

基于混合子结构方法的充气膜结构气动特性

周 峰^{1,2}, 陈文礼¹, 李 惠¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 南昌工程学院 土木与建筑工程学院, 330099 南昌)

摘 要: 为了提高单纯依靠数值模拟方法求解膜结构气动参数的准确性, 采用现场监测和 CFD 数值模拟相结合的混合子结构方法对国家游泳中心(水立方)屋盖 ETFE 充气膜结构的气动特性进行研究. 首先分别设立 ETFE 充气膜结构和流场两个子结构, 然后利用已建立的风荷载监测子系统和膜结构振动监测子系统所获得的数据作为 CFD 数值模拟的输入, 进行绕流场分析, 从而获得 ETFE 充气气枕的附加质量、气动力系数和气动阻尼等气动参数, 并分析其随时间和风速的变化规律. 分析结果表明, 混合子结构方法是获得充气膜结构气动特性的一条有效途径.

关键词: 水立方; 充气膜结构; CFD 数值模拟; 附加质量; 气动阻尼

中图分类号: TU353

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0001-05

Aerodynamic characteristics of air-inflated membrane structure based on a hybrid substructure method

ZHOU Feng^{1,2}, CHEN Wen-li¹, LI Hui¹

(1. Civil Engineering School, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. Civil and Architectural Engineering School, Nanchang Institute of Technology, 330099 Nanchang, China)

Abstract: To improve the accuracy of aerodynamic parameters of membrane structures depending on numerical simulation method, the aerodynamic characteristic of ETFE air-inflated membrane structure on the roof of the National Aquatics Center (NAC) is analyzed based on the hybrid substructure method of on-site monitoring and CFD numerical simulation in this paper. The ETFE air-inflated membrane structure and flow field are considered as two substructures, the vibration response of the ETFE air-inflated membrane structure is measured from the Health Monitoring System of NAC and treated as the moving boundary condition of air-inflated membrane structure in the flow field. Only the flow field around the moving boundary is simulated by the CFD code CFX 11.0. By CFD numerical simulation, the additional mass, aerodynamic damping and aerodynamic force of ETFE are obtained and the changing laws of these aerodynamic parameters with time and wind speed are studied. The research results indicate that the hybrid substructure method of on-site monitoring and CFD numerical simulation is an effective approach to obtain aerodynamic characteristics of air-inflated membrane structure.

Key words: water cube; air-inflated membrane structure; CFD numerical simulation; additional mass; aerodynamic damping

近年来国内外在大跨度空间膜结构风致振动方面的研究取得了一些成果^[1-3], 但大都停留在

实验室阶段, 基于现场监测的充气膜结构气动特性研究较少. 本文在建立了国家游泳中心(水立方)健康安全监测系统并获得了较为全面的充气膜结构监测数据后, 借鉴文献[4]提出的物理实验(现场监测)与 CFD 数值模拟结合的混合子结构方法对 ETFE 充气膜结构的气动特性进行了深入研究. 首先分别设立 ETFE 充气膜结构和流场

收稿日期: 2011-04-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50525823, 50738002); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT.NSRIF.2009099).

作者简介: 周 峰(1979—), 男, 高级工程师;
李 惠(1966—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 周 峰, zhouleng_hit@163.com.

两个子结构,然后利用已建立的风荷载监测子系统和膜结构振动监测子系统所获得的数据作为 CFD 数值模拟的输入,进行绕流场分析,从而获得了 ETFE 充气气枕的附加质量、气动力系数和气动阻尼等气动参数,在数值分析时,考虑到很难对整体结构(超过 1 000 个充气膜结构)进行模拟分析,因此选取有代表性跨度约 10 m 的 ETFE 气枕(位于结构中心)进行数值模拟分析,并采用实际采集到的风荷载数据和结构振动数据作为边界条件,进行数值模拟分析,通过该方法可获得充气膜结构附加质量、气动力系数和气动阻尼等气动参数,及上述指标随风速的变化规律,为该类结构的工程应用和风振研究提供参考。

1 水立方充气膜结构风振监测系统

1.1 水立方工程概况

国家游泳中心又称水立方,177 m × 177 m × 30 m,建筑面积 79 532 m²,结构表面被 ETFE 充气膜结构覆盖,具有透光性、自洁性等特点,可节省大量能源。

1.2 水立方 ETFE 充气膜结构风振监测系统

北京地区的季风特性:冬季以西北风为主,夏季以东南风为主。三维超声波风速仪安装于屋盖顶部,精度达 0.01 m/s,见图 1。

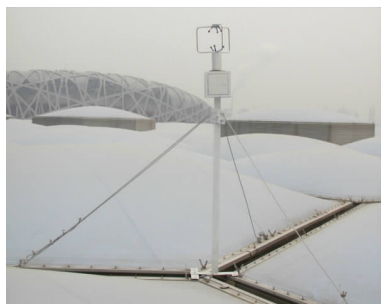


图 1 风速仪安装图

为了监测到膜结构外表面的风致振动情况,在 ETFE 充气膜外表面分别布设了风压传感器和激光位移传感器,现场安装见图 2、3。

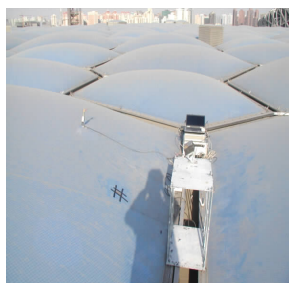


图 2 风压传感器安装图 图 3 ETFE 膜结构振动监测系统

1.3 ETFE 充气膜结构风振监测

基于建立的风致振动监测系统,对同步采集

到的数据进行全面分析,监测结果见图 4,可以看出,水立方上方风荷载的脉动性较强,充气膜结构的振动位移较小。

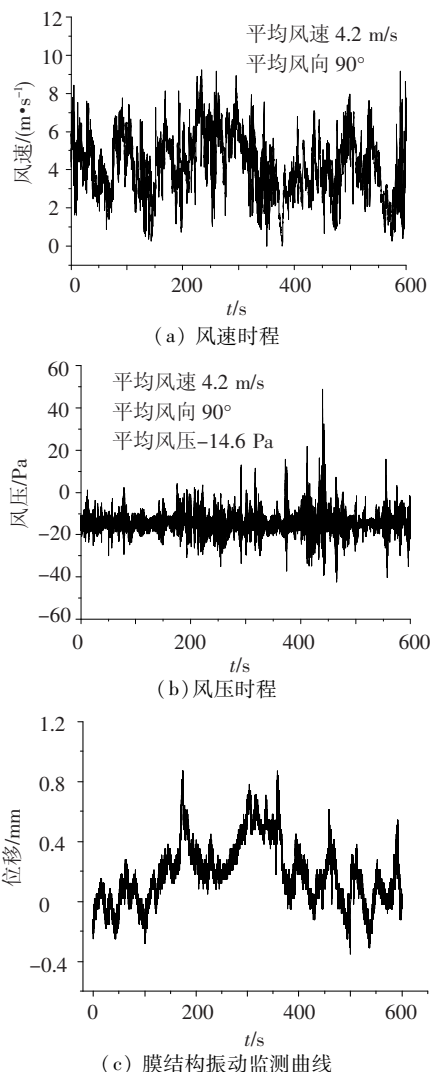


图 4 ETFE 膜结构风振监测

2 基于 CFD 数值模拟混合子结构方法的充气膜结构气动特性研究

2.1 CFD 数值模拟流体模型

选取水立方屋盖上方跨度约 10 m,矢高约 2 m 的一个六边形充气膜结构来进行分析。流体模型采用基于 Menter SST 方程的分离涡模型(DES)^[5],其基本原理是在近壁面采用雷诺平均方法,实现小尺度涡脉动运动的高效率模拟,而远壁面采用大涡模拟方法,实现大尺度涡的高质量模拟,两种方法优势互补。

流体域计算由 ANSYS CFX 11.0 完成,流体域尺寸为:210 m × 110 m × 60 m,由于流体域边界较为复杂,网格划分采用适应性较强的四面体网格进行划分,边界条件见表 1。

表 1 流体域边界条件与网格划分

边界	网格尺寸/m	壁面类型
进流面	1.5	速度入口
出流面	2.0	压力出口
地面	1.5	无滑移壁面
侧壁及顶壁	1.0	自由滑移壁面
ETFE 充气膜上表面	0.3	三维动边界

模拟时的来流风剖面采用我国规范中的指数型风剖面,其平均风速 $U(z)$ 与高度 z 的关系为

$$U(z) = U_b \left(\frac{z}{z_b} \right)^\alpha. \quad (1)$$

式中: z_0 为参考高度,我国规范规定为 10 m; z 为实际高度, U_b 为与参考高度对应的平均风速; α 为地面粗糙度系数, B 类地貌取 0.16. 湍流强度随高度的变化按照日本规范提出的方法进行计算,其表达式为

$$I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{z_c} \right)^{-\alpha-0.05}. \quad (2)$$

式中 z_c 为梯度风高度, B 类地貌取 350.

2.2 充气膜结构动边界

充气膜结构的动边界模拟需借助 CFX 11.0 表达式语言 CFX Expression Language 来实现,首先假设 ETFE 充气膜结构的整体振动形态为受风荷载静压作用下的形态,见图 5(a),如此便可将采集到的膜结构上方某点的位移振动时程扩展到整体膜结构上,并作为边界条件施加其上,监测位移时程见图 5(b). 基于上述方法,便可实现数值计算的边界条件封闭,从而计算出充气膜结构的附加质量、气动阻尼和气动压力等气动参数.

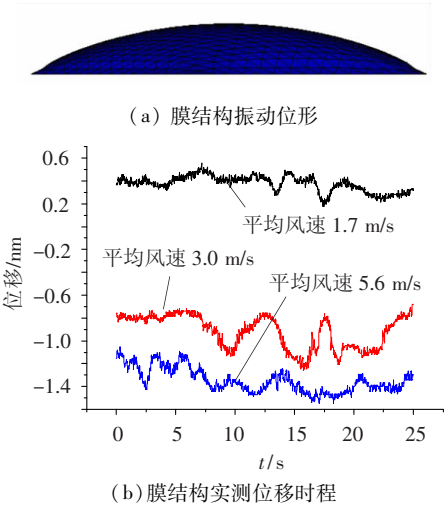


图 5 膜结构振动输入信号

2.3 基于混合子结构方法的充气膜气动特性

2.3.1 附加质量

根据能量守恒定律和势流理论^[6-8],并假设结构运动引起了原静止流体的流动,则膜结构周围被带动的空气在 dt 时间内的动能增量 dE 等于

膜结构上气动压力 p 在 dt 时间内做的功 dW ,即

$$-dE = dW, \quad (3)$$

$$dW = \iint_{\sigma} p V_N d\sigma dt = \iint_{0}^{xyl} \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} p dx dy dt, \\ dE = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} m_a \int_0^{yl} \int_0^{xl} \left(\frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} \right)^2 \cdot dx dy \cdot dt \right) = \\ m_a \int_0^{yl} \int_0^{xl} \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial t} \cdot dx dy \cdot dt.$$

式中: p 为结构表面气动力, $h(x,y,t)$ 为沿膜结构法线方向位移, m_a 为单位膜面积上的附加质量.

由式(3)可进一步得到

$$m_a = \frac{\int_0^{yl} \int_0^{xl} \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} \cdot p \cdot dx \cdot dy}{\int_0^{yl} \int_0^{xl} \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial t} \cdot dx \cdot dy}.$$

设附加质量比为

$$\alpha_{ac} = \frac{M_a}{M_s} = \frac{m_a}{m_s}.$$

式中 m_a 和 m_s 分别为单位膜面积上的附加质量和结构自身质量.

2.3.2 气动阻尼

根据能量守恒定律^[9], T 时间内作用在膜结构上气动压力所作的功 W 与气动阻尼消耗的能量 E 有如下关系

$$-W = E.$$

式中

$$W = \int_0^T \int_0^{yl} \int_0^{xl} p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt, \\ E = 2(m_a + m_s) \cdot \omega \cdot \int_0^T \int_0^{yl} \int_0^{xl} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 dx dy dt.$$

则气动阻尼比表示为

$$\xi_{ac} = \frac{\int_0^T \int_0^{yl} \int_0^{xl} p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt}{2(m_a + m_s) \cdot \omega \cdot \int_0^T \int_0^{yl} \int_0^{xl} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 dx dy dt}.$$

结构总阻尼为 $\xi_s + \xi_{ac}$, 其中 ξ_s 和 ξ_{ac} 分别为结构阻尼比和气动阻尼比.

2.3.3 升力系数

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S}.$$

式中: U 为流体平均流速, S 为膜结构垂直于来流方向的投影面积, F_L 为膜结构升力, ρ 为空气密度.

2.3.4 结果与讨论

根据水立方风振健康监测系统的监测结果,选取 3 种风速工况 (1.7, 3.0 和 5.6 m/s) 作为 CFD 数值模拟的来流平均风速, 3 种风速对应的

充气膜结构实测振动位移时程见图 5(b). 将其作为边界条件施加于结构, 以计算结构的附加质量、气动阻尼及气动力.

由于计算得到的气动参数波动范围较大, 为了直观的表达附加质量、附加阻尼和气动力随平均风速的变化规律, 对计算得到的振动数值进行平均化处理, 附加质量比、附加阻尼比和气动力系数随时间和风速的变化情况见图 6~9. 随风速增加, 附加质量增加; 气动力为负, 说明膜结构外表面整体处于负压状态, 气流对膜结构的作用主要表现为向上的升力; 气动阻尼随风速的变化不具有单调趋势, 在来流风速 3 m/s 时出现最大值.

由图 8 气动力频谱分布情况可看出, 3 m/s 风速时气动力的卓越频率集中在 8.6 Hz 附近, 而风速降至 5.6 m/s 和 1.7 m/s 时, 气动力的卓越频率分别集中在 12.7 Hz 和 13.3 Hz 附近. 显然, 对于本充气膜结构, 气动力与气动力的卓越频率间有着如下关系: 低频气动力可产生较大的气动阻尼, 而高频气动力所产生的气动阻尼相对较低.

结合图 7(b) 和图 8(c) 可以看出, 气动力和气动阻尼有着较相似的变化规律, 即均在风速为 3 m/s 时出现最大值, 一定程度上说明了气动阻尼与气动力在随风速的变化上具有一致性.

将充气膜结构表面风压的数值模拟结果和实测结果进行比较, 见图 9. 受建筑群风场复杂性影响, 相较于数值模拟结果, 实测风压值具有更强的脉动性和不稳定性, 分析结果符合实际情况.

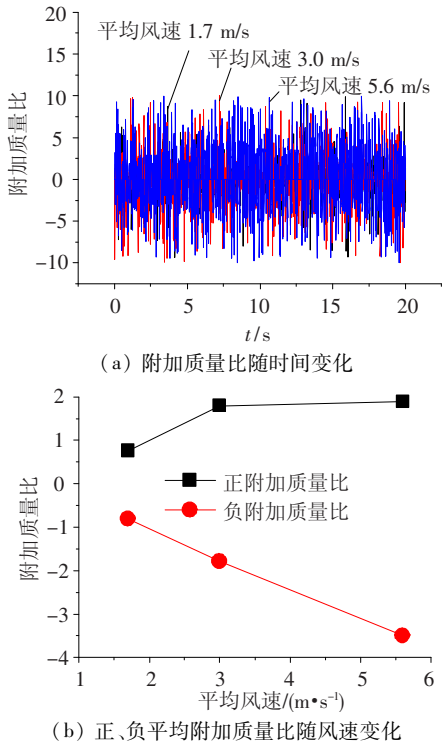


图 6 附加质量比随时间和风速的变化

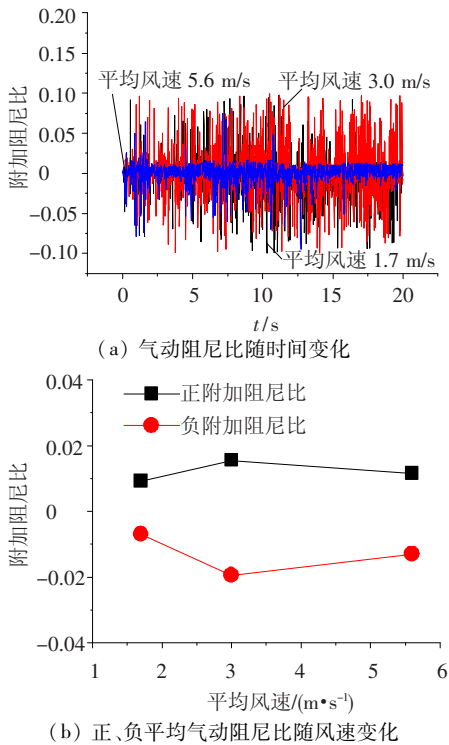


图 7 气动阻尼比随时间和风速的变化

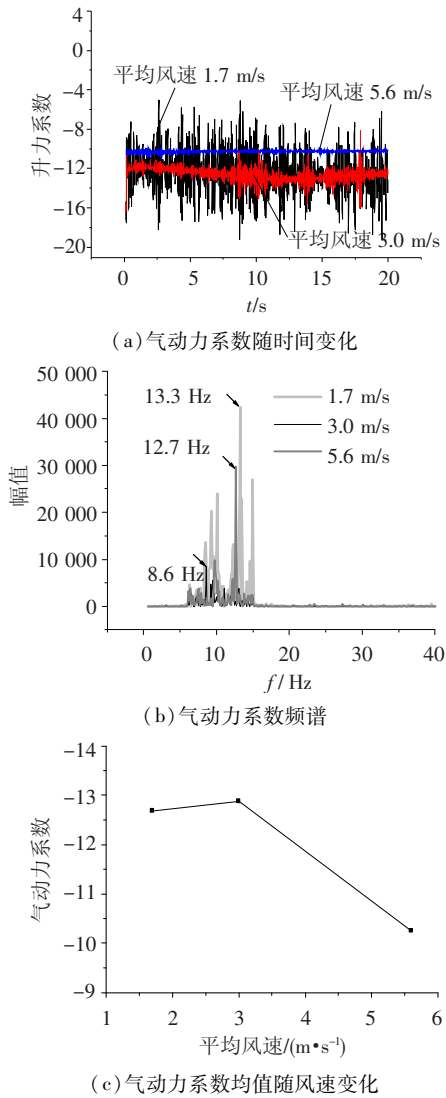


图 8 气动力系数随时间和风速的变化

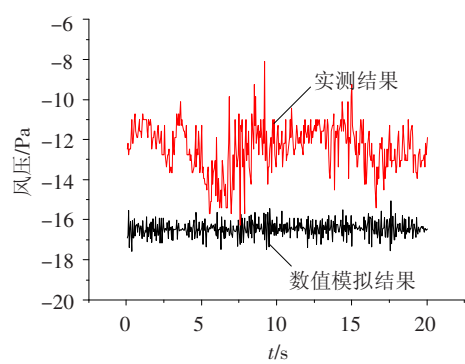


图 9 充气膜表面风压时程 (平均风速 5.6 m/s)

从图 10 中还可进一步看出, 风速较小时, 膜结构的附加质量和气动阻尼体现出了围绕零点的正、负交替性变化. 当风速增加至 10 m/s 后, 气动阻尼平衡位置逐渐发生偏离, 其平衡位置向正阻尼方向移动.

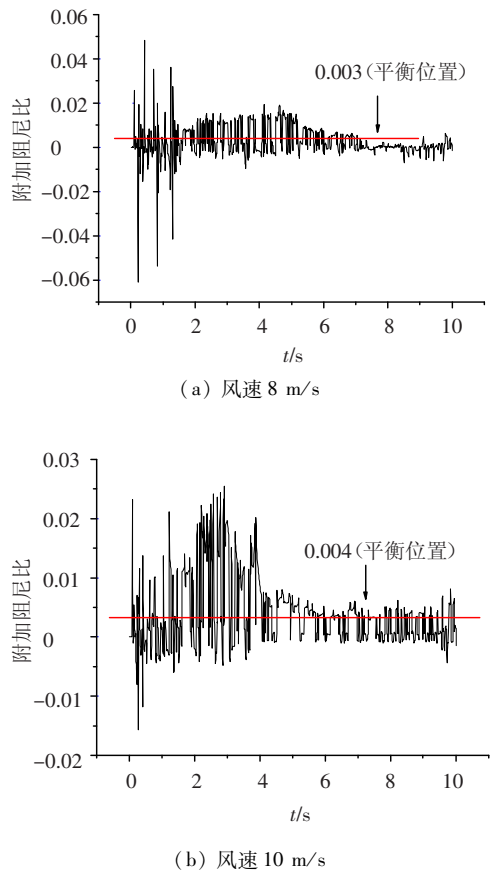


图 10 气动阻尼比随时间变化曲线

3 结 论

1) 环境风速较小, 充气膜结构的振动位移也较小时, 且充气膜结构的气动阻尼和附加质量随时间体现出了围绕零点的正、负交替性变化, 但随风速逐渐增加, 气动阻尼震荡平衡位置逐渐发生偏离, 平衡位置向正阻尼方向移动, 此时, 充气膜结构的气动阻尼特性也体现的越发明显.

2) 屋盖表面的 ETFE 充气膜结构的气动力主要表现为向上的升力, 说明充气膜结构整体受到负压环境影响; 随风速增加, 充气膜结构的附加质量逐渐增加.

3) 低频气动力可产生较大的气动阻尼, 而高频气动力所产生的气动阻尼相对较低; 气动阻尼与气动力在随风速的变化上具有一致性.

参考文献:

[1] MINAMI H, OKUDA Y, KAWAMURA S. Experimental studies on the flutter behavior of membranes in a wind tunnel [J]. Space Structures, 1993, 8: 935 – 945.

[2] MATSUMOTO T. An investigation on the response of pretensioned one-way type suspension roofs to wind action [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13: 383 – 394.

[3] MATSUMOTO T. Self-excited oscillation of a pretensioned cable roof with single curvature in smooth flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 34: 303 – 318.

[4] 陈文礼. 斜拉索风雨激振的试验研究与数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 76 – 103.

[5] 常书平, 王永生, 庞之洋. 用基于 SST 模型的 DES 方法数值模拟圆柱绕流 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31 (2): 1 – 4.

[6] KASSEM M. Dynamics of light weight roofs [D]. London, Ontario, Canada: University of Western Ontario, 1990: 10 – 21.

[7] 童秉纲. 非定常流与涡运动 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 21 – 40.

[8] 孙晓颖. 薄膜结构风振响应中的流固耦合效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 63 – 65.

[9] 周峰. 大跨度空间钢膜结构健康监测研究与应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 115 – 126.

(编辑 赵丽莹)