



基于正交分析的中庭热环境影响因素研究

田沛哲, 皮伟, 楚文军

北京联合大学生物化学工程学院, 北京 100023

摘要 采用正交分析的方法对中庭热环境的主要影响因素——中庭断面面积、室外温度、顶部天窗开启百分比进行试验设计, 针对设计工况进行数值模拟, 并对数值模拟结果进行正交分析。研究结果表明, 中庭顶部天窗开启百分比对中庭的通风量影响最大, 中庭的断面面积对中庭通风量影响次之, 室外温度对中庭的通风量影响相对较小, 但室外温度是中庭内温度分布的重要影响因素。研究结果为中庭科学设计和合理运行管理提供了依据, 同时对已建成的建筑中庭提出了改善热舒适度和节能的措施。

关键词 正交分析; 建筑中庭; 热环境; 数值模拟

中图分类号 TU111

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)21-0082-04

Influencing Factors of the Thermal Environment of Atrium Based on the Orthogonal Analysis Method

TIAN Peizhe, PI Wei, CHU Wenjun

College of Biochemical Engineering, Beijing Union University, Beijing 100023, China

Abstract Atrium thermal amenity is determined by many factors, as were investigated widely both at home and abroad. But the relationship and interactions between these factors have not been well studied. In this paper, three thermal environment influencing factors: the cross section area of atrium, the outdoor air temperature and the top skylight opening percentage are orthogonally analyzed. First, the experimentation is designed by using the method of orthogonal analysis. Then numerical simulations are carried out according to different test conditions, and simulation results are orthogonally analyzed. The results indicate that the top skylight opening percentage has the greatest impact on the airflow volume of atrium, the section area of atrium plays a secondary role, and outdoor air temperature is relatively less important. But the outdoor air temperature is an important influencing factor on the temperature distribution in atrium. This analysis provides a scientific basis for the rational engineering design and operation management. Proposals for improving the thermal amenity and energy efficiency for the completed building are also given.

Keywords orthogonal analysis; atrium building; thermal environmental; numerical simulation

0 引言

建筑内中庭因其能引入自然光, 创造舒适的室内环境和良好的通风状况等功能而备受人们青睐。中庭热环境影响因素众多, 目前国内外已有很多专家学者对其进行了研究。王崇杰等^[1]通过对济南地区 3 栋公共建筑的实测, 分析了影响中庭热舒适度的因素, 并提出改善措施。彭小云^[2]对南昌、南京建筑中庭的热环境进行测试研究, 分析了室外温度对中庭热环境的影响, 研究表明全封闭中庭不能有效利用烟囱效应

诱导自然通风, 使夏季中庭内热环境恶劣。衣健光等^[3]分析了不同气候区中庭天窗性能对办公建筑能耗的影响。常丽莎^[4]分析了中庭各要素对其热环境的影响, 阐述了中庭的节能价值, 但是对于这些因素之间的相互关系涉猎较少。本文在总结前人研究成果的基础上, 采用正交分析方法, 对影响中庭热环境的中庭断面面积、室外温度、顶部天窗开启百分比 3 个因素进行分析, 总结各因素之间的相互关系, 从而有针对性地提出中庭热环境的改善措施, 为中庭设计提供参考依据。

收稿日期: 2010-07-01; 修回日期: 2010-10-20

基金项目: 北京联合大学校级科研项目(11104542101)

作者简介: 田沛哲, 讲师, 研究方向为建筑环境与建筑节能研究, 电子信箱: jdtpeizhe@buu.edu.cn

1 正交试验设计

正交设计中,涉及 3 个概念:因子、水平和处理数。在进行试验时,被挑选中的安排试验的因素称为试验因子;而水平是指各个因子的取值,处理数是指在试验中需要完成的不同因子不同水平的组合。

本文所选试验因子有:中庭断面面积 a ,室外温度 b ,顶部天窗开启百分比 c 。研究的影响因子及水平如表 1 所示。

表 1 影响因子水平
Table 1 Levels of influencing factors

水平	a/m^2	$b/^\circ C$	$c/\%$
1	3 ²	20	10
2	4 ²	24	30
3	5 ²	28	50

正交表表头 $L_t(n^k)$ 。其中, t 为正交表的行数即处理数(查表得出), n 为水平数, k 为最大因子数。

查表 $L_9(3^4)$,取其前 3 列正交表^[5]如表 2 所示。

表 2 试验工况
Table 2 Test conditions

试验号	a	b	c	试验号	a	b	c
1	1	1	1	6	2	3	1
2	1	2	2	7	3	1	3
3	1	3	3	8	3	2	1
4	2	1	2	9	3	3	2
5	2	2	3				

2 数值模拟

2.1 物理模型

选用方形中庭,高 10m,断面面积分别为 $3m \times 3m, 4m \times 4m, 5m \times 5m$,如表 1。根据 Kotani^[6]的结论,中庭底部开口比顶部开口更有利于热压通风。数值模拟时各工况下中庭底部均开有 4 个口,开口尺寸均为 $2m \times 0.5m$ (长 \times 高)。天窗大小按表 1 设置。以试验号为 1 的物理模型为例,如图 1 所示,坐标系原点在建筑底平面的中心点。

2.2 边界条件和控制方程

室外温度按表 1 设置。各工况下中庭四面墙壁均为均匀热源,且每面墙壁发热量相等,均为 $1.65kW$ 。中庭顶部为模拟太阳辐射,设置为平面均匀热源,且各工况下总发热量相等,均为 $6kW$ 。窗口均为自由出流边界条件。

中庭内空气流动通常为湍流流动。采用室内零方程模型能获得比 $k-\epsilon$ 模型更为准确的结果,而且室内零方程模型对室内等温和非等温流动能快速获得模拟结果,并能保证一定的准确度。

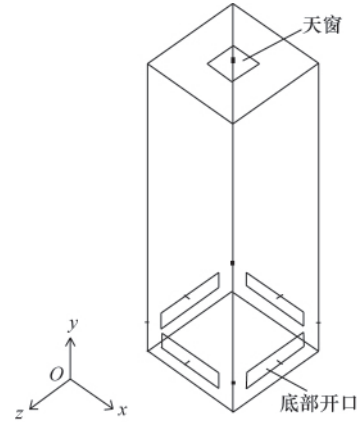


图 1 数值计算物理模型

Fig. 1 Physical model for numerical computation

房间简化成六面体,将模型建立在笛卡尔坐标系下,采用控制容积离散方法将微分方程离散成代数方程。对整个控制方程的求解采用的是 Simple 算法,对单个控制方程采用的是高斯-赛德尔迭代方法进行迭代,且每一次迭代结束后进行下一次迭代前,所赋的新值采用欠松弛方法,以此加强非线性耦合方程迭代求解的稳定性。不同的变量采用的松弛因子不同。本次模拟取的松弛因子为软件的默认值。求解过程中,判断各变量收敛的标准如下:速度的残差值不大于 10^{-3} ,能量的残差值不大于 10^{-6} 。本模型最后确定的网格最大值分别为 $x_{max}=0.15m, y_{max}=0.5m, z_{max}=0.15m$ 。窗户和热源处的网格进行手动局部加密处理。

3 数值模拟结果正交分析

3.1 中庭通风量的正交分析

表 2 中各试验工况下的通风量 Q 见表 3。下面分别采用正交法中 4 种结果分析方法对模拟结果进行深入统计分析。

1) 直接比较法

直接比较法即根据模拟结果数值比较,直接确定最优组合。根据表 3,最大通风量为 $2.135m^3/s$,对应的处理为 $a_3b_1c_3$,即 $a_3b_1c_3$ 为最优处理。

表 3 各工况下通风量

Table 3 Ventilation volume under different test conditions

试验号	a	b	c	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$
1	1	1	1	1.072
2	1	2	2	1.399
3	1	3	3	1.805
4	2	1	2	1.777
5	2	2	3	2.059
6	2	3	1	1.148
7	3	1	3	2.135
8	3	2	1	1.508
9	3	3	2	2.022

2) 优水平组合

直接比较法简单易行,但相对来说,该方法较为粗糙,准确性不高,而优水平组合能够更加综合准确地分析确定本试验的最优处理对。该方法先求出各因子各水平的试样反应变量指标平均数,再将各因子最好的水平组合在一起。

$$Y_{a1}=(Q_1+Q_2+Q_3)/3=1.425 \quad Y_{a2}=(Q_4+Q_5+Q_6)/3=1.661$$

$$Y_{a3}=(Q_7+Q_8+Q_9)/3=1.888$$

$$Y_{b1}=(Q_1+Q_4+Q_7)/3=1.661 \quad Y_{b2}=(Q_2+Q_5+Q_8)/3=1.655$$

$$Y_{b3}=(Q_3+Q_6+Q_9)/3=1.658$$

$$Y_{c1}=(Q_1+Q_6+Q_8)/3=1.243 \quad Y_{c2}=(Q_2+Q_4+Q_9)/3=1.733$$

$$Y_{c3}=(Q_3+Q_5+Q_7)/3=2.000$$

则预测最优处理为 $a_3b_1c_3$ 。

3) 极差分析

以上两种方法只能确定试验当中的最优处理对,而不知道各个影响因子对试验结果的重要性。极差分析法可完成这一任务。极差 R 为各水平的最大平均值减去最小平均值。

$$R_a=Y_{a3}-Y_{a1}=0.463 \quad R_b=Y_{b1}-Y_{b3}=0.003 \quad R_c=Y_{c3}-Y_{c1}=0.757$$

影响因子的重要性由主到次依次为 c, a, b , 即在其他条件一定的情况下,中庭顶部天窗开启百分比对中庭的通风量影响最大,中庭的断面面积的影响次之,室外温度的影响相对较小。

4) 直观分析

根据极差分析已然能够将各影响因子的重要性表明,但是为了让结果直观可见,采用直观分析法,根据各因子各水平的平均数画出趋势图,如图 2 所示。

由图中各曲线斜率可知,顶部天窗开启百分比对中庭的

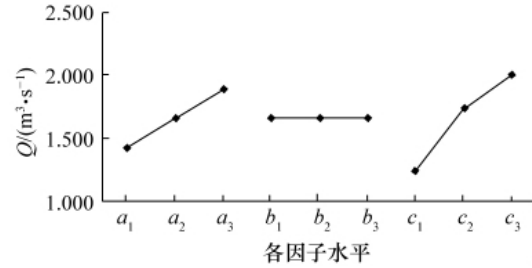


图 2 各因子各水平平均数趋势

Fig. 2 Average value trend map of different factors at different levels

通风量影响很大。为了加大中庭的通风量,顶部天窗应尽量全开。中庭的尺寸对中庭通风量影响也比较大,增大中庭尺寸有利于中庭通风量的增大。室外温度对中庭的通风量影响相对较小。

3.2 中庭内温度分布比较

通过数值模拟得到中庭内各工况下 $x=0$ 剖面的温度分布,如图 3 所示。可以看出,工况 1,工况 4 和工况 7 下室外温度均在 20°C ,3 个工况的温度分布虽有差异,但中庭中下部的温度均为 20°C 左右,与室外温度接近;工况 2,工况 5 和工况 8 下室外温度均为 24°C ,3 个工况的温度分布虽有差异,但中庭中下部的温度均为 24°C 左右,也与室外温度接近;同样,工况 3,工况 6 和工况 9 下室外温度均为 28°C ,3 个工况的温度分布虽有差异,但中庭中下部的温度均为 28°C 左右,同样与室外温度接近。说明室外温度是中庭内温度分布的重要影响因素。

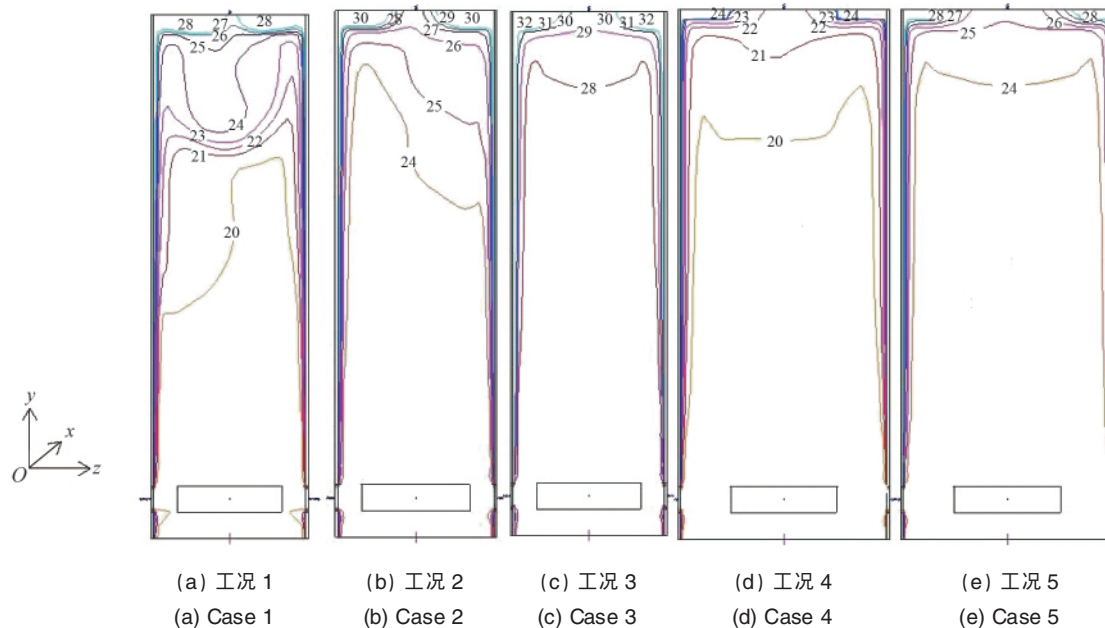


图 3 $x=0$ 剖面各工况温度分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Temperature distribution map at different conditions on section $x=0$ (unit: $^{\circ}\text{C}$)

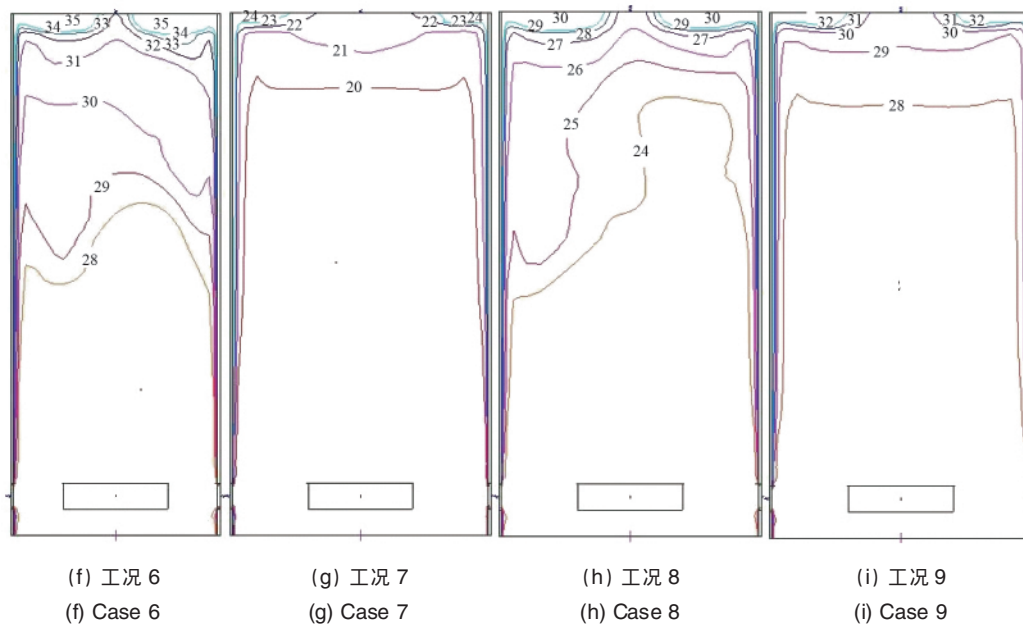


图 3 $x=0$ 剖面各工况温度分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$) (续)

Fig. 3 Temperature distribution map at different conditions on section $x=0$ (unit: $^{\circ}\text{C}$), (continued)

4 结论

中庭热环境影响因素众多,其中中庭断面面积、室外温度、顶部天窗开启百分比 3 个因素中,中庭顶部天窗开启百分比对中庭的通风量影响最大,中庭的断面面积对中庭通风量影响次之,室外温度对中庭的通风量影响相对较小。室外温度是中庭内温度分布的重要影响因素。因此,对于大部分的全封闭中庭来说,要想降低夏季中庭建筑能耗,建议适当地开启中庭天窗;同时做好建筑周围的绿化或增设喷泉、水池、瀑布,降低建筑周围室外温度,从而提高建筑中庭内的热舒适度。

参考文献 (References)

- [1] 王崇杰, 温超, 赵学义. 影响建筑中庭热舒适度的几个因素及改善措施[J]. 华中建筑, 2006, 24(3): 80-83.
Wang Chongjie, Wen Chao, Zhao Xueyi. *Huazhong Architecture*, 2006, 24(3): 80-83.
- [2] 彭小云. 南昌、南京地区建筑中庭的热环境[J]. 工业建筑, 2006, 36(6): 31-34.
Peng Xiaoyun. *Industrial Construction*, 2006, 36(6): 31-34.
- [3] 衣健光, 胡仰耆, 马伟骏. 不同气候区中庭天窗性能对办公建筑能耗的影响[J]. 暖通空调, 2008, 38(6): 171-177.
Yi Jianguang, Hu Yangqi, Ma Weijun. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008, 38(6): 171-177.
- [4] 常丽莎. 无空调中庭热环境设计研究初探 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
Chang Lisha. Primary study of the atrium thermal environmental design without air-conditioning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- [5] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
Yang De. Experiment design and analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [6] Kotani H, Satoh R, Yamanaka T. Stack effect in light well of high rise apartment building [C]. International Symposium on Air Conditioning in High rise Buildings. Shanghai, China, 1997: 628-633.

(责任编辑 代丽)

本期好玩的数学——数字重排答案

关键在于注意到中间两个方格的特点: 与这两个方格在上下、左右和对角线方向上有接触的方格数都是 6 个 (其余的方格与其接触的方格数只有 3 或 4 个)。这表明,对填在中间两个方格中的任一数字而言,在 1~8 的 8 个数字中,除了自身外,必须有 6 个数字和自身没有连续关系,或者说只允许有一个数字与自身有连续关系。而满足这一条件的数字只有 1 与 8。因此,填在中间两个方格中的数字必须是 1 与 8。而数字 1 上面的数字只能是 7,数字 8 下面的数字只能是 2。剩下的 4 个数字也可以按要求很容易地确定。右图是给出的一个符合条件的答案。

	7	
3	1	4
5	8	6
	2	