

# 以动力稳定为目标的空间结构等效静力风荷载

黄友钦<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. 广州大学- 淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 采用基于位移或内力响应等效的等效静力风荷载进行大跨空间结构的稳定分析并不十分合理. 以动力稳定为目标的等效静力风荷载将使大跨空间结构的设计能够满足稳定性设计的要求. 提出大跨空间结构以动力稳定为目标的等效静力风荷载的概念和初步方法, 并应用于单层柱面网壳的稳定性分析. 通过风洞试验获得柱面网壳表面的非定常气动力, 利用 Budiansky-Roth 准则分析该网壳的动力稳定性, 得到以动力稳定为目标的等效静力风荷载. 通过对比以动力稳定为目标和基于位移等效的等效静力风荷载下的稳定性分析结果, 表明大跨空间结构进行稳定性分析时有必要采用以动力稳定为目标的等效静力风荷载来考虑风荷载作用.

**关键词:** 空间结构; 以动力稳定为目标; 等效静力风荷载; 风洞试验; Budiansky-Roth 准则

中图分类号: TU 391

文献标识码: A

## Dynami e-instability-based Equivalent Static Wind Loads on Spatial Structures

HUANG Youqin<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. Guangzhou University-Tamkang University Joint Research Center for Engineering Structure Disaster Prevention and Control, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The paper presents the concept of dynamic-instability-based equivalent static wind loads and the elementary method to obtain them and then the method is applied to studying the stability of a single-layer reticulated cylindrical shell. The unsteady aerodynamic forces on the shell are obtained from the wind tunnel test, the dynamic instability of the shell are investigated by the Budiansky-Roth criterion, and then the dynamic-instability-based equivalent static wind loads on the shell are gained. Comparison of stability of the shell under two kinds of equivalent static wind loads, the

dynamic-instability-based and the displacement-based, shows that it's necessary to adopt the dynamic-instability-based equivalent static wind loads to consider the wind actions in the stability analysis of large-span spatial structures.

**Key words:** spatial structures; dynamic-instability-based; equivalent static wind loads; wind tunnel test; Budiansky-Roth criterion

设计大跨空间结构时, 一般需要进行稳定性分析. 风荷载是结构分析考虑的一种重要荷载, 一般通过风洞试验和理论分析得到的等效静力风荷载来考虑其作用<sup>[1]</sup>. 但是, 该等效静力风荷载基于位移或内力响应等效得到<sup>[2]</sup>, 因此用该等效静力风荷载进行响应分析得到的结果比较可靠, 而通过此等效静力风荷载进行稳定性分析来得到失稳临界荷载并不科学. 如果可以进一步得到以动力稳定为目标的等效静力风荷载并用于稳定性分析, 将使大跨空间结构的设计满足稳定性设计的要求.

本文提出以动力稳定为目标的等效静力风荷载的概念并用于单层柱面网壳的稳定性设计. 将动力稳定性研究中用于判定非保守系统动力稳定状态的 Budiansky-Roth 准则<sup>[3]</sup> (简称为 B-R 准则) 应用于判定大跨空间结构在非定常风荷载下的动力稳定性. 通过对已有文献中经典算例的分析来验证本文用于非线性动力响应分析的计算程序. 动力响应分析中的非定常气动力通过刚体模型风洞试验获得. 通过进行以动力稳定为目标和基于位移等效的两种等效静力风荷载下的静力稳定性分析, 来表明大跨空间结构稳定性分析中采用以动力稳定为目标的等效静力风荷载的必要性.

收稿日期: 2010-01-20

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划(2006BAJ06B05); 科技部国家重点实验室基础研究(SLDRCE08-A-03)

第一作者: 黄友钦(1982-), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构的动力稳定性. E-mail: yqhuang.dennis@gmail.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

# 1 理论方法

## 1.1 B-R 准则

Budiansky 和 Roth 于 1962 年在文献[3]中提出用于判定结构系统动力稳定性的 B-R 准则, 即对结构进行非线性动力响应分析, 把荷载微小变化导致结构位移响应突然增加时的荷载定义为动力失稳临界荷载. 该准则不仅适用于保守系统, 也适用于非保守系统, 并且简明直观, 得到了该领域学者的广泛认可<sup>[4-5]</sup>.

将作用于结构系统的动力荷载表示为

$$F(x, t) = fF_0(x, t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

式中:  $F_0(x, t)$  为作用于结构上的初始动力荷载, 为位置矢量  $x$  和时间  $t$  的函数; 标量参数  $f$  称为荷载增大系数. 这里, 将结构系统发生动力失稳时对应的临界荷载增大系数称为荷载增大系数临界值  $f_d$ .

用  $R(f, t)$  表示结构在动力荷载  $F(x, t)$  下的某一响应量(比如应力、变形等), 并进一步定义

$$R_{\max}(f, T) = \max_{0 \leq t \leq T} [R(f, t)] \quad (2)$$

其中,  $T$  为  $t$  的最大值.

图 1a 是典型的  $R_{\max}(f, T)$  随  $f$  的变化曲线. 在纵坐标  $f$  上有一狭窄区域, 在此区域内  $R_{\max}$  突然增大, 将该范围中部的  $f$  值定义为表征动力失稳的荷载增大系数临界值  $f_d$ .

$R_{\max}(f, T)$  随  $f$  的变化还可能存在其他两种情况: ①当  $T$  很大时,  $R_{\max}(f, \infty)$  可能为  $f$  的不连续函数(图 1b), 此时  $f_d$  与  $T$  无关(这种不连续函数在  $T$  为有限值时一般不可能出现); ②对于一些理想结构,  $R_{\max}(f, \infty)$  在  $f > f_d$  时可能为无穷大(图 1c). 这两种情况定义的  $f_d$  虽然具有一定的数学意义, 但  $R_{\max}(f, \infty)$  成为  $f$  的不连续函数的条件一般很难满足.

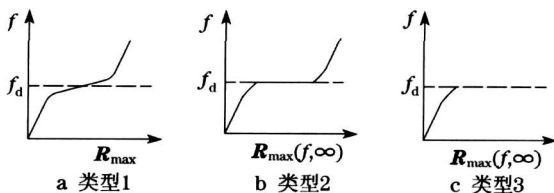


图 1 动力失稳临界值  $f_d$  的估计

Fig. 1 Estimation of the critical dynamic instability parameter  $f_d$

实际工程结构发生动力失稳时  $R_{\max}$  与  $f$  的关系一般如图 1a 所示. 应用 B-R 准则来判定风荷载下单

层网壳结构的动力稳定性时, 可按照图 1a 的方法取  $R_{\max}$  突然增加的狭窄区域的中部作为荷载增大系数临界值  $f_d$ . 工程应用中为保守取值, 将按图 1a 得到的数值除以安全系数 1.2 作为最终的  $f_d$  值.

## 1.2 以动力稳定为目标的等效静力风荷载方法

在等效静力风荷载的研究中, Davenport 于 1967 年提出的阵风荷载因子法<sup>[6-7]</sup> 简单可行, 在大跨空间结构中得到了广泛应用. 本文参考阵风荷载因子法的概念来获得以动力稳定为目标的等效静力风荷载. 以动力稳定因子  $\varphi_d$  来表征动力作用对动力稳定性分析的影响. 作用在结构上以动力稳定为目标的等效静力风荷载可表示为

$$\hat{p} = \varphi_d \bar{p} \quad (3)$$

式中,  $\bar{p}$  为作用于结构的平均风荷载. 动力稳定因子  $\varphi_d$  由下式确定:

$$\varphi_d = f_s / f_d \quad (4)$$

式中,  $f_s$  和  $f_d$  分别表示静力稳定性和动力稳定性分析得到的荷载增大系数失稳临界值.

# 2 动力稳定性分析及验证

根据风洞试验得到的结构表面风压数据构造非定常气动力, 然后利用 B-R 准则进行风荷载下单层柱面网壳的动力稳定性分析. 通过荷载增大系数  $f$  来增加非定常气动力, 同时考虑几何和材料非线性, 对单层网壳结构在非定常气动力和重力作用下进行非线性动力分析, 得到不同风向角下最大位移响应随荷载增大系数  $f$  的变化曲线, 再根据 B-R 准则确定工程上适用的荷载增大系数临界值  $f_d$ .

结构的非线性振动平衡方程可写为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F_d + F_w(t) = P_t \quad (5)$$

式中:  $M$  为质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为非线性刚度矩阵;  $U, \dot{U}, \ddot{U}$  分别为位移、速度、加速度矢量;  $F_d$  为恒载矢量, 即结构自重;  $F_w$  为动力荷载矢量, 这里指风荷载矢量;  $P_t$  为总外荷载矢量.

采用瑞利阻尼模型来考虑结构的阻尼<sup>[8]</sup>. 假设结构质量在振动过程中保持不变, 则单元的增量平衡方程可写成

$$(K_l + K_{nl})U = P_{t+\Delta t} - M\ddot{U}_{t+\Delta t} - C\dot{U}_{t+\Delta t} \quad (6)$$

式中:  $K_l$  为线性应变增量刚度矩阵;  $K_{nl}$  为非线性应变增量刚度矩阵.

采用 Newmark 时间积分法和 Newton-Raphson 迭代方法求解非线性动力平衡方程<sup>[9]</sup>, 得到结构的

位移响应历程. 非线性动力分析的步骤如图 2 所示.

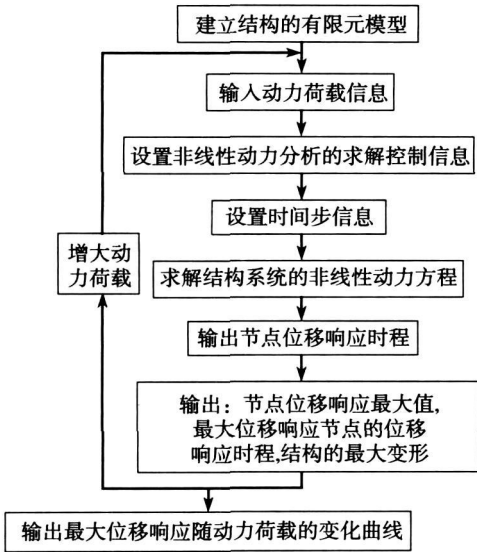


图 2 非线性动力分析的计算步骤

Fig. 2 Steps for nonlinear dynamic analysis

利用本文计算程序分析文献[3]的算例, 来验证本文计算程序的正确性. 文献[3]基于非线性理论, 通过伽辽金方法求解一浅球壳(图 3)在阶跃压力荷载(图 4)下的位移响应, 并根据 B-R 准则得到该球壳的动力失稳临界荷载为  $p_{cr} = 0.52$ . 以量纲一参数来表示计算参数(表 1), 分别取量纲一的荷载持续时间和结构几何尺寸参数为  $\tau = 5$  和  $\lambda = 5$ . 浅球壳的竖向位移用  $\Delta$  来表示:  $\Delta = w_{ave} / z_{0,ave}$ , 即为结构的平均竖向位移与结构的平均初始高度的比值.

表 1 文献[3]中用到的量纲一参数

Tab. 1 Dimensionless parameters in Ref [3]

几何参数	压力参数	时间参数
$\lambda = \frac{2\sqrt{3}(1-\nu^2)}{J^{1/4}} \left( \frac{H}{h} \right)^{1/2}$	$p = \frac{q}{q_0}, q_0 = \frac{2E}{[3(1-\nu^2)J]^{1/2}} \left( \frac{h}{R} \right)^2$	$\tau = \frac{ct}{R}, c = \sqrt{E/\rho}$

注:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\rho$  为材料密度;  $q$  为作用于结构上的阶跃压力荷载;  $t$  为荷载作用时间; 参考压力  $q_0$  是完整球壳基于经典小变形理论的屈曲压力;  $H, h$  和  $R$  分别为结构几何尺寸, 参见本文图 3.

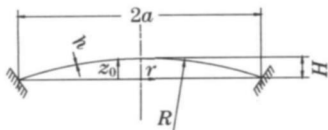


图 3 浅球壳几何参数

Fig. 3 Geometrical parameters of the shallow spherical shell

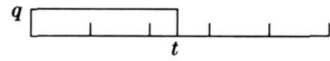


图 4 输入计算的阶跃荷载

Fig. 4 Rectangular pressure history

将本文计算程序得到的结构竖向位移最大值  $\Delta_{max}$  随压力参数  $p$  的变化曲线与文献[3]的结果进行对比(图 5). 可以看出: 两条曲线的趋势基本一致, 并且在发生动力失稳前( $p < 0.52$ ) 两者的结果十分接近; 本程序得到的动力失稳临界荷载为  $p_{cr} = 0.55$ , 与文献[3]的结果  $p_{cr} = 0.52$  仅相差 5%. 因此, 采用本文计算程序进行动力稳定性分析是可靠的.

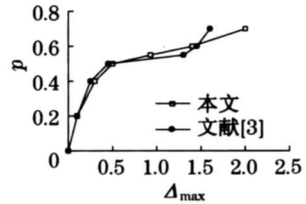


图 5 结构竖向位移最大值随荷载的变化曲线

Fig. 5 Variation of  $\Delta_{max}$  with  $p$

### 3 应用

#### 3.1 模型风洞试验及非定常气动力构造

用于分析的单层网壳结构为一单层柱面网壳. 该柱面网壳为纵向边缘落地支承, 弧向跨度为 25 m, 纵向跨度为 35 m, 高度为 9.7 m. 采用单向斜杆正交正放网格, 网格尺寸为 2.0~3.0 m, 相邻杆件间的夹角大于  $30^\circ$ (图 6). 杆件为无缝钢管, 钢管外径为 0.219 m, 壁厚为 0.006 m, 杆件长细比小于 150, 杆件用钢量为  $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . 在永久荷载和可变荷载作用下最大位移为 0.05 m, 小于弧向跨度的  $1/400$  ( $= 0.063 \text{ m}$ ), 满足规范要求<sup>[10-12]</sup>.

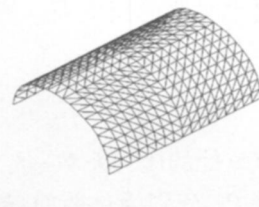


图 6 用于分析的单层柱面网壳

Fig. 6 Reticulated cylindrical shell

通过刚体模型测压风洞试验获取柱面网壳表面的风压时程. 这里初步假设空间结构的振动不影响结构表面的风压. 该试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 T-J-2 风洞中完成. 刚体模型(图 7)与实物在外形上保持几何相似, 几何缩尺比为 1:37.5, 模型表面布置足够的测压孔, 以测量结构表面的风压. 风洞中模拟了该结构所处的 B 类风场<sup>[13]</sup>. 该结构位于强台风区, 50 年重现期的基本风压为 0.80 kPa, 基本风速为  $35.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 测压试验的参考点风速为  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 测压信号采样频率约为 312.5 Hz, 每个测点采样样本总长度为 18 000 个数据.

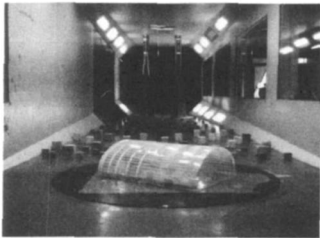


图 7 风洞试验中的柱面网壳刚体模型

Fig. 7 Rigid model of the shell in the wind tunnel test

定义来流风沿柱面网壳纵轴方向吹向该网壳时的风向角为  $0^\circ$ , 按顺时针方向增加(图 8). 根据对称性, 仅进行  $90^\circ \sim 180^\circ$  共 7 个风向角下的风洞试验(风向角间隔为  $15^\circ$ ).

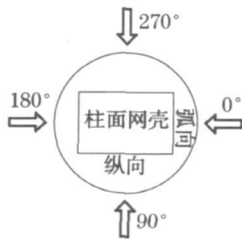


图 8 柱面网壳的方位及风向角

Fig. 8 Definition of angles of wind direction

结构表面的压力通常用量纲一压力系数  $C_{pi}$  表示为

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (7)$$

式中:  $C_{pi}$  为测点  $i$  处的压力系数;  $P_i$  为作用在测点处的压力;  $P_0$  和  $P_\infty$  分别为试验时参考高度处的总压和静压.

紊流场中的风压是个随机变量, 对所记录的数据进行概率统计分析, 获得各测点上所有风向角以

梯度风压为参考风压的平均风压系数和脉动风压系数(图 9). 为了使风压系数分布图不在近地位置发生变形, 在绘制风压系数分布图时将结构表面按图 8 的方位展开成平面. 从平均和脉动风压系数分布图可以看出: 风向角从  $90^\circ$  到  $135^\circ$  时, 网壳表面的平均风压系数总体上逐渐增大; 风向角从  $135^\circ$  到  $180^\circ$  时, 网壳表面的平均风压系数总体上逐渐减小; 脉动风压系数随风向角的变化类似平均风压系数.

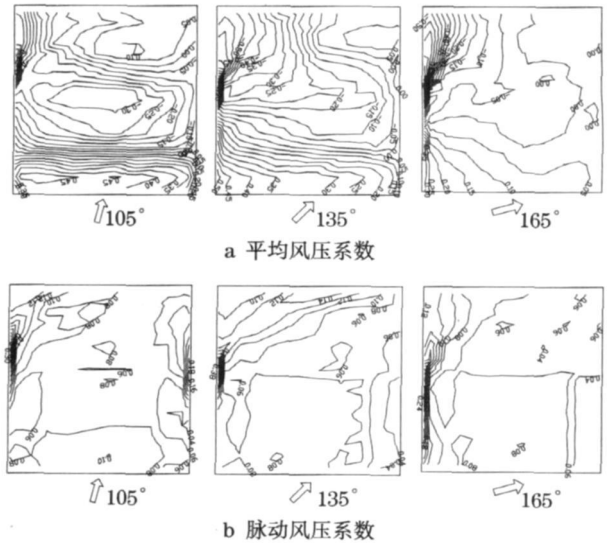


图 9 风向角分别为  $105^\circ, 135^\circ$  和  $165^\circ$  时柱面网壳表面的平均和脉动风压系数分布图

Fig. 9 Distribution of coefficients of average and fluctuating wind pressure

根据刚体模型风洞试验得到的结构表面风压数据来构造非定常气动力, 并将其作用于有限元模型进行非线性动力分析. 刚性模型表面第  $i$  个测压点上  $t_j$  时刻以梯度风压为参考风压的压力系数为  $C_{p,ji}$ , 则作用于实际网壳结构表面的非定常气动力为

$$p_{ji} = \frac{1}{2} \rho_a U_T^2 C_{p,ji} A_i \quad (8)$$

式中:  $\rho_a$  为空气密度;  $U_T$  为梯度风速;  $A_i$  为测压点的附属面积.

根据相似定律可知

$$(nL/V)_m = (nL/V)_p \quad (9)$$

式中:  $n$  为风场频率;  $L$  为几何尺寸;  $V$  为风速; 下标  $m$  表示模型,  $p$  表示实际结构.

从而可得

$$n_p / n_m = (L_m / L_p) / (V_m / V_p) \quad (10)$$

然后, 根据  $n = 1 / \Delta t$  ( $\Delta t$  为风压数据间隔时间) 得到

$$\Delta t_p / \Delta t_m = (V_m / V_p) / (L_m / L_p) \quad (11)$$

由此就得到了实际风场中的非定常气动力离散数据序列, 即非定常气动力大小为  $p_{ji}$ , 时间间隔为  $\Delta t_p$ . 通过荷载增大系数  $f$  不断增加作用于网壳结构表面的非定常气动力, 即作用于实际网壳结构上的非定常气动力为  $f p_{ji}$ .

### 3.2 计算模型及计算参数

用空间梁单元来模拟网壳结构的杆件, 节点连接为刚接, 支承为刚性支承, 约束全部自由度. 初始几何缺陷按平均风荷载和重力荷载作用下的最低阶屈曲模态分布, 缺陷最大值取为网壳跨度的  $1/300^{[14]}$ .

材料参数: 弹性模量常数为 200 GPa; 材料密度为  $7850 \times 1.2 = 9420 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 即通过将杆件密度提高 20% 来考虑节点自重; 材料泊松比取 0.3; 采用

双线性随动强化塑性模型, 屈服强度为 235 MPa, 屈服后的切线模量为 1.18 GPa. 瑞利阻尼模型中的常数取值为  $c_0 = 0.112$  和  $c_1 = 0.0008$ .

### 3.3 动力稳定性分析结果

用网壳上所有节点在整个计算时间内的位移最大值  $w_{\max}$  来表征位移响应

$$w_{\max} = \max\{\max(w, \Gamma), \text{所有节点}\} \quad (12)$$

其中,  $\Gamma$  为总计算时间.

对单层网壳结构在非定常气动力和重力作用下进行非线性动力分析, 得到不同风向角下最大位移响应  $w_{\max}$  随荷载增大系数  $f$  的变化曲线(图 10), 并根据 B-R 准则得到工程上适用的荷载增大系数临界值  $f_d$ (表 2).

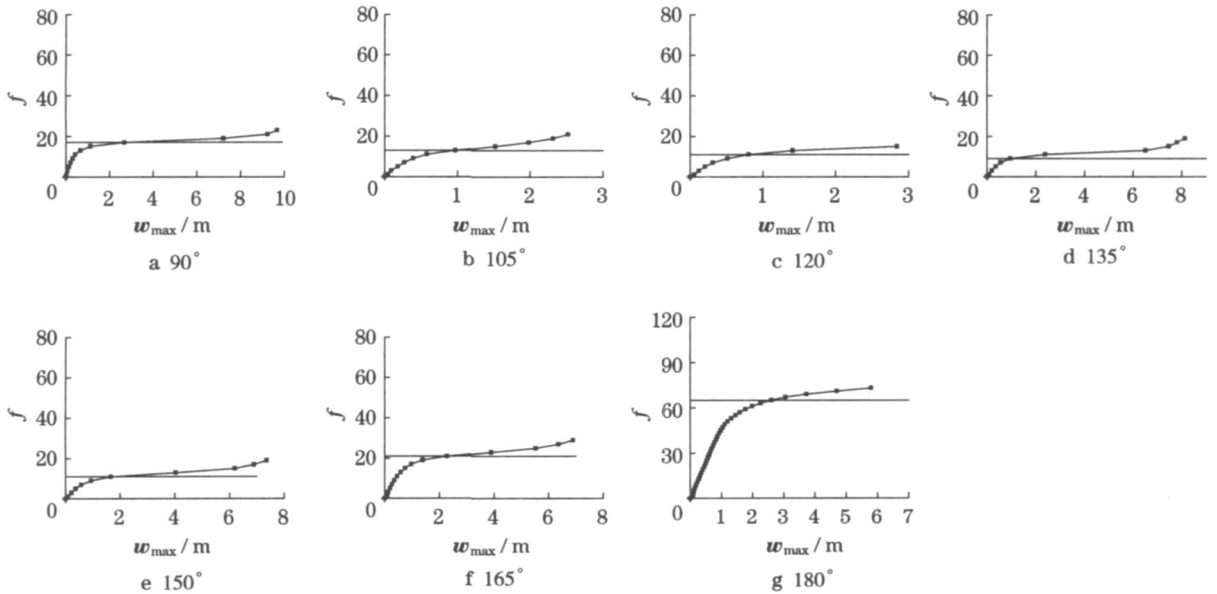


图 10 不同风向角下柱面网壳最大位移响应随  $f$  的变化

Fig. 10 Variation of  $w_{\max}$  with  $f$  at various angles of wind direction

表 2 不同风向角下的  $f_d, f_s$  和  $\varphi_d$

Tab. 2  $f_d, f_s$  and  $\varphi_d$  at various angles of wind direction

风向角/(°)	$f_d$	$f_s$	$\varphi_d$
90	14.2	18	1.3
105	10.8	17	1.6
120	9.2	12	1.3
135	7.5	11	1.5
150	9.0	15	1.7
165	17.5	27	1.5
180	51.0	113	2.2

由图 10 可以看出, 风向角为  $90^\circ, 135^\circ, 150^\circ$  和

$165^\circ$  时网壳发生动力失稳后位移迅速增长至接近网壳高度, 即结构倒塌至地面. 风向角为  $105^\circ, 120^\circ, 180^\circ$  时网壳发生动力失稳的趋势不如上述风向角明显, 特别是风向角为  $180^\circ$  时, 结构很难发生动力失稳.

由表 2 可见, 风向角为  $135^\circ$  时的  $f_d$  值为所有风向角中最小, 因此该柱面网壳在斜风作用下比较容易发生动力失稳. 随着风向角不断偏离  $135^\circ, f_d$  值不断变大. 当风向角为  $180^\circ$  时,  $f_d$  值达到最大, 即当来流平行网壳纵轴吹向网壳时, 结构很难发生动力失稳. 这是因为风向角为  $180^\circ$  时气流平行于结构表

面,柱面网壳上基本没有受风面.同时,通过对比平均风压系数和脉动风压系数随风向角的变化规律和  $f_d$  值随风向角的变化规律可以看出,平均和脉动风压系数较大的风向角下,柱面网壳较容易发生动力失稳.

图 11 给出了风向角为  $135^\circ$  时单层柱面网壳的失稳模态.可以看出,在该风向角下单层柱面网壳发生整体失稳,失稳时网壳迎风侧倒塌至地面,网壳端部的变形最大.

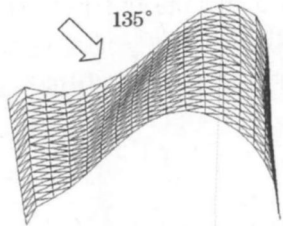


图 11 风向角为  $135^\circ$  时单层柱面网壳的失稳模态

Fig. 11 Buckling shape of the shell at  $135^\circ$  wind direction

### 3.4 获得以动力稳定为目标的等效静力风荷载

根据风洞试验获得的网壳表面风压数据得到作用于该结构的平均风荷载,然后进行该平均风荷载下的非线性静力稳定性分析.网壳的初始几何缺陷按该平均风荷载下的最低阶屈曲模态分布.通过分析得到 7 个风向角下发生静力失稳时的荷载增大系数临界值  $f_s$ (表 2).进一步根据式(4)得到不同风向角下的动力稳定性因子  $\varphi_d$ (表 2),从而得到柱面网壳以动力稳定为目标的等效静力风荷载.

由表 2 可见,  $\varphi_d$  值介于 1.2~2.2 之间.风向角为  $90^\circ$  时  $\varphi_d$  值最小,即动力作用对结构稳定性的影响最小;风向角为  $180^\circ$  时  $\varphi_d$  值最大.工程应用中为保守取较大的  $\varphi_d$  值,这里取  $\varphi_d = 2.2$  作为风荷载作用下该柱面网壳的动力稳定因子,即将  $\hat{p} = 2.2\bar{p}$  作为该柱面网壳以动力稳定为目标的等效静力风荷载.

## 4 等效静力风荷载下的稳定性分析

对单层柱面网壳在以动力稳定为目标和基于位移等效的等效静力风荷载下进行非线性静力稳定性分析.同样通过荷载增大系数  $f$  来增加作用于结构的等效静力风荷载.当荷载微小变化导致位移大大增加时结构发生极值点失稳,此时对应的荷载增大系数  $f$  定义为失稳临界值  $f_e$ .本文得到单层柱面网壳以动力稳定为目标的等效静力风荷载为  $\hat{p} =$

2.2 $\bar{p}$ .根据文献[15],按照阵风响应因子法得到基于位移等效的等效静力风荷载为  $\hat{p} = 1.5\bar{p}$ .

两种等效静力风荷载下的非线性静力稳定性分析得到不同风向角下的荷载增大系数失稳临界值  $f_e$ .(图 12).由图 12 可见,每种风向角以动力稳定为目标的等效静力风荷载下的  $f_e$  值都小于基于位移等效的等效静力风荷载下的  $f_e$  值,最大相差 80% (风向角为  $105^\circ$  时),最小相差 40% (风向角为  $135^\circ$  时).所以大跨空间结构设计中如果采用基于位移等效的等效静力风荷载进行稳定性分析,可能得到偏于不安全的结论.因此,大跨空间结构进行动力稳定性设计时有必要采用以动力稳定为目标的等效静力风荷载来考虑风荷载的作用.

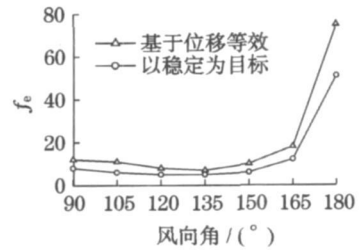


图 12 两种等效静力风荷载下的失稳结果比较

Fig. 12 Comparison of  $f_e$  under two kinds of equivalent static wind loads

## 5 结论

本文研究了单层柱面网壳结构在风荷载下的动力稳定性,获得以动力稳定为目标的等效静力风荷载,并用于单层柱面网壳的静风稳定性分析.研究发现:

(1) 以动力稳定为目标的等效静力风荷载下得到的荷载增大系数失稳临界值小于基于位移响应的等效静力风荷载下的临界值,因此结构稳定性分析中有必要采用以动力稳定为目标的等效静力风荷载来考虑风荷载的作用.

(2) 斜风下单层柱面网壳的动力稳定性较差,来流平行结构表面时单层柱面网壳最不容易发生动力失稳.

(3) 风压系数较大的风向角下,单层柱面网壳较容易发生动力失稳.

(4) 风向角为  $120^\circ$  时风荷载的动力作用对单层柱面网壳动力稳定性的影响最小,风向角为  $180^\circ$  时影响最大.

(下转第 674 页)

- [ 9 ] Ding Q, Lee P K K. Computer simulation of buffeting actions of suspension bridges under turbulent wind[J]. Computers and Structures, 2000, 76: 787.
- [ 10 ] DING Zhonghai. Nonlinear periodic oscillations in a suspension bridge system under periodic external aerodynamic forces[J]. Nonlinear Analysis, 2002, 49: 1079.
- [ 11 ] 黄坤, 冯奇. 悬索桥非共振情况下的振动[J]. 力学季刊, 2009, 30(3): 363.  
HUANG Kun, FENG Qi. Vibration of suspension bridge in non-resonant vibration[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2009, 30(3): 363.
- [ 12 ] 冯维明, 高黎黎. 索-梁耦合系统非线性振动分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 115.  
FENG Weiming, GAO Lili. Nonlinear vibration analysis for coupled structure of cable-stayed beam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 115.
- [ 13 ] 赵跃宇, 王涛, 康厚军, 等. 斜拉桥双索与桥面耦合的非线性参数振动特性分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(8): 1.  
ZHAO Yueyu, WANG Tao, KANG Houjun, et al. Performance study of the nonlinear parametric vibration of coupled bridge decks and two cables[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2008, 35(8): 1.
- [ 14 ] 赵跃宇, 李永鼎, 王连华. 悬索的多重内共振研究[J]. 力学季刊, 2008, 29(1): 15.  
ZHAO Yueyu, LI Yongding, WANG Lianhua. Multiple resonances in suspended cables [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(1): 15.
- [ 15 ] Pascoletti A, Zanolin F. Example of a suspension bridge ODE model exhibiting chaotic dynamics: a topological approach[J]. Mathematical Analysis and Applications, 2008, 339: 1179.
- [ 16 ] Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear oscillations [M]. New York: Wiley, 1979: 395.

(上接第 642 页)

## 参考文献:

- [ 1 ] Li Y, Tamura Y. Equivalent static wind load estimation in wind-resistant design of single-layer reticulated shells [J]. Wind and Structures, 2005, 8(6): 443.
- [ 2 ] 顾明, 周晷毅. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载方法及应用[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 125.  
GU Ming, ZHOU Xuanyi. Equivalent static wind loads of large-span roof structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 125.
- [ 3 ] Budiansky B, Roth R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells [R]. Washington D C: NASA TND-510, 1962: 597-606.
- [ 4 ] Hsu C S. On dynamic stability of elastic bodies with prescribed initial conditions [J]. Int J Engng Sci, 1966, 4(1): 1.
- [ 5 ] Simitses G J. On the dynamic buckling of shallow spherical caps [J]. J Appl Mech, 1974, 41(1): 299.
- [ 6 ] Davenport A G. Gust loading factor [J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(ST3): 11.
- [ 7 ] Chen X, Kareem A. Equivalent static wind loads on buildings: new model [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(10): 1425.
- [ 8 ] Li Y, Tamura Y. Nonlinear dynamic analysis for large span single-layer reticulated shells subjected to wind loading [J]. Wind and Structures, 2005, 8(1): 35.
- [ 9 ] Bathe K J. Finite element procedures [M]. [s. l.]: Prentice Hall Inc, 1996.
- [ 10 ] 中华人民共和国建设部. JGJ61—2003 网壳结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China JGJ61—2003. Technical specification for latticed shells [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.
- [ 11 ] 沈祖炎, 陈扬骥. 网架与网壳 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.  
SHEN Zuyan, CHEN Yangji. Latticed trusses and shells [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [ 12 ] 中华人民共和国冶金工业部. GB/T 17395—1998 无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.  
Ministry of Metallurgical Industry of the People's Republic of China GB/T 17395—1998. Dimensions, shapes, weight and tolerances of steel seamless tubes [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [ 13 ] 黄鹏, 全涌, 顾明. T-J-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(2): 136.  
HUANG Peng, QUAN Yong, GU Ming. Research of passive simulation method of atmospheric boundary layer in T-J-2 wind tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(2): 136.
- [ 14 ] 中华人民共和国建设部. GB50009—2001 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China GB50009—2001 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [ 15 ] 米福生. 干煤棚风致响应及干扰效应研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.  
MI Fusheng. Research on wind-induced responses and interference effects on dry coal shed [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.