

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.169

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



新型抗风耗能装置在低矮房屋中 布置方式的风洞试验研究

何锴, 霍林生, 李钢, 李宏男

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对低矮房屋受台风作用极易损坏的问题,提出一种在低矮房屋上安装新型抗风耗能装置的防护方法。为寻求新型耗能装置的最优布置方式,使耗能装置效用最大化,针对将装置安装在双坡屋盖边缘、屋脊以及联合导流板工作等 6 种安装工况,通过风洞试验,研究抗风装置系统对屋面峰值风压和平均风压的影响,并对 6 种工况进行数值模拟分析,数值模拟结果与风洞试验一致。进行了耗能装置几何参数的优化研究,探讨了叶尖速比、叶轮根部安装角和叶根对叶尖扭角对耗能系数的影响。研究表明:安装耗能装置能有效预防屋面受风损坏;在迎风侧屋檐上部,结合导流板与抗风装置联合工作的方式能显著降低负风压对屋面结构的不利影响,这种安装方式在任一风向角下都显著降低了屋面平均风压系数极值(包括迎、背风面),降低幅度可达 40%。

关键词:低矮房屋;耗能装置;风洞试验;数值模拟;风压系数

中图分类号:TU352.2 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)02-0125-10

Wind tunnel test study on the arrangement of wind-resistant energy-dissipation devices for low-rise buildings

He Kai, Huo Linsheng, Li Gang, Li Hongnan

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problem that low-rise buildings are easily damaged by typhoons, this paper presents a protection method by installing a new type of wind-resistant energy-dissipation devices on low-rise buildings. To find the optimal arrangement of proposed devices and maximizing the utility of the devices, six cases with different installing schemes were analyzed in this paper, including to install the device on the edge of the double-slope roof, the roof ridge, and installed with spoiler. The influence of energy-dissipation devices system on peak wind pressure and average wind pressure of roof were studied by wind tunnel experiments. The numerical simulations of the 6 installation cases were carried out, and the simulation

收稿日期:2019-05-27

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2014BAL05B03);中央高校基本科研业务费(DUT19TD26)

作者简介:何锴(1994-),男,主要从事建筑结构抗风研究,E-mail:dluthk@foxmail.com。

霍林生(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lshuo@dlut.edu.cn。

Received:2019-05-27

Foundation items: “Twelfth Five-Year” National Science and Technology Support Program (No. 2014BAL05B03); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (DUT19TD26)

Author brief: He Kai (1994-), main research interest: building wind-resistance, E-mail: dluthk@foxmail.com.

Huo Linsheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lshuo@dlut.edu.cn.

results are consistent with the wind tunnel test. The optimization on the geometric parameters of energy-dissipation devices was studied, and the influences of the tip speed ratio, blade root angle and blade to tip torsion angle on the energy-dissipation coefficients were studied. The results show that the installation of energy-dissipation devices can effectively prevent the roof damage from wind. In addition, by combining the spoiler and the energy-dissipation devices at the windward side of the eave, the adverse effects of wind suction on the roof structure can be significantly reduced. The aforementioned installation method can significantly reduce the extreme value of the average wind pressure coefficient of the roof (in both windward and leeward sides) at any wind direction angle and the reduction ratio is up to 40%.

Keywords: low-rise building; energy-dissipation device; wind tunnel experiment; numerical simulation; wind pressure coefficient

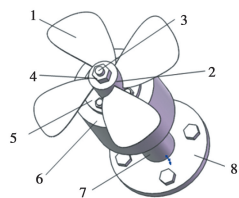
沿海地区低矮建筑常遭受台风袭击,传统低矮房屋抗风能力较弱。风灾调查统计表明,多数低矮建筑在台风下从屋面开始,从最初的局部屋盖破坏(屋檐外侧、角部和屋脊等部位)逐渐扩展,最终导致整个屋盖损坏甚至房屋整体倒塌^[1-3]。破坏是由较大的风吸力导致的,减小低矮建筑屋面风压极值对于低矮建筑抗风设计具有非常重要的意义。为降低在低高度建筑物屋顶上出现的高吸力风荷,已有多位学者对建筑表面的风压分布规律进行了研究。Pindado 等^[4]在屋顶边缘使用具有适当高度的护栏,所研究的护栏配置包括普通垂直墙护栏、实心或多孔垂直墙护栏,以及靠近建筑物屋顶的小水平屋顶形式的悬臂护栏。其低速风洞试验证明:具有中等孔隙度的垂直墙护栏和悬臂护栏更有效。Kopp 等^[5]给出了栏杆可替换的几何形状,它可以减轻由于角落涡流形成的局部(部件和包层)载荷。Bitsuamlak 等^[6]和 Aly 等^[7]针对双坡屋顶类型,给出了多种建筑几何改装方案。包括棚架、肋条、圆形边缘、倾斜边缘等。黄鹏等^[8]、陶玲等^[9]、Huang 等^[10]设计了多种屋檐形式,证实合理的屋檐形式可使靠近屋檐边缘和拐角处的负峰值风压显著降低。甘石等^[11]针对低层双坡屋顶建筑,提出安装扰流板可降低屋面风荷载,风洞试验考虑了扰流板高度、宽度、角度和安装位置的影响,给出的扰流板推荐高度为 0.2~0.6 m,建议宽度为整个建筑物长度的 1/20。杨易等^[12]在低矮房屋屋面增加构筑件(厝头和屋脊),设计低矮建筑模型并对其进行风洞试验,结果表明:在屋面增加厝头和屋脊都可降低双坡屋面结构的风荷载。

基于对低矮房屋防护措施的研究成果,笔者提出一种新型空气动力装置,该装置兼具导流和耗能的双重特点,可开发出效果更佳的屋顶表面吸力降低技术。同时,配合经典的扰流板方法进行研究,以

寻求更优的抗风装置组合。

1 阻尼抗风耗能装置设计简介

阻尼抗风耗能装置如图 1 所示,叶轮根部安装在中心轮毂,支座与液体圆桶的上表面固定连接,轮毂杆下半段置于圆桶内部;圆桶内部灌入阻尼液体,装液后密封。叶轮受风转动时,阻尼液体提供阻力,这样装置转动时会对风能进行耗散。阻尼圆桶下端设计一个固定板,用于将装置固定于房屋结构上。固定板的外形可依据所防护的结构外形适当设计,便于安装。



注: 1.叶轮; 2.轮毂; 3.螺丝; 4.螺母; 5.上文座; 6.阻尼圆桶(封闭装置); 7.连杆; 8.固定板

图 1 抗风装置简图

Fig. 1 The wind-resistant devices

耗能装置的制作材料可选用常用的工程塑料,如叶轮可采用聚酰胺(PA),圆筒、固定板等可采用聚甲醛(POM)。选用 PA 是因为其具有耐磨、自润滑性好、冲击韧性优异、比重轻、高抗拉强度、加工简便的特点。POM 硬度、强度接近金属,具备良好的耐疲劳、耐化学品性及一定的弹性。

风载作用在装置上时,叶轮会随风转动并带动轮毂,而下部的阻尼部分会产生阻尼效应,阻碍转动,从而消耗能量。将数个耗能装置并排安装在屋面边缘,装置工作时,各装置将独立转动,装置周围风场并不会互相影响。通过安装多个耗能装置共同作用,预期可以加强装置的抗风效果。低矮建筑安装该装置后,

气动装置成为了建筑物抗风的第一道防线, 有必要通过完善的加工工艺及各构件间可靠的螺栓连接, 使装置具备足够的承载力, 保证耗能装置在较大风荷载作用下不会先于房屋构件发生损坏。

2 抗风装置安装方式对比研究

2.1 试验概况

霍林生等^[13]通过数值模拟和风洞实验验证了阻尼耗能抗风装置在减小低矮双坡屋面风压的有效性。在此基础上, 笔者提出同时安装耗能抗风装置与扰流板的方式, 并考虑不同的安装位置时, 研究抗风装置对屋面风压的影响规律。设计了 6 种装置安装工况, 通过风洞试验研究抗风装置系统对屋面峰值风压和平均风压的影响。试验在中国建筑科学研究院的风洞试验室完成(如图 2 所示), 结合实际房屋受风环境, 通过劈尖和粗糙元布置模拟了 B 类地形粗糙度, 使风剖面、湍流强度剖面接近真实的大气边界层。



图 2 风洞试验现场

Fig. 2 Wind tunnel laboratory

2.2 试验模型

研究的房屋实际尺寸见图 3, 根据低矮房屋中常见的屋面坡角范围, 模型中的屋面坡角定为 30°。

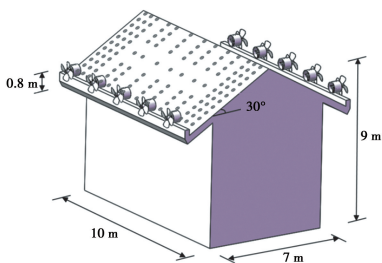


图 3 试验模型对应的房屋实际尺寸

Fig. 3 Full-scale geometric dimension of test model

模型采用玻璃钢板制作而成, 模型缩尺比为 1:20。测压模型底面矩形尺寸为 500 mm × 350 mm, 高度为 450 mm, 该尺寸满足了风洞试验阻塞比要

求。装置扇叶直径为 40 mm, 试验安装时一侧安置数量为 5 个。

2.3 试验设计

试验将模型固定在转盘中心, 通过控制转盘模拟风向角变化, 风向角间隔取为 15°, 按顺时针方向递增(0°~360°), 可模拟 25 个风向角(0°与 360°相同, 复核数据)。试验为探究屋面风压的分布情况, 在每侧屋面布置 128 个测压点, 共 256 个, 测点编号依红色标识线递增布置, 见图 4。

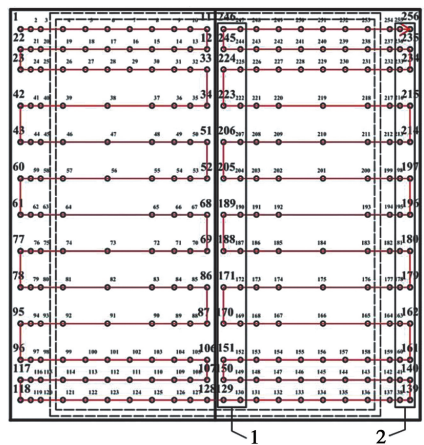


图 4 装置测点编号示意

Fig. 4 The number of the measuring point of the device

6 种抗风装置安装工况见表 1, 示意图见图 5。借助风洞试验, 对各风向角下双坡房屋屋面风压情况进行全面分析。

表 1 工况类型

Table 1 Test cases

工况编号	工况类型	风向角
1	屋面未施加控制	0~360°, 间隔 15°
2	迎风侧屋檐处安装耗能装置	0~360°, 间隔 15°
3	两侧屋檐处同时安装耗能装置	0~360°, 间隔 15°
4	迎风侧屋檐处安装导流板	0~360°, 间隔 15°
5	迎风侧屋檐处将耗能装置与扰流板联合布置	0~360°, 间隔 15°
6	屋脊处安装耗能装置	0~360°, 间隔 15°

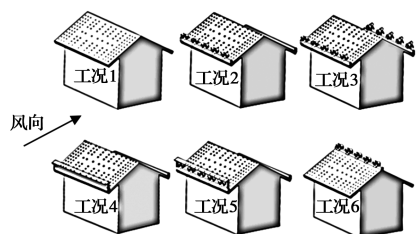


图 5 工况示意

Fig. 5 Test cases

3 试验结果及分析

3.1 各测点的平均风压系数

中国建筑科学研究院风洞实验室配置的扫描阀频率为 400 Hz, 一次数据采样时间设置为 30.75 s, 故一次采样可得到每个测点的 12 300 个数据。对 12 300 个风压数据取平均值, 作为相应测点的风压实测值。参考点(取 10 m 高度处)的静压和总压可同步测出。由式(1)可计算出各测点的无量纲平均风压系数。

$$C_{pr} = \frac{p - p_{\infty}}{p_{r0} - p_{r\infty}} = \frac{p - p_{\infty}}{q_r} \quad (1)$$

式中: p 为各测点测得风压; C_{pr} 为各测点平均风压系数; p_{r0} 为参考点处测得总压; q_r 为参考点处动压; p_{∞} 、 $p_{r\infty}$ 为各参考测点处测得静压。

为直观观察房屋屋面风压的分布特点, 首先给出 0° 风向角下的对比 C_{pr} 。图 6~图 8 为无控工况(工况 1)与各防护工况(工况 2~工况 6)下测点平均风压系数的对比。

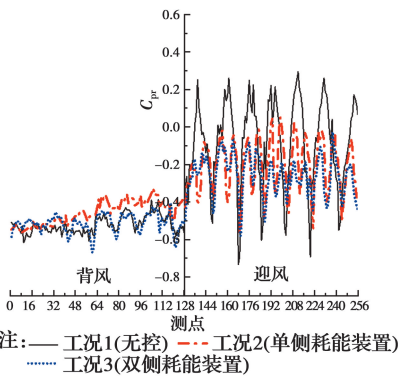
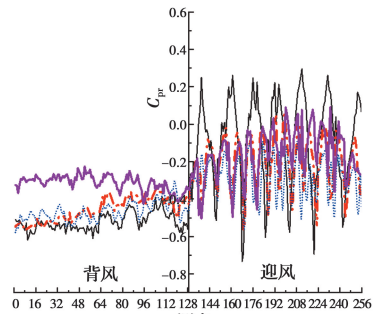


图 6 工况 1、2、3 的测点平均风压系数对比

Fig. 6 Comparison of average wind pressure coefficient of measuring points in case 1, 2 and 3

由图 6 可以看出, 无控工况下, 测点 1~测点 128 为背风屋面测点, 整体受较强的风吸负压; 测点 129~测点 256 为迎风屋面, 因测点的布置顺序曲线呈起伏状, 其中, 出现负压绝对值较大的测点在屋脊处(图 4 框 1 内的测点), 此为迎风屋面的危险区域。

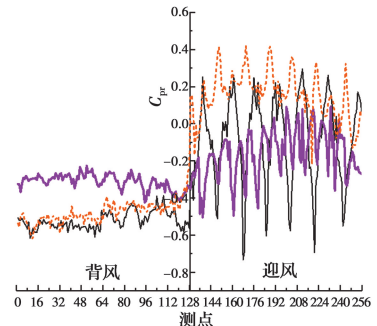
在安装阻尼耗能装置后, 观察工况 2、工况 3 测点平均风压系数曲线, 房屋负压较无控工况整体出现不同程度的降低。值得关注的是: 在房屋迎风屋面, 除了屋脊处, 在屋檐部位(图 4 框 2 内测点)的测点亦出现负压区。产生该现象的原因为装置叶轮旋转改变了屋檐边缘的气流走向, 使屋檐部位负压区



注: — 工况1(无控) — 工况2(单侧耗能装置)
····· 工况4(扰流板) — 工况5(扰流+耗能装置)

图 7 工况 1、2、4、5 的测点平均风压系数对比

Fig. 7 Comparison of average wind pressure coefficient of measuring points in case 1, 2, 4 and 5



注: — 工况1(无控) — 工况5(扰流板+耗能装置)
····· 工况6(屋脊安装耗能装置)

图 8 工况 1、5、6 的测点平均风压系数对比

Fig. 8 Comparison of average wind pressure coefficient of measuring points in cases 1, 5 and 6

域增大。同时, 由图 6 还可以看出, 安装耗能装置也减小了迎风屋面的极值正压。

整体对比工况 2、工况 3 曲线, 双侧安装减弱了耗能装置的防风作用。

工况 4 在迎风侧屋檐处安装扰流板, 取扰流板倾斜角度为 0° , 宽度为建筑物长度的 $1/20$, 即 $0.25 \text{ m}^{[11]}$ 。由图 7 可以看出, 工况 4 单独安装扰流板亦使房屋的极值负压绝对值降低。但工况 4 与工况 2 曲线相比较, 可看出单侧屋檐安装耗能装置对迎风屋面风压的改善作用优于安装扰流板。

结合耗能装置和扰流板的优点, 将耗能装置放置于扰流板正下方, 同时, 安装至房屋屋檐处(工况 5)。观察工况 5 各测点的平均风压系数曲线, 背风屋面测点平均风压系数绝对值降低非常明显, 也改善了迎风屋面的风压分布。

若低矮双坡房屋的坡顶处存在屋脊, 可减小屋面的最不利极值风压系数^[12]。于是, 考虑将耗能装置安装至屋脊处(工况 6)来观测其工作效果。图 8

中的工况 6 曲线表明,耗能装置安装至屋脊处完全改善了迎风屋面的风压分布,使得迎风屋面几乎全部受正压作用。反观背风屋面测点,对负压的改善作用很小。

3.2 屋面平均风压等值线云图

为直观显示屋面风压分布情况,图 9 为 6 种工况在 0° 风向角下风洞试验得到的屋面平均风压等值线云图。

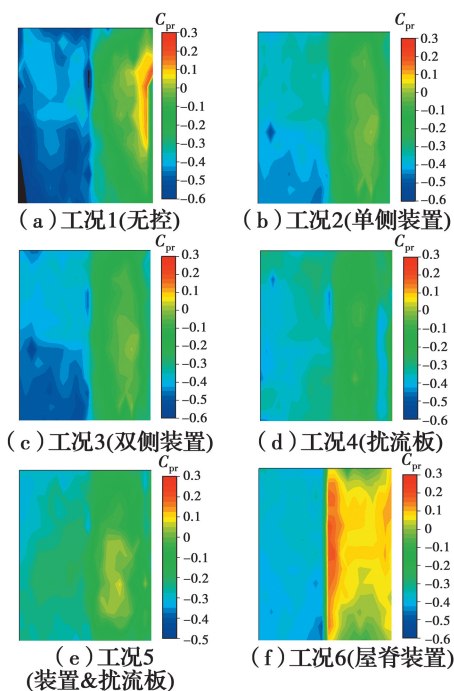


图 9 0° 风向角风洞试验屋面平均风压等值线比较

Fig. 9 Comparison of average wind pressure contours of roof wind tunnel test in 0° wind direction

由图 9 可以看出,各工况平均风压等值线云图直观反映出,在 0° 风向角下,无控状态的典型双坡屋面背风面负风压系数极值接近 -0.7 。在安装抗风装置之后,工况 2、工况 3、工况 4 使负风压系数极值改善到 -0.5 ,工况 5 负风压系数绝对值进一步减小至 -0.4 以下。

综合上述 6 种工况各测点实测平均风压系数的对比分析,考虑低矮双坡房屋屋面本身的风压分布特点:背风屋面及屋脊角落处较迎风屋面在台风下更易破坏。认为 0° 风向角下,工况 5 的装置布置方式作用效果最好。

3.3 各工况的负平均风压系数极值

为客观、全面地判断装置对屋面风压的影响效果,仍需从多个风向角进行风压系数极值分析。

C_{pr}^* 表示不同工况下的平均风压系数绝对值最大测点的风压系数值。图 10 给出 6 种安装工况在 $0 \sim 180^\circ$ 风向角下的 C_{pr}^* 。

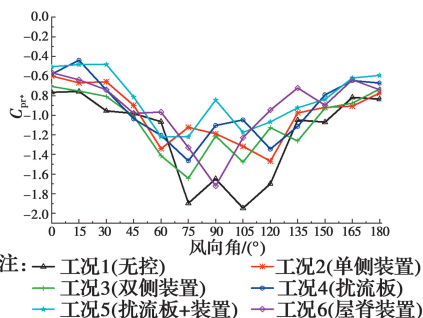


图 10 各工况平均风压系数绝对值最大测点的风压系数值
Fig. 10 Wind pressure coefficient value of the test point which has the maximum absolute value of the average wind pressure coefficient under the six operating cases

由图 10 可以看出,在风向角 75° 、 105° 左右,屋面出现了极值负压,典型双坡屋面无控时(工况 1), C_{pr}^* 接近 -2.0 ,这是非常不利的。在对屋面采取不同的抗风措施后(工况 2~工况 6),从图 10 曲线可以看出,极值负压都得到了不同程度的改善。其中,效果较好的是工况 2、工况 4、工况 5,将负风压系数极值控制在 -1.4 ,工况 5 更是将 C_{pr}^* 控制在 -1.2 , C_{pr}^* 降低幅度可达 40%。将装置安装在屋脊(工况 6)虽然在多数风向角下改善负压效果良好,但在 90° 风向角附近无法发挥作用。

4 数值模拟

4.1 计算域及网格设置

利用 FLUENT 17.0 对双坡屋面风压特性进行模拟分析。几何模型所对应实体房屋的尺寸为: 10 m (长) $\times 7\text{ m}$ (宽) $\times 9\text{ m}$ (高),考虑数值风洞大小的优化和阻塞率要求,计算域尺寸取为 200 m (长) $\times 90\text{ m}$ (宽) $\times 80\text{ m}$ (高)。

用分块的方法将计算域分为内部流域和外部流域两部分,内部流域即距房屋相对较近的流域,采用四面体网格划分;其余部分为外部流域,外部流域主要目的是提供足够大的风场来接近真实状态,故采用六面体单元减少网格数量。混合网格划分如图 11 所示,这种网格划分方式满足了风场的真实性,同时限制了网格数量,在保证计算精度的情况下,提高了计算效率。

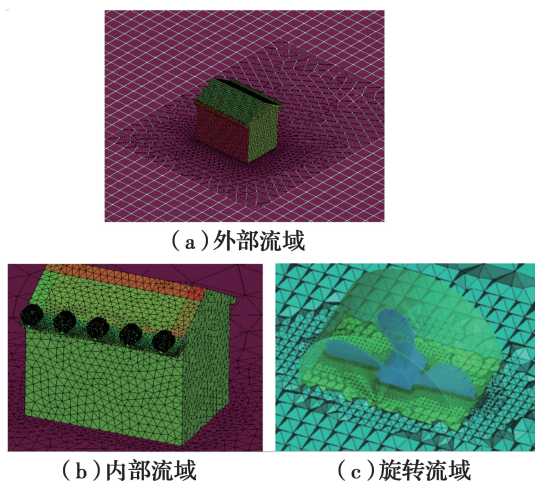


图 11 数值模型计算域与网格划分

Fig. 11 The computation field and grid of numerical model

4.2 耗能装置网格划分

装置叶轮采用三维制图软件 SolidWorks 进行几何建模。建立几何模型时,模型进行适当简化,忽略对仿真影响较小的构件,如装置的圆筒、连接杆部分。建模完成后保存为 *.step 格式,以便导入 ICEM 中进行网格划分。

由于抗风装置模型属于旋转机械,因此,需要将装置附近流场空间分成两个计算域,即运用 ICEM 中 BODY 功能将流场区域分割成静止域与旋转域,其中,叶轮外表面与交界面围成区域为旋转域,流场边界与交界面围成区域为静止域。交界面设置为圆柱面,旋转区域采用 TGRID 方法生成四面体网格,如图 11(c)所示。

4.3 仿真模型的选择

处理旋转机械问题,可采取混和平面模型 (Mixing Plane)、旋转坐标系模型 (Rotating Reference Frame)、多参考坐标系模型 (MRF) 等处理动静部件 CFD 方法,滑移网格模型可以用来对流场进行非定常计算,主动旋转的仿真模拟流场与实际情况最为接近^[14]。针对耗能装置叶轮的旋转运动建立瞬态模型,对流场进行非定常计算,考虑以上几种仿真方法的特点,最终选择使用滑移网格方法建立瞬态运动模型,它可以真实地模拟旋转叶轮和流场间的相互影响,从而真实地描述叶轮旋转区域的流场特征。

4.4 边界条件及参数设置

对计算域的入口、出口、地面、顶面、侧面和房屋

模型表面进行了设置,不同部位的边界条件不同。具体设置情况见表 2。

表 2 边界条件设置

Table 2 Boundary conditions

边界	参数设置
平均风(B类风场)	30 m/s
湍动能剖面	$k=1.5(u \cdot I_u)^2$ 。 u 为水平风速; I_u 为湍流强度
入口	湍动能耗散率剖面: $\epsilon=C_\mu^{3/4}(k^{3/2}/l)$ 。 $C_\mu=0.09$; l 为特征长度(障碍物高度)
雷诺应力来流边界条件	$\overline{u'u'}=k$; $\overline{u'w'}=-0.225k$; $\overline{v'v'}=\overline{w'w'}=-0.5k$
出口	采用完全发展出流边界条件(outflow)
地面	固壁(wall)
计算域侧面和顶面	光滑固壁(symmetry)

由 Body 定义的旋转域和静止域的交界面则通过 ANSYS 中设置的 Interface 进行数据交换。旋转域的运动方式设置为旋转 (Rotational)。旋转轴和旋转中心由建模时旋转域圆柱体的位置确定。旋转轴为每个圆柱体上下底面圆心的连接轴,旋转中心为每个圆柱体的形心。通过加载编译 udf 宏约束装置的运动状态,只对叶轮主体释放绕旋转轴环向的旋转自由度,以此来模拟装置工作时叶轮的旋转。

对于低矮房屋的流体仿真,湍流模型选用雷诺应力模型进行仿真会得到最精确的结果^[15]。在 FLUENT 中,RSM 是最精细制作的模型,其避免了同性的涡粘性假设,比单方程和双方程模型更加严格地考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力的快速变化,对于复杂流动有更高的精度预测潜力。缺点是计算时占用较多的 CPU 计算时间和内存、收敛较难,但对于复杂的 3D 流动适用(如弯曲管道、旋转、旋流燃烧等)^[16]。研究的低矮房屋模型包含多个旋转域,故选用 RSM 进行数值模拟。子模型中,选择以耗散率为基础的线性压力-应变模型。

FLUENT 求解器提供了多种求解算法,其中的 SIMPLEC 算法可同时对速度场与压力场进行修正,稳定性优于 SIMPLE^[17]。故模拟时选用压力速度耦合中的 SIMPLEC 算法进行求解;数值模拟计算的收敛依据为所设定变量的残差值均降到 10^{-4} 以下,监测变量设定为各阻尼叶轮的表面压力及屋

面的平均风压。当压力数值基本稳定时,即认为此流场内气流流动进入稳定状态。文中约计算到 6 000 多步时,所监测数值达到稳定。

4.5 数值结果分析

为方便讨论低矮房屋屋面各区域的风压改善情况,首先将屋面进行分区,如图 12 所示。图中 A1~A9 区域为迎风面,B1~B9 区域为背风面。

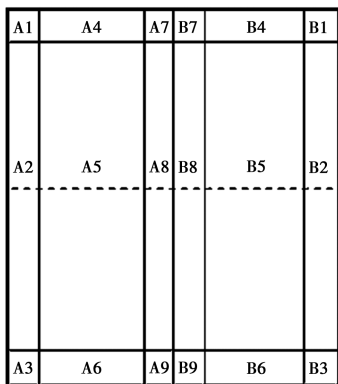


图 12 房屋模型屋面分区示意图

Fig. 12 Roof partitioning diagram

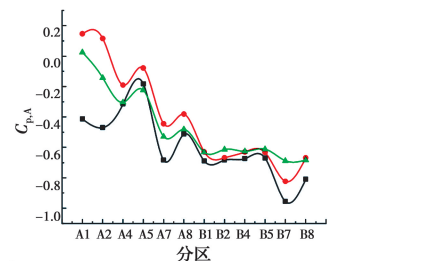
在建立房屋的几何模型时,已将房屋的区域进行了划分,故每个分区的面积平均风压可直接由 Report-force 读出。将 5 种施加抗风措施的工况与普通屋面工况的分区风压作对比,见图 13。

由图 13 可以看出,屋面负压绝对值较大的区域主要出现在屋脊和背风屋面,这些部位的风压改变情况应着重关注。将 5 种施加抗风措施房屋的屋面风压分布与无控房屋屋面的风压分布进行对比可以看出:采用 5 种不同的抗风措施都在一定程度上改善了屋面的负压;双侧安装耗能装置无法提高对房屋的保护作用效果;工况 5(扰流板+耗能装置)对降低负压绝对值效果最明显。

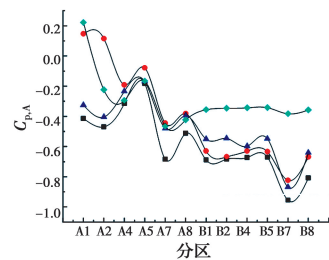
根据数值模拟结果绘制 6 种工况下屋面平均风压系数等值线云图,如图 14 所示,从云图中能直观地看到,双坡房屋加设抗风措施后,屋面负压值得到了改善。图 14 中工况 5(扰流板+装置)的背风屋面负风压系数极值已经降低至 -0.4 左右,图 8 和图 9(e)中工况 5 背风屋面负风压系数极值也约为 -0.4,数值模拟和风洞试验结果相一致。

对比图 9(f)、图 14(f)可以看出,工况 6(屋脊安装抗风装置)屋脊附近的风压分布,数值模拟与风洞试验结果差异较大。风洞试验该处呈正压,而数值模拟此处为不利的负压。产生该现象的原因是:在

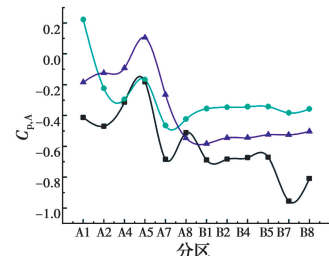
风洞试验模型中,耗能装置通过具有一定宽度的金属条安装至屋脊处,而数值模拟时将安装结构简化去除,故此处风压值出现差异。



注: — 工况1(无控) — 工况2(单侧耗能装置)
— 工况3(双侧耗能装置)
(a) 工况1、2、3分区面积平均风压系数对比



注: — 工况1(无控) — 工况2(单侧耗能装置)
— 工况4(扰流板) — 工况5(扰流板+耗能装置)
(b) 工况1、2、4、5分区面积平均风压系数对比



注: — 工况1(无控) — 工况5(扰流板+耗能装置)
— 工况6(屋脊安装耗能装置)
(c) 工况1、5、6分区面积平均风压系数对比

图 13 不同工况下分区面积平均风压系数对比

Fig. 13 Comparison of regional wind pressure in different cases

4.6 耗能装置的几何参数优化

在保证数值模拟结果正确的基础上,进一步探讨耗能装置的几何参数优化方法。定义风耗能系数 C_p 为抗风耗能装置对通过气流能量的耗散系数,其物理意义为耗能装置叶片转动耗散的能量与吹到耗能装置叶片上的空气动能,具体计算公式为

$$C_p = \frac{Pt}{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{T\omega t}{\frac{1}{2}(\rho\pi R^2 \omega t)v^2} = \frac{2T\omega}{\rho\pi R^2 v^3} \quad (2)$$

式中: P 为风耗能装置叶片转动的功率; T 为叶轮的扭转,数值模拟中可由 FLUENT 数值模拟积分计算得到; ω 为叶片转动角速度; t 为风荷载的作用时间; m 为一定时间 t 内通过装置的空气质量; ρ 为空气

气的密度; v 为空气的流速; R 为耗能装置叶片的半径。

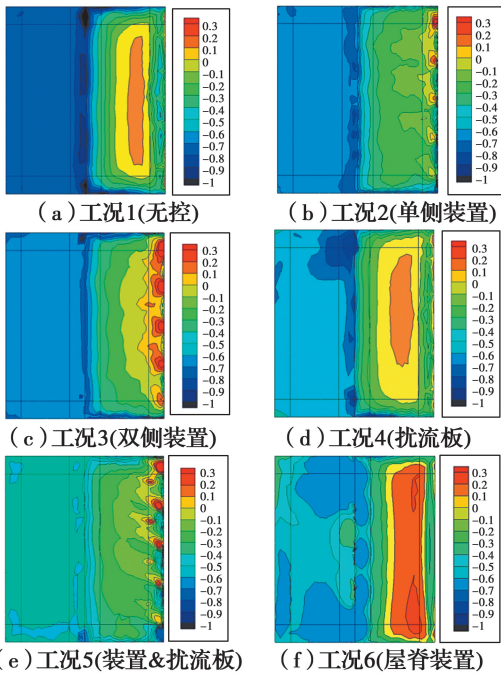


图 14 6 种工况下的平均风压系数等值线云图
Fig. 14 Equivalent line cloud map of roof mean wind pressure coefficient under 6 cases

由式(2)可知, C_p 的数值越大, 耗能装置对于风能的耗散效果越好。因此, 对于耗能装置几何参数的优化问题, 可以转化为通过优化耗能装置叶片的几何尺寸, 使得耗能装置在给定风速条件下公式(2)中的耗能系数最大。耗能装置的几何参数, 主要包括叶尖速比、叶轮根部安装角和叶尖对叶跟扭角。

叶尖速比是描述叶轮旋转状态的一个参数, 为旋转叶轮叶尖最大切向速度与来流流体速度之比, 通常用公式 $\lambda = \omega R / v$ 来表示。在实际工程中, 可通过改变叶轮材料、叶轮长度、阻尼液体黏度来调整尖速比。根据文献[18], 对于阻力型叶片的叶尖速比, 通常取为 0.3~1.2。图 15 给出了某额定风速下耗能系数与叶尖速比的关系曲线。由图 15 可以看出, 随着叶尖速比的增加, 风能耗散系数呈现先增加后减小的趋势。叶尖速比为 0.29 时, 风能耗散系数可以达到最大值 0.29。

叶轮根部安装角即叶跟与轮毂连接处的角度。旋转机械中一般取值范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。为探究能使装置风能耗散系数达到最大值的最优安装角取值, 数值模拟中每 5° 一个区间, 分别建模并计算, 结果如图 16 所示。由数值模拟结果可见, 随着安装角度的

增加, 耗能系数逐渐增加。当装置叶轮根部安装为 45° 时, 耗能系数已经达到最大值, 继续改变角度已经无法再增加耗能系统的数值。为简化叶片制作工艺, 建议叶轮根部安装角取值为 $45^\circ \sim 50^\circ$ 。

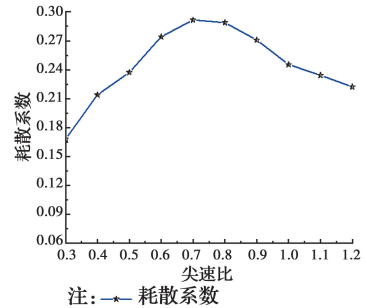


图 15 耗能系数与叶尖速比的关系

Fig. 15 The relationship between the energy dissipation coefficient and the tip speed ratio

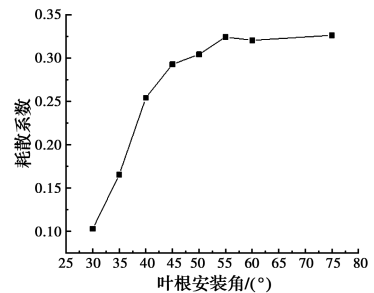


图 16 耗能系数与叶根安装角的关系

Fig. 16 The relationship between dissipation coefficient and blade root angle

取装置叶轮根部安装角度为 45° , 改变叶跟对叶尖扭角, 进而探究该扭角变化对装置风能耗散系数的影响情况, 数值模拟中每 5° 一个区间, 分别建模并计算。不同扭角模拟耗能效果见图 17, 由图 17 可以看出, 叶跟对叶尖扭角对装置耗能能力影响不大, 实际工程中建议取值 20° 左右。

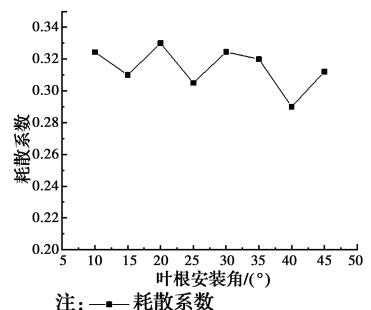


图 17 耗能系数与叶跟对叶尖扭角的关系

Fig. 17 The relationship between dissipation coefficient and blade to tip torsion angle

5 结论

对 6 种工况下的低矮双坡房屋进行风洞试验,采集各测点的实测风压数据,并采用 FLUENT17.0 对相同工况的低矮双坡房屋屋面风压特性进行数值模拟分析,得到如下结论:

1) 低矮双坡屋面房屋受风时,背风面负压极值普遍大于迎风面,故若屋面受风吸力破坏,首先是出现在背风面的局部破坏(屋脊附近、屋面边缘)。由最不利负压极值的分布位置提出最不利风向角的概念:即定垂直于屋脊风向为 0° 风向角,风向逆时针旋转,最不利负压极值出现在 $70^\circ \sim 75^\circ$ 范围内。

2) 通过多工况的风洞试验数据分析,提出一种最优的抗风耗能装置安装方法:在屋檐上部,结合气动抗风措施(扰流板)与抗风耗能装置联合的方式,以显著降低风吸力对屋面结构的不利影响。这种安装方式在任一风向角上都显著降低了测点的平均风压系数极值及面积平均风压系数极值(包括迎、背风面),降低幅度可达 40%。

3) 对抗风耗能装置进行叶轮旋转工作状态的数值模拟,选取与风洞试验相同的工况进行 CFD 分析。给出各工况对屋面风压的影响情况,数值模拟计算结果仍表明扰流板+装置的安装方案为最优,与风洞试验结论相同。

参考文献:

[1] AKON A F, KOPP G A. Turbulence structure and similarity in the separated flow above a low building in the atmospheric boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182: 87-100.

[2] CAO S Y, WANG M G, CAO J X. Numerical study of wind pressure on low-rise buildings induced by tornado-like flows [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 183:214-222.

[3] ASGHARI MOONEGHI M, KARGARMOAKHAR R. Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings: Review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 6:225-235.

[4] PINDADO S, MESEGUER J. Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings [J]. *Journal of Wind*

Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91 (9):1133-1139.

- [5] KOPP G A, MANS C, SURRY D. Wind effects of parapets on low buildings; Part 2. Structural loads [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(11):843-855.
- [6] BITSUAMLAK G T, WARSIDO W, LEDESMA E, et al. Aerodynamic mitigation of roof and wall corner suction using simple architectural elements [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139 (3): 396-408.
- [7] ALY A M, CHOKWITTHAYA C, POICHE R. Retrofitting building roofs with aerodynamic features and solar panels to reduce hurricane damage and enhance eco-friendly energy production [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 35:581-593.
- [8] 黄鹏, 陶玲, 全涌, 等. 檐沟对低矮房屋屋面风荷载的影响[J]. *工程力学*, 2013, 30(1):248-254.
- HUANG P, TAO L, QUAN Y, et al. Influence of trench on wind load on low-rise roofs [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1):248-254. (in Chinese)
- [9] 陶玲, 黄鹏, 顾明, 等. 低矮房屋屋面细部构造的风荷载特性研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(1):65-71.
- TAO L, HUANG P, GU M, et al. Study on wind load characteristics of fine roof structure of low-rise houses [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(1):65-71. (in Chinese)
- [10] HUANG P, TAO L, GU M, et al. Experimental study of wind loads on gable roofs of low-rise buildings with overhangs [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, 12(3):300-317.
- [11] 甘石, 李钢, 李宏男. 扰流板减小低矮房屋屋面风压试验研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(6):91-102.
- GAN S, LI G, LI H N. Study on wind pressure on the roof of low-rise building alleviated by spoiler [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(6):91-102. (in Chinese)
- [12] 杨易, 谢壮宁, 石碧青. 屋顶构造形式对传统民居风荷载特性的影响 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(2): 143-150.
- YANG Y, XIE Z N, SHI B Q. Influence of roof structure on wind load characteristics of traditional dwellings [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38 (2):143-150. (in Chinese)

- [13] 霍林生, 王银坤, 何锴, 等. 阻尼耗能抗风装置对低矮双坡屋面风压影响研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4):8-17.
HUO L S, WANG Y K, HE K, et al. Research on influence of wind-resistant damping devices on wind pressures of low-rise buildings with gable roof [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4):8-17. (in Chinese)
- [14] 郑迪. 基于 CFD 的 Savonius 风机叶片优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
ZHENG D. Optimization of savonius fan impeller based on CFD [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [15] 杨伟. 基于 RANS 的结构风荷载和响应的数值模拟研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
YANG W. Numerical simulation of wind load and response based on RANS [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [16] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海:同济大学出版社, 2008.
HUANG B C. Principle and application of structural wind resistance analysis [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001. (in Chinese)
- [17] 顾明, 赵雅丽, 黄强, 等. 低层房屋屋面平均风压的风洞试验和数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1):82-87.
GU M, ZHAO Y L, HUANG Q, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of mean wind pressures on roof of low-rise buildings [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(1):82-87. (in Chinese)
- [18] 曹开元. 装有可摆动挡风片的 Savonius 风轮静态转矩的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
CAO K Y. The research on static torque of savonius wind turbine with swinging fin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)