

文章编号: 1004- 4574(2010) 01- 0185- 07

风对定日镜影响的计算流体动力学数值模拟

卢春玲^{1, 2}, 李正农¹, 李秋胜¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 桂林工学院 土木系, 广西 桂林 541004)

摘 要: 利用 linux 系统下软件平台 Fluent 6.3 的并行计算技术和实用的结构网格划分方法, 基于 Reynolds 时均方程, 分别采用两种湍流封闭模型: 标准 $k-\epsilon$ 和 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型, 模拟计算了定日镜结构的平均风压系数、阻力、升力以及力矩系数和平均风流场。分析了定日镜镜体平均风压、平均风流场的分布规律和特点; 并将数值计算结果与风洞试验进行了比较。结果表明, 基于 Fluent 6.3 的 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型较之标准 $k-\epsilon$ 模型有更好的预测效果。

关键词: 计算风工程; 定日镜; 数值模拟; $k-\epsilon$ 湍流模型

中图分类号: TU973.213

文献标识码: A

Numerical simulation of wind effects on heliostat by computational fluid dynamics

LU Chun-ling^{1, 2}, LI Zheng-nong¹, LI Qi-zheng¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2. Department of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract Numerical simulation was conducted to predict the mean wind load coefficients, the coefficients of drag and lift force on the heliostat and the mean velocity field around the heliostat. The numerical simulation used the paralleled technology of software Fluent 6.3 under the linux system, adopted the practical mesh arrangement and based on the Reynolds averaged equations and two turbulent models, i.e. the standard $k-\epsilon$ model and the MMK model. The distribution characteristics of the surface wind pressure on the heliostat and the wind environment around the heliostat were obtained and analyzed, then, the computed results were compared with extensive experimental data which were obtained at wind tunnels. It is found that the MMK model gives better results than the standard $k-\epsilon$ model.

Key words computational wind engineering; heliostat; numerical simulation; $k-\epsilon$ turbulence model

计算风工程 (computational wind engineering, CWE) 作为计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的一个分支, 最近 30 年有了迅速的发展, 它能够给出风对结构作用的数值评价。它是除风洞试验外, 为结构的抗风研究提供了一种新的方法。数值风洞技术正逐渐成为辅助传统风洞试验的强有力工具。

由于建筑结构多为钝体, 对于钝体的数值模拟在 CFD 计算中具有挑战性, 尚有诸多困难^[1]。因此进行这方面的研究很有必要。本文基于 Fluent 6.3 的并行计算技术, 计算了定日镜结构在来流垂直于镜面情况下的平均风压系数和风流场。重点放在合理建立适应于钝体结构的数值风洞模型的探讨上, 包括网格的划分,

收稿日期: 2008-08-23 修订日期: 2009-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50778072); 广西建筑工程检测与试验重点实验室开放基金资助项目 (桂科能 07109005-12)

作者简介: 卢春玲 (1978-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事灾害方面研究。E-mail: lchunling78@sohu.com

湍流模型的选取等, 将数值计算的结果和风洞试验作了比较。并分析了定日镜镜体平均风压、平均风流场的分布规律和特点。

1 工程概况及计算域和网格划分

本文研究的对象为太阳能发电站中采用的塔式电站定日镜系统。它是一种跟踪太阳的反射镜。定日镜实物如图 1, 它高 H 为 11 992m, 宽 D_x 为 9 04m, 计算域, 坐标定义见图 2。计算域在 y 方向长为 $20D_x$, 其中 D_x 为结构在 x 方向的宽度, 在 x 方向距离为 $6D_x$, 在 z 方向高度为 $6H$ 。这样选择一是保证计算域的相对大小和风洞试验室保持一致, 二是保证结构的堵塞度小于 3%。

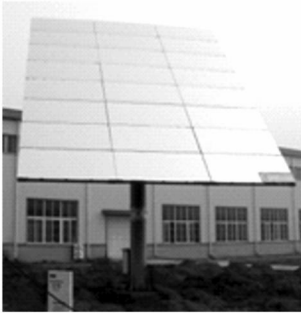


图 1 定日镜
Fig 1 H eliostat

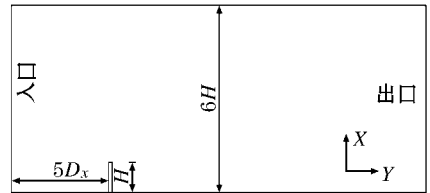
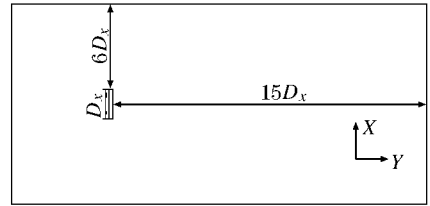
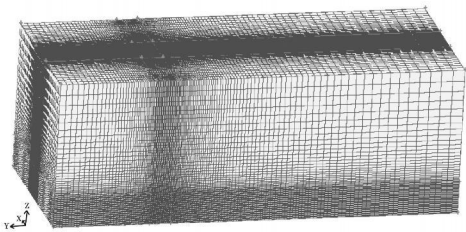
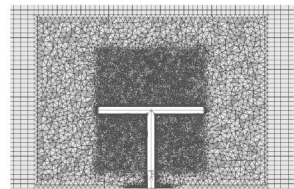


图 2 计算区域

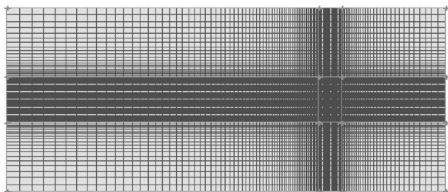
Fig 2 Computational domains



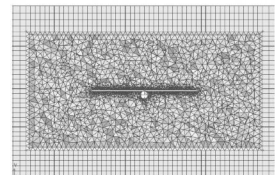
(a)整体网格分布



(b)靠近定日镜表面的网格 (X-Z平面)



(c) X-Y平面的网格分布



(d)靠近定日镜表面的网络 (X-Y平面)

图 3 网格划分的方式

Fig 3 Division style of grid

定日镜结构相对于一般建筑结构较复杂, 定日镜镜体后面的支撑横梁与立柱之间存在圆柱相贯问题, 且镜体很薄, 其厚度仅为其高度、宽度的 1/1000, 网格划分比较困难。图 3 表示的是定日镜的网格划分的方式。这种网格划分是将整个定日镜嵌套在一个比其大几倍的长方体中, 这个长方体的尺寸为 y 方向长为 $2D_x$, 在 x 方向距离为 $2D_x$, 在 z 方向高度为 $2H$ 。在这个长方体区域内采用无结构网格模式, 而在其它区域采用结构网格模式。采用这种划分网格的方式能够在定日镜表面区域内有效进行网格精确划分, 而在远离定日镜表面的区域保持一种相对粗糙的网格划分。这样既能进行有效的计算又能保证计算精度不受影响。本文的计算网格数为 199×10^4 。

2 控制方程和湍流模型

近地风是一种近似不可压缩的湍流流动。在稳态效应下, 基于 Reynolds 时均方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型组成湍流控制微分方程^[2]。

本文主要采用两种典型的湍流模型来模拟湍流流动, 即: 标准 $k-\varepsilon$ 模型以及 MMK 修正的 $k-\varepsilon$ 模型。这两种模型的特点如下:

标准 $k-\varepsilon$ 模型计算量小、收敛快, 对于工程中常见的绕流和边界层流动, 以及部分有回流区的流动, 其计算结果与试验值吻合较好, 因而往往是工程应用首选的模型^[3]。在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, 定义 $P_k = \nu_t S^2$, $\nu_t =$

$C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$, 该模型对于强各向异性流动的预测有偏差。过高的估计了在迎风面屋

角处的湍流动能。为了解决这一问题首先由 Launder 和 Kato 提出了一种修正模型来消除在钝体碰撞区域对湍流动能的过高估计, 即 KL 修正模型^[4]。KL 修正模型中采用 $P_k = \nu_t S \Omega$, $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 其中 $\Omega =$

$\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$ 。但是 Murakami 等指出, 当时 $\Omega = S$, KL 修正模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型更多的高估了

湍流动能。他提出了又一种修正模型, 即 MMK 修正模型^[5]。MMK 修正模型中采用 $P_k = \nu_t S^2$, $\nu_t = C_\mu^* \frac{k^2}{\varepsilon}$, 当

$\Omega < S$ 时, $C_\mu^* = C_\mu \frac{\Omega}{S}$; 当 $\Omega \geq S$ 时, $C_\mu^* = C_\mu$ 。

由上述可看出, MMK 修正模型主要是针对不同的情况对 ν_t 进行了修正。这种修正能克服 KL 修正模型的缺点且简单有效, 只是少量增加了计算时间, 能给出比 KL 修正模型更好的模拟效果^[6]。故为了节省篇幅, 本文采用风工程中广泛运用的标准 $k-\varepsilon$ 模型和 MMK 修正模型进行对比研究。

由于 Fluent 6.3^[7] 中并没有自带 MMK 修正模型程序, 故需要通过对其 MMK 修正模型定义的涡团粘性 ν_t 编程与 Fluent 6.3 接口。

3 边界条件的设定及壁面处理

计算流域入口条件: 采用 Fluent 中的速度进口边界条件, 假定气流是不可压缩的。参考工作点取为定日镜前方不受扰动 10m 高处的一点, 基本风速为 8m/s。

计算流域出口条件: 采用完全发展出流边界条件。计算流域顶部和两侧条件: 采用对称边界条件, 等价于粘性流动中的自由滑移壁面。定日镜表面和地面边界条件: 采用无滑移的壁面条件 (wall) 限定流体和固体区域。壁面函数: 选用标准壁面函数以模拟壁面附近气流流动。

为了使数值模拟的结果和风洞试验结果吻合较好, 需要采用和试验相同的流动边界条件。对大气边界层风速剖面模拟采用指数率形式, 其中 V_{10} 表示 10m 高度处的风速, 试验中采用 8m/s, a 为地面粗糙度系数。

$$\frac{V}{V_{10}} = \left(\frac{Z}{Z_{10}} \right)^a, \quad a = 0.16. \quad (1)$$

对于湍流强度, 我国现行荷载规范没有给出明确定义, 对 B 类地形的湍流强度模拟, 参考日本规范中的第 II 类地貌 (空旷, 少量障碍物, 草地, 粮田) 取值。

$$I = 0.23 \quad Z \leq Z_0; \quad (2)$$

$$I = 0.1 \left(\frac{Z}{Z_C} \right)^{-\alpha-0.05}, \quad Z_0 \leq Z \leq Z_C; \quad (3)$$

其中: $Z_0 = 5\text{m}$, $Z_C = 350\text{m}$ (梯度风高度)。

在入口截面处的湍流动能和耗散率按以下公式计算:

$$k = \frac{3}{2} (U_{\text{avg}} I)^2, \quad (4)$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^3}{l}, \quad (5)$$

式中, U 为入口处的平均风速, l 为湍流强度, l 为湍流积分尺度。本文根据湖南大学定日镜风洞试验的风速剖面、湍流强度剖面以及相应的湍流积分尺度的结果, 编制相应的程序与 Fluent实现接口, 使数值计算中的入口气流更加符合实际风场情况。

4 计算和求解

本文主要模拟在高雷诺数下, 来流垂直于定日镜时, 风对定日镜的作用。文中的计算在湖南大学一个并行计算机群上进行, 该计算机群是由 32CPU s并联成一个平台, 用来进行大规模计算。

计算采用分离式求解器, 对非线性耦合控制方程组, 文中采用 SMPLEC 算法实现该方程组的解耦以及压力场和速度场的校正, 采用二阶迎风式离散对流项, 对扩散项采用具有二阶精度的中心差分格式。采用隐式分离解法对离散后的控制方程求解。计算平台为 Fluent6.3

5 结果分析与比较

5.1 平均风压系数数值结果分析

5.1.1 平均风压系数的分布

平均风压系数定义为

$$C_p = 2(P - P_0) / (\rho U^2), \tag{6}$$

式中: ρ 为流体密度, U 为参考点高度处的风速, P 为平均风压, P_0 为参考点处的压力。本文取为 10m 高度处, 定日镜前方来流不受扰动处为参考点。

两种模型定日镜镜面以及背面平均风压系数分布图如图 4及图 5。

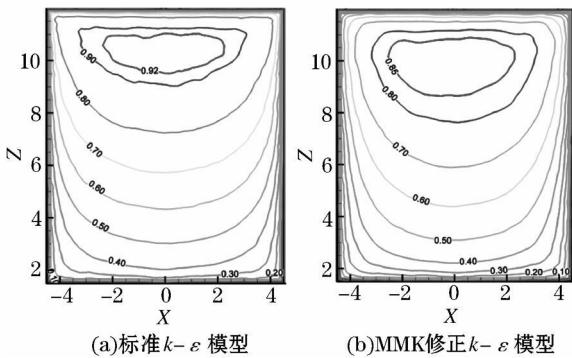


图 4 两种模型计算的定日镜镜面平均风压系数分布图

Fig 4 Mean pressure coefficient contours on the front face of heliostat from two models

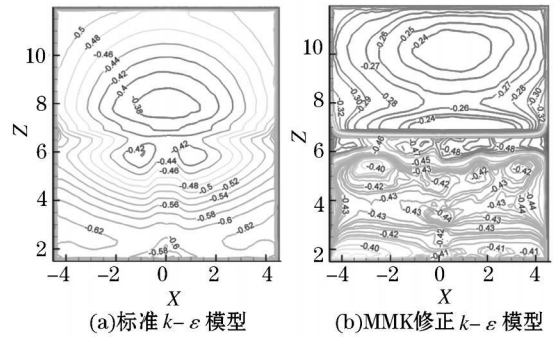


图 5 两种模型计算的定日镜背面平均风压系数分布图

Fig 5 Mean pressure coefficient contours on the back face of the heliostat from two models

通过分析数值模拟计算得到的定日镜平均风压系数分布图 4和图 5 可以得出该建筑物表面以下几点风压分布的规律:

(1) 定日镜的迎风面出现正压, 背风面为负压。

(2) 在高度方向, 定日镜镜面平均风压系数沿高度变化呈现中间大、两端小的变化趋势。这是由于风速随高度呈指数律增长, 在建筑物下部的风速相对较小, 所以风压系数较小, 而在建筑物的上部, 虽然风速较大, 但由于流体的三维效应, 气流向定日镜顶部绕流, 风压系数有所减小。

(3) 由于气流分离、涡流脱落、尾流等因素, 定日镜背面平均风压沿高度分布相对镜面要复杂得多。这点从风速流线图 8可以看出: 流动在背面处发生了分离, 形成了大小两个负压漩涡, 从而造成了风压分布图在高度 6.7m左右形成了上下两个负压风压分布区域。最大的负风压出现在定日镜背风面的镜面下端。这是由于气流在这部分区域出现了分离, 在分离点后出现较大的负压涡流。

5.1.2 两种湍流模型与风洞试验结果的对比及分析

本文采用 1:10的缩尺比对定日镜模型进行了风洞试验。试验在湖南大学 HD-2大气边界层风洞中进

行的。为了测取定日镜内外表面上的风压分布, 在定日镜内外表面上上共均匀布置了 288 个测压点, 每面各 144 个测点。

图 6 到图 7 给出了不同高度处不同湍流模型计算结果与风洞试验得到的风压系数的直接比较。

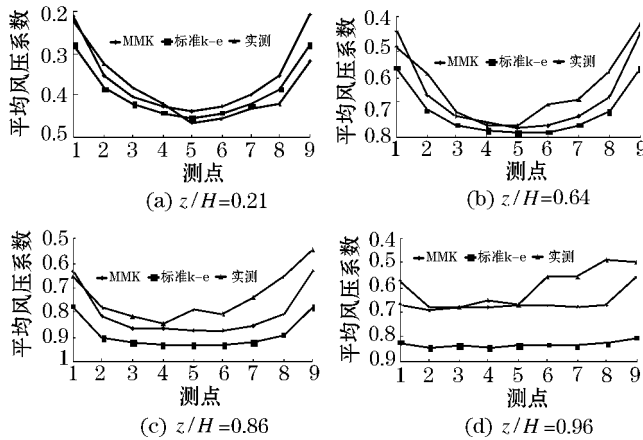


图 6 不同高度处镜面测点的平均风压系数数值模拟结果与风洞试验实测数据比较

Fig. 6 Comparison between experimental and numerical results of mean wind pressure coefficient on the front face of the heliostat at different height

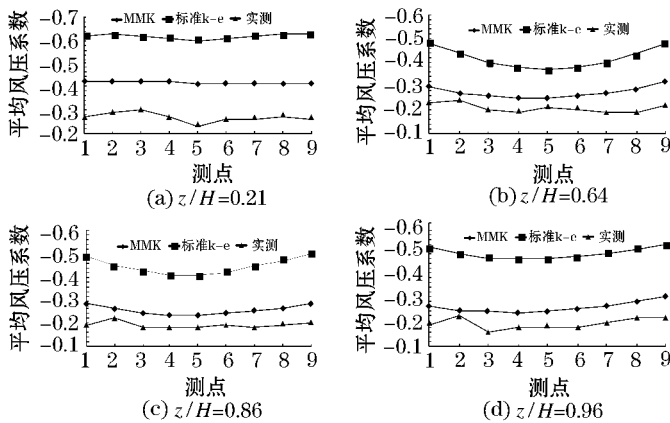


图 7 不同高度处镜背面测点的平均风压系数数值模拟结果风洞试验实测数据比较

Fig. 7 Comparison between experimental and numerical results of mean wind pressure coefficient on the back face of the heliostat at different height

分析图 6 及 7 可得: (1) 两种湍流模型的计算结果均与试验值趋势一致, 但比较而言, 数值计算的结果稍偏大。(2) 两种湍流模型迎风面上正风压比背风面上负风压模拟效果更好一些。(3) 无论是迎风面还是背风面 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型比标准 $k-\epsilon$ 模型模拟的结果要好, 说明 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型对钝体周围的分离、回流等复杂流动现象具有更好的预测效果。(4) 在大部分测点上, MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型的模拟结果与试验数据的差距不大, 数值模拟结果较为可靠。误差较大地方主要集中在定日镜背面下半部分的一些测点上, 这些测点都处在负压较大的区域。产生较大误差的原因是由于此处的小旋涡脱落, 模型模拟精度相对较差。

5.2 阻力、升力及力矩系数

根据 Obasaju 阻力系数和升力系数 C_D 和 C_L 按下式定义:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_y \int_0^H U^2 dz}, \quad (7)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_y \int_0^H U^2 dz}, \quad (8)$$

式中, ρ 为流体密度, U 为 Z 高度处风速, F_D 和 F_L 各自表示为阻力和升力, $\int_0^H U^2 dZ$ 定义为风的剪力轮廓。

入口气流按式(1)定义, 则

$$\int_0^H U^2 dZ = 0.625U_H^2 H \tag{9}$$

力矩系数 $C_{\bar{M}_x}$ 和 $C_{\bar{M}_y}$ 按下式定义:

$$C_{\bar{M}_x} = \frac{\bar{M}_x}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 D_y H^2} \tag{10}$$

$$C_{\bar{M}_y} = \frac{\bar{M}_y}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 D_x H^2} \tag{11}$$

力矩 \bar{M}_x, \bar{M}_y 分别为平行和垂直于模型宽边方向的力矩。

将两种模型的阻力、升力、力矩系数和风洞试验数据进行对比(见表1), 从表中我们可以看出: 两种湍流模型对都高估了阻力以及力矩系数, 并导致这两种模型均高估了阻力中心点 Z_p/H 的高度。用标准 $k-\epsilon$ 模型进行数值模拟时, 阻力系数和试验值相差较大。而 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型有效的降低了阻力以及力矩系数与风洞试验的误差。

5.3 风环境的研究

近年来, 建筑物周围的风环境问题越来越受到重视, 由于风洞试验受到试验条件和手段的限制, 很难测得建筑物周围的整个流场的情况, CFD 方法则不受此限制, 可以给出非常完整的资料。如风速分布和流线图等, 为设计提供参考。下面给出了本例的计算中得出的定日镜周围的平均风速流线图 8 以及图 9。图中云图表示平均风速大小的分布, 箭头表示风的流线。

表 1 两种计算模型的阻力、升力、力矩系数与风洞试验结果的比较

Table 1 Comparison of drag lift force and moment coefficients from two calculation methods and experiments

计算模型	C_D	C_L	$C_{\bar{M}_x}$	$C_{\bar{M}_y}$	Z_p/H
标准 $k-\epsilon$	1.64	0	0	0.60	0.59
MMK 修正的 $k-\epsilon$	1.43	0.01	0	0.52	0.58
风洞试验	1.22	0.07	0.001	0.40	0.53

从图 8 以及图 9 中可以看出: (1) 一个马蹄形的漩涡从定日镜的前部产生, 然后沿着钝体弯曲进入尾迹区域; (2) 从定日镜顶部和侧面出现流动分离, 从定日镜后面出现一个更大的流动分离并和马蹄漩涡相互作用; (3) 绕定日镜的流动是高度复杂的, 充满着冲撞、分离、涡旋、环绕及回流。绕经定日镜上方的流线向下卷起一个漩涡, 从地面产生一个漩涡在定日镜后面发展, 这两个漩涡相互交织在一起向下流泄出。这些现象同 $Martinuzzi$ ^[8]所述一致。

标准 $k-\epsilon$ 模型预测定日镜背面从地面产生的漩涡区域太小(见图 8)。这使得它较高估计背风面的平均风压系数。 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型从地面产生的漩涡区域明显大于标准 $k-\epsilon$ 模型。而正确预测漩涡区域的大小将决定平均风压系数的大小。故其在背风面对平均风压系数预测要明显优于标准 $k-\epsilon$ 模型。

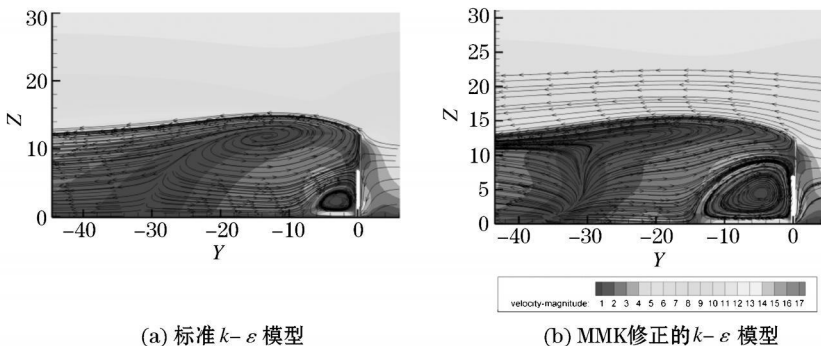


图 8 定日镜在 $x=0m$ 处 $y-z$ 平面平均风速流线图

Fig 8 Mean wind speed contour distributions with flow line for the heliostat on $y-z$ plane at $x=0m$

定日镜的背风面出现气流分离和剧烈的漩涡(见图 8), 这些地方正是前面所提到的风压系数与试验数据差距较大的高负压的区域。

用标准 $k-\epsilon$ 模型模拟的流场尾迹区域的漩涡比用 MMK 修正的 $k-\epsilon$ 模型要窄, 该差异能解释用 $k-\epsilon$

模型模拟将高估阻力系数 C_D 。在标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟中, 湍流的滞止区域被不切实际的高估, 这就导致了较高的湍流粘性比, 造成流场在建筑表面和顶面的分离区域相对狭小, 并导致在建筑物后面产生狭而窄的分离区域, 从而导致漩涡向下游移动。这点可从图 9 中可以看出。

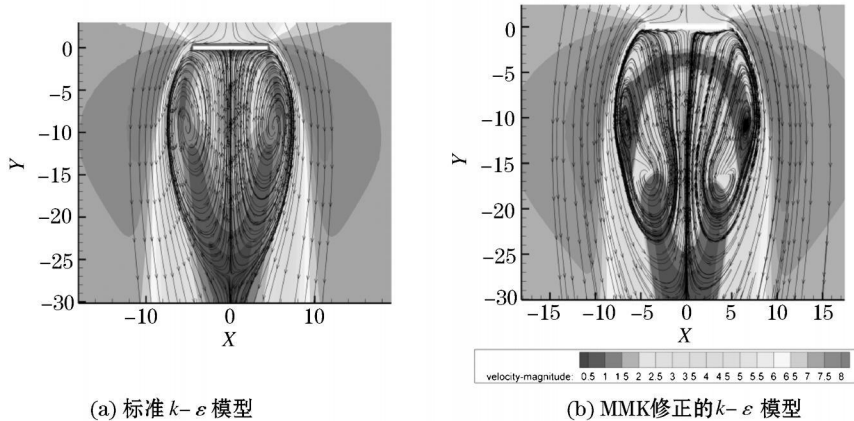


图 9 定日镜在 $z=6.7\text{m}$ 处 $x-y$ 平面平均风速流线图

Fig 9 Mean wind speed contour distributions with flow line for the heliostat on $x-y$ plane at $z=6.7\text{m}$

6 结论

本文采用的结构网格划分实用方法, 既能节约计算时间又能达到计算精度的要求。采用标准 $k-\varepsilon$ 和 MMK 修正的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对定日镜的表面风压系数和风场环境进行了数值模拟及分析。通过对模拟结果的分析以及与风洞试验结果的比较, 对两种模型的模拟效果进行了分析评价; 并获得了定日镜镜面以及背面的风压分布的规律; 定日镜周围风场的特性; 特别是定日镜背面复杂的风场的分析结果。本文的主要结论如下:

(1) 数值模拟和风洞试验的结果从整体趋势上看均有较好的吻合。这表明通过数值模拟方法和风洞试验相结合能够为定日镜的抗风设计提供合理的设计参数。

(2) MMK 修正的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对定日镜平均风压的预测效果明显优于标准 $k-\varepsilon$ 模型的预测效果, 特别是对于高负压区的背面的预测。

(3) 数值模拟方法能有效地模拟定日镜周围的流场。特别是对定日镜背风面流动的分流、涡旋、环绕及回流等能够做出较准确地预测。

(4) MMK 修正的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对定日镜背面流场的模拟比 $k-\varepsilon$ 湍流模型更为准确。标准 $k-\varepsilon$ 模型预测定日镜背面从地面产生的漩涡区域较小, 这使其较高估计了背风面的平均风压系数。

(5) 对于阻力、升力以及力矩系数 MMK 修正的 $k-\varepsilon$ 模型相对于标准 $k-\varepsilon$ 有更好的预测效果, 与风洞试验所得的结果比较接近。

参考文献:

- [1] Murakami S. Overview of turbulence models applied in CWE-1997 [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1998; 74: 1-24.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与运用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering [J]. JW Ind Eng Indus Aerodyn 1997; 67&68: 3-34.
- [4] Murakami S, Mochida A. 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the $k-\varepsilon$ model [J]. JW Ind Eng Indus Aerodyn 1988; 31(2): 283-303.
- [5] Launder BE, Kato M. Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder [C]. ASME Fluid Eng Conf 1993.
- [6] Murakami S, Mochida A, Kondo K, Ishida Y, Tsuchiya M. Development of new $k-\varepsilon$ model for flow and pressure fields around bluff body. CWE96, Colorado, USA, 1996 [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1998; 67-68: 169-82.
- [7] Fluent Inc. The user guide of Fluent 6.3 2006.
- [8] Martinuzzi R. Experimentelle untersuchung der umströmung wandgebundenen rechteckiger prismatisch er hindemisse. Dissertation. University Erlangen-Nürnberg 1992.