

文章编号: 1000-5013(2010)04-00463-05

山体地形下低矮房屋数值风洞模拟的计算域设定

崔利民, 彭兴黔, 时凌琳, 张春晖, 乔常贵

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对山体地形下低矮房屋数值风洞模拟, 研究其计算域大小的设定问题, 并提出设置的参考方法. 通过建立正弦山丘轮廓函数, 对 4 种不同形状因子的山丘进行计算流体动力学数值模拟. 采用 CFX 软件作为计算平台, 对影响计算结果精度的各个参数进行分析, 在此基础上, 提出合理的取值范围.

关键词: 山体地形; 低矮房屋; 计算流体动力学; 数值模拟; 计算域

中图分类号: TU 312⁺. 1; P 435⁺. 1

文献标识码: A

在我国沿海台风多发地区, 低矮房屋的抗台风是一个现实而又亟待解决的问题^[1]. 建造在复杂山体地形上的低矮建筑具有不同的地形地貌特征, 因而风场条件各不相同. 在台风来时, 受到特殊地形对风场的负面作用, 加大了结构损坏的可能性, 易造成严重的人员伤亡及经济损失. 目前, 国内外在山体地形对低矮房屋建筑表面风荷载影响的研究还很少^[2]. 利用计算流体动力学(CFD)数值模拟技术对建筑物绕流进行模拟时, 要获得理想的计算精度, 其中一个重要的方面是计算域的设定. 对建筑物表面风压进行数值模拟时, 在距离建筑较远的地方要人为设置几个壁面, 使求解域封闭. 设置求解域的大小与计算精度密切相关, 太小会对建筑物表面风压分布产生影响, 太大又会增加计算网格数量, 影响计算速度^[3]. 由于山体地形下低矮房屋数值风洞模拟, 与国内外所做的其他数值风洞模拟有所区别, 因此不能简单地根据已有经验设定计算域. 本文针对山体地形下低矮房屋数值风洞模拟, 研究计算域大小设定的问题.

1 计算模型

针对三维正弦山丘单体, 低矮房屋模型选取典型的二层双坡屋面房屋, 模型长度方向 12 m, 宽度方向 8 m, 檐口高 7 m, 屋面坡度 30°, 如图 1 所示. 由于三维正弦山丘在竖直方向上各向对称, 且房屋的几何尺寸远小于山丘, 来流方向对计算域大小取值影响不大. 因此, 主要针对房屋位于山丘正前方的工况进行研究, 计算模型如图 2 所示. 图 2 中, 房屋与山脚的间距 s 取 24 m. 山丘中轴线剖面轮廓函数选取正弦函数^[4], 即

$$z = \frac{H}{2} \left[1 + \sin\left(\pi \frac{x-L}{2L}\right) \right]. \quad (1)$$

当 L 值一定时, 山丘的轮廓形状则取决于山高 H_m . 定义山丘形状因子为

$$R = H_m/L. \quad (2)$$

选取 $L = 50$ m, 形状因子 (R) 分别取

0.5, 1.0, 1.5, 2.0 进行分析, 坐标原点(0, 0, 0)设置在低矮房屋中轴线上的山丘山脚处.

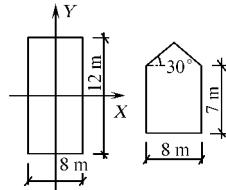


图 1 低矮房屋尺寸
Fig. 1 Size of low rise houses

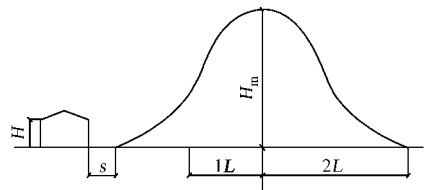


图 2 计算模型
Fig. 2 Computational model

收稿日期: 2009-07-29

通信作者: 彭兴黔(1959-), 男, 教授, 主要从事结构抗风的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2009J01255); 福建省厦门市科技计划高校创新项目(3502Z20083039); 福建省泉州市科技计划重点项目(2007G7); 湖南省风工程与桥梁工程重点实验室开放基金资助项目(2009-01)

2 计算域高度的设置

计算域高度的设定主要与山丘的形状和尺寸有关. 测点的平均风压系数 $C_p(t)$ 及 z 高度处水平剖面上平均风压系数极差 $\Delta C_p(z)^{[5]}$ 为

$$C_p(t) = (p_i(t) - p_\infty) / [1/2 \rho v_H^2],$$
$$\Delta C_p(z) = C_{p, \max}(z) - C_{p, \min}(z).$$

式中: $p_i(t)$ 为测点的风压值; p_∞ 为参考点静压; ρ 为空气密度; v_H 为参考点的风速; $C_{p, \max}(z)$, $C_{p, \min}(z)$ 分别为 z 高度处水平面上平均风压系数的最大值和最小值. $\Delta C_p(z)$ 的大小可以衡量计算域顶面对模型表面平均风压分布的影响, 将其作为选取计算域高度的指标. $\Delta C_p(z)$ 值越大, 说明该高度平面对模型周围风场的影响越大; $\Delta C_p(z)$ 值越小, 则对风场的影响越小, 表明该高度已不在建筑物周围的风场区^[6].

当形状因子 R 为 0.5 时, 不同风向角下的 $\Delta C_p(z)$ 随距离地面高度的变化曲线, 如图 3(a) 所示. 从图 3(a) 可得知, 当距离地面高度大于 $4L$ 时, 曲线逐步趋于平缓; 当距离地面高度为 $6L$ 时, $\Delta C_p(z)$ 小于 0.02, 则该高度已不影响模型周围的风场. 因此, 建议 R 为 0.5 时的计算域高度取值范围为 $4L \sim 6L$. 各风角下的变化曲线基本重合, 说明在设置计算域的高度时, 风向角的影响并不明显. 因此, 以下其他形状因子主要以 0° 风向角为例进行说明.

当风向角为 0° 时, 不同形状因子下的 $\Delta C_p(z)$ 随高度变化曲线, 如图 3(b) 所示. 由图 3(b) 可知, 计算域高度大于 $4L$ 时, 曲线逐步趋于平缓; 当距离地面高度为 $5L$ 时, $\Delta C_p(z)$ 仅为 0.02, 认为该高度已不影响模型周围的风场. 因此, 建议 R 为 1.0 的计算域高度取值范围为 $6L \sim 8L$.

由图 3(b) 还可以看出, 当距离地面高度大于 $8L$ 时, 曲线逐步趋于平缓; 当距离地面高度为 $10L$ 时, $\Delta C_p(z)$ 小于 0.02, 认为该高度已不影响模型周围的风场. 因此, 建议 R 为 1.5, 2.0 时的计算域高度取值范围为 $8L \sim 10L$.

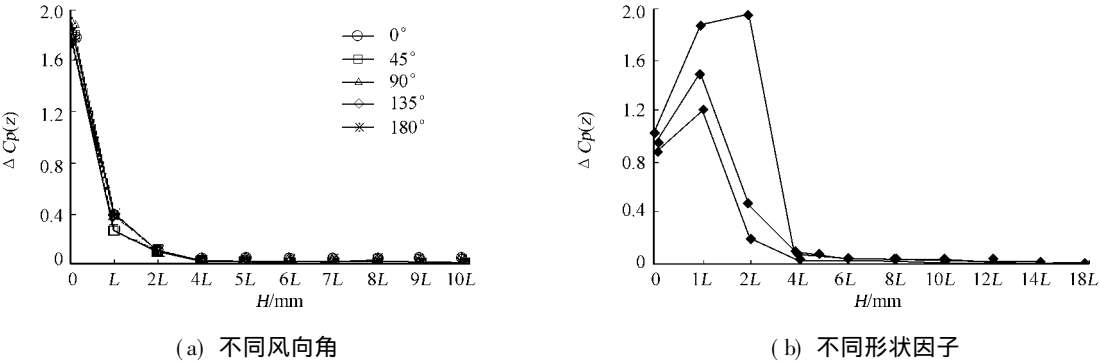


图 3 $\Delta C_p(z)$ 随高度变化曲线

Fig. 3 Curve between $\Delta C_p(z)$ and height

3 计算域长度的设置

在已经确定好的计算域高度范围内, 选取几个具有代表性的水平剖面, 通过分析这些平面内的相对静压分布, 确定计算域的大小范围. 当 R 为 0.5 时, 不同风向角下不同高度平面内的相对静压分布图, 如图 4 所示. 由图 4 可知, 就大范围而言, 风压分布情况主要是由山丘决定的, 低矮房屋由于体积比较小, 对计算域的整体风压分布影响较小. 由于山丘的形状是沿着高度方向双向对称的, 因此可以忽略风向角的影响, 主要取 0° 风向角为研究对象.

山丘中心正上游对计算域上游长度的影响最大, 且各风向角下的相对静压分布曲线基本沿 Y 轴对称. 所以, 沿着此方向取不同高度处测点的相对静压, 通过相对静压为零来确定计算域上游长度 L_1 的取值范围. 相对静压随计算域上游到模型迎风面的距离变化曲线, 如图 5 所示.

由图 5 可知, 当 R 为 0.5 时, 在 $0L \sim 6L$ 范围内, 相对静压变化较大, $6L$ 时各个测点的相对静压基本为零. 因此, L_1 取 $4L \sim 6L$; 同理, 当 R 分别为 1.0, 1.5, 2.0 时, L_1 可取 $6L \sim 8L$.

气流遇到山丘时, 在山丘迎风面的一部分气流上升越过山丘, 一部分气流下沉降至地面, 另一部分

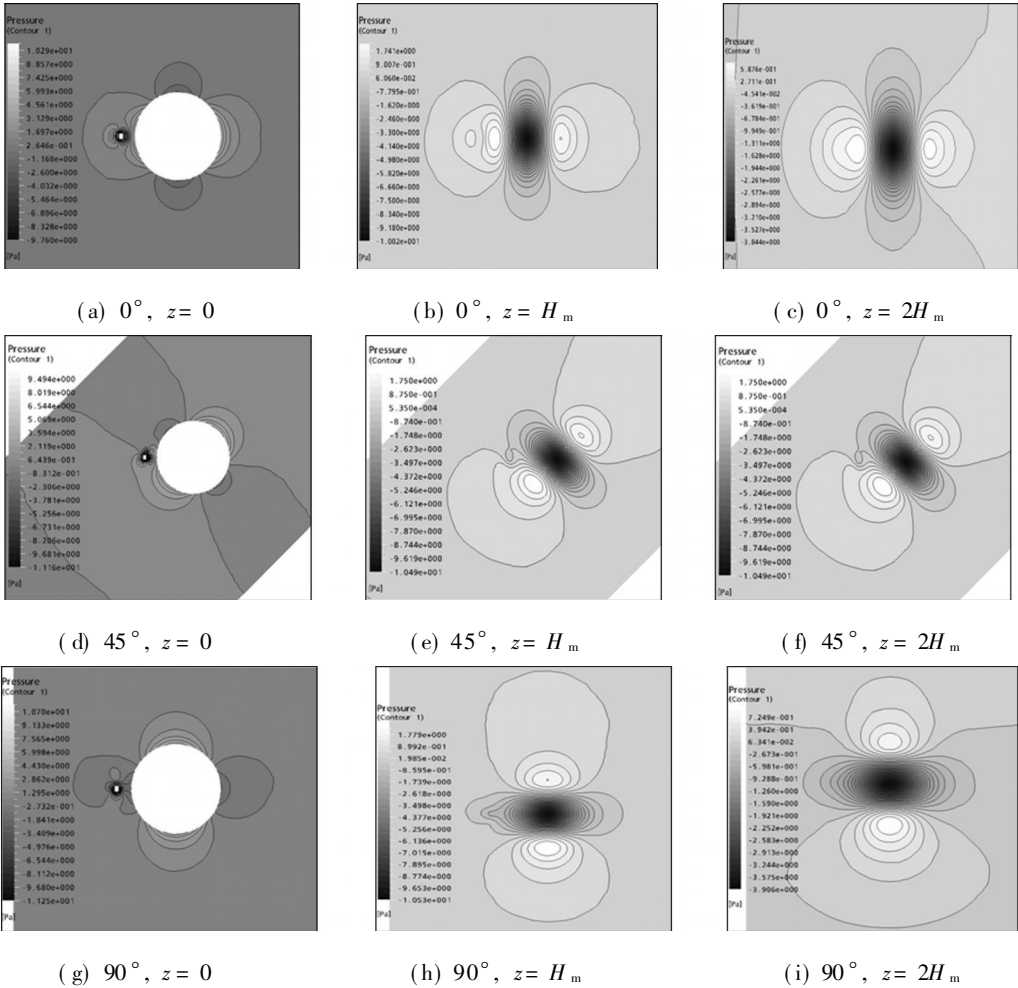


图 4 顺风向水平剖面相对静压等压线分布图

Fig. 4 Relative static pressure contours for along wind horizontal profile

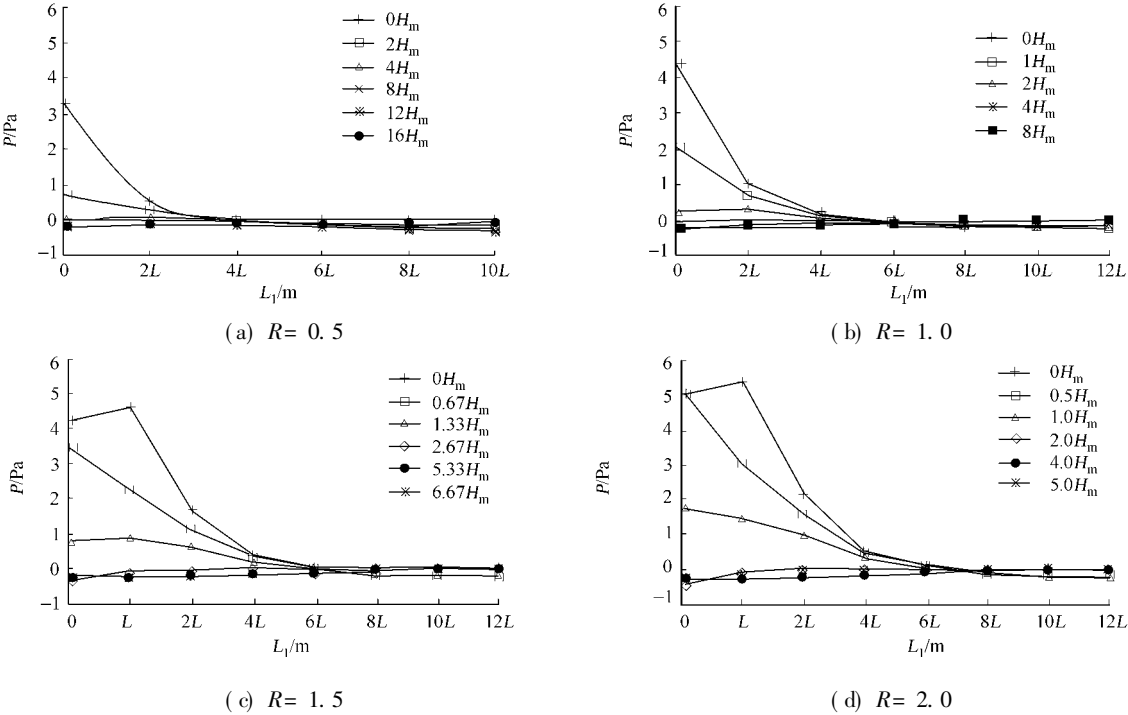


图 5 相对静压随 L_i 的变化曲线

Fig. 5 Curve of relative static pressure to L_i

则绕过山丘的两侧向背后流去,在山丘的背后产生尾流. 计算域下游长度 L_2 不能设置太小,否则会导致出口处出现回流,影响计算结果的精度.

在已经确定好的计算域高度范围内,选取几个具有代表性的水平剖面,通过分析这些平面内的相对静压分布,可以估计 L_2 的范围. 相对静压随计算域下游到模型迎风面的距离变化曲线,如图 6 所示.

从图 6 可以看出,当 R 为 0.5 时,相对静压为零的等压线沿水平方向延伸较长. 在 $0L \sim 8L$ 范围内,相对静压变化较大, $10L$ 时各个测点的相对静压基本接近于零. 因此, L_2 可取 $8L \sim 10L$. 同理,当 R 分别为 1.0, 1.5, 2.0 时, L_2 的取值范围分别为 $8L \sim 10L$, $10L \sim 12L$, $12L \sim 14L$.

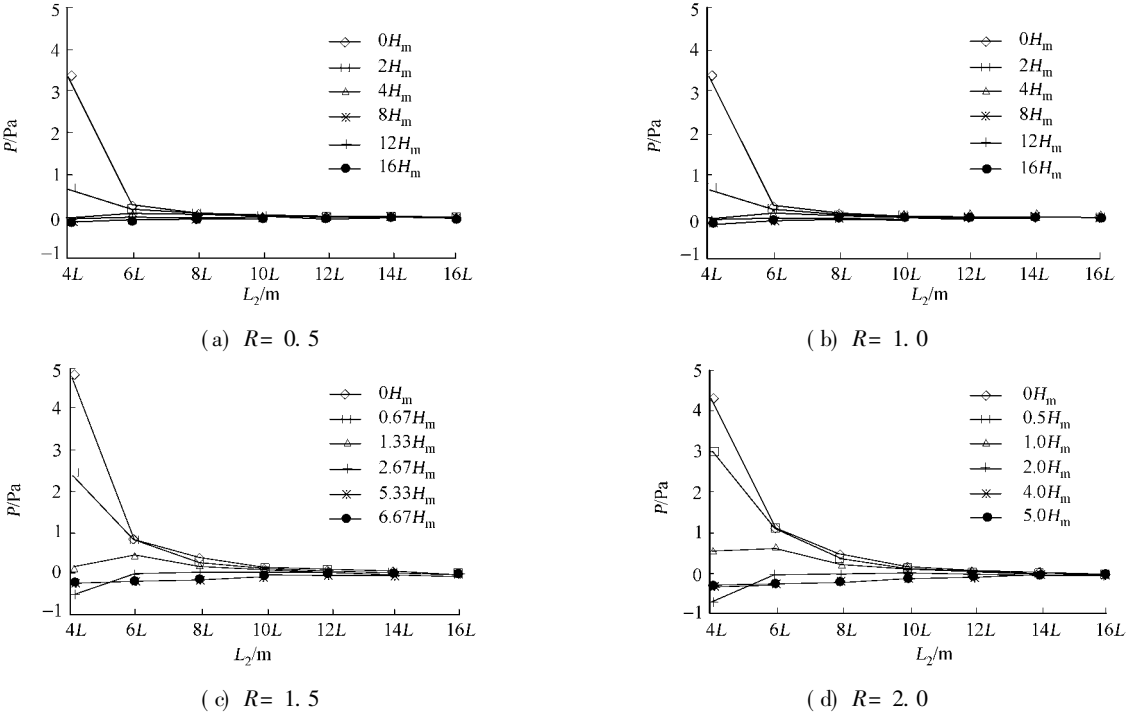


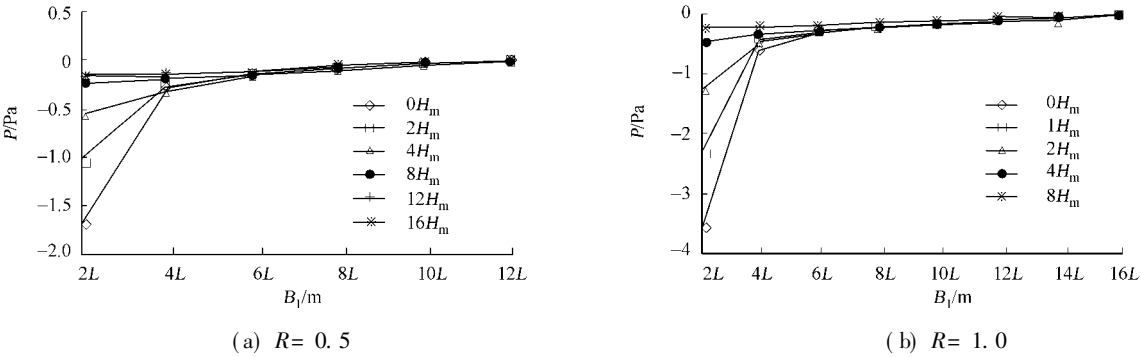
图 6 相对静压随 L_2 的变化曲线

Fig. 6 Curve of relative static pressure to L_2

4 计算域宽度的设置

由于来流有一部分气流从山丘侧面绕过,在侧面产生的绕流,使风速变大、流场变化复杂. 通过相对静压分布的判断可以取定计算域宽度(B)的范围^[7]. 由图 4 可知,山丘中心在横风向方向受计算域侧面的影响最大.

因此,在山丘中心沿横风向方向不同高度处,测点的相对静压值随 B_1 的变化曲线,如图 7 所示. 图 7 中, $B_1 = (B/2) - 2L$. 从图 7 可知,当 R 为 0.5, B_1 为 $10L$ 时,相对静压接近为 0 Pa,曲线趋于平缓一致,计算域宽度 B 为 $20L$. 因此, B 的取值范围为 $20L \sim 24L$. 同理,当 R 分别为 1.0, 1.5, 2.0 时, B 的取值范围分别为 $24L \sim 28L$, $28L \sim 32L$, $28L \sim 32L$.



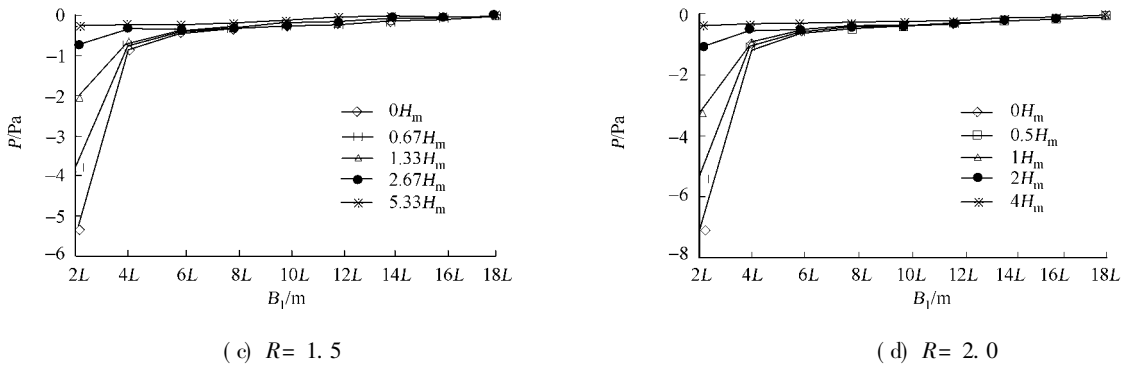


图 7 相对静压随 B_1 的变化曲线
Fig. 7 Curve of relative static pressure to B_1

5 结束语

研究山体地形下低矮房屋数值风洞模拟中的计算域设置问题, 得到计算域高度、宽度, 以及长度的建议取值范围. 需要注意的是, 数值风洞的计算域设置应满足阻塞度小于 5% 的相关要求.

参考文献:

[1] 周显鹏, 彭兴黔, 张松. 带悬挑女儿墙双坡屋面风压的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 289-293.

[2] 陈平. 地形对山地丘陵风场影响的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[3] 侯爱波, 汪梦甫. 建筑数值风洞的基础研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 34(2): 21-24

[4] TAMURA T, OKUNO A, SUGIO Y. LES analysis of turbulent boundary layer over 3D steep hill covered with vegetation[J]. J Wind Eng Indus Aerodyn, 2007, 95(9/ 11): 1463-1475.

[5] 乔常贵, 彭兴黔, 时凌琳, 等. 港口集装箱群数值模拟中计算域设置的研究[J]. 郑州轻工业学报: 自然科学版, 2008, 23(2): 104-107.

[6] 孙晓颖, 许伟, 武岳. 钝体绕流中的计算域设置研究[C] // 第十三届全国结构风工程学术会议. 大连: [s. n.], 2007: 1036-1041.

[7] 孙珩, 黄素逸. 建筑物周围流场数值模拟的研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 76-83

Computational Domain Setting about Numerical
Wind Tunnel in the Simulation of
the Low-Rise Housing in the Mountain Terrain

CUI Li-ming, PENG Xing-qian, SHI Ling-lin,
ZHANG Chun-hui, QIAO Chang-gui

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on the numerical wind tunnel simulation of low-rise housing in the mountain terrain, the computational domain setting of the wind tunnel is investigated, and one method is put forward. Establishing sinusoidal hill contour function, four hills of different shape factors is simulated numerically by the computational fluid dynamics. Using CFX software, the parameters that affect the accuracy of the results is analyzed, then the reasonable domain of the wind tunnel is given.

Keywords: mountain terrain; low-rise house; computational fluid dynamics; numerical simulation; computational domain

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)