

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.016

# 地域气候条件下异型建筑室外风环境 绿化改进研究

王诗怡, 王辉明

(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为了研究绿化对异型建筑室外风环境的改进效应, 本文采用 CFD 方法和 Realizable  $K-\epsilon$  湍流模型, 结合乌鲁木齐地区风环境特征, 以异型建筑新疆大剧院为例, 以城市空间中 1.5 m 人行高度处风速小于 5 m/s 为评价指标, 依据单棵、一排树木周围流场特性的风洞试验和数值模拟对比, 对大剧院周围无绿化和现有绿化方案进行分析, 并根据树木周围流场特性及对建筑周围风环境的影响提出更为合理的绿化布局, 以此满足室外行人舒适度要求。结果表明: 树冠处阻风作用最好, 随着距树冠距离的增加, 阻风作用逐渐降低; 树冠两侧及间隔处有导风作用, 使得局部风速增大; 留有间隔的一排树木在满足经济条件的同时仍能起到优于单棵的阻风效果, 更适合实际使用。异型建筑的凹角及拐角处易生成涡流和局部高风速区, 在建筑抗风设计时应予以充分考虑。本研究可为利用树木阻风导风和类似异型建筑的室外风环境绿化改进提供参考。

**关键词:** 异型建筑风环境; 绿化栽植方案; 人体舒适度; 风工程

**中图分类号:** S732

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2022)02-0271-08

## Research on the improvement of outdoor wind environment greening of special-shaped buildings under regional climate conditions

WANG Shiyi, WANG Huiming

(College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** For studying the greening improvement on outdoor wind environment of special-shaped buildings, the research, under the guidance by the CFD method and the Realizable  $K-\epsilon$  turbulence model combined with the wind environment features of Urumqi, takes the special-shaped building-Xinjiang Grand Theater as the sample to analyze the non and existing afforestation plans of Xinjiang Grand Theater at the wind speed less than 5 m/s in the pedestrian-level of 1.5m in urban space as that by the evaluation indicators and the wind-tunnel experiment and numerical simulation of flow field characteristics around a tree or a row of trees as comparison. It also proposes a more reasonable afforested layout to meet the comfort requirements for outdoor pedestrians based on the flow field characteristics around trees and their influence on wind environment around buildings. The results show that the best wind-guide effect is found at the crown. With the distance from the increasing crown, the performance gradually decreases; the wind-guide effect on both sides of the crown and at its intervals leads to an increase in local wind speed; a spaced row of trees not only satisfies the economic conditions but also produces a better wind-resistance performance than a single tree, which is more suitable for practical use. Vortex and local high wind speed areas are easy to form in concave corners and turnings of special-shaped buildings, which should be fully considered in the wind-resistance design of buildings. This study can provide reference for using trees to resist and guide wind and the greening improvement of outdoor wind environment in similar special-shaped buildings.

**Key words:** wind environment of special-shaped buildings; green planting scheme; human comfort level; wind engineering

收稿日期: 2021-04-07; 网络出版日期: 2021-08-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210820.1856.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568062); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2016D01C063)

第一作者: 王诗怡, 女, 硕士生, 研究方向为建筑风工程。E-mail: 781171384@qq.com

通信作者: 王辉明, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为工程结构损伤破坏机理及多尺度分析。E-mail: wanghmjxj@126.com

随着可持续发展理念的深入,我国城市发展正迈向人与自然和谐共处的新境界。城市的绿色发展应考虑当地气候环境,而风是决定建筑室外环境的因素之一,良好的建筑室外风环境不仅可以提升户外舒适度和空气质量,还能为室内环境提供良好的通风,减少采暖空调的能源消耗。但是,当前城市规划及设计人员缺乏对风环境的深入认识,在规划和设计之前未能全面、系统地分析场地的风环境,因此可能会导致一系列城市风环境问题。

目前,对城市风环境的改善多从建筑布局入手,而较少考虑绿化对室外风环境的影响。鲜鑫等<sup>[1]</sup>采用多元线性回归方法研究建筑布局、建筑高度、建筑密度对室外风环境的综合影响。合理的绿化布局可以减弱局部区域的强风并美化环境、净化空气,是改善室外风环境的重要方式。甄蒙等<sup>[2]</sup>通过模拟小区风环境和热环境,得出了3种绿化率下不同垂直高度上的温度和风速比。刘晓勤等<sup>[3]</sup>研究了夏热冬暖地区屋顶绿化及垂直绿化围护结构在不同绿化形式下的节能改造效果。张梓霆等<sup>[4]</sup>分析了夏季和冬季青岛市人民医院的室外风环境,研究了绿化布局和绿化模式对室外风环境的影响。上述研究虽运用绿化改善了局部环境,但缺乏对树木流场特性的研究,并且对地域风环境下绿化布局的研究也较少。

研究城市风环境,除了使用传统的现场测量方法和使用大型的风洞试验设备进行缩尺试验外,数值模拟分析已成为主要的研究方法之一,它的优越性体现在可以使用足尺模型来模拟整个结构风场的特性,并快速便捷地输出可视化图形结果。

据气象资料统计,乌鲁木齐地区55年来(1956—2010年)的最大风速平均值达18.2 m/s<sup>[5]</sup>,常年大风盛行。乌鲁木齐地区的多风天气不仅影响着人们的日常出行,还可能引发沙尘暴灾害。树木的遮蔽作用可以有效降低附近流场的风速并改变风向,同时阻碍风中颗粒物,改善风场环境,减轻风灾对行人、建筑物的危害。因此,本文结合乌鲁木齐地区风环境特征,以异型建筑——新疆大剧院为例,研究树木的流场特性及对周围风环境的影响,结合风环境评估提出更为合理的绿化布局,以满足室外行人舒适度要求,并为类似建筑周围的绿化改进提供参考。

## 1 理论基础

### 1.1 计算流体力学基本控制方程

建筑风工程数值模拟的理论基础是计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),其基本控制方程是流体力学的连续性方程、动量方程和能

量方程<sup>[6]</sup>,在直角坐标系中以张量形式表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \rho f_j + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( E + \frac{1}{2} u_i u_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} u_j) + \rho u_i f_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $t$ 为时间; $u_i, u_j$ 均为速度分量, $i, j=1, 2, 3$ ,表示三个空间方向; $x_i$ 为*i*方向坐标分量; $f$ 为单位质量流体受到的外力; $\sigma_{ij}$ 为流体粘性应力张量的分量; $E$ 为单位质量流体的内能; $q$ 为单位面积的固体表面与流体之间在单位时间内交换的热量。

### 1.2 湍流模型

标准  $K-\epsilon$ 、RNG  $K-\epsilon$  和 Realizable  $K-\epsilon$  模型被普遍用于解决工程湍流问题。但由于标准  $K-\epsilon$  湍流模型会在很大程度上削弱建筑产生的涡旋,为了使流动更加符合湍流的实际物理情况,Shih 等<sup>[7]</sup>对标准  $K-\epsilon$  模型进行改进并提出了 Realizable  $K-\epsilon$  模型,该模型对旋转流、边界层流、流动分离都具有较好的效果。Yakhot 等<sup>[8]</sup>则依据重正化群理论提出了 RNG  $K-\epsilon$  模型。

本文选用 Realizable  $K-\epsilon$  模型进行数值模拟计算,其湍动能及耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \quad (4)$$

$$G_K + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (5)$$

$$\rho C_{1\epsilon} e \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{K + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} C_{3\epsilon} G_b$$

式中: $K$ 为湍动能; $\mu$ 为动力学粘度; $\mu_t$ 为湍动粘度; $\sigma_K$ 为湍动能的普朗特数; $G_K$ 是由平均速度梯度引起的湍动能产生项; $G_b$ 是由浮力影响引起的湍动能产生项; $\epsilon$ 为湍动耗散率; $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; $\nu$ 为运动粘度; $\sigma_\epsilon$ 为湍动耗散率的普朗特数; $C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$ ,其中  $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{K}{\epsilon}$ ,  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;程序中默认值为  $C_2 = 1.9, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{3\epsilon} = 0.09$ ;  $e$  为总能量。

### 1.3 建筑风环境评估标准

《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)<sup>[9]</sup>是基于统计学、概率学,同时兼顾人的主观感受得出的较为准确的评估标准<sup>[10]</sup>。参照该评估标准,建筑周围

1.5 m 人行高度处的风速应小于 5 m/s,如表 1 所示。

表 1 风速与人体舒适度感受

Tab.1 Wind speed and human comfort

风速/(m·s <sup>-1</sup> )	人体舒适度感受
$V < 5$	舒适
$5 < V < 10$	不舒适,影响行动
$10 < V < 15$	很不舒适,严重影响行动
$15 < V < 20$	无法忍受
$V > 20$	危险

## 2 异型建筑风环境模拟的建模及分析

### 2.1 数值计算模型的建立及网格划分

本文采用 ANSYS 中基于有限体积法的 fluent 作为数值模拟工具。将计算区域划分为若干网格,使每一个网格上的点都有一个互不重复的控制体,将待求解的微分方程对每一个控制体进行积分,从而得到一组离散的计算流体力学基本控制方程<sup>[11]</sup>。

新疆大剧院主体结构由两个外壳和一个内壳组成,如图 1 所示。主体结构长 141.4 m,宽 113.4 m,高 73.6 m;主体结构下有一个长 255 m,宽 212 m,高 6.3 m 的平台。本文将新疆大剧院实物进行合理简化,并按照原尺寸建立三维几何模型,如图 2 所示。



图 1 新疆大剧院实拍图

Fig. 1 Picture of Xinjiang Grand Theater



图 2 新疆大剧院几何模型及网格

Fig. 2 Geometric model and grid of Xinjiang Grand Theater

计算域边界的设置不对计算结果产生较大影响。计算域的横截面尺寸通过阻塞率来衡量,阻塞率为建筑物最大迎风面积与计算域横截面面积之比,最大阻塞率应小于 3%。新疆大剧院属于大跨建筑结构,模型距计算域顶部与侧面的距离应大于

$4h$  ( $h$  为模型最大高度),入口边界距模型应大于  $4h$ ,出风口距离模型应大于  $9h$ 。为了满足阻塞率要求和保障计算结果的稳定,取 CFD 流场计算域为  $2\ 500\text{ m} \times 1\ 500\text{ m} \times 400\text{ m}$  (长×宽×高)。整个流场采用六面体网格划分,以保证计算结果的质量,靠近建筑物及树木表面采用了加密的网格形式,计算域中的网格数约为  $4 \times 10^6$  个。

### 2.2 边界条件的确立

乌鲁木齐地区在天山山脉等地形的影响下,大风天气日较多。从气象数据得知,乌鲁木齐地区全年盛行西北风,平均风速为 2.47 m/s,冬季和夏季盛行南向风,平均风速分别为 2.2 m/s 和 3.1 m/s。参考风速记录数据,取工况一:夏季盛行南风,平均风速为 3.1 m/s;工况二:全年盛行西北风,平均风速为 2.7 m/s。

本文采用稳态计算,设置计算模型表面和地面为无滑移壁面,计算域顶部和两侧为自由滑移壁面;出口处定义为自由出流(outflow);入口处设置为指数率的速度入口:

$$\bar{V}(Z) = \bar{V}_b \left( \frac{Z}{Z_b} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: $Z$  为距地面的高度;参考高度  $Z_b = 10\text{ m}$ ;  $\bar{V}_b$  为  $Z_b$  高度处的平均风速;  $\alpha = 0.16$  为 B 类粗糙地面指数。

速度入口处的湍动能  $K$ 、湍动能比耗散率  $\omega$  和湍流强度  $I$  参考日本规范<sup>[12]</sup>取值为:

$$K(Z) = 1.5 [I(Z) \cdot \bar{V}(Z)]^2 \quad (7)$$

$$\omega = \frac{K(Z)^{0.5}}{C_u^{0.25} L} \quad (8)$$

$$I = \begin{cases} 0.23 & (Z \leq 5\text{m}) \\ 0.1 \left( \frac{Z}{350} \right)^{-\alpha-0.05} & (5\text{m} < Z \leq 350\text{m}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $C_u = 0.09$ ;  $L$  为入口处湍流特征尺度,  $L = 100 \cdot \left( \frac{Z}{300} \right)^{0.5}$ 。

图 3 为模型入口处风速和湍流强度随高度变化的曲线图,可以看出,风速和湍流强度的模拟结果与理论曲线较为吻合。

根据上述边界条件,分别模拟横向和纵向来流风下大剧院周围的流场。图 4(a)为横向来流风时大剧院周围的风速矢量图,可以看出,来流风在撞击正迎风面时,在下部产生空气回流,使下部来流风速减小;同时,空气在整个建筑物顶部发生分离和再附着;空气在整个建筑物两侧生成两股剪切流,并在建

筑物背部发生空气回流,在背风面处形成涡流;随着尾流与建筑物之间的距离增大,流场分布渐渐复原。图4(b)为纵向来风时的计算结果,其与横向来风时总体类似,但由于顶部截面的变化,在屋顶处也形成了涡流。

在横向和纵向来流风下,大剧院周围的流场分布都符合钝体绕流现象。

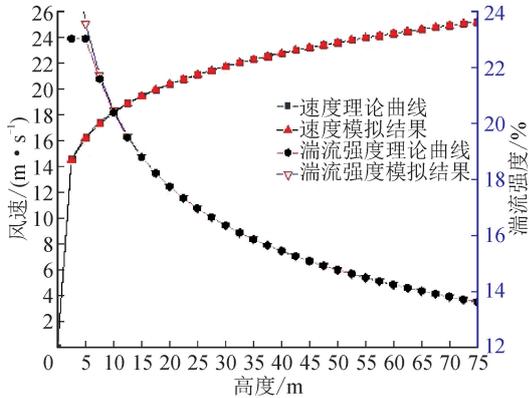


图3 入口处风速和湍流强度随高度的变化  
Fig. 3 Wind velocity and turbulence intensity of inlet on the variation of height

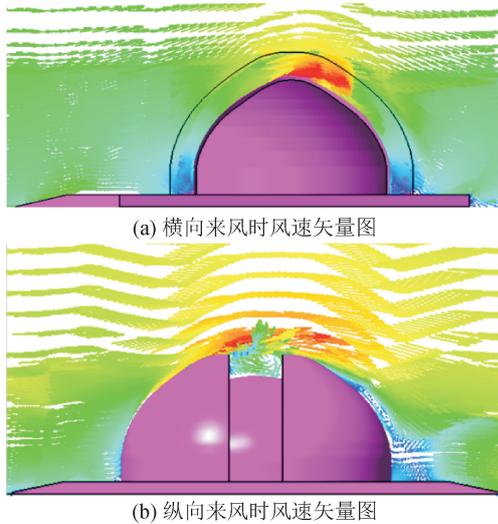


图4 大剧院周围风速矢量图

Fig. 4 Vector of wind speed around the Grand Theatre

### 2.3 未绿化下异型建筑室外风环境数值模拟分析

在南向风下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 5.68 m/s。在图5(a)中,大剧院平台的三个拐角处风速大于 5 m/s,不符合人体舒适度要求。平台凹角处存在涡流,来流风不易流出,污染物也容易沉淀在此处,因此不利于人体健康,故不适合作为游客的活动与休息区域。在西北风向下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 4.70 m/s。在图5(b)中,大剧院本身就很好地阻挡了一部分来流风。平台的后部和凹角处存在涡流,不适合作为游客的活动与

休息区域。

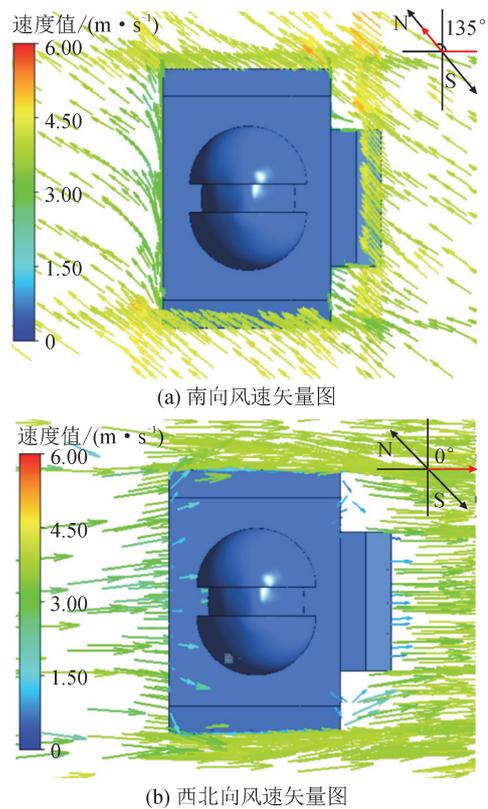


图5 无绿化情况下风速矢量图  
Fig. 5 Wind velocity vector map without greening

通过上述分析可知,在当地典型风环境下,未进行绿化的大剧院室外风环境基本不满足行人舒适度要求。

## 3 树木周围流场特性及对风环境影响分析

### 3.1 树木简化计算模型

在建立栽植树木的计算模型时,树木的几何形状可简化为长方体、四棱锥、四棱台等,参考相关研究并经多方面分析比较,本文选择建模简单、计算时间短、收敛性能好、模拟效果较好的长方体树木模型<sup>[13]</sup>,如图6所示。将树冠当成多孔介质进行处理,树干作为不透风的实体<sup>[14]</sup>。



图6 树木几何模型

设定树冠和灌木的截面形状均为正方形。参考大剧院周围实际绿化树木的尺寸和已有研究<sup>[13-14]</sup>,取树冠高 3.5 m,树干高 1.5 m,树冠宽 2 m;灌木高

度设置为 1.5 m,宽 2 m。树冠的孔隙率越大,表示树冠内枝叶越稀疏,对风的阻挡作用越弱。为使树冠具有较好的挡风作用,树冠的孔隙率取 0.1;因灌木本身枝叶较小,灌木孔隙率取 0.7。考虑到多孔介质内粘性的存在,设定树冠和灌木的粘性系数为  $1.2 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;对于阻力,根据孔隙率和叶片的当量直径(本文取 0.1 m),可确定树冠和灌木的阻力系数为 31 500<sup>[15]</sup>。

### 3.2 单棵、一排树木周围流场特性风洞试验及模拟

为进一步验证上述长方体树木模型计算的可靠性,本文将单棵、一排树木周围的流场数值模拟结果与李正农等<sup>[16]</sup>的 1:40 缩尺树木模型风洞试验结果进行对比。参考高度处风速取 10 m/s,相对风速为同一测点存在干扰(树木)时的平均风速与无干扰时的平均风速的比值。

首先,分析树木水平面的风洞试验和数值模拟流场情况,如图 7 所示,单棵和一排树木树冠周围的相对风速等值线分布均呈椭圆形,且树冠中心阻风效果最好,阻风效果从树冠内向外逐渐降低。由于数值模拟的计算模型为有棱角的长方体,在树冠角部处出现了较为显著的分流现象,故树冠角部处的相对风速分布与风洞试验结果有些许不同。由数值模拟结果可知,以相对风速 0.5 为界限,单棵树木在树冠后  $1.5B$ ( $B$  为树冠宽)范围内的风影响区,可显著降低风速,起到阻风作用;一排树木在树冠后  $4B$  范围内的风影响区,可显著降低风速。一排树木较单棵树木在树冠后侧形成了更大范围的风影响区。在水平面上,数值模拟计算的单颗树木、一排树木的树后风影响区大于风洞试验的计算结果,这是因为数值模拟将树冠作为较真实的树木,即分布更为均匀的多孔介质来处理,使得多孔介质下的树冠具有更好的挡风作用。

其次,分析树木立面的风洞试验和数值模拟流场情况,如图 8 所示,在树冠周围,单棵和一排树木的相对风速等值线云图均近似为椭圆形,在树冠内部和靠近树冠处,相对风速最小,阻风效果最好,距离树冠越远,阻风效果越差。数值模拟下的单棵树木树冠后侧的风影响区小于风洞试验的计算结果,这是因为数值模拟采用的长方体树冠是由风洞试验使用的等体积球形树冠转换而来,故等体积下,立面内圆形的迎风面积大于矩形。由数值模拟结果可知,以相对风速 0.5 为界限,单棵树木在树冠后  $1.5B$  范围内的风影响区可有效降低风速;一排树木在树冠后  $4B$  范围内的风影响区可有效降低风速,其阻风效果优于单棵树木。

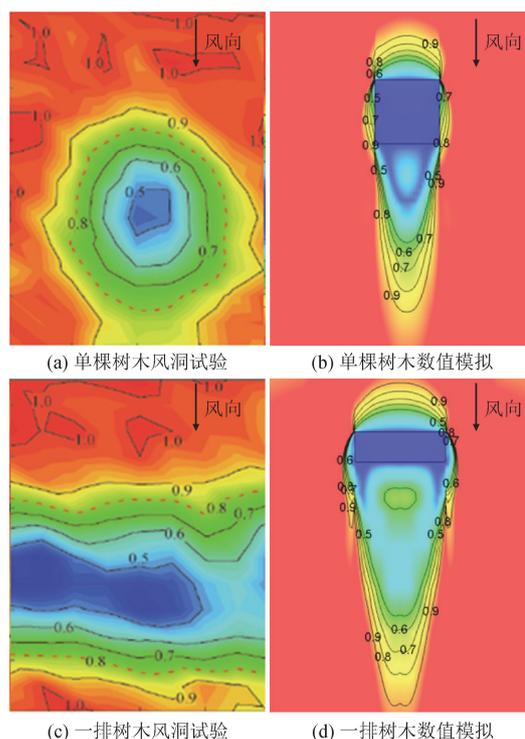


图 7 水平面的风洞试验和数值模拟相对风速等值线云图  
Fig. 7 Wind tunnel test and numerical simulation relative wind speed contour cloud map of horizontal plane

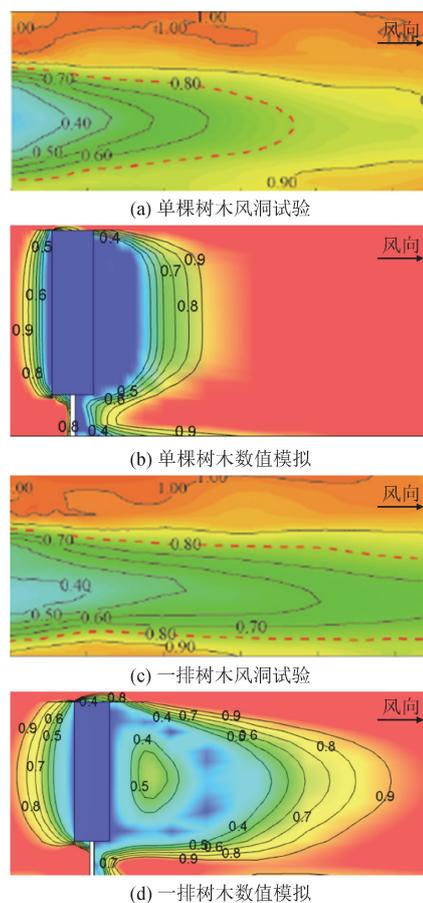


图 8 立面的风洞试验和数值模拟相对风速等值线云图  
Fig. 8 Wind tunnel test and numerical simulation of relative wind speed contours of the facade

由于风洞试验和数值模拟采用的树木形状不同,造成数值模拟结果与风洞试验结果略有不同,但得到的单棵树木对周围风环境的影响规律和一排树木对周围风环境的影响规律是一致的,验证了本文所采用的树木数值计算模型的合理性和可靠性。

### 3.3 留有间隔的一排树木周围流场特性模拟分析

考虑到经济成本等因素,实际工程中一排树木的绿化布局常常在树木间设有间隔,间隔宽度为树冠宽度。

如图 9 所示,在此绿化布局下,其水平面内的相对风速等值线云图与单棵树木的分布规律基本一致,但在树木间隔和端部处因分流现象形成了高风速区,体现了树冠的导风作用。以相对风速 0.5 为界限,树冠后侧 3B 范围内可有效降低风速,风影响区范围小于无间隔一排树木布局方式,但仍优于单棵树木情况。同样,通过计算分析可以得到,树木立面的树冠后侧风影响区范围略小于无间隔一排树木情况,但仍优于单棵树木情况。因此,留有间隔的一排树木绿化布局方式既经济又能起到阻风作用,更适合在实际中使用。

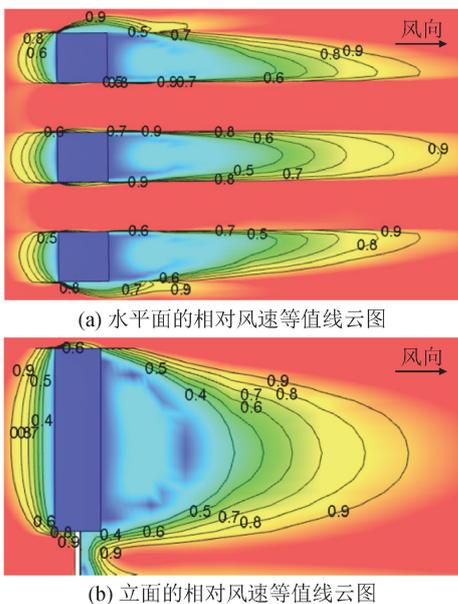


图 9 留有间隔的一排树木数值模拟相对风速等值线云图  
Fig. 9 Numerical simulation of relative wind speed contours of a row of trees spaced apart

## 4 绿化布局对异型建筑室外风环境的改进模拟分析

### 4.1 现有绿化布局状态下风环境数值模拟

在南向风下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 5.58 m/s。在图 10(a)中,由于建筑物的阻挡,下风向处的风速都较小。留有间隔的一排树木布局

形式可以有效降低风速,但在平台拐角处形成了大于 5 m/s 的风速,不符合人体舒适度要求。在平台凹角处存在涡流。

在西北风向下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 4.25 m/s。在图 10(b)中,大剧院本身和留有间隔的一排树木共同发挥了一定的阻风作用,而树木的间隔处起到了导风作用,使此处风速增大,但风速大小未超过 5 m/s。在平台凹角处和后部仍有涡流存在。

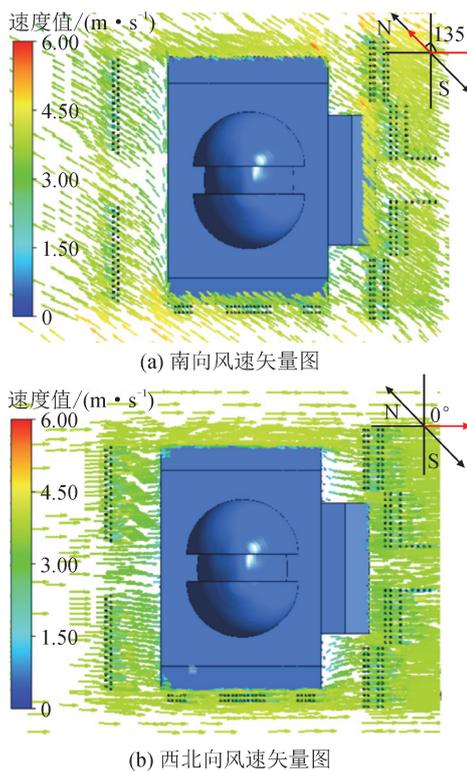


图 10 现有绿化布局下风速矢量图  
Fig. 10 Wind velocity vector of existing greening

### 4.2 合理绿化布局状态下风环境数值模拟

现有绿化方案可在一定程度上降低风速,但在部分区域仍存在较大风速,并且在平台后部和凹角处仍不利于空气中污染物扩散的涡流存在。针对上述问题,并结合树木周围流场特性及对周围风环境的影响特点,适当调整一排树木的间距,同时,采用围合型灌木隔绝行人与涡流。灌木类似紧挨地面的树冠,其阻风效果与树冠一致,且更适合较低位置的阻风导风。图 11 为优化调整后的新疆大剧院绿化布局示意图。

在南向风下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 4.50 m/s。在图 12(a)中,与新疆大剧院现有绿化布局相比,最高风速有所降低,平台拐角处的局部风速增大有所改善,人行处的风速值均小于 5 m/s。凹角处仍有涡流存在,但灌木形成的围合区域将行人与涡流区隔开。

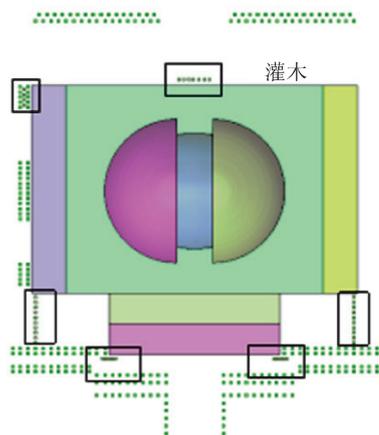


图 11 调整后的合理绿化布局

Fig. 11 Reasonable planting scheme after adjustment

在西北风向下,大剧院周围人行区域处的最高风速为 4.15 m/s。在图 12(b)中,人行处的风速值均小于 5 m/s,符合人体舒适度要求。灌木将平台处涡流与行人隔开,使得行人远离空气质量较差的涡流区。

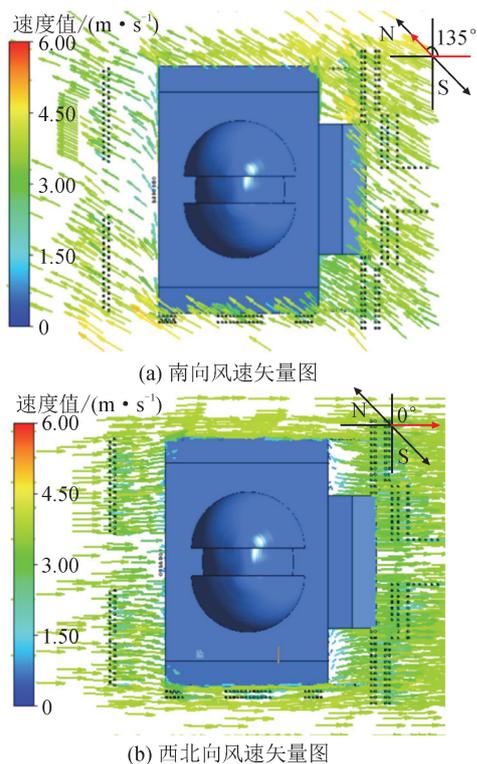


图 12 合理绿化布局下风速矢量图

Fig. 12 Wind velocity vector of reasonable planting scheme

#### 4.3 极端情况下合理绿化布局对风环境改善数值模拟

本文还依据气象资料,考察了平均风速达到 18.2 m/s(西北向)时的极端情况。图 13(a)、(b)分别为极端情况下大剧院周围无绿化和合理绿化布局下建筑

周围风速矢量图。合理绿化布局可使大剧院周围人行区的最高风速由 17.8 m/s 降到 16.9 m/s。

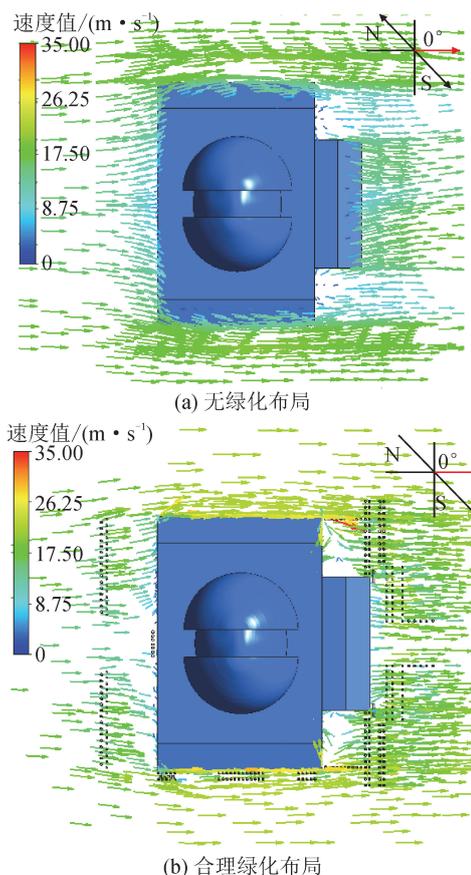


图 13 极端情况下合理绿化布局风速矢量图

Fig. 13 Wind velocity vector of reasonable greening layout under extreme conditions

## 5 结论

本文运用 CFD 方法和 Realizable  $K-\epsilon$  湍流模型,结合乌鲁木齐地域风环境,以城市空间中 1.5 m 人行高度处风速小于 5 m/s 为评价指标,在单棵、一排树木的绕流风洞试验和数值模拟基础上,对异型建筑——新疆大剧院的室外风环境及绿化布局方案进行了研究。

1) 树冠后侧存在较大范围的风影响区,可有效降低风速,树冠起到阻风作用;在树冠两侧及间隔处由于分流现象形成高速区,并在树冠后侧形成涡流。单棵和一排树木对周围风环境的影响规律基本一致,一排树木的阻风效果优于单棵树木,留有间隔的一排树木绿化布局方式既经济又能起到阻风作用,更适合在实际中使用。不合适的绿化布局极有可能造成局部风速增大或生成涡流。

2) 异型建筑的凹角及拐角处易生成涡流和局部高速区,在建筑抗风设计时应予以充分考虑。

3) 本文还依据气象资料,考察了平均风速达到 18.2 m/s(西北向)时的极端情况,合理绿化布局可使大剧院周围人行区的最高风速降至 16.9 m/s,可以削弱风灾对行人、建筑物的危害。

#### 参考文献:

- [1] 鲜鑫,李晓虹,游诚,等. 建筑规划设计因子对住区建筑室外风环境的综合影响[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(1):28-32,41.  
XIAN Xin, LI Xiaohong, YOU Cheng, et al. Comprehensive influence of architectural design factors on the outdoor wind environment of residential buildings [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(1): 28-32, 41.
- [2] 甄蒙,丁伟,邹炜晗,等. 绿化率与居住区竖向微气候环境相关性研究[J]. 建筑与文化, 2019(10):41-42.  
ZHEN Meng, DING Wei, ZOU Weihang, et al. The correlation between greening rate and vertical microclimate environment in residential areas[J]. Architecture and Culture, 2019(10):41-42.
- [3] 刘晓勤,刘龙斌,丁云飞,等. 夏热冬暖地区乡村建筑立体绿化节能改造性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2020,36(1):33-40.  
LIU Xiaoqin, LIU Longbin, DING Yunfei, et al. Study on the energy-saving renovation performance of rural buildings based on three-dimensional greening in hot summer and warm winter areas[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(1):33-40.
- [4] 张梓霆,周春玲. 基于 PHOENICS 软件模拟的医院室外风环境优化[J]. 青岛农业大学学报:自然科学版, 2021, 38(1):50-56.  
ZHANG Ziting, ZHOU Chunling. Optimization of hospital outdoor wind environment based on PHOENICS simulation[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 38(1):50-56.
- [5] 王江. 近 55 年新疆乌鲁木齐大风的气候变化特征[J]. 科技传播, 2011(21):57,40.
- [6] 张鸣远. 高等工程流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2008.
- [7] SHIH T H, LUMLEY J L. A realizable Reynolds stress algebraic equation model[J]. NASA Technical Memorandum, 1992: 105993.
- [8] YAKHOT V, SMITH L M. The renormalization group, the  $\epsilon$ -expansion and derivation of turbulence models[J]. Journal of Scientific Computing, 1992, 7: 35-61.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色建筑评价标准: GB/T 50378—2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [10] 聂志勇. 城市风环境的测试方法及评价标准整合研究 [C]//《环境工程》2019 年全国学术年会, 北京, 中国, 2019:356-360.
- [11] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010:4.
- [12] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用(第二版) [M]. 上海:同济大学出版社, 2008.
- [13] 梁朋云. 树木对建筑小区风环境影响的模拟研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2011.  
LIANG Pengyun. Simulation on district air environment effected by planting[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2011.
- [14] 马杰,林波荣,李晓锋,等. 景观绿化对居住区风环境影响的量化评价研究[J]. 绿色建筑与人文环境, 2008, 9: 629-633.
- [15] 程向明. 绿化模式对室外风环境影响的研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.  
CHENG Xiangming. Study on the influence of greening modes on outdoor wind environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011.
- [16] 李正农,李枫,陈斌,等. 树木风荷载与流场特性的风洞试验[J]. 林业科学, 2020,56(8):173-180.  
LI Zhengnong, LI Feng, CHEN Bin, et al. Wind tunnel test on wind load and flow field characteristics of trees [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(8):173-180.

(责任编辑 周 蓓)