

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.011

平面局部凸出的双坡房屋表面风压特性分析及 体型优化研究*

颜卫亨, 王 妥, 张楠楠, 廖思伟

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:以计算流体动力学和大气边界层基本理论为依据,对平面局部凸出的双坡野营房屋表面风压分布特性展开研究,在此基础上对其建筑外形进行合理的优化。研究过程中运用Fluent软件对模型进行分析和计算,并将数值模拟与TTU实测的结果进行对比,进而确定数值风洞的相关参数。将我国野营房屋使用的功能要求以及人体活动所需的尺度等作为依据,在此基础上建立模型,并在风向角、辅助建筑相对尺寸和建筑平面布置形式等的变化下,计算分析房屋表面的风压分布规律,最后将结果归纳为房屋的风荷载体型系数,以便抗风设计使用。进一步将房屋表面风压的平均值、极值和标准差作为优化目标,对平面局部凸出的双坡野营房屋的体型进行优化,最终得到该类型房屋风作用最小的合理建筑外形,以提高其抗风性能。结果表明:轻型双坡野营房屋因自身凸出的辅助建筑的存在,建筑周围的气流运动会受到影响,从而使建筑表面风压分布规律发生变化,更会出现主体建筑局部风荷载体型系数发生变号的现象,鉴于以上情况,可知辅助建筑对建筑表面风压的影响在抗风设计中必须予以重视。

关键词:计算流体动力学;平面局部凸出;T形平面;L形平面;体型系数

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2132(2020)03-0395-09

Study on the Wind Pressure Distribution Characteristics and Shape Optimization of Gable Roof House with Partially Protruding Plane

YAN Weiheng, WANG Tuo, ZHANG Nannan, LIAO Siwei

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the basic theories of computational fluid dynamics and atmospheric boundary layer, the wind pressure distribution characteristics of the double-slope camping houses with local convexity are studied. On this basis, the structural shape of the building is rationally optimized. During the research, Fluent software was used to analyze and calculate the model, and the numerical simulation was compared with the results of TTU measurement to determine the relevant parameters of the numerical wind tunnel. The models are built based on the functional requirements of the use of camping houses in China and the spatial scale required for human activities. The wind pressure distribution on the house surface is calculated and analyzed considering the changes of wind direction angle, relative size of auxiliary buildings and layout of buildings. The wind pressure distribution law is finally summarized as the wind load shape coefficient of the house, so that it can be used in wind resistance design.

* 收稿日期:2019-03-02;修回日期:2019-04-03

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2004E204)、中央高校科研专项资金创新团队项目(2013G328401)资助

作者简介:颜卫亨(1958-),男,教授,博士。主要从事结构工程研究及抗风雪设计方面的研究。Email:yanwh@chd.edu.cn

Furthermore, the average value, extreme value and standard deviation of the wind pressure on the house surface are used as the optimization targets, and the shape of the double-slope camping house with partial convexity is optimized. Finally the reasonable building shape of each house type with the least wind effect is obtained to improve wind resistance. The analysis results show that due to the existence of auxiliary structures protruding from the double-slope camping houses, the air movement around the building will be affected, so that the wind pressure distribution law of the building surface changes, and even more, reversal of the wind load shape coefficient of the main building will appear. In view of the above situation, it can be seen that the influence of the auxiliary building on the wind pressure of the building surface must be taken into account in the wind resistance design.

Keywords: computational fluid dynamics; partially protruding plane; t-shaped plane; l-shaped plane; shape coefficient

引言

平面局部凸出的双坡野营房屋由主体建筑和辅助建筑两部分构成,结构形式为框架式双坡屋顶,支杆为焊接型钢管,尽管结构质量较轻但却有较高的可靠性,同时便于安装和拆卸的特点使其拥有良好的机动性。基于以上特性,该种房屋多用作军队开展医疗、手术和救治工作时使用的特制帐篷。但是该类型房屋由于总体质量较轻,因此风荷载对其的影响也较为显著,属于比较典型的风敏感结构。关于风荷载对不规则封闭式房屋和构筑物影响的研究,我国《建筑结构荷载规范》^[1]及国外规范^[2-4]仅给出了特定风向角和特定比例条件下Y形平面、L形平面、T形平面、十字形平面、截角三角形平面等类型下的风荷载体型系数。国内外相关研究成果中,T. Tamura等^[5]对低矮建筑进行了LES(大涡模拟)和RANS(雷诺平均)模拟,G. A. Kopp等^[6]对开放式框架、低层建筑进行了风洞试验;顾明等^[7]考虑了坡角、挑檐长度、檐口高度等参数,对我国常见的带挑檐的低层双坡房屋屋面风压进行了数值模拟;董欣等^[8]以点风压和面积平均风压为分析参数,研究了不同坡度双坡屋盖表面的风压特性。

国内外规范和已有研究中尽管给出了多种不同形状的低矮建筑在一定情况下的表面风荷载体型系数,但对平面局部凸出的双坡房屋(主要包括T形平面和非定比的L形平面双坡房屋)既没有给出相关规定,也缺少相关的研究,因此该类房屋在抗风设计中只能近似参考双坡屋面房屋。但是建

筑表面的风压分布特性与建筑的几何外形密切相关。这种近似参考法并不具有普适性,尤其是主辅建筑衔接处的风压分布比较复杂,若是强行套用双坡屋面房屋的抗风设计规定,则有可能导致结构的局部不满足设计要求而失效。鉴于以上情况,平面局部凸出的双坡房屋难以广泛运用于工程实际,因此亟需对该类型房屋的表面风压分布特性展开研究。

1 数值模拟的基础性研究

通过对分析模型的试算结果与TTU标准模型^[9-10]对比分析来确定数值风洞等关键参数。TTU标准模型实际尺寸及典型测压点位置如图1所示。

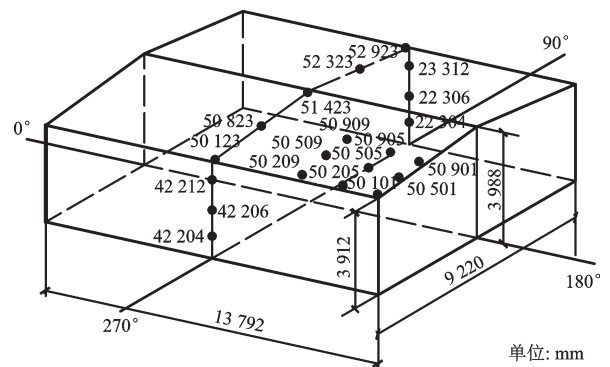


图1 TTU标准模型实际尺寸及典型测点位置

Fig.1 Actual size of TTU building model and positions of typical measuring points

1.1 模型的建立

平面局部凸出的双坡野营房屋外形如图2所示,其平面布置形式主要为两种(T形和L形),考虑



图2 平面局部凸出的双坡野营房屋外形

Fig.2 Shape of the gable roof camping house with a partially protruding plane

到减少风向角的设置以减少计算量,故利用对称性将L形平面双坡野营房屋分为左L形平面和右L形平面,既减少了风向角设置也方便对不同平面布置的房屋表面风压特性的对比。图3给出了T形平面布置的双坡野营房屋的建筑尺寸定义及表面分区展开图(左L形平面和右L形平面同理)。为了增加研究的普遍性,现将 b 与 L 的比值定义为相对凸出长度,其中 b 为辅助建筑凸出宽度, L 为主体建筑长度。根据我国野营房屋的使用功能要求同时考虑人体尺度及活动对空间的要求设计了36种分析模型(表1),选取使用环境为B类地貌风场,风速为10 m/s,分别对野营房屋进行 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 风向角下风压分布特性的数值风洞模拟。

对于跨度较小的低矮建筑而言,脉动风对建筑表面风压分布规律的影响比平均风小得多^[11-15],因此对于这类野营房屋可以忽略脉动风的影响而仅考虑平均风对建筑表面风压的影响。

1.2 数值风洞的建立

以目前国内外数值风洞模拟^[7-21]和试算的结果

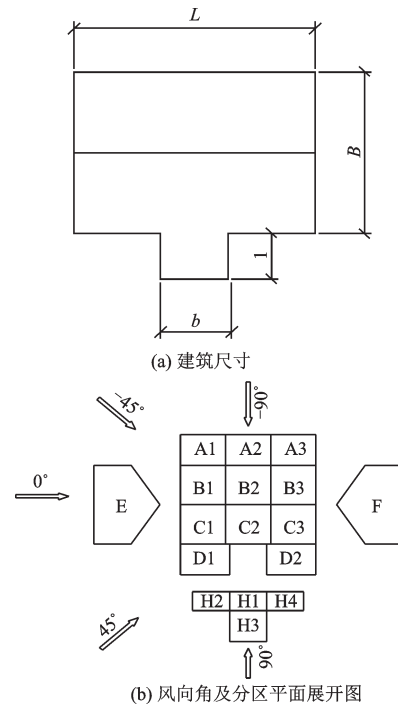






图3 T形平面野营房屋建筑尺寸定义及表面分区展开图
Fig.3 Definition of building size and surface zoning expansion of camping house in T-shaped plane

为依据进行综合分析得到计算域,尺寸为: $15L \times 8L \times 10H$ (即 $99 \text{ m} \times 52.8 \text{ m} \times 36 \text{ m}$),同时其阻塞率为1.25%,小于3%,满足要求。模型位置在流域入口 $1/3$ (即 33 m)处,同时保证横风向与计算域中轴线重合。以提高计算效率和精度为原则,综合考虑结构化与非结构化网格的优点,将分区进行网格划分作为最终的方案。

数值风洞中网格数量、插值格式、湍流模型以及计算方法等参数是通过先以单参数变化进行数

表1 房屋分析模型设计方案

Table 1 Design scheme of the house analyzing models

Shape 编号	平面布置形式	相对凸出宽度(b/L)	相对凸出长度(l/B)	风向角
00	矩形 	0	0	$0^\circ/45^\circ/90^\circ$
01~05		4/16		$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
06~10		5/16		$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
11~15	T形 	6/16		$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
16~20		7/16		$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
21~25		8/16	$\frac{2}{8} \frac{3}{8} \frac{4}{8} \frac{5}{8} \frac{6}{8}$	$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
26~30	左L形 	3/8		$0^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$
31~35	右L形 	3/8		$0^\circ/\pm 45^\circ$

值模拟计算,之后将计算的结果与TTU实测数据进行对比来确定的。不同参数下各监测点压力系数与TTU标准模型的对比结果如图4所示。由图4(a)可知,随着网格数量的变化模型表面的风压分布规律与TTU实测保持一致,但计算的精确度随着网格数量的增加有所提高,但考虑到网格数量为150万时的计算结果与实测基本吻合,而200万时的

结果未见精度明显提高,故确定网格数量为150万,这在满足精度要求的同时也有利于提高计算效率。同理,由图4(b~d)可知,随着不同参数的变化,与实测结果吻合度较高的参数分别是二阶迎风格式、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和SIMPLEC算法,故将它们作为最终的参数。

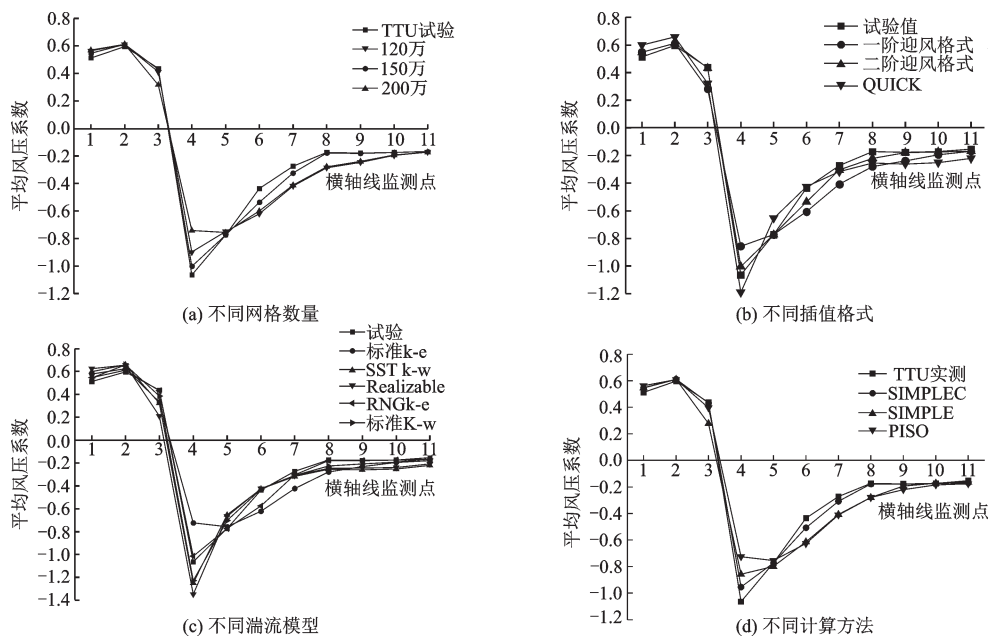


图4 各计算参数对监测点压力系数对比

Fig.4 Comparison of pressure coefficients of the measuring points calculated using different parameters

2 房屋表面风压分布特性分析

2.1 房屋表面风压特性分析

对表1中的所有模型在 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 风向角下进行数值模拟,可得到各种参数组合下的野营房屋表面风压分布特性。图5为shape13在 45° 风向角时的表面风压分布云图。

由图5可见:当来流与主体建筑正面形成倾斜角时,在迎风面凸出角隅的建筑表面附近有明显的锥形涡产生。D1和E面以及屋顶C面作为主体建筑中的迎风面,其中D1面和E面均是以受到正风压控制为主,但由于辅助建筑的存在,使得D1面表面风压分布特性不同于其它面,在云图中具体表现为一个更加明显的锥形涡,并有较为明显的对称于辅助建筑H2面的趋势。D1面的正负压风压极值分别出现在锥形涡的中心和与辅助建筑相连的角隅。受辅助建筑影响,D2面原本的正压控制转变为负压控

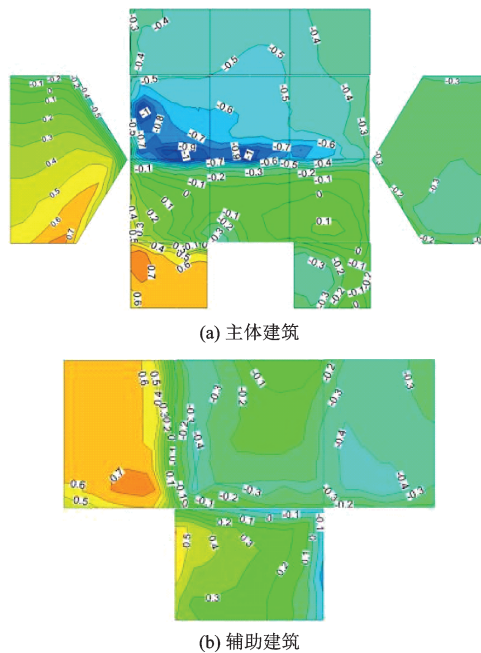


图5 shape13在 45° 风向角下的风压分布云图

Fig.5 Contour of wind pressure distribution of Shape13 under 45° wind direction angle

制。而辅助建筑其屋面边缘处形成比较明显的锥形涡,且迎风面凸出的拐角处会出现压力梯度急剧变化的现象,而凹陷拐角处周围风压分布呈现环形。H1面(屋顶面)全部由负压控制,这是因为辅助建筑采用的是平屋顶的形式,其屋檐的存在使得来流在该处产生分离,而后又会在距离屋顶不远处的地方产生再附,从而出现整个屋顶都由负压控制的现象。

2.2 辅助建筑对平面局部凸出双坡野营房屋影响

表1所示分析模型shape00~25的每个表面都存在分区的情况,因此将采用加权平均法来计算不同风向角下的风荷载体型系数,之后将T形平面布局的双坡野营房的每个表面分区的风荷载体型系数结果与矩形双坡野营房表面的风荷载体型系数(shape00)相比较,最后再以此为依据分析总结不同风向角下辅助建筑的相对尺寸对双坡野营房表面风荷载体型系数所产生的影响。

由于篇幅的限制,下面仅以 0° 风向角为例来分析每个参数对T形双坡野营房屋表面风压分布特性的影响。

图6是将辅助建筑的相对凸出长度确定为 $4/8$ 时所展开的分析。总体来看5种模型其表面风压分布规律呈现出比较高的一致性。当辅助建筑相对凸出宽度增加时会造成主体建筑的D1面受风面积减小,进而导致其风荷载体型系数略减小,总体波动范围为 $-0.04\sim 0.08$;至于辅助建筑中的H2面,其风荷载体型系数则在 $0.30\sim 0.39$ 波动,其它各面基本相同。相较于双坡屋面而言,主体建筑各面上的风荷载体型系数也均有不同程度的变化,其中D1面中几乎降到零,D2面中则有所增大,屋顶C2和

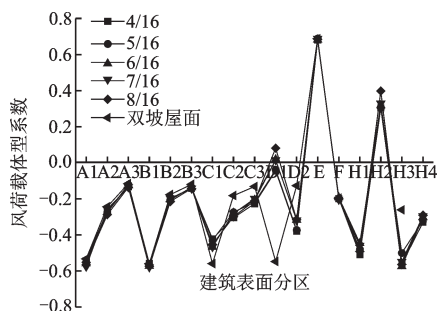


图6 相对凸出宽度对房屋表面体型系数的影响

Fig.6 Influence of relative bulge width on the shape coefficient of housing surface

C3面中只则变化甚微,至于其他各面更是几乎没有影响。

图7仅在辅助建筑的相对凸出宽度为 $6/16$ 时进行分析。随着辅助建筑相对突出长度的增加,C1、C2、D1、H1、H2和H3是建筑表面中风荷载体型系数受到影响较大的表面。具体表现为D1面的体型系数从 -0.30 逐渐过渡到 0.11 ,其它表面的波动相对较小。D1、D2面的风荷载体型系数与双坡屋面相比变化很大,并且屋顶C面的体型系数也有所波动,而D2面的体型系数更是从 -0.13 增至最大时的 -0.39 ,增大了3倍。由此可知,辅助建筑的存在使得主建筑中靠近辅助建筑一侧表面上的风压在风向角为 0° 时发生了显著变化,各分析模型的风荷载体型系数在不同相对突出长度的作用下呈现一致的规律,同时相对突出长度对建筑表面风压有很大影响,这将使主建筑的局部风压系数发生变化,甚至会出现风压系数变号的现象。因此,在抗风设计中应选择合适的相对突出长度,使建筑表面的风压趋于合理。

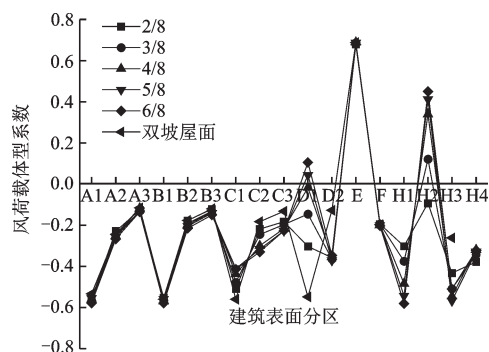


图7 相对凸出长度对房屋表面体型系数的影响

Fig.7 Influence of relative bulge length on the shape coefficient of housing surface

通过比较和分析每个风向角下分析模型表面上的风荷载体型系数可以发现:辅助建筑会对建筑周围的气流运动产生影响,从而导致建筑表面的风压分布发生变化,进而使得结构表面的风压也发生变化。而采用双坡屋面的抗风设计不能真实反映该类房屋的表面风压,同时还有可能导致结构因不满足设计要求而失效。因此,辅助建筑对建筑表面风压的影响必须予以重视。而相比于辅助建筑的相对凸出长度而言,其相对凸出宽度对建筑物表面风压的影响较小,因此在满足使用要求的前提下,可以忽略其对房屋表面风压分布规律的影响。

2.3 不同平面布置房屋体型系数的对比分析

对此不同平面布置形式对双坡野营房屋表面风荷载体型系数的影响,分析寻找更有利于抗风设计的平面布置形式。

图8为 0° 风向角下不同平面布置对房屋风荷载体型系数的影响图,可以看出,在辅助建筑的相对凸出长度不同的情况下,建筑物表面风压受建筑平面布局形式的影响规律是一致的。对主体建筑中的A、B、E和F的风荷载体型系数在平面布置形式的影响下几乎没有波动;而主体建筑的屋顶C面所受到的不同平面布置形式对其的影响程度则与辅助建筑的相对凸出长度有着紧密联系,即随其增加而变大;C2和C3平面的风荷载体型系数波动较小;当采用左侧L形平面布置时,C1平面的风荷载体型系数明显大于另外两种平面布置形式,这对抗风设计有着不利的影响;至于辅助建筑,在左L形平面布置的影响下,其建筑表面风荷载体型系数会出现明显偏高的现象,右L形平面布置则不同,尤其相较于T形平面布置而言,其表面风荷载体型系数更小,这也使其更加利于抗风设计。

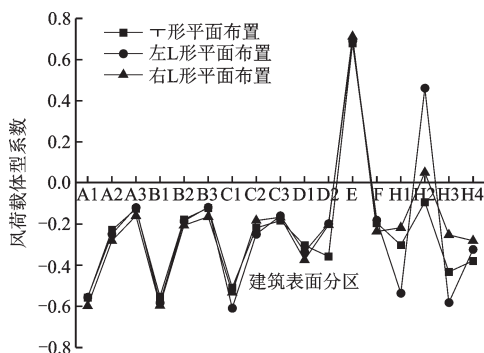


图8 不同平面布置对房屋风荷载体型系数的影响

Fig.8 Influence of plane layout pattern on wind load shape coefficient of buildings

通过比较和分析不同风向角下不同平面布置的分析模型其表面风荷载体型系数,可以发现:将辅助建筑置于流场上游时,对房屋表面风压有很大影响。因此,综合各因素可知T形平面布置的双坡屋面其风荷载体型系数是较为合理的。

3 房屋体型优化分析

3.1 平面局部凸出的双坡野营房屋体型优化分析

上文对不同平面布置的平面局部凸出的双坡

野营房屋表面风压分布特性进行了定性和定量分析,结果表明该类房屋表面局部区域风压梯度变化较大,容易使房屋整体受力不均匀和应力集中现象产生,因此,需对该类房屋表面风压系数的标准差(由房屋表面各分区的风荷载体型系数计算得到)和极值(用建立数值风洞的Fluent软件自带功能求解)进行体型优化设计。

以 0° 风向角下的T形平面双坡野营房屋为例,并以分区体型系数的标准差和极值为计算指标,就辅助建筑的相对凸出尺寸对优化目标的影响规律展开分析,如图9所示。可以发现,体型系数标准差受辅助建筑相对凸出宽度的影响甚小,而随凸出长度的增大也增大;相对凸出长度较大或较小容易导致房屋表面局部极值较大。

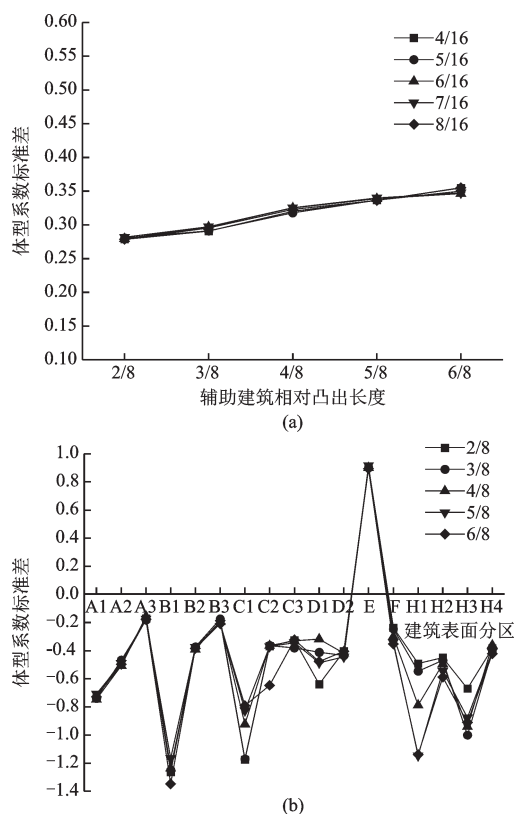


图9 辅助建筑相对尺寸对优化目标的影响

Fig.9 Influence of relative size of auxiliary building on the optimization target

3.2 不同平面布置下房屋表面风压特性对比分析

为了研究平面布置形式对双坡野营房屋表面压力分布均匀程度的影响以及是否存在应力集中现象,如图10所示。在风向角为 0° 时,各种平面布置形式下房屋体型系数的标准差由大到小依次是

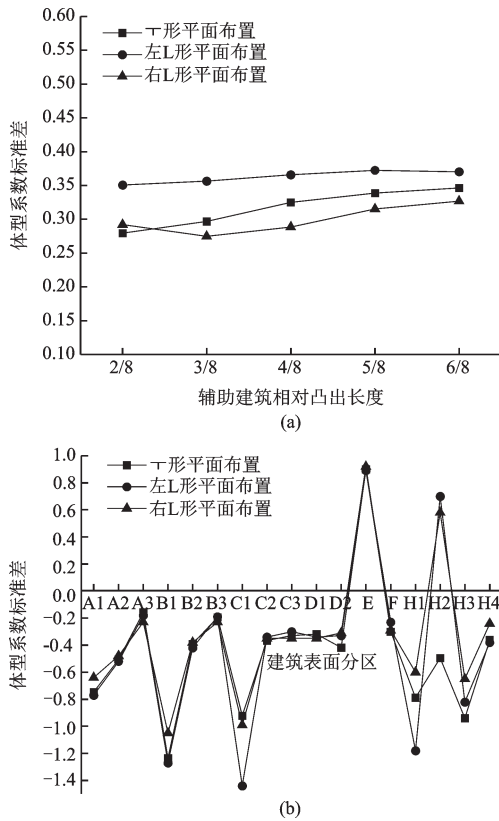


图10 平面布置形式对优化目标的影响

Fig.10 Influence of plane layout pattern on the optimization target

左L形平面布置、T形平面布置和右L形平面布置。当采用右L形平面布置和T形平面布置时,主体建筑C1面的风压极值明显小于左L形平面布置;B1面采用右L形平面布置时的风压极值小于左L形平面布置和T形平面布置;其余面的风压极值则是差异不大;辅助建筑的表面风压极值不仅受到平面布

置形式的影响,且在其影响下有较大的波动。

3.3 优化方案的确定

本节以 0° 风向角为例,并将分区体型系数标准差和极值设定为计算指标,在此基础上比较了两种平面布置的野营房屋的表面风压,最后再将其与第2节中对两种平面布置房屋表面风荷载体型系数的分析相结合,综合以上分析发现:在辅助建筑的相对凸出宽度 b/L 约为 $3/8$ 且相对凸出长度 l/B 介于 $3/8\sim 4/8$ 这样的条件下,会出现房屋表面风压的平均值、标准差和极值均比较合理的情况,也可以称为此时的建筑具合理的抗风设计外形。

4 风荷载体型系数

通过数值风洞模拟,可以得到168种不同工况下双坡野营房屋表面风荷载的体型系数,工况的繁多最终导致得到的体型系数也数量庞大,而由前文的分析可知房屋表面风压受到辅助建筑相对凸出宽度的影响较小,可以忽略。因此当相对凸出长度有一个比较合适的取值时,房屋也会具有一个较为合理的建筑外形。鉴于此,可在前面所确定的优化方案(辅助建筑的相对凸出宽度 b/L 约为 $3/8$ 且相对凸出长度 l/B 介于 $3/8\sim 4/8$)的基础上,对计算所得的所有体型系数展开筛选,最终整理汇总为优化方案在不同风向角下的风荷载体型系数表(见表2~4),为该类型房屋设计时提供参考。

表2 T形平面双坡野营房屋体型系数

Table 2 List of shape coefficients of the camping house with T-shaped plane gable roofs

风向角	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E	F	H1	H2	H3	H4
0°	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	0.7	-0.2	-0.6	0.4	-0.6	-0.4
45°	-0.5	-0.5	-0.4	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	-0.2	-0.1	0.7	-0.4	0.4	-0.5	-0.3	0.7	0.3	-0.4
90°	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	-0.6	-0.6	0.2	0.3	0.7	0.3
-45°	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	-0.1	-1.1	-0.8	-0.6	-0.7	-0.4	0.4	-0.7	-0.3	-0.6	-0.5	-0.4
-90°	0.6	0.7	0.6	0.2	0.2	0.2	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.2	-0.5

表3 左L形平面双坡野营房屋体型系数

Table 3 List of shape coefficients of the camping house with left L-shaped plane gable roofs

风向角	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E	F	H1	H2	H3	H4
0°	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.7	-0.3	-0.2	-0.4	-0.3	0.7	-0.2	-0.6	0.6	-0.6	-0.4
45°	-0.5	-0.5	-0.4	-0.7	-0.7	-0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	-0.4	-0.1	0.6	0.4	-0.1
90°	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.7	-0.3	-0.2	-0.4	-0.2	0.7	-0.2	-0.6	0.6	-0.7	-0.4
-45°	0.6	0.4	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.5	0.5	-0.4	-0.7	0.1	-0.4	-0.5
-90°	0.6	0.7	0.6	0.1	0.2	0.2	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4

表4 右L形平面双坡野营房屋体型系数

Table 4 List of shape coefficients of the camping house with right L-shaped plane gable roofs

风向角	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E	F	H1	H2	H3	H4
0°	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.5	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.7	-0.3	-0.4	0.2	0.2	-0.2
45°	-0.5	-0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-0.5	0.1	-0.2	-0.3	0.7	0.6	0.4	-0.3	-0.4	0.6	0.2	-0.3
-45°	0.6	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.9	-0.8	-0.5	-0.6	-0.6	0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4

5 结 论

(1)当计算域尺寸为 $15L \times 8L \times 10H$,且湍流模型采取RNG $k-\epsilon$,同时选择二阶迎风格式并采用SIMPLEC算法时,数值模拟的结果在满足精度的要求下兼有较好的稳定性,因此以上参数可作为此类房屋进行数值风洞模拟时的参考依据。

(2)建筑周围的气流运动会因为辅助建筑的存在而发生改变,从而影响到房屋表面风压分布的规律,自然也会造成房屋表面风压的变化。而辅助建筑其相对凸出宽度相较于其相对凸出长度而言,前者对房屋表面风压分布规律的影响远小于后者,因此前者的影响可以忽略,而后者的影响具体表现为随着其增加,会出现主体建筑中局部风压体型系数变号的现象,变化最高可达双坡屋面的3倍,因此辅助建筑对建筑表面风压的影响必须予以考虑。

(3)辅助建筑相对凸出长度的变化在对主体建筑的表面风压分布产生影响程度的同时,其影响程度与风向角的正负也是息息相关,具体表现为:风向角为正(即风从辅助建筑一侧迎面吹来)时其影响程度大于风向角为负(即风从主体建筑一侧迎面吹来)时。尽管如此,但是当风向角为负时,还存在着主体建筑背风面屋顶的负压压会因为辅助建筑的存在而急剧增加的现象。因此,在抗风设计中须注意这些影响。

(4)综合分析各风向角下建筑表面的风压分布得到抗风设计的合理建筑外形为:平面局部凸出的双坡野营房屋其相对凸出宽度 b/L 约为 $3/8$ 且相对凸出长度 l/B 介于 $3/8 \sim 4/8$,此时其建筑表面的风压分布较为合理。同时研究得到了该条件下的房屋表面风荷载体型系数表(表2~4),为该类型房屋设计时提供参考。

(5)确定平面局部凸出双坡野营房屋的合理建筑外形,是建立在研究大量工况的基础上的,因此若采用现场实测和风洞试验,时间和经费的消耗巨

大,而数值模拟技术的应运不但可以减少不必要的消耗同时还可以保证结果的可靠性。在体型优化过程中,将房屋表面风压的平均值、标准差和极值等作为优化目标,在分析模型大量的数值模拟结果中可以有效地选出房屋的合理建筑外形。

参考文献:

- [1] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S].Beijing: China Architecture Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [2] NRC-IRC. National building code of Canada 2010 [S]. Ottawa: NRCC, 2010.
- [3] AIJ. Commentary on recommendations for loads on buildings [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2006.
- [4] ASCE. ASCE 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston: ASCE Press, 2010.
- [5] Tamura T, Nozawa K, Kondo K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:1 974-1 984.
- [6] Kopp G A, Galsworthy J K, Oh J H. Horizontal wind loads on open-frame, low-rise buildings [J]. Structural Engineer, 2010, 136(1): 98-105.
- [7] 顾明,黄强,黄鹏,等.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.
Gu M, Huang Q, Huang P, et al. Numerical simulation study on the influence factors of average wind pressure on low-rise and double-slope roof [J]. Journal of Architectural Structures, 2009, 30(5): 205-211. (in Chinese)
- [8] 董欣,丁洁民.不同坡度双坡屋盖表面风压特性研究[J].建筑结构学报,2017,38(3):118-126.
Dong X, Ding J M. Study on surface wind pressure

- characteristics of double slope roof with different slope [J]. *Journal of Architectural Structures*, 2007, 38(3): 118-126. (in Chinese)
- [9] Amiri A K, Bucher C. A procedure for in situ wind load reconstruction from structural response only based on field testing data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 167: 75-86.
- [10] Kim Y C, Tamura Y. Simulation of wind pressures on a target low-rise building in large group by RANS Turbulence model [J]. *Aerospace Engineering*, 2015, 28(3): 04014082.
- [11] 颜卫亨, 邵家醉, 张茂功. 野营折叠网壳结构表面定常风场的数值模拟研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 224-230.
Yan W H, Tai J Z, Zhang M G. Numerical simulation of steady atmospheric flow for folding reticulated shell [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 224-230. (in Chinese)
- [12] 颜卫亨, 黄政, 吴东红. 基于风压分布特性的折叠网壳结构形状优化研究 [J]. *计算力学学报*, 2016, 33(2): 150-157.
Yan W H, Huang Zh, Wu D H. Folding reticulated shell structure shape optimization based on wind pressure distribution characteristics [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(2): 150-157. (in Chinese)
- [13] 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: 139-144.
Huang B C. Theory and application against wind load of structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008: 139-144. (in Chinese)
- [14] 颜卫亨, 何立勇, 吴东红, 等. 风致折叠网壳结构表面积雪分布 CFD 模拟 [J]. *计算力学学报*, 2018, 35(1): 82-90.
Yan W H, He L Y, Wu D H, et al. CFD simulation of wind-induced snow pressure on folded reticulated shell structure [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(1): 82-90. (in Chinese)
- [15] Ozmen Y, Baydar E, Van Beeck J P A J. Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles [J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 63-74.
- [16] Tominaga Y, Akabayashi S I, Kitahara T, et al. Air Flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: wind tunnel experiments and CFD simulations [J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 204-213.

(本文责编: 赵霞)