

文章编号: 1000-5013(2010)03-0327-05

# 大跨屋盖风荷载风洞试验及数值模拟

吴立<sup>1</sup>, 张华林<sup>2</sup>, 彭兴黔<sup>1</sup>, 周显鹏<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 泉州市重点工程办公室, 福建 泉州 362006)

**摘要:** 以闽南某大跨体育馆屋盖表面为例, 进行风洞试验和计算流体动力学(CFD)数值模拟研究. 通过风洞试验, 得出体育馆最不利风向角下的平均风压系数和分块风压系数. 基于 CFX10.0 软件平台, 采用剪切应力输运(SST)  $k-\epsilon$  湍流物理模型, 对屋盖上的平均风压进行数值模拟. 将计算结果与风洞试验数据进行对比, 结果显示两者大体上基本吻合, 证明数值模拟可以较准确地模拟实际大跨屋盖表面的平均风荷载.

**关键词:** 大跨屋盖; 风洞试验; 数值模拟; 风压系数; 计算流体动力学

**中图分类号:** TU 208.5; TU 312+.1

**文献标识码:** A

与风洞试验相比, 计算流体动力学(CFD)数值模拟具有成本低、周期短、效率高等优点. 而且, 其不受模型尺度的影响, 可进行全尺度模拟, 克服了试验中难以满足的雷诺数相似的困难, 可以方便地变化各种参数, 以研究不同参数的影响. 随着计算机软硬件水平的飞速提高及流体力学理论的发展, CFD 数值模拟将会成为一种很有潜力的方法. 闽南某大跨体育馆总平面由一个椭圆形和一个半圆筒状网壳组成空间网壳结构, 平面是单轴对称的椭圆形, 长轴 232 m, 短轴 105 m, 屋盖最高点距地面为 32 m. 该结构体型十分独特, 其表面风压分布及相应的体型系数无法从我国规范中得到, 风荷载成为其设计的主要控制荷载. 因此, 以该大跨体育馆风荷载为研究对象, 进行风洞模型试验和数值模拟研究.

## 1 风洞试验及数据处理

### 1.1 试验设备及模型

按照文[1]的方法, 风洞实验模型选为 1/120 的刚性模型. 试验中, 风向角间隔为 15°, 共有 24 个风向, 即 24 个试验工况. 风沿结构中轴线吹向比赛馆时, 定义为 0° 风向角; 风向角按顺时针方向增加. 体育馆方位、风向角示意图, 如图 1 所示. 体育馆的比赛馆表面上共布置了 360 个测点, 在训练馆表面上共布置了 236 个测点. 根据体育馆所在地的地貌特征及荷载规范<sup>[2]</sup> 规定, 确定该体育馆所处地为 B 类地貌. 图 2 为风洞模拟的风场特征.

### 1.2 试验数据处理

在空气动力学中, 物体表面的压力通常采用无量纲压力系数  $C_p(t)$  表示, 有

$$C_p(t) = \frac{p_i(t) - p}{p_0 - p} \quad (1)$$

式中:  $C_p(t)$  为模型上第  $i$  测孔所在位置的风压系数;  $p_i(t)$  为该位置上所测得的表面的风压值;  $p_0$  和  $p$  分别为参考点处所测得的平均总压与平均静压. 风压符号规

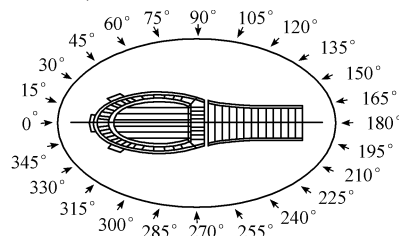


图 1 风洞试验模型方位及风向

Fig. 1 Model and wind direction in wind tunnel test

收稿日期: 2008-07-08

通信作者: 彭兴黔((1959-), 男, 教授, 主要从事结构风工程的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510022); 福建省科技重大专项前期项目(2005ZY1016); 福建省泉州市科技计划重点项目(2007G7); 福建省厦门市发改委科技计划项目(2008-07)

定:风压向下为正,而风压向上为负.根据上式所记录的数据进行概率统计分析,可以得到各测点在 24 个风向角下的平均风压系数  $\overline{C_p}$ .为了便于工程应用,可将每个测点的风压系数  $C_p(t)$  转换为平均分块风压系数  $C_{p,b}$ .即

$$C_{p,b} = (\sum_{i=1}^n \overline{C_p} A_i) / A.$$

(2)

式(2)中:平均分块风压系数  $C_{p,b}$ 是以梯度风压为参考风压的系数; $\overline{C_p}$ 为测点  $i$  平均风压系数; $A_i$ 为测点  $i$  对应的面积; $A$ 为分块的总面积.

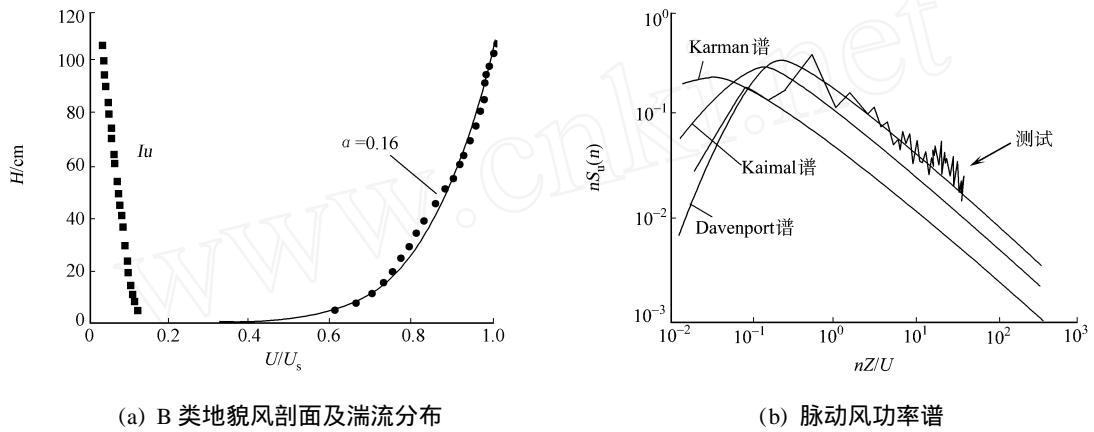


图 2 风洞模拟的风场特征  
Fig. 2 Characteristics of wind field in the wind tunnel

2 平均风压的 CFD 数值模拟

2.1 湍流物理模型

采用完整的雷诺应力模型<sup>[3-8]</sup>,近壁面用壁面函数以模拟壁面附近复杂的流动现象.雷诺应力模型包括平均运动的 3 个动量方程、1 个连续性方程、6 个雷诺应力方程和 1 个 方程组成的封闭方程组.

2.2 边界条件

(1) 入口边界条件.风速由式  $U_z = U_0 (Z / Z_0)$  确定,其中  $Z_0, U_0$  为参考高度和参考高度处的风速.按照风洞试验方法,分别取  $Z_0 = 120\text{ m}$  和  $U_0 = 14\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,B 类地面粗糙度系数 取 0.16,入口处的湍流强度,当  $Z \leq 5\text{ m}$  时,取常数 0.23;当  $5\text{ m} < Z \leq 350\text{ m}$  时,按式  $I_z = 0.094 \times (Z / 350)^{-0.21}$  计算.

(2) 边界条件出口.采用充分发展的湍流;计算区域上表面、侧面采用自由滑移的壁面;地面采用无滑移的粗糙壁面;建筑物壁面采用无滑移的光滑壁面.

2.3 几何数值模拟及网格图

选用流体动力学软件 CFX10.0 计算,并按照实际尺寸建立数值模型.数值模拟的风洞长为 2 700 m,宽为 1 500 m,高为 175 m,体育馆模型中心距风洞入口为 900 m,整个计算域分为计算域 和计算域 .计算流域 共划分 424 962 个非结构化的六面体单元,计算流域 共划分 318 879 个四面体单元和 315 380 个非滑移近壁面的六面体单元,最终得到体单元为 1 059 221 个.模型及网格图如图 3 所示.

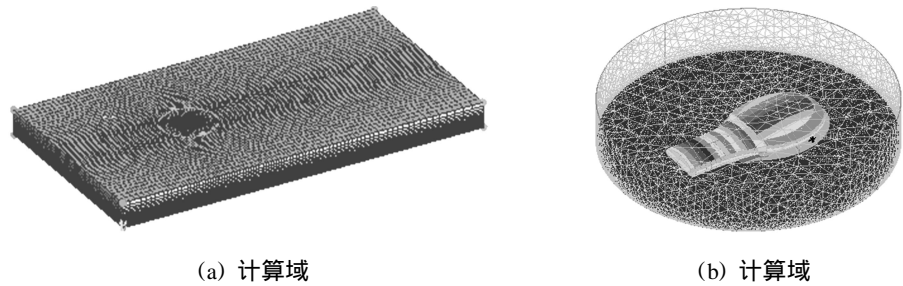


图 3 模型网格示意图  
Fig. 3 Model and mesh division

3 数值模拟数据与风洞试验结果比较

3.1 屋盖平均风压系数

闽南某大跨体育馆由比赛馆和训练馆 2 个单体结构组成,每个单体在结构上是独立的. 因此,用于屋盖结构设计的风荷载,也只需分别考虑作用在各个单体屋盖上的最不利情况. 由于该结构沿中轴对称,所以仅分析其在 0~180° 风向角下的风荷载特征. 对体型结构比较复杂的比赛馆而言,最不利风向角是 75° 风向角. 在此风向下,风洞试验的平均风压系数分布,如图 4(a) 所示,而数值模拟平均风压系数分布如图 4(b) 所示.

从图 4(a),(b) 可以看出,在风向角为 75° 来流风的作用下,训练馆屋盖在迎风部分的负压较大. 在屋盖中部及后缘,平均负压系数逐渐减小,但整个体育馆屋盖表面风压均为负压,风洞试验平均负压系数最大达 -0.45,数值模拟平均负压系数最大达 -0.59.

对训练馆而言,最不利风向是 105° 风向角. 在此风向下,风洞试验的平均风压系数分布,如图 4(c) 所示,数值模拟的平均风压系数分布,如图 4(d) 所示. 从图 4(c),(d) 可以看出,在风向角为 105° 来流风的作用下,由于来流的分离,在迎风屋盖上边缘附近出现了高压区,且平均风压系数的变化梯度较大. 在其他区域,平均风压系数变化相对平缓,特别在屋盖建筑外型改变处,来流分离最为严重,平均负压系数最大可达 -0.87,数值模拟平均负压系数最大达 -1.26.

总体来说,数值模拟风压系数分布图与风洞试验结果变化趋势保持一致. 但是,其数值在不同的位置吻合程度不一样,前缘和后缘数值模拟比风洞试验结果大,两者在中部较为接近.

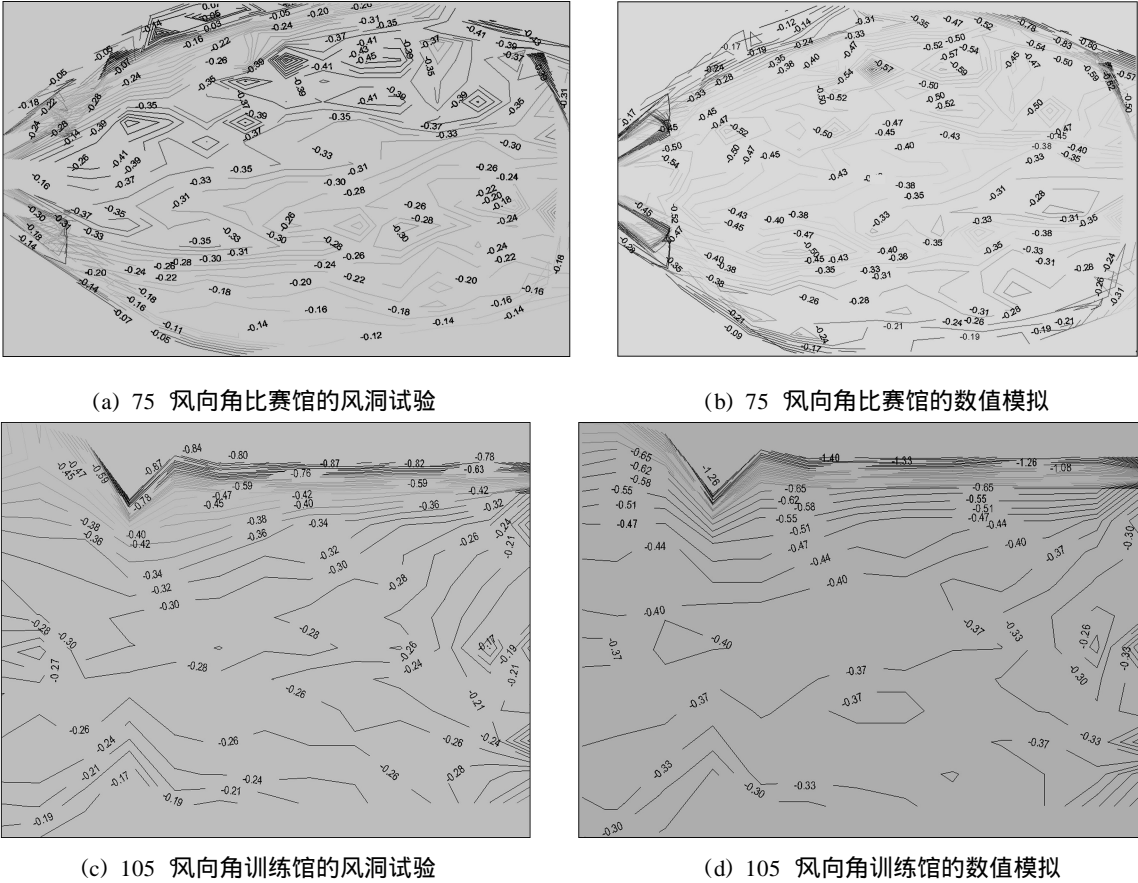


图 4 风洞试验与数值模拟的风压系数分布图

Fig. 4 Wind pressure coefficient distribution in wind tunnel test and numerical simulation

3.2 分块体型系数

闽南某大跨体育馆训练馆的最不利风向角为 105°, 比赛馆的最不利风向角为 75°. 当训练馆在 105° 最不利风向角下,其数值计算得到的分块风压系数如图 5(a) 所示,试验得到的分块风压系数如图 5(b) 所示.

比较图 5(a),(b)可知,训练馆在 105° 最不利风向角下,其数值计算得到的分块风压系数最大值为 - 0.46,试验得到分块风压系数最大值为 - 0.36,误差为 27.8%;而训练馆在 105° 最不利风向角下,其数值计算得到的分块风压系数的最小值为 - 0.33,试验得到的分块风压系数最小值为 - 0.29,误差为 13.8%。两者分块风压系数比较的最大误差为 35.3%,平均误差在 25%左右。

比赛馆在 75° 最不利风向角下,其数值计算结果如图 5(c)所示,试验得到的分块风压系数如图 5(d)所示。

比较图 5(c),(d)可知,比赛馆在 75° 最不利风向角下,其数值计算所得到的分块风压系数最大值为 - 0.50,试验得到分块风压系数最大值为 - 0.45,误差为 11%。两者分块风压系数比较的最大误差为 41%,平均误差在 20%左右。

从总体上来说,数值模拟结果与风洞试验结果基本上是吻合的,模拟结果是可行的。

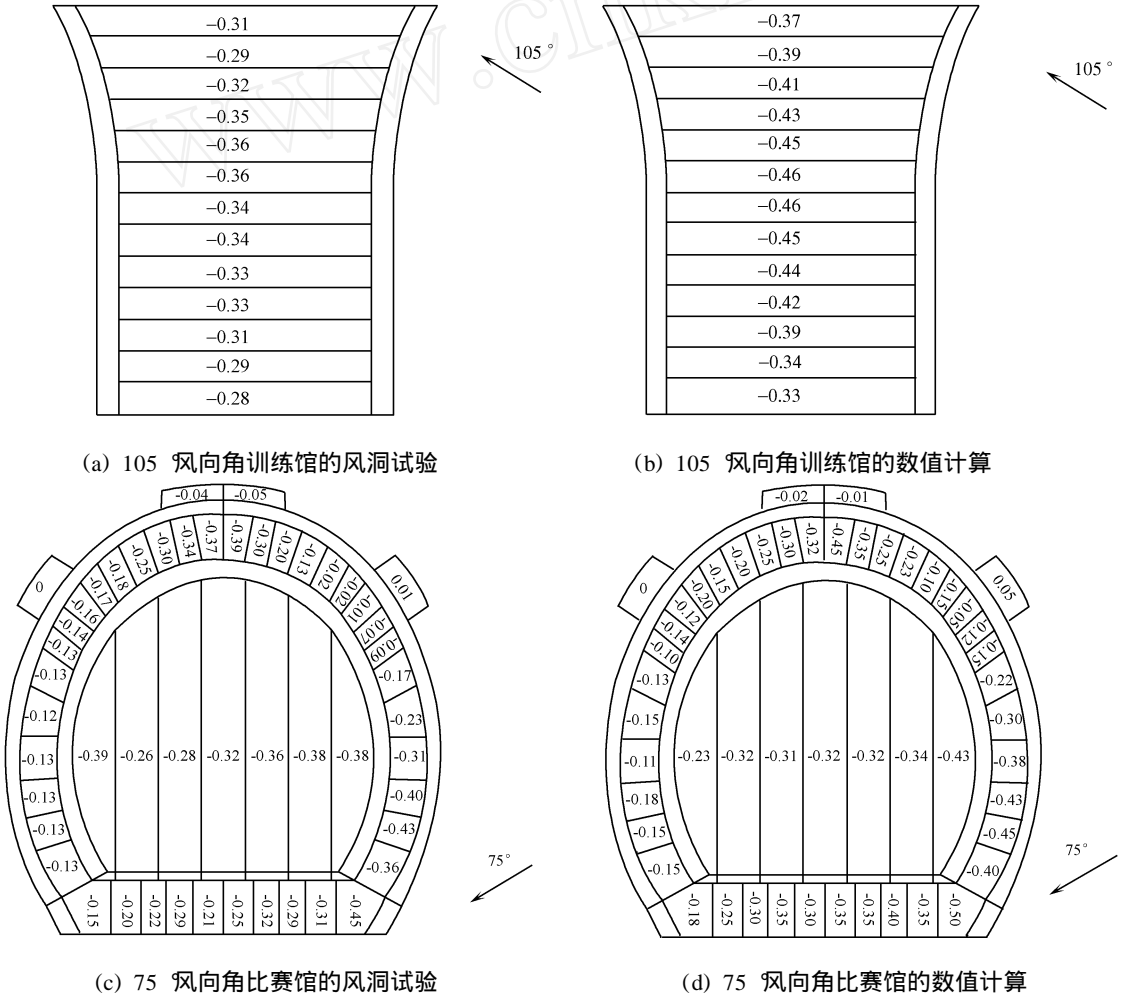


图 5 分块风压系数的风洞试验与数值计算

Fig. 5 Regional pressure coefficient in wind tunnel test and numerical simulation

3.3 误差分析

引起试验结果与数值模拟计算分析产生误差的原因有很多。首先,数值模拟计算中的建模误差,把体育馆模型近似为封闭结构,边界条件不能完全吻合。入口的风剖面、粗糙度等不能完全模拟风洞试验的环境,导致流体在建筑物周围产生漩涡、分离等与试验有一定的差别。

微分方程离散时的截断误差,以及舍入误差等也是难以避免的,分块风压系数的计算方法不同,也可能是引起误差的原因之一。

其次,计算中选用的 SST 湍流模型,本身在高负压区风压的计算上的确存在一定的不足。另外,模拟计算选用了实际尺度的模型,而风洞试验选用缩尺模型,选取描述流场的部分参数来满足与实际情况下的相似比例,风洞实验本身也有不可避免的误差。

## 4 结束语

通过对闽南某体育馆屋面风荷载的风洞试验和 CFD 数值模拟对比研究,发现两者在风压分布的规律上基本保持一致,证明了 CFD 数值模拟技术可用于实际结构静风荷载的分析研究. 尽管 CFD 模拟结果在整体上能够基本满足工程精度要求,但是局部差别可能较大. 就现阶段而言,将 CFD 技术用于工程方案阶段的预研,是一种较为安全稳妥的方法.

### 参考文献:

- [1] 黄鹏,全涌,顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,1999,27(2):136-144.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50009 - 2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] HOXEY B P,ROBERTSON A P,RICHARTSON G M,et al. Correction of wind-tunnel pressure coefficients for Reynolds number effect[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,71:574-555.
- [4] RICHARTSON G M,HOXEY R P,ROBERTSON A P,et al. The silsoe structures building: Comparisons of pressures measured at full scale and in two tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,72:187-197.
- [5] 楼文娟,孙斌,卢旦,等. 复杂型体悬挑屋盖风荷载风洞试验与数值模拟[J]. 建筑结构学报,2007,28(1):107-112.
- [6] 林斌,孙晓颖,武岳,等. 大庆石油学院体育馆屋面风荷载的风洞试验和 CFD 数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(3):357-361.
- [7] 顾明,黄鹏,杨伟,等. 上海铁路南站平均风荷载的风洞试验和数值模拟[J]. 建筑结构学报,2004,25(5):43-54.
- [8] 彭兴黔,贾勇. 开洞位置对低层轻钢结构风荷载的影响[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(4):580-583.

## Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Wind Loads on Stadium Roof with Long Span

WU Li<sup>1</sup>, ZHANG Hua-lin<sup>2</sup>,  
PENG Xing-qian<sup>1</sup>, ZHOU Xian-peng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Office of the Key Projects of Quanzhou, Quanzhou 362006, China)

**Abstract:** The wind tunnel test and computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation are carried out to investigate the wind load on a stadium roof with long span in south Fujian. The wind tunnel test finds out the average wind pressure coefficient and the regional wind pressure coefficient on the stadium roof under the most disadvantageous wind direction. Meanwhile, the wind load distribution is numerically simulated using shear stress transport (SST) turbulent model based on the CFX 10.0 software platform. The tested wind pressures agree well with the numerical simulation pressures, therefore the accuracy of the numerical simulation is acceptable to calculate the average wind pressure on roof with long span.

**Keywords:** roof with long span; wind tunnel test; numerical simulation; pressure coefficient; computational fluid dynamics

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)