到了较好的均匀性。本文数值模拟的紊流强度, 与风洞试验[8]中的紊流强度 $I_u = 15\%$ 相比, 相对误差为 4.67%。与试验数据较吻合, 验证本文采用的数值模拟手段是可行的, 该湍流场断面可用于开展节段模型的研究。

Table 2. Turbulence intensities
表 2. 紊流强度

坐标(m)	I_u (%)	坐标(m)	I_u (%)	坐标(m)	I_u (%)	坐标(m)	I_u (%)	坐标(m)	I_u (%)
(0.4, 0.4)	14.7	(0.4, 0.8)	14.7	(0.4, 1.2)	14.9	(0.4, 1.6)	14.7	(0.4, 2.0)	14.9
(0.8, 0.4)	13.6	(0.8, 0.8)	13.8	(0.8, 1.2)	13.8	(0.8, 1.6)	14.6	(0.8, 2.0)	14.6
(1.2, 0.4)	14.4	(1.2, 0.8)	13.7	(1.2, 1.2)	13.4	(1.2, 1.6)	14.0	(1.2, 2.0)	14.6
(1.6, 0.4)	14.2	(1.6, 0.8)	14.3	(1.6, 1.2)	13.6	(1.6, 1.6)	14.2	(1.6, 2.0)	14.5
(2.0, 0.4)	14.4	(2.0, 0.8)	14.9	(2.0, 1.2)	14.0	(2.0, 1.6)	13.8	(2.0, 2.0)	14.2

4.2. 紊流积分尺度

本文同样对监测面上个监测点的风速时程信号进行分析, 得到了各监测点的积分长度尺度, 详细数据如表 3 所示。其中最大的紊流积分尺度为 0.371 m, 最小为 0.231 m, 平均值为 0.279 m, 标准差为 0.0345, 说明该格栅紊流场在此断面处已有足够的均匀性。与文献[4]中的结果相比较, 相对误差约为 16.7%, 本文数值模拟结果偏大。其主要原因在于, 本文数值模拟的计算条件较差, 无法使用庞大数量的网格进行计算。因此导致在数值模拟时, 不能捕捉到小尺度的旋涡。

Table 3. Turbulence integral scale
表 3. 紊流积分尺度

坐标(m)	L_x (m)	坐标(m)	L_x (m)	坐标(m)	L_x (m)	坐标(m)	L_x (m)	坐标(m)	L_x (m)
(0.4, 0.4)	0.259	(0.4, 0.8)	0.371	(0.4, 1.2)	0.274	(0.4, 1.6)	0.351	(0.4, 2.0)	0.293
(0.8, 0.4)	0.236	(0.8, 0.8)	0.276	(0.8, 1.2)	0.277	(0.8, 1.6)	0.246	(0.8, 2.0)	0.252
(1.2, 0.4)	0.248	(1.2, 0.8)	0.258	(1.2, 1.2)	0.231	(1.2, 1.6)	0.261	(1.2, 2.0)	0.312
(1.6, 0.4)	0.299	(1.6, 0.8)	0.308	(1.6, 1.2)	0.237	(1.6, 1.6)	0.293	(1.6, 2.0)	0.305
(2.0, 0.4)	0.324	(2.0, 0.8)	0.258	(2.0, 1.2)	0.287	(2.0, 1.6)	0.262	(2.0, 2.0)	0.270

4.3. 脉动风速谱

利用监测点测得的风速时程信号, 对其进行傅里叶变换, 编写将风速时程信号转化为脉动风速谱的程序, 利用 MATLAB 软件进行处理, 即可得到脉动风速谱。本文以顺风向, 高度为 0.4 m 的监测点为例, 得到脉动风速谱如图 8 所示。并 Von Karman 谱作比较, 可以看出数值模拟得到的脉动风速谱, 在低频段对比 Von Karman 谱偏小, 但数值模拟的风场能量结构与 Von Karman 谱基本能够吻合。

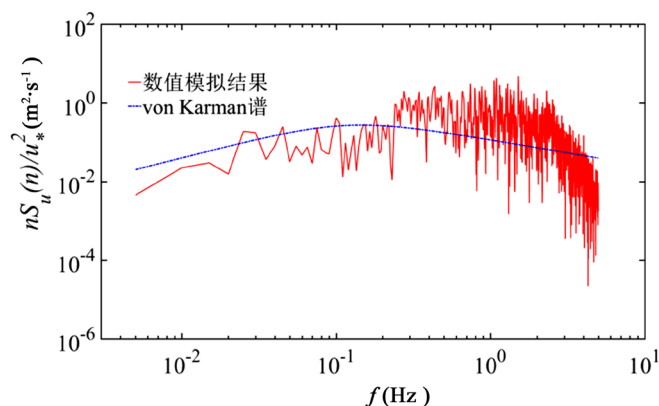


Figure 8. Fluctuating wind speed spectrum
图 8. 脉动风速谱

5. IEC 阵风与紊流场结合

本文采用 Länger-Möller [12] 根据国际通用标准 IEC61400-1 建立的极端运行阵风(EOG)模型, 用作模拟流场入口处的风速:

$$U(t) = \begin{cases} U - 0.37U_g \sin\left(\frac{3\pi(t-2)}{T_g}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi(t-2)}{T_g}\right)\right) & 2 \leq t \leq 12.5 \\ U & t \text{ 取其他值} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_g 为与阵风风速相关的参数; T_g 为特征周期时间取 10.5 s; U 为均匀来流速度。

初始风速为 10 m/s, 持续时间为 15 s 时, IEC 阵风模型风速时程曲线如图 9 所示。

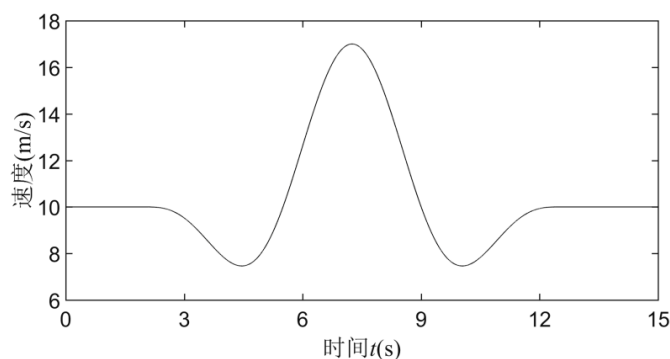


Figure 9. Wind speed time history curve of IEC gust model
图 9. IEC 阵风模型风速时程曲线

图 10 为阵风与格栅共同作用下, 距格栅 4 m 的下游流场中心点处, 顺流向的风速时程曲线。由于在 $t = 12.5$ s 后, IEC 阵风风速持续为 10 m/s, 所以本文仅计算 15 s 的时长, 迭代时间步长为 0.001 s。由于刚开始计算时, 流场尚未充分发展, 因此 0~1 s 内的风速时程曲线振幅很大。在最大阵风风速时刻附近, 紊流场内风速时程曲线振幅也较其他时刻偏大, 但整体数值模拟的风速曲线与理论值吻合较好。

图 11 展示了格栅流场下游 4 m 处监测面上不同时刻顺流向的速度云图。 $t = 2.0$ s 和 $t = 12.5$ s 时速度横截面上平均速大致为 10 m/s, $t = 4.5$ s 和 $t = 10.0$ s 时速度横截面上平均速大致为 7 m/s, $t = 7.5$ s 时速度横截面上平均速大致为 17 m/s。各时刻风速与 IEC 理论风速相对应, 且监测面上的风速分布均匀, 可说明 IEC 阵风与格栅紊流场结合较好, 可在该断面上开展桥梁段面特性的研究。

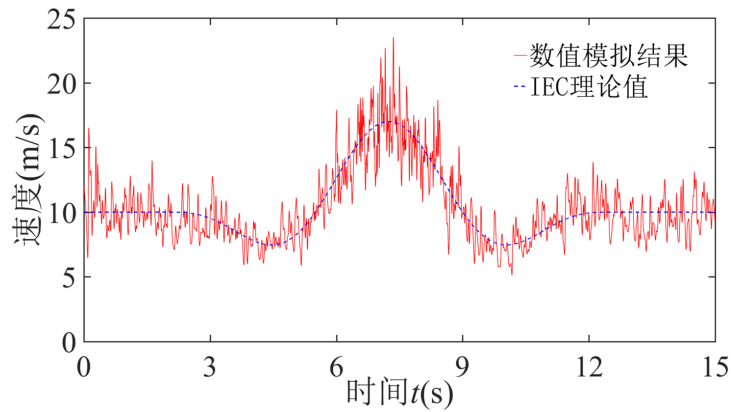


Figure 10. Wind speed curve under the combined action of gust and turbulence
图 10. 阵风与紊流共同作用下的风速曲线

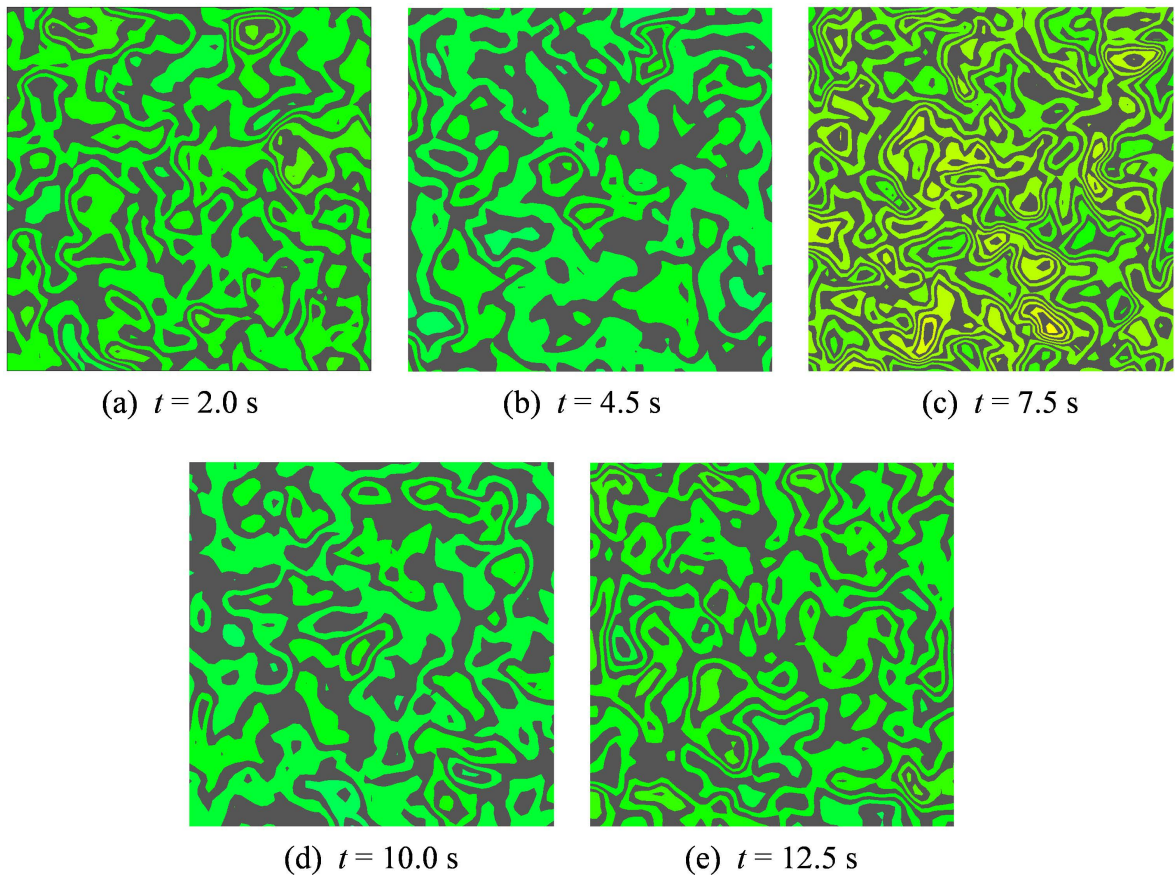


Figure 11. Downstream velocity contours at different times at 4 m downstream of the grid
图 11. 格栅下游 4 m 处不同时刻顺流向速度云图

图 12 是通过 CFD 后处理软件 CFD-POST 中的 Q-criterion 获得的涡量图。当空气经过格栅后，在格栅附近形成较小的旋涡结构，通过一段距离的发展和扩散，旋涡结构逐渐变大。可得出，积分长度尺度是沿顺流向逐渐增大。不同时刻，整个流场区域的旋涡结构分布一致，即在格栅附近为小旋涡结构，而后逐渐变大。IEC 阵风的风速变化并不会破坏紊流场的旋涡分布，紊流场与 IEC 阵风能够很好地结合起来，可用于后续桥梁断面特性的研究。

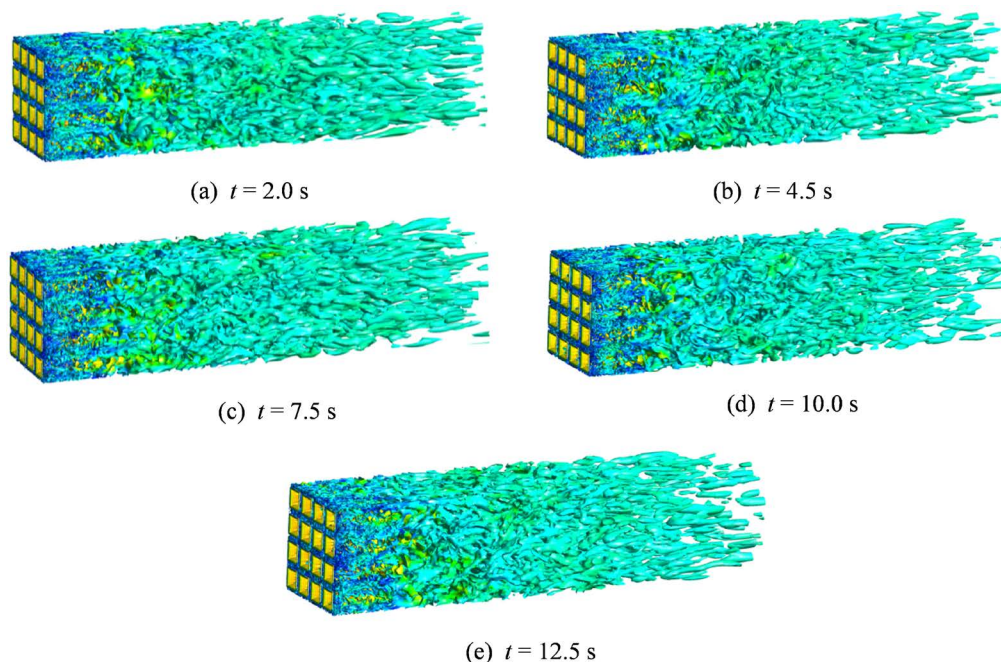


Figure 12. Vorticity contours at different times
图 12. 不同时刻的涡量图

图 13 为流场中心线上不同时刻的静压图, 任意时刻流场中静压仅在格栅附近有较大波动。在格栅前流场中心线上的静压为正, 在靠近格栅处急剧上升。在格栅后流场中心线上的静压为负, 并快速上升至零。流场中静压与风速密切相关, 从 IEC 风速时程曲线上可以看出, $t = 2.0\text{ s}$ 和 $t = 12.5\text{ s}$ 、 $t = 4.5\text{ s}$ 和 $t = 10.0\text{ s}$ 时的风速几乎是相同的。因此, 图 13(a) 中 $t = 2.0\text{ s}$ 和 $t = 12.5\text{ s}$ 、 $t = 4.5\text{ s}$ 和 $t = 10.0\text{ s}$ 静压曲线几乎是重合的。图 13(b) 展示的是 $t = 2.0\text{ s}$ 、 $t = 12.5\text{ s}$ 和 $t = 7.5\text{ s}$ 时流场中心线上的静压曲线, $t = 7.5\text{ s}$ 时对应的风速最大。因此, 格栅前方的正压和格栅后方的负压, 分别达到了整个模拟过程的最大值。相反, $t = 4.5\text{ s}$ 时流场中流速最小, 流场中心线上的静压也最小。

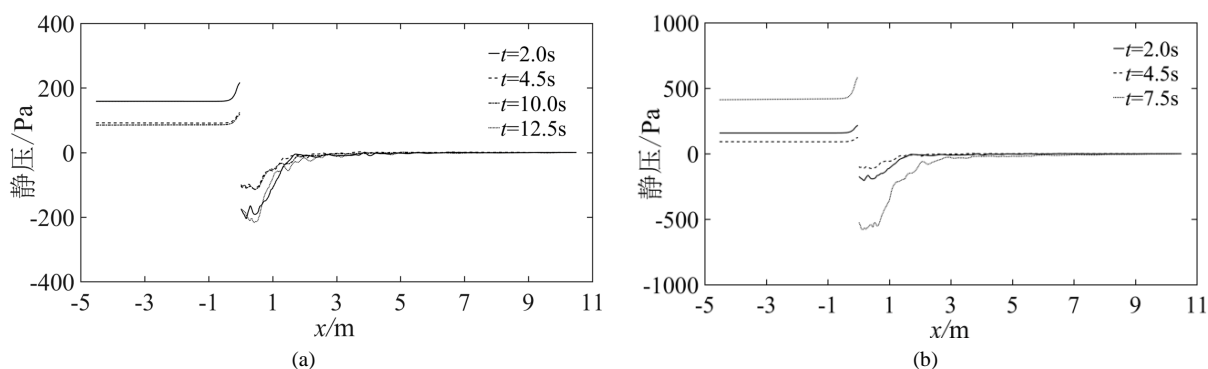


Figure 13. Static pressure curve of centerline of flow field
图 13. 流场中心线静压曲线图

6. 结论

本文采用 LES 湍流模型对格栅紊流场和 IEC 阵风与紊流共同作用下的流场进行了数值模拟, 分析流场得到了以下结论:

1) 通过与风洞试验得到的结果对比, 发现数值模拟得到的格栅紊流场特性满足要求。数值模拟的方法能够任意布置监测点, 并且能直接观察到流场中不同时刻旋涡的分布情况。相对于风洞试验拥有更便于观测、更省时等优点。

2) 数值模拟得到的紊流场紊流强度与风洞试验吻合较好, 紊流积分尺度稍微偏大, 可能是计算条件不足、网格不够精细导致的, 紊流脉动风速谱与 Von Karman 谱也基本能够吻合。可以利用数值模拟的方法, 开展格栅紊流场特性的研究。

3) IEC 阵风与紊流共同作用下的脉动风速时程曲线与 IEC 阵风理论风速曲线吻合较好, 不同时刻流场中漩涡结构分布规律一致, 不同时刻流场中心线上静压分布规律相同, 说明 IEC 阵风与格栅紊流场结合较好。可用于后续桥梁断面特性的研究。

参考文献

- [1] 魏芬洋. 基于振动格栅的大气边界层风洞模拟方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] 庞加斌, 林志兴. 边界层风洞主动模拟装置的研制及实验研究[J]. 实验流体力学, 2008(3): 80-85.
- [3] 张冠华, 赵林, 葛耀君. 主动来流模拟技术试验研究[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2014(5): 1-9.
- [4] 邱旭, 王昊, 李峰, 等. 格栅湍流场湍流特性的数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(5): 863-870.
- [5] 冀哲. 大气边界层风场的风洞模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [6] 吴畏. 大气边界层风场的大涡模拟[J]. 山西建筑, 2018, 44(32): 56-57.
- [7] 张明月, 李永贵, 谭文俊, 等. 格栅湍流风场风参数变化规律的风洞试验研究[J]. 实验力学, 2019(3): 427-433.
- [8] 文水兵. 特征紊流效应对典型桥梁断面脉动气动力谱和气动导纳的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [9] 鲍泽辰, 张克跃, 张继业. 基于大涡模拟的大气边界层全尺寸风场研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 95-101.
- [10] 杨荣菲, 杨兵, 张晓东, 等. 高湍流度格栅的数值模拟及设计方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(4): 1-6.
- [11] Torrano, I., Martinez-Agirre, M. and Tutar, M. (2016) LES Study of Grid-Generated Turbulent Inflow Conditions with Moderate Number of Mesh Cells at Low Re Numbers. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **30**, 141-154. <https://doi.org/10.1080/10618562.2016.1167195>
- [12] IEC 61400-1:2005(E). Wind Turbines—Part 1: Design Requirements.
- [13] 黄菲, 黄林, 周俊吉. TSI 阵风作用下箱梁断面的气动特性分析[J]. 建模与仿真, 2020, 9(1): 19-28.
- [14] 赵元元. 1.0 兆瓦风机的外部流场气动仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [15] Storey, R., Norris, S.E. and Cater, J. (2014) Modelling Extreme Wind Events in a Wind Farm Using Large Eddy Simulation. *32nd ASME Wind Energy Symposium*, National Harbor, 13-17 January 2014, Article ID: 0711. <https://doi.org/10.2514/6.2014-0711>
- [16] Flay, R.G.J. and Stevenson, D.C. (1998) Integral Length Scales in Strong Winds below 20 m. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **28**, 21-30. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90098-0](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90098-0)
- [17] Von Karman, T. (1948) Progress in the Statistical Theory of Turbulence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **34**, 530-539. <https://doi.org/10.1073/pnas.34.11.530>