

# 基于气弹模型风洞试验研究张拉膜结构气动参数

韩志惠<sup>1,2</sup>, 顾明<sup>1</sup>, 周昶毅<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市气象科学研究所, 上海 200030)

**摘要:** 基于两种鞍型张拉膜结构的气弹模型风洞试验, 分别采用 Ibrahim 时域法和随机子空间参数识别法从自由响应及风荷载作用下响应的数据中识别了结构的模态参数. 在此基础上, 研究了气动质量及气动阻尼随风向角、风速、预张力的变化规律, 并通过与前人研究成果的对比分析了各研究成果之间差别产生的原因. 研究表明, 气动质量会随风向角的变化而变化且在斜风向下时达到极值, 随风速的增加而增加, 随预张力的增加而减小; 第一阶模态所对应的总阻尼比随风速的增加而增加.

**关键词:** 张拉膜结构; 气动弹性模型; 风洞试验; 气动参数  
**中图分类号:** TU358 **文献标志码:** A

## Aerodynamic Parameters of Tensioned Membrane Structure Based on Aeroelastic Wind Tunnel Test

HAN Zhihui<sup>1,2</sup>, GU Ming<sup>1</sup>, ZHOU Xuanyi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Based on the aerodynamic wind tunnel test of two saddle tensioned membrane structures, the modal parameters were identified from free responses and responses under wind loading, the using Ibrahim time domain and stochastic subspace identification methods. Besides, the variation of aerodynamic mass and damping with wind direction, wind speed, and pretension were researched, and reasons for the difference between previous research achievements were analyzed by comparison. The results show that the aerodynamic mass changes with the wind direction, reaches the maximum under oblique wind direction, increases with the wind speed increment, and decreases with the pretension increment. In addition, the damping ratio of first order modal increases with the increase of wind speed.

**Key words:** tensioned membrane structure; aeroelastic model; wind tunnel test; aerodynamic parameter

张拉膜结构在受到风荷载作用时, 主要通过变形来抵抗荷载, 是典型的大变形柔性结构体系. 在此过程中, 结构会带动部分周围空气一起运动, 同时与周围空气之间有能量转换, 即产生所谓的气动质量和气动阻尼. 对于变形较大的膜结构, 这两种气动参数可能是结构自身参数的数倍甚至更大, 而且它们的存在会改变结构的振动特性, 严重时甚至可能导致结构的失稳破坏, 因此不容忽略. 然而由于膜结构气动参数的机理复杂, 影响因素众多, 到目前为止仍然是结构风工程领域的一个难题.

理论分析方法是研究膜结构气动参数的方法之一. Minami 等<sup>[1]</sup>和王吉民<sup>[2]</sup>基于薄翼理论, 利用不同的膜结构位移函数给出了平坦膜结构气动质量的表达式, 得到了相似的结论, 但是两者都将膜结构简化为二维结构, 并且只考虑了结构沿跨向的第一阶振型. 孙晓颖<sup>[3]</sup>将薄翼理论应用于三维膜结构, 并对鞍型及伞形膜结构的气动质量和气动阻尼进行了参数分析. 王磊<sup>[4]</sup>认为薄膜结构附加质量与模态振型相关, 并基于 Minami 研究成果提出了考虑振型区域特征的气动质量计算方法. Davenport<sup>[5]</sup>给出了气动阻尼的一般表达式, 利用该公式计算的膜屋盖气动阻尼比为 0.3. 研究膜结构气动参数的另一种常用方法是基于风洞试验的参数识别方法. 武岳等<sup>[6]</sup>通过对鞍型膜结构气弹模型风洞试验数据的识别, 分析了气动质量及气动阻尼随参数的变化特性. 王磊<sup>[7]</sup>利用气弹模型风洞试验对平面圆形薄膜结构的气动阻尼特性进行了研究.

到目前为止, 有关膜结构的气动质量和气动阻尼的研究成果并不是很多, 且各研究成果之间也缺

收稿日期: 2014-06-17

基金项目: 科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-A-03)

第一作者: 韩志惠(1985—), 女, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: hzh850111@163.com

通讯作者: 顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

乏对比,难以形成统一的规律性结论.本文基于鞍型张拉膜结构气弹模型风洞试验,采用线性系统模态参数识别方法对张拉膜结构的气动质量及气动阻尼进行分析.

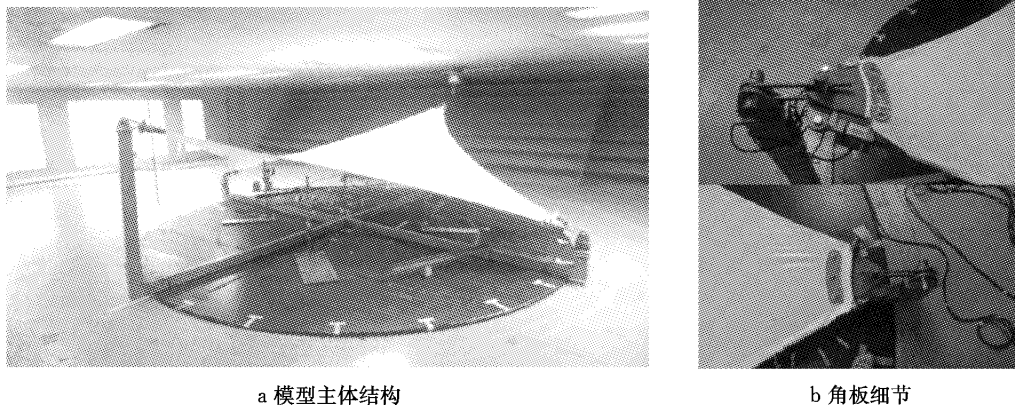
## 1 风洞试验简介

### 1.1 试验模型

鞍型张拉膜结构采用四角固定、四边张拉的结构型式(图1).气弹试验模型共2个,模型尺寸见表1.模型编号分别为AM1,AM2.由于AM1模型没有

对角高差,实际形状为平面四边形,本文将其归为一种特殊的鞍型结构.

试验模型主要包括膜面和钢架两部分.膜面部分采用轻质的PVC膜材制作,膜材经剪裁后由高频热合机完成锁边、拼接等加工步骤,通过边索张拉成型.边索材质为包塑的直径1 cm的钢丝绳.膜材弹性模量经专业的双轴拉伸试验测得.膜材弹性模量



a 模型主体结构

b 角板细节

图1 模型结构形式和角板细节

Fig.1 Types of model and bracket joint

表1 鞍型张拉膜结构风洞试验工况表

Tab.1 Wind tunnel test cases of saddle tensioned membrane structures

模型编号	对角线长度/m	低点与地面高差/m	对角高差/m	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	风向/( $^{\circ}$ )	预张力 $T$ /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
AM1	5	0.4	0	2,4,6,8,10	0,30,45	285,360,396
AM2	5	0.4	1.0	2,4,6,8,10	0,30,45,60,90	234,324,378

$E=600 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\gamma=0.3$ ,厚度  $t=0.3 \text{ mm}$ ,密度  $\rho=0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ .钢架部分主要由  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的方钢制作而成,接合处采用焊接和螺钉加固.膜材和钢架通过角板连接.为了在张拉过程中实时监测边索内力,特别设计了两种角板,一种角板直接通过锁套与边索连接,另外一种通过电子推拉力计与边索连接(图1).电子推拉力计量程为  $20 \text{ kN}$ ,精度为  $0.1 \text{ N}$ ,自带电子显示屏,可实时显示数据.这样,在膜材张拉过程中,可以通过推拉力计所带的电子显示屏得到边索的内力,同时也能保证四根边索内力同时增加,使得膜材张拉过程中受力均匀.

### 1.2 风洞试验概况

气弹模型风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的 TJ-3 大气边界层风洞中进行.该风洞是一座竖向回流式低速风洞,试验段宽  $15 \text{ m}$ 、高  $2 \text{ m}$ 、长  $14 \text{ m}$ ,最高试验风速为  $17.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .试验中采用均匀紊流场,紊流度为  $10\%$ .脉动风速谱曲线见图2a,图中  $f$  为频率, $U$  为  $50 \text{ cm}$  高度平

均风速, $S_u(f)$  为脉动风速功率谱值, $\sigma$  为脉动风速均方根值.模型在张拉过程中边索内力用电子推拉力计测量,膜材预张力采用膜面应力测量仪测量.每个气弹试验模型表面布置9个测点,测点位置见图2b,图中字母 H,L 分别对应模型的高点和低点.每个测点处布置一个激光位移计测量垂直于地面的位移.规定垂直于地面向上的位移为正,垂直于地面向下的位移为负.激光位移计采样频率为  $204.8 \text{ Hz}$ .每个测点采样样本的总长为  $122\,880$  个数据,采样时长为  $600 \text{ s}$ .试验考察的影响因素包括预张力、风速及风向(表1),风速参考点高度为  $1 \text{ m}$ .当风洞内放置模型和被动装置后无法达到最大试验风速,因此本文最高风速为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2 参数识别方法

理论上讲,膜结构的刚度是随着结构变形而时刻变化的,因而需要采用非线性系统参数识别方法

才能得到膜结构的气动质量和气动阻尼.但是目前还没有比较合适的非线性系统参数识别方法可以选用.因此本文提出以下假设:①张拉膜结构在平均风荷载的作用下,其位移变形的非线性部分已基本完成.也就是说,平均风荷载作用下的处于平衡状态的膜结构可以近似看作是线性结构.从文献[8]的分析结果来看,这一假设对本文的研究对象是合适的.②

在脉动风荷载作用下,当膜结构与来流之间的耦合作用处于一种稳定状态时,气动质量、气动阻尼不再随时间而变化.在此基础上,可以运用理论成熟的线性系统参数识别方法进行膜结构的参数识别.这种处理方式虽然会带来一定的误差,但是仍然可以在一定精确度上对膜结构的气动参数进行定性分析.

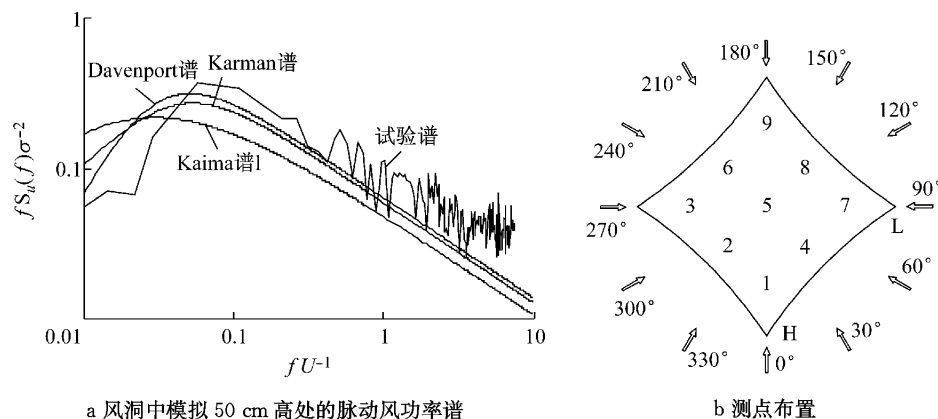


图2 风场模拟结果及测点布置

Fig.2 Simulation of wind field and layout of test points

## 2.1 自由响应数据识别

在零风速的情况下,分别对同一个模型的9个采集点进行敲击,可以得到9组自由响应数据.采用改进的 Ibrahim 时域(ITD)法对自由响应位移数据进行识别.其基本思想是对同时测得的各测点的位移响应数据进行3次不同延时采样,得到自由响应数据矩阵,由响应与特征值之间的复指数关系建立特征矩阵的数学模型,再求解特征值问题,从而求得数据模型的特征值与特征向量,再根据模型特征值与振动系统特征值之间的关系,求出振动系统的固有频率、振型及阻尼.限于篇幅,本文不给出详细的理论推导过程.为了减小噪声的影响以及减小结构非线性和相邻密集模态的影响,采用 Ibrahim 提出的模态置信因子(Modal Confidence Factor)来辨别真假模态.在使用 ITD 法对每组数据进行识别时,得到识别结果不是完全一样.因为使用敲击法激振过程中,每个敲击点激起的振型不同,而且不能激起所有振型.对于非线性膜结构,不同的激励幅值也会得到不同的结果.因此,在敲击过程中,要尽量保持敲击力大小一致.下文所使用的结果是9个敲击点所对应识别结果的综合.

## 2.2 风荷载作用下膜结构气弹参数的识别

采用数据驱动随机子空间识别(SSI)方法来识别张拉膜结构在风荷载作用下的模态参数.线性

系统离散时间状态空间模型可以写为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$  为互不相关的零均值白噪声,即  $E[\mathbf{w}_k] = 0, E[\mathbf{v}_k] = 0$ . 同时  $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$  与状态向量  $\mathbf{x}_k$  不相关,即  $E[\mathbf{x}_k \mathbf{w}_k^T] = 0, E[\mathbf{x}_k \mathbf{v}_k^T] = 0$ . 利用卡尔曼状态序列滤波和最小二乘得到系统矩阵  $\mathbf{A}$  及输出矩阵  $\mathbf{C}$ . 对系统矩阵  $\mathbf{A}$  进行特征值分解可得  $\mathbf{A} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\Phi}^{-1}$ , 其中,  $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_i), \lambda_i$  为离散时间系统的特征值,  $\boldsymbol{\Phi}$  为系统的特征向量矩阵. 系统固有频率  $\omega_i$ 、阻尼比  $\xi_i$  可由下式求出:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\ln \lambda_i \ln \lambda_i^*}}{\Delta t} \quad \xi_i = -\frac{\ln(\lambda_i \lambda_i^*)}{2\omega_i \Delta t} \quad (2)$$

其中,上标 \* 表示共轭. 模态振型由下式给出:

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{C}\boldsymbol{\Phi} \quad (3)$$

由于噪声的存在以及环境激励不能严格满足白噪声假设,随机子空间识别方法不可避免地会产生虚假模态,本文采用稳定图方法来辨别虚假模态.为了从稳定图中精确地识别出结构的固有模态,采用文献[9]中的方法对识别结果作一定的预处理.

## 2.3 气动质量计算方法

张拉膜结构无论在零风速环境中还是非零风速环境中振动,都会产生气动质量.设结构自身的质量为  $M_s$ ,气动质量为  $M_a$ .由单自由度结构体系质量和

结构振动频率之间的关系可得

$$M_a/M_s = (f_s/f_T)^2 - 1 \quad (4)$$

式中:  $f_s$  为结构自身的基频;  $f_T$  为存在流固耦合作用时的基频. 本文利用此方法来获得张拉膜结构的气动质量,并定义气动质量比为  $a_M = M_a/M_s$ . 因为式(4)成立的前提是假设结构刚度不变,因此,求解静止空气中结构振动产生的气动质量时,  $f_s$  应为结构初始状态的基频,  $f_T$  为结构在静止空气中测得的基频;求解流动空气中产生的气动质量时,  $f_s$  为平均风荷载作用下结构达到平衡状态时的基频,  $f_T$  为结构在风荷载作用下测得的基频. 本文中  $f_s$  都是采用有限元分析方法得出,结构的有限元模型参数与气弹模型完全相同,其中所施加的风荷载采用文献[8]的刚性模型测压试验数据.

## 2.4 气动阻尼计算方法

设定张拉膜结构自身的阻尼比为  $\xi_s$ , 气动阻尼比为  $\xi_a$ , 总阻尼比为  $\xi_T$ . 理论上讲, 只要通过识别方法得到结构的总阻尼比, 用总阻尼比减去结构自身阻尼比, 就可得到气动阻尼比. 但是实际工程中, 张拉膜结构自身阻尼比的准确值很难确定. 在研究其

他类型建筑结构的气动阻尼时, 一般作法是将静止空气中识别的阻尼比作为结构自身阻尼比<sup>[10]</sup>. 但是张拉膜结构在静止空气中仍然会产生气动阻尼, 这种作法显然不是非常合理. 考虑到对结构总阻尼比的分析在一定程度上也可以反映气动阻尼的特性, 因此本文将总阻尼比作为研究对象.

## 3 结果分析

### 3.1 识别结果分析

图3给出  $0^\circ$  风向角、 $285 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  预张力状态下, AM1 模型在初始找形状态、静止空气以及  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速的流动空气中, 分别通过数值模拟方法、Ibrahim 时域法及随机子空间参数识别 (SSI) 方法得到的一阶振型以及对应的频率和阻尼比. 与数值模拟结果对比可以发现, 在同样的预张力状态下, 尽管振型相同, 但是 AMI 模型在静止空气以及  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速的流动空气中的一阶自振频率明显小于数值计算结果, 因为数值方法没有考虑气弹效应, 而流动空气中结构的阻尼比则远大于静止流体中总阻尼比.

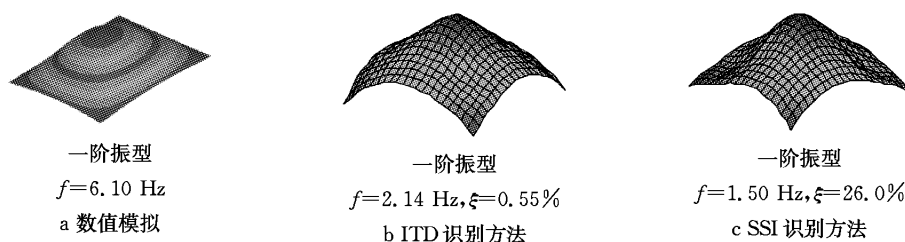


图3 AM1 模型识别结果

Fig.3 Identification results of AM1

### 3.2 气动质量特性

#### 3.2.1 气动质量比随风向角的变化

图4为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速、不同预张力状态下 AM1, AM2 模型气动质量比随风向角的变化曲线. 从图4中可以看出, AM1 模型在  $30^\circ$  风向角下的气动质量比最小. 而 AM2 模型在三种预张力状态下的气动质量分别在  $45^\circ$  及  $60^\circ$  风向角下达到最大值, 这可能与膜面预张力分布不均匀有关. 因为膜面应力测量仪有一定的测量误差, 不能保证在每次张拉过程中膜面内张力呈完全均匀分布状态.

总体来说, 结构振动所产生的气动质量会随风向角而变化, 且在斜风向下时达到极值, 但是不同形状模型的变化趋势却不同. 这说明结构运动所产生的气动质量不仅与结构的初始形态有关, 也与风荷载作用下的稳定形态有关. 因为不同风向角下, 作用在结构表面的风荷载会导致结构产生不同的变形,

继而影响结构的稳定形态.

#### 3.2.2 气动质量比随风速的变化

图5给出  $0^\circ$  风向角、不同预张力状态下 AM1, AM2 模型气动质量比随风速的变化情况. 本文的来流风速为  $2, 4, 6, 8, 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应的来流风压分别为  $2.5, 10.0, 22.5, 40.0, 62.5 \text{ Pa}$ . 为了更好地表示气动质量与荷载之间的关系, 图5中横坐标为不同风速对应的来流风压, 下文相同. 从图5中可以看出, 3种预张力状态下, AM1, AM2 模型气动质量比都随风速的增加而增加, 而且基本呈线性增长趋势. 这说明, 气动质量与结构的振动幅度有关. 因为结构所受风荷载增大, 振动幅度也相应增大, 被带动的周围空气质量也增加. 但是气动质量随风速的增长率随着预张力的增大明显减小, 说明气动质量随风速的增长率与结构的刚度有关.

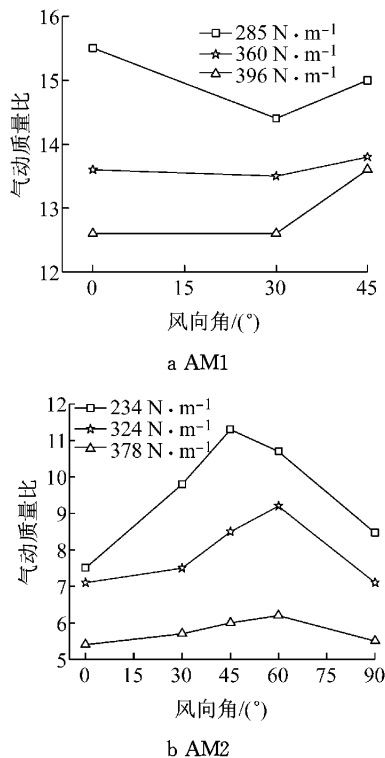


图 4 气动质量比随风向角的变化曲线

Fig.4 Aerodynamic mass as a function of wind direction

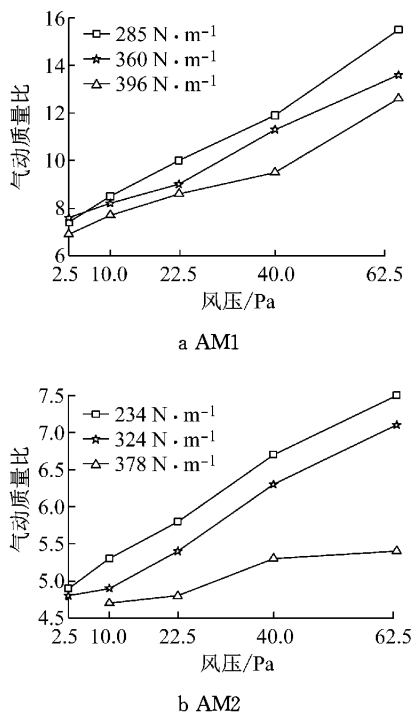


图 5 气动质量比随风速(风压)的变化曲线

Fig.5 Aerodynamic mass as a function of wind speed

### 3.2.3 气动质量比随预张力的变化

图 6 为静止空气(零风速)及  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下, AM1, AM2 模型的气动质量比随预张力的变化曲线。从图 6 中可以看出,气动质量比会随着预张力的

增加而减小,这表明结构刚度的增加减小了气动质量的产生。因为刚度的增加导致相同风速下结构振动幅度减小,所带动的空气质量也会减小。静止空气中气动质量的变化范围较流动空气中的变化范围小,但是两个模型的气动质量比分别达到 7.0, 4.0 左右,可见静止空气中的气动质量是不可忽略的。而流动空气中各风向角下的变化趋势基本相同,且通过对比可以发现,AM2 模型的气动质量整体上较 AM1 模型小。

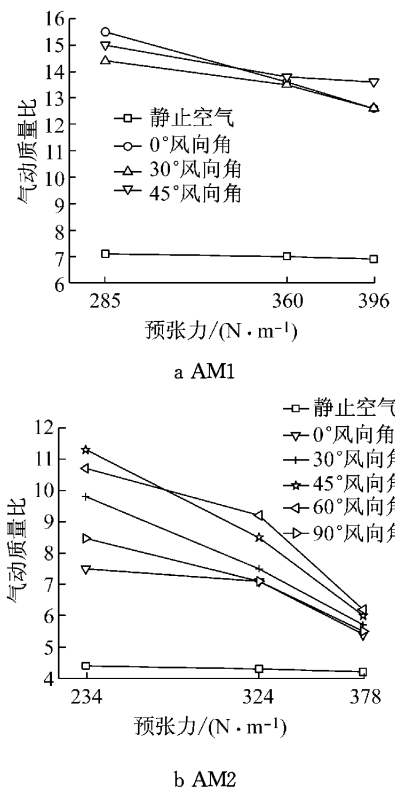


图 6 气动质量比随预张力的变化曲线

Fig.6 Aerodynamic mass as a function of pretension

### 3.2.4 与相关研究成果的对比

在本文所考察的参数范围内,没有对角高差的 AM1 模型的气动质量比在 6.9~15.5 范围内变化,而具有对角高差的 AM2 模型的气动质量比在 4.2~11.3 范围内变化。

孙晓颖<sup>[3]</sup>采用理论分析方法得到的鞍型封闭式膜结构的气动质量比为 1.5~2.0,鞍型开敞式膜结构的气动质量比为 0.3~0.5。武岳等<sup>[6]</sup>基于气弹试验得到的鞍型膜结构气动质量比基本在 0.2~1.2 之间变化。以上两位作者所得结果都远小于本文的结果,而且都认为气动质量比随着风速的增加呈下降趋势,这与本文的观点也有所不同。需要注意的是,两位作者所用的鞍型膜结构模型四边是刚性固

定的,这在一定程度上会减小结构的振动幅度,从而影响气动质量的产生.此外,武岳等的气弹模型制作方式也与本文不同,这也会产生一定的差别.

将 Irwin 等<sup>[11]</sup>采用的气动质量公式  $M_A = \rho \sqrt{A/4\pi} = 0.282\rho \sqrt{A}$  ( $M_A$  为气动质量,  $\rho$  为空气密度,  $A$  为膜结构表面积)和 Minami 等<sup>[1]</sup>给出的平坦矩形膜结构气动质量公式  $M = 0.68\rho l$  ( $M$  为气动质量,  $\rho$  为空气密度,  $l$  为膜结构跨径)用于计算本文 AM1 模型的气动质量,其中模型表面积  $A$  约为  $12.5 \text{ m}^2$ ,膜材自身质量为  $M_F = 0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\rho = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $l$  取模型边长,可得气动质量分别为  $M_A = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $M = 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相应的气动质量比分别为  $M_A/M_F \approx 4.20$ ,  $M/M_F = 10.0$ . 这两个结果在量值上都小于本文通过气弹试验得到的 AM1 模型最大气动质量比值 15.5,而且两者都不能考虑风向角、风速、预张力等参数对气动质量的影响.而实际上膜结构与气流的耦合作用十分复杂,而且结构多变的外形会加剧这种复杂性,目前给出一个简单的质量计算公式还有一定的困难.

### 3.3 气动阻尼特性

#### 3.3.1 气动阻尼随风向角的变化

图 7 为 AM1, AM2 模型在  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下第一阶模态所对应的总阻尼比随风向角的变化曲线.从图 7 中可以看出,AM1 模型在 3 种预张力状态下的总阻尼比都在  $30^\circ$  风向角下达到最小值,与气动质

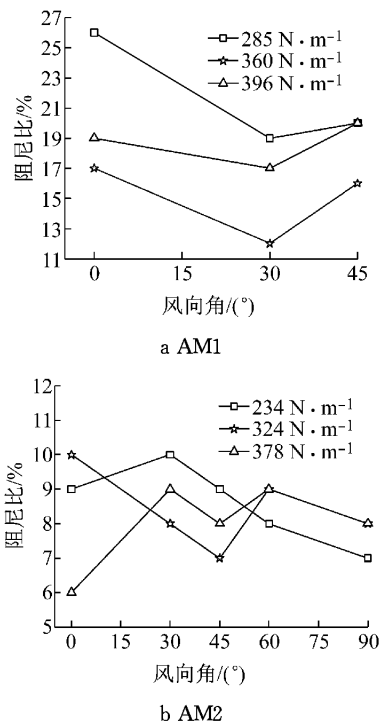


图 7 阻尼比随风向角变化曲线

Fig.7 Damping as a function of wind direction

量的变化规律相似,说明膜结构的稳定形态也会影响气动阻尼.然而 AM2 模型的总阻尼比随风向角的变化比较混乱,这可能与 SSI 参数识别方法的精度有关.

#### 3.3.2 气动阻尼随风速的变化

图 8 为  $0^\circ$  风向角下, AM1, AM2 模型第一阶模态所对应的总阻尼比随风速的变化曲线.从图 8 中可以看出,除个别点外,总阻尼比的变化趋势也是随风速的增加而增加,与气动质量变化趋势相似.这表明气动阻尼也与结构的振动幅度有关.

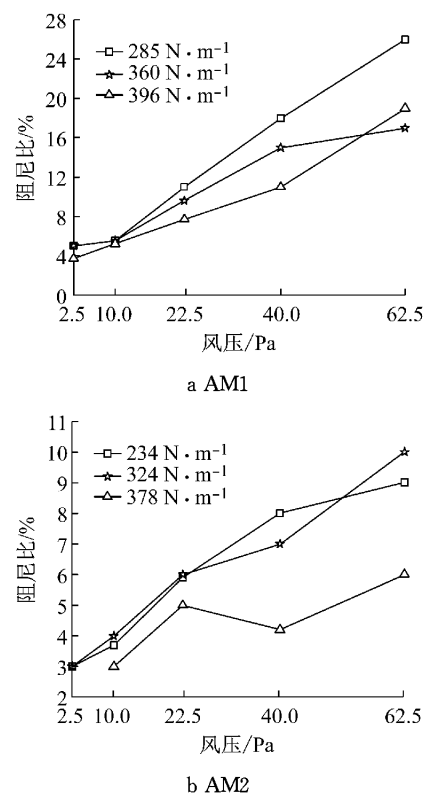


图 8 阻尼比随风速(风压)变化曲线

Fig.8 Damping as a function of wind speed

#### 3.3.3 气动阻尼随预张力的变化

图 9 为零风速及  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下, AM1, AM2 模型第一阶模态所对应的总阻尼比随预张力的变化曲线.在静止空气中,总阻尼比相对较小而且基本不随预张力变化,说明本文的两个张拉膜结构模型的自身阻尼比不会超过 1%.在流动空气中,AM1 模型总阻尼比在  $360 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  预张力状态下达到最小值,目前还不能确定这种现象的原因,可能是  $360 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  预张力状态下,膜面内预张力分布不均匀所致.而 AM2 模型总阻尼比的变化规律比较乱,这可能与 SSI 方法识别精度有关.与气动质量特性相似的是,AM2 模型的总阻尼比整体上较 AM1 模型小.

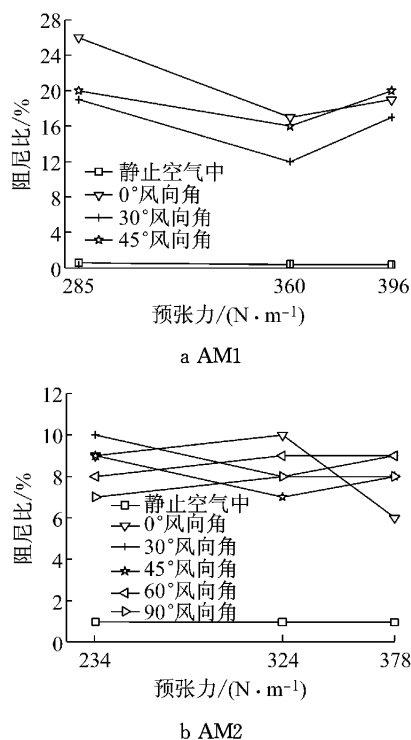


图9 阻尼比随预张力变化曲线

Fig.9 Damping as a function of pretension

### 3.3.4 与相关研究成果的对比

在本文所考察的参数范围内,流动空气中,没有对角高差的AM1模型第一阶模态所对应的总阻尼比在12.0%~26.0%范围内变化,而具有对角高差的AM2模型第一阶模态所对应的总阻尼比变化范围为6.0%~10.0%。考虑到两个模型的自身阻尼比都不会超过1.0%,为方便与前人研究成果比较,这里粗略地将流动空气中的总阻尼比作为结构的气动阻尼比。

孙晓颖<sup>[3]</sup>给出的结论是:鞍型封闭式膜结构的气动阻尼比为6.0%~8.0%,鞍型开敞式膜结构气动阻尼比为1.0%~1.5%,而且认为气动阻尼比随刚度的增加而减小,随风速增加呈增大趋势。这个结论在量值上小于本文结果,但是变化趋势相似。而武岳等<sup>[6]</sup>通过气弹试验给出的鞍型膜结构第一阶模态所对应气动阻尼比可达到20.0%~30.0%左右,第二阶模态所对应气动阻尼比基本在15.0%左右,第三阶模态所对应气动阻尼比约在7.0%左右,与本文结论相当。

## 4 结论

本文基于气弹模型风洞试验,采用线性系统模态参数识别方法,研究了两种鞍型张拉膜结构的气

动质量及气动阻尼随风速、风向、预张力的变化规律,得出以下主要结论:

(1)总体来说,鞍型张拉膜结构振动所产生的气动质量会随风向角变化,且在斜风向下时达到极值,但是不同形状模型的变化趋势却不同;气动质量比随风速的增加而增加,而且基本呈线性增长趋势,但是增长率随着预张力的增大明显减小;气动质量比随着预张力的增加而减小,静止空气中变化范围较流动空气中的变化范围小,而流动空气中各风向角下的变化趋势基本相同,且具有对角高差模型的气动质量比整体上较没有对角高差模型的气动质量比小;在本文所考察的参数范围内,没有对角高差模型的气动质量比在6.9~15.5范围内变化,而具有对角高差模型的气动质量比在4.2~11.3范围内变化。

(2)没有对角高差的张拉膜结构模型第一阶模态所对应的总阻尼比在30°风向角下达到最小值,而有对角高差模型第一阶模态所对应的总阻尼比随风向角的变化比较混乱,可能与参数识别方法的精度有关;总阻尼比随风速的增加而增加;静止空气中的总阻尼比相对较小且基本不随预张力变化,流动空气中总阻尼比随预张力的变化规律比较混乱,这可能与膜面预张力分布不均匀及参数识别方法精度有关;在本文所考察的参数范围内,流动空气中没有对角高差模型的总阻尼比在12.0%~26.0%范围内变化,而具有对角高差模型的总阻尼比变化范围为6.0%~10.0%。

(3)通过与前人研究成果的对比可以发现,针对张拉膜结构的气动质量及气动阻尼,给出一个定量的结论还存在着一定的困难。因为膜结构与气流的耦合作用十分复杂,而且风向角、风速、预张力以及结构多变的外形等因素都会加剧这种复杂性,有待进一步深入研究。

### 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, 1: 935.
- [2] 王吉民. 薄膜结构的风振响应分析和风洞试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.  
WANG Jimin. Study on wind-induced dynamic response and wind tunnel test of membrane structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [3] 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.
- [4] 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.  
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.
- [5] Davenport A G. The response of tension structures to turbulent wind: the role of aerodynamic damping[C]//1st Oleg Kerensky Memorial Conference. London:[s. n.], 1988: 41-47.
- [6] 武岳,杨庆山,沈世钊. 索膜结构风振气弹效应的风洞试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 8.  
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.
- [7] 王磊. 膜结构风振机理试验研究[D]. 上海:同济大学, 2011.  
WANG Lei. Experimental investigation on the wind-induced vibration mechanism of membrane structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [8] 韩志惠. 张拉膜结构气弹模型风洞试验及参数识别方法研究[D]. 上海:同济大学, 2012.  
HAN Zhihui. Research on aeroelastic model wind tunnel test and modal parameter identification of tensioned membrane structure [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [9] 常军,张启伟,孙利民. 稳定图方法在随机子空间识别模态参数中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 39.  
CHANG Jun, ZHANG Qiwei, SUN Limin. Application of stabilization diagram for modal parameter identification using stochastic subspace method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 39.
- [10] 曹会兰,全涌,顾明. 方形截面超高层建筑的横风向气动阻尼风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 18.  
CAO Huilan, QUAN Yong, GU Ming. Experimental study on across-wind aerodynamic damping of square-high-rise building [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 18.
- [11] Irwin H P A H, Wardlaw R L. A wind tunnel investigation of a retractable fabric roof for the Montreal Olympic stadium [C]// Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering. Fort Collins: Pergamon Press, 1979: 925-938.

#### (上接第 829 页)

- [3] Gu M, Quan Y. Across-wind loads of typical tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1147.
- [4] Xie J M. Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 130: 88.
- [5] Carassale L, Freda A, Marrè-Brunenghi M. Experimental investigation on the aerodynamic behavior of square cylinders with rounded corners[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 44: 195.
- [6] 谢壮宁,李佳. 强风作用下楔形外形超高层建筑横风效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 118.  
XIE Zhuangning, LI Jia. Experimental research on cross wind effect on tapered super-tall buildings under action of strong wind [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (12): 118.
- [7] Tamura T, Miyagi T. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1): 135.
- [8] Tamura T, Miyagi T, Kitagishi T. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 531.
- [9] Wang J M, Cheng C M, Tens P T. Design wind loads on tall buildings: a wind tunnel data based expert system approach [C]// Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering. Lubbock: International Association for Wind Engineering (IAWE), 2003: 531-538.
- [10] Larose G L, D'Auteuil A. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(5): 365.
- [11] Larose G L, D'Auteuil A. Experiments on 2D rectangular prisms at high Reynolds numbers in a pressurised wind tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 923.
- [12] Delany N K, Sorensen N E. Low-speed drag of cylinders of various shapes [R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.
- [13] 王新荣,顾明,全涌. 低紊流度下二维矩形柱体模型表面风压分布的雷诺数效应[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 143.  
WANG Xinrong, GU Ming, QUAN Yong. Reynolds number effects on the wind pressure distributions of 2-D rectangular prisms in low turbulence flow [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 143.