

# 贝壳型单层网壳结构流场 数值模拟与风洞试验对比研究

张树光<sup>1</sup>, 路平平<sup>1</sup>, 赵中伟<sup>1,2</sup>, 马 涛<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

3. 辽宁省阜新公路路政管理局, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**应用 SST  $\kappa\omega$  湍流模型, 采用数值风洞技术对贝壳型单层网壳在不同风向作用下结构表面的风压分布进行了数值模拟, 获得了结构表面各分区下的压强系数。把其中具有代表性的分区数值风洞理论值与风洞试验结果进行比较分析, 结果对比说明: 两者吻合较好, 所得到的压强分布系数可以用于工程实际, 验证了数值风洞模拟技术的可靠性。事实证明以数值风洞技术来分析复杂结构周围的流场进行预测是可行的。

**关键词:** 贝壳型; 网壳; 风场; 数值风洞

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0337-07

## Numerical simulation and wind tunnel test of shell structure with single-layer reticulated shell

ZHANG Shuguang<sup>1</sup>, LU Pingping<sup>1</sup>, ZHAO Zhongwei<sup>1,2</sup>, MA Tao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Project Technology University, Liaoning Fuxin 123000, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Administration of highway service, Liaoning Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Predicted the distribution of pressure coefficient on surface of the single-layer lattice shells located in Yujiapu which is in shell shape by numerical wind tunnel method. The SST  $\kappa\omega$  turbulence model was adopted. The pressure coefficient of each subarea was computed to make a comparison with the result from wind tunnel test. It was validated that they were in good agreement with the results derived by experiment and the pressure coefficient distribution could be adopted for the project. the numerical simulation method adopted in this paper could be generalized.

**Key words:** shell shape; single-layer lattice shells; wind field; numerical wind tunnel

本文对地下高铁站房的贝壳型单层网壳结构进行分析, 该站房建筑面积约 86 200 m<sup>2</sup>。车站形式为地下两层、地面一层。地下二层为站台层, 由 3 座岛式站台和 6 条到发线构成; 地下一层为站厅层, 设候车大厅、进出站厅、设备用房及办公用房; 地面层为进站大厅。地上部分为“贝壳”型穹顶采光屋面, 结构形式为大跨度空间网格结构。全结构主要杆件均采用曲线钢箱梁, 72 根箱梁相互交叉连接, 编织成一个纵向跨度约 142 m, 横向跨度约 80 m, 矢高约 24 m 的贝壳形穹顶网壳结构, 其顶部设置有顶环结构、底部设置有箱型圈梁, 对单层网壳顶底端起连接和约束作用。

该结构形体新颖, 结构复杂, 箱形钢梁相互交叉, 在现行《建筑结构荷载规范》<sup>[1]</sup> (GB50009-2001) 中找不到合适的体型系数作为其风荷载值。因此本文利用 CFD 技术<sup>[2-3]</sup>对网壳表面的风压分布进行了数值模拟, 对不同风向角下网壳表面风压分布进行分析研究, 同时探讨了周围建筑物对网壳周围风场的影响, 为工程结构设计的风荷载取值提供必要的指导。

## 1 数值模拟方法

风向角下的风压分布特性进行研究。目前本文选取典型风向角(0°、180°)对站房进行不同常用的

收稿日期: 2018-04-11 修改稿日期: 2019-05-16

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M621156)

第一作者: 张树光(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程和环境岩土工程方面的研究. E-mail: zhangshuguang168@163.com

通信作者: 路平平(1990—), 女, 博士, 主要从事地下工程和环境岩土工程方面的研究. E-mail: lupingping222@126.com



图1 火车站站房效果图

Fig. 1 Effect blueprint of railway station building of yujiapu

湍流模型有标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型、SST  $k-\omega$  模型、雷诺应力模型和大涡模拟 (Large-Eddy Simulation, LES) 等。

LES 采用滤波函数, 直接模拟大尺寸漩涡, 效果最好; 雷诺应力模型次之。由于 LES 还处在研究阶段, 且网格划分要求较高, 要达到 Kolmogorov 尺度, 对计算机要求较高, 并且对入口边界条件敏感<sup>[5]</sup>, 目前应用于土木工程的实际问题还不现实。基于 SST  $k-\omega$  湍流物理模型在计算以分离流为主的流场时, 精度很好<sup>[6]</sup>, 故预采用 CFX 商用流体软件自带的 SST  $k-\omega$  模型对高铁站房表面风压分布进行数值风洞模拟, 该模型综合了  $k-\omega$  模型在近壁区和远场计算的优点, 一并增加交叉扩散项, 且湍流剪切应力的输送过程在湍流粘性系数的定义中给予了充分考虑, 因此, SST  $k-\omega$  湍流模型的应用范围变得更为广泛。SST  $k-\omega$  湍流模型较传统的  $k-\epsilon$  湍流模型要更适用于具有逆压梯度流动或分离流动的计算, 因而前者更广泛地应用于大气边界层钝体绕流的计算中。以张量形式表达的 SST  $k-\omega$  湍流模型的流场输送方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + S_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

式中:  $\Gamma$ 、 $\Gamma_k$ 、 $\Gamma_\omega$  为速度  $u$  ( $v$  或  $w$ )、湍动能  $k$  及比耗散率  $\omega$  的有效扩散系数,  $\tilde{G}_k$ 、 $G_\omega$  为  $k$ 、 $\omega$  的产生项,  $Y_k$ 、 $Y_\omega$  为  $k$ 、 $\omega$  的耗散项,  $D_\omega$  为交叉扩散

项,  $\rho$  为空气密度,  $p$  为压强;  $S_i$ 、 $S_k$  及  $S_\omega$  为各输送方程的自定义源项利用有限体积法和 SIMPLE<sup>[8]</sup> 压力校正算法来实现非线性离散化方程的解耦和迭代求解, SIMPLE 算法的基本策略是用假定的压强场求解动量方程得到边界点上的通量通过修正假定的压力场反复迭代直至收敛达到求解目的<sup>[9]</sup>。

### 1.1 计算模型

所建立的数值风洞计算流体域采用  $862 \text{ m} \times 320 \times 192 \text{ m}$ <sup>[10]</sup>, 网格划分越靠近模型表面单元划分越细。划分网格后节点数为 598 793, 单元数为 3 040 162。

### 1.2 边界条件设置

边界条件的入口 (inlet) 输入平均风速剖面和湍流强度。根据《建筑结构荷载规范 GB 50009-2001》, 根据“全国基本风压分布图”, 可查得重现期为 100 年时天津市地区的风压。由此推算得到基本风速  $31.6 \text{ m/s}$ 。根据站房所处的位置, 其大气边界层应属 D 类地区, 沿  $x$  方向的风速剖面为

$$V(z) = V_b (z/z_b)^\alpha,$$

式中:  $V_b$  为标准参考高度处的平均风速 (规范取  $z_b = 10 \text{ m}$ ),  $\alpha = 0.30$ ,  $z$  为高度方向, 自建筑物底部算起;  $y$ 、 $z$  方向速度为零。

湍流强度  $I$  是地面粗糙度类别和地高度  $z$  的函数, 鉴于我国规范对湍流强度尚无明确规定, 关于  $I$  的表达式, 参考日本规范<sup>[11-12]</sup> 取值为

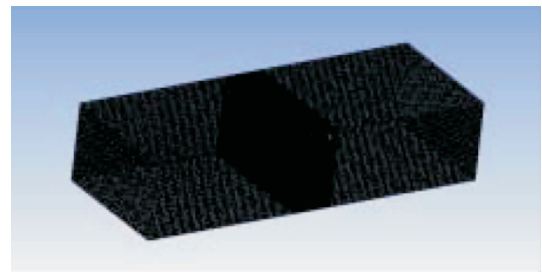


图2 计算区域总体网格划分

Fig. 2 Meshing of calculation zone

$$I = \begin{cases} 0.31 & z \leq z_b \\ 0.1(z/z_g)^{-a-0.05} & z_b \leq z \leq z_g \end{cases}$$

式中:  $z_b$  取 5;  $z_g$  取 450; III 类地貌  $a$  取 0.20。

### 2.3 湍流模型比较

为进一步验证本文所选湍流模型的优越性, 故在相同边界及网格划分条件下, 采用不同的湍流模型对实际工程  $0^\circ$  风向角进行模拟计算。将各个湍流模型所得结构表面风压系数结果以图表形式列出进行对比。

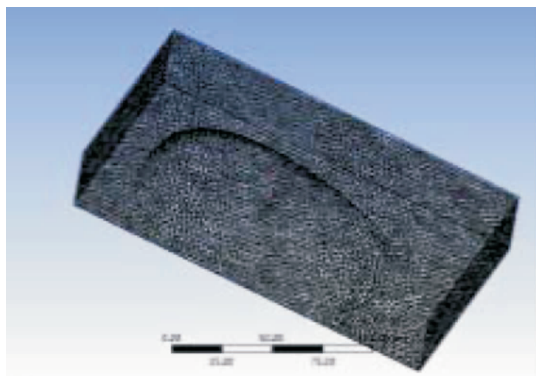


图3 网壳表面网格划分

Fig. 3 Meshing of surface of lattice shell

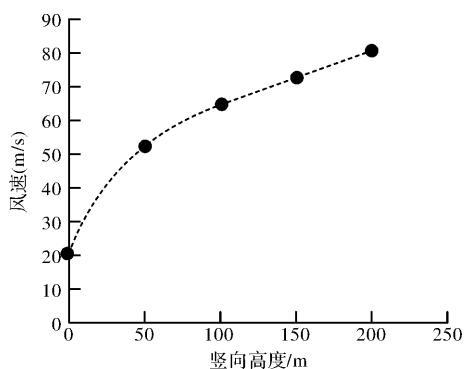


图4 竖向平均速度剖面图

Fig. 4 Vertical profile of mean velocity

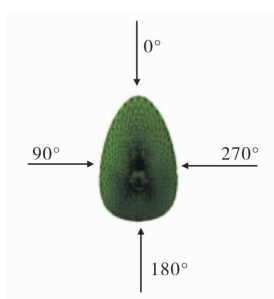


图5 站房网壳模拟风向示意

Fig. 5 Schematic diagram of wind direction

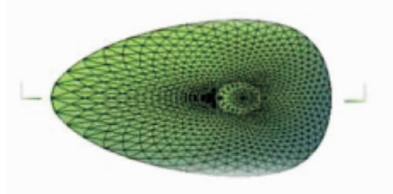
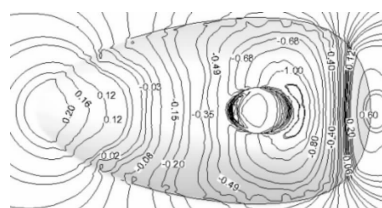
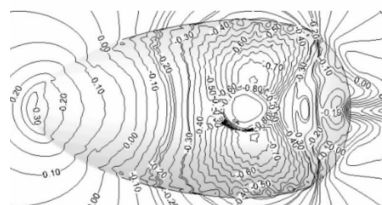
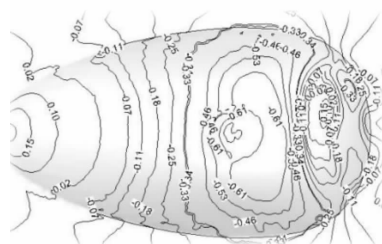
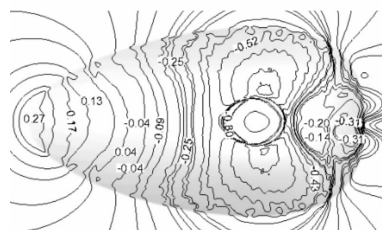
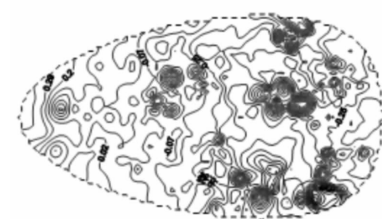


图6 PLAIN1 平面示意

Fig. 6 Schematic diagram of PLAIN1

由以上对比可以看出:  $\kappa\omega$  模型的优点在于在低雷诺数下对壁面的处理计算, 对于高雷诺数下的风场模拟则不能精确地模拟出气流与结构物表面的分离与再附着, 对气压梯度较大区域及负压区域误差较大. 标准  $\kappa\epsilon$  模型该模型假设流动为完全湍流, 分子粘性的影响可以忽略, 此标准  $\kappa\epsilon$  模型只适合完全湍流的流动过程模拟, 且会对湍动

 $\kappa\omega$  模型湍流模型标准  $\kappa\epsilon$  模型RNG  $\kappa\epsilon$  模型SST  $\kappa\omega$  模型

风洞试验

图7 各湍流模型结果与风洞试验结果对比

Fig. 7 Comparison of results getting from each turbulence model and wind tunnel test

能的计算误差较大. RNG  $\kappa\epsilon$  相比于标准  $\kappa\epsilon$  模型在一些方面做了一些改进, RNG  $\kappa\epsilon$  模型修正了湍流动能黏度, 引入了与旋转和曲率有关的内容, 改进了  $\epsilon$  方程, 能更好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 对近壁区和低雷诺数的流动都能进行很好的计算在更广泛的流动中有更高的可信度和精度<sup>[13]</sup>. SST  $\kappa\omega$  考虑了湍流剪切应力的输运, 对在逆压力梯度下流动的分离的起点和积累能够预测得很准, 同时能够很好地模拟出气流的漩涡结构图8. 故本文采用 SST  $\kappa\omega$  湍流模型进行



分析.

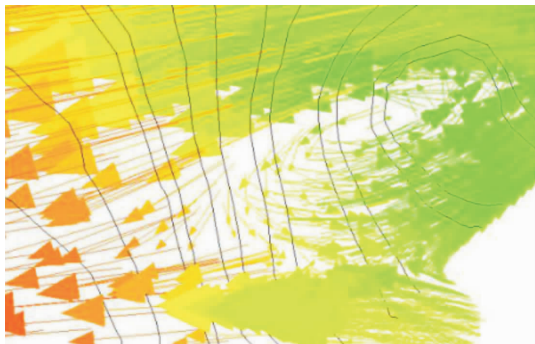


图8 漩涡结构

Fig. 8 Structure of vortex

## 2 计算结果

### 2.1 压强分布

量纲为1的压强系数  $C_p$  定义为

$$C_p = (P - P_{\text{ref}}) / \frac{1}{2} \rho u_0^2$$

式中:  $P_{\text{ref}}$  为参考静压力, 取为一个大气压 0.101 3 MPa;  $\rho$  为空气密度, 取为 1.225 kg/m<sup>3</sup>;  $u_0$  为参考风速.

以下分别为风向角为 0°、180°时火车站站房网壳的风压系数等值线图.

当风向角为 0°时, 如图 9 由于该结构的流线型造型, 在网壳前端出现风压系数较小的正压区, 反而是在网壳背部出现较大的正压区, 这是该结构与一般结构的不同之处. 气流在到达天窗之前出现分离点, 在天窗附近负压达到最大, 经过天窗之后上部气流与网壳两侧来流在网壳尾部汇集形成较大的正压区, 在网壳前端出现正压区, 另外网壳两侧气流向中间汇集是网壳前端出现正压区的原因.

当风向角为 180°时, 由图 10 可以看出气流在到达天窗之前出现分离点, 在天窗附近负压达到最大, 经过天窗之后气流与网壳表面再附着, 在网壳前端出现正压区, 另外网壳两侧气流向中间汇集也是网壳前端出现正压区的另一原因.

### 2.2 与风洞试验结果对比

将数值模拟结果与风洞试验结果<sup>[14]</sup>进行对比进一步验证数值模拟的可靠性. 以下分别为数值模拟结果与风洞试验结果的平均风压系数云图的对比. 从下图可以看出数值模拟结果与风洞试验结果吻合较好, 但是局部细节还是存在较大误差, 造成误差的原因可能有:

(1) 为建模的方便, 在建模时简化了网壳局部的一些细部特征以及风洞试验未考虑天窗影响,

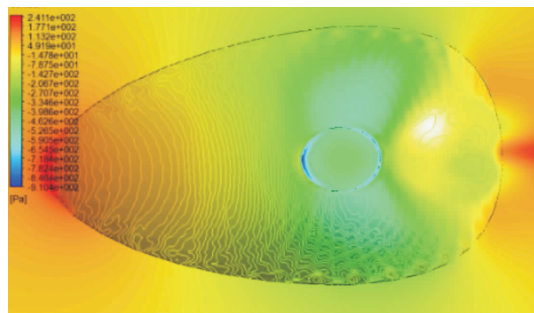


图9 0°时站房网壳表面压强分布

Fig. 9 Distribution of pressure on surface of shell with the wind angle 0°

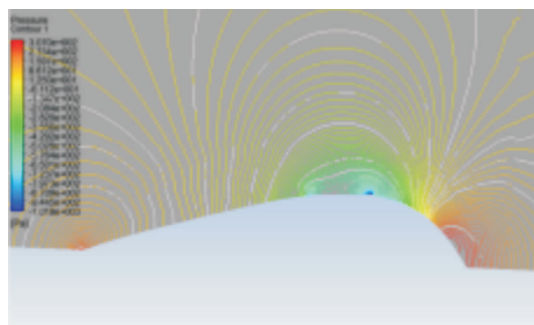


图10 180°PLAIN1 平面压强分布

Fig. 10 Distribution of pressure on PLAIN1 with wind angle 0°

所以会造成局部风压系数的误差;

(2) 采用的湍流模型包含了湍流各向同性假设, 与实际不符, 势必引起误差. 这需要将来进一步研究更符合实际的湍流模型如大涡模拟<sup>[11]</sup>, 以及不断提高的计算机运算能力来解决;

(3) 风洞试验是在大缩尺比的情况下完成, 与实际情况存在偏差.

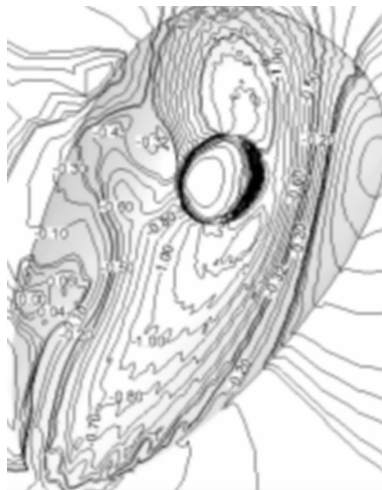


图11 120°时站房表面压强系数分布(模拟)

Fig. 11 Distribution of pressure coefficient on surface of shell with wind angle 120° (numerical simulation)

为方便结构设计阶段结构风荷载施加的方便, 将结构按风压系数的差异将结构分为不同的区域,

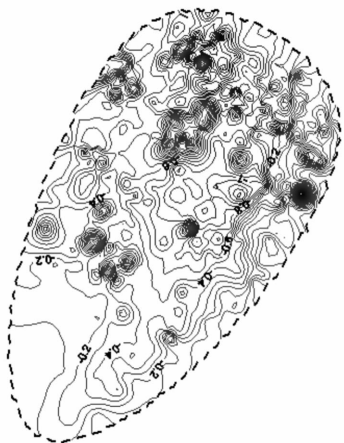


图 12 120°时站房表面压强系数分布(试验)

Fig. 12 Distribution of pressure coefficient on surface of shell with wind angle 120° (experiment)

图 13 为各个分区的分布图. 图 14 和图 15 所示为不同风向角下各分区的风压系数对比结果. 由图中所示结果可以看出, 数值风洞所得结果与试验所得结果吻合较好, 在 BB9 区数值模拟与实验差别较大, 主要因为该区域压力梯度较大, 同时受限于计算机能力划分网格不够细造成, 另一可能原因为风洞试验数据采集误差所导致. 以上对比表明: 数值风洞技术可以很好地预测复杂结构表面的风压分布.

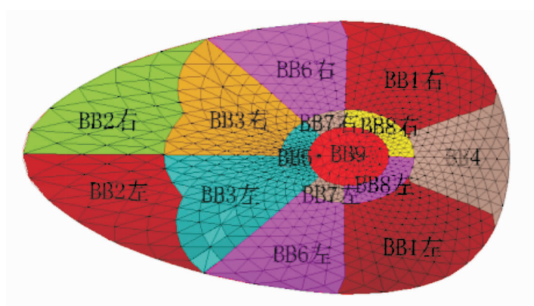


图 13 各分区分布图

Fig. 13 Distribution of each subarea

### 2.3 周围建筑物对结构表面风压的影响

为研究周围建筑物对结构表面风压的影响, 在流体域中分别考虑位于建筑物正前方与正后方的截面尺寸为 60 m×60 m×100 m 和 60 m×60 m×50 m 的情况, 建筑物与结构的距离分为 150 m 和 75 m 两种工况, 在各工况下研究在建筑物影响下结构表面风压的影响, 图 16 为位于结构正前方 75 m 建筑高度为 100 m 的流场, 可以看出, 整个结构位于由于前方建筑扰动形成的漩涡之中, 机构表面几乎全为负压, 与不考虑周围建筑的情况完全不同, 所以在结构的风载设计中要充

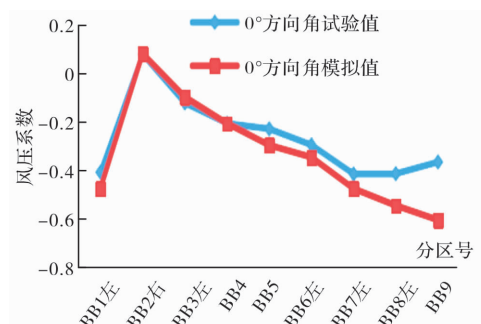


图 14 0°各分区压强系数对比

Fig. 14 Comparison of pressure coefficient at each subarea with wind angle 0°

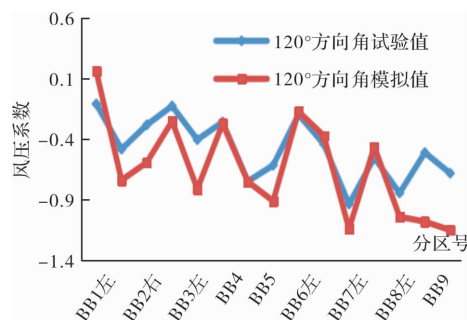


图 15 120°各分区压强系数对比

Fig. 15 Comparison of pressure coefficient at each subarea with wind angle 120°

分结合周围地势与建筑物分布情况, 这对结构表面的风压分布将产生决定性作用. 图 17 为结构后方 75 m 建筑高度为 100 m 的流场, 可以看出即使建筑物在结构顺风向下方, 对结构表面的风压分布亦有很大影响, 而所有结构都是出于一定的环境下, 确定等效风载是需考虑周围环境的影响.

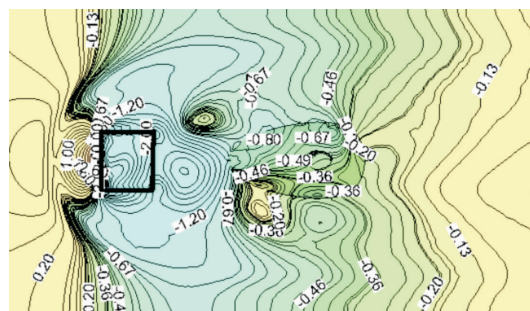


图 16 50 m 高建筑物位于结构前方 75 m 风场

Fig. 16 Wind fields of structure under the condition that 50 meter's high building located in front with distance of 75 meters

以下列出各工况下体形系数的对比, 如图 19, 从中可以看出在确定结构风荷载时要充分考虑周围环境对建筑物风荷载的影响, 结构表面的风压系数与需根据实际情况考虑最不利因素以确定

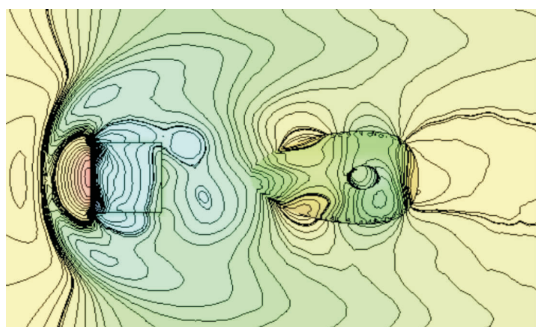


图 17 100 m 高建筑物位于结构前方 150 m 风场

Fig. 17 Wind fields of structure under the condition that 100 meter's high building located in front with distance of 150 meters

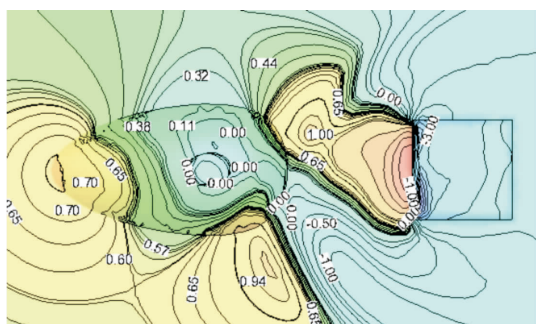


图 18 100 m 高建筑物位于结构后方 75 m 风场

Fig. 18 Wind fields of structure under the condition that 50 meter's high building located in rear with distance of 75 meters

等效风荷载。

通过工况 1 与工况 2 的对比可以发现, 建筑物高度对结构表面的风压系数有很大影响。通过工况 1 与工况 4 的对比可以发现结构顺风向建筑对风压系数的影响会小于前方建筑, 但其影响依然较大不可忽略。

### 3 结论

通过对站房网壳结构风场的数值模拟和风洞试验研究, 得到相关结论如下:

(1) 贝壳型火车站站房网壳结构造型奇特, 其周围流场运动比较复杂。采用数值模拟方法对不同风向下站房网壳周边的压强场、速度场以及湍动能场进行了模拟计算。运用数值风洞法对地上网壳部分周围流场进行数值模拟, 得到网壳表面的压强系数分布和网壳周围流场的速度分布。

(2) 通过风洞试验结果对比, 两者吻合较好, 验证数值风洞模拟技术的可靠性, 但现阶段由于

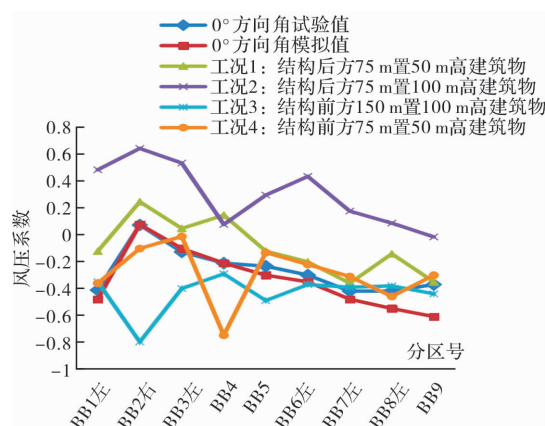


图 19 不同周围环境下建筑物表面风压系数

Fig. 19 Wind pressure coefficient with different environment around

计算机计算能力有限, 对湍流的直接模拟方法尚不能有效应用, 只能借助湍流简化模型进行计算, 造成数值计算结果与风洞试验结果的细节有较大差别, 同时风洞试验的大缩尺比也是造成误差的主要原因之一。

(3) 由于结构周围环境对结构所受风荷载有很大影响, 结构设计阶段应充分考虑最不利工况确定等效风荷载。由于风洞试验的高成本, 长周期的弊端, 在计算机计算能力充分发展的将来, 数值风洞技术可以很好满足工程设计的需要, 为结构风荷载设计提供很好的预测。

### 参考文献 References

- [1] 中国工程建设标准化协会. 建筑结构荷载规范: GB50009-2012, [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Building structure load specification: GB50009-2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [2] 杨舒. 地铁上盖物业商业综合体实例研究——以深圳市区为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
YANG Shu. A case study of subway overlying property commercial complex: Take downtown shenzhen as example [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [3] 吉迪恩·S·格兰尼. 城市地下空间设计[M]. 许方, 译. 北京: 中国工业出版社, 2011: 141-186.  
Gideon·S·Glen. Urban underground space design [M]. Xufang, Translated. Beijing: China Industry



- Press,2011:141-186.
- [4] ZHANG A S, GAO C L, ZHANG L. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements [J]. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 2005,93(12): 891-904.
- [5] 廖泽邦,黄本才,林高. 沈阳综合体育馆大跨封闭屋盖平均风压数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(4):91-95.
- LIAO Zebang, HUANG Bencai, LIN Gao. Numerical simulation of average wind pressure of large span closed roof in shenyang comprehensive stadium[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2008, 29(4):91-95.
- [6] 胡朋,李永乐,廖海黎. 基于 SST  $\kappa\omega$  湍流模型的平衡大气边界层模拟[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(6): 737-743. HU Peng, LI Yongle, LIAO Haili. Simulation of equilibrium atmospheric boundary layer based on SST  $\kappa\omega$  turbulence model[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2012, 30(6): 737-743.
- [7] 孙晓颖,朱晓洁,武岳,等. 深圳大运会主体育场罩棚风压分布的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42,(8):1183-1188.
- SUN Xiaoying, ZHU Xiaojie, WU Yue, et al. Numerical simulation of wind pressuredistribution in the main stadium of Shenzhen universiade[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 ( 8 ): 1183-1188.
- [8] 刘丹,黄本才,史益军. 复杂双侧大悬挑屋盖平均风压数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(3):38-42.
- LIU Dan, HUANG Bencai, SHI Yijun. Numerical simulation of average wind pressure of complex double-sided large cantilevered roof[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(3):38-42.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis—Principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004.
- [10] 陈志华,闫翔宇,王小盾,等. 新型斜拉桥与摩天轮复合结构流场数值模拟与风洞试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5):117-123, 130.
- CHEN Zhihua, YAN Xiangyu, WANG Xiaodun, et al. Numerical simulation of flow field and wind tunnel test of new cable-stayed bridge and ferris wheel composite structure [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5):117-123, 130.
- [11] 西南交通大学风工程试验研究中心. 天津于家堡地铁车站站房风洞试验研究报告[R]. [s.l.]:[s.n.], 2010. 4.
- Southwest Transportation University windengineering test and research center. Research report on wind tunnel test of station building of Yujiapu metro station in Tianjin[R]. [s.l.]:[s.n.], 2010. 4.
- [12] 日本建筑学会. 建筑物荷重指针 ISBN4-8189-0459-7C3052 P4450E-1996[S]. 东京:[s.n.], 1996.
- Architectural Society of Japan. Building loading guide: ISBN4-8189-0459-7C3052 P4450E-1996 [S]. Tokyo: [s.n.], 1996.
- [13] 张军海,王吉桥,吴向东,等. 高速列车湍流特性的数值模拟[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(1):11-15.
- ZHANG Junhai, WANG Jiqiao, WU Xiangdong, et al. Numerical simulation of turbulence characteristics of high-speed trains [J]. Railway Locomotive and Car 2010, 30(1):11-15.
- [14] NOZAWA K, TAMURA T. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(10): 1151-1162.

(编辑 吴海西 沈 波)