

# 庭院式高层办公建筑自然通风研究

## ——以宁波大学科技服务大楼为例

陈高翔, 安嫫娟

(宁波大学 潘天寿建筑与艺术设计学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 自然通风已经成为绿色建筑设计中重要的一环, 良好的室内通风条件可以保证室内人员生理和心理健康, 也是预防职业病、控制建筑能耗和成本的重要指标。结合庭院式高层办公建筑实例, 采用 PKPM-CFD 风环境模拟分析软件, 对宁波大学科技服务大楼室内自然通风效应进行数值模拟计算, 并结合实测数据分析庭院式高层办公建筑自然通风效果, 研究结果可为办公建筑自然通风设计提供一些参考。

**关键词:** 自然通风; 庭院式办公建筑; 量化效果

**中图分类号:** TU233

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2019) 05-0110-05

近年来随着我国建筑业的发展, 对绿色建筑和建筑节能重要性认识逐步加深<sup>[1-2]</sup>, 自然通风设计已经成为绿色建筑设计的重要一环<sup>[3]</sup>。良好自然通风的建筑相比一般建筑有着诸多重要的现实意义。首先, 它可以排除污浊空气, 提供干净新鲜的自然空气, 有利于人的生理和心理健康<sup>[4]</sup>。自然通风还能够稀释、降低室内固态粉尘以及有毒有害气体等在空气中的含量。其次在医学领域内, 工作环境中通风量和气流组织是预防职业病防治的重要保证<sup>[5]</sup>。再次, 通过自然通风可以实现被动式制冷, 在不消耗能源情况下, 达到降温以满足人体舒适需求, 从而减少能源损耗并降低污染, 并有效降低整个建筑的投资成本<sup>[6]</sup>。

《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2014 对室内自然通风的换气次数有着明确的规定, 自然通风设计是办公建筑室内品质的重要评定标准。但是, 高层办公建筑因其平面进深较大的特点很难实现较好的自然通风效果<sup>[7]</sup>。在设计中引入庭院空间, 不仅可为办公楼内的人们提供自然景观资源和趣味公共空间, 也可起到高效的自然通风组织作用<sup>[8]</sup>。中庭特有的竖井空间易形成通风渠道, 通

过烟囱效应和温室效应, 即利用空间的高差形成进风口和排风口的温度差, 可以起到很好的“拔风”效果<sup>[9]</sup>。因此, 庭院式办公室作为一种有效的环保节能的空间形式, 已经得到普遍认可。

庭院空间的尺度、材料、构造及所处的地域和季节性差异等各种因素相互耦合, 使其呈现出复杂的流场变化<sup>[10]</sup>。因此, 当前实际绿色建筑模拟室内环境所采用的定性或部分定性的方法难以准确量化及评价庭院式高层办公建筑的通风效果。本文以宁波大学科技服务大楼为实例, 采用 PKPM-CFD 风模拟分析软件, 对建筑庭院的特性进行室内自然通风的量化分析, 为类似办公建筑设计提供一些参考。

### 1 研究对象

宁波大学科技服务大楼项目占地面积约 6 000 m<sup>2</sup>, 总建筑面积 12 601 m<sup>2</sup>, 其中地上建筑面积 10 721 m<sup>2</sup>, 地下建筑面积 1 880 m<sup>2</sup>, 高 38.7 m, 总共 9 层, 建筑中心有观光电梯的通高庭院, 建筑平面形状呈回字形。作为世界银行投资的绿色建筑的示范项目, 目前已获得绿色建筑三星标识。

植入中庭是该建筑节能减排的重要设计策略,通过控制庭院的体型、围护结构以及构造等以达到绿色建筑标准。该中庭从一层通高到顶,具体尺寸 $19\text{ m} \times 9.4\text{ m} \times 38.7\text{ m}$ ,整体呈东西瘦高型且无顶盖(图1),中庭四周为大面积可开口回廊,回廊内侧墙上都开有高窗。因此中庭在提供建筑自然采光的同时,能有效利用烟囱效应和温室效应造成较大温差,促进室内气流上升。即室外空气通过建筑物下部的开口流入室内,并将室内较轻空气从上部窗户排出,形成自下而上的室内通风流动<sup>[11]</sup>。



图1 宁波大学科技服务大楼剖面图

## 2 研究方法

### 2.1 CFD 模拟原理简述

本文采用 CFD 对自然通风进行模拟,根据周边环境,设定边界条件,然后利用划分的网格用于自然通风风场布局优化和室内自然通风优化分析。

由于建筑物周围的流动往往是湍流,模拟中常采用标准  $k-\varepsilon$  模型及其他湍流模型方程。涉及到的控制方程主要包括连续性方程、动量方程、能量方程, $k-\varepsilon$  模型方程可以写成如下通用形式<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad } \phi) + S, \quad (1)$$

式中, $\phi$ 为通用变量,可代表 $u, v, w, T, C_s$ 等求解变量,即代表温度场、速度场、浓度场等; $\Gamma$ 为广义扩散系数; $S$ 为广义源项。(1)式中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和项源,其具体表现形式如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon. \quad (2)$$

标准  $k-\varepsilon$  双方程模型中  $k$  控制方程表示为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho u k) = \text{div}(\Gamma_1 \text{grad } k) + S_1, \quad (3)$$

其中,

$$\Gamma_1 = \mu + \mu_t / \sigma_k, S_1 = G_k + \rho \varepsilon. \quad (4)$$

标准  $k-\varepsilon$  双方程模型中  $\varepsilon$  控制方程表示为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \varepsilon) = \text{div}(\Gamma_2 \text{grad } \varepsilon) + S_2, \quad (5)$$

其中,

$$\Gamma_2 = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon, S_2 = (\varepsilon / k)(C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon). \quad (6)$$

同时以上各式中  $G_k$  为:

$$G_k = \mu_i \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

模型常数分别取值如下:  $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ .

### 2.2 换气次数

换气次数是表征室内空气平均新鲜程度的物理量,与进风口的风速、进风口的尺寸和形式、房间体积有关,公式如下:

$$n = \frac{3600 \sum vA}{V}, \quad (8)$$

式中, $n$ 为换气次数,次 $\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $v$ 为垂直于进风口的风速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $A$ 为进风口面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$ 为房间体积,  $\text{m}^3$ .

### 2.3 模拟范围与条件

#### 2.3.1 模拟参数设置

宁波位于北纬 $29.78^\circ$ ,东经 $121.55^\circ$ ,气候存在明显季节性差异,通常冬夏两季气候较为严酷,春秋两季则气候温和。本文主要研究建筑自然通风效果,因此选择使用机械通风最少的春秋两季工况。根据典型气象年宁波地区春季和秋季两季平均风速、风向(与指北针顺时针方向夹角)分别为 $2.97\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $360^\circ$ 和 $2.55\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $225^\circ$ 。

该庭院始于建筑一层,因此一层热压通风最差。考虑其一层有地库坡道和层高稍高的情况,而二层平面形状和布局跟其以上楼层基本一致,可作为标准层。因此取最低两层数作为模拟分析对象足以说明该楼最不利通风情况(图2、图3)。

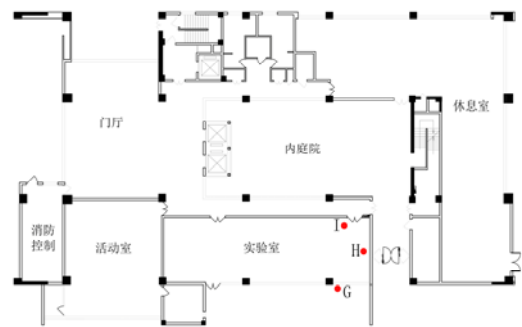


图2 一层平面图



图3 二层平面图

### 2.3.2 网格尺寸设置

根据项目尺度和计算精度的具体要求,将本项目总网格数设置为20.66万个(图4),最小网格尺寸 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ,最大网格尺寸 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 。

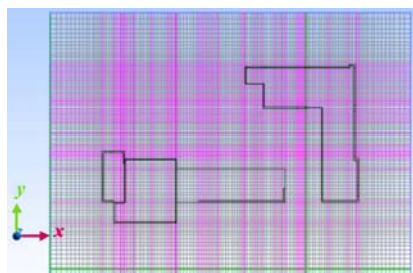


图4 计算域与网格划分设置

### 2.4 实验测试

为准确地评估模拟结果,还需要对比实测和模拟结果。本次实测选择在过渡季的一天,同时通风和时段并无直接关联,因此测试定于2019年4月9日上午8:30点到11:30点。

测点选取二楼南面办公楼、东面活动室和一楼南面实验室3个房间,其中南面二楼办公室和一楼实验室紧邻中庭,房间和庭院走廊之间通风开启面积由一扇门和一扇推拉高窗组成,走廊和庭院之间通风和南面外窗一样通过上悬窗,其外窗可开启面积为外窗总面积32.3%。东面活动室有楼梯间间隔,仅靠外侧上悬窗通风,3个房间由窗口处向内庭院方向各取3点的具体位置如图3所示。

由于模拟采用室外稳定风速 $2.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,因此,在实测中以窗口测点A、D和G点稳定接近风速 $2.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,记录其他2点,并记录3组数据。

### 2.5 实验仪器

本次实验的测试仪器为鑫思特 HT-9829 热敏式风速仪(东莞市鑫泰仪器仪表有限公司),量程

$0.1\sim 25.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分辨率 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在使用仪器测试前,并将3个测试仪同时进行校准。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 结果与讨论

本次模拟针对庭院式高层办公建筑,在春秋两季工况单独考虑风压和耦合热压作用下,建筑一、二层平面的气流变化规律。

由图5和图6可见,二楼南面房间的气流对流明显,房间的最高平均风速达到 $4.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明形成了庭院空间的拔风效果。二层其他偏大一点房间也呈现外侧和庭院侧的对流,平均风速处于 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,只有西北面的资料室风速比较小,只有 $0.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图7和图8风速矢量图可见,一层没有像二层一样形成明显内外对流,但是房间外侧和庭院侧风速接近,这也说明了庭院对自然通风有着促进作用。

从图9和图10的一层平面春秋两季工况空气

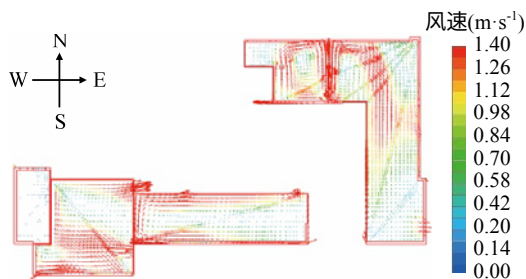


图5 一层平面1.2 m高度平面风速矢量图(春季工况)

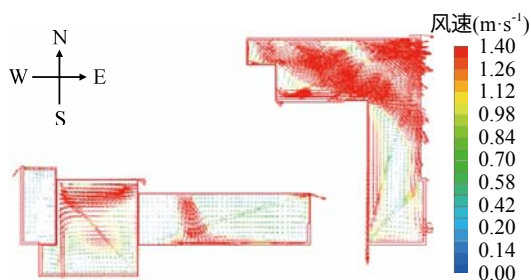


图6 一层平面1.2 m高度平面风速矢量图(秋季工况)

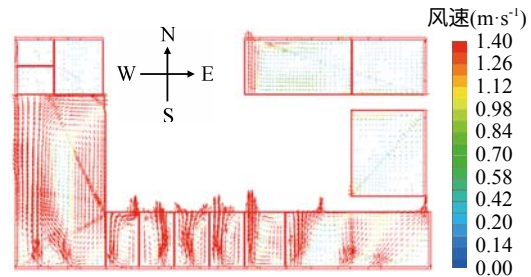


图7 二层平面1.2 m高度平面风速矢量图(春季工况)

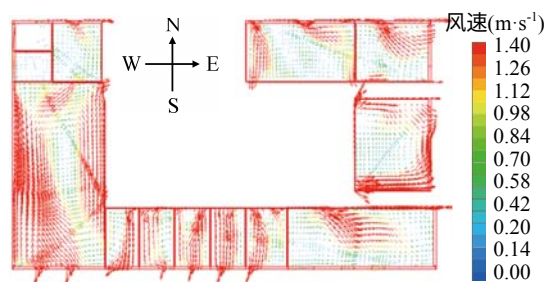


图8 二层平面 1.2 m 高度平面风速矢量图(秋季工况)

龄云图可以看出,一层空间中,消控监控室是空气龄最大的房间(491.73 s),活动室最小(25.99 s)。在秋季工况时,最大还是消控监控室的 281.29 s,最小的却是北面休息间的 25.96 s,说明除西北侧房间其他一楼房间通风较好。

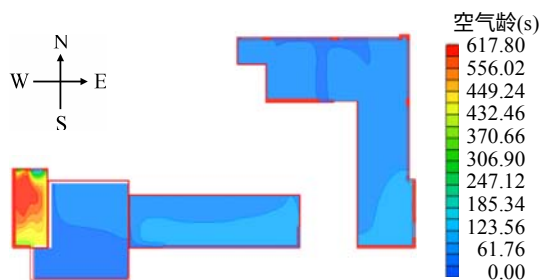


图9 一层平面 1.2 m 高度平面空气龄云图(春季工况)

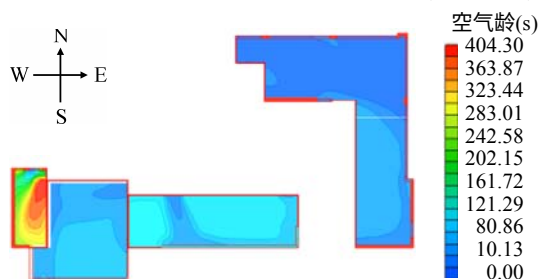


图10 一层平面 1.2 m 高度平面空气龄云图(秋季工况)

从图 11 和图 12 中可见,二层平面春秋两季工况最大的房间位于西北面资料室(1 294.39 s),其他房间相应较小一般处于 200 s 左右。剩下一半的房间,特别是靠南面的房间基本在 10~20 s。因此,秋季工况时总体比较均衡,除资料室和复印室分别为 750.46 s 和 354.55 s,其他在 20~60 s,说明二楼主要房间通风较好。

一层空间室内春秋两季平均换气次数最大、最小分别是 144.75, 6.89 次·h<sup>-1</sup> 和 281.28, 18.16 次·h<sup>-1</sup>。二层空间室内春秋两季平均换气次数最大、最小分别为 613.76, 6.88 次·h<sup>-1</sup> 和 417.32, 10.40 次·h<sup>-1</sup>。因此,上下两层秋季和春季相比各室内的通风次数

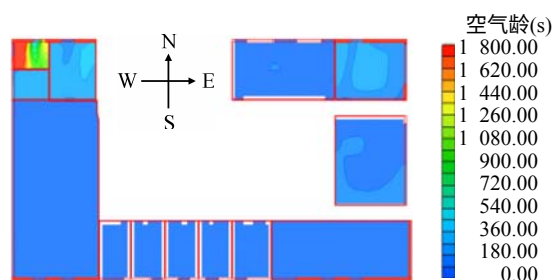


图11 二层平面 1.2 m 高度平面空气龄云图(春季工况)

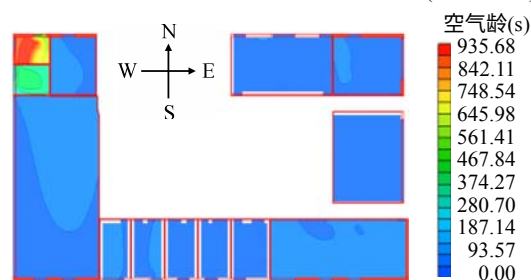


图12 二层平面 1.2 m 高度平面空气龄云图(秋季工况)

差异较小。同时,二层的整体气流速度和对流强度比一楼高,表明在同样条件下,楼层越高自然通风效果越好。可以看出一、二层换气频率都能满足 2 次·h<sup>-1</sup> 的绿色建筑评价标准要求。

### 3.2 实测

表 1 为 3 个房间实测与模拟的对比数据,可见:

(1)房间一的 B、C 点和房间二的 E、F 点模拟数据分别为 0.28, 1.10 m·s<sup>-1</sup> 和 0.35, 0.42 m·s<sup>-1</sup>。除房间一的 B 点相差较大,其他点相差不大。

(2)房间一的 B 点实际值比模拟值要低 0.14 m·s<sup>-1</sup>,从模拟中可以看出是气流对流路径原因,因此实际气流路径由于家具、通风洞口开启等原因更加复杂。

(3)房间内靠近内庭院,并有通风洞口的测点相较于房间中部的风速要高,如房间一的 C 点也同模拟趋势一致。

(4)房间二中的 D、E、F 点从窗口向内呈由强到弱趋势。

(5)一层实验室房间模拟中, H 点风速较小,反而是靠近庭院侧门口 I 点的风速比较高,达到 1.20 m·s<sup>-1</sup>,且在实测中, H、I 和模拟基本一致。

虽然模拟要尽量接近实际,但毕竟测点和模拟中位置不能完全相同。同时实际室内风速由于自然通风在室内的家具以及人员扰动形成的耦合效应,准确模拟有一定的难度。对比实测和模拟的数据,除个别测点,两者差异总体不大。

表1 实测与模拟对比数据表  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 

| 项目 | 房间一(办公室) |      |      | 房间二(活动室) |      |      | 房间三(实验室) |      |      |
|----|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
|    | A点       | B点   | C点   | D点       | E点   | F点   | G点       | H点   | I点   |
| 实测 | 2.97     | 0.14 | 1.14 | 2.94     | 0.41 | 0.47 | 2.99     | 0.70 | 1.25 |
|    | 3.00     | 0.13 | 1.14 | 2.77     | 0.35 | 0.38 | 3.03     | 0.78 | 1.30 |
|    | 2.95     | 0.14 | 1.09 | 2.86     | 0.40 | 0.45 | 2.78     | 0.63 | 1.15 |
| 模拟 | 2.97     | 0.28 | 1.10 | 2.97     | 0.35 | 0.42 | 2.97     | 0.68 | 1.20 |

#### 4 结论

利用数值模拟和实测相结合的方法,对庭院式办公建筑的室内自然通风效果进行量化研究。通过模拟得到建筑室内风速矢量和空气龄云图,数据直观地反映了建筑的自然通风效果,换气次数达标面积比例为100.00%。对照绿色建筑星级评级标准,该项可以达到最高分。同时,实测和模拟结果较为接近,靠近庭院的房间通风效果较好。同时,房间和庭院间的通风开启面积对室内自然通风有着重要作用。因此,在庭院式高层办公建筑设计的初期,就要对庭院和房间通风开启面积进行分析和方案优化,这样才能有效的改善建筑室内的通风环境。

#### 参考文献:

- [1] Yao J, Zheng R Y. A comparative study of the building energy performance of thermotropic windows[J]. Open House International, 2017, 42(1):16-22.
- [2] Yao J, Zheng R Y. Stochastic characteristics of manual solar shades and their influence on building energy performance[J]. Sustainability, 2017, 9(6):1070.
- [3] 邹经宇. 风自悠悠水自清——城市多尺度通风体系及水循环体系的应用研究[J]. 新建筑, 2008(2):8-13.
- [4] 董海涛, 董海波. 浅谈建筑中的自然通风和住宅建筑设计[J]. 中国新技术新产品, 2009(15):171.
- [5] 靳勇涛, 王娟. “通风”在职业病危害防治方面的应用现状研究[J]. 农业与生态环境, 2015, 23(8):96-97.
- [6] 甘路, 吕韶东. 庭院空间在高层办公建筑设计中的运用探讨[J]. 福建建筑, 2013(7):29-31.
- [7] 李珺杰, 朱宁. 建筑中介空间被动式调节作用效果的实测验证——以大型公共建筑的中庭空间为例[J]. 建筑学报, 2016(9):109-111.
- [8] 李禹澄, 冉茂宇. 基于设计视角, 浅析公共建筑中庭空间自然通风的影响因素[J]. 中外建筑, 2017(7):156-159.
- [9] 王洁, 赵东强, 周洁. 国内外绿色中庭建筑实践的比较研究和启示[J]. 浙江建筑, 2011, 28(7):62-66.
- [10] 梁春峰, 温静. 耦合风压和热压的中庭建筑自然通风模拟分析[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(6):74-77.
- [11] 陈湛. 绿色建筑中协同作用的自然通风设计[J]. 工业建筑, 2016, 46(12):26-30.
- [12] Chen Q Y, Glicksman L R, Srebric J. Simplified methodology to factor room air movement and the impact on thermal comfort into design of radiative, convective and hybrid heating and cooling systems[R]. ASHRAE RP-927 final report. Atlanta: ASHRAE, 1999.

## Natural ventilation of courtyard office building: A case study of Ningbo University Science and Technology Service Building

CHEN Gaoxiang, AN Huajuan

(Pan Tianshou Academy of Architecture and Arts Design, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Natural ventilation has become an important part of green building design. A good indoor ventilation condition can guarantee the physical and mental health of indoor personnel, and is also an important index to prevent occupational diseases and control the energy consumption and the investment cost of a building. Using a courtyard office building of Ningbo university named “Science and Technology Service Building” as a case, the wind environment simulation software PKPM-CFD was applied to calculate the indoor natural ventilation effect, and the natural ventilation effect of courtyard high-rise office buildings is analyzed combined with the measured data. The research results can provide some references for the design of natural ventilation of office buildings.

**Key words:** natural ventilation; courtyard office building; quantifiable effect

(责任编辑 章践立)