

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201606104

张拉膜结构风致动力灾变研究进展

武 岳¹, 陈昭庆², 孙晓颖¹

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 为明确膜结构的风致动力灾变机理, 分别从现场实测、气弹模型风洞试验、流固耦合数值模拟等方面的研究进展, 探讨了膜结构附加气动力和气弹失稳机理等问题. 研究表明: 受实测设备、气弹模型试验相似理论和流固耦合模拟方法等方面的限制, 膜结构流固耦合现象的观测模拟方面, 针对实际工程的研究仍比较少; 流固耦合振动机理方面, 普遍认为, 气弹失稳与形成于结构表面附近的旋涡有关, 表现为结构总阻尼比的大幅衰减; 但已有研究成果多基于对简单膜结构在近似均匀流场中振动现象的观测得出, 与实际工程相差比较大. 建议以后从以下几方面进一步深入: 气弹模型试验相似理论的相似偏差量化分析方法和误差修正技术; 大型膜结构实际工程流固耦合数值模拟关键技术; 基于现场实测、气弹模型风洞试验、数值模拟和解析等多种研究手段的膜结构气弹失稳机理研究; 便于工程设计人员接受的考虑流固耦合的膜结构抗风设计方法.

关键词: 张拉膜结构; 风致动力灾变; 流固耦合; 气弹效应

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)06-0001-09

Advances on wind-induced dynamic disaster of tensioned membrane structures

WU Yue¹, CHEN Zhaoqing², SUN Xiaoying¹

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: To clarify the wind-induced dynamic disaster mechanism of membrane structure, this paper analyzed the research progress of field test, aero-elastic model wind tunnel test and numerical simulation method of Fluid-Structure Interaction (FSI) problems, and discussed the latest research results on the additional aerodynamic force and aero-elastic instability mechanism of membrane structure. It was shown that by the limitation of field test equipment, similar theory of aero-elastic model and FSI simulation method, the research on the observation and simulation of practical membrane structure was still relatively few. As for the aero-elastic instability mechanism of membrane structure, it was believed that the aero-elastic instability of membrane structures was related to the vortices formed near the membrane surface, which was manifested as a significant attenuation of the total damping of the structure. However, the research results were based on the vibration phenomena observation of the simple membrane structure in the approximate uniform flow field, which was quite different from the actual project. The following aspects are suggested for researches: similarity analysis method and error correction technique of similarity theory of aero-elastic model wind tunnel test; key technology of numerical simulation of FSI problem of large-scale membrane structure; research on the aero-elastic instability mechanism of membrane structure that based on various research means including field test, aero-elastic model wind tunnel test, numerical simulation method, analytical theory, and so on; the wind-resistant design method of membrane structure, which is acceptable for designers to consider the FSI effect.

Keywords: tensioned membrane structures; wind-induced dynamic disaster; fluid-structure interaction; aero-elastic effects

建筑膜结构以其新颖独特的造型和简捷高效的传力方式, 近年来在国内外得到广泛应用; 然而膜结构的轻、柔特性也使其成为受风灾害最为严重的结构类型之一^[1-3]. 相关调查表明^[4-6], 除设计与施工

不合理外, 由于流固耦合作用引起的大幅振动、膜结构门窗破坏引起的室内压力突然变化、风致喷射物对膜面的冲击作用、膜面积雪滑落(或排水)困难等, 也是导致膜结构破坏的重要原因. 其中, 流固耦合作用引起的膜结构大幅振动是最普遍和最主要的原因^[7-8]. 这种大幅振动会引起膜面及膜面与拉索连接部位出现局部应力集中现象, 长时间的往复振动还会导致膜面或拉索出现疲劳损伤; 由于膜面的抗

收稿日期: 2016-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91215302);
国家自然科学基金(51578186)

作者简介: 武 岳(1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈昭庆, chenzhq2004@163.com

撕裂强度远低于其抗拉强度(通常只有抗拉强度的 $1/8 \sim 1/7$),因此,一旦膜结构出现小的破损,即会引起大面积的撕裂破坏。

本文总结了近年来在膜结构流固耦合现象的观测与模拟、流固耦合振动机理等方面的研究进展并对未来的研究做出展望,以期今后膜结构抗风领域的研究提供参考。

1 膜结构流固耦合现象的观测与模拟

膜结构在强风作用下会产生大幅的变形和振动,这种变形和振动反过来又会影响到其表面的风压分布,形成所谓的“流固耦合”效应^[9];在特定条件下,这种相互作用会加剧流场的分离和旋涡脱落,导致结构从风中吸收的能量大于振动本身所耗散的能量,出现所谓的“气弹失稳”^[10]。

要明确膜结构的流固耦合机理并在抗风设计中考虑这种耦合效应的影响,首先需实现对膜结构流固耦合现象的观测或模拟。目前主要通过现场实测、气弹模型风洞试验和流固耦合数值模拟 3 种方法对膜结构的流固耦合现象进行观测与模拟。

1.1 实测方法

实测方法不涉及模型的相似比问题,因此其响应结果最真实、最能反映膜结构的流固耦合效应,其结果除了用于流固耦合机理研究外,还常被用于验证 CFD 数值模拟的正确性。

Michalski 等^[11](2011)对一个高 19 m,投影宽 29 m 的伞形膜结构进行了长期实测,将实测获得的风速数据输入计算流体力学软件中进行流固耦合数值模拟,通过比较实测结果与模拟结果验证了数值模拟方法的正确性。韩国学者 Kim 等^[12](2011)对韩国济州岛世界杯体育场膜结构的加速度响应进行了 4 年的观测,其间经历了台风 Nabi(2005. 09. 05)和 Shanshan(2006. 09. 17)。研究发现:强风作用下,膜结构的气弹效应明显,结构频率降低了 5%,总阻尼比随着振幅的增加增大了 2 倍左右,但未观测到气弹失稳现象。国内学者朱丙虎等^[13](2012)针对一次强风下上海世博轴索膜结构所处的风环境和膜结构表面风压分布特性进行了实测。研究表明:实际结构所处风场湍流度非常大,风场具有显著的紊乱性和随机性;平均风压系数的实测值略小于风洞试验值,分布趋势基本一致。

实测方法获得的数据非常有价值,但目前为止,针对膜结构实际工程进行的实测仍比较少。这是因为:1)实测所需的监测周期较长,通常需要 2~3 a,监测成本很高;2)实测方法对传感器的抗风雨性能要求较高,目前能用于实测的仪器设备仍不是很多;

3)实测中,来流不可控,不利于通过变换来流条件来研究膜结构的流固耦合机理。

1.2 气弹模型试验方法

气弹模型试验是揭示膜结构流固耦合效应及气弹失稳机理最有效的手段。相关研究工作主要包括相似理论的研究和气弹模型试验研究。

如何保证风洞试验中测得的响应能够真实的反映原型结构在自然风作用下的响应,即相似理论问题,是气弹模型试验需解决的一个基础性问题^[14]。韩志惠等^[15](2014)以 1/5、1/10 和 1/20 缩尺比的气弹模型为例,分析了不同费劳德数、质量比、弹性模量对鞍形张拉膜结构风致动力响应的影响,给出了部分相似参数的理论取值控制范围。陈昭庆^[16](2015)探讨了鞍形张拉膜结构气弹模型试验(图 1)时,相似参数及缩尺模型尺寸、材料参数的确定过程。总的来看,目前关于膜结构气弹模型试验相似理论的研究不多。

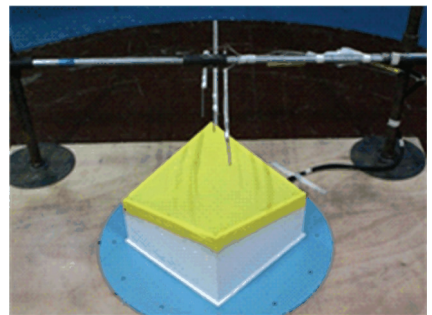


图 1 鞍形张拉膜结构气弹模型^[16]

Fig.1 Aero-elastic model of saddle shape membrane structure^[16]

国内外学者针对具体膜结构工程进行了一些气弹模型风洞试验研究。意大利学者 Lazzari 等^[17](2003)以拉普拉塔体育场(La Plata Stadium)索膜结构为原型进行了气弹模型风洞试验,模型制作时保证频率相似、几何相似、结构刚度相似和阻尼相似。研究了结构发生气弹失稳的可能性,发现除最大风速外,结构振动中未发现任何与气弹失稳有关的现象;结构流固耦合效应与结构阻尼和刚度系数矩阵有关,阻尼和刚度系数矩阵由与风速有关的迭代矩阵来进行修正,随着风速的增大,当迭代矩阵非正时,结构发生气弹失稳。德国学者 Rank 等^[18](2005)以一直径 30 m 的伞形张拉膜结构为原型进行了气弹模型风洞试验,保证了结构的几何相似,将试验结果用于验证 CFD 数值模拟方法的正确性,发现数值模拟结果与风洞试验结果吻合良好。国内学者顾明等^[19](2006)针对某体育场看台弧形挑棚膜结构进行了气弹模型试验;模型制作时保证了频率相似、几何相似,放松了质量相似、阻尼相似。研究表明:气弹模型试验结果与风振响应分析结果非常相近。张其

林等^[20](2011)以世博轴 1 号和 2 号阳光谷膜结构为原型,进行了气弹模型风洞试验:模型制作时,阳光谷先用小钢管做出形状,外面用膜布张成相近形状,安装时,先按照零预应力下尺寸连接,再逐步张拉索和膜.作者研究了不同预张力、风速、风向角下膜结构的气弹响应特征.研究发现:1) 预应力较小区域的响应比较大;2) 紊流场中膜结构的位移和加速度响应的统计值普遍大于均匀流中响应的统计值;3) 紊流场中膜结构的风振系数普遍高于均匀流场中.

还有一些学者以假想原型的膜结构为基础,进行气弹模型试验,研究了膜结构的气弹响应特征.如武岳等^[21](2008),Yang 等^[22](2010)通过鞍形膜结构气弹模型试验,研究了结构的附加质量和气动阻尼随风速、风向、结构刚度和振动模态的变化规律.研究表明:气动阻尼是影响结构振动特性的主要因素,结构的个别点出现了负气动阻尼,说明结构可能发生局部气弹失稳;附加质量对结构振动特性的影响则比较小.Zhang 等^[23](2007)通过气弹模型试验,研究了车辐式索穹顶膜屋盖在风荷载和地震荷载作用下的响应,给出了适合该类型屋盖的一些气弹响应的统计结果,研究中未发现和气弹失稳相关的现象.Li 等^[24](2009)针对索穹顶膜结构进行了气弹模型风洞试验,发现附加质量效应很明显,受气动阻尼的影响,膜结构的总阻尼比随着风速的增加而增大,试验中并未发现气弹失稳现象.表 1 为部分气弹模型试验中原型结构类型和模型膜材材料,目前用于气弹模型试验的膜材种类繁多,不同材料造成的模型在质量、阻尼、刚度等方面的误差均不同,但大多数试验并未对制作误差引起的响应偏差进行分析和修正.

表 1 膜结构气弹模型材料统计表

Tab.1 Statistics of materials used for aero - elastic models of membrane structures

时间	文献	模型类型	膜材
2003	文献[17]	拉普拉塔体育场索膜	未知
2005	文献[18]	伞形张拉膜	Rubber sheet
2006	文献[19]	弧形挑棚膜结构	牛皮纸
2007	文献[23]	车辐式索穹顶膜屋盖	未知
2008	文献[21]	鞍形索膜结构	防雨绸
2009	文献[24]	索穹顶膜结构	Rubber sheet
2011	文献[20]	世博轴阳光谷膜结构	软膜材 502
2015	文献[16]	鞍形张拉膜	乳胶膜

能够看出:相似理论的研究方面,取得了一定的成果;但模型制作时,放松部分相似条件后,对结构响应的具体影响程度,仍无法做到量化分析.相似理

论研究工作的滞后,导致目前针对膜结构实际工程的气弹模型试验仍比较少,有重要参考价值的研究更少^[25].不考虑相似理论的限制,以假想模型为原型,以膜结构在风荷载作用下的气弹响应为主要观测对象的气弹模型试验取得了一定成果,但仍未彻底解决膜结构的流固耦合机理和气弹失稳机理.

1.3 流固耦合数值模拟方法

流固耦合数值模拟是通过将 CFD 计算流体力学技术、CSD(Computational Structural Dynamics) 计算结构力学技术以及动网格技术相结合,在计算机上再现膜结构与风之间的流固耦合过程.流固耦合数值模拟方法按求解策略分为强耦合法和弱耦合法^[26].

1.3.1 强耦合法

强耦合法通过对流体方程、结构方程和耦合条件同时进行联立,然后在同一时间步内对所有变量进行同时求解.这种计算方法的求解精度高,但是对离散格式、计算方法以及网格划分的精细程度等的要求也高.

Hubner 等^[27](2002)采用强耦合法研究了二维膜结构的流固耦合问题,计算结果收敛性较好,但他的研究并未引入湍流模型,因此还有待发展.国内学者孙芳锦等^[28](2011)基于强耦合法,将伪实体模型引入到流体域中来处理变形问题,实现了二维双坡屋面膜结构的数值模拟.

1.3.2 弱耦合法

弱耦合法是将流体域的和结构域的计算分开进行处理,然后通过设置一些具体的参数,在两个计算域之间进行数据传递,以此实现两个分区之间的耦合,计算效率较前者有很大的提升空间,因此成为流固耦合数值模拟领域内的研究热点.

武岳等^[29-30](2007, 2008)、孙晓颖等^[31](2012)在弱耦合算法的基础上,综合运用 FLUENT6.0 软件、自行编制的结构动力分析和动网格程序,实现了膜结构的流固耦合数值模拟.孙晓颖等^[32-33](2007, 2010)提出了一种简化数值模拟方法,将膜结构的风振响应分为平均响应、背景响应、共振响应三部分;将与之对应的流固耦合过程分为静态耦合、拟静态耦合和瞬态耦合三种耦合;针对每一种耦合的具体特点,分别采用不同的方法进行求解.这种计算方法,使流固耦合数值模拟过程得到了很大简化,作者运用这个方法实现了对鞍形张拉膜结构的流固耦合简化数值模拟(图 2).王彬等^[34-35](2007,2008)基于弱耦合分区算法,将荷载和位移的传递分别通过守恒和非守恒插值方法来实现,对流固耦合过程进行了简化,实现了对一系列三维张拉膜结构的流固

耦合数值模拟。朱伟亮等^[36] (2010) 基于 ADINA 软件, 实现了鞍形张拉膜结构的流固耦合数值模拟, 并探讨了流场对结构振动的影响, 研究表明: 膜结构上方存在明显的旋涡; 当结构预张力较小时, 膜结构在旋涡作用下出现了类似行波的振动; 在气流分离点附近以及旋涡脱落明显的区域, 结构的振幅及振动频率较大。刘振华^[37] (2007) 基于 ADINA 软件, 采用伪结构法进行动网格处理, 改善了流体和结构界面网格间的协调性和信息传递映射策略, 实现了三维膜结构的流固耦合数值模拟。李启等^[38-39] (2012, 2014) 基于弱耦合算法, 将亚格子模型模块和动网格模块与求解任意拉格朗日欧拉动网格-大涡模拟 (ALE-LES) 方程的程序结合; 采用九点网格重构法优化了动网格更新策略, 解决了网格畸变的问题; 开发了适用于模拟动边界钝体绕流风场的 CFD 计算程序, 实现了二维封闭式平屋盖膜结构和四周封闭的三维大跨平屋盖膜结构的数值模拟。金鑫^[40] (2012) 基于 ADINA 软件中的迭代求解算法, 实现了伞形和鞍形张拉膜结构的流固耦合数值模拟。丁静鹤等^[41-42] (2013) 将非协调边界元计算势流的方法引入到传统涡方法中, 通过引入预处理循环型广义小残余迭代算法, 使膜结构的流固耦合计算效率大大提高, 同时膜结构位移均值的数值模拟结果与气弹模型试验结果吻合良好。

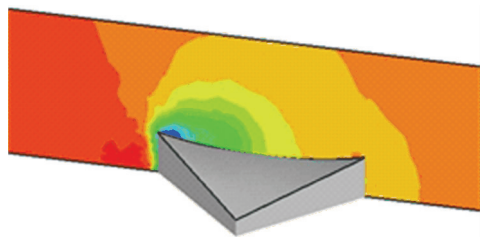


图 2 鞍形膜屋盖流固耦合数值模拟^[32]

Fig. 2 Fluid-structure interaction simulation of saddle-shaped membrane structure^[32]

由此可知: 近年内, 流固耦合数值模拟方法在计算策略和计算效率上已经取得了一定的进展, 但该进展仅限于对简单的膜结构进行分析, 对实际工程进行流固耦合数值模拟时, 动网格更新效率仍不是很高, 数值模拟所需计算量仍十分巨大, 还远未达到大规模推广运用和指导工程设计的程度。

2 流固耦合振动机理研究

2.1 膜结构附加气动力的研究

通常认为, 膜结构的流固耦合效应与附加气动力 (包括: 附加质量、气动阻尼、气承刚度) 有很大的关系^[43]。受附加气动力的影响, 膜结构在流体中的振动频率通常会小于其在真空中的频率; 当气动阻

尼与结构阻尼之和为零或为负时, 会导致结构中出现不稳定的大幅振动, 发生气弹失稳。因此, 准确评估结构的附加质量和气动阻尼, 对于明确结构的气弹效应和判断结构振动中是否发生了气弹失稳非常重要。

关于附加质量和气动阻尼的研究多集中在静止空气中振动膜结构的附加质量以及气动阻尼的提取方法等方面。Irwin 等^[14] (1979) 假定膜结构附加质量的量值等于膜结构上方一个球形空间内空气的质量, 并给出了经验公式 $m_a = 0.282\rho_{\text{air}}A^{-0.5}$, 其中 ρ_{air} 为空气密度, A 表示膜面面积。Minami^[44] (1998) 运用薄翼理论推导了以正弦半波模态振动的平面张拉膜的附加质量公式, 发现静止空气中膜结构的附加质量等于 $0.68\rho_{\text{air}}l$ 其中 l 表示模型的跨度。Li 等^[45] (2011)、王磊等^[46] (2011)、Zhou 等^[47] (2014) 研究了膜结构在不同密度的静止空气中的附加质量, 假定每个模态的附加质量等于膜上方 $\alpha_m l$ 高度范围内的空气质量, 其中 α_m 为附加质量系数, 约等于 0.65, l 为相应振动区域的内切圆直径。Marukawa 等^[48] (1996) 给出了利用随机减量法从结构位移响应中提取结构总阻尼比的方法。Kareem 等^[49] (1996) 讨论了从结构振动位移时程中提取结构阻尼时涉及到的各种不确定性因素, 分析了几种典型的谱方法、时间序列法求解结构总阻尼比的优缺点, 并给出了求解示例。Peng 等^[50] (2005) 给出了基于 Hilbert-Huang 变换的从结构位移响应中求解结构阻尼比的方法。武岳^[43] (2003)、杨庆山等^[51] (2008) 设计了鞍形索膜结构的静风耦合试验, 给出了提取结构附加质量和气动阻尼的方法; 通过改变鞍形索网上覆盖膜片的面积并测量振动频率与阻尼比, 测量了附加质量和气动阻尼的量值。研究表明: 受附加质量效应的影响, 膜结构基频降低达到 15%; 附加质量达到结构质量的 37%, 气动阻尼比达 9%。

Chen 等^[52] (2015) 基于气动声学 and 拟静态理论, 对均匀来流作用下, 小振幅振动的开敞式单向张拉膜结构的附加质量和气动阻尼的解析表达式进行了推导, 通过气弹模型试验验证了其有效性。将低风速均匀流中振动膜结构表面的风荷载, 简化为气动声压和拟静态风压之和。前者由膜面振动过程中被挤压的空氣的反作用形成, 与来流无关, 可通过气动声学理论进行评估; 后者由风荷载作用下膜结构表面的拟静态风压引起, 因膜面振动引起的瞬时形状的改变而变化, 与来流有关, 通过一周期内不同位置模型的 CFD 数值模拟结果进行评估。研究表明: 气动声压引起的附加质量为 $2\rho_{\text{air}}l/n\pi$, 拟静态风压引起的附加质量解析式为 $\rho_{\text{air}}U_0^2 a_n / 2\gamma_0 \omega_{s,n}^2$, 气动阻尼

解析式为 $\rho_{\text{air}} U_0^2 b_n / 2y_0 \omega_{s,n}$, 其中, ρ_{air} 为空气密度, l 为跨度, n 为模态阶数, U_0 为风速, y_0 为结构的振幅, a_n 、 b_n 为与形状改变有关的气动力系数, $\omega_{s,n}$ 为结构 n 阶模态圆频率. 研究发现: 低风速均匀流中, 张拉膜结构的附加质量随着风速的增大而增大, 可达到结构质量的 3.5~6.9 倍; 结构的总阻尼比普遍远大于静止空气中的结构阻尼比.

表 2 为以上各位学者根据不同理论或研究方法得出的附加质量解析表达式. 其中, Chen 等^[52] (2015) 的公式为均匀流中以各阶模态振动的单向张拉膜的附加质量表达式. 公式第一项在数值上等于静止空气中振动的单向张拉膜的附加质量. 对于一阶模态的振动, n 取 1, 表达式可简化为 $0.64\rho_{\text{air}} l$, 与 Minami^[44] 和 Li 等^[45] 基于薄翼理论和真空试验得出的解析公式非常接近.

表 2 不同学者给出的附加质量解析表达式
Tab.2 Analytical expressions of added mass for tensioned membrane structures from different scholars

年份	文献	表达式	依据	结构类型
1979	文献[14]	$0.282\rho_{\text{air}} A^{-0.5}$	试验	张拉膜
1998	文献[44]	$0.68\rho_{\text{air}} l$	薄翼理论	静止空气中 单向张拉膜
2011	文献[45]	$0.65\rho_{\text{air}} l$	真空试验	静止空气中 张拉膜
2015	文献[52]	$\frac{2\rho_{\text{air}} l}{n\pi} + \frac{\rho_{\text{air}} U_0^2 a_n}{2y_0 \omega_{s,n}^2}$	气动声学 and 拟静态理论	均匀流中 单向张拉膜

综上所述, 目前膜结构附加质量的提取方法仍然局限在静止空气或均匀流中小振幅振动的膜结构, 与实际膜结构工作的流场环境相差甚远; 气动阻尼的提取方面, 如何考虑各种不确定性因素的影响, 将结构阻尼和气动阻尼分离, 仍然是一个具有挑战性的工作.

2.2 气弹失稳机理研究

“气弹失稳”的概念, 来源于机翼、超高层建筑、超大跨桥梁等具有一定柔性的结构, 指的是弹性体在气动力作用下由于流固耦合作用产生的一种不稳定的发散振动现象^[53]. 关于膜结构气弹失稳机理的研究, 包括: 气弹失稳现象的观测、气弹失稳原因的研究及失稳判定方法等.

气弹失稳现象的观测方面, Sugulski^[54] (2007) 通过风洞试验测量一个开敞式单向张拉膜结构在亚音速流体中的气弹响应, 将超过一定风速后, 结构变形随风速增大开始迅速增加的现象定义为发散式气弹失稳; 将结构振动中出现了 3 个半波的驻波模态时的振动称之为颤振式气弹失稳.

气弹失稳原因及判定准则方面, 一种观点认为:

膜结构的气弹失稳与结构总阻尼的变化有关, 气弹失稳是由于膜结构在振动过程中, 超过一定风速后, 从风中吸收的能量开始等于或大于结构阻尼所消耗的能量^[8]. 这种观点借鉴了桥梁和机翼方面对气弹失稳的解释, 其理论来源是解析法. 解析法在求解结构与流体的动力耦合方程时, 根据结构稳定理论和特征值分析得出结构的气弹失稳条件: 结构特征方程有唯一实根时, 也即总阻尼比为零时, 结构发生气弹失稳. 李庆祥等^[55] (2006) 根据大挠度薄壳的无矩理论建立了封闭式薄膜屋盖的控制方程, 将势流理论与薄翼理论相结合建立了风与薄膜屋盖的动力耦合方程; 通过假定结构出现单模态失稳和多模态耦合失稳, 推导了二维封闭式膜结构的单模态失稳和双模态失稳临界风速. 李庆祥等^[56] (2006) 还基于理想势流理论, 运用行波模拟薄膜振动形态的方法推导了均匀流场中小曲率薄膜的振动特征方程, 探讨了结构的气弹失稳类型和失稳阶段; 通过将能量守恒定理和牛顿迭代法相结合求解了结构的最大幅值, 根据薄膜结构表面气动力、薄膜自重和惯性力之间的动力平衡关系推导了结构的一阶失稳临界风速. 刘瑞霞等^[57] (2005)、杨庆山等^[58-59] (2006) 通过联合运用扁壳的无矩理论和流体理想势流理论, 建立了来流沿着结构拱向时和来流沿着垂直于拱向方向时, 小垂度矩形平面双曲薄膜屋盖结构与风之间的耦合动力方程, 利用 Bubnov-Galerkin 方法将耦合动力方程简化为一常系数二阶微分方程, 根据 Routh-Hurwitz 稳定准则确定了均匀理想势流作用下小垂度矩形平面双曲薄膜屋盖结构的气弹失稳临界风速, 讨论了临界风速与膜材参数、屋盖几何尺寸和形状及两个方向上的预张力之间的关系, 提出了防止结构气弹失稳的一些措施.

另外一种观点认为: 膜结构的气弹失稳与屋盖附近的旋涡有关. Matsumoto^[60] (1990) 通过气弹模型试验研究了柔性单向悬挂索屋盖在均匀流中的振动规律, 发现: 超过一定风速后, 结构振幅随风速的增大迅速增大, 这种现象是由形成于屋盖上方, 且从上游以一定速率往下游传递的旋涡引起的, 是一种由涡激振动引起的失稳. Wu 等^[30] (2008) 通过单向张拉膜结构的流固耦合数值模拟, 发现形成于屋盖前缘的大尺度涡是导致结构振动的主要原因. 孙晓颖等^[61] (2013)、陈昭庆等^[16,62] (2015)、Wu 等^[63] (2015) 进行了开敞式单向张拉膜结构、封闭式单向张拉膜结构、鞍形张拉膜结构的气弹模型试验; 研究发现: 膜结构的气弹失稳以超过一定风速后振幅突然增大、结构主振动模态发生跳跃、结构总阻尼迅速衰减等为主要特征 (见图 3 中 30°、45° 风向角下鞍

形张拉膜总阻尼比随风速变化特征,且总阻尼比发生衰减时的风速正好等于振幅突增、模态跳跃和发生涡激共振的风速)。气弹失稳由涡激共振引起,当膜面平均变形增大到一定程度,流体流经结构前缘后形成周期性脱落的旋涡;旋涡以一定速度从上游往下游运动,引起膜结构表面出现周期性的升力;当升力的周期与结构某一阶模态周期接近时,诱发该阶模态主导的涡激共振,随着风速的继续增大,可能发生其它阶模态主导的涡激共振。气弹失稳发生后,膜面上方的旋涡在从上游往下游运动的过程中,与结构振动发生耦合,导致一定风速范围旋涡主频被振动锁定。失稳后,系统总阻尼比接近于 0,但不会小于或等于 0。膜结构振动过程中出现以下特征后,可判定其发生了气弹失稳:1) 振幅随风速增大突然迅速增大,振幅放大系数达到 2.5 以上;2) 结构由一种振动模态跳跃到另外一种振动模态;3) 结构总响应阻尼比随风速增大迅速衰减^[16]。

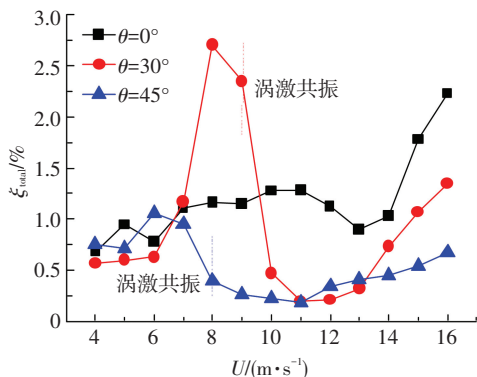


图 3 鞍形张拉膜结构总阻尼比随风速变化特征^[16]

Fig.3 Total damping ratios of saddle-shaped membrane structure at different wind speeds^[16]

在对张拉膜结构气弹失稳机理有了一定认识的基础上,庄梦园^[64](2016)探讨了设置导流板、格栅,改变预张力、矢跨比等控制措施对鞍形膜结构荷载分布、位移响应的影响,并给出了风振控制的建议。发现增大预张力、矢跨比,对最大位移有一定控制效果;增加附加气动装置对降低迎风角部或结构边缘的极值风压有一定控制效果;施加悬空导流板对降低膜结构的风致最大位移有一定的控制效果(图 4)。

关于膜结构气弹失稳机理的认识,已经取得了一定进展,普遍认为:膜结构的气弹失稳与形成于结构表面附近的旋涡有关,表现为结构总阻尼比的大幅衰减。但目前已有研究成果多基于对简单膜结构在近似均匀流场中振动现象的观测得出,实际工程膜结构的形状远比这些模型复杂,流场绕流情况远比均匀流复杂。因此,关于大型膜结构在实际风荷载作用下的气弹失稳机理,仍需进一步探索。关于膜结

构风致振动气动控制方面的研究,目前仍处于探索阶段,距离实际工程应用还有较大的距离。

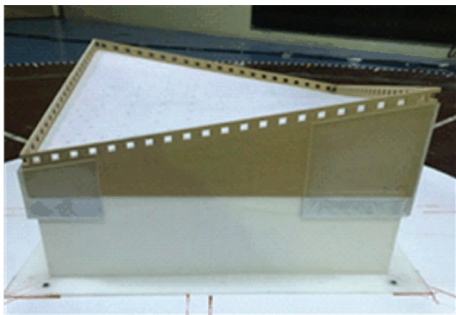


图 4 鞍形张拉膜结构气动控制风洞实验模型^[64]

Fig.4 Wind tunnel model for control of wind-induced vibrations of tensioned membrane structures^[64]

3 结论与展望

经过近 20 年的研究,膜结构的风致动力灾变研究取得了一定的成果;但受膜结构自身流场绕流特点、多自由度体系、强几何非线性等特性的制约,目前的研究仍未彻底解决膜结构的风致灾变机理问题。基于上述工作,建议今后从以下几个方面进一步展开研究:

1) 完善现有的膜结构气弹模型试验方法,对现有的相似理论进行改进,量化分析制作模型时部分相似参数的放松对结构响应的影响,提出对模型制作误差引起的结构响应偏差的修正方法。

2) 进一步开展针对膜结构流固耦合数值模拟方法的研究,在动网格技术、计算效率、计算精度等方面进行提升,推动流固耦合数值模拟方法在大型膜结构工程设计中的运用。

3) 针对典型膜结构展开一系列的野外实测和足尺气弹模型风洞试验研究,联合运用膜结构流固耦合数值模拟方法及解析理论,明确膜结构与风之间的相互作用过程及能量传递机制。

4) 完善现有的膜结构抗风设计方法,提出便于工程设计人员接受的考虑流固耦合的膜结构抗风设计方法。

参考文献

- [1] 严慧,吕子正,韦国岐.膜结构的风损事故及防范[J].建筑结构,2008,38(7):113-116.
YAN Hui, LYU Zizheng, WEI Guoqi. Wind damage accidents of membrane structures and counter measures[J]. Building Structures, 2008, 38(7): 113-116.
- [2] 严慧,艾威.膜结构常见疵病、损伤及防治[J].空间结构,2007,13(2):26-31. DOI: 10.13849/j.issn. 1006-6578. 2007. 02. 005.
YAN Hui, AI Wei. Familiar flaw, disfiguration and prevention of membrane structures[J]. Spatial Structures, 2007, 13(2): 26-31. DOI: 10.13849/j.issn. 1006-6578. 2007. 02. 005.

- [3] 沈世钊, 武岳. 大跨空间结构抗风研究新进展与展望. [C]// 第十三届全国结构风工程学术会议. 大连: 中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会, 2007: 1-8.
- SHEN Shizhao, WU Yue. New progress and prospects of the wind-resistant study for large span space structure [C]// Proceeding of the 13th Conference on Structural Wind Engineering in China. Dalian: Wind Engineering Committee of Bridge and Structural Engineering Branch of China Civil Engineering Society, 2007: 1-8.
- [4] KIM S D. On the membrane collapse of Jeju word cup stadium by typhoon [C]// Symposium of IASS-APCS (International Association for Shell and Spatial Structures-Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures). Taipei: International Association for Shell and Spatial Structures, 2003, 60-61.
- [5] 翁晓博. 索膜结构挑棚设计及膜结构事故分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 48-63.
- WENG Xiaobo. Design of cable and membrane structure awning and analysis on accident of membrane Structure [D]. Hangzhou: Zhenjiang University, 2006: 48-63.
- [6] 胥传喜. 膜结构的工程事故与质量通病防治 [J]. 工业建筑, 2005, 35(2): 83-88. DOI: 10.13204/j.gjz2005.02.023.
- XU Chuanxi. Prevention and treatment of engineering accident and quality common failing in membrane structure [J]. Industrial Construction, 2005, 35(2): 83-88. DOI: 10.13204/j.gjz2005.02.023.
- [7] GIONVU V. Progressive collapse in space structures [C]// Symposium of IASS-APCS (International Association for Shell and Spatial Structures-Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures). Beijing: International Association for Shell and Spatial Structures, 2006: 18-19.
- [8] 杨庆山. 薄膜结构的风致动力效应初探 [J]. 空间结构, 2002, 8(4): 3-10. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2002.04.001
- YANG Qingshan. Preliminary studies on wind-induced response of fabric structures [J]. Spatial Structures, 2002, 8(4): 3-10. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2002.04.001.
- [9] 沈世钊, 武岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 1-9.
- SHEN Shizhao, WU Yue. Research progress on fluid-solid interaction effect of wind induced vibration of membrane structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 1-9.
- [10] 武岳, 杨庆山, 沈世钊. 膜结构分析理论研究现状与展望 [J]. 工程力学, 2014, 31(2): 1-14. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST03.
- WU Yue, YANG Qingshan, SHEN Shizhao. The current status and prospects of analysis theory of membrane structures [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 1-14. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST03.
- [11] MICHALSKI A, KERMEI P D, HAUG E, et al. Validation of the computational fluid-structure interaction simulation at real-scale tests of a flexible 29 m umbrella in natural wind flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2011, 99: 400-413. DOI: 10.1016/j.jweia.2010.12.010.
- [12] KIM J Y, YU E, KIM D Y, et al. Long-term monitoring of wind-induced response of a large-span roof structure [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2011, 99(9): 955-963. DOI: 10.1016/j.jweia.2011.06.008.
- [13] 朱丙虎, 张其林. 世博轴索膜结构屋面风效应的监测分析 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2012, 40(2): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.02.003.
- ZHU Binghu ZHANG Qilin. Monitoring and analysis of wind effect on membrane roof of Expo Axis [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(2): 13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.02.003.
- [14] IRWIN H P A H, WARDLAW R L A. wind tunnel investigation of a retractable fabric roof for the Montreal Olympic Stadium [C]// Proceeding of the 5th International Conference on Wind Engineering. Colorado, USA: International Association for Wind Engineering, Pergamon Press, 1979: 925-938.
- [15] 韩志惠, 顾明. 非线性鞍形张拉膜结构气弹模型相似参数分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2014, 42(4): 532-538. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.04.006.
- HAN Zhihui, GU Ming. Similarity parameter analysis of aeroelastic model for nonlinear saddle tensioned membrane structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(4): 532-538. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.04.006.
- [16] 陈昭庆. 张拉膜结构气弹失稳机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CHEN Zhaoqing. Research on the aero-elastic instability mechanism of tensioned membrane structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] LAZZARI M, VITALIANI R V, MAJOWIECKI M, et al. Dynamic behavior of a tensegrity system subjected to follower wind loading [J]. Computers and Structures 2003, 81: 2199-2217. DOI: 10.1016/S0045-7949(03)00291-8.
- [18] RANK E, HALFMANN A, SCHOLZ D, et al. Wind loads on lightweight structures: Numerical simulation and wind tunnel tests [J]. Gamm-mitteilungen, 2005, 28(1): 73-89.
- [19] 顾明, 朱川海. 体育场主看台弧形挑篷气弹模型风洞试验和响应特性 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 54-59. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2006.10.009.
- GU Ming, ZHU Chuanhai. Wind tunnel test on an aeroelastic model of grandstand cantilevered roof of large stadium and features of wind-induced response [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 54-59. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2006.10.009.
- [20] 张其林, 周颖, 艾辉林, 等. 世博轴膜结构气弹模型风洞试验研究 [J]. 工程质量, 2011, 12(6): 32-37.
- ZHANG Qilin, ZHOU Ying, AI Huilin, et al. Wind tunnel test of an aero-elastic model of membrane roof for Central Axis of the 2010 Shanghai Expo [J]. Construction Quality, 2011, 12(6): 32-37.
- [21] 武岳, 杨庆山, 沈世钊. 索膜结构风振气弹效应的风洞实验研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(1): 8-15.
- WU Yue, YANG Qingshan, SHEN Shizhao. Wind tunnel tests on aeroelastic effect of wind-induced vibration of tension structures [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 8-15.
- [22] YANG Qingshan, WU Yue, ZHU Weiliang. Experimental study on interaction between membrane structures and wind environment [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(4): 523-532. DOI: 10.1007/s11803-010-0034-0.
- [23] ZHANG Zhihong, TAMURA Y. Wind tunnel test on cable dome of Geiger type [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2007, 2(3): 218-224. DOI: 10.1115/1.2730848.

- [24] LI Yuanqing, WANG Lei, TAMURA Y, et al. Wind tunnel test on levy type cable dome [C]//Proceeding of the 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, Taiwan; International Association for Shell and Spatial Structures, 2009.
- [25] 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. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2006.03.007.
- GU Ming, LU Haifeng. Wind loads and wind induced vibration of membrane structures: state of the art[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 25-43. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2006.03.007.
- [26] 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008, 14(1): 3-15. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2008.01.002
- QIAN Ruojun, DONG Shilin, YUAN Xingfei. Advances in research on fluid-structure interaction theory[J]. Spatial Structures, 2008, 14(1): 3-15. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2008.01.002.
- [27] HUBNER B, WALHOM E, DINKLER D. Simultaneous Solution to the Interaction of Wind Flow and Lightweight Membrane Structures [C]//Proceedings of the International Conference on On Lightweight Structures in Civil Engineering. Warsaw: [s.n.], 2002: 519-523.
- [28] 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): 213-264. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2011.06.053.
- SUN Fangjin, YIN Zhixiang, 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): 213-264. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2011.06.053.
- [29] 武岳, 孙晓颖, 沈世钊. 单向悬挂屋盖结构的风致气弹耦合效应数值模拟[J]. 计算力学学报, 2007, 24(5): 571-578.
- WU Yue, SUN Xiaoying, SHEN Shizhao. Numerical simulation on the aeroelastic effects of uni-directional suspension structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(5): 571-578.
- [30] WU Yue, SUN Xiaoying, SHEN Shizhao. Computation of wind-structure interaction on tension structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10): 2019-2032. DOI:10.1016/j.jweia.2008.02.043.
- [31] 孙晓颖, 武岳, 陈昭庆. 薄膜结构流固耦合的 CFD 数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2012, 29(6): 873-878.
- SUN Xiaoying, WU Yue, CHEN Zhaoqing. CFD numerical simulation on wind-structure interaction of membrane structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(6): 873-878.
- [32] 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.
- SUN Xiaoying. Study on wind-structure interaction in wind-induced vibration of membrane structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2007.
- [33] 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. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2010.10.015.
- SUN Xiaoying, WU Yue, SHEN Shizhao. A combined numerical approach for wind-structure interaction of membrane structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 30-35. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2010.10.015.
- [34] 王彬, 杨庆山. 弱耦合算法的实现及应用[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 48-52.
- WANG Bin, YANG Qingshan. The realization and application of loosely coupled algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 48-52.
- [35] 王彬, 杨庆山, 张群峰. 膜结构风致响应的分区耦合算法[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2007, 4(31): 15-21.
- WANG Bin, YANG Qingshan, ZHANG Qunfeng. Partitioned coupling arithmetic of wind-induced response of membrane structure [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 4(31): 15-21.
- [36] 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 Weiliang, YANG Qingshan. Numerical investigation on fluid-structure interaction of membrane structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 422-427.
- [37] 刘振华. 膜结构流体-结构耦合作用风致动力响应数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- LIU Zhenhua. Fluid-structure interaction numerical simulation for wind-induced dynamic response of membrane structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [38] 李启, 杨庆山. 建筑结构非定场绕流风场的数值模拟方法[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 63-67.
- LI Qi, YANG Qingshan. Unsteady numerical simulation method for wind field around building structure [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 63-67.
- [39] 李启. 含运动边界钝体绕流风场的大涡模拟数值算法[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- LI Qi. A numerical method for the large eddy simulation of the wind field around a bluff body with moving boundaries [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [40] 金鑫. 张拉膜结构流固耦合的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- JIN Xin. Numerical simulation of fluid-structure interaction on tensioned membrane structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2012.
- [41] 丁静鸽, 叶继红. 基于改进涡方法的膜结构流固耦合研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 61-69. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.24.026.
- DING Jinghu, YE Jihong. Interaction between membrane structures and wind based on modified vortex method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 61-69. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.24.026.
- [42] 丁静鸽, 叶继红. 基于非协调边界元法和涡方法的黏性流场研究[J]. 力学学报, 2013, 45(2): 202-213. DOI:10.6052/0459-1879-12-171.
- DING Jinghu, YE Jihong. Viscous flow field based on discontinuous boundary element method and vortex method. [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2): 202-213. DOI:10.6052/0459-1879-12-171.
- [43] 武岳. 考虑流固耦合作用的索膜结构风致动力响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- WU Yue. Study on wind-induced vibration of tension structures with

the consideration of wind-structure interaction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.

[44] MINAMI H. Added mass of a membrane vibrating at finite amplitude [J]. Journal of Fluids and Structures, 1998, 12: 919–932. DOI: 10.1006/jfls.1998.0175.

[45] LI Yuanqi, WANG Lei, SHEN Zuyuan, et al. Added-mass estimation of flat membranes vibrating in still air[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99: 815–824. DOI:10.1016/j.jweia.2011.05.006.

[46] 王磊, 李元齐, 沈祖炎. 薄膜振动附加质量试验研究[J]. 振动工程学报, 2011, 24(2): 125–132. DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2011.02.018.

WANG Lei, LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Experimental investigation on the added mass of membranes vibrating in air[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(2): 125–132. DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2011.02.018.

[47] ZHOU Yi, (2016) LI Yuanqi, SHEN Zuyan, et al. Numerical analysis of added mass for open flat membrane vibrating in still air using the boundary element method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 131: 100–111. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.05.007.

[48] MARUKAWA H, KATO N, FUJII K, et al. Experimental evaluation of aerodynamic damping of tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59: 177–190. DOI:10.1016/0167-6105(96)00006-2.

[49] KAREEM A, GURLEY K. Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1996, 59: 131–157. DOI: DOI: 10.1016/0167-6105(96)00004-9.

[50] PENG Z K, TSE P W, CHU F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. Journal of Sound and Vibration. 2005, 286: 187–205. DOI:10.1016/j.jsv.2004.10.005.

[51] 杨庆山, 王基盛, 朱伟亮. 薄膜结构与空气环境静力耦合作用的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(5): 19–25. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2008.05.009.

YANG Qingshan, WANG Jisheng, ZHU Weiliang. Experimental study on the static inter action between membrane structures and air [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 19–25. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2008.05.009.

[52] CHEN Zhaoqing., WU Yue, SUN Xiaoying. Research on the added mass of open-type one-way tensioned membrane structure in uniform flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015, 137: 69–77. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.12.004.

[53] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures; an introduction to wind engineering [M]. New York: Wiley, 1978, 1–100.

[54] SYGULSKI R. Stability of membrane in low subsonic flow [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2007, 42: 196–202. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2006.11.012.

[55] 李庆祥, 孙炳楠. 封闭薄膜屋盖的风致气动力失稳分析[J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 346–353. DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2006.03.011.

LI Qingxiang, SUN Bingnan. Wind-induced aerodynamic instability for closed membrane roofs [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 346–353. DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2006.03.011.

[56] 李庆祥, 孙炳楠. 均匀流场中小曲率薄膜的气动稳定性分析[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 39–44.

LI Qingxiang, SUN Bingnan. Aerodynamic stability analysis of small curved membrane in uniform flow [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 39–44.

[57] 刘瑞霞, 杨庆山, 李作为. 矩形平面双曲抛物面薄膜屋盖的动力失稳临界风速[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 105–110.

LIU Ruixia, YANG Qingshan, Li Zuwei. Critical wind velocity of hyperbolic parabolic membrane roofs with rectangular plane [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 105–110.

[58] YANG Qingshan, LIU Ruixia. On aerodynamic stability of membrane structures [J]. International Journal of Space Structures, 2005, 20: 181–188.

[59] 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.

YANG Qingshan, LIU Ruixia. On aerodynamic stability of membrane structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 18–24.

[60] 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(3): 304–318. DOI:10.1016/0167-6105(90)90158-9.

[61] 孙晓颖, 陈昭庆, 武岳. 单向张拉膜结构气弹模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 63–69. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.11.010

SUN Xiaoying, CHEN Zhaoqing, WU Yue. Aeroelastic experiment of one-way tensioned membrane structure [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 63–69. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.11.010.

[62] 陈昭庆, 武岳, 孙晓颖. 封闭式单向张拉膜结构气弹失稳机理研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 12–19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.03.002.

CHEN Zhaoqing, WU Yue, SUN Xiaoying. Research on the aeroelastic instability of closed-type one-way tensioned membrane [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 12–19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.03.002.

[63] WU Yue, CHEN Zhaoqing, SUN Xiaoying. Research on the wind-induced aero-elastic response of closed-type saddle-shaped tensioned membrane models [J]. Journal of Zhejiang University Science. A (Applied Physics & Engineering). 2015, 16(8): 656–668. DOI: 10.1631/jzus. A1400340.

[64] 庄梦园. 张拉膜结构风振控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

ZHUANG Mengyuan. Investigation of control of wind-induced vibrations of tensioned membrane structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.