
Wind Load Simulation on Cylindrical Air-supported Structure

Shen Yuekui*, Wang Hao, Xin Jiali

Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

Email address:

ykshen129@126.com (Shen Yuekui), hao6825@qq.com (Wang Hao), xjl0605@sohu.com (Xin Jiali)

*Corresponding author

To cite this article:

Shen Yuekui, Wang Hao, Xin Jiali. Wind Load Simulation on Cylindrical Air-supported Structure. *Science Discovery*.

Vol. 7, No. 6, 2019, pp. 404-408. doi: 10.11648/j.sd.20190706.15

Received: November 3, 2019; **Accepted:** December 4, 2019; **Published:** December 9, 2019

Abstract: More and more air-supported structures are used. However, the current wind load shape coefficient can not match engineering design. The CFD technology is utilized to simulate the wind load pressure distribution of rigid half cylindrical shape used for air-supported structures frequently. The shape is found by finite element software ANSYS, and then put into the flow field. RNG κ - ϵ turbulence model based on the Reynolds averaging method and FLUENT software are chose to investigate wind load variation along different wind direction (0° , 30° , 60° , 90°). The results show that the distribution range of extreme negative pressure area is from - 0.9 to - 1.01 at different wind direction angles, and it is easy to separate and form extreme negative pressure area at the two corners close to the windward side. Therefore, enough attention should be paid to the extreme positive pressure area at the bottom of the windward side and the extreme negative pressure area at the top of the membrane face.

Keywords: Numerical Simulation, Cylindrical Air-supported Structure, Computational Fluid Dynamics, Wind Pressure Coefficient Distribution

截圆柱形充气膜结构风荷载数值模拟

申跃奎*, 王浩, 邢佳丽

西安建筑科技大学土木工程学院, 西安, 中国

邮箱

ykshen129@126.com (申跃奎), hao6825@qq.com (王浩), xjl0605@sohu.com (Xin Jiali) (邢佳丽)

摘要: 近年来充气膜结构应用越来越多, 然而现行荷载规范中的风荷载体形系数并不能满足工程设计应用的需要。本文采用数值模拟方法, 运用CFD技术对截圆柱形充气膜结构模型进行绕流风场的数值模拟, 分析其表面风荷载分布规律。通过有限元软件ANSYS对膜结构找形, 然后将其导入到流场域中, 从而建立起充气膜结构绕流问题的计算模型。选用基于雷诺平均法(RANS)的RNG κ - ϵ 湍流模型, 分析不同风向角($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)时截圆柱形充气膜结构的风荷载云图, 得到不同风向角下, 膜面极值负压区分布范围为-0.9~-1.01, 在离迎风面最近的两个拐角处, 容易发生分离现象, 形成极值负压区。因此在设计时, 要对迎风面底端的极值正压区和膜面顶部的极值负压区给予足够重视。

关键词: 数值模拟, 圆柱状充气膜, 计算流体力学, 风压系数分布

1. 引言

作为一种新型的结构形式, 充气膜具有造型美观、经济性好、施工周期短、易于实现大跨度等优点。同时, 利用其密闭和用空气支承的特点, 可以实现室内空气的净化, 给人们提供健康的室内运动场地, 因而近年来充气膜结构应用越来越多。然而, 柔性的充气膜结构对风荷载十分敏感[1-3], 风荷载在其设计中往往起到控制作用。而现行荷载规范中的风荷载体形系数不能满足工程设计应用的需要。

研究结构风荷载的方法主要有风洞试验、数值模拟和理论分析。其中风洞试验周期长、费用昂贵, 难以实现多参数分析; 理论分析对诸多风场流动问题均很难得到理论解析解[4-6], 所以数值模拟分析是研究结构风荷载的有力工具。本文运用CFD数值模拟技术对截圆柱形充气膜结构常用的一种形状进行刚性模型、定常绕流的数值模拟, 研究其风荷载的分布特性, 以解决该种结构三维计算的风荷载输入问题[7-9]。

2. 圆筒状充气膜结构绕流特性的数值模拟

2.1. 计算模型的建立

(1) 结构模型

充气膜结构造型为空间曲面, 其曲面形式难以用函数表示。本文首先通过有限元软件ANSYS 14.5对膜结构找形, 确定充气膜结构形状, 然后将其导入到流场域中, 用专用工具GAMBIT完成流体域的网格划分, 从而建立起充气膜结构绕流问题的计算模型。采用有限元法进行膜结构找形时, 膜面采用shell 63单元, 其有限元模型如图1所示。

(2) 流域模型

根据充气膜结构的尺寸60m×30m×15m, 将流场计算域尺寸取600m×600m×200m, 流域设置满足阻塞率<3%的要求, 以消除计算域的设置对模型附近流动状态的影响。除了阻塞率的要求, 计算域的构筑还涉及到所考察的建筑物在流域中的位置, 如出流的位置太靠近所研究的建筑物模型, 则流动可能还没有达到完全发展状态, 甚至可能因建筑物阻挡而形成尾流回流区, 使得完全自由出流的边界条件不能得到满足, 因此研究中将膜结构置于整个流域沿流向的1/3位置处[10,11], 其流域模型如图2所示。

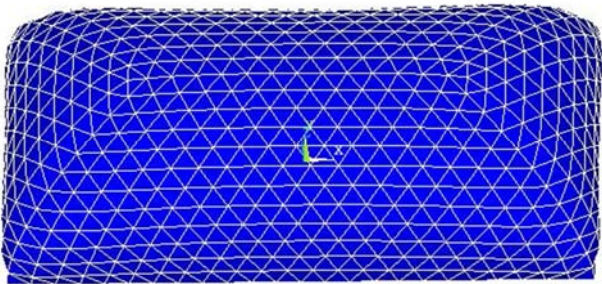


图1 结构有限元模型。

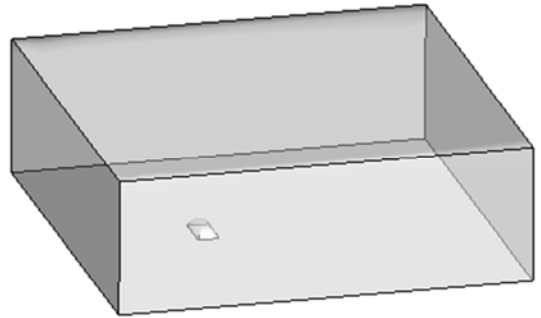
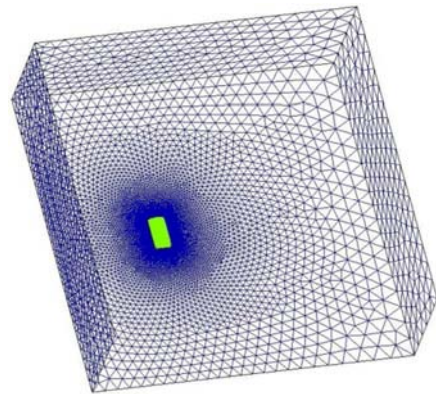


图2 截圆柱形充气膜结构流场透视图。

截圆柱形充气膜结构膜面曲率较大, 为了兼顾计算精度与效率, 选用四面体非结构网格, 网格划分方式采用尺寸函数, 以膜面为源面, 进而扩展到整个流域, 膜面最小网格尺寸0.4m, 增长率1.08, 整体流域的网格数量达220万, 流场网格划分如图3所示。



(a) 整体流域



(b) 局部放大

图3 截圆柱形充气膜结构流场网格划分。

2.2. 计算参数

(1) 边界条件

入口边界条件选用速度入口并按B类地貌风速剖面进行取值

$$v_z = v_b \times (z/z_b)^\alpha \tag{1}$$

其中，粗糙度指数 $\alpha=0.16$ ， V_z 为高度 z 处风速， Z_b 为标准参考高度，取值 $Z_b=10m$ 。 V_b 为标准参考高度 Z_b 处的风速，取 $V_b=15m/s$ 。

入口处采用的湍流强度 I 、湍流积分尺度 l 、湍流动能 k 和湍流耗散率 ϵ 根据湍流特性采用如下表达式[12]:

$$I = \begin{cases} 0.23 & z \leq z_b \\ 0.1(z/z_g)^{-(\alpha+0.05)} & z_b \leq z \leq z_g \\ 0.1 & z \geq z_g \end{cases} \tag{2}$$

$$l = 100(z/30)^{0.5} \tag{3}$$

$$\epsilon = C_u^{0.75} (k^{1.5}/l) \tag{4}$$

$$k = \frac{3}{2} (v_z I)^2 \tag{5}$$

式中，常数 $C_u=0.09$ ，标准参考高度 $Z_b=5m$ ，梯度风高度 $Z_g=350m$ 。

入口边界的风速剖面 V_z ，湍流动能 k 和湍流耗散率 ϵ 采用Fluent提供的UDF编程与Fluent作接口实现。

(2) 出口及壁面边界条件

出口边界条件为自由流出，任意物理量沿出口法向梯度为0。流场顶部和两侧选用对称边界条件，相当于自由滑移壁面，膜结构表面和地面均为无滑移壁面。

(3) 湍流模型及计算参数

湍流模型选用 $k-\epsilon$ RNG模型，流场求解方法选用SIMPLEC，控制方程中对流项的离散采用二阶迎风格式[13-15]，结果收敛标准为残差控制在 10^{-3} ，风压系数基本稳定。

3. 圆筒状充气膜结构风荷载分布特性

本文分析了不同风向角 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时结构风压系数的分布特性。由于实际工程中截圆柱形充气膜结构为封闭式，故可直接测得结构的风压系数。 0° 和 90° 风向角工况下计算模型和边界条件关于流向对称，数值模拟的结果整体上也成对称分布，初步验证了数值模拟的合理性。风压系数的定义如下:

$$C_{pi} = \frac{w_i}{0.5 \rho v^2} \tag{6}$$

圆筒状充气膜结构计算模型如图4所示

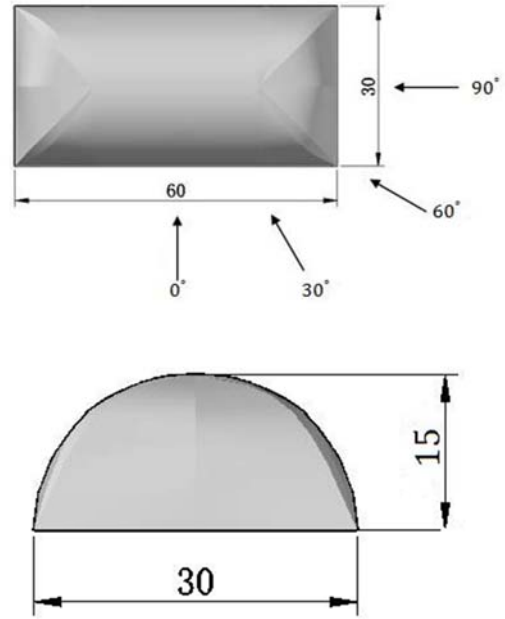


图4 圆筒状充气膜结构计算示意图。

不同风向角作用下的截圆柱形充气膜面风压系数分布详图如下所示:

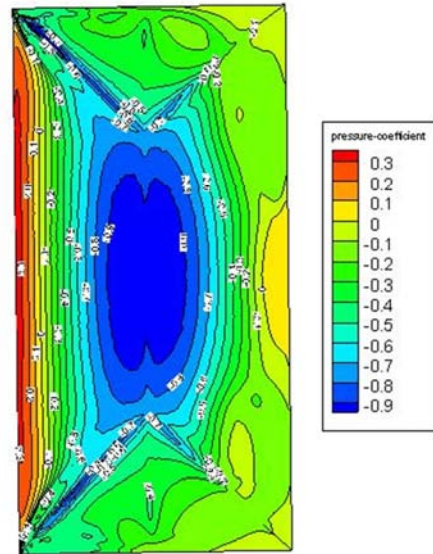


图5 0° 风向角风压系数等值线图。

如图5所示，当风向角为 0° 时，截圆柱形充气膜结构的迎风面是流动发生碰撞、分离的区域，该区域在靠近地面的部分为正压区，最大值为0.35，然后逐渐向两侧和顶面过渡到负压区，并在顶面和两侧拐角处形成极值负压区，其极大值达-1.01，这是由于气流在这些区域出现了分离，在分离后出现了较大的负压涡流。随着气流远离迎风面，碰撞作用和分离作用减弱，膜面压力系数从极值负压区逐渐减小，直至形成背风膜面无压区。

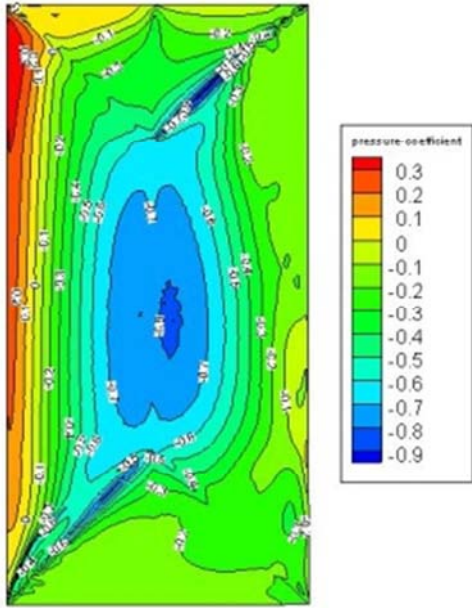


图6 30°风向角风压系数等值线图。

如图6所示，当风向角为30°时，膜面压力系数的变化总体趋势基本和0°时相近：迎风面底部正压区最大值为0.36，然后向负压区过渡，在顶部区域和拐角处形成极值负压区，其值为-1.0，不过和0°时相比，顶部的极值负压区范围明显减小，随后风压系数逐渐减少，整个膜面大部分为负压区。

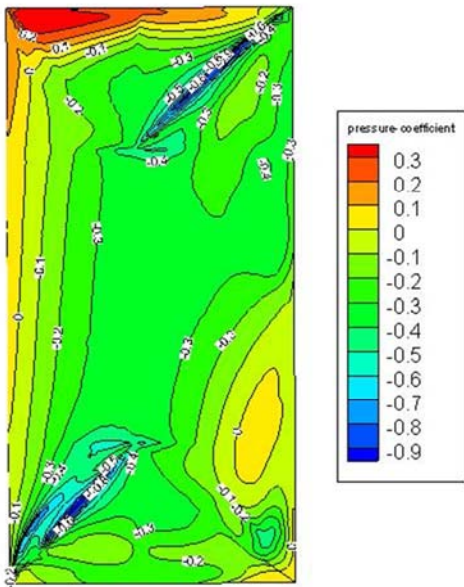


图7 60°风向角风压系数等值线图。

如图7所示，风向角为60°时膜面压力系数的变化趋势和30°时基本相同，但和30°时的风压系数相比，在较高点处的极值负压区消失，而在背风面形成无压区。

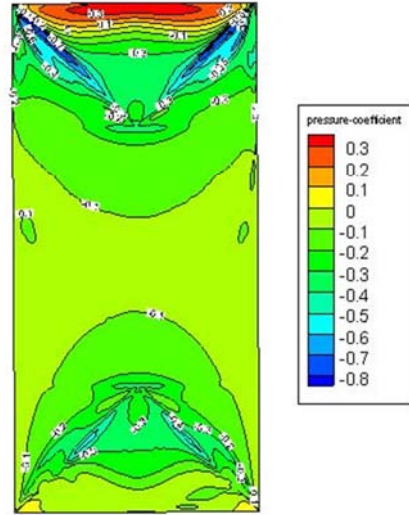


图8 90°风向角风压系数等值线图。

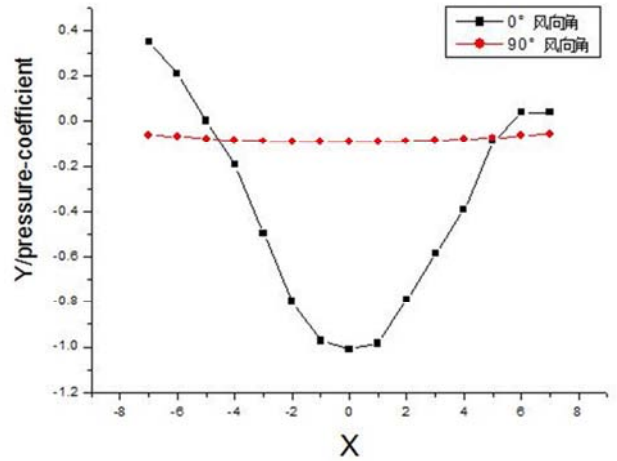


图9 0°和90°时横剖面的风压系数分布图。

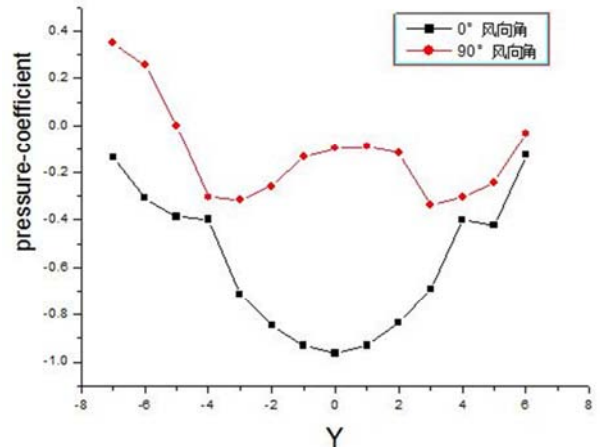


图10 0°和90°时纵剖面的风压系数分布图。

如图8所示，风向角为90°时，膜面相对于顺风向对称，所以风压系数对称分布，变化也比较平缓，从迎风面底端

的极值正压区, 其值为0.36, 过渡到负压区, 在拐角点处形成极值负压区, 其值为-0.9, 背风面都是负压区。

根据以上不同风向角的膜面风压系数分布图, 可以画出结构横剖面和纵剖面这两个典型剖面的风压系数分布如图9和图10。

由上图可以看出, 风向角对膜面风压系数的影响特别明显。在风荷载作用下, 截圆柱形充气膜结构只有在迎风面底端受到压力(正值), 在膜面顶端和两侧受到吸力(负值), 并且 0° 时, 膜面顶端有较大区域的极值负压区, 在膜面迎风面背部, 几乎过渡到了无压区。 90° 时纵剖面的变化趋势和 0° 时横剖面的变化趋势差距较大, 原因是由于 0° 时横剖面是半圆形的, 无棱角, 比较圆滑, 不存在风的分离、再附现象, 而风向 90° 时在两侧靠近顶端存在曲率的变化, 风场在此处会发生分离、再附、漩涡等一系列复杂的流动的情况, 使得膜面顶端的压力系数增大, 因此在进行膜面设计时应严格找形和裁剪, 尽量做到膜面的圆滑过渡。

4. 结论

本文采用CFD数值模拟方法对圆筒状充气膜结构表面风荷载分布进行了数值模拟。系统研究了风向角对膜面风压分布的影响, 主要结论如下:

(1) 风向的变化对截圆柱形充气膜结构风荷载分布起着十分显著的作用。不同风向角下, 膜面极值负压区分布范围不同, 因此在设计时, 要对迎风面底端的极值正压区和膜面顶部的极值负压区给予足够重视。

(2) 在离迎风面最近的两个拐角处, 容易发生分离现象, 形成极值负压区, 故设计时尽量保证此处的圆滑过渡, 避免形成极值负压区。

致谢

本文为陕西省自然科学基金2018JM5130的阶段性成果之一。

参考文献

[1] Aas-Jakobsen K, Strommen E. Time domain calculation of buffeting for wind-sensitive structures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74 (1998): 687-695.

- [2] 向阳, 沈世钊, 李军. 薄膜结构的非线性风振响应分析[J]. *建筑结构学报*. 1999, 20(6): 38-46.
- [3] 顾明, 陆海峰. 膜结构风荷载和风致响应研究进展[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 25-43.
- [4] 杨庆山, 刘瑞霞. 薄膜结构气弹动力稳定性研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(9): 18-24.
- [5] 乔磊, 谭峰, 杨庆山. 薄膜结构的动力反应分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6): 109-113.
- [6] Guck M, Breuer M, Durst F. Computation of wind-induced vibrations of flexible shells and membranous structures [J]. *Journal of Fluids and structures*, 2003, 17: 739-765.
- [7] 潘亮. 典型体型膜结构风荷载的CFD数值模拟研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2009.
- [8] 吴奎. 基于CFD理论建筑膜结构风荷载数值模拟研究[D]. 重庆大学硕士学位论文, 2013.
- [9] 周峰, 陈文礼, 李惠. 基于混合子结构方法充气膜结构气动特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(8): 2-5.
- [10] 孙晓颖, 许伟, 武岳. 钝体绕流中的计算域设置研究. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连. 2007, 10: 1036—1041.
- [11] J.N. Wood, M. Breuer, G. De Nayer. Experimental studies on the instantaneous fluid-structure interaction of an air-inflated flexible membrane in turbulent flow [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 80: 405-440.
- [12] 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.
- [13] 武岳, 沈世钊. 膜结构风震分析的数值风洞方法[J]. *空间结构*, 2003, 9(2): 38-43.
- [14] Bodnár T, Fraunié P, Kozel k. On the use of high order compact schemes for the simulation of stably stratified fluid flow [J]. *V European Conference on Computational Fluid Dynamics Lisbon, Portugal, June 2010: 14-17.*
- [15] 殷惠君. 膜结构风荷载的数值模拟研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2006.