

胶囊形气膜结构风致气弹响应及风振系数研究

陈昭庆^{1,2}, 宋鹏飞^{1,2}, 闫科晔³, 武岳³, 苏宁⁴, 曾聪^{1,2}

(1. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学吉林省电力基础设施安全评估与灾害防治重点实验室, 吉林 吉林 132012; 3. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 针对 1/3 矢跨比胶囊形气膜结构进行了气弹模型风洞试验, 研究了结构的风致气弹响应变化规律, 并给出了可供设计参考的风振系数。研究发现: 结构平均变形呈迎风面凹陷, 顶部隆起, 横风向向外凸出的趋势, 且这种变形趋势随着内压减小和风速增大越来越明显。0° 风向角时的平均变形和振幅大于 45° 风向角时的平均变形和振幅大于 90° 风向角时的平均变形和振幅, 结构合位移均值的极值出现在迎风面与顶面中心点; 0° 和 45° 风向角下, 顶点竖向振幅 > 顺风向振幅 > 横风向振幅, 结构以 1 阶模态振动为主; 90° 风向角下, 顶点横风向振幅大于其他两个方向, 结构以 1 阶和 2 阶模态叠加振动为主。各工况下结构的内压均有不同程度的减小。最后给出了考虑流固耦合效应的响应风振系数。

关键词: 风致气弹响应; 胶囊形气膜; 气弹模型; 风洞试验; 响应风振系数

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)01-0031-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.01.004

1 概述

近年来, 气承式膜结构因其建设周期短、具有良好的防治雾霾功能等优点, 在国内外得到广泛的应用。其常见形状包括: 截球形、矩形平面投影长条形、胶囊形等。其中, 胶囊形气膜通常由柱面两端接截球面构成, 是气膜结构最常见的形状之一, 主要用于大型体育馆(如图 1 所示)、购物中心、展览馆、仓库货栈等场所的建设。



图 1 河南省杂技集团气膜集训馆

Fig. 1 An inflatable membrane structure for the training center of Henan Acrobatics Group

这种结构的跨度常达到 30~60 m, 是典型的风敏感结构, 在风荷载作用下易产生较大的变形和振动。因其在风荷载作用下的振动规律比较复杂, 所以风振响应的确定十分困难。

目前关于胶囊形气膜结构风振响应规律及抗风设计方法方面的研究并不是很多。Kawamura 等^[1]通过刚性模型测压试验研究了 3/4 矢跨比胶囊形气膜结构的风压分布规律; 在野外建造了一个高 3 m, 跨度 4 m, 长 9 m 的同矢跨比的胶囊形气膜结构, 测量了膜结构表面 4 个测点在强风下的位移响应, 发现该气膜结构以多模态叠加振动为主, 结构的动态响应受脉动风荷载影响明显, 结构振动行波速度比风速更快, 结构有可能发生气弹失稳。Srivastava 等^[2]通过风洞试验, 分别测量了矢跨比为 1/2, 1/3, 1/4 的柔性模型表面的脉动风压荷载, 并与矢跨比为 1/2 的刚性模型测压试验结果对比, 发现在特定风向角下, 刚性模型与柔性模型表面风压系数差别较大; 当内压与脉动风压之比越来越小时, 结构越来越柔, 直至失稳。Bown 等^[3]使用非线性动力时程分析方法, 研究了雨水作用下胶囊形气膜的动态响应过程, 评估了结构发生破坏的可能。

更多关于气承式膜结构的研究, 集中在截球形和矩形平面投影长条形气膜结构方面。例如: 一些国外学者^[4-5]对截球形气膜进行气弹模型风洞试验, 探求其不同风速、内压等条件下的气弹效应, 发现在风速达到一定条件下气膜表面会发生凹陷, 结构最终会发生失稳。文献[6-7]利用数字图像相关技术

收稿日期: 2022-03-11; **修订日期:** 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878129); 吉林省科技厅重点研发计划项目(20210203165SF); 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室开放基金资助项目(HITCE202004)。

(Digital Image Correlation, DIC)、粒子图像技术速(Particle Image Velocimetry, PIV)和CFD仿真模拟方法探究了不同雷诺数下湍流与气膜模型之间的相互作用,发现结构变形会随雷诺数的增加而明显变化,且随着雷诺数的增加,当旋涡形成的频率接近于气膜最低固有频率时会放大膜的振动。He等^[8]模拟了截球形充气膜储气罐的风振响应,发现气膜结构在风作用下具有明显的气弹效应,当结构自振频率与旋涡脱落频率成比例时结构振幅增大并发生气弹失稳。申跃奎等^[9]、Li等^[10]模拟了矩形平面投影长条形气膜、拱形屋盖在振动状态下的风压分布规律,并与刚性模型对照,发现考虑流固耦合时风压有明显的放大效应。

这些研究表明:气膜结构柔性较大,风致流固耦合效应明显,抗风设计时需考虑流固耦合效应的影响。但是,目前关于气膜结构气弹响应研究的文献仍不是很多,关于胶囊形气膜结构气弹模型试验的研究更少。这是因为模型制作困难、风洞试验非接触测量手段缺乏。

近年来,非接触式位移、应变测量技术获得了很大的进步,在充气膜结构领域得到了广泛应用。例如:沈珊珊等^[11]将摄影测量技术用于一个平面尺寸97 m×80 m的充气膜结构泄气过程中7个测点位移的测量。Zhao等^[12]通过3D数字摄影测量技术实时测量了气枕式膜结构在不同内压条件下的动态几何形状。

同时,考虑到中国的《膜结构技术规程》^[13]中尚未给出胶囊形气膜结构的风振系数。因此,本文拟针对胶囊形气膜结构进行气弹模型试验,通过DIC技术测量结构在不同风速和风向角下的全场动态位移应变信息,研究结构在风荷载作用下的振动规律,给出可供设计参考的响应风振系数。

2 气弹模型风洞试验

试验在交通运输部天津水运工程科学研究所TKS-400风洞中进行,该风洞为直流风洞,试验段长×宽×高为15 m×4.4 m×2.5 m,模拟B类地貌风场。

2.1 气弹模型设计

以实际工程中应用最多的1/3矢跨比气膜结构为原型进行模型设计,假设原型结构长×跨度×高为60 m×30 m×10 m,膜材为PVDF,弹性模量为800 MPa,单位面积质量为1055 g/m²,无拉索。

长度缩尺比的确定主要考虑阻塞率不大于5%的要求,取 $\lambda_L=L_m/L_p=1:50$ (L_m 和 L_p 分别表示模型和原型的特征长度,特征长度取跨度),对应的最大阻塞率

(0°风向角)为1.87%,模型各部位的尺寸如图2所示。考虑0°,45°和90°三种风向角的变化。膜材选用PVC(聚氯乙烯)涂层的纤维织物膜材,膜材厚为0.14 mm,弹性模量为16 MPa,面积质量为180 g/m²。

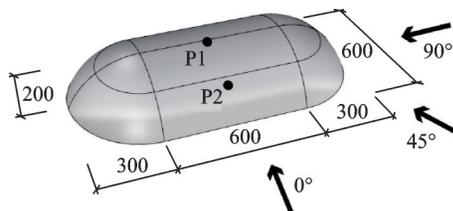


图2 模型尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Model dimension (Unit: mm)

风速缩尺比 $\lambda_v=V_m/V_p$ (V_m 和 V_p 分别表示模型试验风速和原型实际风速)的取值参考文献[14]的结论,取为1:1,此时可不用对模型内部封闭空间进行放大。原型内压一般为200~400 Pa,试验中内压取为100,150,200 Pa。其他缩尺比可通过长度缩尺比与风速缩尺比推导出,如表1所示。

表1 气弹模型缩尺比

Tab. 1 Scale ratios of the aero-elastic models

名称	理论缩尺比	实际缩尺比
长度	$\lambda_L=L_m/L_p=1:50$	1:50
风速	$\lambda_v=V_m/V_p=1:1$	1:1
膜质量比	$\lambda_m=\lambda_L=1:50$	1:6
膜弹性刚度比	$\lambda_{ET}=\lambda_v^2\lambda_L=1:50$	1:50
位移比	$\lambda_d=\lambda_L=1:50$	1:50
内压比	$\lambda_p=\lambda_v^2=1:1$	1:2
Froude数比	$\lambda_{Fr}=1$	$\lambda_v^2/\lambda_L=50:1$
Reynolds数比	$\lambda_{Re}=1$	$\lambda_v\lambda_L=1:50$

可以看出,虽然选择的膜材已经是能找到的最轻的膜材,但长度缩尺比决定了膜的质量缩尺比仍然比理论要求偏大,事实上,文献[14-15]认为:膜结构气弹模型试验的质量比一般均难以满足,但膜结构振动引起的附加质量对响应的影响远大于膜材质量的影响,因此质量缩尺比的偏差可以被忽略。

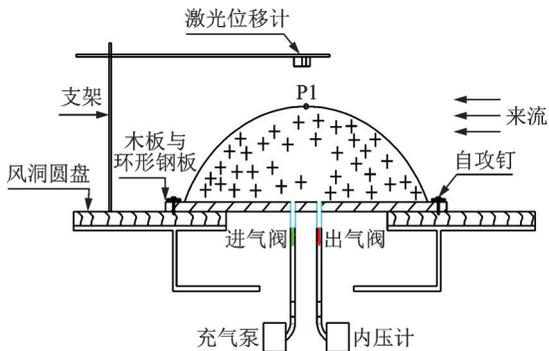
Froude数、Reynolds数缩尺比与理论值之间也存在偏差,这两个缩尺比本身是矛盾的,无法同时满足。Froude数表示惯性力与重力之比,要满足就需要采用非常低的风速,由于模型质量轻,内外压差对结构响应产生的影响远大于重力,所以该相似比不满足引起的误差可以忽略^[16]。Reynolds数代表惯性力与黏性力之比,模型缩尺到1/n,风速就需要增大n倍,试验中也很难满足。但试验时一般应保证模型和原型的Reynolds数在同一临界区内,本试验中主要考虑球形面迎风时Reynolds数处于同一临界区,模型和原型的Reynolds数分别为 $1.7\times 10^5\sim 5.8\times 10^5$ 和 $8.3\times 10^6\sim 2.9\times 10^7$ 。文献[17]认为:当Reynolds数 $>3\times 10^5$ 之后,球形结构流体绕流形式

基本固定。因此,模型和原型处于同一临界区, Reynolds 数不满足造成的影响可以忽略。

模型制作过程包括找形分析、剪裁分析^[18]、放样、剪裁、热合、充气、气密性检查等环节。气膜屋盖与一块平面膜材热合形成一个封闭整体,平面膜材通过自攻钉和环形钢板固定在风洞木质圆盘上,平面膜材下面设进气阀和出气阀,分别与充气泵和内压计相连,模型布置安装示意图和照片如图 3 所示。



(a) 模型布置安装的照片
(a) A photo of aero-elastic model installation



(b) 模型布置安装的示意图
(b) Schematic diagram of aero-elastic model installation

图 3 模型布置安装的示意图和照片

Fig. 3 Schematic diagram and photo of aero-elastic model installation

2.2 试验工况及测量方法

试验工况如表 2 所示,主要考虑风向角、内压和风速变化。内压测量采用法国 KIMO 内压计 CP212,量程为 0~1000 Pa,精度为 ±1%。采用眼镜蛇风速仪对风速进行测量,采样频率为 1024 Hz。风速仪安装在模型前方 2.5 m,距离墙壁 0.5 m 位置处,以此位置的风速为试验的参考风速。

表 2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

风向角/ (°)	内压/ Pa	双目风速/ (m·s ⁻¹)	激光位移计 风速/(m·s ⁻¹)
0, 45, 90	100, 150, 200	4, 7.5, 11	4, 6, 8, 9, 11, 13, 14

试验时,主要采集膜面的全场动态位移时程和应变时程。采集设备包括:比利时 Matchid 的 Stereo-3D 全场位移、应变测量系统(双目系统)和 Panasonic HL-C2 系列激光位移计。

双目系统为非接触式光学测量设备,由两台高速摄像机及数据采集系统构成,相机镜头为日本康达达 FA M2518-MPW2 25 mm 焦距工业镜头,500 万像素,采样时长为 10 s,采样频率为 60 Hz。每工况采集 5 个样本。测量原理为:基于 DIC 技术,将膜面变形前标定的图像作为参考图像,对比物体形变后的图像,获得膜面变形前后的位移与应变。试验前,需在膜面绘制黑色随机散斑,将相机及采集设备固定在风洞试验段玻璃窗外(如图 4 所示),利用标定板对散斑点初始位移及应变进行标定(如图 5 所示)。由于测量时只能采集两台相机公共交叉视野内散斑点的三维动态位移和应变,因此,需要通过改变双目相机的位置分多次测量获得结构的全场动态位移与应变。

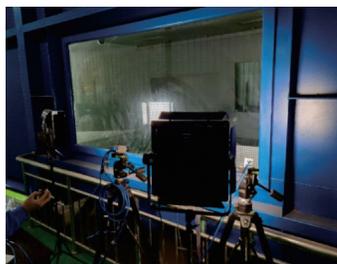


图 4 双目相机摆放

Fig. 4 Placement of binocular cameras



图 5 相机标定

Fig. 5 Cameras calibration

激光位移计通过支架固定在气膜正上方以测量模型上方中点(如图 3(b)中的点 P1)的竖向位移,采样频率为 1024 Hz,用于模型功率谱分析。

通常认为,激光位移计的采样精度较高,因此,通过激光位移计测量气膜正上方中心点在 11 m/s 风速下的竖向位移时程,与双目系统的测量结果进行对比,如图 6 所示。可以看出,双目系统测得的竖向位移的均值 \bar{d} 和振动幅度与激光位移计较接近,从而印证了 DIC 技术测量的准确性。

3 试验结果分析

3.1 位移与应变分布规律

通过双目系统可以得到膜面任意时刻任意测点

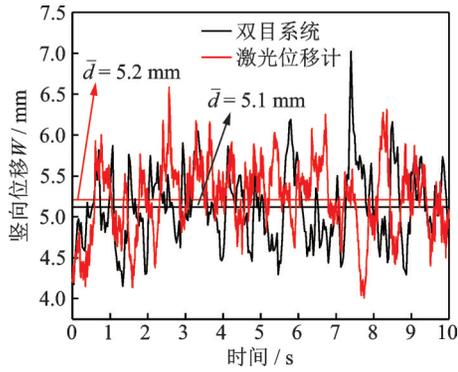


图6 同一测点不同仪器测量的位移历程

Fig. 6 Time history of displacements for the same measuring point measured by different instruments

任意方向的瞬时位移与应变。

图7为0°风向角、150 Pa内压、11 m/s风速下膜面的位移瞬时云图(u, v 和 w 分别表示相机系统坐标顺风向 X 、横风向 Y 、竖向 Z 位移)和最大主应

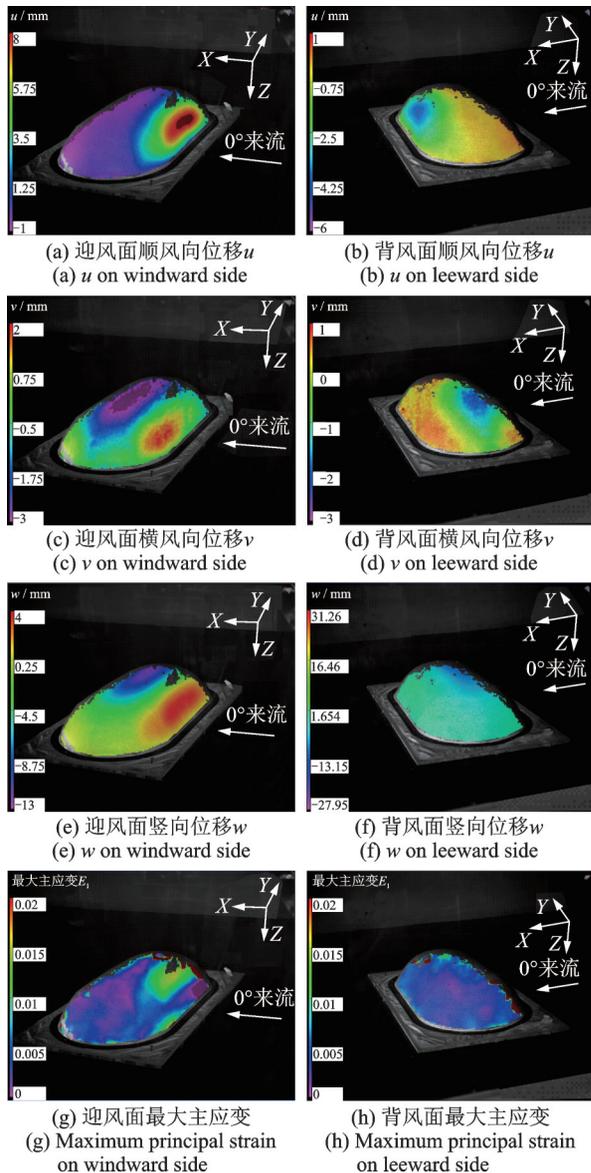


图7 位移与最大主应变瞬时云图

Fig. 7 The instantaneous cloud image of displacements and maximum principal strain

变瞬时云图。从图7中可以看出:顺风向和竖向位移的最大值出现在迎风面中心点与顶部中心点附近,最大主应变的最大值出现在迎风面2/3矢高处附近。

将膜面每一测点任意时刻三个方向的位移通过下式处理,可以得到膜面每一测点每一时刻的合位移 D :

$$D = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1)$$

对合位移 D 求均值 \bar{D} 并绘制等值线图,可得合位移均值分布图。图8为150 Pa内压、11 m/s风速条件下,0°,45°,90°风向角合位移分布云图。可以看出:1)0°风向角时合位移均值最大,90°风向角时合位移值最小;2)0°风向角下,最大合位移出现在迎风面与顶面中心点附近;3)45°风向角下,最大合位移出现在迎风面1/2矢高处与顶面中心点附近;4)90°风向角下,最大合位移出现在迎风半球面1/2矢高处附近。

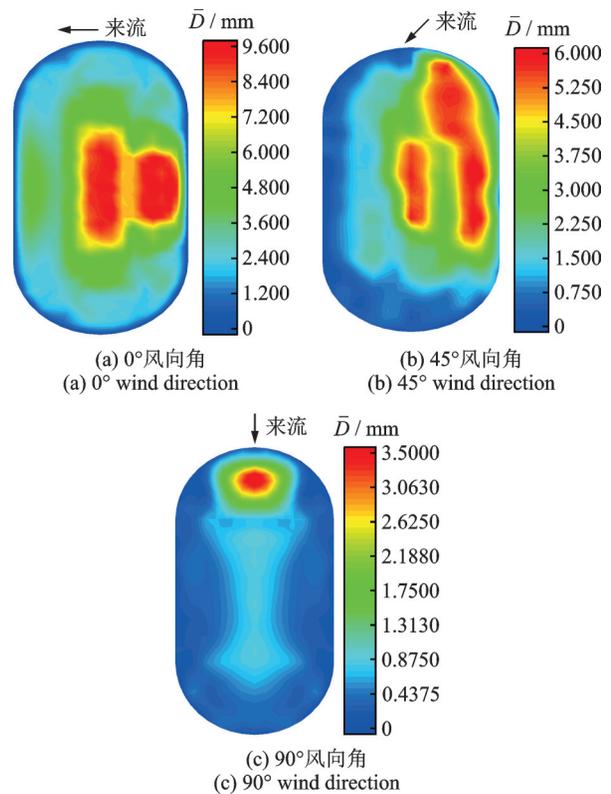


图8 合位移分布云图

Fig. 8 Cloud image of total displacements distribution

3.2 平均变形与振幅变化规律

沿气膜长轴、短轴方向中央轴线分别等间距取61个和31个测点做气膜沿长/短轴方向的外轮廓图。将轮廓尺寸及响应通过参数 $a=300$ mm, $b=60$ mm无量纲化处理,得到不同工况下结构在世界坐标系(顺风向 x ,横风向 y, z)平均变形轮廓图。图9为0°风向角时各工况下的平均变形轮廓图。可

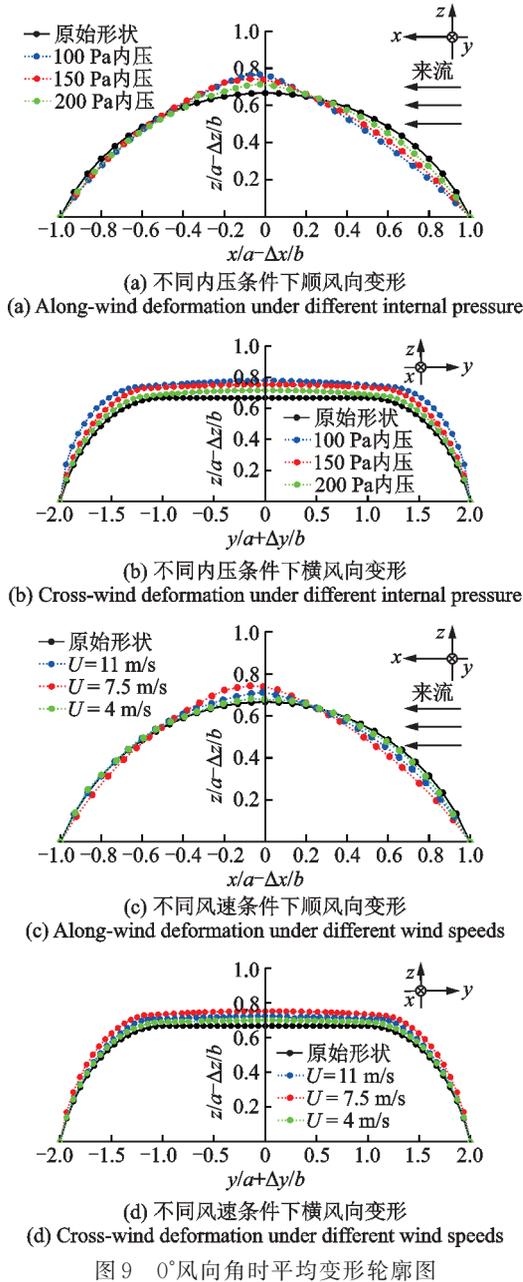


图 9 0°风向角时平均变形轮廓图

Fig. 9 Averaged deformation profiles of 0° wind direction

以看出: 总体而言, 结构平均变形呈迎风面凹陷, 顶部隆起, 横风向向外凸出的趋势, 且这种变形趋势随着内压减小和风速增大越来越明显。90°, 45°风向角时总体变形规律与 0°风向角类似。

图 10 为不同风向角条件下长轴与短轴的平均变形轮廓图。可以看出: 0°风向角时的平均变形 > 45°风向角时的平均变形 > 90°风向角时的平均变形。

图 11 为不同风向角条件下模型顶部中心点各向振幅(用位移均方根 σ 表示)随风速变化曲线。可以看出: 1) 整体而言, 0°, 45°风向角下, 竖向振幅 > 顺风向振幅 > 横风向振幅; 2) 90°风向角下, 横风向振幅明显大于其他两个方向, 说明结构振动受尾流旋涡脱落影响明显, 但数值远小于其他两个风向角。

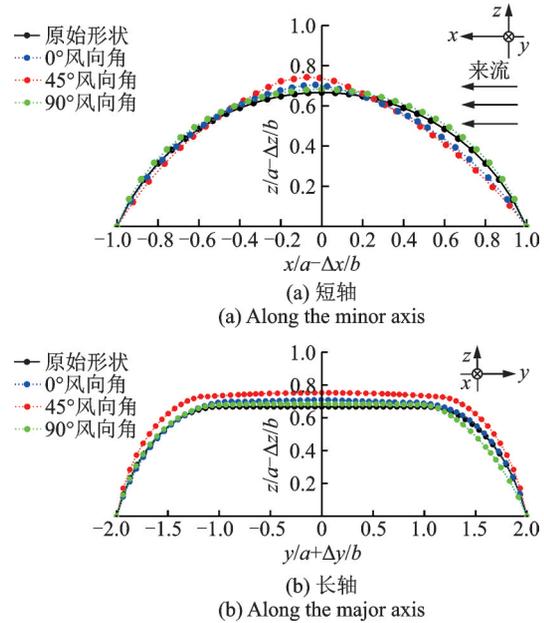


图 10 不同风向角时平均变形轮廓图

Fig. 10 Averaged deformation profiles of different wind directions

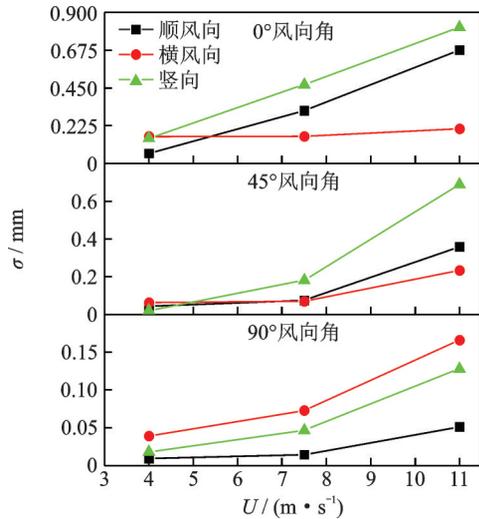


图 11 不同风向角下模型顶点三向振幅

Fig. 11 Three-direction vibration amplitudes for the model top points of different wind directions

3.3 内压变化规律

试验中发现: 随着风速的增大, 各工况下气膜结构的内压均有不同程度的减小。图 12 为内压随风速变化曲线。可以看出: 1) 风速越大, 内压减小越多, 最多减少到原内压的 60%; 2) 相同风向角下, 初始内压越大, 内压最终减小量就越大; 3) 相同初始内压条件下, 90°风向角时的内压减小量最小, 0°风向角时的内压减小量最大。内压减小与膜面变形有关。风荷载作用下, 膜面受风吸力影响有向外膨胀的趋势, 使气膜内部空间增大, 造成内压减小, 说明强风来临前, 需要对气膜结构进行适当补压以维持结构刚度。

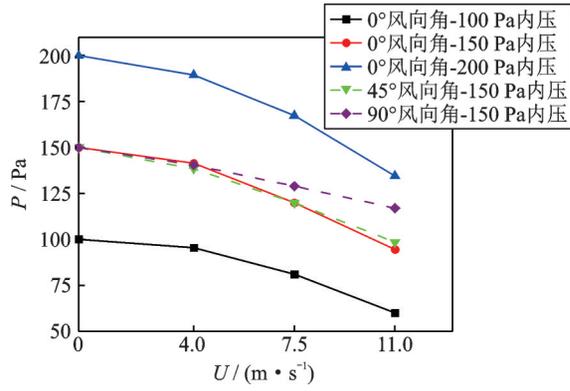


图12 内压随风速变化

Fig. 12 Change of internal pressure with wind speeds

3.4 功率谱分析及模态识别

通过有限元软件对100 Pa内压的胶囊形气膜模型进行模态分析,得到模型前2阶模态如图13所示。可以看出,模型1阶模态是围绕胶囊形气膜短轴方向前后振动,2阶模态是膜面上下振动。

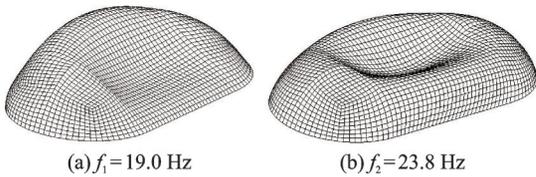
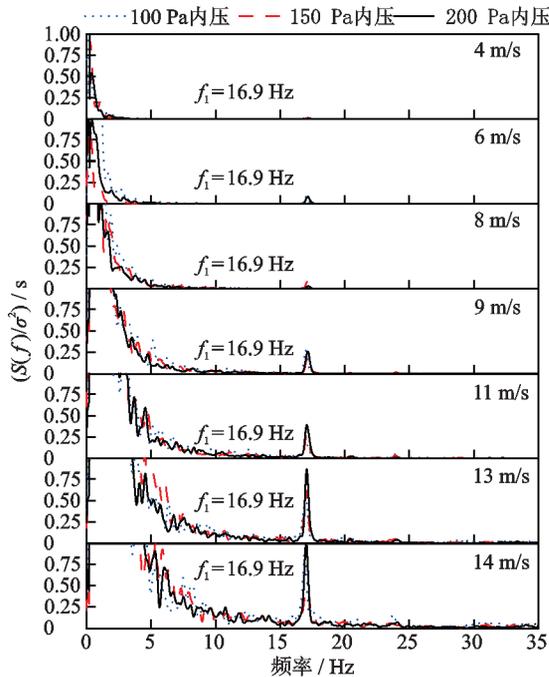


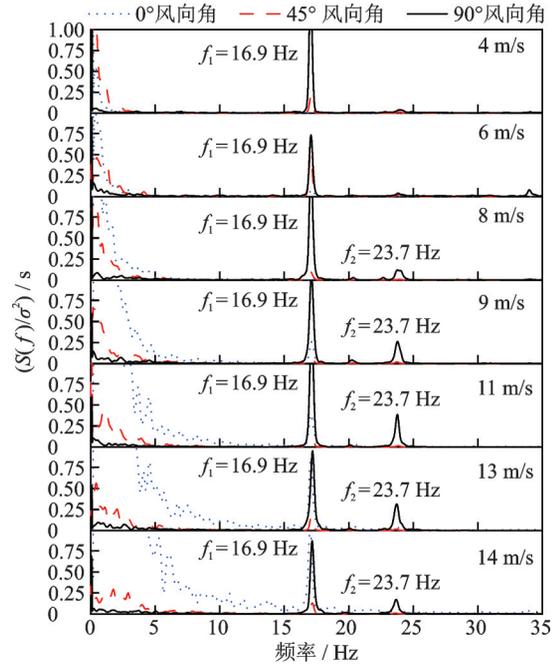
图13 模型前2阶模态

Fig. 13 The first two modes for model

图14为各风速各工况下模型顶部激光位移计测点位移时程的功率谱密度。其中 $S(f)$ 代表位移的功率谱密度(PSD)。从图14中能够看出:1)0°风向角下,结构主要以1阶模态振动为主,随着风速的增大,1阶模态的能量越来越大;2)90°风向角下,随着



(a) 0°风向角,不同内压下
(a) Different internal pressures at 0° wind direction



(b) 不同风向角下
(b) Different wind directions

图14 不同风速下位移功率谱密度

Fig. 14 PSD of displacement for different wind speeds

风速的增大,结构由1阶模态振动转为1阶模态和2阶模态叠加的振动。结合图10横风向振幅大于其他两个风向角的结论可知:90°风向角下,来流与结构长轴方向平行,在结构背风面球形区尾部会形成明显的卡门涡街,对结构响应特征有一定的影响。

结合图13,14可以看出:气弹模型的1阶模态频率为16.9 Hz,振型为沿膜面上下振动;2阶模态频率值为23.7 Hz,振型为沿气弹模型短轴方向前后振动。

4 风振系数研究

4.1 响应风振系数

对于气承式膜结构而言,结构响应与荷载之间呈非线性关系,需要通过定义响应风振系数与内力风振系数来评估结构的动力响应^[19]。膜面任意一点*i*的位移风振系数 β_{di} 与应力风振系数 β_{si} 可表示为:

$$\beta_{di} = 1 + g \frac{\sigma_{U_{wi}}}{|U_{wi}|} \quad (2)$$

$$\beta_{si} = 1 + g \frac{\sigma_{S_{wi}}}{|S_{wi}|} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{U_{wi}}$ 与 U_{wi} 分别表示节点*i*的位移均方根与均值; $\sigma_{S_{wi}}$ 与 S_{wi} 分别表示节点*i*的应力均方根与均值,本文中 $\sigma_{S_{wi}}$ 与 S_{wi} 通过点*i*的最大主应变的均方根与均值代替; g 表示峰值因子,按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[20],取 $g=2.5$ 。

通过引入分区风振系数 β 对计算过程进行简化,表达式如下:

$$\beta = \frac{\sum \beta_i A_i}{A} \quad (4)$$

式中 β_i 为测点 i 的风振系数; A_i 为节点 i 分配到的所属面积; A 为分区总面积。

分区方式如图 15 所示。图中, B 表示跨度, L 表示长度。在模型的半柱面部分分为 3 个区, 两侧截球面部分分为 8 个区。

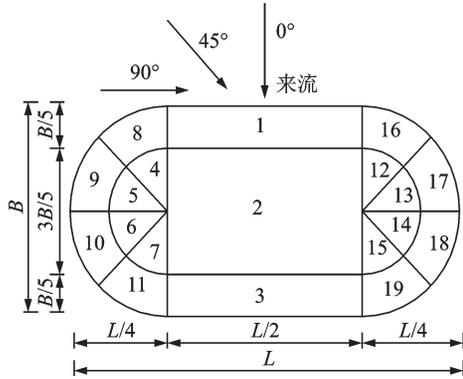


图 15 分区方式

Fig. 15 Partition method

图 16 为 0° 风向角不同内压条件下模型顶部中心点 P1 与迎风面中心点 P2 (如图 2 所示) 的合位移、最大主应力风振系数随风速的变化。可以看出: 达到一定风速后, 内压和风速变化对响应风振系数的影响不大, 所以本文取 11 m/s 风速、 150 Pa 内压条件下的响应风振系数作为设计参考。

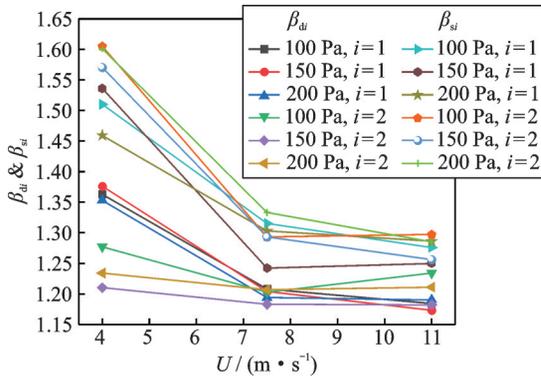


图 16 测点 P1, P2 响应风振系数

Fig. 16 Response-based wind-induced vibration coefficient of measuring point P1 and P2

4.2 响应风振系数计算结果

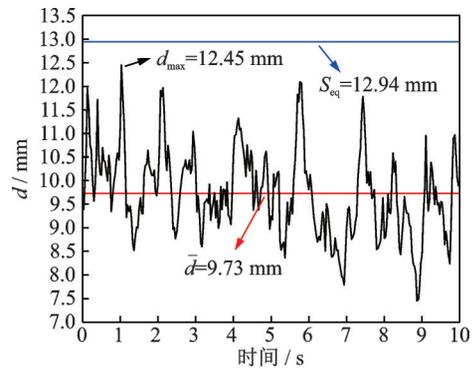
表 3 为胶囊形气膜结构分区风振系数表, 结合图 6~10 可知: 1) 总体而言, 在位移响应大的工况下, 位移风振系数较小; 位移响应小的工况下, 位移风振系数较大。2) 0° 与 45° 风向角的合位移分区风振系数基本在 $1.2 \sim 1.6$; 90° 风向角的合位移分区风振系数基本在 $1.3 \sim 1.8$ 之间。3) 各工况下, 应力风振系数沿膜面分布都比较均匀且变化不大, 数值在 $1.2 \sim 1.4$ 之间。

表 3 分区风振系数建议值

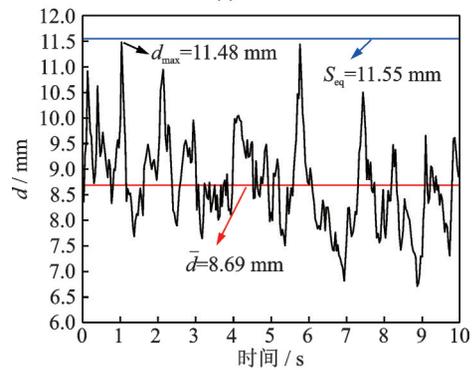
Tab. 3 Recommendation values of partition wind-induced vibration coefficient

分区	0° 风向角		45° 风向角		90° 风向角	
	位移风振系数	应力风振系数	位移风振系数	应力风振系数	位移风振系数	应力风振系数
1	1.33	1.39	1.28	1.29	1.63	1.31
2	1.33	1.35	1.31	1.40	1.40	1.36
3	1.27	1.28	1.43	1.25	1.63	1.31
4	1.25	1.26	1.24	1.40	1.36	1.28
5	1.25	1.26	1.30	1.35	1.34	1.30
6	1.25	1.28	1.32	1.25	1.34	1.30
7	1.30	1.28	1.29	1.23	1.36	1.28
8	1.43	1.30	1.25	1.21	1.30	1.23
9	1.30	1.35	1.30	1.21	1.73	1.29
10	1.27	1.20	1.55	1.21	1.73	1.29
11	1.27	1.23	1.45	1.23	1.30	1.23
12	1.25	1.26	1.29	1.23	1.45	1.34
13	1.25	1.26	1.36	1.25	1.44	1.40
14	1.25	1.28	1.40	1.29	1.44	1.40
15	1.30	1.28	1.36	1.40	1.45	1.34
16	1.43	1.30	1.38	1.25	1.55	1.28
17	1.30	1.35	1.55	1.23	1.30	1.30
18	1.27	1.20	1.48	1.34	1.30	1.30
19	1.27	1.23	1.45	1.30	1.55	1.28

以 0° 风向角时模型分区 1、分区 2、分区 3 三个分区的中心点为例, 验证本文风振系数的合理性。如图 17 所示, 三个分区的位移风振系数分别采用 $1.33, 1.33$ 和 1.25 , 将风振系数乘以三个分区中心点



(a) 分区 1
(a) Partition 1



(b) 分区 2
(b) Partition 2

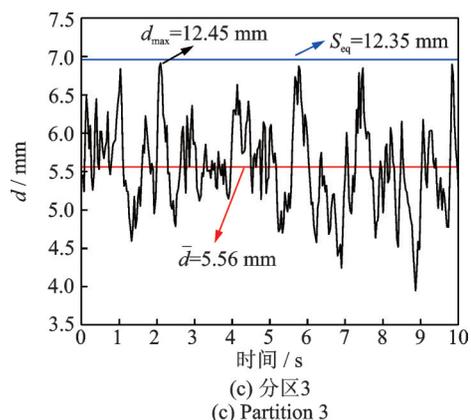


图 17 风振系数验证

Fig. 17 Verification of the wind-induced vibration coefficient

位移时程的均值 \bar{d} 得到的等效位移 S_{eq} , 均包络了极值位移响应 d_{max} , 说明本文风振系数是合理的。

5 结 论

本文针对 1/3 矢跨比胶囊形气膜结构开展了气弹模型风洞试验, 研究了结构的风致气弹响应变化规律, 并给出了可供设计参考的风振系数, 主要结论如下:

(1) 总体而言, 结构平均变形呈迎风面凹陷, 顶部隆起, 横风向向外凸出的趋势, 且这种变形趋势随着内压减小和风速增大越来越明显。

(2) 0° 风向角时平均变形最大, 45° 风向角时次之, 90° 风向角时最小。 0° 风向角下, 合位移均值的最大值出现在迎风面与顶面中心点附近; 45° 风向角下, 合位移均值的最大值出现在迎风面 1/2 矢高处与顶面中心点附近; 90° 风向角下, 合位移均值的最大值出现在迎风半球面 1/2 矢高处附近。

(3) $0^\circ, 45^\circ$ 风向角下, 顶点竖向振幅 $>$ 顺风向振幅 $>$ 横风向振幅; 90° 风向角下, 横风向振幅明显大于其他两方向, 说明结构振动受尾流旋涡脱落影响明显。

(4) 各工况下气膜结构的内压均有不同程度的减小, 与膜面变形有关。风荷载作用下, 膜面受风吸力影响有向外膨胀的趋势, 使气膜内部空间增大, 造成内压减小, 说明强风来临时补压是很有必要的。

(5) 0° 风向角下, 结构以 1 阶模态振动为主, 随着风速的增大, 1 阶模态的能量越来越大; 90° 风向角下, 随着风速的增大, 结构由 1 阶模态振动转为 1 阶模态和 2 阶模态叠加的振动。

(6) 位移响应大的工况下, 位移风振系数较小, 位移响应小的工况下, 位移风振系数较大; 0° 与 45° 风向角的位移风振系数在 1.2~1.6 之间, 90° 风向角的位移风振系数在 1.3~1.8 之间; 应力风振系

数沿膜面分布均比较均匀且变化不大, 在 1.2~1.4 之间。

后续我们将围绕气膜结构, 进行流固耦合数值模拟, 并结合非线性动力时程分析, 对流固耦合效应及流固耦合机理进行深入研究。

参考文献:

- [1] Kawamura S, Kiuchi T. An experimental study of a one-membrane type pneumatic structure-wind load and response[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 23: 127-140.
- [2] Srivastava N K, Turkkan N. Experimental determination of wind pressure distribution for cylindrical and spherical flexible membrane structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(1): 23-31.
- [3] Bown A, Makin T, Wakefield D. Beyond static analysis: investigation of membrane structure performance using time stepping, transient and progressive analyses [J]. Procedia Engineering, 2016, 155: 313-322.
- [4] Kassem M, Novak M. Wind-induced response of hemispherical air-supported structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1-3): 177-178.
- [5] Sygulski R. Dynamic stability of pneumatic structures in wind: theory and experiment[J]. Journal of Fluids and Structures, 1996, 10(8): 945-963.
- [6] Wood J N, Breuer M, De Nayer G. 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.
- [7] De Nayer G, Apostolatos A, Wood J N, et al. Numerical studies on the instantaneous fluid-structure interaction of an air-inflated flexible membrane in turbulent flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 82: 577-609.
- [8] He Y L, Shen J H. The wind response of double layer membrane gas holders when considering the effect of FSI[J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2017, 58(2): 125-135.
- [9] 申跃奎, 赵德顺, 王秦. 考虑流固耦合作用的充气膜结构风压分布研究[J]. 计算力学学报, 2017, 34(5): 665-671.
SHEN Yuekui, ZHAO Deshun, WANG Qin. On wind pressure coefficient distribution of air-supported structures considering fluid-structure coupling[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(5): 665-671.
- [10] Li T, Yang Q S, Ishihara T. Unsteady aerodynamic characteristics of long-span roofs under forced excitation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 181: 46-60.
- [11] 沈珊珊, 龚景海, 孟文清. 充气膜结构泄气过程的摄影

- 测量实用方法[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(1): 11-13.
- SHEN Shanshan, GONG Jinghai, MENG Wenqing. Practical method of photogrammetry in the deflation process of inflatable membrane structure[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(1): 11-13.
- [12] Zhao B, Hu J H, Chen W J, et al. Computational method for in-situ finite element modeling of inflatable membrane structures based on geometrical shape measurement using photogrammetry[J]. Computers and Structures, 2019, 224: 106105.
- [13] 中国工程建设标准化协会. 膜结构技术规程: CECS 158—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for membrane structures: CECS 158—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [14] Tryggvason B V. Aeroelastic modeling of pneumatic and tensioned fabric structures[C]//Proceeding of the 5th International Conference on Wind Engineering. USA: Pergamon Press, 1980, 2: 1061-1072.
- [15] Matsumoto T. Aeroelastic modelling of air-supported roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 42(1-3): 1497-1507.
- [16] 李天娥, 孙晓颖, 武岳, 等. 软式平流层飞艇气弹模型相似参数分析[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 240-246.
- LI Tiane, SUN Xiaoying, WU Yue, et al. Similarity parameter analysis of aeroelastic model for non-rigid stratospheric airship[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 240-246.
- [17] Cheng C M, Fu C L. Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6-7): 328-344.
- [18] San B B, Yang Q S, Yin L W. Stochastic and sensitivity analysis of shape error of inflatable antenna reflectors[J]. Acta Astronautica, 2017, 132: 170-176.
- [19] 陈波, 武岳, 沈世钊. 张拉式膜结构抗风设计[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 65-71.
- Chen Bo, Wu Yue, Shen Shizhao. Wind-resistant design of tensile membrane structures[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 65-71.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

Wind-induced aero-elastic response and vibration coefficients of capsule inflatable membrane structure

CHEN Zhao-qing^{1,2}, SONG Peng-fei^{1,2}, YAN Ke-ye³, WU Yue³, SU Ning⁴, ZENG Cong^{1,2}

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2.Key Lab of Electric Power Infrastructure Safety Assessment and Disaster Prevention of Jilin Province, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3.Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

4.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Aero-elastic model wind tunnel test is carried out for a 1/3 rise-span ratio capsule-shaped pneumatic membrane structure, the characteristics of the wind-induced aero-elastic response of the structure are studied and the wind-induced dynamic vibration coefficients for practical design reference are given. The research confirms that the averaged deformation of the structure shows a trend of windward depression, top uplift and outward bulge in the transverse direction. This deformation trend is increasingly obvious with the decrement of internal pressure and the increment of wind speed. The averaged deformation and vibration amplitude decrease when the wind direction ranges from 0° up to 45°, then to 90°, and the extreme value of structural mean total displacements tends to appear at the center points of windward surface and top surface. Under 0° and 45° wind directions, the sort of vibration amplitudes of different components is vertical component, along-wind component and cross-wind component in descending order. Moreover, the structural vibration is dominated by the first-order mode. Under 90° wind direction, the amplitude of the cross-wind direction is greater than two other directions, and the wind-induced vibration is dominated by the superposition of the first and second order modes. The internal pressure of the structure decreases in different extents under all cases. The response-based wind-induced dynamic vibration coefficients considering the fluid-structure interaction effect are given.

Key words: wind-induced aero-elastic response; capsule inflatable membrane; aero-elastic model; wind tunnel test; response-based wind-induced vibration coefficient

作者简介: 陈昭庆(1980—),男,博士,副教授。E-mail:chenzhq2004@163.com。

通讯作者: 苏宁(1990—),男,博士,副研究员。E-mail:souvenire@126.com。