

# 檐口结构对四坡低矮房屋屋面风压影响的数值模拟研究

邹思敏,戴益民,蒋荣正,闫旭光,雷静敏

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**基于 Ansys FLUENT RNG $\kappa$ - $\varepsilon$  模型,通过利用日本东京工业大学同体型比的四坡低矮房屋表面风压进行对比分析.结果表明:数值模拟与风洞试验结果基本吻合,验证了数值模拟方法的可行性;基于此模型对檐口长度及结构形式改变对屋面平均风压展开了研究,檐口长度的变化对屋面风压分布及大小的影响较为显著;屋檐角部位置结构发生变化直接影响屋面风压分布规律,切角可以起到降低屋面平均风压作用,此结论可以为沿海低矮房屋抗风及设计提供参考.

**关键词:**风工程;数值模拟;四坡屋面房屋;平均风压

**中图分类号:**TU312<sup>+</sup>.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2015)01-0072-06

## Numerical simulation of effects of cornice structure on wind pressure of low-rise hip roofed buildings

Zou Simin, Dai Yimin, Jiang Rongzheng, Yan Xuguang, Lei Jingmin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Based on Fluent and Re-normalization group (RNG)  $\kappa$ - $\varepsilon$  model, according to a comparative analysis of low-rise hip roofed buildings surface pressure on the Japanese Tokyo Polytechnic University with the same size ratio. Simulation results show that the numerical simulation and wind tunnel test results are basically consistent, the feasibility is revived that of numerical simulation methods. Based on this model, the changing of the length of the cornice and roof structure on the average pressure is launched a study. Impact of changes in the length of the roof cornice pressure distribution and the size is of more significant, and roof eaves angle changes directly affect the distribution of pressure, cutaway roof eaves can reduce the average pressure, this conclusion can provide reference for coastal wind and low building design.

**Keywords:** wind engineering; numerical simulation; hip roofed building; mean wind pressure

四坡低矮建筑在我国的应用从古至今应用都较为广泛,从古代的庭院、亭子等建筑到现代常见的四坡低矮民房,此类屋面极为常见,从古代的木结构支撑到现在的钢结构支撑,且建筑的体型及屋面形式复杂多变,导致研究其风荷载特性是低矮建筑抗风设计的重要组成部分.我国是世界上遭受台风灾害最为严重的国家之一,因台风而引起建筑物损毁的各方面损失十分惨重.历次国内外各大台风灾害调查表明,屋面破坏是低矮四坡屋面建筑的主要破坏形式之一.在对低矮房屋屋面抗风的研究与设计,可以通过采用几何形状改变和合理配置檐口等措施来改变房屋周围的风场和屋面风压分布,这些措施有助于提高低矮房屋的抗风能力.

收稿日期:2014-02-22

基金项目:交通运输部重大科技项目(2011318824140);广西防灾减灾与结构安全重点实验室开放课题(2013ZDK06);湖南省教育厅(13K088);湖南科技大学项目(E51257,J11216)

通信作者:戴益民(1972-),男,湖南新化人,博士,副教授,主要从事风工程方向研究. E-mail:dymzzy@163.com

结构风工程主要研究方法包括:现场实测、边界层风洞实验和数值模拟 3 大方面. 由于实验本身的特性,现场实测是最为有效的方法,但同时是最耗时耗力且较难进行参数分析;风洞试验能够正确反映实际结构上的风荷载和风致响应,但在模型制作上如何恰当地模拟结构的外形、质量和刚度等结构特性和风洞实验进行中,难以满足几何相似、雷诺数、密度比、柯西数和阻尼比等参数一致的条件;而数值模拟的方法已得到人们越来越多的重视与应用,数值模拟方法中包括直接数值模拟法(DNS)、雷诺平均法(RNS)以及大涡模拟法(LES). 其中 LES 与 DNS 方法对计算机的内存及 CPU 速度要求较高,因此在时间域上平均的雷诺平均法(RNS)和湍流物理模型在风工程中应用最广,但它的核心是不直接求解瞬时的  $N-S$  方程,而是想办法求解时均化的雷诺方程. 同时为了封闭时均雷诺方程,还需引入某种湍流模型,常见的有 Spalart-Allmaras 湍流模型、雷诺应力(RMS)模型、 $\kappa-\varepsilon$  模型和  $\kappa-\omega$  模型. 同时国内外对在低矮房屋结构风工程领域对平屋顶、单坡和双坡屋面房屋的风压分布都有了较多的分析与较深入的研究,在四坡屋面的研究上也取得了进展. 李秋胜等<sup>[1]</sup>根据强台风“黑格比”登录过程中的实测数据与分析,采用现场实测的方法得出屋面平均、脉动及极值风压系数的规律,且建筑模型为平屋面;陶玲等<sup>[2]</sup>通过研究低矮房屋屋面是否添加屋脊和出山对屋面风荷载的影响,得出有屋脊和出山屋面是对低矮房屋抗风最有利的屋面形式;谢壮宁等<sup>[3]</sup>分析了模型尺寸变化对平均、脉动风压系数和堵塞特征的影响;顾明等<sup>[4]</sup>通过对我过沿海地区较常见的带挑檐的低层双坡建筑的屋面风进行了数值模拟,研究了对屋面平均风压产生影响的因素;宋芳芳<sup>[5]</sup>对双坡屋面低矮房屋风致内压进行了数值模拟,表明房屋开洞对风致内压的影响;戴益民等<sup>[6-8]</sup>对双坡屋面低矮房屋进行了数值模拟,表明湍流度、开洞、坡度对房屋表面风压的影响;孙颖浩等<sup>[9]</sup>从屋面坡度、房屋高度、跨度、长度以及檐口等因素对曲面双坡屋面进行了数值模拟研究;Endo 等<sup>[10]</sup>对 TTU 标准低层建筑模型进行了风洞试验研究;陈水福等<sup>[11-13]</sup>采用了数值模拟方法对低矮双坡屋面以及低矮四坡屋面风荷载进行了分析;聂少峰等<sup>[14]</sup>对低层四坡屋面房屋模型进行了风洞试验,给出了屋面平均和脉动风压系数等值线和各面体型系数的变化规律;目前我国对低矮四坡建筑的研究相对较少,且我国现行的《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[15]</sup>虽然对一些屋面类型如单坡、双坡屋面房屋的平均风载体型系数有对应的规定,但是对四坡屋面却几乎没有.

本文基于对四坡屋面的屋面檐口结构进行研究,利用数值模拟结果与日本东京工艺大学的风洞试验数据进行对比,说明本文采用方法的适用性与精度. 同时通过此方法,研究了在不同风向时,不同檐口结构对低层四坡房屋屋面表面风压的分布以及其变化规律,为沿海低矮房屋抗风及设计提供参考.

## 1 数值模拟与风洞试验对比

本文数值模拟对比数据来源于日本东京工艺大学风洞试验中同体型比的四坡低矮房屋, (<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp>) 其风洞试验段宽 2.2 m, 高度为 1.8 m 且本试验长度比例为 1:100, 风速比例为 1:3, 以及时间比例为 3:100, 且假定的目标建筑是按日本规范所指定的郊区风场, 即日本荷载规范 AIJ(2004) 中的 III 类风场, 所以其平均风速剖面指数为 0.20, 梯度风高度为 450 m, 10 m 高度处的来流紊流强度为 25%, 在试验中此风洞 10 cm 高度处的风速为 7.5 m/s, 对应实际建筑的设计基本风速为 22 m/s. 本文采用长 240 mm, 宽 160 mm, 以及高 40 mm, 坡度为 45° 的四坡低矮建筑模型.

本文采用数值模拟方法, 通过建立实际尺寸为 24 m × 16 m × 4 m 的计算模型, 且计算域取为 360 m × 160 m × 40 m, 建筑模型位于流域沿流动方向上游 1/3 处, 计算模型的阻塞率小于 3%. 本文基于雷诺时均方程  $N-S$  方程和 RNG $\kappa-\varepsilon$  模型, 模型附近网格分布密集, 远离模型的流域网格分布相对稀疏, 网格数控制在  $80 \times 10^4$  左右. 分别选取 0°, 90° 风向对模型进行分析, 模型以及测点分布情况如图 1 所示.

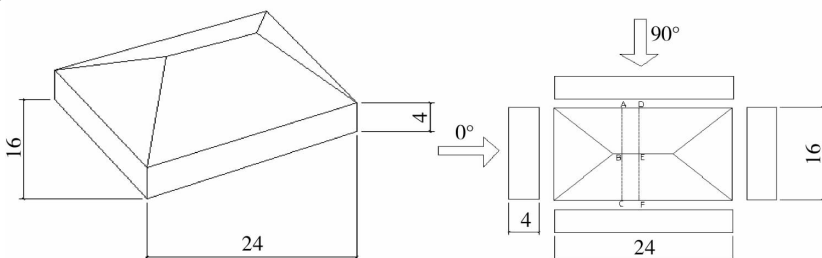


图 1 低矮房屋试验模型以及风向角

由于日本东京大学风洞试验数据中已有相对应位置的有关平均风压系数的统计,遂将模拟结果与试验数据的平均值进行对比,同时为方便进行对比,将计算结果换算成无量纲的平均风压系数  $C_p$  ( $C_p = \frac{p}{0.5\rho u^2}$ ), 其中  $p$  为区域面积的平均风压,  $\rho$  为空气密度,  $u$  为参考高度风速. 对比情况如图 2.

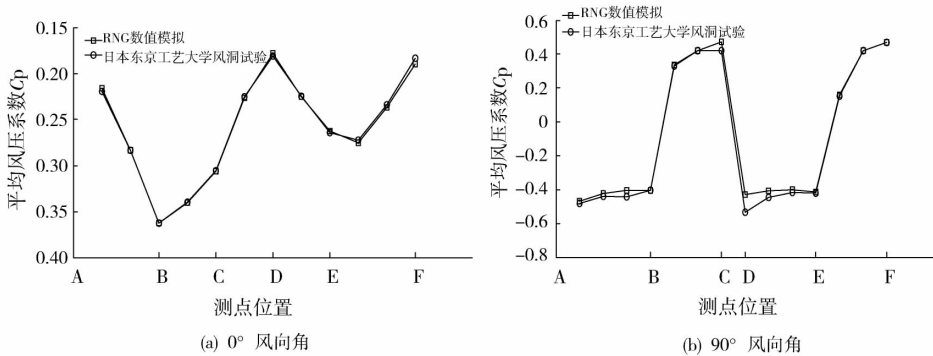


图 2 模型中测点平均风压系数对比

由图可见,数值模拟结果与风洞试验结果总体相吻合,此说明所用模型和参数对本研究是具有一定适用性的.

## 2 挑檐长度对屋面风压影响研究

基于对屋面檐口长度对屋面风压影响的分析,檐口高度与模型一致,挑檐长度  $L$  分别选取 0.5, 1.0, 1.5 m, 3 个长度以及  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  以及  $90^\circ$  风角进行分析,为了方便分析将屋面分为 4 个区域,如图 3 所示.

在  $0^\circ$  风向角下,如图 4(a) 所示,随着挑檐长度的增加,迎风面 1 区的平均风压系数变化幅度较大,绝对值变小,而背风面屋面平均风压系数呈现出微小的变大趋势,且绝对值大于迎风面,另外 2 个区域呈现微小的变大趋势,但变化比较平缓. 从中可看出,挑檐长度的变化可改变部分区域的流动特性,在 1 区平均风压系数受到影响非常明显,随着挑檐长度的增加平均风压系数减小.

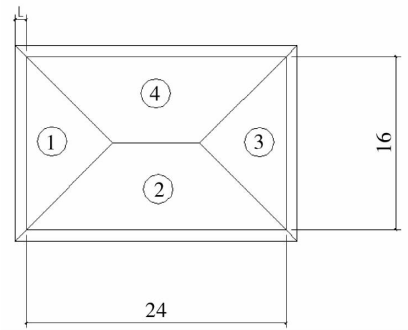


图 3 屋面分区

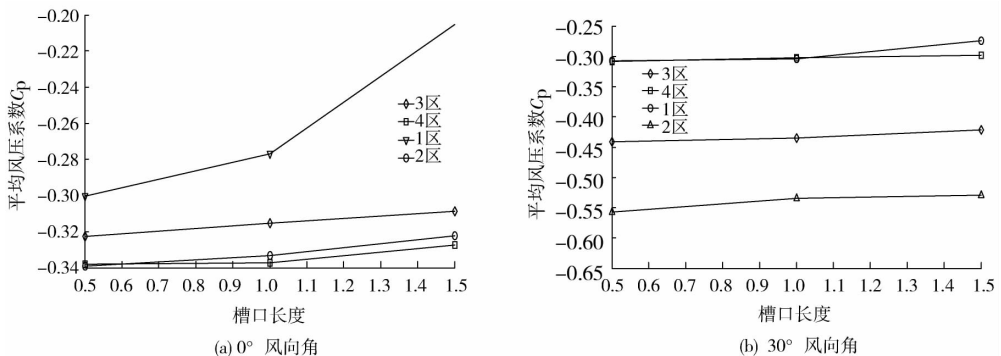


图 4 不同风向角下檐口长度对四坡屋面各区域平均风压系数  $C_p$  的影响

在  $30^\circ$  风向角下,由于风角的变化,导致迎风区域改变,当挑檐长度超过 1 m, 1 区的平均风压系数变大, 2, 3, 4 区变化相对平缓,整体呈变小趋势,迎风面受到风压其系数变大,且绝对值大于  $0^\circ$  风角的情况,但 4 个区域的风压系数都比较平缓,4 个区域风压在  $30^\circ$  风向角情况下挑檐对改变来流运动的影响较小.

在  $45^\circ$  风向角下,如图 5(a) 所示,各区域随挑檐长度的增加平均风压系数减小,迎风面和背风面受到风压其系数变大,挑檐影响各区域风压,且在 2 区和 3 区变化较明显,而对 1 区和 4 区影响较小. 在  $60^\circ$  风向角下,如图 5(b) 所示,迎风面和背风面风压变大,4 个区域的变化平缓,挑檐长度的变化是平均风压系数整体呈现下降趋势,在 2 区尤为明显.

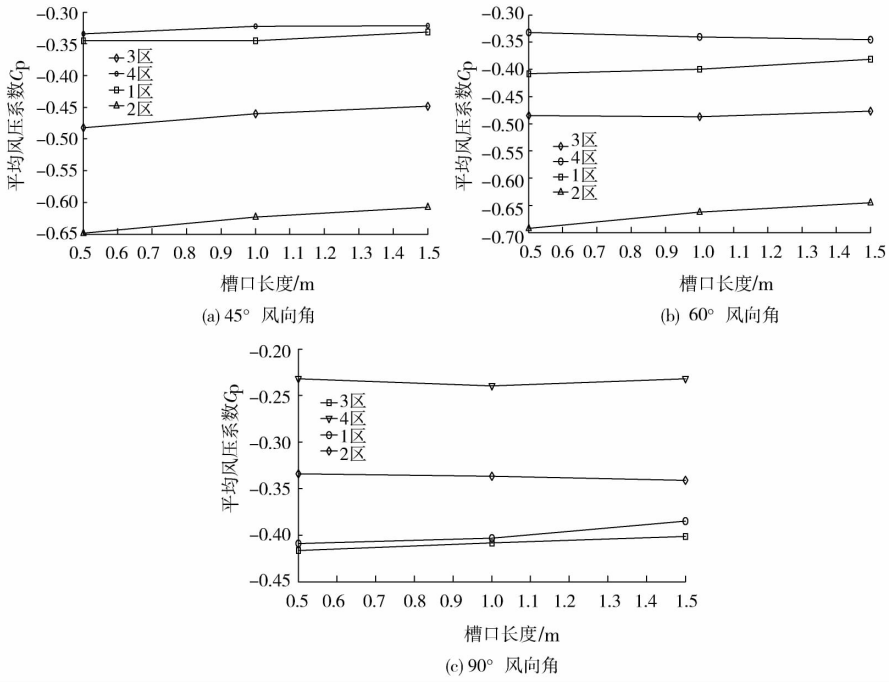


图5 不同风向角下檐口长度对四坡屋面各区域平均风压系数  $C_p$  的影响

在 90° 风向角下,如图 5(c) 所示,迎风面和背风面风压变小,4 个区域的变化平缓呈变小趋势,在 1,3,4 区平均风压系数变小,变大幅度不大。

图 6 所示随着带挑檐低矮四坡屋面平均风压受到风向角的强烈影响,随风风向角的变化而变化,从图中区域 4 由背风面转变成迎风面,且在 60° 风向角时随挑檐长度的变化达到极值,负平均风压绝对值达到 0.69,带挑檐低矮四坡屋面随挑檐长度的增加,各区域平均风压成下降趋势,对屋面风压的大小的影响显著,且呈现规律性变化。

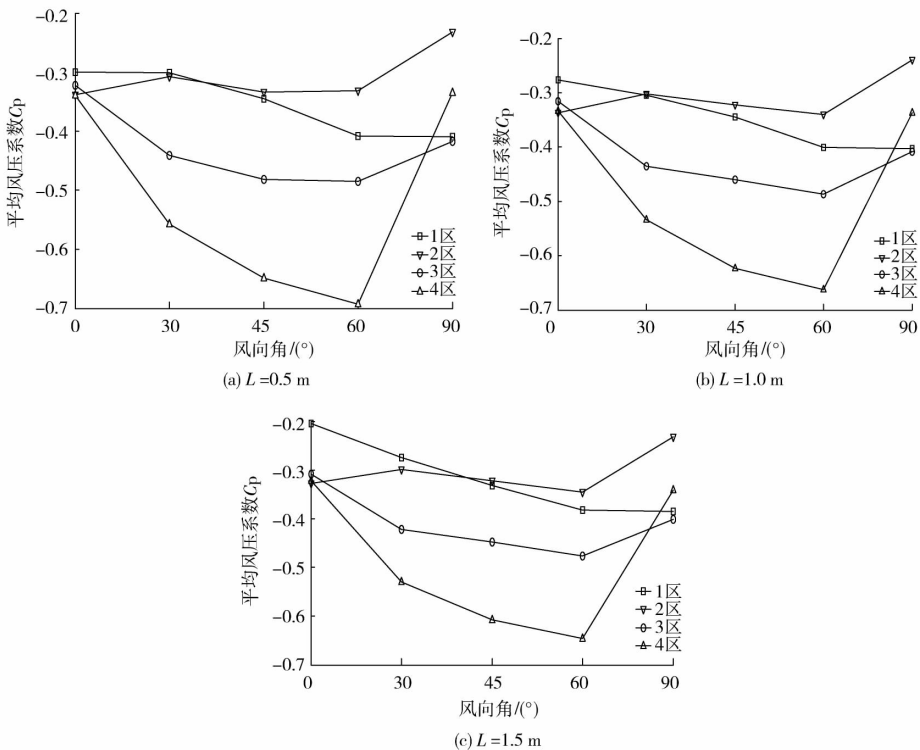


图6 在不同檐口长度下不同风向角对屋面各区域平均风压系数  $C_p$  的影响

### 3 屋檐切角对屋面风压的影响

由于自古中外建筑以及风工程研究方面对于低层屋檐角大多都处于尖锐利角,本文基于此原因,改变檐口结构,将屋檐角转变为切角,切角情况如图7所示,采用 $24\text{ m} \times 16\text{ m} \times 4\text{ m}$ ,且坡度为 $45^\circ$ 的带挑檐四坡屋面,挑檐长度为 $1.5\text{ m}$ 以及切割长度为 $b = 1.5\text{ m}$ 的低矮四坡房屋屋面模型,分别从 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 风向角进行比对分析研究.

在 $0^\circ$ 风向角下,如图8(a)所示,在1区时切角作用对于平均风压系数影响不明显,在2区时平均风压系数变小,在3区时即背风面时平均风压系数与之有较大的变化且产生较大负压,在4区时平均风压系数趋于接近,切角模型对于模型各区域平均风压一定上改变了部分区域流动特性,在背风面影响最大.

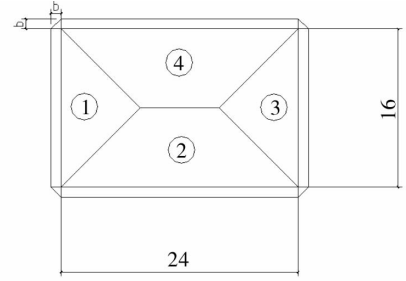


图7 切角定义

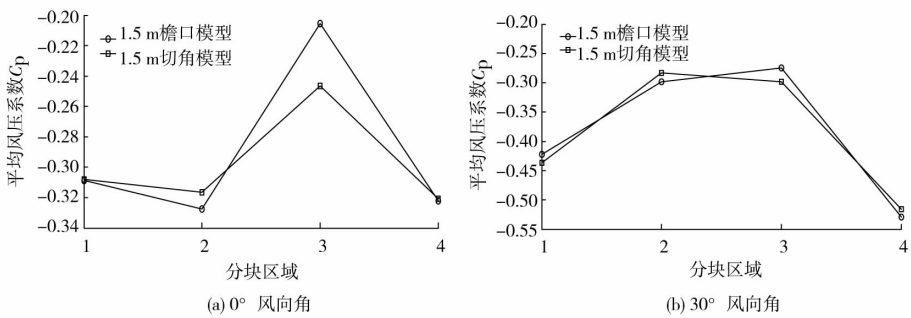


图8 不同风向角下切角对四坡屋面各区域平均风压系数  $C_p$  的影响

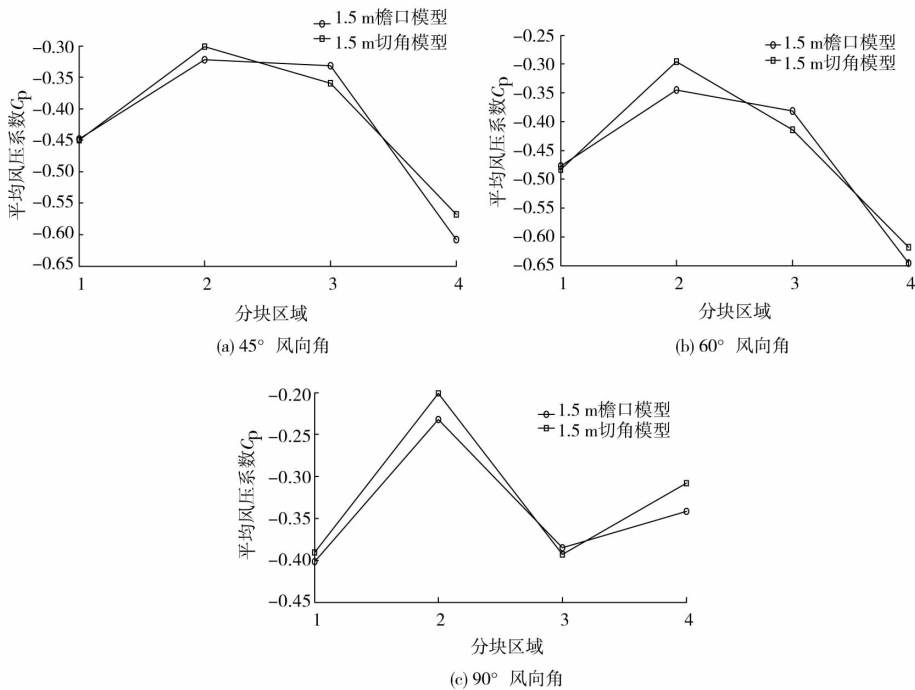


图9 不同风向角下切角对四坡屋面各区域平均风压系数  $C_p$  的影响

在 $30^\circ$ 风向角下,整体变化相对平缓,4个区域平均风压系数基本接近,1区和3区平均风压系数减小,2区和4区略微增大,对屋面各区域产生不同影响,在迎风区域产生使平均风压系数变小的作用,平均风压系数的从 $-0.45$ 降低到 $-0.41$ .

在 $45^\circ$ 风向角下,1区整体变化不大,2区、3区以及4区发生变化,2区和4区的平均风压系数减小,而3区增大.切角对来流运动产生影响,各区域平均风压系数虽然接近,变化不大,但在一定程度上降低了风压,在迎风区域2区和4区平均风压系数从 $-0.34$ 降低到 $-0.30$ 以及从 $-0.61$ 降到 $-0.55$ .

在 $60^\circ$ 风向角下整体变化趋势不大,且分别在部分区域平均风压系数的绝对值略有下降,在3区对平均风压系数影响较大,且使2区和4区平均风压变小,在1,3区平均风压变大,平均风压系数从 $-0.34$ 降到 $-0.29$ 以及从 $-0.65$ 降低到 $-0.61$ ,而在 $90^\circ$ 风向角下3区平均风压变大,1,2,4区变小.

## 4 结论

本文采用数值模拟方法,对带挑檐低矮四坡房屋屋面平均风压进行了模拟,分别对4个坡面进行了分析.通过对模拟结果的分析,获得了该类型房屋在不同风向角下屋面风压的分布规律以及特性.

1)低矮四坡建筑随挑檐长度的变化,使得各区域平均风压产生变化,各区域负风压减小,檐口的设置对四坡屋面的风压大小以及分布产生显著影响,且呈现规律性变化,挑檐长度的增加对屋面抗风较为有利.

2)通过对原模型与切角模型对比,屋檐角切角可对来流运动产生影响,可起到降低了屋面平均风压的作用.

3)挑檐长度参数的改变以及屋角的改变使屋面风压同时会随着风向角的改变产生显著变化.

4)檐口长度随长度增加与檐口切角对降低负风压绝对值效果明显,可为低矮四坡建筑的抗风优化设计提供参考.

## 参考文献:

- [1] 李秋胜,戴益民,李正农.强台风“黑格比”作用下低矮房屋风压特性[J].建筑结构学报,2010,31(4):62-68.
- [2] 陶玲,黄鹏,全涌.屋脊和出山对低矮房屋屋面风荷载的影响[J].工程力学,2012,29(4):113-121.
- [3] 谢壮宁,刘帅,石碧青.低矮房屋标准模型的风洞试验研究[J].华南理工大学学报,2011,39(6):107-112.
- [4] 顾明,黄强,黄鹏.低层双坡房屋屋面平均风压影响因素的数值模拟研究[J].建筑结构学报,2009,30(5):205-211.
- [5] 宋芳芳,欧进萍.低矮建筑风致内压数值模拟与分析[J].建筑结构学报,2010,31(4):69-77.
- [6] 闫旭光,戴益民,刘也,等.风特性参数对低矮房屋屋面局部风压影响的数值分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2014,29(1):45-52.
- [7] 戴益民,闫旭光,王相军,等.风电机组塔筒结构绕流风场的数值模拟研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(1):47-52.
- [8] 王相军,戴益民,闫旭光,等.低矮房屋表面平均风压的数值模拟和实测及风洞试验比较研究[J].建筑结构,2014,44(10):84-88.
- [9] 孙颖昊,周岱,陈怡然.带檐口曲面双坡屋面风压数值模拟[J].空间结构,2013,19(1):41-49.
- [10] Endo M, Bienkiewicz B, Ham H J. Wind-tunnel investigation of point pressure on TTU test building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(7):553-578.
- [11] 陈水福,吕少琳.低层双坡房屋屋面风荷载的数值模拟研究—坡角和高宽比影响的分析[J].浙江大学学报(工业版),2006,40(10):1738-1742.
- [12] 陈水福,焦燊烽.低层四坡屋面房屋表面风压的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(11):1653-1657.
- [13] 焦燊烽,陈水福.低层四坡屋面房屋风载体型系数的分析与实用计算[J].计算力学学报,2007,24(3):312-317.
- [14] 聂少峰,周绪红,石宇,等.低层四坡屋面房屋风荷载的风洞试验与数值模拟[J].建筑科学与工程学报,2013,30(3):39-49.
- [15] 中华人民共和国建设部. GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.