

文章编号: 1000-4750(2011)11-0210-08

风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定

黄友钦^{1,2}, *顾明¹

(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, 广州 510006)

摘 要: 强风带动积雪漂移可能使结构处于稳定最不利状态, 而目前在这方面的研究很少。该文研究单层柱面网壳在风雪耦合作用下的动力稳定性。首先阐述风雪耦合作用下动力稳定性的研究方法, 然后介绍风雪耦合作用的数值模拟, 并通过风洞试验获得网壳表面的非定常气动力, 最后分析了风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定。研究表明, 斜风作用和不均匀分布积雪使单层柱面网壳更易于动力失稳, 按荷载规范中雪荷载标准值来分析动力稳定得到的结论偏于不安全。

关键词: 单层柱面网壳; 动力稳定; 风雪耦合作用; 计算流体力学; 风洞试验

中图分类号: TU391; O347.2 **文献标志码:** A

DYNAMIC INSTABILITY OF SINGLE-LAYER RETICULATED CYLINDRICAL SHELL UNDER COUPLED WIND AND SNOW LOADS

HUANG You-qin^{1,2}, *GU Ming¹

(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: Structures may be subjected to instability when snow drifting on them happens under strong wind, which was studied less. In this paper, the dynamic instability of a single-layer reticulated cylindrical shell under coupled wind and snow loads is studied. The guideline for this study is firstly given. Then, snow drifting in wind fields is simulated by the CFD method and the unsteady aerodynamic forces on the shell are obtained by wind tunnel tests. Finally, the dynamic instability of the single-layer reticulated cylindrical shell under coupled wind and snow loads is analyzed, in which seven load cases are included. The analytical results show that yawed wind and ununiform snow pressure make the single-layer reticulated cylindrical shell be prone to dynamic instability and the application of conclusions drawn from the dynamic instability analysis by the uniform snow pressure in current Chinese Load Code is unsafe.

Key words: single-layer reticulated cylindrical shell; dynamic instability; coupled wind and snow loads; computational fluid dynamics (CFD); wind tunnel tests

近年来, 大范围雪灾不断发生, 不仅造成巨额经济损失, 也造成了惨重的人员伤亡。暴风雪中建筑物的倒塌是造成人员伤亡的主要原因。大跨空间结构对动力荷载较为敏感, 虽然在大风中一般仅发生局部破坏而不易倒塌, 但在强风和大雪共同作用下可能因动力失稳而倒塌, 特别是强风带动积雪漂移形成的不均匀分布积雪可能使结构处于稳定最

不利状态。而目前在这方面的研究很少。

以往国内外学者对大跨空间结构动力稳定性的研究常常局限于阶跃荷载、脉冲荷载和简谐荷载等简单荷载^[1]和地震荷载^[2-4]。文献[5]对一球壳在风荷载下的动力稳定性作了简单分析, 提到可以通过切线刚度矩阵特性、计算是否发散和动力分析与静力失稳分析的位移比较来判断结构在风荷

收稿日期: 2010-02-21; 修改日期: 2010-05-17

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

作者简介: 黄友钦(1982-), 男, 福建宁德人, 助研, 工学博士, 从事结构动力稳定性研究(E-mail: yqhuang.dennis@gmail.com);

*顾明(1957-), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 博导, 从事结构抗风研究(E-mail: minggu@tongji.edu.cn).

载下的动力稳定性。风雪运动机理的研究始于 20 世纪中期, 主要的研究方法有实地观测^[6]、风洞试验^[7]、数值模拟^[8-10]等。数值模拟方法具有周期短效率高、可进行全尺度模拟、方便进行参数分析等优点, 因此随着计算机技术的进步得到了快速发展。文献[10-11]通过对 FLUENT 进行二次开发计算了风力下积雪漂移后屋盖表面的雪压分布规律, 并分析了湍流模型等参数对屋盖表面雪压变化的影响。

本文采用文献[10-11]的方法模拟单层柱面网壳表面的风雪耦合作用, 获得网壳上的积雪在风场中发生漂移后的不均匀分布形式, 研究单层柱面网壳在风雪耦合作用下的动力稳定性。首先阐述风雪耦合作用下动力稳定性研究的思路, 然后介绍风雪耦合作用的数值模拟, 通过风洞试验获得网壳表面的非定常气动力, 最后利用 Budiansky-Roth 动力失稳判别准则^[12](后文简称为“B-R 准则”)研究风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定性。

1 风雪耦合作用下单层柱面网壳动力稳定的研究思路

结构动力稳定性研究的首要任务是确定动力失稳判别准则。Budiansky 和 Roth 于 1962 年提出用于判定结构系统动力稳定性的 B-R 准则, 即对结构系统进行非线性动力响应分析, 把荷载微小变化导致结构位移突然增加时的荷载定义为动力失稳临界荷载。B-R 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^[13-14]。

本文假设风和雪之间为单向耦合, 即积雪在风场中发生堆积或侵蚀, 而积雪分布的改变不影响风场。然后通过 CFD 方法获得结构表面的不均匀分布雪荷载, 通过刚体模型风洞试验获得结构表面的非定常气动力。将得到的风荷载、雪荷载同时作用于结构, 通过不断增加非定常气动力来模拟风速的不断增大, 保持雪荷载的大小和分布不变, 对该结构系统进行非线性动力分析得到最大位移响应随荷载变化的曲线, 从而根据 B-R 准则得到结构系统发生动力失稳的临界荷载。

2 风雪耦合作用的数值模拟

2.1 基本理论

假设风相与雪相的关系为单向耦合, 即雪在风

的作用下发生漂移, 而雪的搬运、堆积过程不影响风场。根据两相流理论, 对风相和雪相分别建立传输方程^[8-9,15]。

空气相的控制方程: 风在大气边界层中低速流动, 因此可看作不可压缩湍流的粘性流动。基于雷诺平均的空气相控制方程是连续性方程及雷诺方程^[16]。本文采用标准 $k-\varepsilon$ 方程模拟雷诺应力, 近壁面采用壁面函数模拟壁面附近复杂的流动现象。

雪相的控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho_s f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s f u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \frac{\partial(\rho_s f)}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} [-\rho_s f u_{R,j}] \quad (1)$$

式中: ρ_s 为雪密度(取 150kg/m^3); f 为单位体积内雪相所占的组分; μ_t 为空气相的湍流粘性系数; $u_{R,j}$ 为相对于空气的雪的运动速度(取 0.3m/s ^[17]); u_j 为风的速度矢量。

积雪在风的作用下是否发生侵蚀或沉积由近壁面的摩擦速度(风速)决定。当摩擦速度 u_* 超过阈值速度 u_{*t} (取为 0.2m/s ^[11]), 壁面上的雪被风刮起进入计算域, 发生侵蚀; 当摩擦速度 u_* 低于阈值速度 u_{*t} , 漂移至壁面上方的雪离开计算域, 沉积在壁面。壁面上积雪侵蚀及沉积量的计算公式分别为:

$$q_{ero} = A_{ero} (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (2)$$

$$q_{dep} = C w_f \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2} \quad (3)$$

式中: A_{ero} 为常系数(取 7.0×10^{-4}); C 为近壁面网格中单位体积内雪相的质量($C = f \rho_s$, 在求解雪相控制方程的基础上获得); w_f 为雪的下沉速度; 摩擦速度 u_* 由 $u_* = u(z) \kappa / \ln(z/z_s)$ 确定, κ 为 von Karman 常数(取 0.4), z_s 为积雪面的地面粗糙度(取 0.0005m)。

作者课题组基于 FLUENT 软件平台, 开发了计算结构表面积雪漂移的分析程序^[10-11]。基于 FLUENT 的两相流求解方法, 在求解空气相控制方程的基础上求解雪相控制方程, 获得流场中雪相所占组分的分布, 进一步得到单位时间内积雪的侵蚀或沉积量。以建筑结构荷载规范^[18]提供的屋面均匀分布积雪为计算的初始条件, 通过程序分析得到结构表面不同位置处的积雪漂移率, 从而得到风吹雪一定时间后的积雪不均匀分布形式。

2.2 CFD 模型

将一实际单层柱面网壳(具体尺寸见 4.1 节)置

于三维流场中进行 CFD 分析(图 1)。三维流场的尺寸为 550m×250m×100m(来流方向×垂直来流方向×竖向)，靠近壳体的区域采用非结构网格，其他区域采用结构网格。网格节点总数为 334790，体网格总数为 1497122。采用二阶离散格式求解控制方程，迭代计算中按无量纲均方根残差为 10^{-8} 来设定收敛标准。

三维流场的入流面采用速度入流边界条件。大气边界层风速剖面按指数分布模拟 B 类地貌，设定 10m 高度处的风速为 8m/s。在入流面处以直接给出湍流强度的方式给定入流面的湍流参数。因我国建筑荷载规范中没有给出湍流强度分布，故湍流强度剖面参考日本建筑协会提出的《房屋荷载建议》^[19] 中第 II 类地貌的湍流度剖面。三维流场的出流面采用压力出口边界条件，流场顶面和两侧面采用自由滑移壁面，流场的底面和结构表面采用无滑移壁面。

对该 CFD 模型作如下假设：① 网壳表面仅当倾角为 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时存在积雪，初始雪压为 50 年一遇的基本雪压(设为 0.45kPa)，且沿网壳表面均匀分布^[18]；② 引起积雪漂移的来流风向角为 90° ，即来流方向垂直于网壳纵轴。

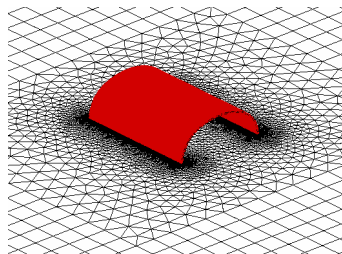


图 1 CFD 计算模型的局部计算网格
Fig.1 Local mesh scheme of CFD model

2.3 模拟结果

来流垂直网壳纵轴时，在基本风速下积雪漂移 10h 后网壳表面的不均匀分布积雪如图 2 所示。图 2 中数值表示发生积雪漂移后的雪压值，大于 0.45 的数值表示堆积，小于 0.45 的数值表示侵蚀。由图 3 可见，在风力作用下，网壳表面发生较大范围的积雪漂移。网壳顶部的积雪发生侵蚀，网壳两侧的积雪发生堆积，介于顶部和两侧的积雪运动较少。侵蚀和堆积覆盖的结构表面积大小基本相同。网壳背风侧的堆积大于迎风侧，位于来流两侧的区域积雪堆积最多。

为验证本文数值模拟结果的正确性，将其与文献[20]的结果进行对比，文献[20]对一拱形屋面(图

3)上的积雪漂移进行实测和数值模拟。该拱形屋面的纵向跨度为 123m，弧向跨度为 85m，高度为 25m。进行实测时当地的平均积雪深度约为 0.2m。当来流垂直屋面纵轴吹向屋面时，屋面背风侧靠近屋面端部的弧向截面上积雪分布的实测和数值模拟结果如图 4 所示，横坐标表示与屋面顶点的距离。由图 4 可见，屋面顶部的积雪发生侵蚀而屋面两侧的积雪发生堆积。对比图 2 和图 4 可以看出，本文的数值模拟结果与文献[20]的结果趋势一致。

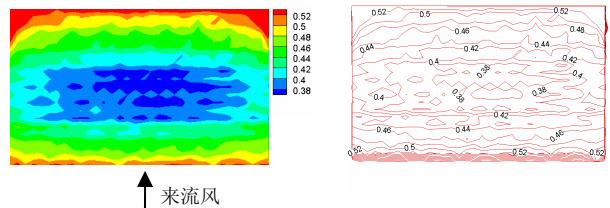


图 2 积雪漂移后的不均匀雪压分布 /kPa

Fig.2 Distribution of snow pressure after drifting

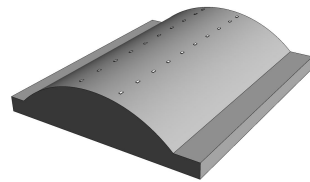


图 3 文献[20]中拱形屋面的三维形状

Fig.3 3D shape of the arched roof in Ref. [20]

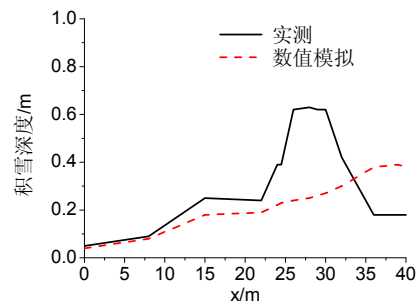


图 4 文献[20]中拱形屋面上不均匀积雪的实测和数值模拟结果

Fig.4 Measurement and simulation results of uneven snow in Ref. [20]

3 模型风洞试验及非定常气动力构造

通过刚体模型风洞试验获得结构表面的风压时程，然后根据相似定律得到作用于结构表面的非定常气动力。将非定常气动力和 CFD 模拟得到的雪荷载同时作用于结构，作为风雪耦合作用下动力稳定性分析的荷载系统。这里初步假设用于动力稳定性分析的风压不受雪荷载不均匀分布的影响。

单层柱面网壳(图 5)的模型风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞中完成。

雷诺数对圆柱形结构的风压系数有较大影响^[21]，通过增加结构的表面粗糙度可大大降低风压系数对雷诺数的依赖^[22]。单层柱面网壳刚体模型在外形上与实物保持几何相似，在模型表面设置凸条来增加表面粗糙度以满足雷诺数相似(图 6)。模型表面布置 215 个测点(430 个测压孔)。每对测点包括内表面、外表面两个测压孔，以同时测量该点处内表面、外表面的压力，而该测点最终的压力为外表面、内表面压力之差。风洞中模拟了该结构所处的 B 类风场^[23]。该结构位于强台风区，50 年重现期的基本风压为 0.80kPa，测压试验的参考点风速为 12m/s，测压信号采样频率约为 312.5Hz。在测压试验数据处理软件中以 PVC 管长度为参数对测压管路系统进行直接修正^[24]。定义来流沿网壳纵轴方向吹向该网壳时的风向角为 0°，按顺时针方向增加(图 7)。根据对称性，仅进行 90°~180°风向角下共 7 个风向角下的风洞试验(风向角间隔为 15°)。

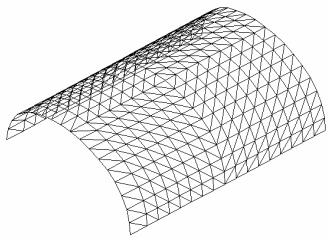


图 5 用于分析的单层柱面网壳
Fig.5 Cylindrical shell for analysis

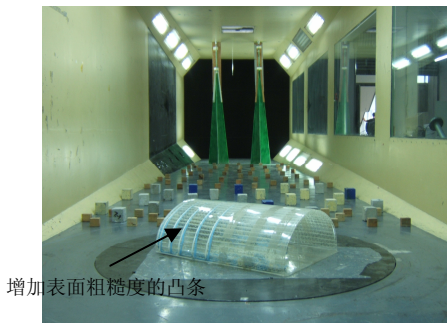


图 6 单层柱面网壳刚体模型
Fig.6 Rigid model of the reticulated cylindrical shell

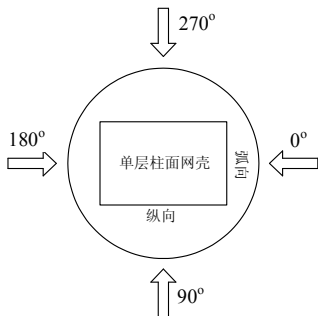


图 7 风向角定义
Fig.7 Definition of wind direction

结构表面的压力通常用无量纲压力系数 C_{P_i} 表示为：

$$C_{P_i} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (4)$$

其中： C_{P_i} 为测点 i 处的压力系数； P_i 为作用在测点 i 处的压力； P_0 和 P_∞ 分别是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对应的平均风压系数 $C_{P_{mean}}$ 和脉动风压系数 $C_{P_{rms}}$ (图 8)。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 7 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°变化到 135°时，网壳表面的平均风压系数总体上逐渐增大；风向角从

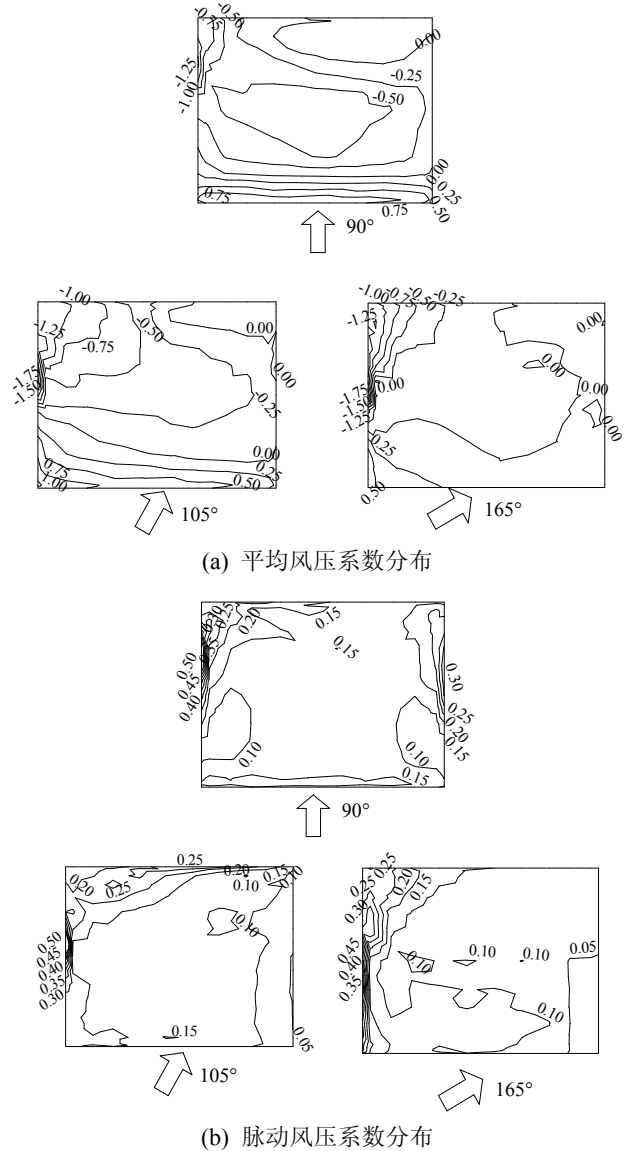


图 8 网壳表面的平均和脉动风压系数分布图
Fig.8 Distribution of mean and fluctuating wind pressure coefficients on the shell

135°变化到 180°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。

根据风洞试验得到的风压数据构造非定常气动力,然后将其作用于网壳的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 $\{C_{p,ji}\}$ 。作用于实际网壳结构表面的非定常气动力 $\{p_{ji}\}$ 为
$$p_{ji} = \frac{1}{2} \rho U_T^2 C_{p,ji} A_i$$
 (式中: ρ 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 $(nL/V)_m = (nL/V)_p$ (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; 下标 p 表示实际结构) 可得: $n_p/n_m = (L_m/L_p)/(V_m/V_p)$ 。然后,根据 $n = 1/\Delta t$ (式中 Δt 为风压数据间隔时间) 得到: $\Delta t_p/\Delta t_m = (V_m/V_p)/(L_m/L_p)$ 。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 Δt_p 。通过荷载增大系数 f 不断增加网壳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 $\{f \cdot p_{ji}\}$ 。

4 动力稳定性分析

将非定常气动力和雪荷载同时作用于单层柱面网壳,并考虑结构自重。为了与 CFD 模拟得到的不均匀分布雪荷载下结构的动力稳定结果对比,本文也分析了仅有风荷载和风荷载与均布雪荷载作用下结构的动力稳定性。均布雪荷载取 CFD 计算时的基本雪压(0.45kPa),同时考虑屋面积雪分布系数 μ_r , 这里取 $\mu_r = 0.4$ ^[18]。同时,将雪荷载分为全跨分布和半跨分布两种情况。将网壳沿来流方向分为位于上游的半跨和位于下游的半跨,因此雪荷载半跨分布时分为上游半跨分布和下游半跨分布两种情况。因此,本文分析风雪荷载共同作用下单层柱面网壳的动力稳定性时考虑 7 种荷载工况:

① 仅有风荷载(用 Wind 表示); ② 风荷载+全跨均布雪荷载(用字母 A 表示); ③ 风荷载+上游半跨均布雪荷载(用字母 B1 表示); ④ 风荷载+下游半跨均布雪荷载(用字母 B2 表示); ⑤ 风荷载+全跨不均匀分布雪荷载(用字母 C 表示); ⑥ 风荷载+上游半跨不均匀分布雪荷载(用字母 D1 表示); ⑦ 风荷载+下游半跨不均匀分布雪荷载(用字母 D2 表示)。

通过荷载增大系数 f 增加风荷载,雪荷载的大

小和分布保持不变,不断对结构系统进行非线性动力响应分析。同时考虑几何和材料非线性,分析得到结构系统最大位移响应随荷载增大系数 f 的变化曲线,进一步根据 B-R 准则确定荷载增大系数动力失稳临界值 f_D 。限于篇幅,本文不介绍 B-R 准则和非线性动力分析程序,具体参见文献[25]。

4.1 计算模型及计算参数

用于分析的单层柱面网壳为纵向边缘落地支承,弧向跨度为 25m,纵向跨度为 35m,高度为 9.7m。采用单向斜杆正交正放网格,网格尺寸为 2.0m~3.0m,相邻杆件间的夹角大于 30°(图 5)。杆件为无缝钢管,钢管外径 0.219m,壁厚 0.006m,杆件长细比小于 150,杆件用钢量为 33kg/m²。在永久荷载和可变荷载作用下单层柱面网壳的最大位移为 0.05m,小于网壳弧向跨度的 1/400(=0.063m),满足规范要求^[26-28]。

用空间梁单元来模拟网壳的杆件,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雪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^[26]。

材料参数:弹性模量常数为 200GPa;密度为 7850 kg/m³×1.2=9420kg/m³,即通过将杆件密度提高 20%来考虑节点自重;泊松比取 0.3;采用双线性随动强化塑性模型,屈服强度为 235MPa,屈服后的切线模量为 1.18GPa。瑞利阻尼模型中的常数取值为 $c_0 = 0.112$ 和 $c_1 = 0.0008$ 。

4.2 计算结果及分析

用网壳上所有节点在整个计算时间内的位移最大值 \underline{w}_{\max} 来表征“位移响应”

$$\underline{w}_{\max} = \max \{ \max(\underline{w}, T), \text{所有结点} \} \quad (5)$$

其中: T 为总计算时间。

对单层柱面网壳在非定常气动力和雪荷载共同作用下进行非线性动力分析,得到 7 个典型风向角(图 7)下最大位移响应 \underline{w}_{\max} 随荷载增大系数 f 的变化曲线(图 9),并根据 B-R 准则得到荷载增大系数动力失稳临界值 f_D 和雪荷载导致的 f_D 降低率(表 1)。图 9 中字母 A、B、C、D 分别表示 4 类雪荷载和风荷载耦合作用的情况; B1、D1 表示网壳处于风向上游的半跨有积雪, B2、D2 表示网壳处于风向下游的半跨有积雪; Wind 表示仅有风荷载、没有雪荷载的情况。表 1 中 f_D 的最大值和最小值加粗显示,积雪影响率为每种工况下 f_D 的最大值和最小值的差值与最大值的百分比。

由图 9 可见,积雪使单层柱面网壳更易于发生动力失稳。风向角为 90° 、 165° 和 180° 时最大位移响应随荷载增大系数的变化曲线较为分散,表示这些风向角下积雪对动力稳定性影响较大。风向角为 90° 、 135° 和 150° 时曲线的动力失稳部分较为平坦,说明这些风向角下结构的动力失稳趋势较为明显,发生动力失稳后结构迅速倒塌至地面(图 10)。积雪不均匀分布时曲线的动力失稳段比积雪均匀分布时平坦,因此不均匀分布积雪使结构倒塌更加突然。所有荷载情况下结构的位移变化规律如下:相同的荷载作用下,仅有风荷载时结构位移最小,全

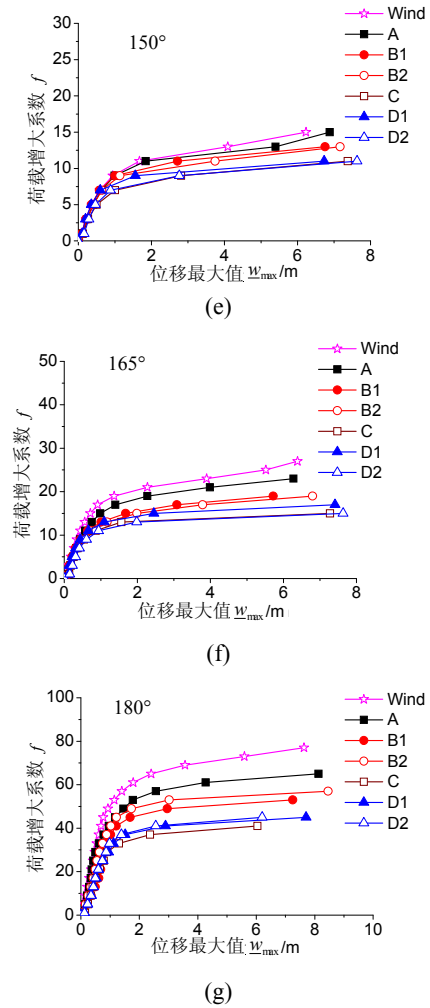
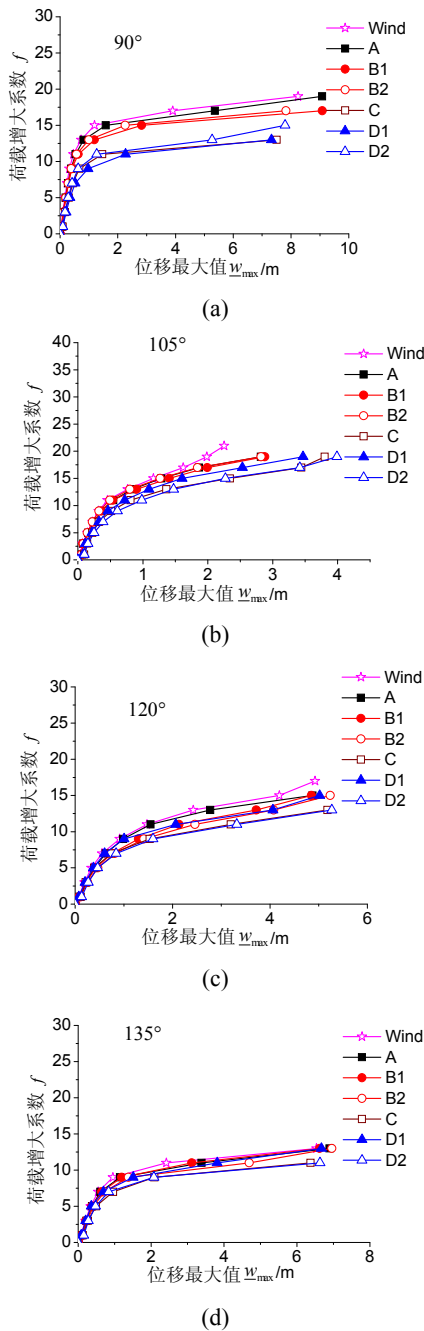


图 9 不同风向角下网壳的最大位移响应随 f 的变化
Fig.9 Variation of w_{max} with f under different wind directions

表 1 不同风向角下的 f_D 值
Table 1 f_D under different wind directions

风向角	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
Wind	14	13	10.5	9	10.5	17.5	58
A	13	12	10	8	10	15.5	47.5
B1	11.5	12.5	9	8.5	9	12.5	37.5
B2	12.5	11.5	8.5	7.5	8	11.5	40.5
C	9	10.5	8	6.5	6.5	10	27.5
D1	8	11	9	7	7.5	11	34
D2	9.5	10	7.5	6	6	9.5	35.5
积雪影响率/(%)	43	23	29	33	43	46	52

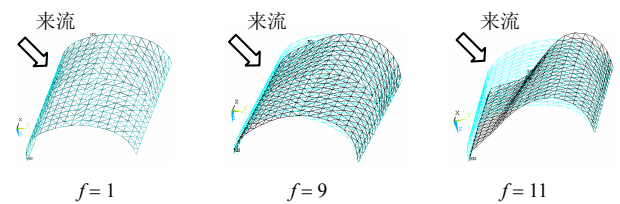


图 10 风向角为 135° 时不同 f 下网壳的最大变形
Fig.10 Maximum deformation of the shell under 135°

跨不均匀积雪和下游半跨不均匀积雪时结构位移最大；不均匀积雪时的结构位移大于均匀积雪时；积雪为均匀分布时，半跨积雪的结构位移大于全跨积雪；积雪为不均匀分布时，全跨积雪和下游半跨积雪时的结构位移大于上游半跨积雪。

表1和图11的结果指出,7种荷载工况下 f_D 值随风向角的变化规律类似,风向角为 135° 和 150° 且下游半跨存在不均匀分布积雪(工况D2)时 f_D 值最小, $f_D=6$,即当实际风速为设计风速2.5倍时结构系统发生动力失稳。因此,斜风下该单层柱面网壳最容易发生动力失稳。随着风向角不断偏离 135° 和 150° , f_D 值不断变大;风向角为 180° 时 f_D 值达到最大, $f_D=27.5$,这是因为此时来流平行于网壳表面,网壳上基本没有受风面。风向角为 180° 时,雪荷载使 f_D 值降低52%,即动力失稳临界风速降低32%;所有风向角下考虑雪荷载时的 f_D 最小值比仅有风荷载时的 f_D 最小值降低33%,即动力失稳风速降低18%。因此,积雪对单层柱面网壳的动力稳定性有较大影响。对于本文所研究的结构,仅有风荷载和考虑雪荷载时最易发生动力失稳的风向角都是 135° ,而其他结构可能在仅有风荷载不易动力失稳的风向角下考虑雪荷载后较易发生动力失稳,此时积雪对动力稳定性的影响就更大。

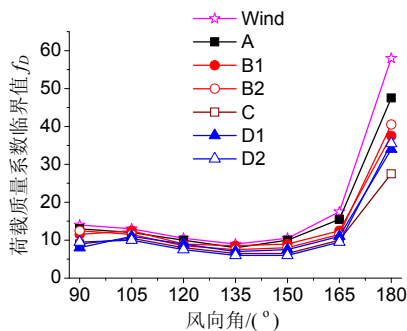


图11 不同荷载工况下 f_D 随风向角的变化
Fig.11 Variation of f_D with wind directions

同时,通过对比 $C_{p_{mean}}$ 和 $C_{p_{rms}}$ 随风向角的变化规律和 f_D 值随风向角的变化规律发现:平均和脉动风压系数较大的风向角下,单层柱面网壳较易发生动力失稳。

风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定性总体规律如下:仅有风荷载时结构最不易发生动力失稳,全跨或下游半跨不均匀分布积雪时结构最容易发生动力失稳;积雪不均匀分布比均匀分布使结构更易于发生动力失稳,因此直接按荷载规范^[18]中的均匀雪荷载计算得到的动力稳定性结果偏于

不安全;积雪均匀分布时,半跨积雪比全跨积雪使结构更易于发生动力失稳,下游半跨积雪比上游半跨积雪使结构更易于发生动力失稳;积雪不均匀分布时,下游半跨积雪使结构最易于发生动力失稳。

4.3 与仅有不均匀积雪下的稳定性结果对比

将数值模拟得到的不均匀雪荷载(初始均匀雪压为 0.45kPa)作用于单层柱面网壳,网壳的初始几何缺陷按不均匀雪荷载下的最低阶屈曲模态分布,缺陷最大值取为网壳弧向跨度的 $1/300$ ^[26]。采用与动力失稳分析完全一样的材料参数,通过荷载参数 λ 按比例增加雪荷载,不断进行非线性静力分析得到单层柱面网壳最大位移响应随 λ 的变化曲线(图12),从而得到单层柱面网壳发生非线性静力失稳时对应的荷载参数临界值 λ ,即当雪压为初始雪压8倍时单层柱面网壳才呈现失稳趋势。然而,考虑风雪耦合作用时单层柱面网壳在初始雪压($\lambda=1$)下将发生动力失稳。因此,不考虑风荷载仅考虑不均匀积雪时网壳不易发生失稳,也即风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力失稳研究中风荷载为不利因素。

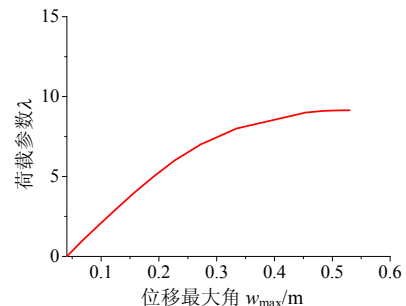


图12 不均匀积雪下最大位移响应 w_{max} 随 λ 的变化
Fig.12 Variation of w_{max} with λ under snow loads

5 结论

本文采用风洞试验和数值模拟相结合的方法,研究了单层柱面网壳在风雪耦合作用下的动力稳定性,研究结果表明:

(1) 风雪耦合作用比仅有风荷载使单层柱面网壳更易于发生动力失稳。对于本文讨论的单层柱面网壳,积雪使动力失稳临界风速降低32%,斜风是其动力失稳的控制风向。

(2) 积雪不均匀分布时单层柱面网壳的动力稳定性比积雪均匀分布时更差,按照建筑结构荷载规范^[18]中的均布积雪得到的动力稳定性结论偏于不安全。

(3) 全跨或下游半跨存在不均匀分布积雪时单

层柱面网壳的动力稳定性最差,风荷载是风雪耦合作用下动力稳定性研究中的不利因素。

(4) 积雪分布是否均匀对动力稳定性的影响较大,而积雪分布范围为全跨或半跨的影响较小,因此研究风雪共同作用下结构的动力稳定性时有必要考虑积雪的不均匀分布。

参考文献:

- [1] Holzer S M. Static and dynamic stability of reticulated shells [C]. International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads. New York: ASCE, 1977.
- [2] 叶继红. 单层网壳结构的动力稳定分析[D]. 上海: 同济大学, 1995.
Ye Jihong. Dynamic instability of single-layer reticulated shells [D]. Shanghai: Tongji University, 1995. (in Chinese)
- [3] 王策. 球面网壳的动力稳定性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.
Wang Ce. Dynamic instability of spherical shells [D]. Harbin: Harbin Institute of technology, 1997. (in Chinese)
- [4] 郭海山. 单层球面网壳结构动力稳定性及抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
Guo Haishan. Dynamic instability and earthquake resistance of single-layer spherical shells [D]. Harbin: Harbin Institute of technology, 2002. (in Chinese)
- [5] 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—48.
- [6] Mellor M. Blowing snow cold regions science and engineering (Part III) [R]. Hampshire: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1965.
- [7] Irwin P A. A simple omni-directional sensor for wind tunnel studies of pedestrian level winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 7: 219—239.
- [8] Sato T, Uematsu T, Nakata T, Kaneda Y. Three dimensional numerical simulation of snowdrift [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46/47: 741—746.
- [9] Beyers J H M, Sundsbo P A, Harms T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(9): 725—747.
- [10] 周晖毅, 顾明, 朱忠义, 黄崑. 首都国际机场 3 号航站楼屋面雪荷载分布研究[J]. 同济大学学报, 2007, 35(9): 1193—1196.
Zhou Xuanyi, Gu Ming, Zhu Zhongyi, Huang Kun. Study on snow loads on roof on terminal 3 of Beijing Capital International Airport [J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(9): 1193—1196. (in Chinese)
- [11] 周晖毅, 顾明, 李雪峰. 大跨度屋盖表面风致雪压分布规律研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 7—12.
Zhou Xuanyi, Gu Ming, Li Xuefeng. Study on wind-induced snow pressure on large-span roof [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 7—12. (in Chinese)
- [12] Budiansky B, Roth R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells [R]. Washington D.C.: NASA TND-510, 1962.
- [13] Hsu C S. On dynamic stability of elastic bodies with prescribed initial conditions [J]. International Journal of Engineering Science, 1966, 4(1): 1—21.
- [14] Simitses G J. On the dynamic buckling of shallow spherical caps [J]. Journal of Applied Mechanics, 1974, 41(1): 299—300.
- [15] Liston G E, Sturm M. A snow transport model for complex terrain [J]. Journal of Glaciology, 1998, 44(148): 498—516.
- [16] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000.
Wu Wangyi. Fluid mechanics [M]. Beijing: Peking University Press, 2000. (in Chinese)
- [17] Sundsbo P A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76: 543—552.
- [18] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S] 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
GB50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005. (in Chinese)
- [19] AIJ2004, AIJ recommendations for loads on building (English Version) [S]. Japan: Architectural Institute of Japan, 1995.
- [20] Thiis T, Potac J, Ramberg J F. 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof [C]. Florence (Italy): EACWE 5, 2009.
- [21] Face A, Warsap J H. The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder [R]. London: Aeronautical Research Council R&M. No. 1283, 1930.
- [22] Guven O, Farell C, Patel C C. Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinder [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 98(4): 673—701.
- [23] 黄鹏, 全涌, 顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究[J]. 同济大学学报, 1999, 27(2): 136—144.
Huang Peng, Quan Yong, Gu Ming. Research of passive simulation method of atmospheric boundary layer in TJ-2 wind tunnel [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(2): 136—144. (in Chinese)

(参考文献[24]—[28]转第 224 页)

- [4] 刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 346—351.
Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 346—351. (in Chinese)
- [5] 汪子君, 刘俊岩, 戴景民, 等. 锁相红外检测中相位检测方法[J]. 无损检测, 2008, 30(7): 418—421.
Wang Zijun, Liu Junyan, Dai Jingmin, et al. Study of phase detection in lock-in thermography nondestructive testing [J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(7): 418—421. (in Chinese)
- [6] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(8): 3962—3965.
- [7] Peyroux R, Chrysochoos A, Licht C, et al. Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys [J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36(4): 489—509.
- [8] Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals [J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 158: 363—376.
- [9] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique [J]. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155—163.
- [10] Rosa G L, Ristitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22: 65—73.

(上接第 217 页)

- [24] 周暄毅. 大跨屋盖结构风荷载及风致响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
Zhou Xuanyi. Study on wind loads and wind-induced response of large-span roof [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [25] 黄友钦, 顾明, 周暄毅. 以动力稳定为目标的大跨空间结构等效静力风荷载[J]. 同济大学学报, 2011, 39(5): 637—642.
Huang Youqin, Gu Ming, Zhou Xuanyi. Dynamic-instability-based equivalent static wind loads on large-span spatial structures [J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(5): 637—642. (in Chinese)
- [26] JGJ61-2003, 网壳结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
JGJ61-2003, Technical specification for latticed shells [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese)
- [27] 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. (in Chinese)
- [28] 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.
GB/T 17395-1998, Dimensions, shapes, weight and tolerances of steel seamless tubes [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998. (in Chinese)