

基于多节点模型的大空间垂直温度分布研究

刘昊儒, 黄 晨, 王 昕
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 针对大空间下送中回气流组织室内热环境,以室内空气为研究对象,通过在垂直方向上分层建立能量平衡方程与质量平衡方程,建立多节点温度求解模型,并利用大空间缩尺模型稳态环境实验予以验证,通过 4 个工况验证结果可知,各空气温度的理论计算值与实验值的最大绝对误差不超过 3%,平均误差为 1.4%。

关键词: 分层空调; 下送中回; 多节点; 垂直温度分布
中图分类号: TU 83 **文献标志码:** A

Application of Multi-Zone Model in Calculating the Indoor Air Temperature of Large Space Buildings

LIU Haoru, HUANG Chen, WANG Xin
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Focusing on the study of indoor thermal environment under the air distribution of low supply and middle return in large spaces, an energy balance equation and mass balance equation were built to analyze each module in order to get the air temperature in multi-node. Experimental verifications for the calculation results of four working conditions were carried out by using the scale model of a large space laboratory. As shown by the results, the absolute value of maximum error between theoretical and experimental values of air temperature in respective areas is 3%, and the average error is 1.4%.

Keywords: stratified air conditioning; low supply and middle return; multi-node; vertical distribution temperature

大空间建筑的特征是空间高度大于 5 m、体积大于 10⁴ m³,在公共建筑方面主要指影院、音乐厅、大会堂、体育馆及展览馆等建筑,在工业建筑中也有大型的车间。大空间建筑由于高度较高,如采用全室空调,则能耗较大,因此,一般采用分层空调的形式。分层空调通过气流组织的设计,将室内空间在垂直方向上分为上部非空调区和下部空调区,空气调节的作用主要是满足下部空调区的设计要求,具有很

收稿日期: 2016-08-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278302)
第一作者: 刘昊儒(1991-),男,硕士研究生。研究方向:大空间室内热环境。E-mail:18117440382@163.com
通信作者: 黄 晨(1958-),女,教授。研究方向:建筑环境与通风、建筑节能。E-mail:hcyhyw@163.com

好的节能效果.目前分层空调除了最常用的侧面喷口射流送风形式外,下部送风中回风气流形式的应用逐渐增多.由于下送中回风气流形式的空调送风首先进入人员活动区,空调区空气品质良好,同时具有改善室内空气品质的优点.近年来,无论是民用还是工业用的大空间建筑,下送中回分层空调的应用越来越广泛.

与空气温度较均匀的普通建筑不同,大空间建筑室内空气温度随高度变化显著.大空间室内垂直温度分布是分层空调研究的重点.一方面,垂直温度分布很大程度上决定了室内环境的热舒适性^[1];另一方面,垂直温度分布对于室内空调负荷影响很大.垂直温度梯度过大,固然空调区温度能满足人体热舒适性的要求,但过高的非空调区温度会增加对空调区的转移热^[2].因此,垂直温度分布的研究对于分层空调节能具有重要的意义.

目前,国内外对垂直温度分布特性的研究主要有3种方法:基于计算流体力学的数值模拟方法、基于质量能量平衡理论的区域模型、基于现场实测的实验研究或模型实验.区域模型研究的方法是通过将房间划分为有限个宏观区域,依据区域间的质量能量流动,建立区域间平衡方程,来探究室内温度分布的情况.其中,比较典型的为多节点模型和Block模型.

Block模型^[3-4]是一种针对建筑墙体规则的高大空间建筑室内垂直温度分布预测的区域模型,该模型是在温差驱动壁面流、区间流动与温差传热等子模型的基础上建立起来的.其基本思想是:室内空气温度在水平方向上均匀一致,将室内空气体积按其传热性质不同在垂直方向上划分成多个控制体,通过对各个控制体建立空气质量和能量平衡方程以求解区间质量流量与各控制体温度,进而求解空调负荷等问题.Block模型在计算室内垂直温度分布的研究中应用广泛,但是,其子模型过多,计算涉及参数繁多,建筑墙体非规则时模型复杂,此外,计算过程中需要进行流动方向判断,因而对计算过程要求很高.

节点模型与Block模型相比,具有模型简单、计算方便的特点.节点模型忽略了壁面流子模型,在气流组织已知的情况下空气流动方向确定.Li^[5]针对普通层高采用置换通风的房间建立了四节点模型(地板温度、地板附近空气温度、屋顶温度及屋顶附近温度分别为一个节点).四节点模型考虑了屋顶附近空气温度以及地板附近空气温度,相

对于普通建筑单一的室内温度,四节点模型计算出的室内温度更加贴近于实际情况.但是,由于其只对屋顶及地面附近进行了分区,而对于室内依然当成一个整体,难以较好地描述大空间空气垂直温度分层特性.Huang等^[6]建立了带热源的多节点模型,解析了自然通风作用下的大空间垂直空气温度分布,获得了比四节点模型更为吻合实验的结论.

针对下送中回分层空调形式,本文将多节点模型应用于大空间建筑,将目标建筑在垂直方向上划分为多个温度不同的区域,建立大空间下送中回分层空调垂直温度多节点计算模型,为下送中回分层空调负荷计算方法提供基础.本文在此模型中对几个工况进行了理论计算,得到了不同参数影响下的室内空气垂直温度分布结果,并在大空间缩尺模型实验室进行相应的实验验证.

1 多节点模型

多节点模型基本思想是:首先将建筑在垂向方向上划分为若干个区域,假定各区域水平方向上温度分布均匀,并将各区域看作一个温度节点^[7],在此基础上,将大空间建筑室内各层空气换热简化为空气层间温差传热和因送风引起的机械流动携带的能量交换共同作用.通过分析研究各个区域间空气的质量流动和能量传递的情况,建立质量与能量平衡方程,对空气的各区域节点温度进行计算.

1.1 物理模型

建筑模型如图1所示,房间气流形式为下送中回系统.回风口及以下区域为空调区,在垂直方向上分为 n 个区域.回风口之上的区域定义为非空调区,并在垂直方向上分为 m 个区域,每个区域中心的特征参数为该区域节点参数.

1.2 理论模型建立

在下送中回气流组织作用下的的大空间建筑中,空气受机械通风和空气温差引起的浮升力的共同作用.但由于机械通风对空气影响较大,因此,在本文无热源的模型设计时热羽流的影响忽略不计.根据质量守恒原理,各区域进、出流量和为零.设空调区的空气流动与置换送风类似,各区域进入流量与流出流量均相等,流动方向为自下而上的单向流.回风区一部分空气进入回风口,另一部分流入非空调区,也就是空调区相邻的非空调区流入回风区的风量.在非空调区,各区域空气流动为双向流.一方面,空

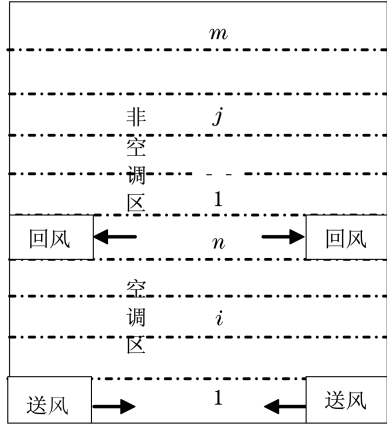


图1 实型建筑示意图

Fig.1 Structure of the multi-zone model

气受回风口的作用自上而下流动;另一方面,部分空气由空调区自下而上流入,这两部分的空气流量相等.分界面处上升和下降空气流量相等.非空调区空气流动受回风口的影响较大,越高层的区域,气体流动越弱.文献[8]的空气龄实验结果指出,采用下送中回气流组织的分层空调形式,其非空调区空气龄在垂直方向上随着高度的增加而增加,屋顶处的空气龄远大于回风口附近的空气龄.因此,本文假定在非空调区,从回风层到屋顶的空气流量呈线性递减,认为屋顶区域为热滞留区,气体质量流量为零.非空调区 j 区域流通的质量流量

$$G_j = G_s \frac{m-j}{m} \quad (1)$$

式中, G_s 为送风量.

分析图2所示的非空调区 j 区域,其热量得失为:区域空气与围护结构间的对流换热、与上下相邻区域因温差引起的传热、与上下相邻区域因流动携带的热量、 j 区域内热源的对流散热.根据能量守恒原理,各换热之和为零(假定区域得热为正),便可获得该区域热量平衡方程式.分析图3所示空调区 i 区域,其热量得失与非空调区相同,但对于送风区域或回风区域,则还存在送风或回风携带的热量.

1.3 模型的建立及求解

根据上述模型列出送风层、空调区 i 区域、回风层(n 区域)、非空调区 j 区域、屋顶层(m 区域)的能量平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & \alpha_{1,1}(\theta_{1,1} - T_{1,1})F_{1,1} + \alpha_f(\theta_f - T_{1,1})A + \\ & C_B(T_{1,2} - T_{1,1})A - G_s c_p \rho T_{1,1} + \\ & G_s c_p \rho T_s + \beta Q_{1,1} = 0 \\ & \alpha_{1,i}(\theta_{1,i} - T_{1,i})F_{1,i} + C_B(T_{1,i+1} + \end{aligned} \quad (2)$$

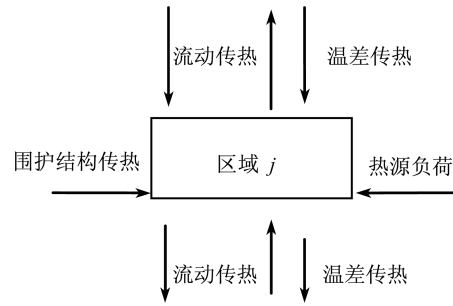
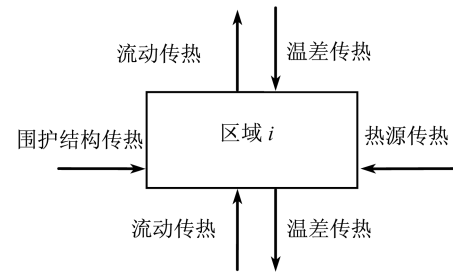
$$T_{1,i-1} - 2T_{1,i})A + G_s c_p \rho (T_{1,i-1} - T_{1,i}) + \beta Q_{1,i} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{1,n}(\theta_{1,n} - T_{1,n})F_{1,n} + C_B(T_{2,1} + \\ & T_{1,n-1} - 2T_{1,n})A + G_s c_p \rho (T_{1,n} - T_{1,n-1}) + \beta Q_{1,n} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{2,j}(\theta_{2,j} - T_{2,j})F_{2,j} + C_B(T_{2,j+1} + \\ & T_{2j,1} - 2T_{2,j})A + \frac{m-j}{m} G_s c_p \rho \cdot \\ & (T_{1j,1} - T_{2,j}) + \frac{m-j-1}{m} G_s c_p \rho \cdot \\ & (T_{2,j+1} - T_{2,j}) + \beta Q_{2,j} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{2,m}(\theta_{2,m} - T_{2,m})F_{2,m} + \alpha_c(\theta_c - T_{2,m})A + \\ & C_B(T_{2,m} - T_{2,m-1})A + \beta Q_{2,m} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:下标 1,2 分别表示空调区、非空调区,等式左边第 2 项表示空气层;下标 f,c 分别表示地板和屋顶;下标 S 表示送风参数; α, θ, T, F, Q 分别表示表面对流传热系数、壁面温度、空气温度、围护结构墙体面积、热源功率,其单位分别为 $W/(m^2 \cdot K), ^\circ C, ^\circ C, m^2, W$; A 为建筑面积, m^2 ; C_B 为温差传热系数,取 $2.3 W/m^2$ [9]; G 为空气质量流量, kg/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; β 为热源功率对流比例系数[9]; c_p 为空气的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$.

图2 非空调区第 j 区域物理模型热平衡示意图Fig.2 Heat balance model of zone j 图3 空调区第 i 区域物理模型热平衡示意图Fig.3 Heat balance model of zone i

将上述各区域空气热平衡方程写成矩阵形式:

D_{11}^{11} $\cdots$ D_{1i}^{11} $\cdots$ D_{1n}^{11} $\cdots$ D_{2j}^{11} $\cdots$ D_{2m}^{11}

$\vdots$

D_{11}^{1i} $\cdots$ D_{12}^{1i} $\cdots$ D_{1n}^{1i} $\cdots$ D_{2j}^{1i} $\cdots$ D_{2m}^{1i}

$\vdots$

D_{11}^{1n} $\cdots$ D_{1i}^{1n} $\cdots$ D_{1n}^{1n} $\cdots$ D_{2j}^{1n} $\cdots$ D_{2m}^{1n}

$\vdots$

D_{11}^{2j} $\cdots$ D_{1i}^{2j} $\cdots$ D_{1n}^{2j} $\cdots$ D_{2j}^{2j} $\cdots$ D_{2m}^{2j}

$\vdots$

D_{11}^{2m} $\cdots$ D_{1i}^{2m} $\cdots$ D_{1n}^{2m} $\cdots$ D_{2j}^{2m} $\cdots$ D_{2m}^{2m}

$\begin{bmatrix} T_{11} \\ \vdots \\ T_{1i} \\ \vdots \\ T_{1n} \\ \vdots \\ T_{2j} \\ \vdots \\ T_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ \vdots \\ B_{1i} \\ \vdots \\ B_{1n} \\ \vdots \\ B_{2j} \\ \vdots \\ B_{2m} \end{bmatrix}$

(7)

式中:左侧矩阵中 D 的数字上标表示空气层,下标表示该空气层中节点温度的系数,例如, D_{1i}^{1i} 为第 $1i$ 层方程中第 T_{1i} 的系数;等号右侧矩阵表示该空气层平衡方程的常数项部分。

求解上述矩阵便得到空调区各区域温度 T_{1i} 和非空调区各区域温度 T_{2j} 。

在回风口处的热平衡方程为

$$\frac{m-1}{m}G_S c_{p1} \rho T_{21} + \frac{1}{m}G_S c_{p1} \rho T_{1n} = G_S c_{p1} \rho T_h \tag{8}$$

通过式(8)可求得回风温度 T_h ,为空调负荷计算奠定了基础。

2 模型验证

2.1 实验介绍

实验室的东西长 4.9 m,南北宽 3.5 m,高 2.1 m,自 1.5~2.1 m 为坡屋顶.实验室气流形式为下送中回,在实验室南北侧各布置 3 个送、回风口.送风口为落地布置的柱状送风口,回风口位于送风口上侧离地面高 1.1 m 处.实验室四周墙体及屋顶都贴有发热量可控的碳晶电热膜,用来模拟室外传热量,根据此特性,多节点模型中 β 取 0.3^[10].实验中设有中心测点、东侧测点和南侧测点,以保证室内温度测量的准确性,在垂直方向上以 0.1 m 为间隔设置测点.同时,实验室各壁面上布置了壁面温度测点,可用于计算内表面对流传热系数,进而得到室内空气得热量.如图 1 所示,在垂直方向上将实验室分为 9 个区域,考虑到实验室具有坡屋顶的特点,除近屋顶 2 个区域高度为 0.3 m 外,其他各区域高度均为 0.2 m。

本文选取了 4 个典型工况对模型进行验证,实验参数如表 1 所示,其中,工况 1 为标准工况,为了探究不同因素对模型准确性的影响,工况 2 改变了送风温度,工况 3 改变了送风速度,工况 4 改变了围护结构发热量。

表 1 实验工况参数表

Tab 1 Experimental conditions

工况	送风温度/℃	送风速度/(m·s ⁻¹)	总热量/W
1	19.33	0.19	510
2	20.93	0.19	510
3	19.11	0.24	506
4	19.47	0.19	646

在模型计算中,为了得到围护结构的对流传热量,采用了根据各工况实验所得内壁面温度与待求的空气温度迭代计算的方法,求解对流传热系数 $\alpha(I)$ ^[11]。

$$\alpha(I) = A_1(\theta(I) - T(I))^{B_1} \tag{9}$$

式中: $\theta(I)$ 为壁面温度; I 为计算壁面的编号;修正系数 A_1, B_1 取值如表 2 所示。

表 2 对流传热修正系数 A_1, B_1

Tab.2 Convective heat transfer correction factor A_1 and B_1

表面朝向	A_1	B_1
垂直	1.66	1/3
水平朝上	2.26	1/3
水平朝下	1.16	1/3

在内壁面温度已测得的情况下,首先预设室内空气的温度,代入式(7)和式(9)中进行迭代计算,经多次迭代收敛后,即可得到各区域的室内空气温度。

2.2 实验结果及分析

通过采用多节点模型对上述工况进行计算,得到稳态状况下室内空气垂直温度分布,其理论计算值与实验值比较如图 4 所示。

通过 4 个工况空气温度实测值和计算值的比较分析,可知模型的计算值与实测值吻合良好,其平均误差分别为 1.42%,1.66%,1.36%,1.15%。4 个工况空气温度的最大误差为 3%。因此,采用本文所建立的下送风节点模型计算的室内空气垂直温度分布可以反映实际情况。

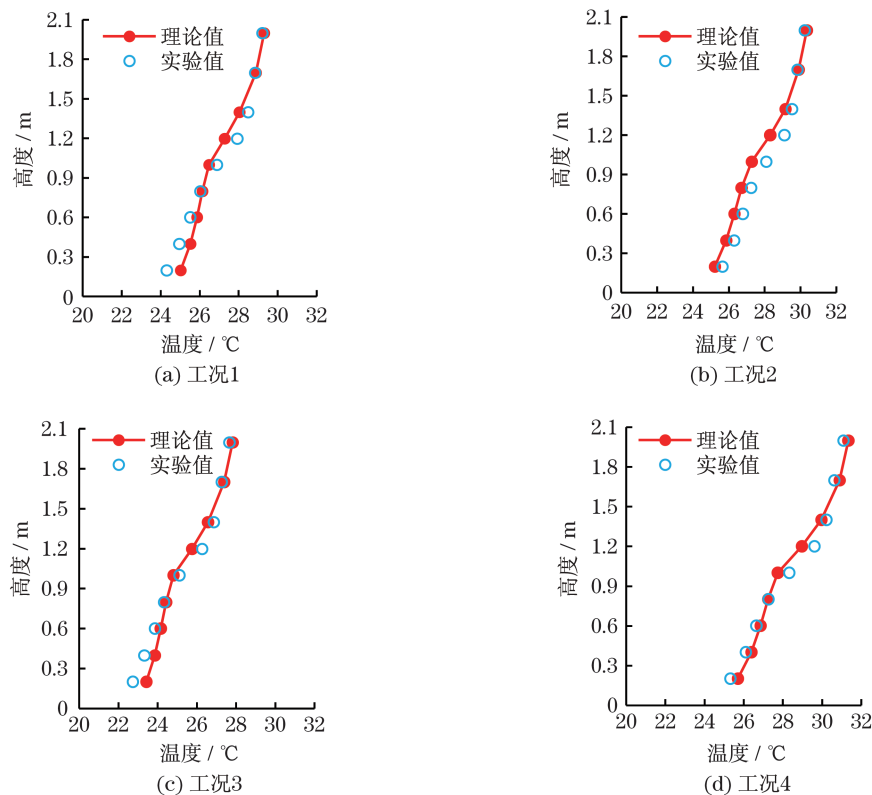


图 4 空气温度垂直分布
Fig.4 Vertical distribution of the air temperature

将依据式(8)计算得到的回风温度与实测回风温度进行对比,结果列于表 3. T_{h1} 为测量回风温度; T_{h2} 为计算回风温度.

表 3 回风温度验证 Tab.3 Verification of the return air temperature			
工况	$T_{h1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{h2}/^{\circ}\text{C}$	误差/%
1	26.56	27.08	2.0
2	27.83	28.06	0.81
3	24.63	25.51	3.5
4	28.06	28.64	2.1

由表 3 可以看出,由理论计算模型得到的回风温度与实测值吻合良好,说明采用本文所建立的多节点计算模型计算大空间下送风室内空调负荷具有可行性.

3 结 论

- a. 本文所建的多节点模型适合于不同条件下的室内空气垂直温度分布求解;
- b. 采用多节点模型计算所得的垂直方向上各层温度与实验值误差低于 3%,平均误差为 1.4%;

c. 多节点模型计算所得回风温度与实验值的最大误差为 3.5%.

本文所建模型还有一定的局限性,模型是以各层壁面温度为已知条件;在热源存在时,由其引起的热羽流对空气流动的影响还有待于考虑,其应用于实际情况还需深入研究. 本文的研究结果将为研究大空间建筑热环境提供一种新方法.

参考文献:

[1] 黄晨,李美玲. 大空间建筑室内垂直温度分布的研究[J]. 暖通空调,1999,29(5):28-33.
[2] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2008:1716-1733.
[3] 高军. 大空间分层空调温度场与负荷的多区热质平衡模型研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.
[4] AXLEY J W. Surface-drag flow relations for zonal modeling[J]. Building and Environment,2001,36(7): 843-850.
[5] LI Y G. Buoyancy-driven natural ventilation in a thermally stratified one-zone building[J]. Building and Environment,2000,35(3):207-214.

(下转第 575 页)

(5):461-468.

[9] 周晓辉,姚俭,吴天魁. 基于梯形直觉模糊数的 TOPSIS 多属性决策方法[J]. 上海理工大学学报, 2014,36(3):281-286.

[10] YU J, SUBRAMANIAN N, NING K, et al. Product delivery service provider selection and customer satisfaction in the era of internet of things;a Chinese e-retailers' perspective[J]. International Journal of Production Economics,2015,159:104-116.

[11] 徐士东,耿秀丽,叶春明. 考虑定量 KANO 分析的产品功能需求优化设计[J/OL]. 计算机集成制造系统, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3619.TP.20151030.1647.010.html>.

[12] 孟庆良,何林. 基于模糊 KANO 模型的质量属性分类方法及其应用[J]. 工业工程,2013,16(3):121-125.

[13] JI P, JIN J, WANG T, et al. Quantification and integration of Kano's model into QFD for optimising product design[J]. International Journal of Production Research,2014,52(21):6335-6348.

(编辑:丁红艺)

(上接第 567 页)

[6] HUANG C,MA C,WANG X, et al. Multi-node model for vertical temperature distribution in atrium with natural ventilation [J]. Journal of Central South University of Technology,2007,14(S3):197-201.

[7] 李博汉,卢玫. 基于相关度的蚁群优化算法对内热源位置的识别[J]. 上海理工大学学报,2015,37(3):225-232.

[8] 王欢. 基于缩尺模型的大空间下送中回空气流动研究[D]. 上海:上海理工大学,2014.

[9] ARAI Y,TOGARI S,MIURA K. Unsteady-state thermal analysis of a large space with vertical temperature distribution[J]. ASHRAE Transactions,1994,100(2):396-411.

[10] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[11] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣. 传热学[M]. 5 版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

(编辑:石 瑛)