

文章编号:1671-6833(2008)04-0091-05

沈阳综合体育馆大跨封闭屋盖平均风压数值模拟

廖泽邦¹, 黄本才¹, 林 高²

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 上海建筑设计研究院有限公司 上海 200041)

摘要: 为验证数值模拟在大跨封闭屋盖平均风压应用的可行性, 采用数值模拟的方法对沈阳奥林匹克体育中心综合体育馆屋盖平均风载进行了分析, 得到屋面上不同风向下的总升力与平均风压分布, 分析了总升力随风向变化的规律性, 并将平均风压分布与风洞试验结果进行了对比分析, 可看出两种方法在三边有屋檐的屋面上的结果接近, 说明数值模拟方法模拟封闭大跨屋盖的平均风压分布可行. 通过悬挑边和圆弧边对比, 可看出 SST $\kappa-\omega$ 湍流物理模型在计算以分离流为主的流场时, 精度很好. 最后研究了不同形式屋檐屋面上锥涡分布的特点.

关键词: 数值风洞; 大跨封闭屋盖; 平均风压; 湍流物理模型; 锥涡

中图分类号: TU 351; TU 311 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 随着计算机软件与硬件能力的快速发展, 计算风工程被越来越多地得到应用. 一般体育馆的特点是结构跨度大、质量轻、结构柔、形状复杂, 从而成为风敏感结构. 体育馆屋盖的风荷载分布比较复杂, 通常多以风洞实验方法确定风荷载^[1-3], 近来计算风工程(或称为数值风洞模拟)方法开始得到应用^[4-6].

笔者采用数值风洞模拟方法对沈阳奥林匹克体育中心综合体育馆(随后简称沈阳综合体育馆)屋盖平均风压进行了数值模拟, 获得了体育馆屋面上不同风向下的总升力和平均风压分布, 分析了总升力随风向变化的规律性, 同时将数值模拟的平均风压系数与风洞试验^[7]结果进行了对比研究, 两者在三边有屋檐的平均风压系数结果很接近, 并对弧形一边处有差别的原因做了分析, 最后研究了具有不同形式屋檐屋面上锥涡的分布特点, 有参考和应用价值.

1 沈阳综合体育馆的数值风洞模拟

沈阳综合体育馆为封闭型大跨度结构, 三面悬挑, 一面是圆弧型幕墙. 体育馆高 40.57 m, 最大跨度达到 104 m. 其中东西悬挑达 5 m, 南面屋檐悬挑达 8.3 m 左右, 屋盖背面为圆弧形幕墙. 沈

阳综合体育馆按照原型尺度建模(见图 1), 建模和计算采用国际上领先的计算流体力学软件平台 CFX5.

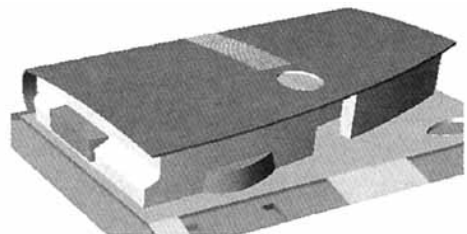


图 1 沈阳综合体育馆数值模型

Fig.1 Numerical model of Shenyang gym

所建立的数值风洞长、宽、高分别为 2 300 m、1 100 m 和 300 m, 按照 Richards 和 Hoxey 的建议^[8], 这样的计算域能适当减小侧壁对建筑物附近风压和流场的影响.

边界条件的入口(inlet)输入平均风速剖面和湍流强度. 根据周边条件, 选为 B 类地面粗糙度类别, 沈阳市基本风压取 0.55 kN/m^2 . 这样按我国荷载规范^[9], 平均风速剖面为: 10 m 以下, 平均风速为 29.66 m/s ; 10 m 至 350 m, 平均风速为 $29.66 \times (z/10)^{0.16} \text{ m/s}$; 我国规范对湍流强度无规定, 本体育馆参考国外有关国家规定, 5 m 以下湍流强度为 0.23, 5 ~ 350 m 湍流强度为 $0.094 \times (z/350)^{-0.21}$.

收稿日期:2008-07-14; 修订日期:2008-08-13

基金项目:上海市重点学科建设项目资助(B302)

作者简介:廖泽邦(1982-), 男, 湖南常德人, 同济大学硕士研究生, E-mail: zebang-0425@163.com.

出口采用充分发展湍流,计算区域面、侧面选用自由滑移壁面,地面采用无滑移壁面,建筑物侧面采用无滑移壁面。

计算域采用二阶精度四面体单元,在我们最为关心的屋盖表面及其附近区域的网格局部适当加密,本体育馆计算域的体单元数为 217.36 万。

在土木结构的风工程中,一般都为分离流,目前一般公认较好的湍流物理模型是二方程 SST $\kappa - \omega$ 剪应力输运模型,笔者也采用该湍流物理模型。

计算时设置的收敛标准为 10^{-4} ,本体育馆场计算时在多数风向下到 70 多步时即可收敛,少数风向要到 160 多步收敛。

2 屋盖上平均风载数值结果分析

2.1 不同风向下屋盖的总升力

共进行了 13 个风向(风向定义见图 2)的数值模拟计算,其中屋盖总升力结果(不含幕墙)见表 1。升力单位为 N,升力为正值代表升力向上。

从表 1 看出:①全部升力结果为正值,说明该体育馆屋盖的总升力方向向上;②在 0° 、 45° 和 315° 风向比在 135° 、 180° 和 225° 风向作用下的总升力值小,即由屋盖弧形面一边吹来的风要比其对边具有悬挑的屋盖方向吹来风的结果小,例如 0° 风仅为 180° 风结果的 0.57 倍,总升力减少 43%,原因是沿弧形面一边吹来的风不会或很少发生分离,屋盖来流前部的负压将大大降低,而对

边具有悬挑的屋盖会加强盖前缘的分离,负压将会变大;③对都具有悬挑屋盖的角部 A1 和 D1,在 A1 附近吹来要比在 D1 附近吹来斜向风的总升力大,例如 135° 风向为 225° 风向结果的 1.27 倍,该体育馆的最大升力对应的风向(150°)就在 A1 近旁,两者的主要区别是 A1 处的屋面角度为钝角,而 D1 处为接近于直角。

2.2 屋盖平均风压分布

下面给出数值模拟所得 0° 、 45° 风向下的平均风压系数分布的结果,分别见图 3 和图 4。平均风压系数定义为屋盖面上的平均风压与屋盖 40.57 m 高度来流参考风压的比值,参考风压为 860.97 Pa。

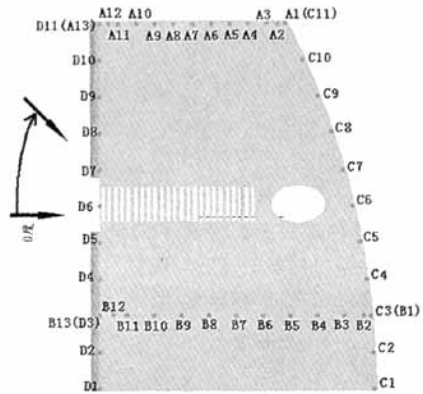


图 2 风向定义和测点位置编号
Fig. 2 Wind direction definition and dot location

表 1 屋盖的总升力 N

风向	0°	45°	90°	120°	135°	150°	180°	195°	210°	225°	240°	270°	315°
总升力	$8.32E+6$	$7.22E+6$	$6.729E+6$	$1.19E+7$	$1.43E+7$	$1.58E+7$	$1.45E+7$	$1.40E+7$	$1.32E+7$	$1.13E+7$	$1.02E+7$	$9.53E+6$	$9.01E+6$

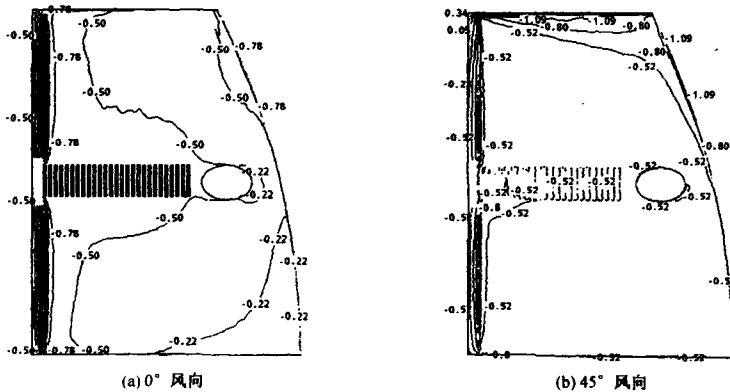


图 3 屋盖平均风压系数等高线分布
Fig. 3 Distribution of the average pressure coefficient contour on roof

由图 3a 看出,在 0° 风向作用下,屋盖面上平均风压系数全部为负压分布,即全部为吸力,在迎风向前大半个屋面上的平均风压分布大体上是对称的;在弧形屋面的前缘区域,有类似于柱涡影响的规律,平均风压等高线梯度变化剧烈,平均风压系数由 -0.50 过度到 -0.78;其余大部分区域的平均风压分布比较均匀,但在屋盖后缘靠图中上部的局部范围,又出现较小的风压系数 -0.50 ~ -0.78,可能是屋盖下方背后局部尾涡的影响所致。

由图 3(b) 看出,在 45° 斜向风作用下,平均风压系数分布的最大特点是在迎风向的两个边缘附近等高线密集,负压值较大,其分布规律完全是由屋面上的锥涡引起的.图 3(b) 中左边为弧形屋盖,上边为悬挑的屋盖,可看出在悬挑屋面附近的锥涡要比弧形屋面处影响大,前者最大为 -1.09,后者为 -0.52.关于锥涡对本体育馆屋面平均风压影响的规律将在随后的内容中详细分析。

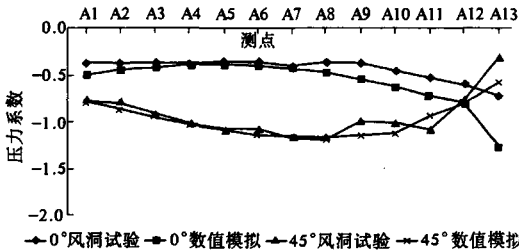


图 4 A 行测点数值模拟与风洞试验对比
Fig. 4 Numerical simulation contrast with wind tunnel tests on average pressure coefficient on row A

3 数值模拟与风洞实验结果的比较

在此仍选取 0° 和 45° 风向下屋盖上有代表性部分点的平均风压系数进行比较,平均风压系数定义与前面相同.这些点的位置和编号详见图 2,他们都位于屋盖四周的边缘,通常都是重点关注的区域.其中 A、B 两对边行的点都位于屋盖具有悬挑的区域,但 A 行的点选择在悬挑屋盖上,而 B 行则选择在墙内侧的屋盖上表面上;C、D 两对边行中,C 行也位于悬挑屋盖上,而 D 行位于弧形屋盖的上表面上;可见 A 和 D 行处的悬挑屋盖都有上下两个面,其各点结果取上下对应点的净平均风压系数.数值模拟所选取的测点总数为 44 个,他们都与风洞实验^[6]中测点布置的位置相同。

A、B 两行各点数值模拟与风洞试验平均风压系数比较分别见图 4 和图 5.由图 4 和图 5 可看

出,在绝大多数测点,数值模拟与风洞试验的结果基本上是一致的,两者平均风压系数比较吻合,但是在测点 A13 处,二者有一定的差异,尤其在 0° 风向下,差异更大一些,一般数值模拟方法的负压值比风洞实验方法大.点 A13 位于弧形屋面前缘处,受雷诺数影响较大,但数值模拟方法的雷诺数是相等的,我们重点考察了笔者采用的 SST $k-\omega$ 剪应力输运模型.因 SST $k-\omega$ 模型对分离流的效果较好,而对弧形屋面的效果如何,需要验证.我们选用了较好的放弃湍黏性假设的雷诺应力模型和其改进的 BSL 雷诺应力模型,所得结果与 SST $k-\omega$ 模型非常接近,说明数值模拟方法的结果可信.此外由于风洞试验方法没能保证雷诺数相等的条件,在 0° 和 45° 风向下在弧形屋面前缘的结果是否有足够的精度,值得进一步考察和研究。

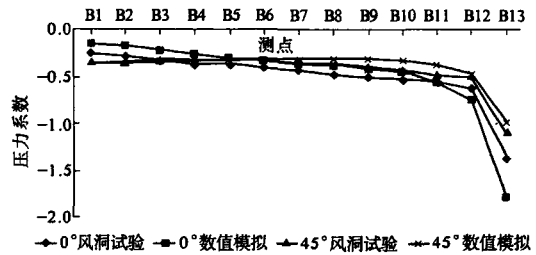


图 5 B 行测点模拟风洞实验对比
Fig. 5 Numerical simulation contrast with wind tunnel tests on average pressure coefficient on row B

图 6 给出了 C 列测点数值模拟与风洞试验结果的比较,可看出在 45° 风向下两者平均风压系数很接近,而在 0° 风向下点 C8 ~ C11 有一定的差异,数值模拟的负压值较大一些。

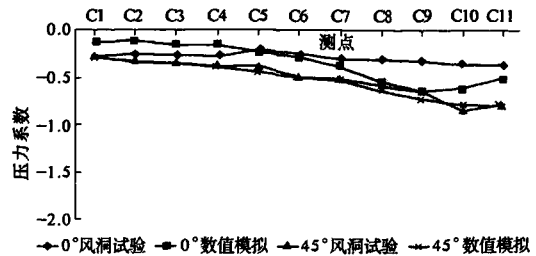


图 6 C 列测点模拟风洞实验对比
Fig. 6 Numerical simulation contrast with wind tunnel tests on average pressure coefficient on column C

图 7 绘出了位于弧形屋面前缘 D 列测点的数值模拟与风洞试验结果的比较,可看出绝大多数点的结果差别较大,相对来说 0° 比 45° 风向结果差别更大一些,一般数值模拟结果的负压比风洞实验结果大;但值得注意的是,在两个风向下,

位于中部的测点 C6 的平均风压系数却比较接近. 经分析, 测点 C6 位于屋盖镂空处(见图 2), 幕墙在此处有开口, 下有一走廊, 气流在此处发生了分离, 流场以分离流为主, 大大削弱了雷诺数的影响, 其余大多数测点结果差别较大的原因可能与雷诺数有关.

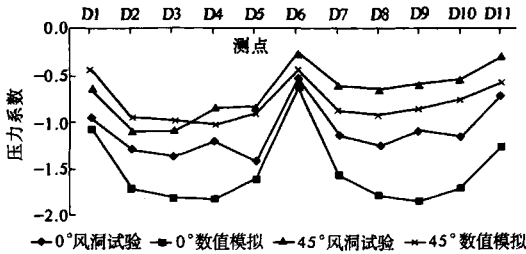


图 7 D 列测点模拟风洞实验对比

Fig. 7 Numerical simulation contrast with wind tunnel tests on average pressure coefficient on column D

由以上数值模拟与风洞实验结果比较看出, 数值模拟方法模拟大跨屋面上的平均风压结果是可信的. 屋盖三边具有悬挑、一边为弧形, 在屋盖具有悬挑的以分离流为主的三条边缘附近, 数值模拟与风洞实验结果基本一致, 但在以附着流为主的弧形面前缘一边, 估计所得到的负压值偏小.

4 矩形低矮建筑具有不同形式屋檐屋面上的锥涡分布

本体育馆具有悬挑屋檐和弧形幕墙的屋面, 相对于矩形低矮建筑无悬挑屋面上的锥涡分布有什么特点呢? 对此, 本文选取了与沈阳综合体育馆大体一致的几何尺寸, 只是将其改为矩形形状的平屋盖数值模型, 在 45° 斜风向吹来的两边, 除将一边固定为有屋檐悬挑外, 另一边为有屋檐悬挑、屋檐无悬挑和圆弧型幕墙光滑连接屋面三种工况(图 8), 其余两边都为屋檐悬挑, 其悬挑长度也参考沈阳体育馆的尺度取值.

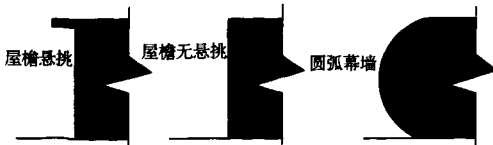


图 8 3 种屋檐形式

Fig. 8 Three forms of penthouses

图 9 和图 10 给出了 45° 斜风作用下平均风压系数的分布图, 其中图 9 可代表无悬挑和有屋檐悬

挑两种工况, 图 10 代表圆弧幕墙工况. 我们知道, 在无悬挑的矩形屋面的锥涡分布是对称的, 锥涡区域的平均风压分布也基本上是对称的, 但从图 9 看出, 由于屋檐悬挑的存在, 使两个锥涡区域的平均风压系数分布不再对称, 有屋檐悬挑一边屋面锥涡范围大, 但靠屋檐边缘附近的平均风压系数接近, 都为 -1.11、-0.83、-0.58 依此向内减少. 由此可看出, 与无悬挑的矩形屋面的锥涡分布相比, 主要是锥涡范围增大, 但负压值变化不大; 又从图 10 可知, 除有屋檐悬挑一边比圆弧一边屋面锥涡范围大以外, 悬挑一边屋面锥涡内的负压也小得多, 例如悬挑一边屋面锥涡内的最小负压为 -1.57, 而圆弧一边屋面的最小值为 -0.77, 显然具有圆弧边的屋面上不仅锥涡范围大大缩小, 平均风压的绝对值也大为降低.

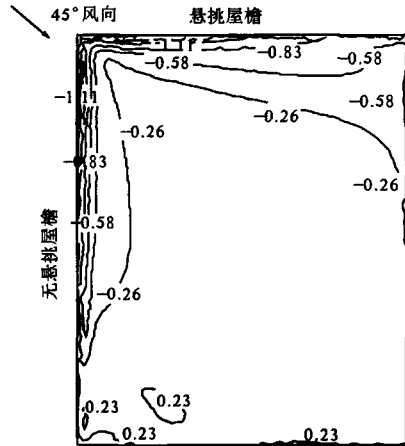


图 9 无悬挑-悬挑

Fig. 9 No cantilever-cantilever combination

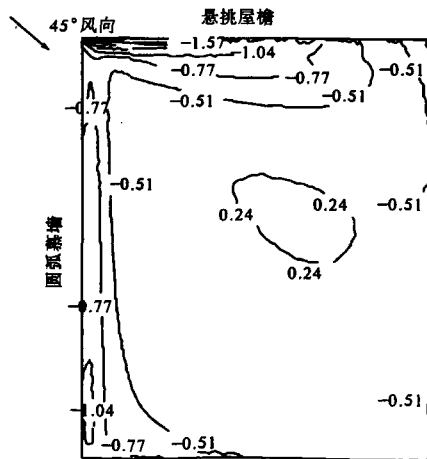


图 10 圆弧-悬挑

Fig. 10 Arc-cantilever combination

5 结论

(1)笔者模拟了三边屋檐悬挑和一边圆弧形封闭屋盖的平均风压,结果表明不同风向下的全部总升力都为吸力;由屋盖弧形面一边吹来的风要比其他三边方向吹来风的结果小;当风都具有屋檐悬挑的角部斜向吹来时,从具有钝角角部吹来时要比接近于直角角部时的总升力大。

(2)通过两个风向数值模拟与风洞实验结果对比看出,在重要的屋檐悬挑的三个屋面边缘附近区域内,两种方法的平均风压系数很接近,说明数值风洞模拟方法预测大跨封闭屋盖的平均风压分布是可行的,也具有足够的精度;而在圆弧形一边的区域内,两种方法结果有一定差别,究其原因,还有待进一步探讨。

(3)在斜风向作用下,具有屋檐悬挑和圆弧形边的四边形封闭屋盖,与四边形无屋檐悬挑的封闭屋盖相似,屋面上也呈现锥形涡的分布,但锥涡的分布不一定对称。例如当风从来流方向具有屋檐悬挑和圆弧形边吹来时,在屋檐悬挑一边比圆弧形一边屋面上的锥涡范围大。

参考文献:

[1] LAM K M, ZHAO J G. Characteristics of wind pressure

on a large cantilevered roof: effect of roof inclination [J]. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 2002, 90: 1867 - 1880.

[2] 汕头大学风洞实验室. 越南广宁体育场风荷载风洞试验研究报告[R]. 2007. 2.

[3] 南京航空航天大学空气动力学研究所. 沈阳奥体中心体育场风荷载风洞试验研究报告[R]. 2006. 6.

[4] 齐辉, 黄本才, 郑本辉, 等. 益阳体育场大悬挑屋盖风压分布数值模拟[J]. 空间结构, 2003, 9(2): 52 - 55.

[5] 齐辉, 黄本才, 张昕. 体育场大悬挑屋盖的振动特性即风振应用[J]. 郑州大学学报: 工学版. 2004. 1, 25(1): 31 - 36.

[6] 汪丛军, 黄本才, 徐晓明, 等. 环状悬挑屋盖平均风压与风环境数值模拟[J]. 同济大学学报, 2006, 34(6): 711 - 715.

[7] 龚家耕, 李江河, 黄达. 沈阳奥体中心体育馆风荷载风洞试验研究报告[R]. 南京航空航天大学空气动力学研究所. 2007. 10.

[8] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $\kappa - \omega$ turbulence model[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn 46 & 47(1993): 145 - 153.

[9] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构荷载规范(GB 50009 - 2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

Numerical simulation of Mean Wind Pressure on the Long - span - closed roof of Shenyang Gymnasium

LIAO Ze - bang¹, Huang Ben - cai¹, LIN Gao²

(1. College of Aerospace Engineering and Mechanic, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Architectural Design & Research Co. Ltd, Shanghai 200041, China)

Abstract: In order to verify feasibility of the application of numerical simulation in average wind pressure of large - span - closed roof, the numerical simulation of mean wind pressure on the roof of Shenyang gymnasium is carried out. The distribution of mean wind pressure and the lift force under different wind directions are obtained and the laws of the lift force are also analyzed. Meanwhile, the comparison between the results of the numerical simulation and wind tunnel test shows that the results on the roof surfaces with three cantilevered edges are close, so the numerical simulation of mean wind pressure on the long - span - closed roof is feasible. From the comparison between cantilevered edges and arc edge, it can be seen that the SST $\kappa - \omega$ turbulence model used in the separation stream's simulation has a high precision. Finally, the cone vortex's characteristics on different forms eaves are discussed.

Key words: numerical wind tunnel simulation; large - span - closed roof; mean wind pressure; turbulence physical model; cone vortex