

# 非线性鞍型张拉膜结构气弹模型相似参数分析

韩志惠<sup>1,2</sup>, 顾明<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:** 以两种具有不同对角高差的鞍型张拉膜结构为研究对象, 利用膜结构刚性模型测压试验数据以及非线性风振响应计算方法, 通过分析初始找形状态及静力平衡状态下的自振频率、风荷载作用下向上及向下最大位移平均值、均方根值的计算差别, 考察了相似参数的简化依据。结果表明: 对于没有对角高差的张拉膜结构, 弗劳德数相似比不宜超过  $\lambda_V^2/\lambda_L = 10/4$ ; 而对于具有对角高差的张拉膜结构, 弗劳德数相似比不宜超过  $\lambda_V^2/\lambda_L = 20/4$ ; 质量系数可以控制在 0.8~1.2 范围内; 弹性模量系数可以控制在 0.5~1.5 范围内。

**关键词:** 张拉膜结构; 气动弹性; 风洞试验; 相似参数; 非线性

**中图分类号:** TU358

**文献标志码:** A

## Similarity Parameter Analysis of Aeroelastic Model for Nonlinear Saddle Tensioned Membrane Structure

HAN Zhihui<sup>1,2</sup>, GU Ming<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 rigid model tunnel test and nonlinear wind-induced response calculation method, the vibration frequencies of initial form-finding state and static equilibrium state, the upward and downward maximum displacement responses under wind load of two saddle tensioned membrane structures are analyzed to study the simplification of similarity parameters. According to the results, it is proposed that, for the tensioned membrane structures without diagonal height difference, similarity requirement of Froude number should be less than  $\lambda_V^2/\lambda_L = 10/4$ ; for those with diagonal height difference, similarity requirement of Froude number should be less than  $\lambda_V^2/\lambda_L = 20/4$ ; the quality coefficient should be controlled in the range of 0.8~1.2; and the elastic modulus coefficient should be in the range of 0.5~1.5.

**Key words:** tensioned membrane structure; aeroelasticity; wind tunnel test; similarity parameter; nonlinearity

张拉膜结构在风作用下具有绕流复杂、几何非线性特性明显、气动弹性效应不可忽略等特性, 是结构风工程领域的难点问题。研究膜结构风效应的重要方法之一是气动弹性风洞试验。Kimoto 等<sup>[1]</sup>、Matsumoto<sup>[2]</sup>和 Minami 等<sup>[3]</sup>通过气动弹性风洞试验研究了单向悬挂膜结构在风荷载作用下的响应。Kawamura 等<sup>[4]</sup>、Nakayama 等<sup>[5]</sup>对充气膜结构进行了研究。Irwin 等<sup>[6]</sup>详细介绍了蒙特利尔体育馆可收缩式索膜屋盖气弹模型的制作和风洞试验的分析结果, 探讨了膜屋盖气弹模型应该满足的相似参数, 认为膜结构的附加质量较大, 可适当放松质量相似比的要求。Tryggvason<sup>[7]</sup>分别考查了弹性刚度误差对张拉膜结构静力变形和自振频率的影响, 认为弹性刚度相似可以适当放松。

近年来, 随着国内大型膜结构的频繁出现, 国内学者也开展了相关研究。向阳等<sup>[8]</sup>、王吉明<sup>[9]</sup>、武岳<sup>[10]</sup>分别对鞍形和伞形张拉式膜结构、双坡屋面膜结构、鞍形膜结构进行了气弹模型风洞试验研究。张其林等<sup>[11]</sup>对上海世博轴膜结构的缩尺模型进行了气弹模型风洞试验。王磊<sup>[12]</sup>分别对圆形平面膜屋结构 and Levy 型索穹顶结构进行了气弹模型风洞试验, 认为对于膜结构气弹模型, 质量相似比可根据结构质量和附加质量的相对大小确定结构质量相似比的放松程度, 而弹性参数需要根据张力水平具体分析确定, 若张力水平较大, 弹性参数对结构整体刚度贡献小, 则可放松其相似比要求, 反之则需要准确满足。

气弹模型设计必须基于相似理论, 原则上只有保证几何相似、运动相似和动力相似才可能保证模

收稿日期: 2013-04-25

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(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, 主要研究方向为结构抗风。E-mail: minggu@tongji.edu.cn

型与原型的完全相似,在此基础上获得的试验数据才能真实反映原型结构的受力及变形。实践表明,在风洞试验中满足所有的相似条件几乎是不可能实现的,对于张拉膜结构的气弹风洞试验而言,难度更大。因此,在进行膜结构的气弹模型风洞试验之前,对相似参数的简化作详细研究,是十分必要的。目前尚无非线性相似理论,所以无法采用解析方法导出膜结构气弹模型的相似率,只能通过数值方法研究其相似方法。本文以两种具有不同对角高差的鞍型张拉膜结构为研究对象,利用膜结构刚性模型测压试验数据以及非线性时程分析法,在简化考虑张拉膜结构气弹效应的条件下,研究相似参数(弗劳德数、质量及弹性模量)的模拟及简化依据。

## 1 气弹风洞试验的相似参数

按照相似理论要求,张拉膜结构的气弹模型风洞试验需要满足以下相似参数相似<sup>[10,13]</sup>:①代表惯性力与黏性力之比的雷诺数相似。 $Re = \rho V^2 L^2 / (\mu V L) = \rho V L / \mu$ 。②代表惯性力和重力之比的弗劳德数相似。 $Fr = \rho V^2 L^2 / (\rho g L^3) = V^2 / (gL)$ 。③斯特罗哈数相似。 $Sr = fL / V$ 。④惯性力相似,即要求索、膜的质量相似。 $m_F / (\rho L), m_C / (\rho L^2)$ ,其中下标F代表膜,下标C代表索,下文相同。 $m_F$ 是膜材单位面积的质量, $m_C$ 是索材单位长度的质量。⑤回复力相似,即要求张拉膜结构几何刚度和弹性刚度相似。索、膜的弹性刚度相似, $E_F l / (\rho V^2 L), E_C A / (\rho V^2 L^2)$ 。类似地,索、膜的预张力相似, $T_F l / (\rho V^2 L), T_C A / (\rho V^2 L^2)$ 。以上所有公式中, $V$ 表示速度, $L$ 表示长度, $\rho$ 表示密度, $g$ 表示重力加速度, $\mu$ 表示黏性系数, $f$ 表示频率, $l$ 表示膜材厚度, $A$ 表示索材横截面积, $E$ 表示弹性模量, $T$ 表示预张力。

张拉膜结构气弹风洞试验的相似参数可由长度比 $\lambda_L = L_m / L_p$ 、风速比 $\lambda_V = V_m / V_p$ 、密度比 $\lambda_\rho = \rho_m / \rho_p$ 三个基本相似比直接导出。变量中,下标m代表模型,下标p代表原型。通常可认为空气是不可压缩的,因此 $\lambda_\rho = 1$ 。雷诺数效应是一个经典问题,本文不讨论。

## 2 相似参数简化研究方法

### 2.1 鞍型张拉膜结构原型

鞍型张拉膜结构原型结构共有两种,编号分别为p1和p2,结构型式见图1。结构四角固定,四边为柔性边界,通过边索实现。p1模型的对角线长度 $L =$

20 m,对角高差 $2F = 0$  m,低点与地面高差 $H = 3$  m,膜预张力 $T_F = 2$  kN·m<sup>-1</sup>,索预张力 $T_C = 75$  kN。p2模型的对角线长度 $L = 20$  m,对角高差 $2F = 4$  m,低点与地面高差 $H = 3$  m,膜预张力 $T_F = 2$  kN·m<sup>-1</sup>,索预张力 $T_C = 80$  kN。膜材弹性模量 $E_F = 800$  MPa,剪切模量 $G_F = 20$  MPa,泊松比 $\gamma_F = 0.3$ ,厚度 $l_F = 1$  mm,密度 $\rho_F = 1$  kg·m<sup>-3</sup>。索弹性模量 $E_C = 2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比 $\gamma_C = 0.167$ ,横截面积 $A_C = 314.16$  mm<sup>2</sup>,密度 $\rho_C = 7.8 \times 10^3$  kg·m<sup>-3</sup>。

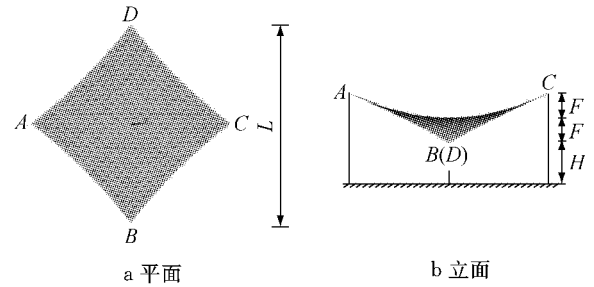


图1 原型结构型式

Fig.1 Type of prototype structure

### 2.2 鞍型张拉膜结构刚性测压试验

刚性模型测压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。试验模型采用双层有机玻璃板制作,具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,不出现明显的振动现象。模型边缘均经过打磨处理,使得下表面靠近边缘处呈切角状,钝化程度减小,尽量不影响来流分离特性。模型几何缩尺比为1/12.5,编号分别为m1和m2。每个模型上下共布置250个测点,测点及风向角定义见图2。图中字母U和B分别对应m2模型的高点和低点。图3为m2测压试验模型图。为了防止模型边缘发生抖动,每边放置了四根细杆作为支撑。试验获得了不同风向角下结构表面的风压时程数据。这些结果用于本文的相似参数研究。限

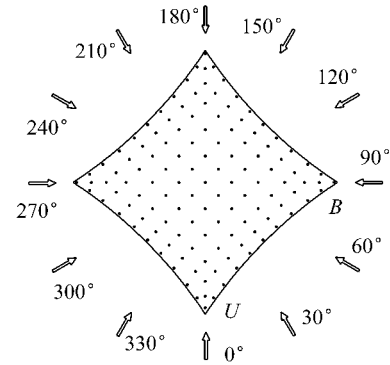


图2 结构测点布置及风向角定义

Fig.2 Test point layout and definition of wind directions

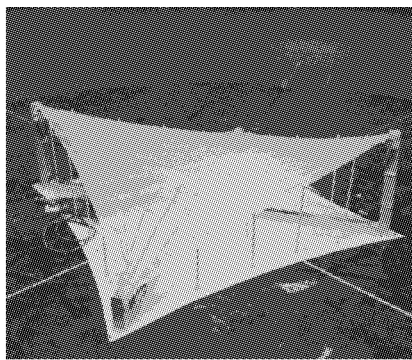


图3 m2 测压试验模型

Fig.3 Model of m2 for wind tunnel test

于论文篇幅,这里不给出结构表面的风压分布特性分析结果,详细内容可见文献[14].

### 2.3 非线性时程分析法

时程分析法就是对结构采用有限元建模,将风荷载时程作为外荷载直接作用于有限元模型上,采用 Newmark 逐步积分法和 Newton-Paphson 迭代理论,获得结构的动力响应,从而解决结构风振响应的计算问题.

结构的动力平衡方程可以表达为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}_{t+\Delta t}\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{P}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ ,  $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ ,  $\mathbf{P}_{t+\Delta t}$  分别表示位移向量、速度向量、加速度向量和荷载向量; $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  分别表示位移、阻尼矩阵,  $\mathbf{K}_{t+\Delta t}$  为结构总刚度矩阵,考虑了几何非线性效应; $t$  表示时间. Newmark 逐步积分法的基本假设为

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + [(1-\delta)\ddot{\mathbf{u}}_t + \delta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\Delta t + [(0.5-\alpha)\ddot{\mathbf{u}}_t + \alpha\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}]\Delta t^2 \quad (3)$$

式(2)和(3)采用了  $\alpha$  和  $\delta$  两个参数对速度和位移进行修正,以提高计算的精度. 利用式(2)和(3)将运动微分方程转化为代数方程,采用 Newton-Paphson 迭代法进行循环迭代,最终即可得到结构在风荷载作用下的响应时程. 阻尼矩阵采用 Rayleigh 阻尼矩阵.

### 2.4 计算参数的选取

计算结构风振响应的参数:①地貌类型为 B 类. ②基本风压 0.55 kPa(上海地区 50 年重现期). ③结构阻尼比  $\xi_s=0.05$ . 文献[15]认为进行风致计算时可忽略空气动力阻尼,膜结构阻尼比的取值在 1.5%~3.0%之间,并认为如果考虑复合材料特性以及纤维的交替卷曲引起的摩擦效应,结构的真实阻尼会更大些. 因而在本文计算中阻尼比取 0.05(本文主要是研究相似参数的简化依据,阻尼比取值并

不影响研究结论). ④阻尼常数取结构第一、第二阶固有频率计算阻尼常数. ⑤工况为  $0^\circ$  风向角.

## 3 计算结果分析

### 3.1 原型结构风振响应分析

图 4 为 p1 和 p2 结构分别在  $0^\circ$  风向角平均风荷载作用下的竖向位移响应等值线图. 图中可以看,在上下表面风荷载共同作用下, p1 和 p2 结构都在迎风侧向上运动,下风向区域向下运动. 但是 p1 结构向下运动的区域面积很小,位移值相对也小. 结构在平均风荷载作用下的变形会直接影响到其动力特性的变化趋势.

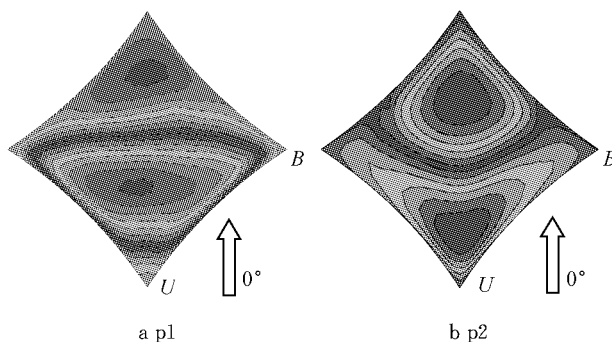


图4 鞍型张拉膜结构竖向位移响应

Fig.4 Vertical displacement of saddle tensioned membrane structures

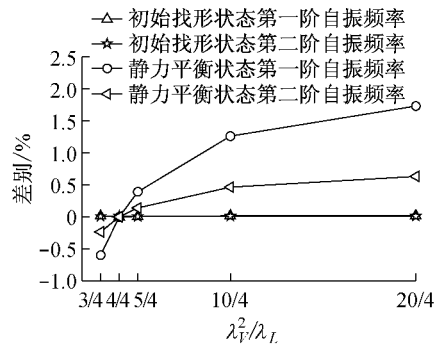
### 3.2 弗劳德数简化

弗劳德数相似要求  $\lambda_L = \lambda_v^2$ . 风洞试验中,一般很难满足弗劳德数相似. 本节设定风速比  $\lambda_v=1/2$ ,长度比分别取  $\lambda_L=1/3, 1/4$  (满足弗劳德数相似),  $\lambda_L=1/5, 1/10, 1/20$ , 通过分析鞍型张拉膜结构在初始找形状态和静力平衡状态(重力及平均风荷载作用下的平衡状态)下,一阶、二阶自振频率、风荷载作用下向上和向下最大位移平均值、均方根值计算差别随  $\lambda_v^2/\lambda_L$  的变化,考察弗劳德数的简化依据. 其中,静力平衡状态下自振频率通过将结构初始坐标更新为静力平衡状态坐标求得,而不同的相似比分析是通过在数值方法中设定相应的结构尺寸、材料弹性模量、预张力及风荷载采样频率等相关参数实现. 差别=(计算值-理论值)/理论值,理论值由原型结构计算得到(见表1),计算值为缩尺模型的计算结果除以相应的相似比转化得到. 根据相似理论,缩尺模型与原型结构的频率比  $\lambda_f = \lambda_v/\lambda_L$ , 位移比值应该等于长度比  $\lambda_L$ . 图 5 和 6 分别为 p1 和 p2 结构在风速比为  $1/2$ , 长度比取不同值时,计算差别随  $\lambda_v^2/\lambda_L$  变化.

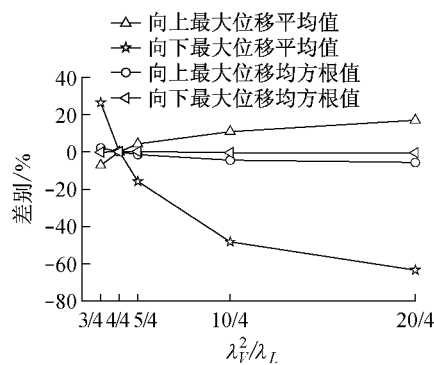
表 1 原型结构的理论值

Tab.1 Theoretical value of prototype structures

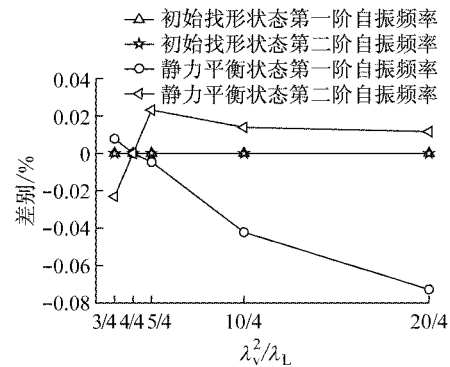
原型	初始找形状态/Hz		静力平衡状态/Hz		最大位移平均值/cm		最大位移均方根值/cm	
	一阶	二阶	一阶	二阶	向上	向下	向上	向下
p1	2.227	3.499	2.342	3.698	22.24	-4.63	15.27	7.63
p2	4.476	4.497	4.263	4.335	28.15	-35.06	1.05	1.81



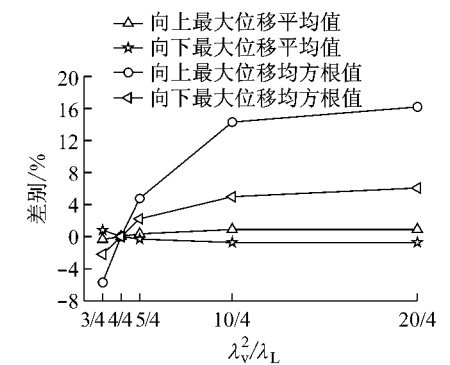
a 自振频率



b 位移响应

图 5 p1 结构缩尺模型计算差别随  $\lambda_v^2/\lambda_L$  变化图Fig.5 Difference for model of p1 structure as a function of  $\lambda_v^2/\lambda_L$ 

a 自振频率



b 位移响应

图 6 p2 结构缩尺模型计算差别随  $\lambda_v^2/\lambda_L$  变化图Fig.6 Difference for model of p2 structure as a function of  $\lambda_v^2/\lambda_L$ 

由于结构的初始找形状态(以自振频率为代表)与自身重力无关,所以无论基本相似比取何值,计算得到的频率值都符合理论值,因此本节不讨论初始找形状态的频率值。

从计算结果可以看出,当  $\lambda_v^2 = \lambda_L$  时,即  $\lambda_v^2/\lambda_L = 4/4$ ,p1 和 p2 结构缩尺模型的所有计算结果都与理论值完全吻合。这说明当基本相似比符合弗劳德数相似时,无论结构是什么形状,缩尺模型计算结果与原型计算结果的比值也完全符合相似理论。这同时也说明,通过缩尺模型气弹模型试验来研究膜结构是可行的。

当  $\lambda_v^2 < \lambda_L$  时,即  $\lambda_v^2/\lambda_L = 3/4$ ,p1 结构的缩尺模型在静力平衡状态下的第一阶、第二阶自振频率以及向上最大位移平均值都小于理论值,而向下最大位移平均值大于理论值。这是因为  $\lambda_v^2 < \lambda_L$ ,缩尺模型的重力大于理论值,导致结构向上位移平均值小于

理论值,而向下位移平均值大于理论值。结构在静力平衡状态下的自振频率也与结构的变形有关。从 p1 结构在  $0^\circ$  风向角平均风荷载作用下的竖向位移响应等值线图(见图 4)可以看出,结构大部分区域都是向上运动,向下位移相对很小,结构在静力平衡状态下的刚度主要受向上位移控制。因此,缩尺模型向上位移小于理论值直接导致结构的刚度相对变小,静力平衡状态下的第一阶、第二阶自振频率也小于理论值。p2 结构缩尺模型的位移平均值变化趋势与 p1 结构相似。而静力平衡状态下的第一阶自振频率大于理论值,第二阶自振频率小于理论值,说明缩尺模型的重力大于理论值,使相应于一阶振型的刚度增加,一阶频率大于理论值。

当  $\lambda_v^2 > \lambda_L$  时,结果完全相反,而实际中遇到更多的是  $\lambda_v^2 > \lambda_L$  的情况。 $\lambda_v^2/\lambda_L = 10/4$  时,p1 结构的自振频率及位移响应平均值、均方根值中,计算值与理

论值最大差值分别为 0.03 Hz(静力平衡状态第一阶自振频率最大差值)、2.4 cm(向上最大位移平均值最大差值), -0.7 cm(向上最大位移均方根值最大差值), 相对差别分别为 1.28%, 10.8%, -4.38%;  $\lambda_v^2/\lambda_L = 20/4$  时, p2 结构的自振频率及位移响应平均值、均方根值中, 计算值与理论值最大差值分别为 -0.003 Hz(静力平衡状态第一阶自振频率最大差值)、0.26 cm(向上最大位移平均值最大差值), 0.17 cm(向上最大位移均方根值最大差值), 相对差别分别为 -0.07%, 0.70%, 16.2%。由表 1 可见, p2 最大位移均方根理论值本身很小, 仅 1.05 cm, 所以认为可将误差放宽。

以上分析表明, 理想情况应该是严格模拟弗劳德数, 但考虑到对实际大型膜结构气动弹性模型模拟时, 时常很难实现弗劳德数, 因而必须在一定的精度范围内简化弗劳德数模拟。对于没有对角高差的 p1 型张拉膜结构, 弗劳德数相似比应不宜超过  $\lambda_v^2/\lambda_L = 10/4$ ; 而对于具有对角高差的 p2 型张拉膜结构, 弗劳德数相似比不宜超过  $\lambda_v^2/\lambda_L = 20/4$ 。通过对弗劳德数相似的研究, 可以发现在满足其他相似参数前提下, 基本相似比取不同值只会影响结构重力的相似, 进而造成对响应计算的差别。由于膜材质量(见下文研究内容)也会在一定程度上影响结构重力的相似, 因此在具体确定基本相似比时, 应该综合考虑这两种相似参数的简化。

### 3.3 质量相似简化

在选择用于制作膜结构气弹试验模型的材料时, 一般很难找到完全符合质量相似要求的膜材, 实际采用的膜材质量往往与理论值存在一定的差别。为研究由于膜材质量差别而带来的计算差别, 本节选定基本相似比  $\lambda_L = 1/9$ ,  $\lambda_v = 1/3$ , 膜材质量分别为理论值的 1.5, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5 倍, 计算结构在风荷载作用下的响应, 并与理论值进行对比。

图 7 和 8 分别为 p1 和 p2 结构的计算差别随质量系数的变化图, 其中差别 = (计算值 - 理论值) / 理论值, 理论值为膜材质量完全符合相似理论时的计算结果(见表 1)。

从图中可以看出, p1 结构在初始找形状态和静力平衡状态下的自振频率都随着膜材质量的增大而减小。至于位移响应, 向上最大位移平均值随着膜材质量的增大而减小, 其他响应都随着膜材质量的增大而增大。因为膜材质量增大, 结构所受重力也增大, 使得向上位移减小, 向下位移增大。p2 结构在初始找形状态和静力平衡状态下的自振频率以及位移

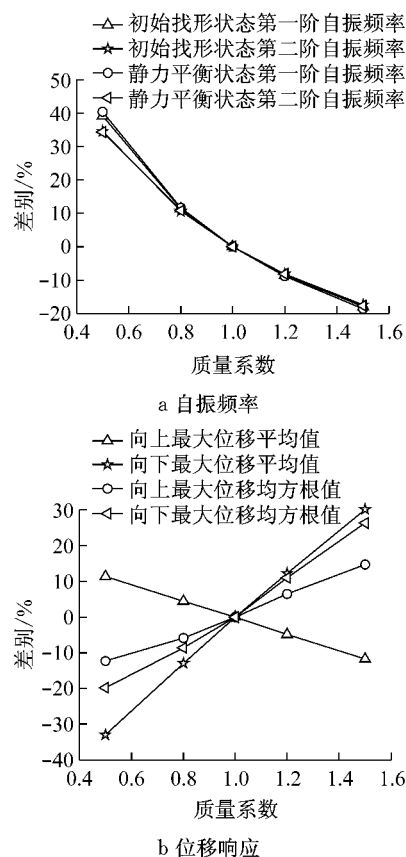


图 7 p1 结构计算差别随质量系数的变化

Fig. 7 Difference for model of p1 structure as a function of mass coefficient

平均值随膜材质量的变化趋势与 p1 结构相似, 但是位移平均值的计算差别明显小于 p1 结构。p2 结构的位移响应均方根值随着膜材质量的增大而减小。因此, 响应的计算差别随质量系数的变化特性除了与响应本身的大小有关系外, 与结构的形式也有关系。

总体来说, 所选膜材质量的差别对结构的自振频率影响比较大, 因为自振频率与质量有直接的关系。对自振频率及位移响应平均值、均方根值中, 计算值与理论值差值比较大的一组数值进行详细分析。当质量系数分别为 0.8 和 1.2 时, p1 结构的初始找形状态下第二阶自振频率、向上最大位移平均值、向上最大位移均方根值的计算值与理论值差值分别为 1.1 Hz 和 -0.85 Hz, 0.11 cm 和 -0.12 cm, -0.09 cm 和 0.11 cm, 相对差别分别为 10.6% 和 -8.19%, 4.45% 和 -4.85%, -5.88% 和 6.47%; p2 结构的静力平衡状态下第二阶自振频率、向下最大位移平均值、向上最大位移均方根值的计算值与理论值差值分别为 1.42 Hz 和 -1.08 Hz, -0.01 cm 和 0.02 cm, 0.01 cm 和 -0.01 cm, 相对差别分别为 10.9% 和 -8.31%, -0.25% 和 0.51%, 8.3%

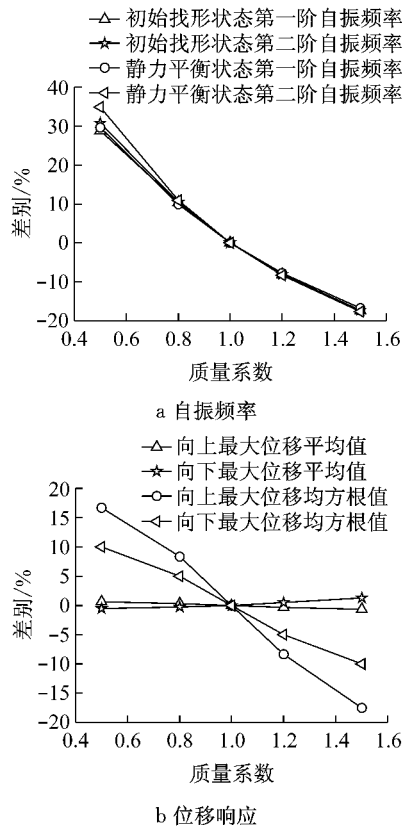


图8 p2结构计算差别随质量系数的变化

Fig. 8 Difference for model of p2 structure as a function of mass coefficient

和-8.3%。

总之,如果条件允许,质量系数应该尽量接近1.0。但考虑到对实际大型膜结构气动弹性模型模拟时,严格满足质量系数的膜材时常难以得到,综合考虑结构的自振频率及位移响应,认为对于类似本文所研究的张拉膜结构,其质量系数可以控制在0.8~1.2范围内,相应的计算误差约10%左右。此外,实际膜结构振动时存在气动质量,会在一定程度上减小膜材质量差别所导致试验结果的差别。但是在没有完全掌握气动质量特性的前提下,可以在气弹试验时选用质量小于理论值的膜材,在不影响其他相似参数的前提下,通过适当增加质量来减小此类差别。

### 3.4 弹性模量相似简化

膜材的弹性模量实际上是随着荷载变化的,因此实际工程中很难给出膜材弹性模量的准确值,而且找到同时满足弹性模量相似要求和质量相似要求的膜材也是一件困难的事情。为此,本节选定基本相似比 $\lambda_L=1/9$ , $\lambda_V=1/3$ ,膜材弹性模量分别为理论值的1.5,1.2,1.0,0.8,0.5倍,对比计算值与理论值,考察由于膜材弹性模量差别而带来的计算差别。

图9和10分别为p1和p2结构的计算差别随弹性模量系数的变化图,其中差别=计算值的绝对值-理论值的绝对值,理论值为膜材弹性模量完全符合相似理论时的计算结果(见表1)。

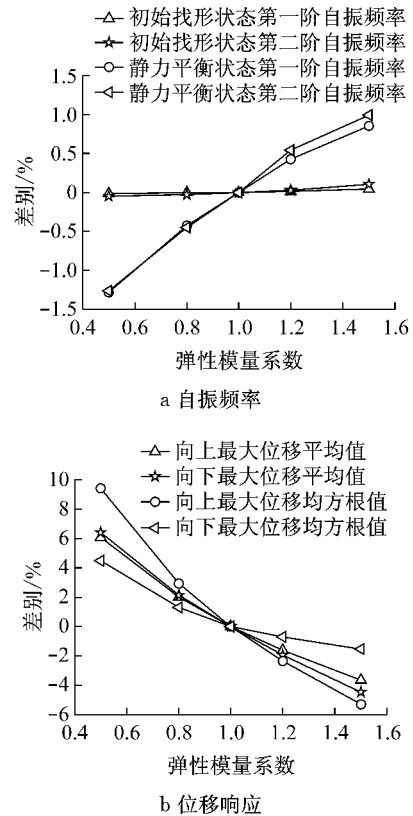


图9 p1结构计算差别随弹性模量系数的变化

Fig. 9 Difference for model of p1 structure as a function of modulus of elasticity coefficient

从图中可以看出,p1和p2结构在初始找形状态和静力平衡状态下的自振频率都随着弹性模量的增大而增大,而位移响应随着弹性模量的增大而减小。

对自振频率及位移响应平均值、均方根值中,计算值与理论值差值比较大的一组数值进行详细分析。当弹性模量系数分别为0.5和1.5时,p1结构的静力平衡状态下第二阶自振频率、向上最大位移平均值、向上最大位移均方根值的计算值与理论值差值分别为-0.14 Hz和0.11 Hz,0.15 cm和-0.09 cm,0.16 cm和-0.09 cm,相对差别分别为-1.26%和0.99%,6.07%和-3.64%,9.41%和-5.29%;p2结构的初始找形状态下第一阶自振频率、向下最大位移平均值、向下最大位移均方根值的计算值与理论值差值分别为-0.64 Hz和0.30 Hz,0.40 cm和-0.41 cm,0.16 cm和-0.06 cm,相对差别分别为-4.76%和2.15%,10.3%和-10.5%,

80%和-30%(由表 1 可见,  $p_2$  最大位移均方根值的理论值本身很小, 仅  $1.81/9=0.2$  cm, 因此可不考虑这个值的影响)。

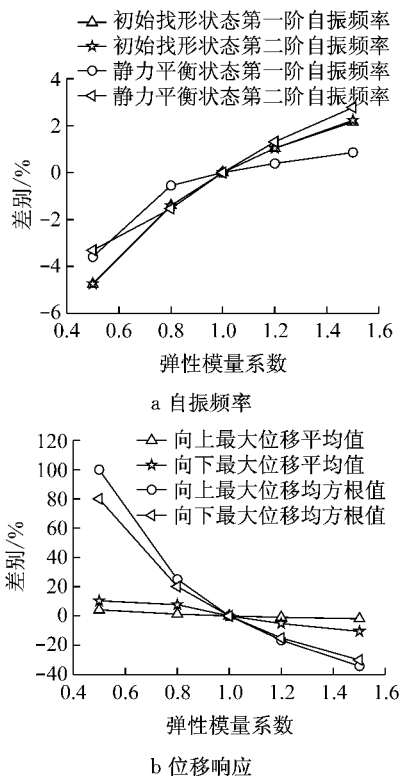


图 10  $p_2$  结构计算差别随弹性模量系数的变化

Fig.10 Difference for model of  $p_2$  structure as a function of modulus of elasticity coefficient

膜结构的刚度是由膜材弹性模量和膜面的预张力两部分组成, 其中占主导作用的是膜面内预张力. 膜材弹性模量的差别必然会导致自振频率及位移响应的计算差别, 但是如果增大膜面的预张力, 会使计算差别进一步减小. 因此, 对于类似本文所研究的张拉膜结构, 其弹性模量系数可以控制在 0.5~1.5 范围内, 但是可以结合实际预张力水平作适当调整. 相对于质量相似要求, 寻找满足弹性模量相似要求膜材的困难更大. 试验时, 可综合考虑两者的相似要求.

## 4 结论

(1) 对于没有对角高差的  $p_1$  型张拉膜结构, 弗劳德数相似比不宜超过  $\lambda_v^2/\lambda_L=10/4$ ; 而对于具有对角高差的  $p_2$  型张拉膜结构, 弗劳德数相似比不宜超过  $\lambda_v^2/\lambda_L=20/4$ . 通过对弗劳德数相似的研究, 可以发现在满足其他相似参数前提下, 基本相似比取不同值只会影响结构重力的相似, 进而造成响应计算

的差别. 由于膜材质量也会在一定程度上影响结构重力的相似, 因此在确定基本相似比时, 应该综合考虑这两种相似参数的简化.

(2) 所选膜材质量的差别会使结构的自振频率及位移响应产生差别, 但是对自振频率的影响相对比较大. 响应的计算差别随质量系数的变化特性除了与响应本身的大小有关系外, 与结构的形式也有关系. 对于类似本文所研究的张拉膜结构, 其质量系数可以控制在 0.8~1.2 范围内, 相应的计算误差约 10% 左右. 而且实际膜结构振动时存在气动质量, 会在一定程度上减小膜材质量差别所导致试验结果的差别. 但是在没有完全掌握气动质量特性的前提下, 可以在气弹试验时选用质量小于理论值的膜材, 在不影响其他相似参数的前提下, 通过适当增加质量来减小此类差别.

(3) 膜结构的刚度由膜材弹性模量和膜面内预张力两部分组成, 其中占主导作用的是膜面内预张力. 膜材弹性模量的误差必然会导致自振频率及位移响应的计算差别, 但是如果增大膜面内预张力, 会使计算误差进一步减小. 对于类似本文所研究的张拉膜结构, 其弹性模量系数可以控制在 0.5~1.5 范围内, 但是可以结合实际预张力水平作适当调整.

(4) 特别需要强调的是, 膜结构气动弹性模型的相似问题很复杂, 对不同形式结构的简化会产生不同的差别. 本文研究成果仅对相似形状结构具有参考价值, 但是研究方法并不失普遍性. 因此, 在进行某一具体膜结构气动弹性模型设计时, 建议进行如上程序的计算分析, 在一定精度的设定下, 确定模型的简化设计方法. 此外, 本文提出的基于数值计算的相似参数简化方法没有考虑结构与风荷载之间的气弹效应, 在目前气弹效应没有完全掌握的前提下, 这种方法可在一定程度上保证气弹试验的精确性, 但还需通过进一步的现场实测及气弹试验进行验证.

## 参考文献:

- [1] Kimoto E, Kawamura S. Aerodynamic behavior of one-way type hanging roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13: 395.
- [2] 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.
- [3] Minami H, Okuda Y, Kawamura S. Experimental studies on the flutter behavior of membranes in a wind tunnel[J]. Space Structures, 1993(1):935.

(下转第 623 页)