

考虑流固耦合作用的充气膜结构风压分布研究

申跃奎^{*1}, 赵德顺¹, 王 秦²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 深圳市博德维环境技术股份有限公司, 深圳 518057)

摘 要: 充气膜结构是典型的风敏感型柔性结构, 风荷载经常起关键的控制作用。本文利用 ANSYS14.5 程序中的 workbench 平台, 考虑流固耦合作用, 研究矩形平面气承式充气膜结构的风压系数分布。其中, 选用基于雷诺时均模拟法的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行风场模拟, 采用弱耦合分析方法模拟流固耦合风荷载效应。分析的参数选择风向角、结构内压、矢跨比和平面长宽比。针对矢跨比分别为 1/4, 1/3 和 1/2, 长宽比分别为 5/3, 2/1 和 3/1 的柔性充气膜结构模型, 计算不同内压及不同风向角作用下的结构响应。结果表明, 考虑流固耦合作用时, 充气膜结构的风压体型系数比不考虑流固耦合作用的刚性模型明显偏大, 其影响因子在 1.25~1.5 之间; 充气膜结构的风压系数分布受风向角、内压、长宽比及矢跨比的影响较大。

关键词: 流固耦合; CFD 数值模拟; 充气膜结构; 风压分布

中图分类号: TU393.3; O35

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2017)05-0665-07

1 引 言

充气膜结构具有轻质高强和经济适用的优点, 非常适用于建造大型体育场馆、展览馆以及仓储等大跨度空间结构^[1]。作为一种典型的柔性结构, 充气膜结构对风荷载十分敏感, 风荷载在设计中经常起控制作用。但是, 考虑结构的刚度、质量相似和流体与固体结构的相互作用, 柔性结构在风洞试验中很难准确地进行模拟。在这种情况下, 计算流体动力学 CFD (Computation Fluid Dynamics) 就可以用于结构的风荷载响应计算, 解决流体和柔性结构的相互耦合问题。孙晓颖等^[2]基于对膜结构流固耦合效应机理的探讨, 提出一种简化的模拟流固耦合方法; 朱伟亮等^[3]探讨了影响薄膜结构风致耦合效应的影响因素; 武岳等^[4]在考虑流固耦合作用的基础上, 建立了一种适用于大跨度张拉膜结构风振分析的 CFD 数值模拟方法。本文考虑流固耦合效应, 采用 ANSYS 软件的 CFD 模块计算充气膜结构的风压分布规律, 对其在风荷载作用下的响应特性进行分析研究。

2 计算原理

2.1 分析原理

建筑物周围流场绕流属于低速不可压缩黏性

流体, 流体运动遵循质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律^[5]。由于风荷载的随机特性, 实际工程中更注重湍流运动下的流场和结构响应。目前的湍流模型模拟分析方法主要分为直接数值模拟法、雷诺平均法 (RANS) 和大涡模拟法 (LES)^[6]。其中, 雷诺平均法 (RANS) 是将时均化后的雷诺方程进行求解, 应用较广泛。所以, 本文采用 RNG $k-\epsilon$ 雷诺应力模型^[7]对湍流进行雷诺平均法模拟。具体的湍流和耗散方程^[8]为

湍流动能方程 (k 方程):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K - \rho \epsilon \quad (1)$$

耗散方程 (ϵ 方程):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_K + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中 ρ 为密度, k 为湍流动能, ϵ 为湍流动能耗散率, μ_t 为湍流粘度, μ 为湍流粘度系数, G_K 为平均速度梯度而产生的湍流动能项, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 是经验常量, σ_k 和 σ_ϵ 是 k 方程和 ϵ 方程的湍流 Prandtl 数。

分析时模型常量 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, 当主流方向与重力方向平行时 $C_{3\epsilon}$ 取 1、垂直时取 0。

2.2 流固耦合计算方法

由于充气膜结构是典型的柔性结构, 风作用下

收稿日期: 2016-07-20; 修改稿收到日期: 2016-08-03.

基金项目: 西部建筑科技重点实验室项目 (K01346) 资助项目.

作者简介: 申跃奎^{*} (1967-), 男, 博士, 副教授

(E-mail: ykshen129@126.com).

结构会产生较大的变形,进而又影响风荷载的作用,所以必须考虑风和结构的耦合作用。目前,流固耦合^[9]问题的求解方法主要分为弱耦合求解法(交错积分求解法)和强耦合求解法^[10](整体求解法)两类,具体的实施方法又可以分为分区法和整体法^[11]。其中,强耦合方法计算的工作量大、应用困难,所以弱耦合的应用较多^[12,13]。刘瑞霞^[14]在弱耦合算法的基础上,编制了膜结构流固耦合程序,实现了二维双坡屋面的流固耦合数值模拟。本文考虑到计算结果精度和效率的要求,也采用弱耦合的求解策略对充气膜结构的风荷载响应情况进行求解。即在流体域和结构域分别用各自的求解器在时域内进行积分计算,利用流体域得到的风压分布作用到结构上得到结构的变形,再将变形后的结构形状更新到流体域进行结构风压的求解,在时间上交错推进计算,直到变形和风压分布趋于稳定,完成计算。

3 分析模型和参数

本文用 CFD 程序进行结构物绕流的模拟,即用一个足够大的有限流场计算区域代替无限大的空间,并在其中建立结构模型进行分析。结合某实际工程,建立尺寸为 $900\text{ m} \times 600\text{ m} \times 150\text{ m}$ 的流场模型,并考虑流固耦合作用,对充气膜结构的风荷载进行模拟研究。具体形状如图 1 和图 2 所示。

建立结构模型时,将膜材和膜面上索的密度及刚度等效为均匀材料。考虑保温的需要,实际的充

气膜结构常为双层膜结构,受力的外层膜材为厚 1.0 mm 的 PVDF 涂层膜材,保温内膜为厚 0.8 mm 的 PVC 膜材,双层膜材加上钢丝绳的等效均布质量为 2.5 kg/m^2 ,所以计算中取膜材的厚度为 1 mm ,其等效材料密度为 2500 kg/m^3 ;同样的原理,等效膜面材料的弹性模量为 $1.2 \times 10^9\text{ Pa}$,泊松比为 0.3 。

由于膜材料厚度小,其抗弯刚度可以忽略,所以结构的刚度主要是膜面内力带来的几何刚度。而几何刚度又和膜内的内压紧密相关,所以膜内内压是研究的重要参数。无疑,风的方向角和结构的本身尺寸变化也会影响结构的风荷载,这些也是本文研究的参数。

研究内压的影响时,保持风向角为 90° ,结构尺寸为 $60\text{ m} \times 30\text{ m} \times 15\text{ m}$,内压分别变化为 150 Pa , 300 Pa 和 400 Pa ;研究风向角的影响时,保持结构尺寸为 $60\text{ m} \times 30\text{ m} \times 15\text{ m}$,内压分别变化为 300 Pa , 400 Pa , 500 Pa 和 600 Pa ,风向角(即来流方向与充气膜结构长边所夹锐角)分别变化为 0° , 30° , 60° 和 90° ;研究矢跨比的影响时,保持风向角为 90° ,内压为 300 Pa ,结构平面尺寸为 $60\text{ m} \times 30\text{ m}$,高度分别变化为 7.5 m , 10 m 和 15 m ;研究长宽比影响时,保持风向角为 90° ,内压为 300 Pa ,结构平面尺寸分别为 $50\text{ m} \times 30\text{ m}$, $60\text{ m} \times 30\text{ m}$ 和 $90\text{ m} \times 30\text{ m}$,模型的高度均为 10 m 。充气膜结构尺寸如图 3 所示。

计算对应的基本风速为 25.3 m/s ,相当于基本风压 0.4 kN/m^2 。计算采用的地面粗糙度假定为 B 类场地,流场入口采用速度入口,出口采用自由出流边界条件,流场两侧和顶端采用对称边界条件,地面和膜面采用无滑移壁面^[15],将膜结构与流体接触面定义为流固耦合面。

4 结果分析

4.1 充气膜结构在不同风向角下的风压分布

表 1 为不同内压、不同风向角下充气膜结构的风压系数最大值统计及其与刚性模型的对比。

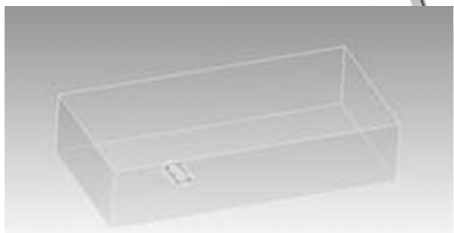


图 1 模型在流场中的布置图
Fig. 1 Layout of model in flow field

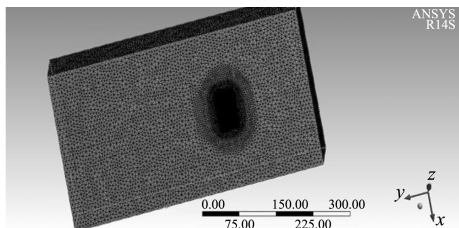


图 2 网格划分示意图
Fig. 2 Meshing diagram

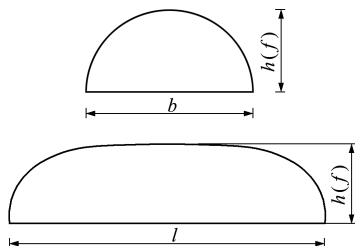


图 3 充气膜结构尺寸示意图
Fig. 3 Size of pneumatic membrane structure

图4为该结果的曲线形式表达,可以看出,各工况下的风压系数正压最大值一般在风向角为 0° 或 90° 时出现,而风压系数负压最大值则一般在风向角为 90° 时出现。各工况下柔性模型风压系数的最大正压值和最大负压值均比相应的刚性模型偏大。定义流固耦合时风压系数与刚性模型的风压系数之比为风载影响因子,则风向角为 0° 时,正压和负压的最大影响因子分别为1.5和1.25;风向角 90° 时,正压和负压的最大影响因子分别为1.3和1.35。这说明由于流固耦合作用,膜结构的变形使结构表面的风压系数值相对于刚性模型有所增加,仅通过刚性模型计算的风压系数值用于膜结构的抗风计算是不安全的。

图5为刚性模型和内压300 Pa的柔性模型在 90° 风向角下的风压系数分布,其中风压系数为正值表示风压方向指向膜面,风压系数为负值表示风压方向背离膜面。从风压分布的总体情况来看,风向角为 90° 时的风压大致沿结构的中轴线对称分布,这种工况下模型表面的风压分布除了迎风面和背风面的局部区域为正压分布外,绝大部分区域为负压分布。刚性模型的风压系数等值线分布相对

于柔性模型的等值线分布更稀疏均匀,说明刚性模型表面的风压变化速度比柔性模型缓慢,流动分离现象也不如柔性模型剧烈。风向角为 90° 时,刚性模型和柔性模型的风压系数值和分布的密集程度差别很大,柔性模型的风压系数值相对于刚性模型明显偏大。

在风向角为 90° 、内压300 Pa时对充气膜结构进行风压分布分析,得到充气膜结构风压系数最大正压值为0.8,出现在迎风面的底部区域;风压系数最大负压值为-3.4,出现在模型的顶部区域。

结构的风压分布会受到结构外形的影响。在充气膜结构的流固耦合计算中,风荷载在膜结构表面形成的风压会使膜结构产生比较大的变形,结构产生变形后又会对其表面的风压分布造成影响。也就是说,结构最终的风压分布离不开结构最终变形的影响。为更直观地理解风场与结构的相互作用,图6给出风向角为 90° 柔性模型的周围流场和位移分布。可以看出,在迎风面为正压,结构会产生一定的凹陷;在背风面风场会产生旋涡脱落进而使结构受到负压;在结构顶部由于风流受阻、风速加大而受到较大的上吸力,最后使得结构的顶部有

表1 各工况下的风压系数极值汇总
Tab.1 Extreme wind coefficient

压强/Pa		0°	30°	60°	90°
300	正压	1.2	0.4	0.4	0.8
	负压	-1	-0.7	-1.2	-3.4
400	正压	1.2	0.4	0.4	1
	负压	-1	-0.7	-1.1	-3.5
500	正压	1	0.3	0.4	0.9
	负压	-1.2	-0.7	-1.1	-3
600	正压	1	0.4	0.4	0.6
	负压	-1	-0.7	-1.1	-3
刚性	正压	0.8	0.3	0.3	0.7
	负压	-0.8	-0.6	-0.9	-2.6

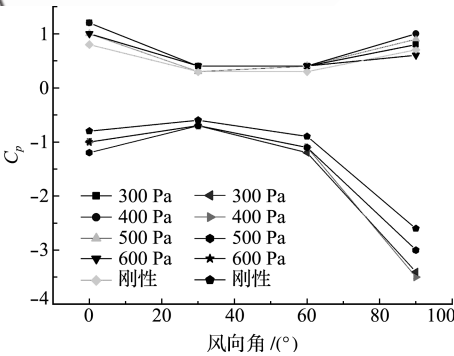
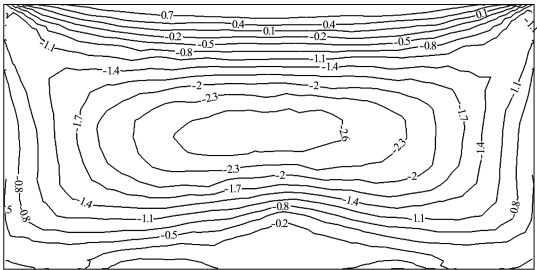


图4 风压系数极值沿风向角的变化
Fig.4 Max wind pressure coefficient under different wind direction



较大的向上位移。后文讨论中,不同压强、矢跨比和长宽比都以风向角为 90° 的情况分析。

4.2 充气膜结构在不同内压下的风压分布

图 7 为刚性模型及内压为 150 Pa, 300 Pa 和 400 Pa 时充气膜结构的风压系数分布。其中,上部是迎风面,下部是背风面。

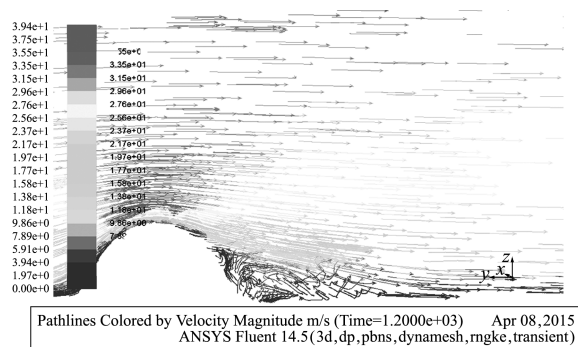
可以看出,主体结构的迎风面和背风面的风压系数沿立面中线对称分布。除迎风面局部区域风压为正压外,结构大部分区域为负压。风压系数最大正压出现在模型迎风面的底部,最大负压均出现在模型的顶部。柔性模型的风压系数最大值均大于刚性模型的最大值。随着内压增加和结构刚度增大,风压系数峰值有所减小,等值线分布更加均匀,密集区逐渐向下方发展。顶部的上吸区形状越来越向刚性模型图形靠近,说明随着内压增加,结

构刚度增加,结构更趋于整体受力。

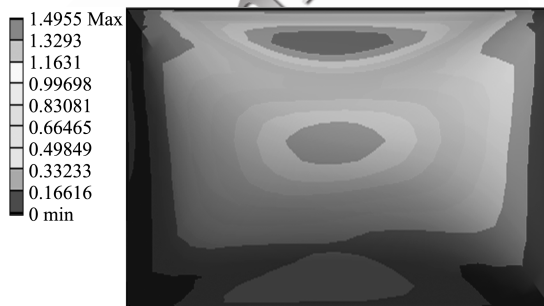
4.3 充气膜结构在不同矢跨比下的风压分布

图 8 为不同矢跨比情况下模型相应的风压系数分布。当模型的矢跨比为 $1/4$ 时,模型表面风压系数的最大负压值为 -2.6 ,出现在模型顶部区域,风压系数最大正压值为 1 ,出现在迎风面的底部区域;当模型的矢跨比增大到 $1/3$ 和 $1/2$ 时,模型表面的风压系数最大负压值均为 -3.5 ,出现在模型顶部区域,最大正压值均为 1 ,出现在模型迎风面底部区域。

三种情况的风压系数分布均沿结构的中线对称分布。顶面较平的矢跨比为 $1/4$ 的模型表面风压分布系数等值线分布较为均匀,有利于结构的整体受力。这说明此种工况下结构表面的流动分离现象较弱,风速变化相对缓慢。当模型的矢跨比增



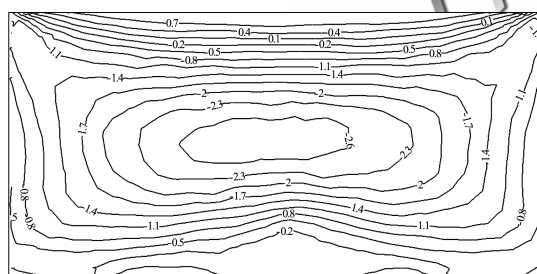
(a) 充气膜结构周围风场剖面



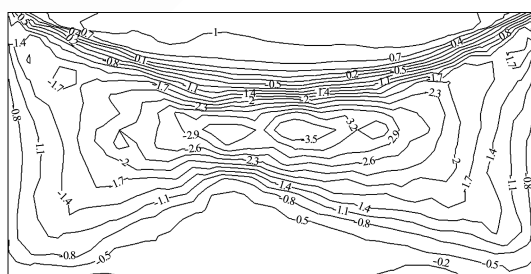
(b) 结构位移分布

图 6 风向角 90° , 内压 300 Pa 时的结构位移和风场剖面

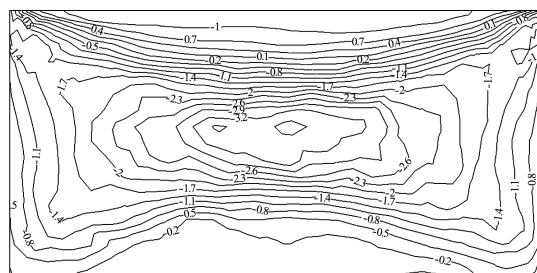
Fig. 6 Structure displacement and wind flow field profile of air-dome with internal pressure 300 Pa under wind direction 90°



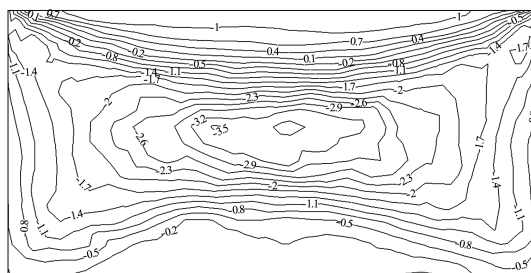
(a) 刚性模型



(b) 内压 150 Pa



(c) 内压 300 Pa



(d) 内压 400 Pa

图 7 90° 风向角时刚性模型及不同内压下柔性模型的风压系数分布

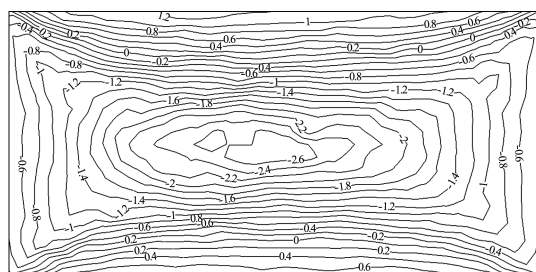
Fig. 7 Wind pressure coefficient of rigid model and air-dome with different inner pressure under wind angle 90°

大到 $1/3$ 时,最大负风压系数变为 -3.5 ,是矢跨比为 $1/4$ 情况的 1.35 倍。而且,此时结构表面的风压系数等值线分布很不均匀,在迎风面和背风面的底部,等值线分布较为稀疏,而在上部等值线分布较为密集,结构局部受到很大的负压作用,对结构的整体受力不利,说明此时在迎风面和背风面的上部风压变化非常剧烈,发生了严重的流动分离现象。当计算模型的矢跨比继续增大至 $1/2$ 时,结构的风压分布规律与矢跨比为 $1/3$ 的情况稍有不同,风压系数增幅不大。

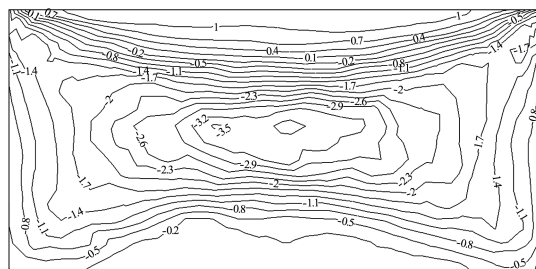
4.4 充气膜结构在不同长宽比下的风压分布

图 9 为不同长宽比下各模型的风压系数分布。可以看出,风压系数负压最大值均出现在模型顶部

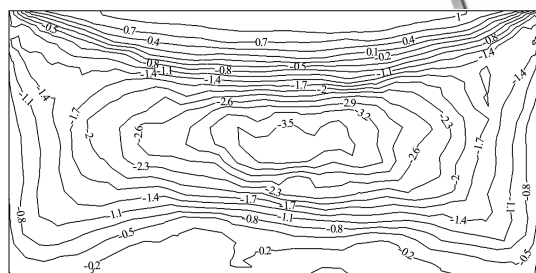
区域,正压最大值均出现在底部区域。随着模型的长宽比的增加,负压最大值逐渐增加。在长宽比为 $5/3$ 时,风压系数负压最大值为 -2.8 ;长宽比为 $2/1$ 时,风压系数负压最大值为 -3.5 ;长宽比为 $3/1$ 时,风压系数负压最大值为 -4.5 ,正压最大值则有减小的趋势。随着模型长宽比的增加,膜面等压线变密且分布越来越不均匀,等压线密集区逐渐向上发展。说明随着长宽比的增加,风场在水平方向的绕流效应减小,使得结构表面的流动分离现象加强,并且分离区域逐渐向模型顶部发展,进而加大了顶部的风压分布系数,所以应该尽量避免建造大长宽比的充气膜结构。



(a) $f/b=1/4$

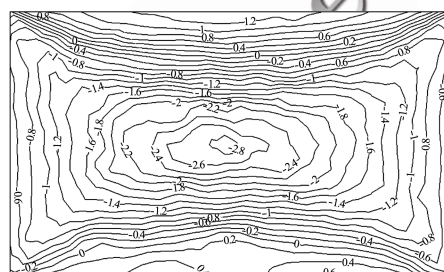


(b) $f/b=1/3$

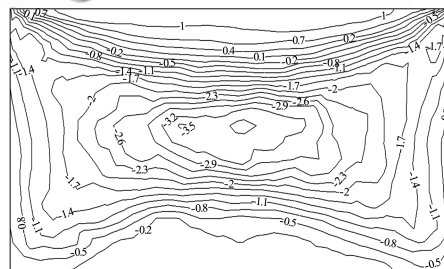


(c) $f/b=1/2$

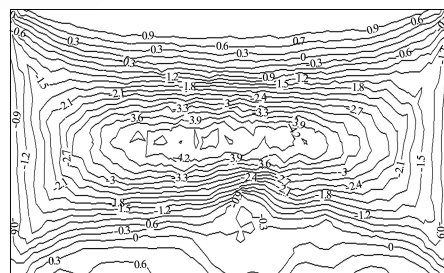
图 8 90° 风向角时模型在不同矢跨比下的风压系数分布
Fig. 8 Wind pressure coefficient of air-dome with different rise-span ratio under wind direction angle 90°



(a) $b/l=5/3$



(b) $b/l=2/1$



(c) $b/l=3/1$

图 9 90° 风向角不同长宽比模型风压系数分布
Fig. 9 Wind pressure coefficient of air-dome with different length-width ratio under wind direction angle 90°

5 结 论

本文考虑流固耦合效应,对不同参数的充气膜结构的风压系数分布进行研究,并与刚性模型的风压分布系数进行对比,得到以下结论。

(1) 来流的方向对于结构的风压分布有显著

影响。相同条件下,当来流的方向与充气膜结构的长边垂直(90° 风向角)时,结构表面的风压分布最为不利,其负压值最大达到 -3.5 。

(2) 考虑流固耦合作用后,膜结构的风压系数相对于刚性模型有 $1.25 \sim 1.5$ 倍的增大,所以取刚性模型计算所得的风压系数值用于膜结构的抗风

设计是不安全的,应该参照流固耦合结果对其进行修正。

(3) 当结构内压较小时,模型凹陷区域过大使得等值线整体分布较不均匀,此时结构局部受力。随着内压增加,结构刚度增加,结构更趋于整体受力。

(4) 顶部的风压系数随着结构矢跨比的增大而增大;随着长宽比的增加而增大。因此,充气膜结构的矢跨比应尽量小一些,结构的长宽比也不宜大于3,否则要考虑顶部风压系数的增大。

参考文献(References):

- [1] 江锡虎. 充气膜结构全过程分析和造型技术研究[D]. 同济大学,2006. (JIANG Xi-hu. Pneumatic Membrane Structure Analysis and Modelling Technology Research [D]. Tongji University,2006. (in Chinese))
- [2] 孙晓颖,武岳,沈世钊. 薄膜结构流固耦合效应的简化数值模拟方法[J]. 土木工程学报,2010,43(10): 30-35. (SUN Xiao-ying, WU Yue, SHEN Shi-zhao. A combined numerical approach for wind-structure interaction of membrane structure[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2010, 43(10): 30-35. (in Chinese))
- [3] 朱伟亮,杨庆山. 薄膜结构风致耦合作用数值初探[J]. 计算力学学报,2010,27(3): 422-427. (ZHU Wei-liang, YANG Qing-shan. Numerical investigation on fluid-structure interaction of membrane structure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(3): 422-427. (in Chinese))
- [4] 武岳,沈世钊. 膜结构风振分析的数值风洞方法[J]. 空间结构,2003,9(2): 38-43. (WU Yue, SHEN Shi-zhao. Computational simulation on wind-induced vibration of membrane structures[J]. *Spatial Structures*, 2003, 9(2): 38-43. (in Chinese))
- [5] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统模型研究进展[J]. 地球科学进展,2001,16(3): 352-358. (CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. Research advances in wetland ecosystem models[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 352-358. (in Chinese))
- [6] Ferziger J H, Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*[M]. Berlin: Springer,2002.
- [7] 殷惠君,张其林,周志勇. 标准低矮建筑 TTU 三维定常风场数值模拟研究[J]. 工程力学,2007,24(2): 139-145. (YIN Hui-jun, ZHANG Qi-lin, ZHOU Zhi-yong. Numerical simulation study of 3D steady atmospheric flow around standard low-rise building TTU model [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2): 139-145. (in Chinese))
- [8] 顾磊,潘亮,齐宏拓. 风荷载的 CFD 数值模拟[M]. 北京:人民交通出版社,2012. (GU Lei, PAN Liang, QI Hong-tuo. *Wind-load of CFD Numerical Simulation* [M]. Beijing: People's Traffic Press, 2012. (in Chinese))
- [9] 王彬,杨庆山. 弱耦合算法的实现及其应用[J]. 工程力学,2008,25(12): 48-52. (WANG Bin, YANG Qing-shan. The realization and application of loosely coupled algorithm [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(12): 48-52. (in Chinese))
- [10] 孙芳锦,殷志祥,顾明. 强耦合法在膜结构风振流固耦合分析中的程序实现与应用[J]. 振动与冲击,2011,30(6): 213-217. (SUN Fang-jin, YIN Zhi-xiang, GU Ming. Implementation and application of strongly coupling method in fluid-structure interaction analysis on wind-induced vibration of membrane structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6): 213-217. (in Chinese))
- [11] Matthies H G, Steindorf J. Partitioned but strongly coupled iteration schemes for nonlinear fluid structure interaction[J]. *Computers&Structures*, 2002, 80(27): 1991-1999.
- [12] 周岱,马骏,李华峰,等. 大跨柔性空间结构风压和耦合风效应分析[J]. 振动与冲击,2009,28(6): 17-22. (ZHOU Dai, MA Jun, LI Hua-feng, et al. Analysis on the wind pressure and the coupled wind-induced vibration effects on spatial flexible structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(6): 17-22. (in Chinese))
- [13] Xu W, Ye J H, Shan J. The application of BEM in the Membrane structures interaction with simplified wind [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2009, 31(3): 349-365.
- [14] 刘瑞霞. 薄膜结构气弹动力稳定性研究的解析方法[D]. 北京交通大学,2004. (LIU Rui-xia. The Membrane Structure of Gas Play in the Research of Dynamic Stability Analysis Method [D]. Beijing Jiaotong University,2004. (in Chinese))
- [15] Harlow F H, Welch J E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface[J]. *Physics of Fluids*, 1965, 8(12): 2182-2186.

On wind pressure coefficient distribution of air-supported structures considering fluid-structure coupling

SHEN Yue-kui^{*1}, ZHAO De-shun¹, WANG Qin²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shenzhen Broadwell Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Air-supported structures are typical flexible structures, which are sensitive to wind. Wind loads are often crucial to structural design. The workbench platform in ANSYS14.5 program was used to investigate the wind pressure coefficient distribution of rectangular plane air-support structure considering fluid-structure coupling effect. RNG $k-\epsilon$ turbulent model based on Reynolds averaged N-S equation was used to simulate the wind field while the weak coupling method was adapted to investigate the coupling effect. The rise-span ratio of 1/4, 1/2, 1/3 and length-width ratio of 5/3, 2/1, 3/1 were adopted to calculate the structural response under different inner pressure and wind direction angles. Results show that the coefficient of wind pressure on structure considering fluid-structure coupling effect differs significantly from that without considering fluid-structure coupling effect and the impact index is between 1.25~1.5. The wind pressure coefficient distribution of structure is influenced by the wind angle, inner pressure, length-width ratio and other factors such as the rise-span ratio.

Key words: fluid structure interaction; CFD numerical simulation; air supported structures; wind pressure coefficient distribution

引用本文/Cite this paper:

申跃奎,赵德顺,王 秦.考虑流固耦合作用的充气膜结构风压分布研究[J].计算力学学报,2017,34(5):665-671.

SHEN Yue-kui, ZHAO De-shun, WANG Qin. On wind pressure coefficient distribution of air-supported structures considering fluid-structure coupling[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(5): 665-671.