

# 基于聚类算法和数值模拟的建筑群平面优化

杨 丽<sup>1,2</sup>, 李光耀<sup>3</sup>, 潘裕清<sup>3</sup>

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 同济大学 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为将建筑空间热舒适度评价应用于建筑群平面的设计优化上, 提出基于Kmeans聚类的分组偏移变量设计方法, 并结合该变量设计、数值模拟、遗传算法和通用热舒适评价指数, 在Matlab软件上实现建筑平面优化流程, 最后对集中式、分散式、边流式的水体配置下的建筑平面进行了优化实验。结果表明, 优化后的建筑空间, 平均热舒适度评价指数(UTCI)值降低了0.1~0.6℃, 热舒适度均有所增强。在较强热应力的范围内, 建筑空间内的平均热舒适度改善的主要目标是提高平面内的风速。

**关键词:** 平面优化; 数值模拟; Kmeans 聚类

**中图分类号:** TU312.1

**文献标志码:** A

## Optimization of Building Group Arrangement based on Clustering Algorithm and Numerical Simulation

YANG Li<sup>1,2</sup>, LI Guangyao<sup>3</sup>, PAN Yuying<sup>3</sup>

(1. College of Architecture & Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of Dense Habitat of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To apply the thermal comfort into the optimization of building arrangement, a variables design method based on Kmeans clustering was proposed. Then, it was combined with numerical simulation, genetic algorithm and universal thermal climate index (UTCI) to implement the building arrangement optimization on Matlab. Finally, the building arrangements with centralized type, decentralized type and edge flow type water displacement were optimized respectively. The results showed that after optimizing, a reduction of 0.1~0.6℃ of UTCI was observed. It is also concluded that in the moderate heat stress, the increasing of wind speed is the key of thermal comfort improvement.

**Key words:** building group arrangement optimization; numerical simulation; Kmeans clustering

被动式设计是建筑节能措施中最基础和最有效的措施之一, 通过形成局部微气候较适宜的建筑空间, 使住户减少制冷和制热负载的需求来减少耗能。而与局部微气候密切相关的除了地形、环境、气象因素等不可控因素外, 还受到建筑平面的影响。由于不同平面会对周围环境的气流产生阻挡和导流, 从而影响该区域内的局部微气候。因此, 对建筑平面的规划设计是建筑节能设计中不可忽视的一环。

在建筑平面优化中, 很多研究使用所有建筑物的位置信息(包含横纵坐标值)作为优化变量<sup>[1-4]</sup>, 虽然可以有更大的变量空间, 可以生成更多样的布局。然而, 建筑空间舒适性的评价需要用到数值模拟软件。单次数值模拟花费的时间通常很长, 从几分钟到几个小时不等。在需要优化的建筑数量较多时, 变量数量大大增加, 加上优化算法通常需要进行多次计算, 因此时间成本很高。也有部分研究者试图减少变量数目来减少计算成本。Yi等<sup>[5]</sup>使用少量虚拟的几何点来代理建筑群的布局形态, 该代理点可以进行水平和垂直2个方向的位移和本身的旋转, 并对各个建筑分配不同的权来控制位移范围。这样大大减少了优化布局所需变量, 但是不同平面布局的权值分配需要根据实际案例来设定。王力凯等将建筑物分组, 使一组建筑物使用相同的偏移量, 在保证布局多样性的同时也减少了变量数量, 但是仍然需要设计者手动进行分组<sup>[6]</sup>。

本文提出基于Kmeans聚类的分组偏移变量设计方法。结合该变量设计、数值模拟、遗传算法和UTCI热舒适评价模型, 提出基于聚类算法和数值模拟的建筑平面布局优化, 并对集中式、分散式、边

收稿日期: 2018-04-04

第一作者: 杨 丽(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为绿色节能建筑。

E-mail: yangli.arch@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

流式的水体配置下的建筑平面布局进行优化实验。

### 1 变量设计方法

建筑群布局的变量表示有 2 个需要解决的问题。第一,建筑群的平面布局受到容积率、功能分区、设施分配、建筑规范等的约束,如建筑之间的间距须满足日照间距和防火间距的要求。建筑之间的拓扑也须符合常识如不能相互重叠等。第二,实际案例中需要进行优化平面布局通常数量较大。若独立控制每个建筑物的位置和朝向,搜索的空间较大,这对于优化问题来说意味着耗费大量时间。

针对第一个问题,采用基于设计者给出的初始方案进行调整的做法,使用建筑相对其初始位置的偏移量作为变量,保持初始布局特征。建筑工程涉及不同工种方面的协同作业,首先要满足的是功能分区、交通规划、设施安装等需求,因此

设计者通常有初始的设计方案,空间舒适性只能作为细微调整的参考。在 Tian 等<sup>[7]</sup>面向建筑设计师的对建筑性能模拟优化技术的需求调查中也体现了这一点。

针对第二个问题,对建筑群中的建筑对象采用分组偏移方法,即以初始方案中的建筑物在水平方向的间距为参考,将建筑物分成若干组,分别施加不同的垂直方向的偏移;以垂直方向的间距为参考,将建筑物分成若干组,分别施加不同的水平方向的位移(图 1)。在不同的偏移量下,可形成平面布局中常见的错列式和斜列式。通过如此的变量设计之后,控制建筑物位置的优化变量从  $2n$  个数量级减少到了  $2\sqrt{n}$  个数量级,大大减少变量的数目,而且保证了建筑群平面布局的多样性。另外,还能在最大程度上避免平面拓扑错误(即建筑物几何对象相交)。

建筑物的分组则采用 Kmeans 算法。该算法是

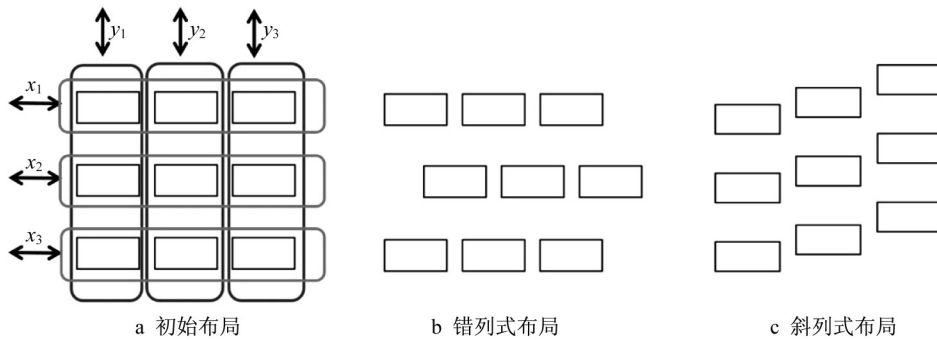


图 1 平面布局的分组偏移示意

Fig.1 Group outline plans

数据挖掘领域经典的基于划分的聚类方法。该算法的目的是:把  $n$  个点划分到  $k$  个聚类中,使得同一聚类中的对象相似度较高,而不同聚类中的对象相似度较低。其数学描述如下:

已知观测集  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其中每个观测都是一个  $d$  维实向量, Kmeans 聚类要把这  $n$  个观测划分到  $k$  个集合中 ( $k \leq n$ ), 使得组内平方和最小。换句话说,它的目标是找到使得式(1)满足的聚类  $S_i$ :

$$E = \arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (1)$$

其中  $\mu_i$  是  $S_i$  中所有点的均值。

就算法的形式来看,适合用于解决本文中建筑物分组的问题:取每个建筑物的几何中心作为代表该建筑物的点。建筑物之间的距离则采用中心点的欧式距离来表示。Kmeans 的实现一般

采用启发式算法,能够快速收敛,效率较高。其聚类可根据欧式距离来将数据就近划分,对于一些并不是行列式的建筑群也有很好的聚类效果(图 2)。

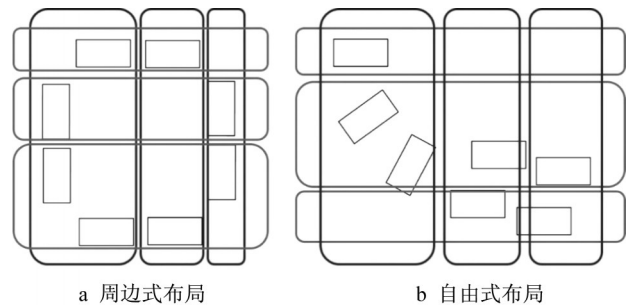


图 2 Kmeans 对周边式布局、自由式布局的聚类效果  
Fig. 2 Kmeans Clustering Effect on Peripheral and Freestyle Layout

## 2 优化过程

### 2.1 总体框架设计

计算流体力学(CFD)用电子计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析。它的基本思想是:将连续的空间分割为有限个离散点,通过建立控制方程,求解每个离散点上各物理量的近似值,从而近似地描述整个空间中各物理量的连续分布。在过去的几十年中,已经有很多文献对建筑周围及内部流场进行了数值模拟分析。模拟建筑室外流场的一般流程如图3所示。

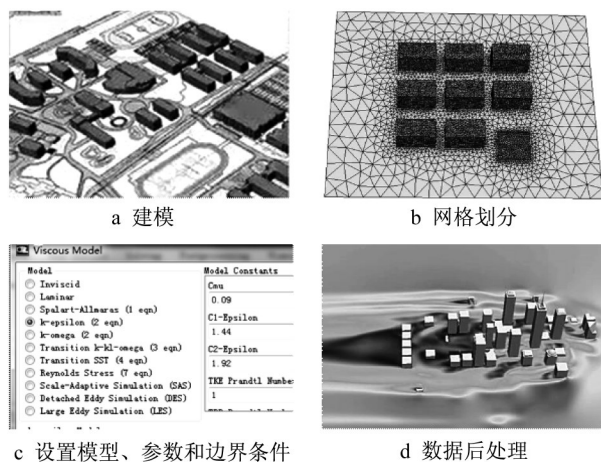


图3 CFD模拟建筑室外流场的一般流程

Fig.3 CFD simulates the general flow of a building's outdoor flow field

建筑设计优化问题中,有约1/4的研究者选用了Matlab作为优化平台<sup>[8]</sup>。本文选择Matlab作为优化的工具,它具有强大的计算能力和丰富的算法库。优化的大体流程如图4所示。

(1)将建筑群的初始布局作为输入,结合建筑位置信息使用Kmeans算法进行建筑对象的分组。

(2)将遗传算法优化过程中产生的候选解输出为偏移信息文件。依次运行数值模拟流程中所需的软件,并调用相应的脚本文件。以最小化计算域内的平均热舒适度为优化目标。

(3)若没有达到收敛标准,重复上一步。

### 2.2 数值模拟过程及其脚本运用

首先,由于Rhino对自定义编程的良好支持,使用它作为建模工具。编写VBScript脚本,在运行Rhino的时候进行装载、编译和执行。在初始化阶段,Rhino读取原始布局文件,根据图层属性来获取几何对象,访问并输出为各建筑体的位置信息。该位置信息中包含各建筑体的唯一标识、几何中心的

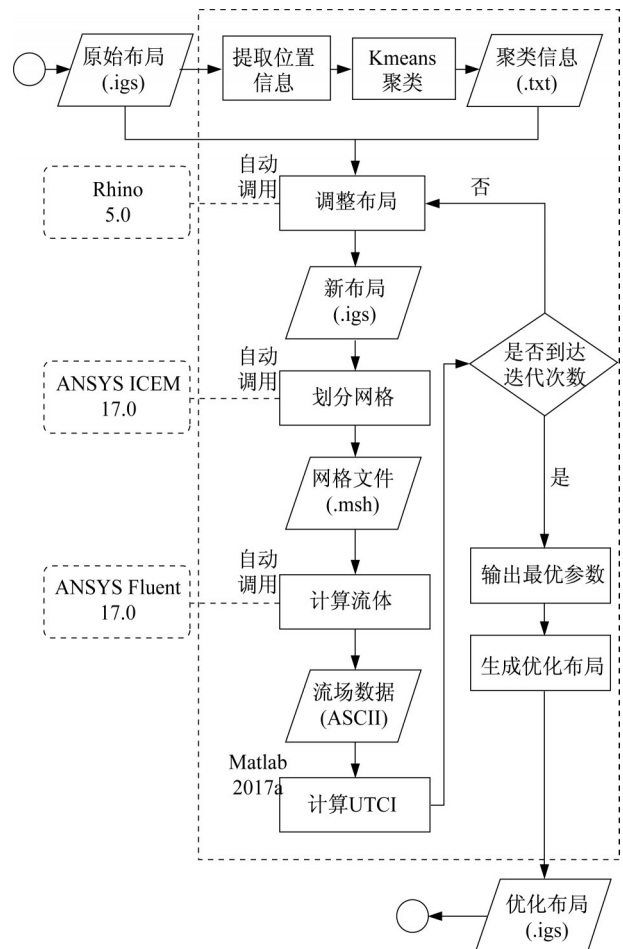


图4 基于水环境评价的建筑平面布局优化框架

Fig.4 Framework plan layout optimization framework based on water environment assessment

坐标(在随后由Matlab读取,进行Kmeans分类,并输出聚类信息)。在优化阶段,调整布局的具体过程如图5所示。

其次,选取ANSYS ICEM作为网格划分工具。ICEM中的扩展类库含有网格划分及文件读写的函数,其自定义脚本由基于Tcl/Tk语法进行编写。既可以根据录制用户在图形界面上的操作来自动生成,也可以自行编写并保存为脚本文件。

划分网格的具体过程如图6所示。在建筑设计优化问题中,使用优化算法来不断生成新的几何体,因此几何模型处在不断变化之中。因此本文使用非结构网格进行计算,通过控制局部的网格尺寸来控制网格疏密。采用非结构网格具有设置简单、无需过多人工干预的优点。精度要求较高的建筑和水体表面使用较小尺寸的网格,其他区域则使用较大尺寸的网格来减少网格数量,加快收敛速度。

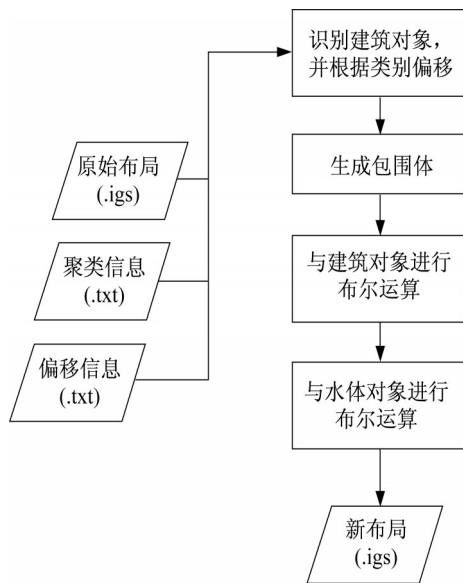


图 5 Rhino 调整布局流程

Fig.5 Rhino adjustment layout flow chart

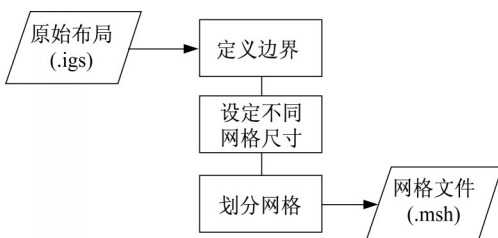


图 6 ICM 划分网格流程

Fig.6 ICM divides the grid process

最后,选取 ANSYS Fluent 作为流体计算工具。采用 TUI(text user interface)命令组成的日志文件来对软件进行一系列自动操作。流体计算的具体过程如图 7 所示。日志文件中的边界条件,包括所需 UDF 文件,根据实际案例不同而由用户提供。由于采用了较小数量的非结构网格,在计算过程中各变量容易发散而导致计算中断,所以设置较小的亚松弛因子来改善收敛情况。

### 2.3 优化算法

建筑优化设计中,对于湍流等现象的模拟是复杂而非线性的,难以得到导数信息,所以无法采用基于导数的优化算法,而只能考虑使用无导数的优化算法<sup>[9]</sup>。当优化参数的个数超过 10 个时,遗传算法的搜索效率明显高于其他算法。遗传算法可以在 0.5% 的精确范围内找到最优解,所需迭代次数比粒子群算法等少 50%<sup>[10]</sup>。因此使用遗传算法来进行优化。

### 2.4 优化目标

1990 年,国际生物气象学学会主席 PeterHoppe

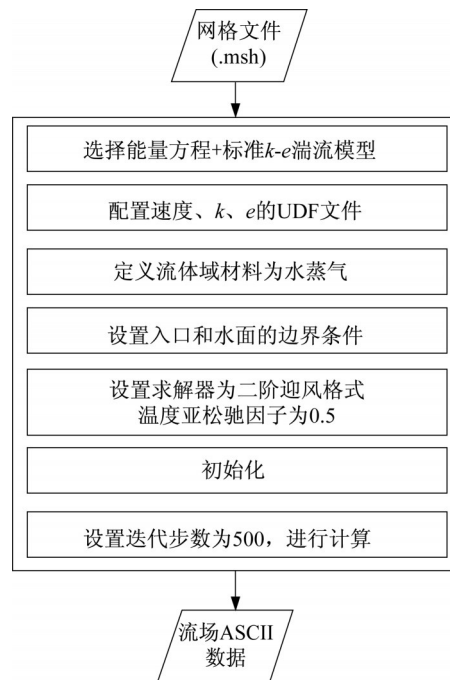


图 7 Fluent 流体计算流程

Fig.7 Fluent fluid flow

和 PET 模型的作者提出构建一个国际通用的热舒适度评价指数 (universal thermal climate index, UTCI)。UTCI 使用的气象参数是空气温度、风速、水蒸气压力、短波辐射和长波辐射通量,这些都可以通过相应的气象测量获得。评估的结果由等效温度来表示,并根据模拟的生理反应发展了相应的热应力表(表 1)。

表 1 UTCI 热应力评估<sup>[11]</sup>

Tab.1 UTCI heat pressure evaluation<sup>[11]</sup>

UTCI/°C	应力等级	UTCI/°C	应力等级
>46	极强热应力	9~0	轻微冷应力
38~46	很强热应力	0~-13	较强冷应力
32~38	强热应力	-13~-27	强冷应力
26~32	较强热应力	-27~-40	很强冷应力
9~26	无热应力	<-40	极强冷应力

UTCI 现在已经投入使用,它的优点是在所有气候、季节和纬度地区都能正常使用。Blazejczyk 等<sup>[11]</sup>的研究中,将 UTCI 与 HI、PET、ET、SET\* 等多种热舒适度指数的准确度进行了分析,结果表明,部分评价指数只适用于特殊情境下的生物气候条件,而 UTCI 在多种气候、天气和地区都适用。此外,UTCI 对环境中的变化非常敏感:气温、太阳辐射、湿度,尤其是风速。在这个方面,它能够表现出人体对环境的敏感性。

运行温度调节模型来计算 UTCI 等效温度对于气候模拟耗费时间较长,计算较复杂,因此需要考虑

多种加速计算的方法。UTCI项目网站提供了多项式回归方程式的源代码,本文利用该回归方程来计算相应数值。

### 3 试验结果

#### 3.1 实验设置

实验对象是 $3\times 3$ 的多层小区。每一栋建筑的尺寸为 $36\text{m}\times 18\text{m}\times 24\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。根据建筑设计防火规范和日照间距设计规范,小区平面布局中建筑的间距设为 $9\text{m}$ 和 $24\text{m}$ (图8)。水面则用距离地面 $0.5\text{m}$ 的平面表示。

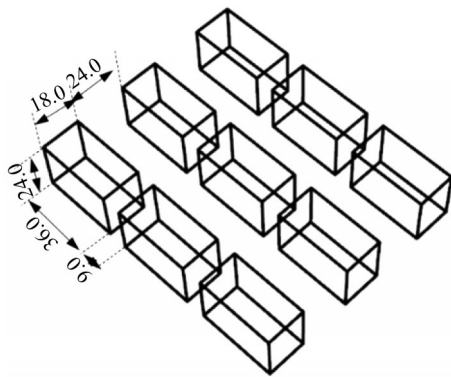


图8 建筑尺寸和间距(单位:m)

Fig.8 Building sizes and gap(unit:m)

在文献[12-14]对于哈尔滨市住宅区水环境的统计中,水体的放置可以分为3种形式:集中式,即区内水体是由一片面积较大的水体形成的;分散式,即住区内的水体是由2块或2块以上水量的水体所组成的;边流式,即住区内的水体是由条带状水体位于住区的某一侧边缘所形成的住区水体配置形式,主要为建筑周围已存在的河流等大型水体。本文设置3种不同水体配置下的建筑平面布局进行试验。

在数值模拟的设置中,选择标准 $k-e$ 模型、能量方程和针对水分( $\text{H}_2\text{O}$ )的组分运输模型。模拟的边界条件设为上海市典型气象。风速为 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向为东南风,空气温度为 $30^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $70\%$ ,辐射温度为 $33^\circ\text{C}$ 。风速、湍流动能、湍流耗散率均采用指数律进行定义。所有方程使用二阶迎风格式进行离散,使用SIMPLE算法进行压力速度耦合计算。

在网络的设置中,为了根据不断变化的布局而设置合适的计算域,计算域的长和宽设置为建筑物包裹六面体的2倍,高设为4倍。例如,在集中式水体配置的建筑平面布局中,计算域的尺寸为 $252\text{m}\times 204\text{m}\times 96\text{m}$ ( $10.5H\times 8.0H\times 4.0H$ , $H$ 为最高建筑

高度),能够使气流充分发展,得到足够精度的场数据。计算域划分为非结构网格,全局最小网格尺寸设为 $18\text{m}$ ,建筑体表面以及水体表面的最小网格尺寸设为 $1.8\text{m}$ 。

在优化设置中,根据文献[15-17],较小的种群规模表现更好,300次的评估次数足够得到优质的结果。种群规模变小的同时,为了避免陷入局部最优解,需要提高交配概率和变异概率。故优化代数设为30,种群规模设为10,交配概率设为1,变异概率设为0.2,样本的模拟数量为 $31\times 10$ ,共310组。对于一种布局方案的评估需要依次进行建模、划分网格、模拟并计算目标函数的过程。单次评估时长约为 $8\text{min}$ ,遗传算法优化总时长约为 $41\text{h}$ 。

在该边界条件下的建筑平面布局做过试验模拟后,发现计算域内 $1.5\text{m}$ 高度平面的UTCI值分布位于 $26\sim 32^\circ\text{C}$ 之间,属于中等热应力。因此范围中UTCI值越低,行人舒适感越强。

根据当前边界条件的设置,气温、辐射温度、风速、相对湿度对于UTCI值的影响如图9所示。气温( $48^\circ\text{C}$ 以下)、相对湿度与最终的UTCI值成正相关,风速与最终的UTCI值成负相关。因此,气温越低、相对湿度越低、风速越高,空间内的舒适度就越高。这也应该是本文优化的方向。

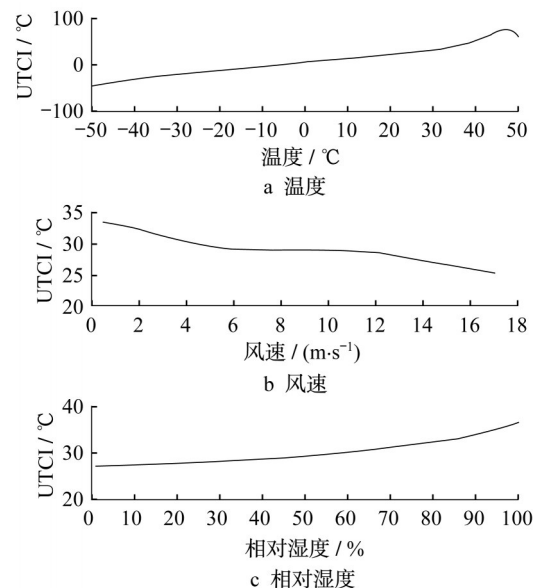


图9 当前边界条件下UTCI与气温、风速、相对湿度的关系

Fig.9 The relationship between UTCI and temperature, wind speed and relative humidity under current boundary conditions

#### 3.2 集中式配置试验结果

图10为集中式水体配置下的初始布局和优化

布局示意图(灰色为水体),由于建筑间的空地上是居民空闲时的主要场所,本文对水体下风向的空地上的场数据进行采样。图 11 分别对采样点的温度、风速、相对湿度的场数据进行比较。经过布局调整后,下风向空地的气温平均升高 0.12°C,相对湿度平均降低了 0.6%,风速平均升高 1.35 m·s<sup>-1</sup>,计算域内的 UTCI 值平均降低了 0.4°C。可以推测,不同平面布局对风速影响较大,对气温和湿度影响较小。虽然气温略有升高,但是风速的升高和湿度的降低降低了行人的热应力,共同改善了空间行人舒适度。

### 3.3 分散式配置试验结果

图 12 为分散式水体配置下的初始布局和优化布局示意图。图 13 分别对采样点的温度、风速、相对湿度的场数据进行了比较。初始布局中,水体上方的区域由于受到蒸发气流的影响较大,具有较低

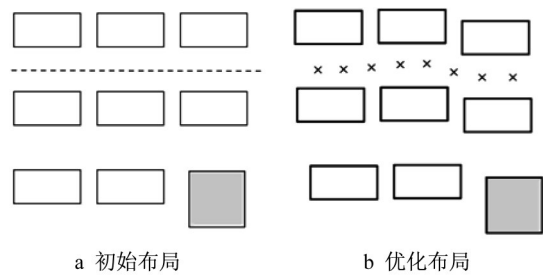


图 10 集中式水体配置的初始布局和优化布局  
Fig.10 Initial layout and optimized layout of centralized water configuration

的气温、较高的水汽含量和较低的风速。优化布局中,与初始布局相比,在 2 个小面积水体附近的微气候基本没有变化。这表明在水体附近,蒸发气流对微气候的影响较大,使得建筑排列方式对微气候的影响被抹平。

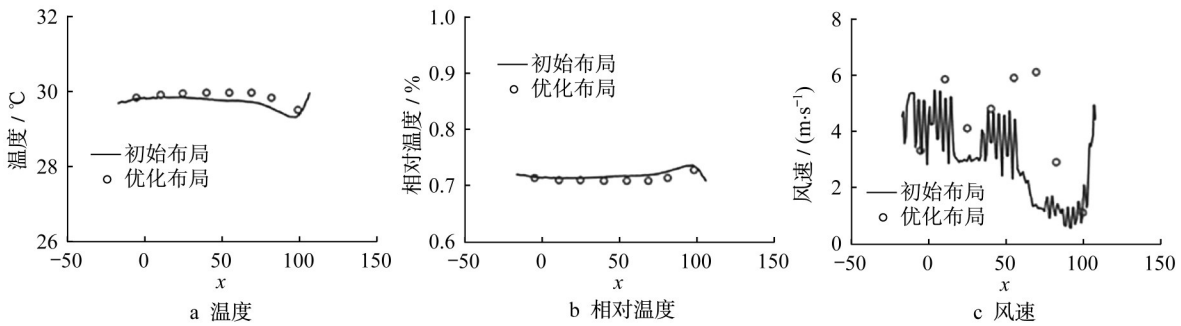


图 11 集中式水体配置的初始布局和优化布局在采样点的温度、相对湿度和风速比较

Fig.11 Comparison of temperature, relative humidity and wind speed at the sampling point for the initial layout and optimized layout of centralized water configuration

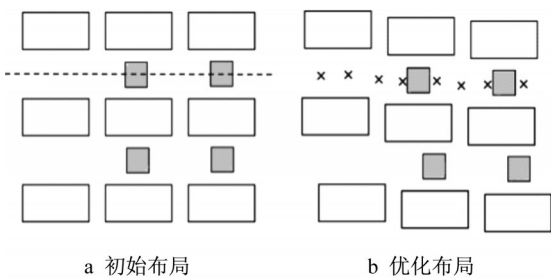


图 12 分散式水体配置的初始布局和优化布局

Fig.12 Initial layout and optimized layout of decentralized water configuration

在靠西边的采样数据点上,则表现出了与集中式水体配置中相同的趋势。针对这 2 个采样数据点,经过布局调整后,气温平均升高了 0.5°C,相对湿度平均降低了 2%,风速平均升高了 1.4 m·s<sup>-1</sup>,计算域内的 UTCI 值平均降低了 0.6°C。类似集中式布局,不同平面布局对风速影响较大,对气温和湿度影响较小。虽然气温略有升高,但是风速的升高和湿度的减小降

低了行人的热应力,共同改善了空间行人舒适度。

### 3.4 边流式配置试验结果

图 14 为边流式水体配置下的初始布局和优化布局示意图。图 15 分别对采样点的温度、风速、相对湿度的场数据进行了比较。经过布局调整后,气温略有增加,平均升高了 0.3°C,相对湿度平均降低了 2%,风速平均升高了 0.2 m·s<sup>-1</sup>,计算域内的 UTCI 值平均降低了 0.1°C。可以看出,在边流式水体布局中,建筑和水体位置的影响对空间内的微气候改善程度较低。传统的行列式布局已经接近最优布局。

### 3.5 结果分析

表 2 是各布局中不同的气象因素的变化程度。图 16 根据气象因素与 UTCI 的相关性,将气象因素的变化反映到气象因素对 UTCI 的影响上(若与 UTCI 成负相关,变化值取其相反数)。从图可见:

(1) 优化实验是成功的,不同水体配置类型下的建筑空间平均 UTCI 值降低了 0.1~0.6°C,热舒适

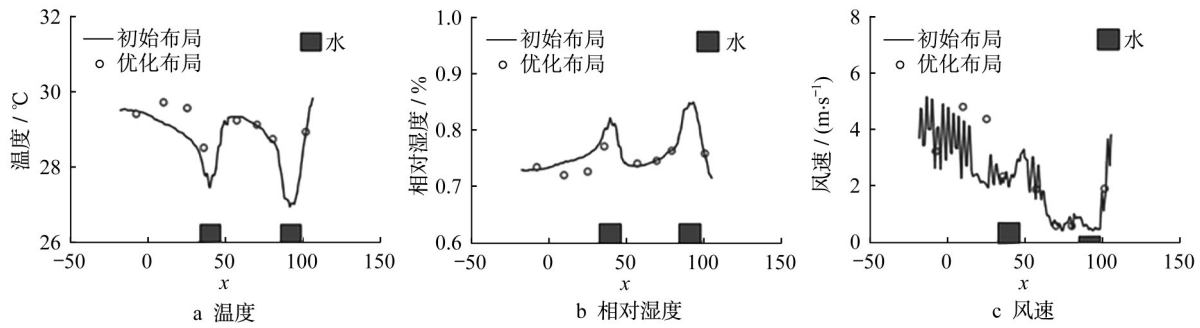


图13 分散式水体配置的初始布局和优化布局在采样点的温度、相对湿度和风速比较

Fig.13 Comparison of temperature, relative humidity, and wind speed at the sampling point for the initial layout and optimized layout of the decentralized water configuration

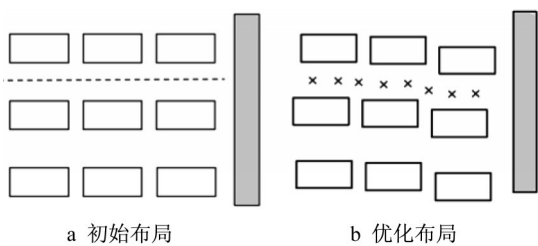


图14 边流式水体配置的初始布局和优化布局

Fig.14 The initial layout and optimized layout of edge flow water configuration

均热舒适度改善的主要目标是提高平面布局的风速。

结合建筑平面布局优化结果,可以得出的结论是:建筑平面布局优化的方向是,尽量将建筑体布置于水体的下风向,并减少建筑排列形成的风道的方向与夏季主导风向的夹角。这样可以充分利用水体的蒸发效应和主导风给行人带来的凉爽感。

#### 4 结论

度均有所增强。

(2)在较强热应力的范围内,建筑空间内的平

提出基于Kmeans聚类的分组偏移变量设计方

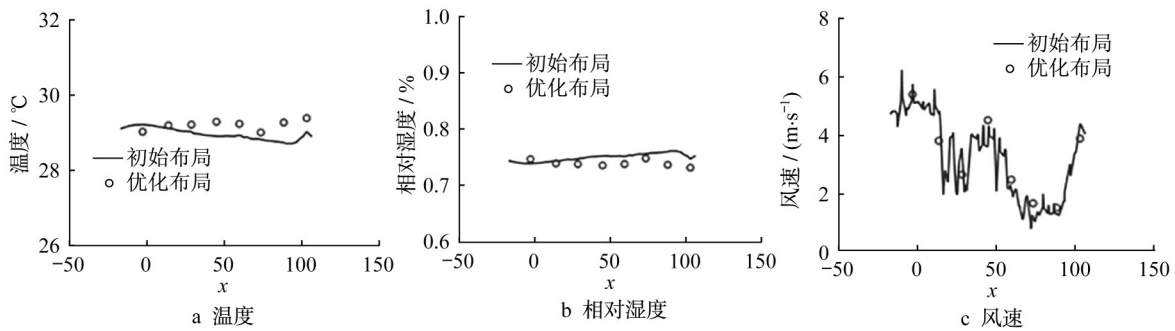


图15 边流式水体配置的初始布局和优化布局在采样点的温度、相对湿度和风速比较

Fig.15 Comparison of temperature, relative humidity, and wind velocity at the sampling point for the initial layout and optimized layout of edge flow water configurations

表2 各个布局中优化过程中不同的气象因素的变化程度  
Tab.2 The degree of change in meteorological factors during the optimization process in each layout

方式	温度/°C	相对湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	UTCI/°C
集中式	0.1	-0.6%	1.35	0.4
分散式	0.5	-2%	1.40	0.6
边流式	0.3	-2%	0.20	0.1
与UTCI关系	正相关	正相关	负相关	正相关

法,并结合该变量设计、数值模拟、遗传算法和通用热舒适评价指数,在Matlab软件上实现建筑平面布局优化流程,最后对集中式、分散式、边流式的水体配置下的建筑平面布局进行了优化实验。

(1)提出的优化方法是有效运行的,优化后的建筑空间平均UTCI值降低了0.1~0.6°C,热舒适度均有所增强。

(2)在较强热应力的范围内,建筑空间内的平均热舒适度改善的主要目标是提高平面布局的风速。

(3)建筑平面布局优化的方向是,尽量将建筑体

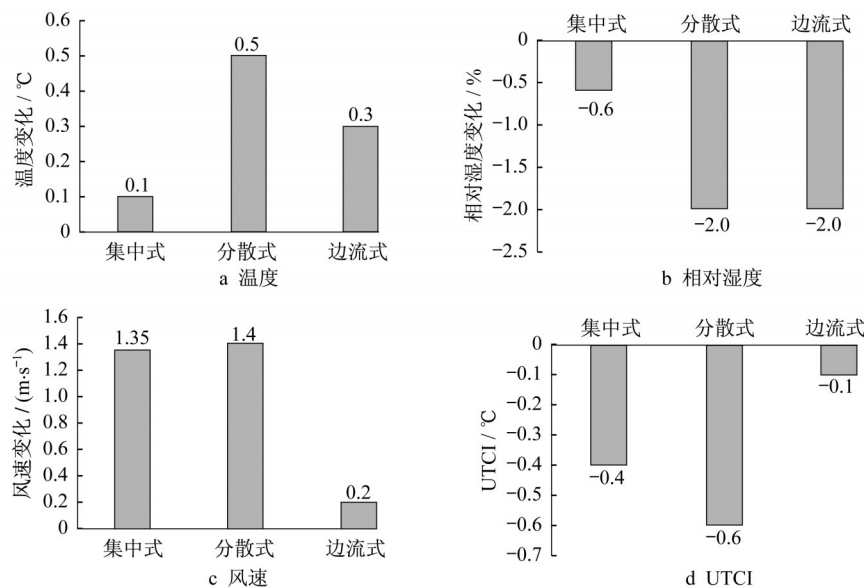


图16 不同水体配置下不同的气象因素的变化程度(与UTCI相关)

Fig.16 The degree of change in meteorological factors under different water configurations (related to UTCI)

布置于水体的下风向,并减少建筑排列形成的风道的方向与夏季主导风向的夹角。这样可以充分利用水体的蒸发效应和主导风给行人带来的凉爽感。

#### 参考文献:

- [1] MICHALEK J, CHOUDHARY R, PAPALAMBROS P. Architectural layout design optimization [J]. *Engineering Optimization*, 2002, 34(5):461.
- [2] PANÃO M J N O, GONÇALVES H J P, FERRÃO P M C. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(5):887.
- [3] KÄMPF J H, MONTAVON M, BUNYESC J, *et al.* Optimisation of buildings' solar irradiation availability[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(4):596.
- [4] ZHANG L, ZHANG L, WANG Y. Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China[J]. *Solar Energy*, 2016, 132:38.
- [5] YI Y K, KIM H. Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA) for tall apartment's solar right [J]. *Solar Energy*, 2015, 113:236.
- [6] 王力凯, 谭子龙, 吉国华. 面向应用的建筑风环境优化设计技术探索[J]. *动感:生态城市与绿色建筑*, 2017(1):100.  
WANG Likai, TAN Zilong, JI Guohua. Investigation of application-oriented technique of wind-environment related performance optimization design [J]. *Eco-city and Green Building*, 2017(1):100.
- [7] TIAN Z, ZHANG X, JIN X, *et al.* Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1306.
- [8] SHI X, TIAN Z, CHEN W, *et al.* A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65:872.
- [9] MACHAIRAS V, TSANGRASSOULIS A, AXARLI K. Algorithms for optimization of building design: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31(2):101.
- [10] TUHUS-DUBROW D, KRARTI M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings[J]. *Building & Environment*, 2010, 45(7):1574.
- [11] BLAZEJCZYK K, EPSTEIN Y, JENDRITZKY G, *et al.* Comparison of UTCI to selected thermal indices [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3):515.
- [12] 张仁龙. 哈尔滨城市住区水体配置对微气候的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.  
ZHANG Renlong. Research on impact of water allocation for urban residential microclimate in Harbin [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] 杨丽. 绿色建筑设计:建筑节能[M]. 上海:同济大学出版社, 2016  
YANG Li. Green building design: Building energy efficiency [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2016
- [14] 钱锋, 汤朔宁. 绿色建筑自然通风设计研究——以同济大学嘉定体育中心为例[J]. *建筑科学*, 2018, 34(8): 106.  
QIAN Feng, TANG Shuoning. The Natural ventilation design of Jiading Tongji Sport Centre[J]. *Building Science*, 2018, 34(8):106.
- [15] WRIGHT J, ALAJMI A. The robustness of genetic algorithms in solving unconstrained building optimization problems [C]//Proceedings of the 7th IBPSA Conference: Building Simulation.Montreal:[S.n.], 2005: 15-18.
- [16] 杨丽. 泛广义建筑节能[J]. *住宅科技*, 2017 (5):32.  
YANG Li. Energy saving of pan-generalized buildings [J]. *Housing Science*, 2017 (5):32.
- [17] YANG L, LIU X D, QIAN F, *et al.* Ventilation effect on different position of classrooms in "Line" type teaching building [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209:886.