

基于 CFD 数值模拟的古建筑群风场特性研究 ——以北京故宫建筑群为例

韩宜丹, 淳 庆

(东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210018)

摘要: 为研究我国古建筑群风场特性评估方法, 基于计算流体力学方法(Computational Fluids Dynamics, CFD), 以北京故宫建筑群为例, 通过对不同风向角工况下的故宫建筑群进行 CFD 数值模拟, 获得全域流场信息, 包括故宫中轴线主要建筑的表面风压分布情况、以及故宫建筑群环境风速分布情况。研究揭示了故宫建筑群内不同风向角下主要建筑表面的风压分布规律、中轴线建筑的不利风向角, 并基于风环境评估理论对故宫建筑群内的行人风环境舒适性和安全性进行评估。研究结果表明: 风压分布大致呈东西和南北对称分布形态; 迎风面受较大正风压, 侧风和背风面受较大负风压, 负风压主要集中在靠近屋脊和墙面转角等气流分离区; 主要建筑表面的正风压系数最值达 1.0, 负风压系数最值达 2.2; 六座大殿所受垂直方向的升力系数极值接近 8, 是水平方向的 2 倍; 在水平和垂直方向上风压合力在斜风向下较大, 其中在 120°时的三向风压合力均达到极值; 环境最大风速比在 3~6 之间, 斜风向的最大风速比较大; 垂直风向下, 风速放大效应较弱, 其中正南和正北风放大效应最弱, 北京地区的主导风向是故宫建筑群的最优风向。研究成果可以为故宫建筑群的结构抗风保护以及行人防风措施提供科学依据和指导。

关键词: CFD 数值模拟; 故宫建筑群; 平均风压系数; 风环境模拟

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)05-0650-10

Study on wind field characteristics of ancient building group based on CFD numerical simulation: Taking the Forbidden City building group as an example

HAN Yidan, CHUN Qing

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: The study reveals the wind pressure characteristics of the main building surface and the unfavorable wind direction for the central axis buildings, and evaluates the comfort and safety of pedestrian wind environment based on the wind environment assessment theory. The results show that the distribution of wind pressure roughly follows a symmetrical pattern of east-west and north-south distribution. The windward surface is subject to positive wind pressure, while the crosswind and leeward surfaces are subject to negative wind pressure. The negative wind pressure is mainly concentrated in the airflow separation area near the roof ridge and the corner of the wall. The maximum positive and negative wind pressure coefficients of main building surface are 1.0 and 2.2, respectively. The extreme lift coefficient in the vertical direction is close to 8, which is twice as high as that in the horizontal direction. The force coefficients are larger under the oblique wind direction, and reach the extreme values at 120°. The maximum wind speed ratio of the environment is between 3 and 6, and the maximum wind speed of the oblique wind direction is larger. The wind speed amplification effects are weak under vertical wind directions, among which the north and south wind amplification effect are the weakest. The dominant wind direction in Beijing is the favorable wind direction for the Forbidden City. The results can provide scientific basis and guidance for the

收稿日期: 2024-05-08

修回日期: 2024-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51778122); 江苏省重点研发计划项目(BE2022833)

第一作者: 韩宜丹(1993—), 女, 博士生, 主要从事建筑遗产保护技术的研究. E-mail: han.hanyidan@gmail.com

通信作者: 淳 庆(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事历史建筑保护、结构安全评估、既有建筑加固改造、木结构技术等研究.
E-mail: cqj1979@163.com

structural protection of buildings and pedestrian protection measures of the Forbidden City building group in view of wind resistance.

Key words: CFD numerical simulation; the Forbidden City building group; mean wind pressure coefficient; wind environment simulation

中国古建筑以其悠久的历史 and 优美的造型、科学的结构和严谨的布局、独特的文化和艺术价值赢得世人瞩目。故宫建筑群作为我国现存规模最大、保存最完整的古代宫殿建筑群,代表了中国传统官式建筑的最高成就^[1],故宫建筑群的保护工作任重道远。目前,对于故宫建筑结构方面的研究,较多关注单体建筑的结构强度^[2-3]和抗震性能^[4-7],而针对古建筑抗风安全性及风环境舒适度评估的研究则较少。少数关注结构风荷载的研究^[2,8],对作用在结构上的风荷载的处理方式是查阅荷载规范^[9]提供的风荷载体型系数。然而,荷载规范仅给出了简单规则外形的建筑风压体型系数,古建筑复杂且独特的外形在荷载规范提供的体型系数难以准确体现。因此,为了进一步研究风对故宫建筑群的作用效应,研究其分压分布和风场环境具有实际意义。

目前,针对我国复杂外形的传统建筑表面风压分布规律及风场绕流特性的研究方面已经取得长足进展。主要的研究方法有风洞试验和 CFD (Computational Fluids Dynamics) 数值模拟。单文姗^[10]利用风洞试验,以双坡、四坡屋盖为例,研究了屋面举折、屋脊高度、重檐等典型中国古建形体特征对屋盖风荷载的影响规律。彭兴黔等^[11]利用数值模拟方法揭示了福建客家土楼不同坡度和高径比的圆形屋盖表面风压分布规律。韩宜丹^[12]以宋元、明清时期的木构建筑为研究对象,对其进行体型系数的风洞数值模拟,从而揭示其风振响应特征。李雨航等^[13-14]通过风洞试验和数值模拟方法准确预测了应县木塔表面的风压力。

近年来,针对古建筑群风环境的研究受到越来越多的关注。闫晓曦^[15]针对苏州市老城区古建筑,基于 PHOENICS 数值模拟软件对不同布局的古建筑群风环境进行模拟,获得了建筑群密集程度对风环境分布及行人舒适度的影响。易晓列^[16]以广州典型祠堂院落式建筑为研究对象,通过 CFD 数值模拟方法,从风环境舒适度的角度出发提出了建筑遗产再利用的防风预防性保护策略。Han 等^[17]以浙江宁波保国寺为例,通过 CFD 数值模拟与现场风环境实测相结合的方法,揭示了周围建筑群和地形对保国寺大殿表面风压及院落风环境的影响。张佳敏等^[18]以初祖庵大殿为例,通

过数值模拟研究了地形对木构建筑遗产风环境的影响。综上,现有研究主要集中在地形对建筑群风环境的影响,以及从舒适度的风环境风速分析,但对于建筑群中单体建筑表面风压分布规律的研究较为缺乏。

本文以故宫建筑群为研究对象,利用 Rhino3D 建模软件构建故宫建筑群几何模型,利用 ANSYS Fluent 软件对不同风向角工况下的故宫建筑群进行 CFD 数值模拟,在后处理软件 CFD-POST 中进行建筑表面风压系数和环境风速结果的处理。重点分析中轴线上主要建筑表面的风压分布规律以及不同风向角下建筑屋顶所受的风压合力变化规律,并通过风速比和风速面积比两个指标对建筑群中的行人风环境进行评估。研究成果可以为故宫建筑群的结构抗风保护以及行人防风措施提供科学依据和指导。

1 CFD 数值模拟方法

1.1 计算模型

CFD 数值模拟采用足尺计算模型,用于数值模拟的故宫建筑群几何模型及其尺寸如图 1 所示。

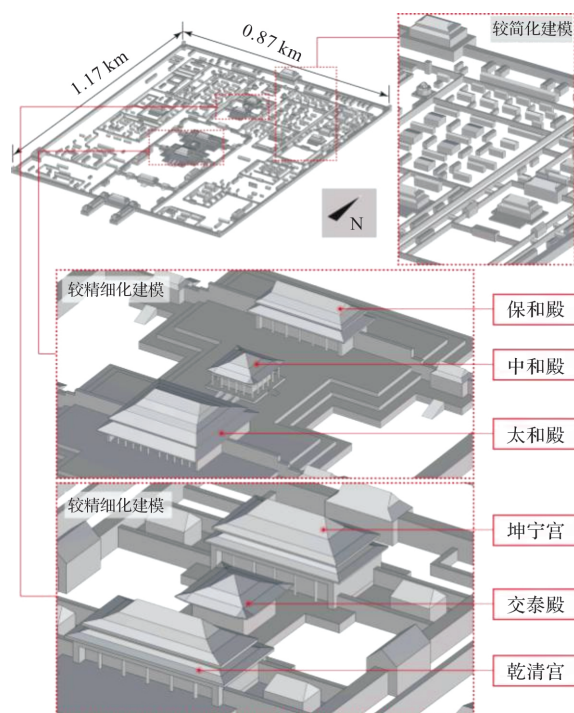


图 1 用于数值模拟的故宫建筑群几何模型

Fig. 1 Geometrical model of the Forbidden City building group used in the numerical simulation

本文重点研究故宫建筑群中占据中轴线主要位置的外朝三大殿——太和殿、中和殿、和保和殿,以及后三宫——乾清宫、交泰殿和坤宁宫。除这六座建筑外的其他建筑几何模型均做简化处理。通过建立等高的简单几何体来等效。对于重点研究的六座主要建筑,建立精细化几何模型,模型包含屋面坡度、屋檐、柱子等元素。六座主要建筑的几何外形虽为东西对称,但由于周边其他建筑并非严格对称布置,并且故宫建筑群也并非严格的南北朝向(约南偏东 2.5°),因此,数值模拟需考虑全风向,共包括12个风向角,设正南风向为 0° 风向,风向间隔 30° ,如图2所示。

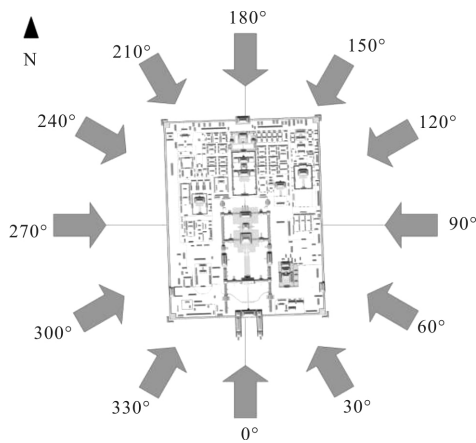


图2 模拟风向角示意图

Fig. 2 Wind direction specification in the simulation

1.2 计算域及网格划分

CFD数值模拟中,计算域的尺寸定义如图3所示。

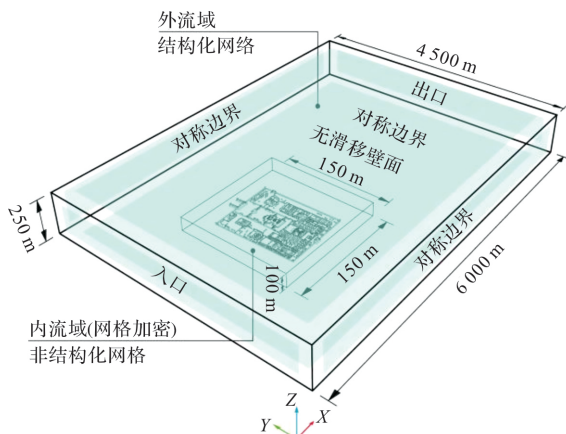


图3 计算流域及边界条件

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

对于六座主要建筑,数值模拟阻塞率小于3%的要求^[19-20],建筑群模型位于距离流域入口1/3处。网格划分采用结构化网格和非结构化网格相

结合的方式,在建筑物附近采用非结构化网格,远场采用结构化网格。对中轴线上的六个建筑,采取网格加密,最小网格尺寸为0.2 m,最大网格尺寸为10 m,网格增长率为1.1,网格划分方案如图4所示。网格的敏感性分析见1.4小节。12个风向角模拟工况的网格总量为 $5.6 \times 10^6 \sim 5.8 \times 10^6$ 个。

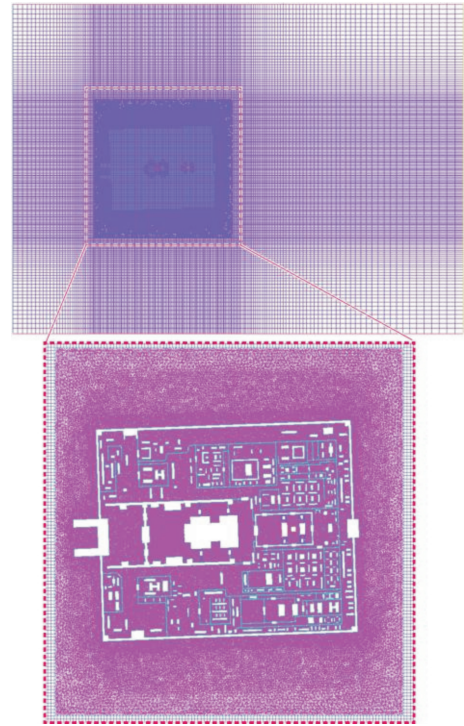


图4 流域网格划分($z=1$ m)

Fig. 4 Meshing of the computational domain ($z=1$ m)

1.3 计算设置及边界条件

采用基于有限体积法的 Fluent 数值模拟软件开展 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)模拟,湍流模型为 Realisable $k-\epsilon$,该湍流模型广泛应用于人行高度风环境研究中^[21-23]。流域入口的平均速度剖面 $U(z)$ 、湍流动能 $k(z)$ 、湍流耗散率 $\epsilon(z)$ 等入口边界条件通过自定义函数(User-Define Function, UDF)接口实现。求解器为基于压力求解的不可压缩流稳态算法,速度-压力耦合方式为SIMPLEC,动量方程和湍流模型输运方程的非线性对流项离散格式为二阶迎风格式。当所有变量的残差变化稳定,监测点的风速平稳,并且 k 及 ϵ 残差达到 10^{-6} 以下,连续方程残差达到 10^{-4} 以下时判定为收敛。参考高度为10 m,参考高度处平均风速为10 m/s,其他各边界条件的设定见表1。表中,平均风速、湍流动能、湍流耗散率公式为Richards等^[24]提出的平衡态大气边界层模型模型; u_* 为摩擦速度,可由参考高度和参考平均风速计

算获得; $C_\mu = 0.09$ 为经验系数; $\kappa = 0.42$ 为 Karman 常数; z_0 为气动粗糙度长度, 根据 Davenport 地面粗糙度分类^[25], 取 $z_0 = 1$ m; K_s 为地面粗糙度高度; C_s 为粗糙度常数, 取 $C_s = 0.5$ ^[22].

表 1 边界条件设置

Tab. 1 Setting of the boundary conditions

流域边界	边界条件
	平均风速 $U(z) = \frac{u_s}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)$
入口 Velocity-Inlet	湍流动能 $k(z) = \frac{u_s^2}{\sqrt{C_\mu}}$
	湍流耗散率 $\epsilon(z) = \frac{u_s^3}{\kappa(z+z_0)}$
出口 Pressure-Outlet	$\frac{\partial(u, v, w, p, k, \epsilon)}{\partial x} = 0$
侧边 Symmetry	$v = 0, \frac{\partial(u, w, k, \epsilon)}{\partial z} = 0$
顶部 Symmetry	$w = 0, \frac{\partial(u, v, k, \epsilon)}{\partial z} = 0$
地面 No-Slip Wall	Standard Wall Function; $K_s = 9.793 \frac{z_0}{C_s}$

1.4 网格敏感性分析

对最小网格尺寸分别为 0.1、0.2、0.4、0.6 m 的网格划分方案进行网格敏感性分析. 选择东京工业大学 (Tokyo Polytechnic University, TPU) 气动数据库^[26]中带有屋檐的低矮建筑风洞试验结果, 对网格敏感性分析结果进行验证. 对比四种网格方案的风压系数结果 (如图 5 所示), 迎风墙面、迎风屋顶、背风屋顶前缘都具有较强的一致性.

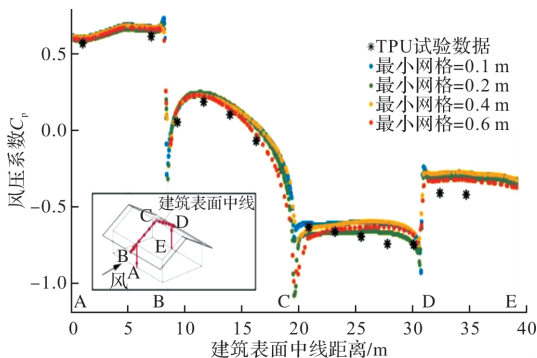


图 5 网格敏感性分析

Fig. 5 Grid sensitivity analysis

在背风墙面和屋顶后半部有偏差, 说明湍流模型预测的流动分离区和尾迹区负压偏小. 在 0.1、0.2、0.4、0.6 m 网格上, CFD 结果与 TPU

数据的风压系数值的偏差分别为 0.045 7、0.045 9、0.056 9、0.060 6. 因此, 选取最小网格尺寸为 0.2 m 的划分方案.

1.5 平衡态大气边界层验证

在评估行人风环境时, 由于行人高度距离地面较近, 而行人高度处风环境 CFD 数值模拟研究中, 来流特性易受到地面粗糙度的影响较难获得良好的大气边界层自保持性. 平衡大气边界层要求流域中湍流风的速度剖面、湍流动能和湍流耗散率等湍流特性剖面的顺风向梯度为零. Blocken 等^[27]指出大气边界入口来流中的地面粗糙度和流域中地面粗糙度二者存在差异, 导致了计算流域的不均匀性. 选取合适的边界条件和湍流模型, 辅以适当的壁面函数修正, 是获得高精度的平衡态大气边界层风场的有效手段^[28]. 因此, 本研究模拟进行了壁面函数及地面粗糙度修正 (表 1), 通过相同尺寸空流域的模拟, 验证了来流的自保持特性, 空流域的边界条件及网格划分方案和带有建筑模型的计算流域完全相同. 在计算流域的顺流方向选取 5 个截面, $x = -2\,000$ m 为流域入口处, $x = 0$ m 为原流域模型中故宫建筑群所在位置, $x = 4\,000$ m 为流域出口处. 提取 5 个截面上的平均速度风剖面、湍流动能、湍流耗散率结果. 模拟结果如图 6 所示, 风速、湍流动能、湍流耗散率沿程均具有较好的自保持性, 其中风速的自保持性维持得最好.

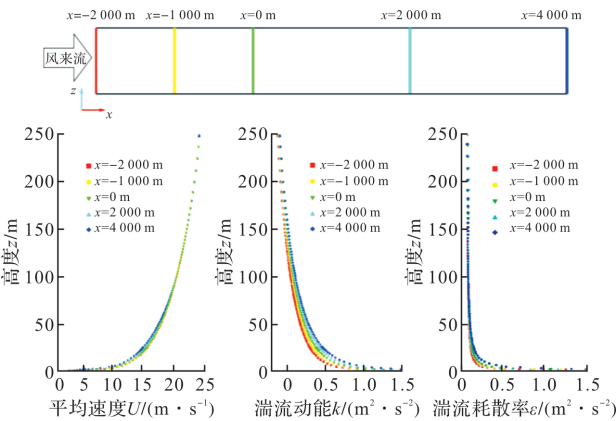


图 6 空流域顺流方向风剖面对比情况

Fig. 6 Comparison of simulated wind profiles in empty domain

2 计算结果处理及分析

将上述的计算结果导入到后处理软件 CFD-POST 中进行处理和可视化呈现.

2.1 建筑表面风压

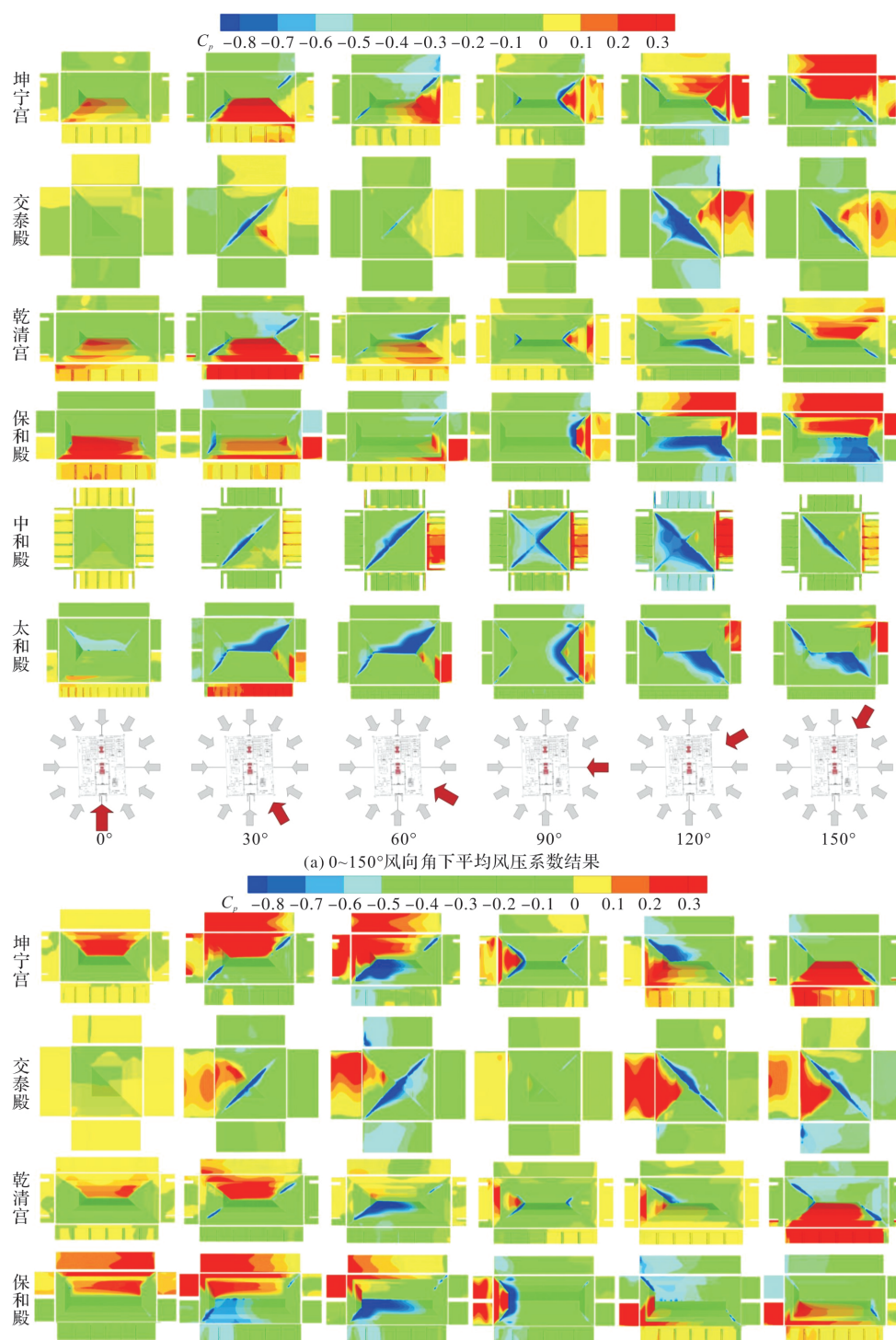
建筑表面任意一点的平均风压系数定义为

$$C_p = P_{\text{mean}} / 0.5 \rho U_{\text{ref}}^2 \quad (1)$$

式中: P_{mean} 为该点的平均静风压, 由 Fluent 计算直接得到; U_{ref} 为参考平均风速; 空气质量密度 ρ 为 1.225 kg/m^3 .

十二种风向角工况下的数值模拟获得的六座主要建筑表面平均风压系数分布情况如图 7 所示. 从图中可以看出, 建筑迎风面承受正风压, 所有风向角下建筑表面的正风压系数最大可达 1.0. 背风面承受负风压, 最大负压系数达 2.2, 较大的负压发生在背风屋面屋脊处以及背风墙面的转角处, 这是由于气流在此处发生分离. 所有风向

角中, 垂直风向下的建筑表面风压水平整体较低, 斜风向风压水平整体较高. 由于中轴线上建筑比其他周围建筑高, 因此在正南(0°)和正北风(180°)向下, 六座主要建筑由于上游其他建筑的有效遮挡, 处于风速较低的环境中, 因此整体风压水平相对较低. 对于太和殿和乾清宫, 其南向一定范围内没有高遮挡物, 因此其不利风向为西南风和东南风; 同理对于保和殿和坤宁宫而言, 不利风向为西北风和东北风.



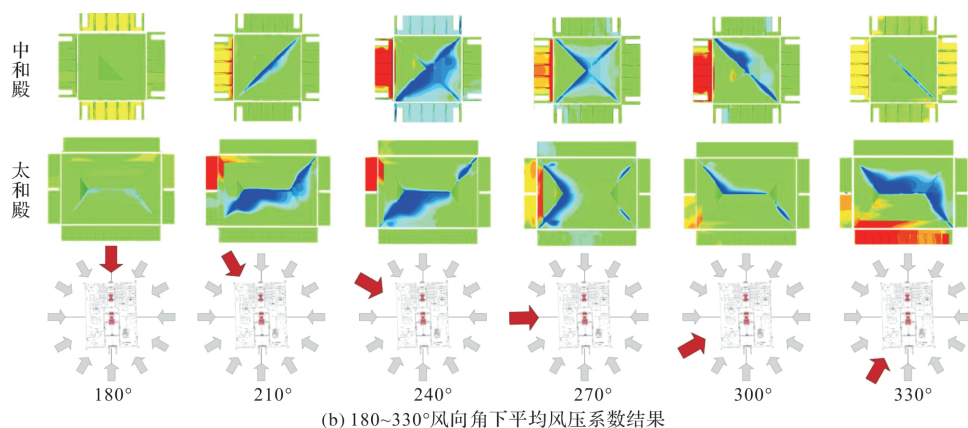


图7 建筑表面平均风压系数分布情况

Fig. 7 Mean wind pressure coefficient distribution on the roofs of six main hall buildings

对于中和殿和交泰殿两座处于中间的大殿,其外形相似,均为单檐的四坡攒尖顶建筑,不同的是中和殿是檐下有四周回廊、墙体内收,交泰殿檐下无回廊。对比两座建筑的屋面风压系数,所有风向角下,中和殿的屋面几乎未出现正风压区域,而在斜风向下墙面出现很大的正风压区域。出现这种情况的原因是,对比交泰殿,中和殿檐下的回廊使得气流分离发生得更剧烈,导致屋面更大区域处于气流分离负压区;此外,分离后有更多的气流进入檐下的回廊空间,致使迎风墙面承受更多的气流冲击,从而承受更大和集中的正风压。

对比图7(a)和(b),东向和西向风来流下的风压分布大致呈对称形态,由此可见东西侧的周围建筑布置对来流影响差异不大。

2.2 建筑屋顶所受的风压合力

建筑屋顶所受的风压的合力的合力系数三向分量定义为

$$C_{Fx} = F_x / 0.5 \rho U_{\text{ref}}^2 A \quad (2)$$

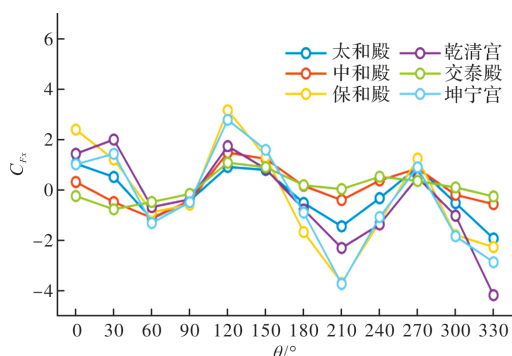
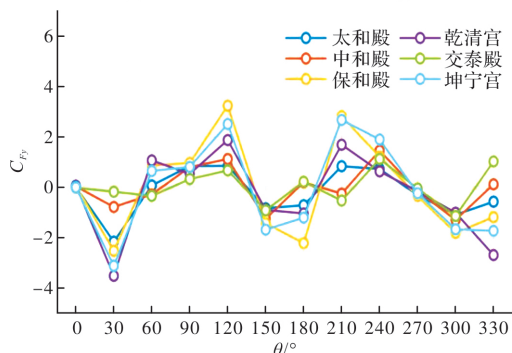
$$C_{Fy} = F_y / 0.5 \rho U_{\text{ref}}^2 A \quad (3)$$

$$C_{Fz} = F_z / 0.5 \rho U_{\text{ref}}^2 A \quad (4)$$

式中: F_x 为建筑屋面在 x 方向的风压合力; F_y 为建筑屋面在 y 方向的风压合力; F_z 为建筑屋面在 z 方向的风压合力; x 向为垂直建筑面阔方向; y 向为垂直建筑进深方向; z 向为竖直向上(升力方向); A 为该建筑的屋顶面积。

所有风向角下的风压合力的合力系数三向分量 C_{Fx} 、 C_{Fy} 和 C_{Fz} 的结果如图8所示。从图中可以看出,所有风向角下,六座大殿所受的水平方向的风压合力系数的绝对值极值接近4,竖直方向的升力系数的极值接近8,是水平方向的2倍。在水平和竖直方向上,建筑所受的风压合力在垂直风

向时较小,在斜风向下较大,其中在风向角为120°时,建筑所受的三向风压合力均达到极值。水平方向上,保和殿和坤宁宫在不同风向角下所受的风压合力值处于较高水平,中和殿和交泰殿所受的风压合力值较低,在0附近波动。在竖直方向上,太和殿和中和殿所受的升力明显高于其他大殿,其中中和殿在120°和240°风向下的升力系数达到极值。中和殿和交泰殿虽都为前后有高建筑物遮挡的状态,且两座大殿的外形体量相似,但是中和殿檐下有四周回廊。太和殿的升力水平较高的原因是,太和殿南侧是空旷的广场,无建筑物遮挡,且外朝三大殿的建筑之间布置相对稀疏,建筑间距大,导致来流风在太和殿处发生强烈分离。

(a) 不同风向角下主要建筑屋顶 C_x 结果(b) 不同风向角下主要建筑屋顶 C_z 结果

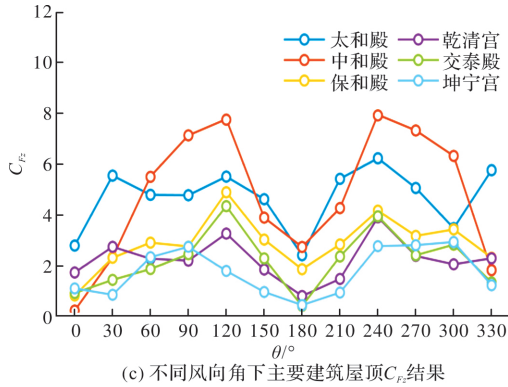


图8 不同风向角下建筑屋顶所受风压合力三向分量
Fig. 8 Results of wind force coefficients of roofs of the six main buildings at three orthogonal directions

2.3 行人风环境评估

行人高度处来流风速与建筑物周围行人高度测点处风速的比值反映了建筑物对远方来流风速的放大效应,风速比的定义如下。

$$\beta = U/U_0 \quad (5)$$

式中: U 为流域中建筑周围环境中某处行人高度风速; U_0 为流域入口处行人高度处风速; 行人高度处取距离地面 2 m。

由以上的风压分布结果分析可以看出,风压大致呈南北对称、东西对称的结果,因此,限于篇幅,此处仅列出 0、30、60、90°四种风向角下的行人高度处风速比结果,如图 9 所示。

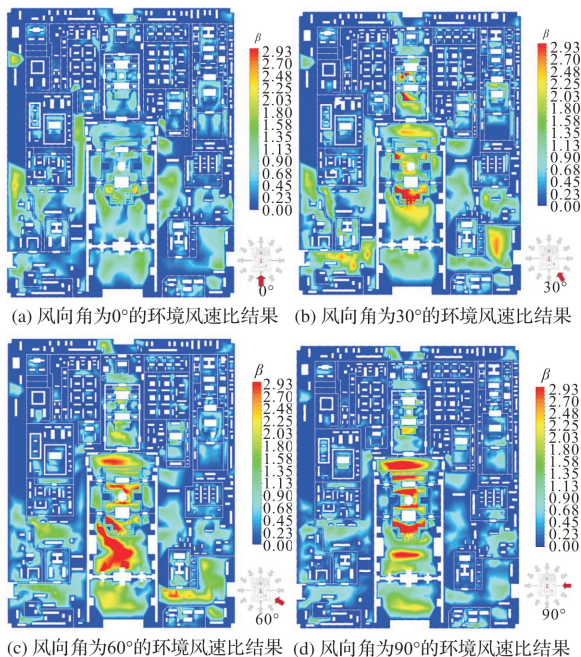


图9 环境行人高度处风速比结果

Fig. 9 Results of wind speed ratios at pedestrian level in the wind environment

对比四种风向角结果可知, 0°风向角下的整体环境风速较低。从图中可以发现, 建筑群的中心区域所处的环境是故宫建筑群的高风速区域, 由于中轴线上的建筑高度比其他周围建筑高度高, 导致远方来流向上攀升, 从而产生了风速放大效应。

为定量分析风向角对故宫中行人风环境舒适度的影响, 本文采用风速比最大值 (β_{\max}) 和风速面积比 (R_θ) 来评估不同风向角下的故宫中行人风环境。定义如下:

$$\beta_{\max} = \max(\beta) \quad (6)$$

$$R_\theta = \frac{A_{\theta, \beta > \beta_0}}{A_{\text{Total}}} \quad (7)$$

式中: A_{Total} 为行人可达范围内行人高度处截面的总面积; $A_{\theta, \beta > \beta_0}$ 为 θ 风向角下该截面中风速比 $\beta > \beta_0$ 的面积。为满足风环境行人舒适度的需求, 在缺乏气象统计资料的情况下, 规范^[29]给出的评估准则为, 主导风向下的风速比不宜大于 1.2, 本文取 $\beta_0 = 1.2$ 。

所有风向角下的 β_{\max} 结果如图 10 所示, 180°风向角下的环境最大风速比最小, 另外, 0、90、270°风向角下的最大风速比均较小, 由此可见, 最大风速比较小的风向为垂直风向, 斜风向将对环境风速产生较大的放大效应。最大的风速比发生在 120°风向角下, 风速比最大可达 5.9。

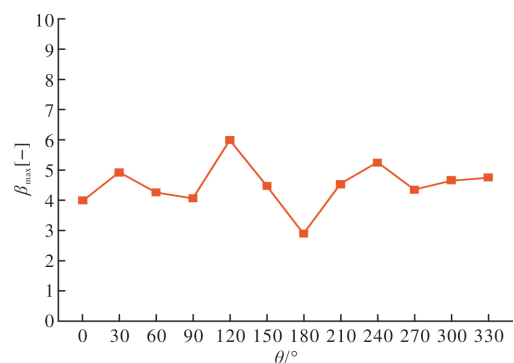


图10 不同风向角下的环境最大风速比

Fig. 10 Maximum wind speed ratios under different wind directions

所有风向角下的 R_θ 结果如图 11 所示, 不同风向角下的 R_θ 趋势与最大风速比 β_{\max} 的变化趋势相似, 即垂直风向下的风速面积比较小, 斜风向下的风速面积比相对较大, 即斜风向下, 风速比超过 1.2 的面积占比较大, 风速放大效应较为明显。这是由于故宫建筑群中的建筑布局较为规整, 垂

直风来流情况下,上游建筑可以给下游建筑提供有效遮挡。基于最大风速比和风速面积比的分析结果,垂直风向下,即正东、正南、正西、正北风下,故宫建筑对风速放大效应较弱,其中正南和正北风放大效应最弱,即为故宫建筑群最优环境风向。根据北京30 a风向频次统计结果^[30],北京地区秋冬季节有至少6个月风向为北向,春末和夏季主导风向为南偏西,全年统计结果来看,北京地区的主导风向为正北向,即180°风向角。从主要建筑表面风压和环境风速分析结果来看,北京地区的主导风向是故宫建筑群的最优风向。

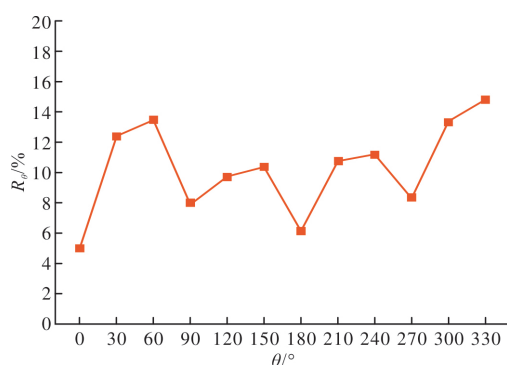


图11 不同风向角下的风速面积比

Fig. 11 Wind speed area ratios under different wind directions

3 结论

(1)建筑表面风压分布大致呈东西和南北对称分布形态。就中轴线建筑而言,东西侧建筑群的布局对来流影响差异不大;

(2)垂直风向为有利风向,建筑表面风压水平整体较低。斜风向为不利风向,迎风面受较大正风压,背风面受较大负风压,负风压主要集中在靠近屋脊和墙面转角等气流分离区;

(3)以10 m/s为参考风速,主要建筑表面的正风压系数最值达1.0,负风压系数最值达2.2;

(4)六座大殿所受竖直方向的升力系数极值接近8,是水平方向的2倍。在水平和竖直方向上,建筑所受的风压合力在斜风向下较大,其中在120°时的三向风压合力均达到极值。水平方向上,保和殿和坤宁宫风压合力值处于较高水平,中和殿和交泰殿风压合力值较低,在0附近波动。在竖直方向上,中和殿的升力系数达到极值;

(5)所有风向角下,故宫建筑环境最大风速比在3~6之间,斜风向的最大风速比较大;

(6)基于最大风速比和风速面积比的分析结果,垂直风向下,即正东、正南、正西、正北风下,故宫建筑对风速放大效应较弱,其中正南和正北风放大效应最弱,即为故宫建筑群最优环境风向。北京地区的主导风向是故宫建筑群的最优风向。

参考文献 References

- [1] 单霁翔.《故宫保护总体规划》的意义及实施对策[J].故宫博物院院刊,2015(5):6-16,156.
SHAN Jixiang. The significance and implementation countermeasures of the general plan for the protection of the Forbidden City[J]. Journal of the Palace Museum, 2015(5): 6-16, 156.
- [2] 周乾,闫维明,关宏志.故宫太和殿结构现状数值模拟研究[J].建筑结构,2015,45(6):66-70,79.
ZHOU Qian, YAN Weiming, GUAN Hongzhi. Numerical simulation study on the structural condition of the Hall of Supreme Harmony in the Forbidden City [J]. Building Structure, 2015, 45(6): 66-70, 79.
- [3] 淳庆,张剑葳,赵鹏,等.故宫灵沼轩残损分析及结构性能研究[J].文物保护与考古科学,2018,30(1):40-46.
CHUN Qing, ZHANG Jianwei, ZHAO Peng, et al. Damage analysis and structural performance study of Lingzhaoxuan in the Forbidden City [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(1): 40-46.
- [4] 周乾.故宫灵沼轩结构抗震分析研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):78-85.
ZHOU Qian. Seismic analysis of the structure of Lingzhaoxuan in the Forbidden City [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(2): 78-85.
- [5] 周乾.紫禁城古建筑的传统防震方法[J].工业建筑,2019,49(6):210-217.
ZHOU Qian. Traditional seismic methods of ancient buildings in the Forbidden City [J]. Industrial Construction, 2019, 49(6): 210-217.
- [6] 周乾.基于构造特征的故宫太和殿抗震性能分析[J].建筑技术,2022,53(3):281-284.
ZHOU Qian. Seismic performance analysis of the Hall of supreme harmony in the Forbidden City based on structural characteristics [J]. Architecture Technology, 2022, 53(3): 281-284.
- [7] 盛守刚.明代重檐盝顶殿堂式结构抗震性能研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2018.

- SHENG Shougang. Seismic performance study of Ming dynasty Double-Eave Hall-Style structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018.
- [8] 周乾, 闫维明, 杨娜, 等. 故宫灵沼轩风振响应分析[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(3): 55-64.
ZHOU Qian, YAN Weiming, YANG Na, et al. Analysis of wind-induced vibration response of Lingzhaoxuan in the Forbidden City[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(3): 55-64.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012[J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009—2012[J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] 单文姗. 殿堂式中国古建筑屋面风荷载特性[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
SHAN Wenshan. Wind load characteristics of roofs of Hall-Style Chinese ancient buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [11] 吴仁伟, 彭兴黔. 圆形土楼屋盖风荷载的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 427-432.
WU Renwei, PENG Xingqian. Numerical simulation analysis of wind loads on roofs of circular earth buildings[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2011, 32(4): 427-432.
- [12] 韩宜丹. 江南地区传统木构建筑风振性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
HAN Yidan. Study on wind-induced vibration performance of traditional timber structures in Jiangnan Region[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [13] 李雨航, 邓扬, 李爱群, 等. 中式高耸古木塔风压分布与体型系数风洞试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 64-73.
LI Yuhang, DENG Yang, LI Aiqun, et al. Wind pressure distribution and shape coefficient study of tall ancient timber pagodas in China using wind tunnel tests[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10): 64-73.
- [14] 李雨航, 邓扬, 李爱群, 等. 应县木塔风压分布的风洞试验与CFD模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 81-91.
LI Yuhang, DENG Yang, LI Aiqun, et al. Wind pressure distribution of Yingxian timber pagoda: Wind tunnel tests and CFD simulation study[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(3): 81-91.
- [15] 闫晓曦. 苏州古城内古建筑修复改造风环境技术研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
YAN Xiaoxi. Technical study on wind environment for restoration and renovation of ancient buildings in the ancient city of Suzhou[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017.
- [16] 易晓列. 广州建筑遗产防火防风性能评估及预防性保护[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
YI Xiaolie. Evaluation and preventive protection of fire and wind performance of architectural heritage in Guangzhou[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [17] HAN Y D, CHUN Q, XU X, et al. Wind effects on Chinese traditional timber buildings in complex terrain: The case of Baoguo Temple[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 59: 105088.
- [18] 张佳敏, 姚珊珊, 吕红医, 等. 基于风环境分析的木构建筑遗产保护研究——以初祖庵大殿为例[J]. 自然与文化遗产研究, 2023, 8(1): 71-80.
ZHANG Jiamin, YAO Shanshan, LV Hongyi, et al. Protection study of timber building heritage based on wind environment analysis: A case study of the Main Hall of Chuzu Temple[J]. Research on Natural and Cultural Heritage, 2023, 8(1): 71-80.
- [19] FRANKE J, HELLSTEN A, SCHLÜNZEN H, et al. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment[J]. COST Action, 2007, 732: 51.
- [20] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10): 1749-1761.
- [21] BLOCKEN B, ROELS S, CARMELIET J. Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(10): 849-873.
- [22] BLOCKEN B, JANSSEN W D, VAN HOOFF T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 30: 15-34.
- [23] BLOCKEN B, MOONEN P, STATHOPOULOS T,

- et al. Numerical study on the existence of the venturi effect in passages between perpendicular buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(12): 1021-1028.
- [24] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model [C]//Computational Wind Engineering 1. Oxford: Elsevier, 1993: 145-153.
- [25] WIERINGA J. Updating the davenport roughness classification[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1): 357-368.
- [26] QUAN Y, TAMURA Y, MATSUI M, et al. TPU aerodynamic database for low-rise buildings[A]//Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering. Cairns, Australia; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007: 1615-1622.
- [27] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, CARMELIET J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(2): 238-252.
- [28] 罗凯文, 杨易, 谢壮宁. 基于 $k-\epsilon$ 模型模拟平衡态大气边界层的比较研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 21-29.
- LUO Kaiwen, YANG Yi, XIE Zhuangning. Comparative study on the simulation of equilibrium atmospheric boundary layer based on the $k-\epsilon$ model[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 21-29.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程风洞试验方法标准: JGJ/T 338—2014[J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for wind tunnel test method in building engineering: JGJ/T 338—2014 [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [30] 岳梦迪. 基于人行区域风环境的板式高层居住区优化设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- YUE Mengdi. Optimization design of slab-type high-rise residential areas based on pedestrian wind environment[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.

(编辑 郑晓龙 李睿奇)

(上接第 649 页)

- [22] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统木结构典型榫卯节点基于摩擦机理特性的低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 139-145.
- GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Low-cycle repeated loading experiment study based on friction mechanism of typical mortise-tenon joints in traditional wood structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 139-145.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 古建筑木结构维护与加固技术标准: GB/T 50165—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for maintenance and strengthening of historic timber building: GB/T 50165—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

(编辑 郑晓龙 李睿奇)