

世博轴索膜结构风振响应数值模拟

汪大绥¹, 卢旦², 李承铭²

(1. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002; 2. 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 上海 200041)

摘要:将风速时程作为数值风洞的入口边界条件,采用非稳态计算方法,获得了世博轴索膜结构的表面风压时程。将该风压时程的统计平均值与采用稳态计算得到的平均风压做比较,验证了前者的准确性。分析结果表明:利用数值风洞非稳态计算获得的阵风系数将比现行《建筑结构荷载规范》中的数据更能反映脉动风的空间分布特性;由于风速模拟和数值风洞分别考虑了风荷载时间和空间的相关性,动力时程分析又包含了结构高阶振型的影响,将非稳态计算得到的风荷载时程直接加载到有限元模型上进行动力时程分析,与采用风振系数的等效静力风荷载方法相比,能较好地反映结构的实际风振情况。

关键词:膜结构;数值风洞;非稳态计算;风振响应;抗风设计

中图分类号:TU393.3 TU312.1 **文献标志码:**A

Numerical simulation on wind-induced response of membrane structure of the Expo Axis

WANG Dasui¹, LU Dan², LI Chengming²

(1. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200002, China;

2. Shanghai Xiandai Architectural Design (Group) Co. Ltd, Shanghai 200041, China)

Abstract: With the wind speed time history as the wind tunnel boundary conditions, the wind load time history on membrane structure of the Expo Axis was obtained by using unsteady state calculation. The precision of the unsteady state simulation was verified by comparison of the mean wind pressure using steady state calculation and the statistical average of the wind load time history. Analytical results indicate that the unsteady state simulation can take the spatial distribution of the fluctuating wind load into account. The wind loads from CFD simulation are directly acted on the FEM nodes to calculate the dynamic responses in time domain. The results show that the method can take spatial-temporal correlation of wind and higher modes influence into account. Therefore, wind-induced vibration can be described more accurately.

Keywords: membrane structure; numerical wind tunnel; unsteady state; wind-induced response; wind-resistant design

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目世博科技专项;世博轴及地下综合体关键技术研究(08dz0580300),国家科技支撑计划项目世博科技专项;世博轴及地下综合体关键技术研究(2009BAK43B06)。

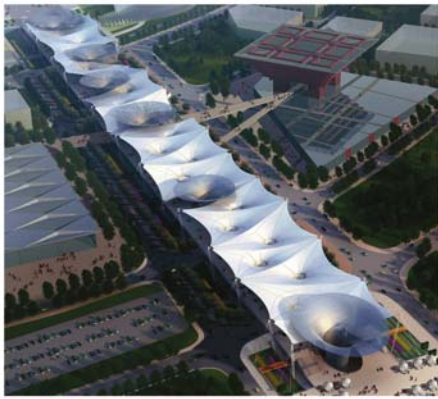
作者简介:汪大绥(1942—),男,江西乐平人,国家设计大师。E-mail:dasui_wang@ecadi.com

通讯作者:卢旦(1978—),男,浙江上虞人,高级工程师。E-mail:dan_lu@xd-ad.com.cn

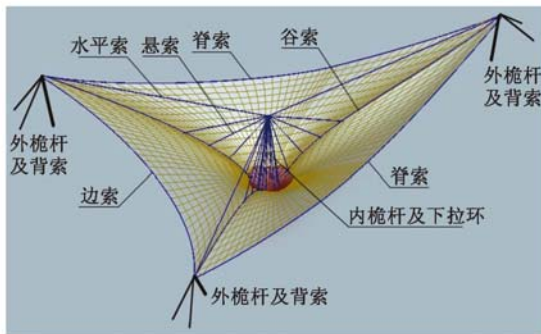
收稿日期:2009年10月

1 工程概况

作为 2010 年上海世博会立体交通组织重要载体的世博轴,由两层地下空间和一层高架步道组成。6 个钢结构阳光谷将地下空间和高架步道连为一体。阳光谷采用三角形网格组成的单层空间网格结构体系,总面积为 31500m²,每个阳光谷高 41.5m,底部直径最大约 20m,顶部直径最大近 90m。高架步道上覆连续张拉式索膜结构顶棚,总长约 840m,最大跨度约 97m,总面积近 64000m²。索膜结构包括支承系统和膜面系统两部分。支承系统通过通过水平索将 31 组外桅杆及背索、19 个下拉点,18 个与阳光谷的拉结点连接成稳定体系。膜面采用国家 A 级 PTFE 膜材,有脊索、边索和谷索形成连续的三角倒锥形膜单元。膜结构轻盈飘逸,阳光谷晶莹剔透,见图 1。



(a) 世博轴鸟瞰图



(b) 索膜结构的组成

图 1 世博轴鸟瞰图与膜结构的组成

Fig. 1 Perspective view of the Expo Axis and composition of membrane structure

世博轴地处台风多发的上海地区(50 年重现期基本风压 0.55kN/m²),项目现场位于黄浦江畔,周边地形开阔无高大建筑阻挡,属 C 类地貌。膜结构最大标高 35m,平均标高超出 10m 高平台约 15m,属于低矮房屋。对于此类建筑,GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[1]既无体型系数可供参考,更无风振

系数的计算方法。

文献[2]基于 Fluent6 软件平台,利用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对世博轴大跨度膜结构屋面的平均风荷载进行了稳态数值模拟研究。并通过与刚性模型测压风洞试验结果的对比,验证了数值模拟计算的有效性。

为确保该建筑设计的安全、经济、合理,本文对该膜结构表面风压进行了数值风洞模拟计算,并由数值风洞获得的风荷载时程计算了结构的风振响应,从而获得了该复杂体型建筑的平均风压与脉动风压的分布,以及结构的风致振动响应,供结构设计参考。

2 数值风洞

根据大量风的实测资料可以看出,在风的时程曲线中,瞬时风速 $u(t)$ 包含两部分^[3]:一部分是长周期部分,其值在 10min 以上;另一部分是短周期部分,常只有几秒钟左右,如图 2 所示。通常将风速分为平均风速 \bar{u} (即稳定风)和脉动风速 \bar{u}' (即阵风脉动)进行分析。

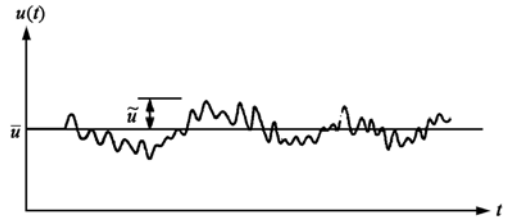


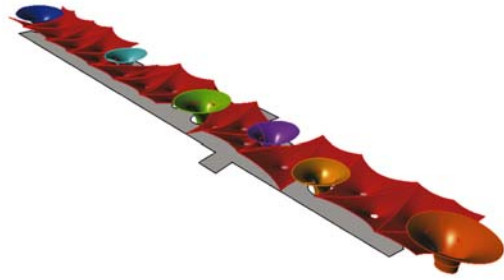
图 2 风速时程曲线

Fig. 2 Wind speed time history

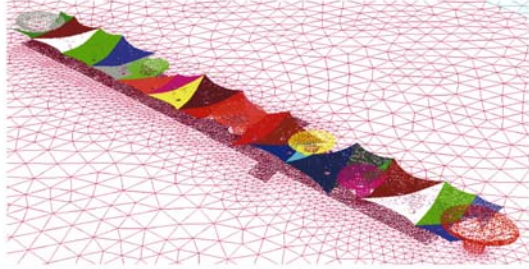
在计算流体动力学中按物理量与时间相关性可分为与时间无关的稳态计算和与时间相关的非稳态计算。稳定风可按稳态方法进行分析,其计算结果可直接获得结构的体型系数。而对非稳态计算得到的风荷载时程数据取平均值同样可获得结构的平均风压。因此本文对采用稳态计算和非稳态计算获得的平均风压进行比较,以探讨数值计算的准确性。并在此基础上,进一步利用非稳态计算得到的风荷载时程进行结构的动力时程分析。

2.1 几何模型的建立

在数值模拟中按 1:1 尺寸建立世博轴的计算模型,模型包含对风荷载有影响的阳光谷、10m 高平台等其他建筑。整个计算流域范围确定为宽 1500m、高 200m、长度 3200m 的空间区域,通过设置对称边界条件模拟整个大气环境并有效减小数值风洞的网格数量。模型位于距离数值风洞入口边界约 1000m,距离数值风洞出口约 2000m。几何模型和计算网格如图 3 所示,风向角定义如图 4 所示。



(a) 几何模型



(b) 计算网格

图3 模型的建立
Fig. 3 CFD model

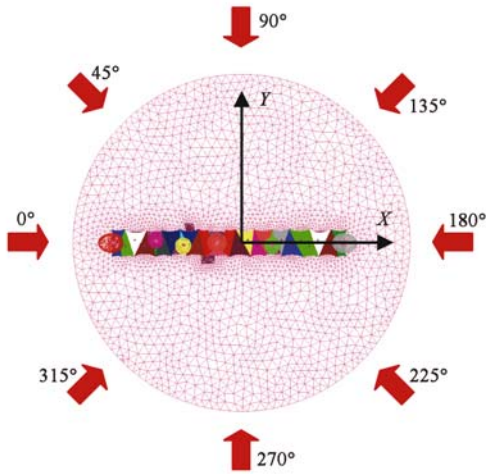


图4 模型方位、风向角及坐标轴定义
Fig. 4 Orientation, wind direction and coordinate definitions of model

2.2 湍流模型选取

稳态计算采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型 (Realizable $k-\varepsilon$)，相对于标准 $k-\varepsilon$ 方程在 C_μ 的计算和耗散率的控制方程上进行了改进。

非稳态计算选用大涡模拟。大涡模拟属于直接数值计算和一般模式理论的折衷方法，其原理是将流动中的旋涡分成大涡和小涡，对大涡进行直接求解，对小涡采用亚格子尺度模型进行计算。相比于一般的模式理论，如 $k-\varepsilon$ 模型方法，大涡模拟可更准确地预测非定常流场以及钝体绕流中的各种现象和各物理量^[4]。

2.3 大气边界层模拟

入流面选用速度入口 (Velocity inlet)。按 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[1]，风场分各类地貌进行描述，离地面不同高度处的风速剖面可用指数规律描述为：

$$\bar{u}_z = u_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中， \bar{u}_0 为离地面 h_0 高度处的平均风速， u_z 为离地面高度 h 处的平均风速。

大气边界的空气流动，有着无数强度不同的涡流，湍流强度随离地面高度的增加而减小，它与平均风速、时距以及地面粗糙度有关。湍流强度 I_u 随离地面高度 h 的变化按式(2)确定。

$$I_u = B \left(\frac{h}{h_T} \right)^{-\alpha-0.05} \quad (2)$$

式中， h_T 为梯度风高度，当 $h_T = 30\text{m}$ 时， B 为待定系数，此处可取地面粗糙系数 α 。

对于非稳态计算在明确以上风荷载特征及统计规律的基础上可以用随机过程模拟的方法得到脉动风速作为入口风速。本文采用文献[5]中的谐波叠加法，在数值风洞入口边界的每一单元中心位置处进行风速时程模拟，程序中引入快速傅立叶变换 FFT 算法以提高计算效率。

2.4 脉动风的无散度化运算与流量修正

用上述模拟得到的时间序列还不能直接代入到实际的风压进行计算，因为脉动风速的时间序列并不一定能保证连续性方程的成立，因此，必须将边界条件中的风速作无散度化处理^[6]，即：

$$u'_i(n+1) = u_i(n+1) - \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Delta P(n)}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Delta P(n)}{\partial x_i^2} = \frac{\partial u_i(n+1)}{\partial x_i} \quad (4)$$

式中， $u_i(n+1)$ 为第 i 单元在 $n+1$ 时刻修正前的瞬时速度， $u'_i(n+1)$ 为第 i 单元在 $n+1$ 时刻修正后的瞬时速度； $\Delta P(n)$ 为由泊松方程中得到的压力梯度修正项。

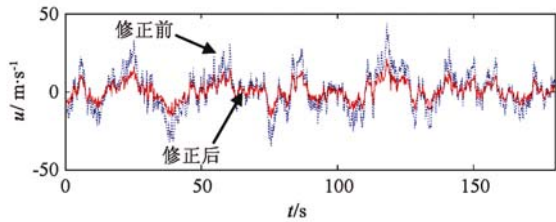
为避免流量的不平衡影响计算结果的收敛，在实际计算中还使用了流量修正的方法，即在计算的每个时间步上对入口处的总流量进行修正，让流动的进出口流量保持一致。修正速度按式(5)计算。

$$\Delta u = - \left(\sum_{i=1}^n u_i A_i - S' \right) / A \quad (5)$$

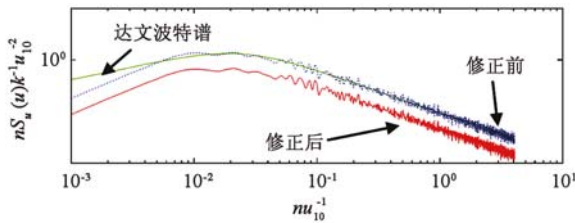
式中， u_i 为入口处第 i 单元的脉动速度， A_i 为 i 单元面积， A 为风速入口处的总面积， S' 为该时间步出口处的流量。入口处每一单元上的脉动速度经过无散度化后还需叠加上修正速度 Δu ，最后得到的脉动风速时程才可以代入到风荷载数值模拟计算的边界条

件中。

数值风洞入口共 408 个网格,在每个网格中心点处输入一条模拟得到的风速时程。由于达文波特谱^[3]与高度无关而《规范》^[1]要求湍流度剖面满足式(2),因此必须将上述风速数据经过湍流度和流量修正,得到真正实用的非稳态计算入口边界。图 5 所示为入口边界离地 268m 高度处一网格中心点位置经过湍流度和流量修正前后的风速时程和脉动风速谱的比较。从图中可以看出,经过修正,尤其是经过湍流度修正后的脉动风能量明显下降。



(a) 经湍流度和流量修正前后的风速时程



(b) 经湍流度和流量修正前后的风速谱

图 5 入口边界离地 268m 高度处的风速模拟与修正
Fig. 5 Wind speed simulation and correction with height of 268m at inlet boundary

3 表面风压特性分析

3.1 稳态与非稳态平均风压计算结果比较

图 6 为稳态计算得到的膜结构上表面 90° 风向角工况下的平均风压云图。非稳态计算得到的首先是某点的风压时程数据,将该数据在时间上求平均值可得到该点的平均风压。表 1 列出了图 6 中的 4 个典型观测点(其中,1#、2#观测点为三角形膜片的形心位置,3#观测点为静力风荷载作用下膜面向下位移最大值点处,4#观测点为边索中部位置)在 90° 风向工况下的稳态平均风压计算结果与采用非稳态计算统计得到的平均风压结果的比较。

从表 1 中可以看出二者之间的误差非常较小。非稳态计算与稳态计算两者采用的是完全不同的计算方法,入口边界条件也完全不同,而二者计算结果之间的差距如此之小充分说明了这两种计算方法的正确性。

3.2 脉动风

对于膜结构,由于其刚度一般较小,在风荷载作

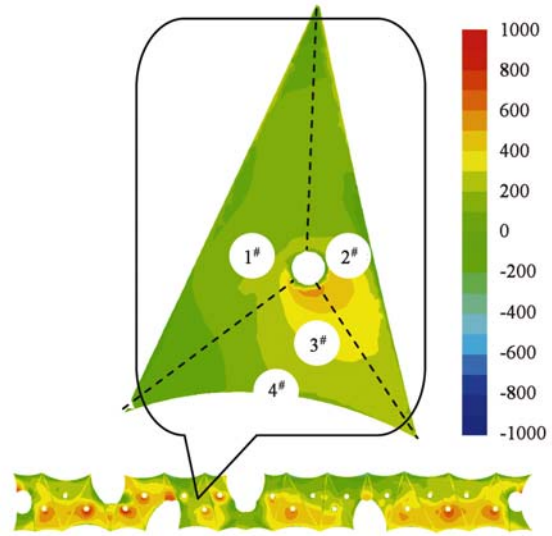


图 6 稳态计算得到的膜结构上表面 90° 风向角工况下风压云图(单位: N/m²)

Fig. 6 Mean pressure contour map of membrane at wind attack angle of 90° by steady state simulation

用下主要考虑结构的风振响应。但根据经验在离开边缘约 2m 范围的膜面,由于风荷载的分离和脱落现象比较显著,脉动风的作用可能会占主导地位。由于计算流体动力学 CFD 稳态计算的结果无法获得脉动风的相关信息,此时仍应采用非稳态计算先获得风压时程,然后经统计获得局部区域的体型系数 μ_{sl} 和阵风系数 β_{gz} 。表 1 列出了图 6 中 4 个观测点处的局部体型系数和阵风系数。

从表 1 中 CFD 计算获得和按规范求得的阵风系数的比较可以看出,规范给出的阵风系数无法反映脉动风与空间位置的关系,而采用 CFD 数值计算获得阵风系数表现出膜面内部与边缘脉动风的空间差异性。

表 1 稳态与非稳态局部体型系数和阵风系数

Table 1 Mean pressure comparison of steady and unsteady state

观测点 编号	体型系数 μ_{sl}			阵风系数 β_{gz}	
	稳态	非稳态	误差	CFD 计算值	规范值
1#	0.25	0.26	4%	1.17	1.68
2#	0.65	0.69	6%	1.08	1.67
3#	0.35	0.38	8%	1.45	1.67
4#	0.12	0.11	8%	1.92	1.66

4 风振响应分析

4.1 动力时程计算

时域法通常采用线性加速度法、Wilson- θ 法、Runge-kutta 法、Newmark- β 法等算法。本计算求解结构动力响应采用直接积分法中的 Newmark- β 方法

进行时程计算。

4.2 阻尼的确定

采用瑞利结构阻尼,按式(6)确定。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

式中, C 为体系的总阻尼矩阵, M 为结构的质量矩阵, K 为结构的刚度矩阵, α 和 β 为瑞利阻尼中的常量。 α 和 β 不能从实际结构中直接得到,但可以从结构的阻尼比计算得到。 ξ_i 为相对于结构第 i 阶振型的阻尼比。如果 ω_i 为结构第 i 阶振型的圆频率, ξ_i 和 α 及 β 的关系可表示为:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (7)$$

通常认为在一定结构自振频率范围内结构阻尼比 ξ 取定值,因而给定结构阻尼比和一个频率范围内的两频率就可由两个方程求出 α 和 β 。

4.3 计算结果

采用动力时程方法计算的结果是一系列响应的时程,时程计算的结果直接反映了结构在风荷载下的实际响应情况。利用放大因子 G 可以将考虑结构风振的内力代入到荷载组合中进行计算。对于结构设计,关注多少种响应就对应有多少种放大因子。这虽然计算量大为增加,但结果较为准确。因此,动力时程计算避免引入“荷载风振系数”、“阵风系数”等拟静力概念。

放大因子定义为:

$$G = \frac{\hat{R}_{Peak}}{\bar{R}} \quad (8)$$

$$\hat{R}_{Peak} = \bar{R} + g\sigma_R \quad (9)$$

式中, \hat{R}_{Peak} 为响应峰值, \bar{R} 为响应平均值, σ_R 为响应的均方根, g 为峰值因子,此处取 $g = 3.5$ 。

表 2 给出了仅考虑风荷载作用下,图 6 中 1[#]~4[#] 观测点的位移和内力响应的平均值、峰值以及对应的放大因子。

表 2 观测点膜面位移与应力时程计算结果的统计

Table 2 Displacement and stress of observation point of membrane

测点编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	
径向应力	\bar{R} /MPa	5.7	1.9	7.3	7.7
	σ_R /MPa	0.03	0.04	0.20	0.10
	\hat{R}_{Peak} /MPa	5.8	2.0	7.9	8.1
	G	1.02	1.07	1.08	1.05
环向应力	\bar{R} /MPa	10.6	7.6	11.9	7.2
	σ_R /MPa	0.20	0.10	0.20	0.10
	\hat{R}_{Peak} /MPa	11.2	8.0	12.8	7.5
	G	1.06	1.06	1.07	1.04
竖向位移	\bar{R} /m	-0.25	-0.51	-1.17	-0.65
	σ_R /m	0.03	0.02	0.05	0.02
	\hat{R}_{Peak} /m	-0.35	-0.56	-1.33	-0.73
	G	1.39	1.11	1.14	1.13

从表中可以看出,4 个观测点的应力放大系数 G 平均值为 1.06,最大不超过 1.08;位移放大系数 G 平均值为 1.19,最大不超过 1.39。当响应的平均值较小时(如 1[#]测点的竖向位移响应平均值为 -0.25m),对应的放大因子可能较大(如 1[#]测点的竖向位移放大因子为 1.39),但其峰值响应未必很大(如 1[#]测点的竖向位移峰值为 -0.35m 远小于 3[#]测点竖向位移峰值 -1.33m)。由此可见,放大因子须结合相应响应的平均值才能反映结构真实的内力及变形状况。

4.4 风振系数的取值

虽然动力时程法可以精确地给出结构上观测点的各类响应。考虑到膜结构的非线性特征,在世博轴膜结构的初步设计阶段,结构风振系数取 1.5,即将平均风荷载放大 1.5 倍以考虑结构的动力效应。表 3 为采用统一风振系数与动力时程方法计算的结构响应值的比较。

表 3 统一风振系数法与时程计算结果比较

Table 3 Comparison of wind fluttering factor method and nonlinear time history analysis method

测点编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	
径向应力放大系数	1.5 风振系数	1.12	1.21	1.25	1.18
	动力时程法	1.02	1.07	1.08	1.05
	误差	10%	13%	16%	12%
环向应力放大系数	1.5 风振系数	1.24	1.30	1.24	1.17
	动力时程法	1.06	1.06	1.07	1.04
	误差	17%	23%	16%	13%
竖向位移放大系数	1.5 风振系数	1.44	1.45	1.28	1.31
	动力时程法	1.39	1.11	1.14	1.13
	误差	4%	31%	12%	16%

表 3 可以看出:(1)膜结构强烈的非线性造成结构的响应与激励不成正比;(2)风振系数取 1.5 包络了动力时程分析的结果,能保证结构的安全可靠,但相对于精确解结果偏于保守。

5 结论

(1)数值模拟中的稳态计算和非稳态计算无论是计算方法还是理论模型都属于两种完全不同的分析手段。但两者获得的建筑物表面平均风压吻合得较好。

(2)CFD 计算得到的阵风系数数据比规范更符合项目实际情况。因此,采用数值风洞提供的风荷载数据进行的设计将更安全和经济。

(3)本文建议方法概念明确,操作灵活,可适应工程紧张、迅捷的要求。既能在方案阶段为决策提供参考,又能在深化设计阶段为抗风计算提供必要的参数。

参 考 文 献

- [1] GB 50009—2001 《建筑结构荷载规范》[S]. (GB 50009—2001 Load code for the design of building structures[S]. (in Chinese))
- [2] 郑德乾,顾明,周暄毅,等. 世博轴膜面平均风压的数值模拟研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(5): 212-219. (ZHENG Deqian, GU Ming, ZHOU Xuanyi, et al. Numerical simulation of mean wind pressure on membrane roof of the Expo Axis [J]. Journal of Building Structure, 2009, 30 (5): 212-219. (in Chinese))
- [3] 张相庭. 结构风工程理论·规范·实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2006. (Zhang Xiangting. Structural wind engineering: Theory·Code·Practice [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 卢旦,李承铭,王国俭. 上海金茂大厦风振响应的CFD非稳态数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 31-35. (Lu Dan, Li Chengming, Wang Guojian. CFD unsteady state numerical simulation of wind-induced vibration of the Shanghai Jinmao Building [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 31-35. (in Chinese))
- [5] 刘锡良,周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84. (Liu Xiliang, Zhou Ying. Numerical simulation methods of wind load [J]. Industrial Construction, 2005, 35(5): 81-84. (in Chinese))
- [6] 彪仿俊. 建筑物表面风荷载的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (Biao Fangjun. Study on numerical simulation of wind-load on structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))