

# 风雪共同作用下门式刚架厂房的动力稳定

顾明<sup>1</sup>, 黄友钦<sup>1,2</sup>, 赵明伟<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:** 结合数值计算和风洞试验, 研究门式刚架轻型钢结构厂房在风雪耦合作用下的动力稳定性. 通过 CFD(计算流体力学)方法, 模拟厂房屋面上的风雪耦合作用, 由风洞试验获得厂房表面的非定常气动力, 然后将门式刚架厂房作为空间刚架体系, 利用 Budiansky-Roth 准则研究其动力稳定. 研究表明, 数值模拟得到的积雪漂移现象与屋面上气流的运动规律基本一致, 不均匀积雪使门式刚架厂房在风场中的动力稳定性显著降低.

**关键词:** 风雪共同作用; 门式刚架; 轻型钢结构厂房; 动力稳定; CFD 方法; 风洞试验

**中图分类号:** TU 391

**文献标识码:** A

## Dynamic Instability of Light-weight Steel Structures with Portal Frames Under Wind and Snow Loads

GU Ming<sup>1</sup>, HUANG Youqin<sup>1,2</sup>, ZHAO Mingwei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangzhou University-Danjiang University (Taiwan) Joint Research Centre for Engineering Structure Disaster Prevention and Control, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The dynamic instability of light-weight steel structures with portal frames under coupled wind and snow loads is studied by numerical simulation and wind tunnel tests. Coupled action between wind and snow is simulated by computational fluid dynamics (CFD) method and the unsteady aerodynamic forces on the structure are obtained by wind tunnel test. Then, the structure is studied as a spatial portal frame on its dynamic instability by the Budiansky-Roth criterion. The results show that simulated snow-drifting on the roof is consistent with the movement rule of airflow near the roof. Non-uniform snow distribution can decrease the dynamic stability of the structure simultaneously under wind actions.

**Key words:** wind and snow loads; portal frames; light-weight steel structures; dynamic instability; computational fluid dynamics (CFD); wind tunnel tests

从 2005 年开始, 我国发生了多次大范围雪灾, 大量屋盖结构在大雪中倒塌. 2007 年 3 月 4 日—5 日, 一场 56 年来最大的暴风雪横扫东北三省, 平均积雪深度达 36 cm, 部分地区最大风力达到 12 级, 轻钢结构建筑普遍遭受到严重破坏<sup>[1]</sup>. 仅辽宁全省 92 家企业的 300 多处钢结构厂房遭到不同程度损坏, 包括采用门式刚架或拱形屋盖等结构体系, 总经济损失达 145.9 亿元<sup>[2]</sup>. 2008 年 1 月 10 日至 2 月 12 日, 中国 21 个省(区、市、兵团)均受到雪灾影响, 部分地区受灾程度超过百年一遇. 仅江苏省溧阳市, 倒塌或部分倒塌的钢结构建筑近 16 万 m<sup>2</sup>, 损失达 6 400 多万元<sup>[3]</sup>. 2009 年和 2010 年初, 我国又发生了多次暴风雪天气, 全国各地大量屋盖结构倒塌. 因此, 及时研究风雪灾害天气中大跨屋盖结构的安全性, 是大跨度屋盖结构的合理设计和有效使用中亟待解决的问题.

大跨度屋盖结构对动力荷载较为敏感, 虽然在大风中常常仅是局部破坏而不易倒塌, 但在强风和大雪共同作用下却可能因动力失稳而倒塌, 而目前在方面的研究很少. 国内外学者对结构动力稳定的研究集中于阶跃荷载、脉冲荷载和简谐荷载等简单荷载和地震荷载<sup>[4-5]</sup>.

文献[6]简单分析一球形网壳在风荷载下的动力稳定性, 提到可以通过切线刚度矩阵特性、计算是否发散以及动力分析与静力失稳分析的位移比较, 来判断结构在风荷载下的动力稳定性. 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<sup>[7]</sup>、

收稿日期: 2010-06-11

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: 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

通讯作者: 黄友钦(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风和动力稳定性. E-mail: yqhuang.dennis@gmail.com

风洞试验<sup>[8]</sup>、数值模拟<sup>[9]</sup>等.数值模拟方法具有周期短效率高、可全尺度模拟、方便参数分析等优点,因此,随着计算机技术的进步得到了快速发展.

笔者采用数值模拟和风洞试验相结合的方法,研究门式刚架轻型钢结构厂房在风雪耦合作用下动力稳定.将平面门式刚架通过支撑系统和系杆组成空间刚架体系进行分析.通过 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体动力学) 方法,模拟厂房屋面上的风雪耦合作用,获得屋面上积雪发生漂移后的不均匀分布形式.然后,由风洞试验获得风场中厂房表面的非定常气动力,将非定常气动力和不均匀积雪同时作用于厂房结构,根据 Budiansky - Roth 动力失稳判别准则<sup>[10]</sup> (B - R 准则),得到结构系统发生动力失稳的临界荷载.

## 1 门式刚架厂房

### 1.1 结构简介

用于分析的门式刚架轻型钢结构厂房见图 1,主要构件包括门式刚架、支撑系统、山墙抗风柱、墙梁、檩条等<sup>[11]</sup>.9 榀门式刚架的跨度均为 36 m,间距均

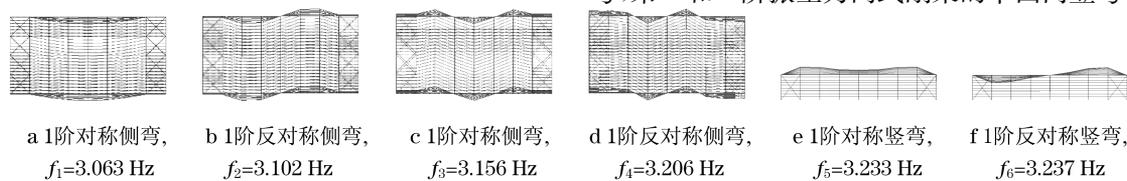


图 1 用于分析的门式刚架轻型钢结构厂房示意图(单位:m)  
Fig.1 Light-weight steel structure with portal frames for analysis(unit:m)

### 1.2 模态分析

模态分析是结构动力分析的基础.图 2 给出了该厂房结构前 6 阶的固有频率  $f$  和振型.由图可见,该厂房结构的固有频率十分密集,第 5 和第 6 阶频率比较接近.结构的前 4 阶振型均为门式刚架的平面内侧弯,第 5 和 6 阶振型为门式刚架的平面内竖弯.

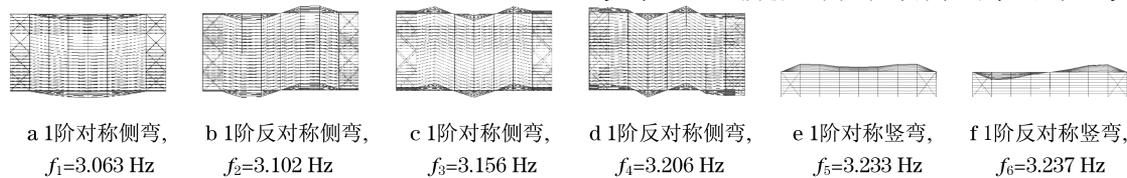


图 2 厂房结构的前 6 阶固有频率和振型

Fig.2 Natural frequencies and vibration modes of the structure

## 2 风雪耦合作用的数值模拟

笔者课题组基于 FLUENT 软件平台,开发了模拟风雪耦合作用的计算程序<sup>[13]</sup>.根据两相流理论,对风相和雪相分别建立传输方程<sup>[14]</sup>.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.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<sup>[15]</sup>提供的屋面均匀分布积雪作为初始条件,通过程序计算,得到风吹雪一定时间后屋面积雪的不均匀分布形式.

### 2.1 CFD 计算模型

将实际门式刚架厂房置于三维流场中进行 CFD 分析(图 3),采用基于 RANS 的标准  $k-\epsilon$  湍流模型.

根据厂房结构的对称性,选取三个风向角—— $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  下工况进行计算.定义沿厂房长边吹向厂房的来流风向角为  $0^\circ$ ,按顺时针方向增加(图 4).三维流场的尺寸为  $550\text{ m} \times 250\text{ m} \times 100\text{ m}$  (来流方向  $\times$  垂直来流方向  $\times$  竖向),靠近厂房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 227 012,体网格总数为 929 435.采用 2 阶离散格式求解控制方程,迭代计算中按量纲均方根残差为  $10^{-8}$  来设定收敛标准.

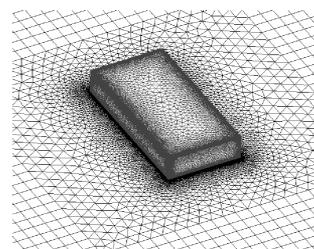


图 3 计算模型的局部计算网格  
Fig.3 Local mesh scheme

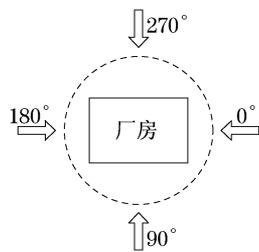


图 4 风向角定义

Fig.4 Definition of wind directions

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  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [13]),壁面上的雪被风刮起进入计算域,发生侵蚀;当  $u_*$  低于  $u_{*t}$ ,漂移至壁面上方的雪离开计算域,沉积在壁面.

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 10 m 高度处的风速为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .一般来说,要使雪粒启动,10 m 高处的风速应大于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但若大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,则大部分雪粒将吹至离地 30 cm 以上,发生悬移运动 [16].因此,设定 10 m 高处的风速为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .在入流面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》 [17] 中 II 类地貌的湍流度剖面.

出流面:采用压力出口边界条件.

流域顶部和两侧:采用对称边界条件,等价于自由滑移的壁面.

结构表面和地面:采用无滑移的壁面条件.

对该 CFD 模型如下假设:①积雪漂移前沿厂房屋面均匀分布,积雪厚度为 30 cm,对应的雪压为 0.45 kPa(雪密度为  $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).②屋面积雪在较低风速下漂移.因为高风速下雪粒容易悬移使屋面积雪全部侵蚀,从而积雪在短时间内被吹光,不易形成侵蚀与沉积并存的不均匀分布状态,而本文重点在于研究积雪漂移形成的不均匀分布形式对大跨度屋盖结构动力稳定性的影响.③在低风速的风吹雪阶段,屋面积雪不结冰不融化,即积雪为以颗粒状存在的干雪,而低风速吹雪一定时间后积雪结冰,其分布形式不再因风力作用而变化,以此条件计算结构的动力稳定性.

## 2.2 CFD 模拟与风洞试验的平均风压系数结果比较

由于屋面的风压分布与近屋面的风速场存在一定的关系,而近屋面的风速场是积雪漂移的主要影响因素,所以,CFD 方法与风洞试验在风压分布结果上的一致性,可在一定程度上验证本文积雪漂移计算结果的准确性 [18-19].

图 5 为两种方法得到的三种风向角下屋面平均风压系数分布图(以屋顶风压为参考风压).由图可见,CFD 方法与风洞试验的结果在趋势上是一致的:①屋面风压以负压为主,平均风压等压线呈阶梯状分布;②由于来流在屋面迎风前缘分离,迎风前缘附近出现了较高的负压区,且风压系数的变化梯度较大;③远离屋面迎风前缘的区域尾流发生再附,风压系数较小.

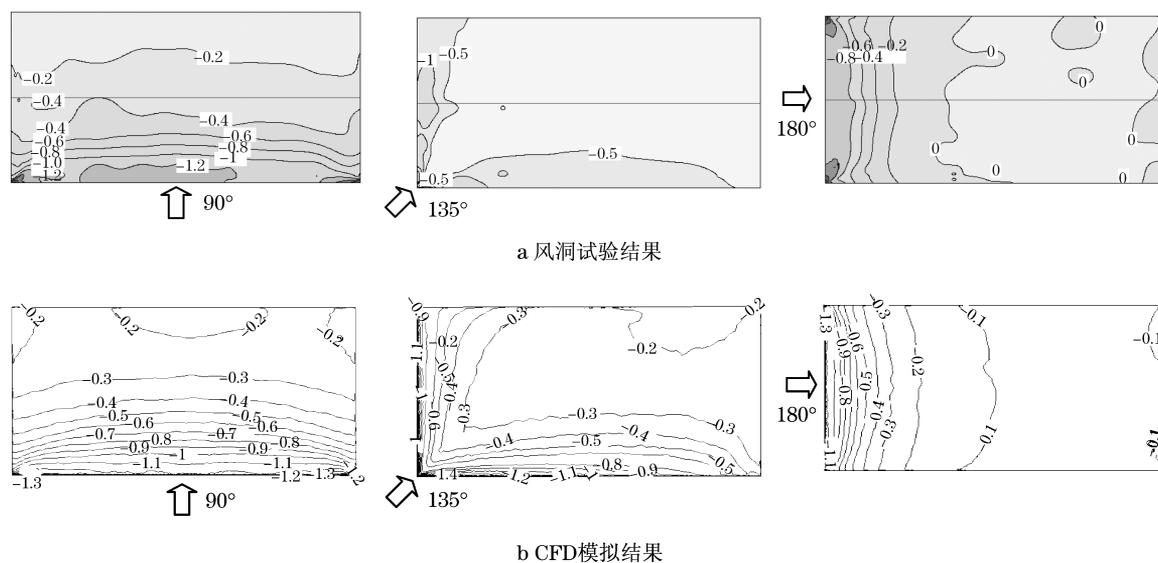


图 5 风洞试验和 CFD 模拟得到的屋面平均风压系数分布

Fig.5 Distribution of coefficients of mean wind pressure on the roof

### 2.3 数值模拟结果

在10 m高处风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的3种风向角下,积雪漂移12 h后厂房屋面上积雪的不均匀分布形式如图6所示.图中数值表示屋面上积雪漂移后的雪压,以雪压的不均匀分布来表示积雪深度的不均匀,大于0.45的表示积雪沉积,小于0.45的表示积雪侵蚀(初始均匀雪压为0.45 kPa).图中以曲线标示出积雪沉积区域.

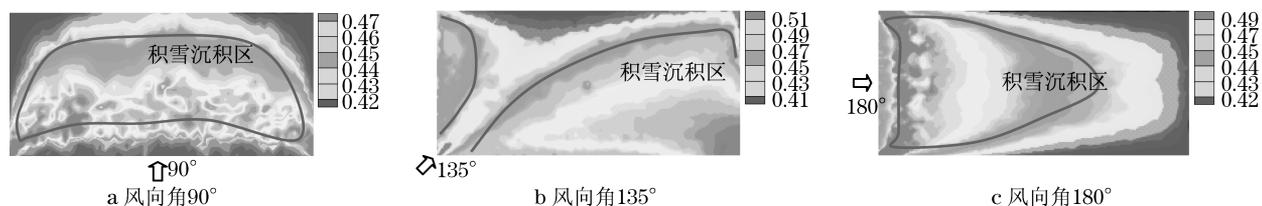


图6 屋面上的不均匀雪压分布(单位:kPa)

Fig.6 Distribution of non-uniform snow pressure on the roof (unit:kPa)

## 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,初步假设用于动力稳定性分析的风压不受积雪不均匀分布的影响.门式刚架厂房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.厂房的刚体模型(图7)在外形上与实物保持几何相似,几何缩尺比为1:100,模型表面布置462个测点.风洞中模拟了该结构所处的B类风场<sup>[20]</sup>.该结构位于强台风区,50年重现期的基本风压为0.80 kPa,试验参考点(风洞中2 m高处)的风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,测压信号采样频率约为312.5 Hz.在测压试验数据处理软件中,以PVC管长度、限制器尺寸及位置等为优化参数优化测压管路系统,同时直接修正测压管路系统<sup>[21]</sup>.来流风向角的定义与风雪耦合数值模拟中一致(图4),进行 $90^\circ$ , $135^\circ$ , $180^\circ$ 这三个风向角下的风洞试验.



图7 风洞试验中的刚体模型

Fig.7 Rigid model in the wind tunnel test

由图可见,在风力作用下,厂房屋面上的积雪发生较大范围的漂移,积雪沉积的程度大于积雪侵蚀(雪压增量最大值为0.06 kPa,雪压减量最大值为0.04 kPa).对比图5和图6的结果可以发现,屋面上积雪不均匀分布和风压系数分布在趋势上具有一定的联系.屋面迎风边缘气流局部分离造成的较大负压使积雪侵蚀,而在气流再附区积雪沉积.

根据风洞试验得到的风压数据,构造实际结构上的非定常气动力,然后将其作用于实际结构的有限元模型进行非线性动力分析.在刚性模型表面第*i*个测压点上 $t_j$ 时刻,以屋顶高度处风压为参考风压的压力系数为 $C_{p,j}$ ,则作用于实际结构表面的非定常气动力 $p_{ji}$ 为

$$p_{ji} = \rho u^2 C_{p,j} A_i / 2$$

式中: $\rho$ 为空气密度; $u$ 为屋顶高度处的风速; $A_i$ 为测压点的附属面积.根据相似定律 $(nL/u)_m = (nL/u)_s$ ( $n$ 为风场频率, $L$ 为几何尺寸; $u$ 为风速;下标 $m$ 表示模型, $s$ 表示实际结构),可得

$$n_s/n_m = (L_m/L_s)/(v_m/v_s)$$

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

$$\Delta t_s/\Delta t_m = (v_m/v_s)/(L_m/L_s)$$

由此就得到实际风场中的非定常气动力离散数据序列,即非定常气动力为 $p_{ji}$ ,时间间隔为 $\Delta t_s$ .通过荷载增大系数 $k$ 不断增加结构表面的非定常气动力,即作用于实际结构的非定常气动力为 $k \cdot p_{ji}$ .

## 4 动力稳定性分析

将同一风向角下的非定常气动力和风致漂移形成的不均匀积雪,同时作用于门式刚架厂房,并考虑结构自重.分析中,假设积雪结冰后积雪和屋面之间具有足够的黏性使二者成为统一的系统.当负压作用于积雪时,吸力由积雪传递至屋面,因此,将负压和不均匀积雪同时作用于屋面,与屋面的实际受力情况一致.通过荷载增大系数 $k$ 增加非定常气动力,

从而模拟实际风速的不断增大.同一风向角下,不均匀积雪的大小和分布保持不变.同时考虑几何和材料非线性,不断对结构系统进行非线性动力响应分析,得到结构系统最大位移响应随  $k$  的变化曲线.进一步根据 B-R 准则确定结构系统动力失稳时的荷载增大系数临界值  $k_d$ .B-R 准则认为,对结构系统进行非线性动力响应分析时,如果荷载的微小变化导致结构位移突然增加,则该荷载为结构系统的动力失稳临界荷载.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<sup>[22]</sup>.为了与风雪耦合作用下的动力稳定性结果对比,笔者也分析了仅有非定常气动力下门式刚架厂房的动力稳定性.

#### 4.1 计算参数

用空间梁单元来模拟厂房构件,构件间的连接与实际情况一致.将厂房基础作为刚性支承,约束全部自由度.材料参数:弹性模量常数为 200 GPa;密度为  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;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.

#### 4.2 计算结果及分析

在某一荷载增大系数  $k$  下,用结构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“最大位移响应”

$$\underline{w}_{\max} = \max\{\max(\underline{w}, T)\}$$

其中: $\underline{w}$  为结构上节点的位移响应; $T$  为总计算时间,这里为 10 min.

##### (1) 动力失稳临界风速

图 8 给出了不同风向角下门式刚架厂房的最大位移响应  $\underline{w}_{\max}$  随  $k$  的变化曲线.由图可见,仅有风荷载和风雪耦合作用,结构系统的最大位移响应均随非定常气动力的增加而增大,不均匀积雪使门式刚架厂房在风场中的位移响应大大增加.当  $k$  达到某一值时,位移响应突然增大,根据 B-R 准则,此时结构系统动力失稳.

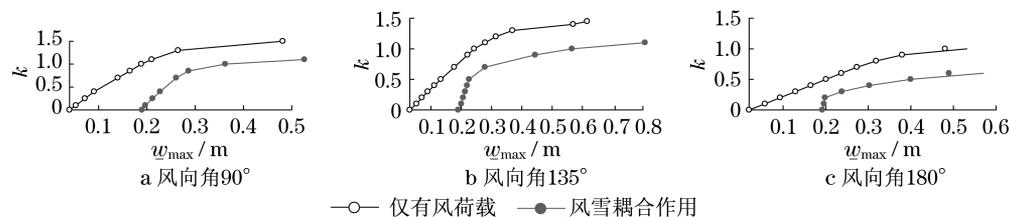


图 8 不同风向角下厂房的最大位移响应随  $k$  的变化

Fig.8 Variation of  $w_{\max}$  with  $k$  under different wind directions

根据图 8 的曲线,由 B-R 准则可得结构系统动力失稳时的荷载增大系数临界值  $k_d$ ,从而得到结构系统的动力失稳临界风速  $v_d$ (表 1).  $v_d = \sqrt{k_d} v_{10}$ ,  $v_{10}$  为实际结构所处风场 10 m 高处的风速(设计基本风速),本结构所处基本风压 0.8 kPa 对应的设计基本风速为  $35.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .表 1 中,积雪影响率为每 1 个风向角下仅有风荷载和风雪耦合作用下  $k_d$  或  $v_d$  的差值与仅有风荷载时  $k_d$  或  $v_d$  值之比,反映了不均匀积雪对动力稳定性的影响.这里,  $k < 1$  表示用于非线性动力响应分析的基本风速小于设计基本风速.因此,如果结构在  $k < 1$  时动力失稳,则该结构在其设计基本风速下处于动力不稳定状态,即该结构的抗风性能达不到设计要求.表 1 的结果指出,每种风向角下不均匀积雪均使结构系统动力失稳的  $k_d$  降低,即使结构系统的  $v_d$  降低.  $k_d$  值的最大降幅为 38%,  $v_d$  值的最大降幅为 22%.不同荷载作用下,  $v_d$  最大相差  $16.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .同时,不论是否存在不均匀积雪,均为风向角 180° 时

$k_d$  值最小,积雪影响率最大(图 9).因此,风向角 180° 为该门式刚架厂房动力失稳的控制风向.风雪耦合作用下,基本风速达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,门式刚架厂房首先在 180° 风向角下动力失稳.

表 1 不同风向角下的  $k_d$  和  $v_d$  值

Tab.1  $k_d$  and  $v_d$  under different wind directions

状况	$k_d$			$v_d / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	90°	135°	180°	90°	135°	180°
仅有风荷载	1.4	1.2	0.8	42.4	39.2	32.0
风雪耦合作用	1.0	0.9	0.5	35.8	34.0	25.3
积雪影响率/%	29.0	25.0	38.0	15.6	13.3	22.0

##### (2) 特征点的位移响应时程

将结构上产生“最大位移响应”的节点称为“特征点”,每个荷载增大系数  $k$  对应一个特征点,但不同  $k$  下的特征点可能相同.动力响应分析中,特征点的位移响应特点代表了整个结构系统的振动特点.通过对比不同  $k$  时特征点的位移响应时程,可进一

步了解结构系统的动力失稳过程.

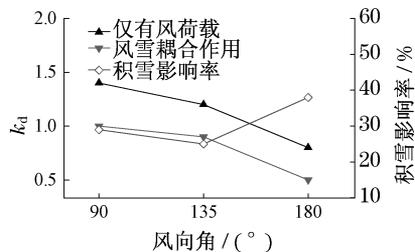


图9  $k_d$  值及积雪影响率随风向角的变化  
Fig.9 Variation of  $k_d$  and snow influence ratio with wind directions

研究发现,风向角为  $180^\circ$  时,仅有风荷载或风雪耦合作用时,门式刚架厂房的特征点均位于其屋面,即结构系统的最大位移响应位于屋面.图10给出了风向角为  $180^\circ$  时仅有风荷载和风雪耦合作用下特征点的位移响应时程,以正值表示向上的位移,负值表示向下的位移.由图可见,仅有风荷载时,屋面负压将屋面体系向上吸起振动;风雪耦合作用时,屋面在积雪作用下产生向下的位移,然后在非定常气动力作用下振动.两种荷载情况下,  $k$  较小时特征点的位移响应在整个计算时间内均保持平稳;随着  $k$  不断接近动力失稳临界值  $k_d$ ,特征点的振动平衡位置开始发生一次或多次跳跃,两种荷载情况下平衡位置发生跳跃的时刻几乎一致.风雪耦合场中,  $k$  从 0.5 增加至 0.6,相当于基本风速的增量为 9% (基本风速增加了  $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),而特征点的位移响应却相应增加了 4 倍多.因此,当  $k$  达到 0.5 时,门式刚架厂房发生动力失稳,与根据图8中曲线得到的荷载增大系数临界值  $k_d = 0.5$  一致.

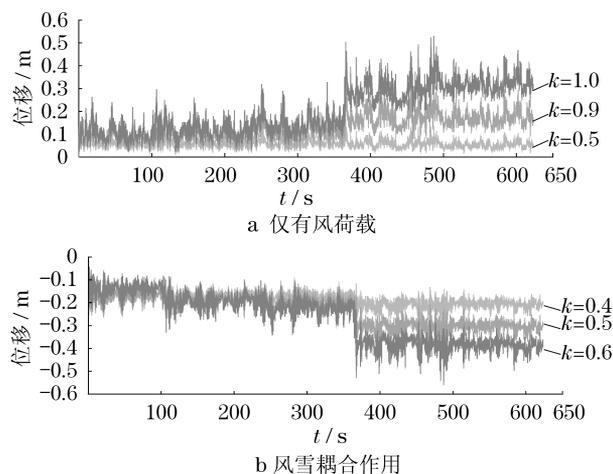


图10 风向角为  $180^\circ$  时不同  $k$  下特征点的位移响应时程  
Fig.10 Displacement histories of feature nodes under  $180^\circ$  wind

#### 4.3 与仅有不均匀积雪下的静力失稳结果比较

将数值模拟得到的不均匀分布雪荷载(初始均匀雪压为  $0.45 \text{ kPa}$ )作用于门式刚架厂房,不考虑风荷载,采用与动力失稳分析完全一样的材料参数,通过荷载参数  $\lambda$  按比例增加雪荷载,进行非线性静力稳定分析,得到门式刚架厂房发生静力失稳时对应的荷载参数临界值  $\lambda_{cr}$ .图11为不均匀雪荷载下门式刚架厂房的最大位移响应随  $\lambda$  的变化曲线,由此可得  $\lambda_{cr} = 3$ ,即当雪压为数值模拟得到的不均匀雪压 3 倍时,门式刚架厂房发生静力失稳.对比风雪耦合作用下的动力稳定性结果可知,当基本风速为  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,在数值模拟得到的不均匀积雪作用下,门式刚架厂房将动力失稳,也即厂房在风雪耦合作用下动力失稳时,对应的  $\lambda_{cr} = 1$ ,小于仅考虑不均匀积雪时的  $\lambda_{cr} = 3$ .因此,风雪耦合作用下,门式刚架厂房的动力稳定研究中风荷载为不利因素,厂房屋面存在积雪时,风荷载将使结构系统的稳定性降低.

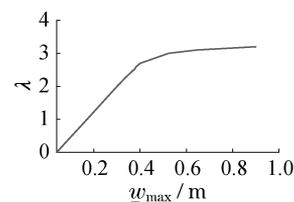


图11 不均匀积雪下厂房最大位移响应  $w_{\max}$  随  $\lambda$  的变化  
Fig.11 Variation of  $w_{\max}$  with  $\lambda$  under non-uniform snow loads

## 5 结论

(1) 数值模拟得到的屋面风压系数与风洞试验结果一致,验证了本文风雪耦合作用 CFD 模拟的正确性.模拟得到的积雪不均匀分布形式符合屋面上气流的运动规律,屋面迎风边缘气流局部分离造成的较大负压使积雪侵蚀,气流再附区积雪沉积.

(2) B-R 准则可用于判定门式刚架厂房在风雪耦合作用下的动力稳定性.不均匀积雪使门式刚架厂房在风场中的动力稳定性显著降低,荷载增大系数临界值  $k_d$  比仅有风荷载时降低 38%,动力失稳临界风速  $v_d$  比仅有风荷载时降低 22%.

(3) 沿厂房长边方向的来流是该门式刚架厂房动力失稳的控制风向,该风向下基本风速达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,门式刚架厂房可能发生动力失稳.

(4) 通过特征点的位移响应时程,可细致了解

结构系统发生动力失稳的整个过程. 动力失稳时, 特征点的振动平衡位置在计算时间内跳跃一次或多次, 同时位移响应突然增加.

(5) 与外荷载仅为不均匀雪荷载而无风荷载的情况相比, 考虑风雪耦合作用时, 结构系统的动力稳定性更差, 也即风荷载为不利因素.

#### 参考文献:

- [1] 张延年, 王元清, 石永久, 等. 某网架结构厂房雪灾后安全性检测[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(5): 877.  
ZHANG Yannian, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. The security detection of a spatial grid steel structure of light-weight building after snow disaster [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2009, 25(5): 877.
- [2] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 门式刚架轻型房屋钢结构雪灾事故分析与反思[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 65.  
WANG Yuanqing, HU Zongwen, SHI Yongjiu, et al. Analysis and reflection on snow disaster accidents of steel structures of light-weight buildings with portal frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 65.
- [3] 蓝声宁, 钟新谷. 湘潭轻型钢结构厂房雪灾受损分析与思考[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 71.  
Lan S N, Zhong X G. Damage diagnoses and lessons learnt from the failure of lightsteel structure by heavy snow in Xiangtan[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 71.
- [4] Holzer S M. Static and dynamic stability of reticulated shells [C]// Structural Stability Research Council. International Colloquium on Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads. New York: American Society of Civil Engineers, 1977: 27-39.
- [5] 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: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2002.  
GUO Haishan. Dynamic instability and earthquake resistance of single-layer spherical shells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, College of Civil Engineering, 2002.
- [6] Li Y, Tamura Y. Nonlinear dynamic analysis for larg-span single-layer reticulated shells subjected to wind loading [J]. Wind and Structures, 2005, 8(1): 35.
- [7] Mellor M. Blowing snow cold regions science and engineering (Part III) [R]. Hampshire: Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1965.
- [8] 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.
- [9] Sato T, Uematsu T, Nakata T, et al. Three dimensional numerical simulation of snowdrift [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46/47: 741.
- [10] Budiansky B, Roth R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells [R]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration TND - 510, 1962: 597-606.
- [11] 张其林. 轻型门式刚架 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2006.  
ZHANG Qilin. Light-weight portal frames [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 2006.
- [12] 中国工程建设标准化协会. CECS102—2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
China Engineering Construction Standardization Association. CECS102—2002 Technical specification for steel structure of light-weight buildings with gabled frames [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [13] 周恒毅, 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.  
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.
- [14] Liston G E, Sturm M. A snow transport model for complex terrain [J]. Journal of Glaciology, 1998, 44(148): 498.
- [15] 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 P. R. China. GB50009—2001 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [16] Tabler R D. Snow fence handbook [M]. Wyoming: Tabler & Associates Press, 1988.
- [17] Architectural Institute of Japan. AIJ - RLB—2004 AIJ recommendations for loads on building [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1995.
- [18] Schmidt R A. Properties of blowing snow [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(1): 39.
- [19] Gamble S L, Kochanski W W, Irwin P A. Finite area element snow loading prediction-applications and advancements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(44): 1537.
- [20] 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.  
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.
- [21] 周恒毅. 大跨屋盖结构风荷载及风致响应研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2004.  
ZHOU Xuanyi. Study on wind loads and wind-induced response of large-span roof [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2004.
- [22] Hsu C S. On dynamic stability of elastic bodies with prescribed initial conditions [J]. Int J Engng Sci, 1966, 4(1): 1.