

文章编号: 1000-4750(2006)01-0057-05

单层网壳结构等效静风荷载分布估计

*李元齐¹, 田村幸雄², 沈祖炎¹

(1. 同济大学建筑工程系, 上海 200092; 2. 东京工业大学风工程研究中心, 日本 厚木 243-0297)

摘 要: 单层网壳对外荷载分布极为敏感, 且稳定问题是其结构设计中的主要问题, 因此风荷载分布的估计对其结构静力抗风分析非常重要。但目前常采用的等效静风荷载分布并不能有效反映其脉动分量对结构稳定性的可能不利影响。首先简单回顾了目前单层网壳抗风分析的方法, 并介绍了一种基于风洞试验的有效风荷载分布估计方案。随后从稳定分析角度提出了一种新方法, 可用来简单高效地估计单层网壳的有效风荷载分布, 同时还可就风荷载的影响进行保守分析。最后, 分别采用单层球面和柱面网壳作为算例, 基于风洞试验结果, 比较了不同估计方法在分析这类结构极限承载能力及稳定性问题时的效率, 表明了所提出方法在单层网壳稳定分析中估计有效风荷载分布时的优点。

关键词: 单层网壳; 稳定性; 风荷载; 风洞试验; 有效风荷载分布; 最不利风荷载分布

中图分类号: TU311.4; TU394 **文献标识号:** A

ESTIMATION OF EQUIVALENT STATIC WIND LOAD DISTRIBUTION FOR SINGLE-LAYER RETICULATED SHELLS

*LI Yuan-qi¹, Tamura Yukio², SHEN Zu-yan¹

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tokyo Polytechnic University, Atsugi 243-0297, Japan)

Abstract: Wind load estimation is very important to single-layer reticulated shells since this system is sensitive to external load distribution, and stability analysis is a main problem in structural design. However, the current estimated equivalent static wind load may not reflect the actual effect of fluctuating wind load on the stability of the shells. In this paper, existing methods used to estimate equivalent static wind load distribution are briefly reviewed. A framework to estimate the effective static wind load distribution for the single-layer reticulated shells based on wind tunnel tests is introduced. Then, a new simple method on the basis of stability analysis is presented to give a conservative estimation of wind load effects, and to improve the efficiency in estimating the effective static wind load distribution. Finally, by comparative analysis of a spherical and a cylindrical single-layer reticulated shell with different methods mentioned and wind tunnel tests, the efficiency of the present method for limit load-carrying capacity and stability analysis of single-layer reticulated shells is demonstrated.

Key words: single-layer reticulated shells; stability; wind load; wind tunnel test; effective static wind load distribution; most unfavorable wind load distribution

网壳结构是一种同时具有杆系结构及薄壳结构优点的空间网格结构体系。在其结构设计中, 结构变形及稳定性通常是主要问题, 且有时必须考虑

其几何非线性特性^[1,2]。同时, 这种结构体系对初始缺陷的分布非常敏感。另一方面, 结构使用阶段实际可能遭受的外荷载分布与设计阶段估计的荷载

收稿日期: 2004-04-12; 修改日期: 2004-06-16

基金项目: 日本东京工业大学 21 世纪 COE 项目; 国家自然科学基金项目(50508024)

作者简介: *李元齐(1971), 男, 湖北云梦人, 副研究员, 博士后, 从事结构工程研究(liyq@mail.tongji.edu.cn);

Yukio Tamura(1947), 男, 日本神奈川县大和市人, 教授, 博士, 同济大学顾问教授, 从事结构工程及风工程研究;

沈祖炎(1935), 男, 浙江杭州人, 教授, 博导, 从事结构工程研究。

分布之间的差别,或者可称之为“荷载缺陷”,也可能给实际结构的稳定性带来重要影响。所有这些缺陷都可能导致一种与设计阶段所估计的完全不同的实际失稳模态,并且这种失稳模态通常对应于相对较低的极限承载力^[3]。这种影响将随着结构跨度的增加而变得越来越明显。目前,这类结构的抗风分析仍采用基于准定常假定的等效静力分析方法,并通过经验的风振系数来反映其动力影响。但考虑到脉动风荷载的随机特性,即使采用较大的经验系数,也很难说这类结构的抗风设计足够安全。本文首先简单回顾了目前单层网壳结构抗风分析的方法,并介绍了一种基于风洞试验结果进行有效风荷载分布估计方案。在此基础上,从稳定分析的角度提出了一种新的方法,可用来简单高效地估计单层网壳结构的有效风荷载分布,同时还可以就风荷载对结构的影响进行保守地分析。最后,分别采用一个单层球面网壳和一个单层柱面网壳作为算例,基于风洞试验的结果,比较考察了不同估计方法在分析这类结构的极限承载能力及稳定性问题时的效率。结果表明,本文提出的分析策略和方法在估计单层网壳结构有效风荷载分布时具有很大的优点。

1 单层网壳结构等效静力抗风分析

在单层网壳结构抗风分析的等效静力方法中,假定包含风荷载的任一种荷载工况的总静荷载向量 $\{P\}$ 可表示为:

$$\{P\} = C_D \{F_D\} + C_L \{F_L\} + C_W \{F_W\} \quad (1)$$

式中, $\{F_D\}$ 、 $\{F_L\}$ 及 $\{F_W\}$ 分别是恒荷载向量、活荷载向量及风荷载向量; C_D 、 C_L 及 C_W 是相应的荷载组合系数。一般情况下, $\{F_D\}$ 、 $\{F_L\}$ 、 C_D 、 C_L 及 C_W 可参考相应的荷载规范确定。

至于风荷载向量 $\{F_W\}$,目前仍无相应的专门规范可供参考。它可以分为两个部分,即对应于壳体表面平均风压分布的平均分量 $\{\bar{F}_w\}$ 和对应于壳体表面脉动风压分布的等效静力分量 $\{F'_w\}$:

$$\{F_W\} = \{\bar{F}_w\} + \{F'_w\} \quad (2)$$

式中,风荷载的随机特性可由分量 $\{F'_w\}$ 来反映。

在结构稳定跟踪分析中,增量形式的非线性静力分析平衡方程可表示为:

$$[K_t] \{\Delta u\} = \{\Delta P\} + \{R\} \quad (3)$$

式中, $[K_t]$ 为当前切线刚度矩阵; $\{\Delta u\}$ 和 $\{\Delta P\}$ 分

别是位移和荷载增量向量; $\{R\}$ 是残余力向量。

对式(3),可采用弧长法进行结构平衡路径的跟踪分析^[4],以得到结构对应于相应荷载工况的极限承载能力。一般采用假定比例加载方式,即 $\{\Delta P\} = \Delta \lambda \{P\}$,其中 $\Delta \lambda$ 是荷载增量参数, $\{P\}$ 是外荷载参考向量。则分析得到的 λ 的极限值 λ_{cr} 可以代表结构极限承载能力。

2 等效静风荷载分布估计

2.1 阵风系数类方法

目前普遍采用的阵风系数类方法^[5]可通过阵风系数 G_f 给定如下结构等效静风荷载分布估计:

$$\{F_W\} = G_f \{\bar{F}_w\} \quad (4)$$

这种方法实际假定等效脉动风压分量与平均风压分量具有相同分布,这在某些情况下并不妥当。尽管该方法在实际设计中简单明了,其缺点对单层网壳结构的抗风分析而言是非常明显的。

2.2 有效静荷载分布估计法

单层网壳结构的等效静风荷载分布可通过有效静荷载分布估计法进行分析,以得到所考虑的结构响应变量 r 的最大或最小值。在这种方法中,等效静风荷载分布可分为三个部分^[6]:

$$\{F_i\} = \{\bar{F}_i\} + W_B \{F_{Bi}\} + W_R \{F_{Ri}\} \quad (5)$$

式中, \bar{F}_i 、 F_{Bi} 和 F_{Ri} 分别是节点 i 处等效静风荷载的平均分量、背景分量及共振分量。 W_B 和 W_R 是相应的权数,分别由下式给定:

$$|W_B| = \frac{g_B \sigma_{r,B}}{(g_B^2 \sigma_{r,B}^2 + g_R^2 \sigma_{r,R}^2)^{1/2}} \quad (6a)$$

$$|W_R| = \frac{g_R \sigma_{r,R}}{(g_B^2 \sigma_{r,B}^2 + g_R^2 \sigma_{r,R}^2)^{1/2}} \quad (6b)$$

式中, g_B 和 g_R 分别是背景及共振分量的峰值系数; $\sigma_{r,B}$ 和 $\sigma_{r,R}$ 分别是所考虑响应变量 r 对应的有效静风荷载分布的背景及共振分量的标准方差。

2.2.1 平均分量的估计

节点 i 处等效静风荷载的平均分量可估为:

$$\bar{F}_i = \bar{C}_{pi} q_h A_i = 0.5 \bar{C}_{pi} \rho_a \bar{V}_h^2 A_i \quad (7)$$

式中, \bar{C}_{pi} 是节点 i 处平均风压系数, q_h 是参考高度的参考风压; ρ_a 空气密度; \bar{V}_h 是平均参考风速; A_i 是节点 i 处的迎风面积。

2.2.2 背景分量的估计

对节点 i 处等效静风荷载的背景分量,可采用荷载—响应相关法^[7]进行分析:

$$F_{Bi} = g_B \rho_{r,pi} \sigma_{pi} A_i = g_B \rho_{r,pi} C'_{pi} q_h A_i \quad (8)$$

式中,背景分量的峰值系数 g_B 一般取 2.5~5; $\rho_{r,pi}$ 是节点 i 处响应变量和风压的相关系数; C'_{pi} 是节点 i 处脉动风压系数。

2.2.3 共振分量的估计

等效静风荷载的共振分量可通过对应于各个振动模态惯性力的加权叠加近似估计^[6]:

$$\{F_{Ri}\} = \sum_j^M W_{Rj} [M] \{\phi_j\} \quad (9)$$

式中, W_{Rj} 是对应第 j 模态的权数; $\{\phi_j\}$ 是模态分析中得到的结构第 j 模态向量; $[M]$ 为质量矩阵。

采用有效静荷载分布估计法估计的风荷载分布用来分析所考虑响应变量 r 的最大或最小值。但对单层网壳抗风分析而言,仍存在一个问题,即如何确定适当的参考响应变量来采用有效静荷载分布估计法进行风荷载分布分析,以便得到风荷载下考虑结构稳定性的最不利风荷载分布。本文提出一种简单方法,用来确定采用有效静荷载分布估计法时所需的适当参考响应变量,同时也可保守地估计风荷载对结构稳定性的影响。

2.3 从稳定问题出发的最不利风荷载分布估计

既然单层网壳在结构设计中的主要问题是稳定和变形分析,且脉动风荷载分量的随机特性可视作为一种荷载缺陷,我们可采用结构相应的可能失稳模态来保守地估计脉动风荷载分量的影响。这种被称之为“一致缺陷模态法”的方法常用于结构缺陷敏感性分析,且被证明非常有效^[3]。本文基于一致缺陷模态法的思想,提出一种可称之为“最不利风荷载分布估计”的简单方法,来保守估计风荷载对结构稳定性的影响。假定在包含 $\{\bar{F}_W\}$ 的任一荷载工况下,结构分析中 $[K_i]$ 在第 $i+1$ 增量步变为非正定,这意味着结构平衡路径可能出现极值点或分枝点。于是让计算返回到这一步的初始状态,并对当前刚度矩阵作模态分析以得到结构当前可能的失稳模态。选定可能失稳模态 $\{v\}$, 则一种最不利的风荷载分布可近似表示为:

$$\{F_W\} = \{\bar{F}_W\} + \{\varepsilon_i\} \sigma_{F_w} = \{\bar{F}_W\} + \{\varepsilon_i A_i\} g \rho_a \bar{V}_h \sigma_v \quad (10)$$

式中, $\{\varepsilon_i\}$ 是乘积 $[K_i] \{v\}$ 的归一化向量,被视作脉动风荷载分量的最不利分布; g 是一峰值系数,位于 2.5~5.0 之间; A_i 为相应迎风面积。

在这种方法中,脉动分量的幅度仍按惯例采用一个统一的峰值系数 g 来表示。既然脉动分量是一

个随机变量,可将可能的失稳模态视作其最不利分布的估计。这样,就可以对脉动分量对结构变形及稳定性的影响作一个保守的估计,同时可以确定一个适当的响应变量进行更精确的等效静风荷载估计,用于单层网壳结构的稳定性分析。

3 算例分析

3.1 分析模型

本文采用两个代表性模型,即球面和柱面单层网壳作为算例来分析以上不同方法在分析壳体结构极限承载能力和稳定性中的效率。图 1(a)所示 Kewitt 型单层球面网壳跨度 $L=120\text{m}$, 矢高 $f=40\text{m}$, 杆件截面 $\phi 200 \times 8\text{mm}$ 。图 1(b)所示单层柱面网壳跨度 $L=129.2\text{m}$, 纵向宽度 $B=L$, 矢高 $f=43.1\text{m}$, 杆件截面 $\phi 750 \times 24\text{mm}$ 。两模型所有底部节点都假定刚接。

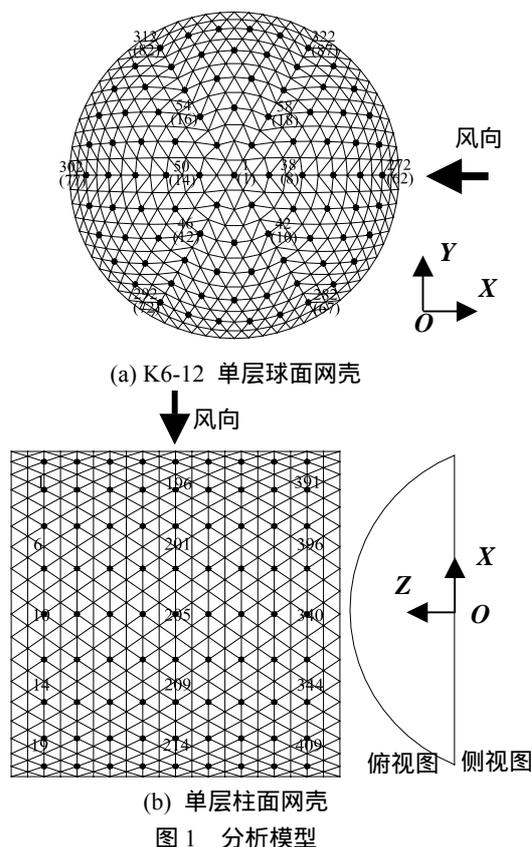


Fig.1 Analysis models

3.2 测定风压分布的刚性模型风洞试验

为得到壳体表面风压分布特性,在东京工业大学风工程研究中心低速边界层风洞中进行了相应的缩尺模型风洞试验。该风洞试验断面高 1.8m, 宽 2m, 长约 19m。采用三角风挡板加布置粗糙元的方法,成功模拟出日本建筑学会^[8]定义的 III 类场地风

剖面,对应指数法则的指数 $\alpha=0.2^{[9]}$ 。模型尺寸由风洞尺度比 1:400 确定。根据惯例,模型顶部相同高度处风速及相应速度压被视为参考风速及参考速度压。模型尺寸及表面测点分布见图 2。各点同步采样频率为 1000Hz。图 3 及图 4 分别给出两个模型同步测出的平均及脉动风压系数分布的结果,与相近模型试验结果一致^[10],模型表面除迎风面小部分区域存在正压外,大部分区域是负压。

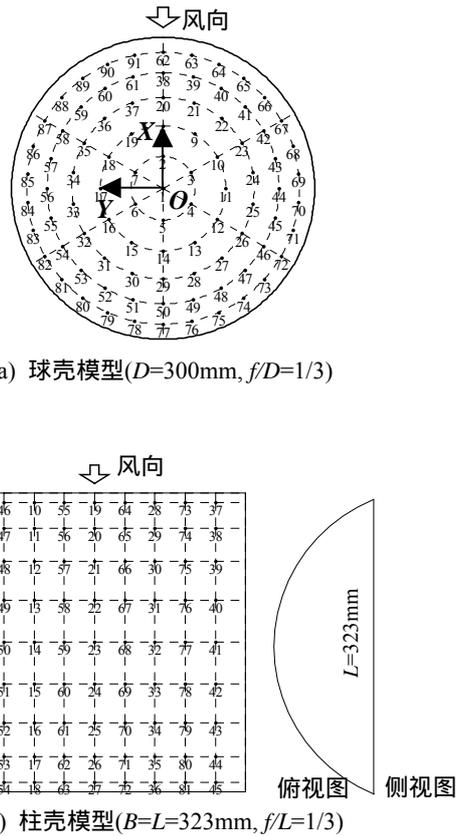


图 2 风洞试验模型及表面测点编号

Fig.2 Wind tunnel test models and tap numbering

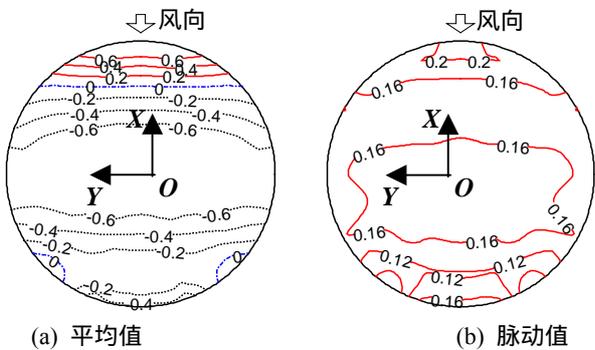


图 3 球壳模型风压系数分布

Fig.3 Wind pressure coefficient distribution on spherical shell model

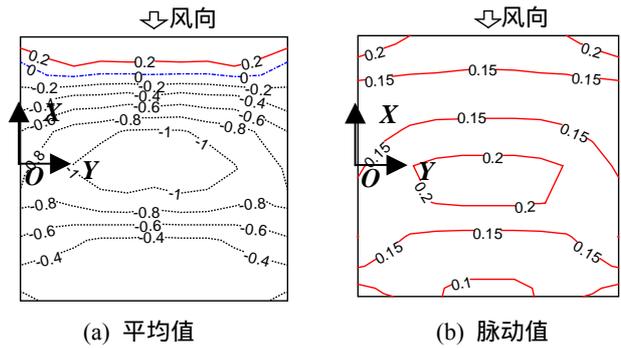


图 4 柱壳模型风压系数分布

Fig.4 Wind pressure coefficient distribution on cylindrical shell model

3.3 比较性分析

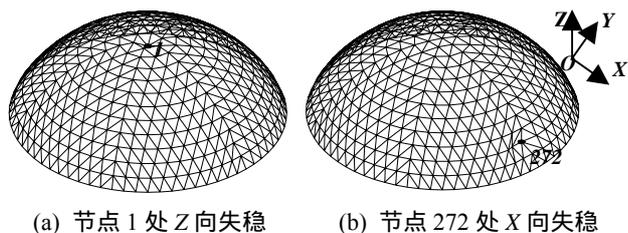
为比较以上提及的不同方法所估计的风荷载分布在分析壳体结构极限承载力和稳定性中的效率,我们分析了以上球面及柱面分析模型在不同的估计静风荷载分布作用下的极限承载力和稳定性。同时,基于风洞试验中同步测到的风压分布数据,采用文献[11]提出的动力非线性分析策略对球面及柱面单层网壳进行非线性动力时程分析,得到动力稳定分析的极限承载能力。本文假定基本风压 $w_0=0.5\text{kN/m}^2$,对应设计风速 V_h 约 28m/s。若 C_D 、 C_L 和 C_W 皆简单地取 1,并假定分布恒荷载、分布活荷载及基本风压的比例为 1:0.25:0.5,则分布恒荷载和分布活荷载分别为 1.0kN/m^2 和 0.25kN/m^2 。表 1 给出了不同分析方法下的结果。其中,阵风系数法采用中国荷载规范^[12]方法。各模型中两种主要失稳模式分别如图 5 及图 6 所示。

表 1 不同方法下对应极限承载力及失稳模式

Table 1 Limit load-carrying capacities and instability modes using different methods

分析方法	球壳模型		柱壳模型	
	λ_{cr}	模式	λ_{cr}	模式
阵风系数法	16.2	图 5(a)	16.7	图 6(b)
	11.6	图 5(a)	12.5	图 6(b)
有效静荷载 (节点 1 的-Z 向)*			(节点 205 的-Z 向)*	
分布估计法	10.1	图 5(b)	11.4	图 6(b)
		(节点 272 的-X 向)*		(节点 201 的-X 向)*
最不利分布估计	4.0	图 5(b)	7.9	图 6(b)
动力稳定性分析	10.0	图 5(b)	11.5	图 6(b)

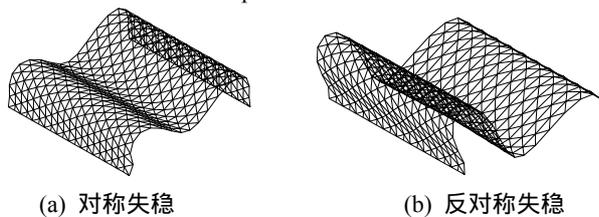
* 指有效静荷载分布估计法中采用的参考响应变量



(a) 节点 1 处 Z 向失稳 (b) 节点 272 处 X 向失稳

图 5 单层球面网壳两种主要的失稳模式

Fig.5 Main instability modes for single-layer reticulated spherical shell



(a) 对称失稳 (b) 反对称失稳

图 6 单层柱面网壳两种主要的失稳模式

Fig.6 Two main instability modes for single-layer reticulated cylindrical shell

从表1可以看出,(1)由于阵风系数法假定等效脉动风压分量与平均风压分量具有相同分布,它不适合用于单层网壳结构等效静风荷载分布的估计,特别是针对其风荷载作用下的稳定性问题进行分析时,较大的阵风系数可能导致更不安全的分析结果。(2)比较于动力稳定性分析结果,若选取的参考响应变量适当,有效静荷载分布估计法可以得到较为满意的有效静风荷载分布估计。(3)采用本文提出的最不利风荷载分布估计法,可以得到风荷载下结构极限承载力的保守估计及最不利失稳模式。前者对结构抗风初步设计简单有效,后者可对有效静风荷载分布估计中选取适当参考响应变量提供指导,从而提高其分析效率。(4)对单层柱面网壳,风荷载分布对其稳定性的影响明显低于单层球面网壳,这是因为反对称失稳模态总是其最不利的失稳模态,且可能出现在任一非对称荷载分布工况,譬如包含风荷载的荷载布工况。

4 结论

在采用等效静力方法对单层网壳进行抗风分析时,结构有效风荷载分布估计必须考虑风荷载中的脉动分量对结构稳定性的影响。本文基于风洞试验同步测到的风压分布,以单层柱面及球面网壳为例,对这类结构等效静力抗风分析中等效静力风荷载分布的估计方法进行了研究。结果表明,本文提出的最不利风荷载分布估计方法,可以在这类结构抗风设计初期简单地保守估计风荷载对结构

稳定的不利影响。同时,结合该方法,基于风洞试验结果,采用本文介绍的有效静荷载分布估计法可以高效地为这类结构的变形及稳定性分析进行有效风荷载分布的估计。

参考文献:

- [1] Gioncu, V. Buckling of reticulated shells: state-of-the-art [J]. *Int. J. Space Structures*, 1995, 10(1): 101~146.
- [2] 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, Spatial trusses and reticulated shells [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 李元齐. 大跨度拱支网壳结构稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 1998.
Li Yuanqi. Stability research on large-span arch-supported reticulated shell structures [D]. Shanghai: Tongji University Press, 1998. (in Chinese)
- [4] 李元齐, 沈祖炎. 弧长法中初始荷载增量符号确定准则的改进[J]. *工程力学*, 2001, 18(3): 34~39.
Li Yuanqi, Shen Zuyan. Improvement on the criterion for determination of initial loading incremental parameter in arc-length-type methods [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(3): 34~39. (in Chinese)
- [5] Solari G. A generalized definition of gust factor [J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1990, 36: 539~548.
- [6] Holmes J D. Wind loading of structures [M]. Spon Press, 2001.
- [7] Kasperski M, Niemann H J. The L.R.C. (Load-Response-Correlation) method: a general method of estimation unfavorable wind load distribution for linear and nonlinear structural behavior [J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1992, 43: 1753~1763.
- [8] Architectural Institute of Japan (AIJ). Recommendations for loads on buildings [M]. Published by AIJ, Architectural Institute of Japan, 1996.
- [9] Li Y Q, Tamura Y, Yoshida A, Katsumura A. Wind modeling in BLWT and discussion on several problems [A]. *Int. Conf. on Advances in Building Technology [C]*. Hong Kong, China, 2002. 1131~1138.
- [10] Uematsu Y, Yamada M, Inoue A, Hongo T. Wind load and wind-induced dynamic behavior of a single-layer latticed dome [J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1997, 66: 227~248.
- [11] Li Y Q, 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.
- [12] GB50009-2001. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB50009-2001, Loading code for building structures [S]. Beijing: China Architectural Industrial Press, 2001. (in Chinese)