

# 深圳机场 T3 航站楼风压特性研究\*

周 晔 毅<sup>1</sup>, 顾 明<sup>1</sup>, 臧 健<sup>2</sup>, 全 涌<sup>1</sup>, 晏 克 勤<sup>1</sup>

(1 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

2 深圳市机场(集团)有限公司, 深圳 518128)

[摘要] 为了给结构(含围护结构)设计提供设计依据,介绍了超大跨度屋盖结构——深圳机场 T3 航站楼的模型风洞试验和数值模拟的主要结果。给出了屋面在典型工况下的分块体型系数(对应法向风压)和切向风荷载体型系数等值线,清楚地显示了屋面的风压分布特征,结果表明切向风荷载相对法向风荷载较小。同时考虑到作用在围护结构上脉动风压的相关性对极值风压的折减,分析了围护结构设计风荷载的折减因子。

[关键词] 风洞试验; 大跨度屋盖; 风压分布; 数值模拟; 折减因子

中图分类号: TU312.1, TU391 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)01-0122-04

## Research on wind pressure of Terminal 3 in Shenzhen International Airport

Zhou Xuanyi<sup>1</sup>, Gu Ming<sup>1</sup>, Zang Jian<sup>2</sup>, Quan Yong<sup>1</sup>, Yan Keqin<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Shenzhen Airport Group Ltd., Shenzhen 518128, China)

**Abstract:** Testing conditions and main results of wind tunnel test and numerical simulation on Terminal 3 in Shenzhen International Airport were introduced. The block shape coefficients for wind forces acting normal to the building surface and the contours of shape coefficients for wind forces acting tangent to the building surface (friction forces) were given for the typical condition, which showed clearly the characteristics of the wind pressure distribution on the large-span roof surface. It is found that the wind forces acting tangent to the building surface are smaller than that of acting normal to the building surface. Meanwhile, considering the wind loading effects at different locations on the same cladding structure will offset each other, the reduction factors taking into the effects of relevant properties for individual measuring points were analyzed.

**Keywords:** wind tunnel test; large-span roof; wind pressure distribution; numerical simulation; reduction factor

## 0 引言

扩建后的深圳机场将成为我国航空枢纽中心之一,其中 T3 航站楼是典型的超大跨度空间屋盖结构,长约 1 100m(包括交通中心后长约 1 400m),最宽处约 600m,最高处约 43m,屋面最大悬挑长度约 100m(图 1)。航站楼屋面为复杂的曲面形状,除了有凹陷于屋面的大型天窗外,屋盖表面还分布了类似蜂窝状凹凸不平的面板。该大跨结构具有质量轻、柔性大、阻尼小等特点,是典型的风敏感结构。此外,在大气边界层中,这类结构处于高湍流度区,由于其独特的建筑外形,绕流和空气动力作用非常复杂。航站楼位于常遭台风侵袭的海边,结构更易发生大幅的风致振动,风荷载是控制结构设计的主要荷载之一。因此,为结构设计人员提供尽可能准确的屋盖风荷载信息至关重要。

介绍了深圳机场 T3 航站楼的刚性模型测压试验,给出了屋面在典型工况下的分块体型系数;同时,提供了用于围护结构设计的极值风压,考虑到作用在围护结构上脉动风压的相关性对极值风压的折减,还分析了围护结构设计风荷载的折减因子;另外,采用计算流体动力学方法(Computational Fluid



图 1 深圳机场 T3 航站楼

Dynamics,简称 CFD)模拟了屋面表面小的、凹凸不平的面板引起的表面切向风荷载。

## 1 试验概况

航站楼测压试验模型为刚性模型(图 2),用玻璃钢、有机玻璃板和 ABS 板制成,具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,并且不出现明显的振动现象,以保证压力测量的精度。模型的几何缩尺比为 1/250。整个模型上共布置 3 257 个测压孔。

由于模型的几何尺度和试验风速均远小于实际值,因而模型的雷诺数也远小于实际结构<sup>[1]</sup>。航站

\* 科技部国家重点实验室基金(SLDRCE10-B-04),国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50621062)。  
作者简介:周晔毅,博士,副研究员,Email:zhouxytj@tongji.edu.cn。

楼不同部位之间的空气动力干扰比较严重, 整个结构处于复杂的高紊流流动之中, 这将减弱雷诺数效应的影响; 而具有钝体外观的部位, 如悬挑屋盖端部存在尖锐前缘, 雷诺数效应可不予考虑; 此外, 试验在高紊流度风场中进行, 风场紊流条件又大大减弱了雷诺数效应。为了进一步降低雷诺数效应对试验结果精度的影响, 在建筑结构的抗风试验研究中, 通常采用增加模型结构表面粗糙度的方法使其近表面的绕流在较低雷诺数时就提前进入紊流状态, 从而近似达到对实际结构高雷诺数效应的模拟。因此文中在屋盖表面粘贴了细条, 在模型表面上构成网状结构, 以此达到增加模型表面粗糙度的目的。尽管如此, 严格的雷诺数效应模拟是风工程研究中的一个经典难题, 特别是对于气动弹性问题(风致振动响应)中雷诺数效应的机理还了解很少。

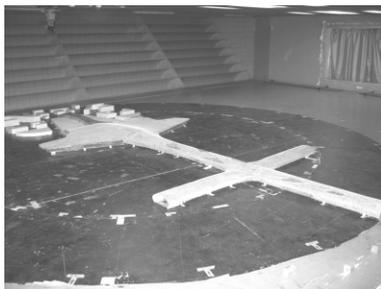


图 2 刚性模型

风洞测压试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-3 大气边界层风洞中进行的。试验风向角间隔取为 15°。航站楼南侧的部分周边建筑在风洞试验中予以考虑。按照文[2]的方法, 试验中模拟了两种风场。0°~180°风向范围为 B 类地貌, 195°~345°风向范围为 A 类地貌。模型方位及风向角定义见图 3。对于 A 类及 B 类风场, 平均风速剖面指数分别为 0.12 和 0.16, 模型顶部高度处的湍流度分别为 12% 和 16%。试验参考点(高度为 0.80m) 风速为 10.0m/s。

2 刚性模型测压试验

2.1 数据处理

在空气动力学中, 物体表面的压力通常用无量纲的压力系数  $C_{pi}$  表示:

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_\infty}{0.5\rho v_\infty^2} \quad (1)$$

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;  $p_\infty$  是试验时参考高度处的静压;  $\rho$  为空气密度;  $v_\infty$  是参考高度处的风速。在分析时往往以梯度风高度作为参考高度, 由此得到以梯度风压为参考风压的风压系数。风压系数极大值  $C_{pmax}$ 、风压系数极小值  $C_{pmin}$  定义如下:

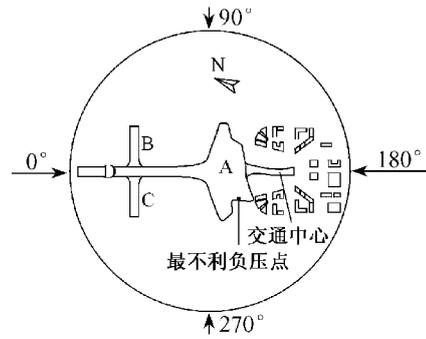


图 3 模型方位及风向角

$$C_{pmax} = C_{pmean} + kC_{prms}$$

$$C_{pmin} = C_{pmean} - kC_{prms}$$

其中:  $C_{prms}$  为风压系数的均方根;  $k$  为峰值因子, 在这里取为 3.5 (根据 Davenport 提出的公式<sup>[3]</sup>, 按极值的概率分布来确定峰值因子, 当峰值因子取 3.5 时, 保证率超过 99.4%)。对各测点的  $C_{pi}$  进行数据统计分析即可得平均风压系数  $\bar{C}_{pi}$ , 并可容易地换算得到各测点的体型系数  $\mu_{si}$  (为区别《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)<sup>[4]</sup> (简称荷载规范) 中的体型系数, 这里定义  $\mu_{si}$  为测点  $i$  的点体型系数, 本小节的体型系数均对应法向风压, 区别于后文对应于切向风压的切向风荷载体型系数), 即: 对 A 类地貌,  $\mu_{si} = \bar{C}_{pi} \times (300/z)^{0.24}$ ; 对 B 类地貌  $\mu_{si} = \bar{C}_{pi} \times (350/z)^{0.32}$ , 其中  $z$  为测点  $i$  的实际高度。大量的试验数据 (各测点的点体型系数或压力系数) 不易在文中表达, 为此, 将航站楼屋面划分为若干个分块部分, 给出每个分块的分块体型系数  $\mu_s$ , 即:

$$\mu_s = \sum_{i=1}^n \mu_{si} \mu_{zi} A_i / \mu_z A \quad (2)$$

式中:  $\mu_{si}$   $\mu_{zi}$   $A_i$  为测点  $i$  的点体型系数、风压高度变化系数和对应的面积;  $A$  为分块的总面积;  $\mu_z$  为分块中心的风压高度变化系数。

2.2 分块体型系数

限于篇幅, 这里仅给出航站楼屋面在 180° 风向角时的分块体型系数, 见图 4。该分块体型系数结合考虑风致动力效应的风振系数后, 可用于承重结构的整体计算分析。在该风向角下, 由于来流在屋面 A 区域 (各区域位置见图 3) 前沿发生比较强烈的分离, 导致悬挑部分上下表面合成风压出现绝对值较大的负风压 (负值表示吸力, 正值表示压力), 绝对值最大的分块体型系数为 -1.21。在屋面的两侧翼, 即 B 和 C 区域也出现较大的负压, 并且迎风侧的负压绝对值明显大于背风侧。远离来流一端的 D 区域体型系数出现较小的正值, 这是因为尾流发生了再附。凹陷于屋面的大型天窗区域情况则要复杂一些, 根据天窗的位置和形状的不同而表现出不同

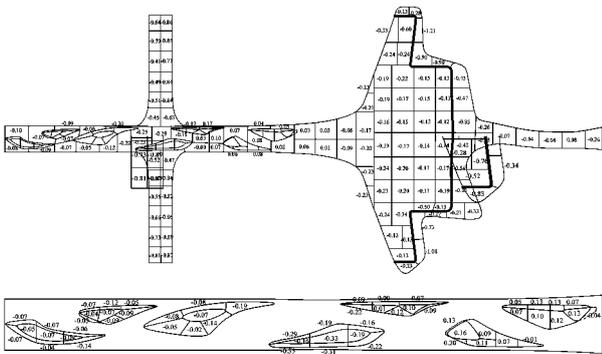


图4 180°风向角时 T3 航站楼的分块体型系数

的风压值,但天窗区域的体型系数一般而言并不大。

总的来说,由于来流分离,屋面迎风前缘的负压较大;来流再附后的屋面中部和后缘部分的风压大大减小。这与其他机场航站楼风荷载研究的结论一致<sup>[5,6]</sup>。

### 2.3 用于围护结构设计的风压

对于每个测点,在所有风向对应的  $C_{pmax}$  和  $C_{pmin}$  中,总可以找到一个最大的  $C_{pmax}$  和一个最小的  $C_{pmin}$ ,分别称为该测点的最大极值风压系数  $\tilde{C}_{pmax}$  和最小极值风压系数  $\tilde{C}_{pmin}$ 。得到各测点的最大(最小)极值风压系数后,乘以梯度风压并考虑内压修正就可得到各测点的最大(最小)极值风压,该方法称为统计方法。航站楼屋面测点最不利正压为 2.87kPa(已进行了内压修正,此最不利风压对应深圳市 50 年重现期基本风压 0.75kPa,下同),最不利负压值为 -5.81kPa。而按照荷载规范提供的方法(简称规范方法),基于风洞试验得到的点体型系数,同样可以得到用于围护结构设计计算的风压值:航站楼屋面测点最不利正压为 2.40kPa,最不利负压为 -4.80kPa。尽管在此没有给出所有最不利风压的数值,但多次试验数据已经表明统计方法的数值大于规范方法的。由于统计方法考虑了来流分离等因素产生的脉动风压力,因而比基于平均压力系数的规范方法更准确。依据统计方法得到的最不利负压出现在 240°风向,该测点位于迎风前缘屋盖边缘(位置见图 3)。

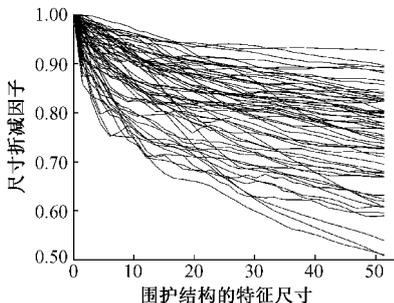


图5 围护结构负压系数的尺寸折减因子

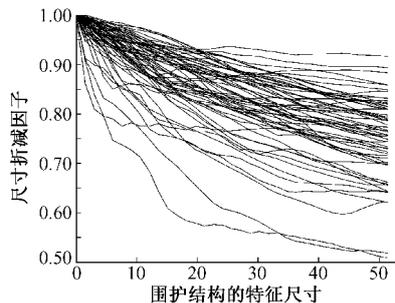


图6 围护结构正风压系数的尺寸折减因子

作用在结构上的风压总是时空脉动的,且在空间上是相关的,这将导致围护结构上不同部位的脉动风压产生的作用效果将会在一定程度上相互抵消,总的风荷载作用效果将随结构尺寸的增大而减小。这种现象可称为围护结构风荷载的尺寸折减效应,通常用以下的折减因子来表达这种效应<sup>[7]</sup>:

$$C_r(L) = C_{pmax}(L) / C_{pmax}(0) \quad (3)$$

式中:  $C_r(L)$  为尺寸折减因子;  $C_{pmax}(L)$  为作用在围护结构上的最大风压系数;  $C_{pmax}(0)$  为作用在围护结构某一点上的最大风压系数;  $L$  为围护结构的特征尺寸,当围护结构为圆形时为其直径,当围护结构为细长结构时为其长度,当围护结构为方形或长方形时为其对角线长度<sup>[7]</sup>。

在进行尺寸折减因子研究时,通常采用时间平均替代空间平均的方法,即把围护结构上单个测点脉动风压时程的时间移动平均结果看作是作用在整个围护结构上的脉动风压时程<sup>[8,9]</sup>。

文[9]认为时间平均的时距  $T$  与围护结构的特征尺寸  $L$  之间存在如下关系:

$$TV = 4.5L \quad (4)$$

式中,  $V$  为作用在围护结构上的平均风速。

基于式(3),(4)可得到航站楼围护结构的设计风荷载尺寸折减因子随特征尺寸变化的曲线图,限于篇幅,文中将多个测点的曲线图汇集在同一图形中,如图 5,6 所示。由图可见,随着特征尺寸的增大,折减因子逐渐减小;当特征尺寸达到 40 时,大部分测点的折减因子趋于稳定,此时多数测点的折减因子在 0.75 以上。当设计人员进行围护结构设计时,先根据围护结构的外形确定其特征尺寸  $L$ ,再从图 5,6 中查出该围护结构临近测点的特征尺寸  $L$  所对应的尺寸折减因子  $C_r(L)$ ,将围护结构的最大设计风荷载和最小设计风荷载乘以尺寸折减因子,即可得到最终的围护结构设计风压。然而,在具体应用时,如何科学合理地确定特征尺寸并没有这么简单,这需要对围护结构在风荷载作用下的破坏机理做进一步研究。考虑到随着围护结构尺寸的增

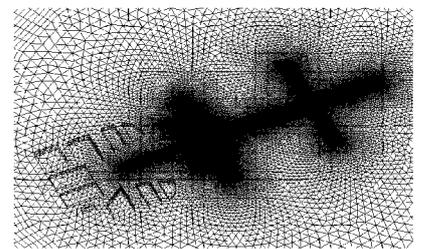


图7 计算域和网格划分

大, 围护结构可能不是作为一个整体共同参与工作, 其局部可能因为所受最不利风压大于其能承受的最不利风压而先于整体发生风毁现象。因此, 为了保证结构的安全性, 建议该折减系数最小值取 0.85。

### 3 屋盖表面切向风压的数值模拟

分布在屋盖表面的类似蜂窝状凹凸不平的面板 (长度及宽度约为 3.0m, 相对屋盖面板高度约为 0.4m) 增加了屋盖表面的粗糙度, 相对于光滑表面, 在来流作用下屋面将出现不可忽略的表面切向风荷载或摩擦力; 由于面板的形状非常复杂, 导致难以加工出真实反映这些面板的风洞试验刚性模型。因此前文的风洞试验采用了光滑表面的模型, 试验结果仅反映了作用在屋面表面的法向风压。为得到这些面板引起的切向风压大小, 本节拟通过 CFD 方法进行模拟。

采用基于时间平均的雷诺 Navier-Stokes 方程, 湍流模型使用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 利用 SIMPLE 压力校正算法进行超松弛迭代求解, 对流项计算为二阶迎风格式。计算流域为一个高 300m、底为正二十四边形的棱柱体, 正二十四边形的外接圆直径为 11400m。网格剖分方案采用区域分块技术。在建筑物附近的区域采用加密的非结构化网格, 在其他区域则采用结构化网格。网格总数约为 300 多万个。结构附近局部网格如图 7 所示。流场的入流面采用速度入流边界条件 (Velocity-inlet), 来流为均匀来流 (47.0m/s); 出流面采用压力出流边界条件 (Pressure-outlet); 顶部和两侧采用对称边界条件 (Symmetry); 其余采用无滑移壁面边界条件 (Wall)。由于深圳 T3 航站楼表面小的凹凸不平面板在 CFD 计算时难以直接模拟, 经过与设计方的商议, 采用设置航站楼屋面壁面粗糙度的方法来间接模拟小面板。文中事先在一个简单模型中直接模拟小面板, 同时同一模型中采用上述方法间接模拟小面板, 然后比较两种结果。通过这样的途径, 得到适当的壁面粗糙度系数和壁面粗糙高度分别为 0.52 和 0.25m。

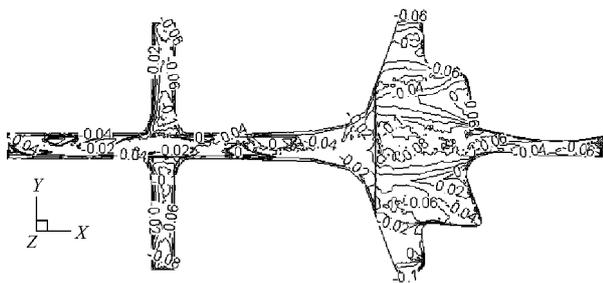


图 8 切向风荷载体型系数等值线  
( $180^\circ$  风向时  $X$  向分力系数)

把数值模拟得到的切向风荷载分解为与笛卡尔坐标对应的  $X$ 、 $Y$  及  $Z$  向分量。与前文对应, 在此仅给出  $180^\circ$  风向下航站楼屋盖表面  $X$  向 (顺风向) 切向风荷载体型系数等值线 (注: 风洞试验得到的是屋盖表面法向体型系数, 两者可结合起来用于整体承重结构的设计与分析), 结果如图 8 所示。图中正、负值分别表示切向风荷载沿  $X$  轴正、负向。相对  $X$  向切向风荷载,  $Y$  及  $Z$  向切向风荷载相对较小, 没有在此给出。从图中可见, 比较大的顺风向切向力出现在 A、B 及 C 区域的顶部范围, 此时切向风荷载体型系数的绝对值在 0.1 左右, 其他区域切向力绝对值很小。对比图 8 与图 4 可知, 即使面板增加了屋面粗糙度, 但切向风荷载相对法向风荷载仍然很小。

### 4 结语

介绍了深圳机场 T3 航站楼模型的风洞试验概况、主要的风洞试验和数值模拟的结果。给出了航站楼屋面在典型工况下的分块体型系数, 由于来流分离导致较大的负压出现在屋盖迎风前缘区域, 来流再附后的屋面中部和后缘部分的风压大大减小; 提供了用于围护结构设计的极值风压, 同时还分析了围护结构设计风荷载的折减因子。另外, 为了考虑分布于屋盖表面的面板引起的表面切向风荷载, 采用了数值计算 (CFD) 方法对其进行了等效模拟。结果表明, 较大的顺风向切向荷载出现在航站楼屋面的顶部区域, 且切向风荷载相对法向风荷载很小。

### 参 考 文 献

- [1] SIMIU E, SCANLAN R H. 风工程导论——风对结构作用 [M]. 刘尚培, 项海帆, 谢黎明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [2] 黄鹏, 全涌, 顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27 (2): 136-140.
- [3] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [4] GB50009—2001 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [5] 顾明, 黄鹏, 周炬毅. 北京首都机场 3 号航站楼风荷载和响应研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (1): 40-44.
- [6] 周炬毅, 黄鹏, 顾明. 上海铁路南站屋盖表面风压特性试验研究 [J]. 建筑结构, 2007, 37 (2): 118-120.
- [7] COOK N J. The designer's guide to wind loading of building structures part 2: static structures [M]. Publications Sales Office Building Research Establishment, 1985.
- [8] LAWSON T V. Wind effects on buildings, volume 1: design applications [M]. London: Applied Science Publishers, 1980.
- [9] HOHN D HOLMES. Wind loading of structures [M]. London: Spon Press, 2001.