

自然通风在大空间建筑空调系统下 室内热环境中应用的理论分析及 实测研究^{*}

上海理工大学 王 昕[☆] 黄 晨
上海工程技术大学 曹伟武

摘要 以上海市建筑科学研究院生态建筑示范基地为研究对象,对夏季由上部自然通风与下部空调系统共同形成的室内热环境进行了理论建模和现场测试研究。分析了不同工况下的温度分布,并探讨了自然通风在改善大空间建筑室内热环境中的有效利用及其优化途径。

关键词 大空间建筑 室内热环境 自然通风 分层空调

Application of natural ventilation in indoor thermal environment by stratified air conditioning system in large spaces

By Wang Xin[★], Huang Chen and Cao Weiwu

Abstract Taking the ecological demonstration building in Shanghai Research Institute of Building Sciences as an object, establishes the mathematical model and studies the site measurements of the indoor thermal environment which was formed by the natural ventilation and stratified air conditioning system. Analyses the temperature distribution under different conditions, and discusses the efficient use and optimization of the natural ventilation.

Keywords large space building, indoor thermal environment, natural ventilation, stratified air conditioning

[★] University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China

^①

0 引言

目前,人们对自然通风的利用已经不同于以前的开窗、开门通风,而是如何充分利用室内、外条件,如建筑周围环境、建筑构造(如中庭)、太阳辐射、气候、室内热源、机械通风等,组织和诱导自然通风已成为目前人们关注的热点之一。通常大空间建筑采用居留区域空调居多(如分层空调、座椅送风等),此时室内热环境是由自然通风与空调系统共同作用形成的,季节、室外风压、室内负荷率不同,形成的热环境也是不同的。因此根据不同工况自如运用自然通风,与空调系统耦合运行,是优化大空间建筑室内热环境的途径之一^[1]。

1 建立由自然通风与空调共同形成的室内热环境的描述方程

Block 模型最先由日本学者户河里敏等人提出^[2],并于 1993 年正式被日本空气调和卫生工学推荐,主要适用于气流形式较为简单的室内自然对流或单股射流的封闭空间室内温度分布的研究。然而,实际大空间建筑多有开口和热源散热量偏大的发热设备,且自然通风及内热源对室内温度分布及能耗影响显著^[3]。因此,本文对 Block 模型加以扩展,提出适合大空间建筑室内热环境的 Block 扩展模型,探讨基于此扩展模型的自然通风与空调的耦合运行方式。

1.1 受羽状流作用的空调非等温射流模型

^{①☆} 王昕,女,1980 年 7 月生,博士研究生
200093 上海军工路 516 号
(021) 55271045
E-mail: wangxinshiyun@126.com
收稿日期:2008-02-22
修回日期:2008-06-17

^{*} 上海市自然科学基金资助项目(编号:00ZF14038),国家自然科学基金资助项目(编号:50478113)

由于大空间建筑室内常存在热量偏大的设备或人员,这些内热源易形成自下而上的羽状气流,此时,室内还存在自上而下的空调冷射流,两股气流的相遇必定在一定程度上妨碍射流的下降路径,改变射流流动轨迹^[4]。因此,本文基于前人的射流和羽状流理论^[5],尝试在建立射流运动模型时考虑羽状流对射流的热浮升作用,得到了关于受羽状流影响的空调射流流动轨迹的表达式。限于篇幅,直接给出结论^[6],将得到的射流轨迹用于 Block 扩展模型中。

$$y' = \left(1 + \frac{\bar{\rho}}{\rho_e}\right)y - \frac{\bar{\rho}gd_0^2}{6.48\rho_e v_0^2 a^2} \left(\frac{ax}{d_0} + 0.41\right)^3 \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \frac{5Q}{6gH\alpha} 0.9\alpha Q^{-\frac{1}{3}} H^{-\frac{5}{3}} \quad (2)$$

式中 y' 为冷射流轴心点偏离的纵向距离, m; ρ_e 为室内环境空气密度, kg/m³; d_0 为喷嘴直径, m; v_0 为冷射流初速度, m/s; a 为湍流系数; Q 为内热源发热量, kW; α 为热浮升气流扩张系数; H 为送风喷口的安装高度, m; x 为射流水平方向进程, m; y 为仅受室内空气浮升作用下射流轴心点偏离的纵向距离, m。

1.2 自然通风描述模型

1) 当风压作用于建筑物时,建筑迎风面接受的是正压,背风面为负压,整个建筑物上作用的风压可表示为

$$\Delta p_l = (K_l - K_b) \frac{v_w^2}{2} \rho_w \quad (3)$$

式中 K_l, K_b 分别为迎风面和背风面的空气动力系数; v_w 为室外空气流速, m/s; ρ_w 为室外空气密度, kg/m³。

$$\alpha_d(t_i - \theta_i) - 4t_m^3 \epsilon_i \sigma \sum_{j=1}^N G_{ij}(\theta_i - \theta_j) + G_{Ui} q_{LU} + G_{Di} q_{LD} + q_a = 0 \quad (8)$$

式中 α_d 为室内壁面表面传热系数, W/(m²·°C); t_i 为壁面 i 附近的空气温度, °C; θ_i 为壁面 i 过余温度, °C; t_m 为平均壁面温度, °C; ϵ_i 为壁面辐射系数; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量; G_{ij} 为表面 i 到 j 的 Gebhart 系数; θ_j 为壁面 j 的过余温度, °C; G_{Ui}, G_{Di} 分别为表面 i 向上和向下的 Gebhart 吸收系数; q_{LU}, q_{LD} 分别为热源辐射平面 m 单位面积向上和向下的辐射热量, W/m²; q_a 为单位面积热流量, W/m²。

式(8)是 n 元的线性方程组,利用室外温度等参数、室内竖直温度分布及其围护结构的热工特性,可解出室内各表面壁温。

度, kg/m³。

则通过开口的空气质量流量 G_1 (kg/s) 为

$$G_1 = \mu F \sqrt{2\rho_w \Delta p} \quad (4)$$

式中 μ 为窗孔流量系数; F 为开口面积, m²。

2) 热压和风压同时作用下的自然通风如图 1 所示。

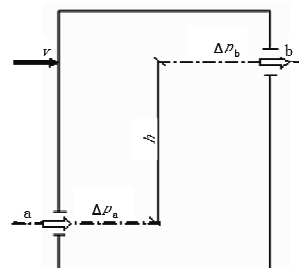


图 1 热压风压同时作用下的自然通风

热压和风压同时作用下的自然通风量为

$$\Delta p_r = \Delta p_b - \Delta p_a = gh(\rho_w - \rho_a) \quad (5)$$

则通过开口的空气质量流量 G_a (kg/s) 为

$$G_a = (\mu F)_a \sqrt{2\rho_w \Delta p} \quad (6)$$

$$\frac{1}{(\mu F)_a^2} = \left(\frac{1}{\mu_a F_a}\right)^2 + \frac{\rho_w}{\rho_a} \left(\frac{1}{\mu_b F_b}\right)^2 \quad (7)$$

式(6)~(7)中 $(\mu F)_a$ 为以窗孔 a 为计算依据的当量有效面积, m²; F_a, F_b 分别为窗孔 a, b 的有效开口面积, m²; μ_a, μ_b 分别为窗孔 a, b 的流量系数; ρ_a 为房间内空气密度, kg/m³。

1.3 壁面温度求解

利用室内壁面对流、辐射、导热耦合换热方程,在对 Gebhart 吸收系数方法考虑内热源影响加以修正的基础上,求解建筑内表面温度^[7]。

1.4 Block 扩展模型

原 Block 模型是将室内空间在竖直方向上划分为若干个区域,每个区域的温度假设是均匀的。且将大空间室内空气流动及能量传递假想由 4 部分构成:1) 沿墙面流动的气流对流换热过程,即壁面气流流动部分,见图 2①;2) 空调送风射流部分,见图 2②;3) 相邻区域由于温差换热引起的气流流动部分,见图 2③;4) 通过各 Block 区域之间的空气流动和能量传递,建立质量和能量平衡方程,即区域热质平衡部分,见图 2④。

本文在上述模型基础上,进行如下 4 方面扩展,建立 Block 扩展模型:

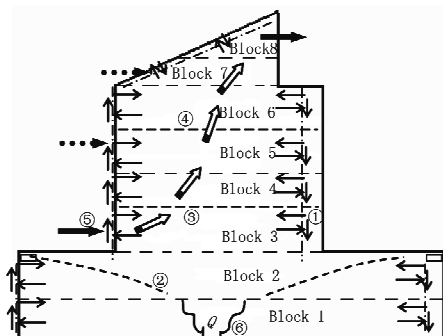


图 2 计算用物理模型

1) 增加自然通风计算模型,即确定大空间建筑中的自然通风量,其随室内、外环境条件的变化而改变,见图 2⑤;

2) 考虑由内热源 Q 形成的羽状气流对空调射流的热浮升作用,见图 2⑥;

3) 考虑空气中含湿量对空气热量变化产生的影响,建立 Block 区域气流流动的含湿量平衡方程

$$t_M(I, K) = \frac{m_{MD}(I+1, K)t_M(I+1, K) + m_{out}(I, K)t_D(I, K)}{m_M(I, K)} \quad (12)$$

式(11), (12)中 $m_M(I, K)$ 为 $m_{out}(I, K)$ 与从上层 Block($I+1$)流下的空气流量合成后的流量, kg/s; $m_{MD}(I+1, K)$ 为从上层 Block($I+1$)流下的流量, kg/s; $t_M(I, K)$ 为 Block(I)与壁面 K 处壁面流合成后形成的下降流的温度。

1.4.2 相邻区域间气流对流换热

由于相邻区域的温度不同,在相邻 Block 区域界面上会产生热量交换

$$\sum_{K=1}^m [m_{in}(I, K) - m_{out}(I, K)] + m_C(I-1) - m_C(I) + A = 0 \quad (14)$$

空气湿量平衡方程:

$$\sum_{K=1}^m m_{in}(I, K)d_{in}(I, K) - \sum_{K=1}^m m_{out}(I, K)d(I) + m_C(I-1)d(I-1) - m_C(I)d(I) + m_n d_w - m_k d(I) = 0 \quad (15)$$

式(14), (15)中 $m_{in}(I, K)$ 为 K 壁面附近的壁面流进入 Block(I)的质量流量, kg/s; $d_{in}(I, K)$ 为 Block(I)与壁面 K 处壁面流形成合流后部分进入本层 Block(I)的空气流的含湿量, g/kg; $d(I)$ 为 Block(I)层内的空气含湿量, g/kg; $m_C(I)$ 为 Block(I)流入 Block($I+1$)的质量流量, kg/s; A

和比焓能量方程;

4) 采用壁面对流、辐射、导热耦合换热方程求解建筑壁面温度。

1.4.1 壁面边界层气流流动

根据边界层理论,Block(I)沿 K 壁面处边界层的空气温度 $t_D(I, K)$ 按式(9)计算。

$$t_D(I, K) = 0.75t(I) + 0.25t_w(I, K) \quad (9)$$

式中 $t(I)$ 为 Block(I)的空气温度, °C; $t_w(I, K)$ 为 K 壁面的壁面流流入 Block(I)的空气温度, °C。

$$m_{out}(I, K) = \frac{4\alpha_C(I, K)A_w(I, K)}{c_p} \quad (10)$$

式中 $m_{out}(I, K)$ 为从 Block(I)流出,进入壁面流的气流质量流量, kg/s; $\alpha_C(I, K)$ 为壁面 K 的表面传热系数, W/(m² · °C); $A_w(I, K)$ 为 Block(I)对应的壁面 K 的面积, m²; c_p 为空气的比定压热容, J/(kg · °C)。

合成后的下降流风量及其温度为

$$m_M(I, K) = m_{MD}(I+1, K) + m_{out}(I, K) \quad (11)$$

$$Q_B(I) = C_B(I)A_B(I)[t(I+1) - t(I)] \quad (13)$$

式中 C_B 为相邻 Block 的温差换热系数, W/(m² · °C); A_B 为 Block 间的边界面积, m²。

温差换热系数 C_B 的大小表示相邻 Block 区域传递的热量,经实验验证,建议计算由通风与空调共同形成的室内热环境时, $C_B = 10$ W/(m² · °C)。

1.4.3 区域热质平衡

风量平衡方程:

为自然通风风量流入、流出的和, kg/s; m_n 为自然通风进入 Block(I)层的空气的质量流量, kg/s; d_w 为室外自然通风气流的含湿量, g/kg; m_k 为自然通风从 Block(I)层排走时带走的空气质量流量, kg/s。

用比焓度量空气能量变化:

$$\sum_{K=1}^m c_p m_{in}(I, K)h_M(I, K) - \sum_{K=1}^m c_p m_{out}(I, K)h(I) + c_p m_C(I-1)h(I-1) - c_p m_C(I)h(I) + C_B A_B \cdot [t(I-1) - t(I)] + C_B A_B [(t(I+1) - t(I))] + \alpha_c A_c [t_c - t(n)] + \alpha_t A_t [t_t - t(1)] + B + C = 0 \quad (16)$$

式中 α_c, α_f 分别为天花板和地板的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_c, A_f 分别为天花板和地板的面积, m^2 ; t_c, t_f 分别为天花板和地板的温度, $^\circ C$; B 为自然通风带入 Block(I)的能量, kW ; C 为 Block(I)内室内热源的散热量, kW ; $h_M(I, K)$ 为壁面 K 处壁面流流入 Block(I)的空气流的比焓, kJ/kg ; $h(I)$ 为 Block(I)空气流的比焓, kJ/kg 。

式(16)左侧第 1, 2 项为壁面流入、流出的热量; 第 3, 4 项为 Block 间流入流出的热量; 第 5, 6 项为相邻 Block 间温差换热量; $\alpha_c A_c [t_c - t(n)] + \alpha_f A_f [t_f - t(1)]$ 仅对最高或最低 Block 列方程时有两项之一, 即为与天花板或地板间的对流换热量。

1.4.4 计算流程

图 3 为 Block 扩展模型计算流程。在模型中, 设定壁温初值和室温初值, 计算射流轨迹及其气流卷吸量和建筑上部自然通风量, 利用区域热质平衡方程计算室温, 若计算得到的室温值与初设值有偏差, 则重新计算程序的边界条件(即射流和自然通风量), 直至两者偏差满足要求后, 输出室温作为计算壁温的已知条件, 计算 Gebhart 模型求解室内壁温, 若计算值与初设值相符, 则输出室温 and 壁温值作为计算最终解, 否则, 输出壁温作为下一轮室温计算的边界条件。如此循环计算, 当前后两次室温与壁温均满足要求时, 求解得到的室温便是最终解。

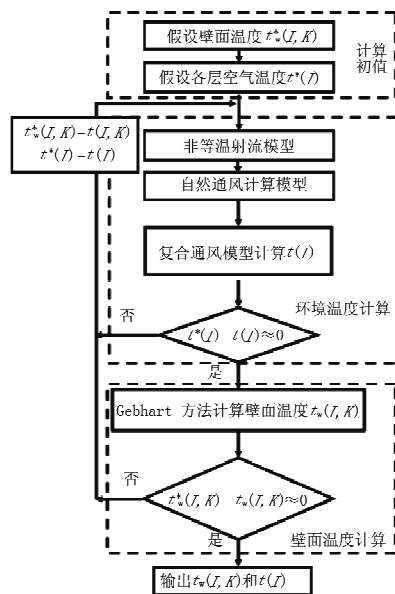


图 3 计算流程

2 计算实例

2.1 计算用物理模型

本文以上海市建筑科学研究院生态建筑示范基地为例, 计算自然通风与空调共同形成的室内竖直温度分布^[1]。该建筑总建筑面积 1 984 m^2 , 南面 2 层、北面 3 层, 东侧为展示与办公区, 约 350 m^2 的大厅用于展示生态建筑新技术和新产品, 其余用于实验及日常办公。中部为采光中庭, 高 14.5 m。为满足建筑采光、美观等要求, 中庭斜屋顶采用天窗设计, 屋顶附近排风窗面积为 2.33 m^2 。根据建筑结构及使用特性, 整个空间在竖直方向上分为 8 个 Block 区域, 1 层大厅分为 2 个 Block 区域, 上部空间暂忽略 2, 3 层办公房间, 考虑中庭至坡屋顶部分温度分布, 分为 6 个 Block 区域。物理模型及分区如图 2 所示。

2.2 计算工况

采用上述理论模型计算 2006 年 7 月 12 日和 8 月 3 日现场工况的室内温度分布。各工况空调和自然通风情况、室外气象参数等详见表 1。

表 1 各测试工况设置

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
日期	7 月 12 日	7 月 12 日	8 月 3 日	8 月 3 日
时间	上午	下午	上午	下午
1 层空调	开	开	开	开
2, 3 层空调	开	开	开	开
2, 3 层开口	关	开	关	开
排风窗(2.33 m^2)	关	开	关	开
实测室外温度/ $^\circ C$	32.1	33.3	32.5	32.3
备注	仅空调 未通风	2 层花园 窗开	仅空调 未通风	3 楼花园 窗开

2.3 计算结果

图 4 为室内空气温度竖直方向的分布, 由此看出, 计算值与实测值基本吻合, 能够体现建筑室内由自然通风与空调系统共同形成的热环境特性。因此, 利用该 Block 扩展模型求解大空间建筑在自然通风和空调系统作用下的热环境是一种有效可行的方法。

3 自然通风特性分析

3.1 不同通风量对竖直温度的影响

保持 8 月 3 日现场实测的开口位置不变, 改变通风开口有效面积, 即改变建筑自然通风量, 分析其对室内竖直温度的影响。如图 5a 所示, 通风量从 3.0 kg/s 增加至 15 kg/s , 利用建筑开口形成自然通风后, 可带走建筑上部空间的热量, 非空调区温度可明显降低, 但通风量的增减对室内竖直温度分布的改变作用不明显。

3.2 不同进风温度对竖直温度的影响

如图 5b 所示, 不同进风温度对竖直温度分布

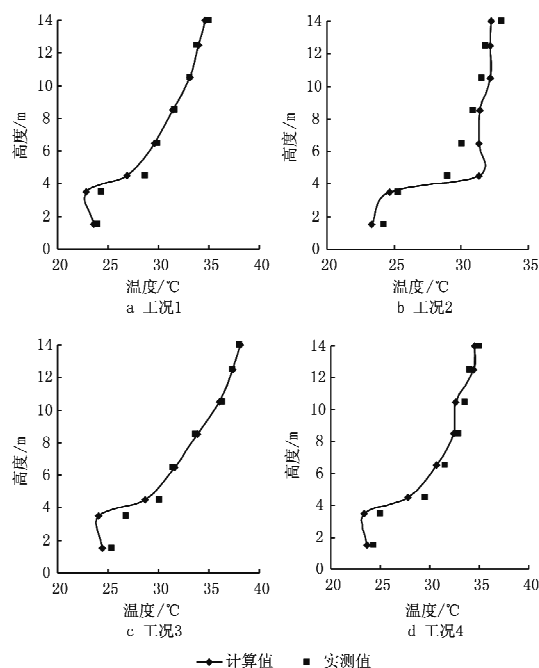


图4 室内空气温度垂直方向的分布

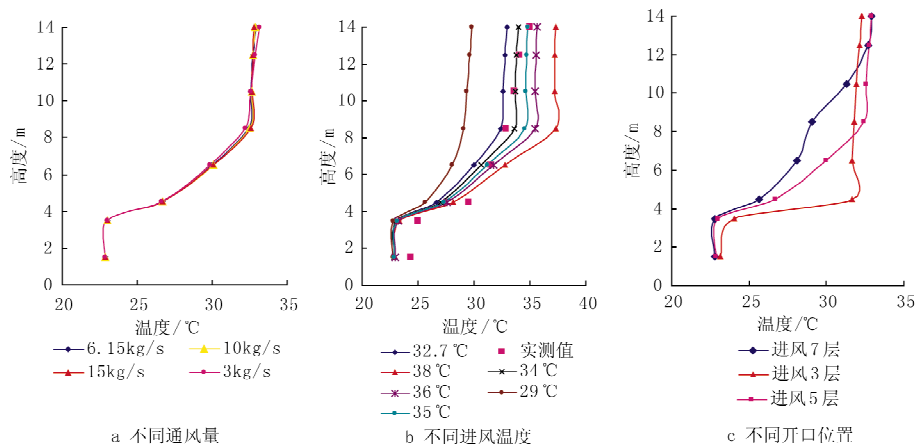


图5 自然通风特性分析图

度,尤其是非空调区平均温度作用更明显,基本呈线性变化。

4.3 若室外温度过高,高于室内非空调区平均温度时,不宜采用上部开口自然通风形式,会增加建筑上部的热负担。

4.4 提升开口位置,有效地避免了进风对空调区温度场的影响,且利用通风带走建筑上部滞留的剩余热量。

参考文献:

- [1] Wang Xin, Huang Chen. Research on vertical temperature distribution of hybrid ventilation in an atrium building by mathematical model [C]// Beijing ICR2007, 2007
- [2] Togari S, Arai Y, Miura K. A simplified model for

的影响较明显,基本呈线性变化。但在室外温度过高时,不易采取自然通风方式。对于生态楼,室外温度超过 35 °C 后,由于自然通风携带热量过多,在通风带走滞留在建筑上部热量的同时,也带进了大量热量,反而增加了建筑上部的热负担。

3.3 不同开口位置对竖直温度的影响

分别选择图 2 中 Block3, Block5, Block7 三个位置作为进风口,排风口置于 Block8。如图 5c 所示,开口位置过低时,因进风温度高于室内空调区温度,一方面影响了空调区温度,另一方面造成空调区与非空调区之间分层面温度过高。因此,提升开口位置,可以有效地避免进风对空调区温度场的影响,同时可以利用通风带走建筑上部滞留的剩余热量。

4 结论

4.1 建筑上部开口形成的自然通风有利于排走室内上部的滞留热,降低非空调区平均温度。

4.2 进风温度与自然进风量相比,对室内竖直温

predicting vertical temperature distribution in a large space[G]// ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 84-90

- [3] 黄晨,李美玲,邹志军,等. 大空间建筑室内热环境现场实测及能耗分析[J]. 暖通空调, 2000, 30(6): 52-55
- [4] Wang Xin, Huang Chen. Site measurement and analysis of indoor thermal environment in a large space building in typical seasons[C]// 2003 HVAC forum in China and Japan, Shanghai, 2003
- [5] Linden P F, Lane-Serff G F, Smeed D A. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990 (212): 309-335
- [6] 王昕,黄晨,曹伟武. 大空间建筑居留区空调射流与室内羽状气流作用机理研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(1): 67-71
- [7] 黄晨,李美玲. 大空间建筑室内表面温度对流辐射耦合换热计算[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(4): 322-327