

文章编号:1673-2049(2008)01-0060-05

塔桅结构三维定常风场风洞试验及数值模拟

白桦,胡兆同,胡庆安

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:利用风洞试验对杭州湾跨海工程海中平台及观光塔模型在各种风向角下的风压分布情况进行了测试,研究了观光塔结构在不同方向风荷载作用下风压的变化情况。采用 FLUENT 6 软件平台,选用标准 $k-\epsilon$ 和 Realizable $k-\epsilon$ 2 种湍流模型计算了大气边界层中杭州湾跨海工程海中平台与观光塔的定常风流场,并将数值计算结果与风洞试验结果进行了比较。结果表明:基于 FLUENT 6 的标准 $k-\epsilon$ 和 Realizable $k-\epsilon$ 模型均能给出工程设计要求的精度;但对建筑物的不同位置,2 种模型反映的精度有所区别。该研究可为精确计算风荷载提供依据,对工程设计有较好的参考价值。

关键词:风洞试验;计算风工程;塔桅结构;表面压力;数值模拟

中图分类号:TU317.1

文献标志码:A

Wind Tunnel Test on 3-D Steady Wind Flow Field of Tower Mast Structure and Numerical Simulation

BAI Hua, HU Zhao-tong, HU Qing-an

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The behavior of wind pressure distribution on the cross-sea engineering of Hangzhou Bay tower mast structure under different angles was investigated through wind tunnel test. The variation situations of wind pressure on tower mast structure were measured and studied under different directions wind loads. The steady wind flow field of a 3-D tower mast structure immersed into atmosphere boundary was numerically simulated using FLUENT 6. Two turbulence models, standard $k-\epsilon$ model and Realizable $k-\epsilon$ model, were used in the numerical simulation. The detailed comparison between numerical simulation results and wind tunnel test results was carried out. The results show that both standard $k-\epsilon$ model and Realizable $k-\epsilon$ model in FLUENT 6 can give the accurate enough results from the view of engineering application. But the simulation precisions of these two models exist some differences between the buildings. Therefore, it is vital to determine wind load precisely for engineering design of such important structures through comparing analysis.

Key words: wind tunnel test; computational wind engineering; tower mast structure; surface pressure; numerical simulation

0 引言

塔桅结构是指高耸的自立于地面或其他屋顶等

平面的塔形结构和高耸的靠纤维绳维持稳定的桅形结构。近年来以塔架为主体结构的塔桅结构的应用非常广泛:在航海航空设施上、大型体育场和大的公共

收稿日期:2008-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:白桦(1979-),男,甘肃西和人,工学硕士,E-mail:baihua15@163.com。

场所中安装指示灯或照明用的灯塔、电视塔、体育运动的跳伞塔等都属于塔桅结构;工业上用的烟囱、钻井架、冷却塔都是常用的塔桅结构。

风荷载是高层建筑物重要的荷载之一,随着中国城市建设和高层建筑的迅速发展,风对建筑物以及建筑物周围环境的影响越来越显著。研究风环境的常用方法是:风洞试验和数值模拟^[1-4]。风洞试验往往周期长、费用高,随着计算流体力学的发展和高层建筑设计要求的提高,开展高层建筑风场和风压力的计算研究,将有利于快速、准确地确定风荷载的大小,为高层建筑设计提供较可靠的依据。

1 研究内容

杭州湾跨海工程海中平台标高为 11.80 m,主平台建筑屋顶形似大鹏展翅,翼长约为 130 m,翼宽约为 50 m,采用四角锥网架结构。观光塔高 145.6 m,塔体是直径约为 8.7 m 的圆筒形钢结构,筒体周围有折线形 8 肢支撑,塔座为 3、4 层裙房,顶部设有 3 层呈宝石形的塔楼,塔楼顶部的桅杆高约为 23 m。

杭州湾跨海工程的海中平台建筑及观光塔处于杭州湾跨海工程中部。杭州湾喇叭口的特定地形,夏季的台风、冬季的强冷空气,形成了该建筑场址的特殊风环境。准确确定结构风荷载和强风作用下的风振响应,对保证海中平台建筑及观光塔结构设计的安全、经济及合理性是十分必要的。

笔者采用 FLUENT 6 对杭州湾跨海工程海中平台与观光塔的表面风压进行了数值模拟,分析了观光塔的风压分布。湍流模型选用应用广泛的基于雷诺均值(RANS)的标准 $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型,并将数值计算的结果和风洞试验做了比较。

2 风洞试验

2.1 试验概况

风洞试验是在长安大学风洞实验室 CA-1 大气边界层风洞中进行的^[5-6],试验段尺寸长为 15 m,宽为 3 m,高为 2.5 m。风洞试验模型用有机玻璃加工制作,缩尺比为 1:110。

为测取观光塔各立面上不同高度处的表面风压,在模型上共布置了 440 个测点,为考虑海中平台拐角、形状突变处的表面风压,共布置了 854 个测点,试验模型如图 1 所示。

压力测量系统由美国 PSI 公司电子压力扫描阀、A/D 板、PC 机以及自编的信号采集与数据处理

软件组成。采样频率为 100 Hz,采样样本总量为 6 000 个数据。

2.2 风场模拟及试验

考虑到杭州湾跨海工程的地理位置及周围地形、地貌特点,该建筑地面粗糙度类别选为 A 类。在风洞利用湍流发生装置生成了 A 类风场的风速剖面及湍流度剖面,大气边界层流场的风速及湍流度剖面见图 2(图 2 中 Z 为实际高度; Z_g 为梯度风高度; U 为实际风速; U_g 为梯度风风速; I_u 为梯度风湍流强度; I 为实测湍流强度),模拟的大气边界层流场符合规范的要求。

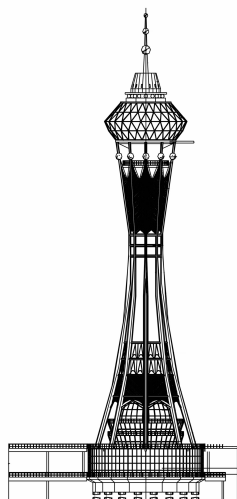


图 1 试验模型
Fig. 1 Test Model

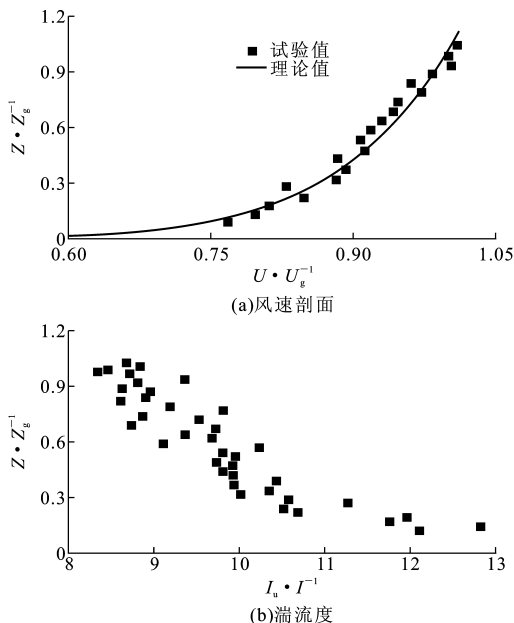


图 2 风洞试验的 A 类地貌风特性参数

Fig. 2 A Kind Geomorphology Wind Characteristics Parameters in Wind Tunnel Test

考虑海中平台建筑及观光塔所处的风场环境及周围建筑的影响,根据《杭州湾跨海大桥工程科研招标参考资料(自然条件)》提供的风玫瑰图,冬季最多风向为 NW~NNW 风,春夏季最多风向为 SE~E 风,秋季主要集中为 NW~SE 风,全年最多风向为 SW~E 风。在主导风向 NW、SE、E 及 NW30°~NW60°、SE30°~E,每隔 15°取一个风向角,在非主导风向每隔 30°取一个风向角进行试验,试验共安排 17 种工况。本文中因篇长所限,只介绍风向角为

NE50°时的工况,对其他工况不做赘述。模型方位及风向见图 3。

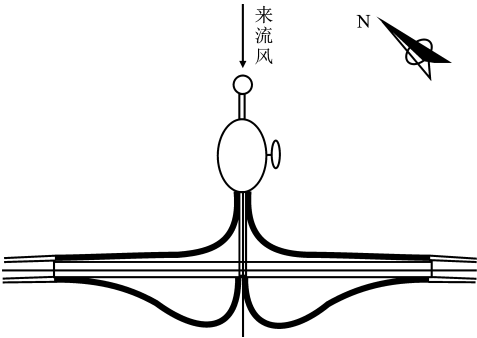


图 3 风向角为 NE50°时的模型方位及风向
Fig. 3 Model Direction and Wind Direction in Wind Angle NE50°

2.3 试验数据处理

物体表面的量纲一的压力系数表示为^[7]

C_{pi} = \frac{P_i - P_{\infty}}{P_0 - P_{\infty}} \tag{1}

式中: C_{pi} 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、P_{\infty} 分别为试验时参考高度处的总压和静压。

参考点离地面的高度为 1.05 m,对应的实际高度为115.5 m。试验直接测得的各点风压系数都是以该高度处的风压作为参考风压。测压试验风速为 15 m \cdot s^{-1}。

参考《杭州湾跨海大桥工程科研招标参考资料(自然条件)》的表 3.11 建议值及《中国建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001),该地区梯度风风速和梯度风风压的最终取值如表 1 所示。

表 1 梯度风平均参考风速和参考风压
Tab. 1 Average Reference Wind Speeds and Referenced Wind Pressures of Gradient Wind

重现期/年	参考风速/(m \cdot s^{-1})	参考风压/kPa
30	52.3	1.709 6
50	55.0	1.890 6
100	58.7	2.153 6

本文中对风洞试验的试验数据不做赘述,只关注与数值计算做比较的 100 年重现期的平均风压。

3 数值模拟

3.1 控制方程

计算风工程中,钝体绕流问题的控制方程是黏性不可压 Navier-Stokes 方程。基于雷诺平均的控制方程可写为^[8-10]

\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{2}

\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \tag{3}

Realizable k-\epsilon 模型的湍流动能 k 运输方程与标准 k-\epsilon 模型相同,与耗散率 \epsilon 运输方程不同,其 \epsilon 方程中生成项与 k 无关,被认为是更适于表达能谱传输。Realizable k-\epsilon 模型在范围广泛的流动现象包括分离流动中得到验证。

3.2 物理模型的建立

3.2.1 数学建模

杭州湾跨海大桥、海中平台与观光塔数值仿真的计算模型采用建筑物的实际几何尺寸,计算流域取为 990 m \times 2 040 m \times 450 m,建筑物置于流域沿流向前 1/3 处。共生成近 200 \times 10^4 个单元,计算模型如图 4 所示。

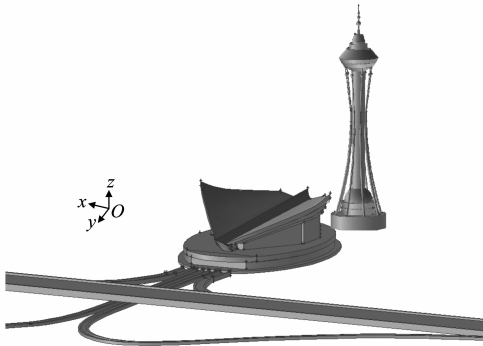


图 4 计算模型
Fig. 4 Calculation Model

3.2.2 边界条件的设定

进流面:用速度进流边界条件模拟大气边界层风速剖面指数分布^[11-12],即

U = U_G (\frac{Z}{Z_G})^\alpha \tag{4}

式中: Z_G、U_G 分别为参考高度和参考高度处的风速,取距地面高度 10 m 和当地 100 年重现期的风速 31.3 m \cdot s^{-1}; Z、U 分别为流域中某高度和对应的平均风速; \alpha 为地面粗糙度指数,本文中按 A 类风场取 0.12。

平均风速剖面采用 FLUENT 提供的 UDF 编程与 FLUENT 做接口实现。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。建筑物表面和地面采用无滑移的壁面条件。

3.3 计算结果及分析

由于观光塔上部设有 3 层呈宝石形的塔楼,外

包玻璃幕墙,故对此处的风压应重点考虑。在此塔楼的迎风面、侧风面与背风面分别选取 6 个测点,以便做定量分析。测点位置见图 5。由于观光塔是对称结构,所以侧风面只取了一侧。其中编号 $a_1 \sim a_6$ 在迎风面中心, $c_1 \sim c_6$ 在背风面中心。

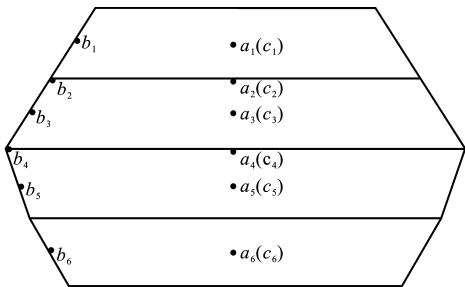


图 5 测点位置

Fig. 5 Locations of Testing Points

3.3.1 压力分布

观光塔表面的平均风压分布通常用量纲一的压力系数 C_{pi} 表示,计算方法同第 2.3 节试验数据处理。试验与数值模拟结果对比见表 2。

表 2 试验与数值模拟结果对比

Tab. 2 Comparison Between Experimental and Simulation Results

测点编号		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
C_{pi}	试验值	0.65	0.70	0.68	0.92	0.90	0.83
	标准模型	0.73	0.75	0.73	0.97	0.95	0.89
	Realizable 模型	0.71	0.75	0.71	0.95	0.92	0.88
测点编号		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
C_{pi}	试验值	-0.35	-0.42	-0.38	-0.35	-0.23	-0.57
	标准模型	-0.41	-0.46	-0.41	-0.39	-0.27	-0.63
	Realizable 模型	-0.40	-0.44	-0.39	-0.37	-0.26	-0.61
测点编号		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
C_{pi}	试验值	-0.49	-0.40	-0.46	-0.42	-0.45	-0.42
	标准模型	-0.72	-0.61	-0.60	-0.59	-0.64	-0.64
	Realizable 模型	-0.72	-0.58	-0.57	-0.55	-0.63	-0.62

由表 2 可知:2 种湍流模型针对塔桅结构抗风研究所关心的迎风面和处在分离区侧面的风压计算值与风洞试验结果基本吻合,其计算结果与风洞试验值趋势一致,数值计算的结果稍偏小。采用定量分析将 2 种模型计算得到的压力与风洞试验值比较,最大偏差约为 15%。这一点在文献[13]中也有提及。同时 2 种模型模拟的精度差别不大,标准 $k-\epsilon$ 模型比 Realizable $k-\epsilon$ 模型小 2%。数值模拟的精度基本可以达到工程应用的要求。

模型背风面处在完全分离区,背面是难以准确模拟的部位。2 种湍流模型对背风面的数值模拟与试验结果有差别,但 2 种模型的计算结果相近,差异不大。

对上述各个面压力系数的比较可知:FLUENT 6 标准 $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型对塔桅结构迎风面的模拟结果较为理想,且对侧风面的模拟结果最好;而对分离区的模拟与试验相比,数值偏小;这 2 种模型之间,Realizable $k-\epsilon$ 模型较标准 $k-\epsilon$ 模型计算结果更接近风洞试验值,Realizable $k-\epsilon$ 模型对塔桅结构的模拟更为合理。

3.3.2 流场分析

标准 $k-\epsilon$ 模型能预测出观光塔顶部分离与回流的发生,与风洞试验相符合。对塔桅结构,绕圆柱的流动是很复杂的,充满着冲撞、分离、涡旋、环绕及回流的流场。绕经圆柱上方的流线向下卷起涡旋,底端的流线则向上卷起涡旋,相互交织在一起向下泄出,因此塔桅结构的下游流场是高度涡旋和紊乱,这也是圆柱分离区数值模拟精度不高的原因之一。流场模拟见图 6。Realizable $k-\epsilon$ 模型与标准 $k-\epsilon$ 模型类似,故不赘述。

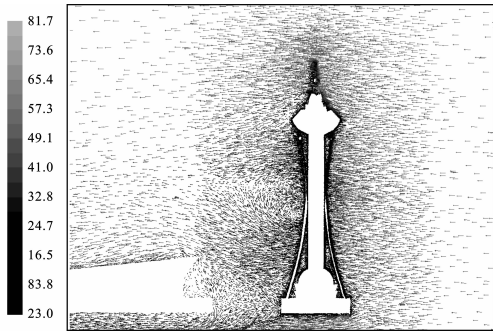


图 6 流场模拟(单位:Pa)

Fig. 6 Flow Field Simulation (Unit:Pa)

4 结 语

(1)基于 FLUENT 6 标准 $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型计算三维塔桅结构流场,在工程应用范围内可以得到具有合理精度的解,基本上能分辨出钝体流动特征。

(2)数值模拟与风洞试验结果基本吻合。建筑物的迎风面为正压,最大值出现在迎风面中心稍偏下的位置;侧风面与背风面为负压,在侧风面及背风面的中部分别出现负压的极值与较大值。

(3)标准 $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型对塔桅结构迎风面的模拟结果较为理想;对侧风面的模拟

结果最好;对背风面的模拟不甚理想。

(4)比较而言,Realizable $k-\epsilon$ 模型较 FLUENT 标准 $k-\epsilon$ 模型数值模拟精度要好。

参考文献:

References:

- [1] 陈政清,韩艳.气动力矩阵和气动导数对桥梁颤振稳定性的影响[J].中国公路学报,2007,20(2):51-56.
CHEN Zheng-qing, HAN Yan. Influence of Aerodynamic Force Matrix and Aerodynamic Derivatives on Flutter Stability for Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 51-56.
- [2] 华旭刚,陈政清,祝志文.在 ANSYS 中实现颤振时程分析的方法[J].中国公路学报,2002,15(4):32-34.
HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing, ZHU Zhi-wen. Approach of Time-history Analysis of Flutter in ANSYS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4): 32-34.
- [3] 于向东,陈政清.桥梁主梁断面颤振导数的强迫振动识别法[J].中国公路学报,2001,14(2):36-39.
YU Xiang-dong, CHEN Zheng-qing. Forced Vibration Method for Identifying Flutter Derivatives of Bridges Sectional Model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 36-39.
- [4] 祝志文,陈政清.数值模拟桥梁断面气动导数和颤振临界风速[J].中国公路学报,2004,17(3):41-45.
ZHU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing. Numerical Simulations for Aerodynamic Derivatives and Critical Flutter Velocity of Bridge Deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 41-45.
- [5] 沈之容,王之宏.上海北外滩酒店中庭结构风洞试验[J].建筑科学与工程学报,2006,23(4):74-78.
SHEN Zhi-rong, WANG Zhi-hong. Wind Tunnel Test on Atrium Structure in Shanghai North Bund Hotel [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 74-78.
- [6] 楼文娟,卢旦,孙炳楠.风致内压及其对屋盖结构的作用研究现状评述[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):76-82.
LOU Wen-juan, LU Dan, SUN Bing-nan. Review of Wind-induced Internal Pressure and Its Effects on Roof Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 76-82.

- [7] 张相庭.结构风压和风振计算[M].上海:同济大学出版社,1985.
ZHANG Xiang-ting. Calculation of Wind Pressure and Wind-induced Vibration of Structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.
- [8] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,1998.
TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [9] 白桦,李加武,胡兆同,等.近流线型断面静力三分力系数的雷诺数效应识别[J].建筑科学与工程学报,2007,24(4):60-63.
BAI Hua, LI Jia-wu, HU Zhao-tong, et al. Identification of Reynolds Number Effect of Tri-component Force Coefficient of Streamline-liked Section [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 60-63.
- [10] 王福军.计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:128-132.
WANG Fu-jun. Computation Fluid Dynamics Analysis: Principle and Application of CFD Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 128-132.
- [11] 洗京晖,倪振华,谢壮宁,等.城市广场环境风场分析及控制[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):79-82.
XIAN Jing-hui, NI Zhen-hua, XIE Zhuang-ning, et al. Analysis and Control of Urban Plaza Wind [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 79-82.
- [12] 张志沛,欧阳鸿武,秦志斌. JT6120 型客车气动特性的数值模拟和风洞试验[J].中国公路学报,2000,13(3):113-115.
ZHANG Zhi-pei, OUYANG Hong-wu, QIN Zhi-bin. The Numerical Simulation and Wind Tunnel Test on JT6120 Aerodynamic Characteristic [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 113-115.
- [13] 杨伟,顾明.高层建筑三维定常风场数值模拟[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(6):647-651.
YANG Wei, GU Ming. Numerical Simulation of Steady Flow Around a 3D High-rise Building [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(6): 647-651.