

文章编号:1673-2049(2006)04-0079-05

建筑室内环境数值模拟中的耦合方法

王 怡, 刘国华, 陈 靖

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:针对建筑室内环境模拟中的耦合特点,同时考虑建筑围护结构中的导热与室内空气的对流问题,详细分析了建筑室内空气流动及建筑围护结构传热过程的物理数学描述方法,对热流耦合特性的数值计算方法做了探讨;建立了宏观描述和微观描述的耦合模拟模型,同时对这两种耦合模型的优缺点做了定性讨论;最后利用 CFD 软件把建筑围护结构传热与室内流动作为整体进行了微观耦合的数值模拟。结果表明,微观耦合模型并不适合室内环境的通风与热耦合问题的计算,有待于宏观耦合模型的研究及实用高效热耦合分析软件的进一步开发。

关键词:室内环境;数值模拟;耦合方法;网络模型

中图分类号:TU834.5

文献标志码:A

Coupling Method by Numerical Simulation of Building Indoor Environment

WANG Yi, LIU Guo-hua, CHEN Jing

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of
Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to show the coupling characteristic of building indoor environmental simulation, authors considered both building structures' heat transfer problem and air flow problem in the room. The detailed physical and mathematical description methods of building indoor environment were analyzed, and its computational method was discussed. The coupling models and simulation method of the macro-coupling and micro-coupling models were introduced. Furthermore, the merits and demerits of two models were analyzed. Lastly as the fulfillment procedure of the micro-coupling model, CFD was used to simulate the building indoor environment, while the calculation range was extended to the exterior surface of wall. The results show that micro-coupling model is not fit for simulating the heat transfer and air flow coupling problem in the building, and there is urgently needing to develop an effective heat coupling analysis software based on macro-coupling model.

Key words: indoor environment; numerical simulation; coupling method; network model

0 引 言

在对导热或对流换热问题进行分析或数值计算时,对固体边界一般都做出了规定,即所谓的 3 类边

界条件:给定边界温度(Dirichlet 问题)、给定边界上的热流(Neumann 问题)、给出壁面温度与热流的关系(Robin 问题)。在讨论建筑室内环境的对流换热问题时,热边界受到流体与壁面之间相互作用的制

收稿日期:2006-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50508035);西安建筑科技大学基础研究基金项目(JC0506)

作者简介:王 怡(1970-),女,陕西西安人,副教授,工学博士,E-mail:wangyicn@hotmail.com。

约,边界条件无法预先规定,这时无论界面上的温度还是热流密度都应看成是计算结果的一部分,而不是已知条件。在不考虑耦合问题时,一般假定墙体为零厚度的固体边界,给出简单的定壁面温度或定热流边界。

为了准确地描述建筑室内环境,必须同时考虑建筑围护结构中的导热与室内流体中的对流:一类是两者在流体与固体的边界上相吻合,由热量交换过程动态地定义热边界条件,而不是作为预先规定条件处理热边界的问题,称为物理区域耦合问题(微观描述);另一类是计算过程中把流动计算模型及传热计算模型耦合起来,称为计算模型耦合问题(宏观描述)。

1 宏观描述耦合模型

宏观描述耦合模型是利用流动计算模型(网络法等)及传热计算模型从宏观角度对建筑室内通风及传热进行分析。网络法把整个建筑物作为一个系统,其中每个房间作为一个区(或网络节点),认为各个区内空气具有恒定的温度、压力和污染物浓度(集总参数模型),门、窗等开口视为通风路径的阻力单元,各个区通过各种阻力单元相连,然后利用质量、能量守恒等方程计算风压和热压作用下的自然通风量;而传热计算模型采用有限差分法、变换法、谐波反应法、Z 函数反应法等方法计算维护结构的传热计算;最后通过热平衡方程等把两模型相互耦合。本文中笔者给出一种具体模型的描述。

宏观描述耦合模型计算方法简单,易于被设计人员掌握,计算量相对较少^[1],但由于网络法不考虑房间内部的空气流动形态对通风效果的影响,所以无法给出房间内部详细的空气流动情况分析。宏观描述耦合模型根据耦合边界信息传递方式的不同又有顺序耦合及乒乓耦合等常见的耦合方法。

1.1 数学描述

1.1.1 通风流动网络模型

由流体力学理论可知,建筑物开口的空气流量可用能量守恒关系所得的通用幂定律形式表示

$$Q_i = K_i (\Delta P)^n \quad (1)$$

式中: K_i 为通风阻抗, $K_i = C_{di} A_i (2/\rho)^{\frac{1}{2}}$, ρ 为流体密度; ΔP 为开口两侧压力差; n 为通风幂指数, $n=0.5$ 。对建筑中有 j_m 条流路的第 m 个区域由质量守恒和式(1)可得

$$\sum_{i=1}^{j_m} K_{i_m} |P_{im} - P_m|^{0.5} \text{sgn}(P_{im} - P_m) = 0 \quad (2)$$

式中: K_{i_m} 为第 i_m 条流路的通风阻抗; P_{im} 为与第 m 个区域相连的相邻节点压力; P_m 为第 m 个区域的压力。

对一有 q 个区域,每个区域又有 j_m 条流路的建筑,由式(2)可得

$$F(P_m) = \sum_{m=1}^q \sum_{i_m=1}^{j_m} K_{i_m} |P_{im} - P_m|^{0.5} \cdot \text{sgn}(P_{im} - P_m) = 0 \quad (3)$$

对非线性方程式(3)一般用 Newton-Raphson 迭代法求解可得各区域的压力,再代入式(1)可得到各区域的通风量。

1.1.2 热模型

描述墙体温度分布的一维非稳态的导热微分方程为^[2]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

式中: a 为墙体导温系数; λ 、 c 分别为墙体的导热系数和比热容; τ 为时间变量; T 为时间函数; x 为几何变量。

初始条件在开始一段时间影响较大,以后逐渐减弱,如果只要最终解,可以人为假定它的初始条件。根据完整描述建筑围护结构热过程的边界条件及微分方程,采用控制容积法离散控制方程,边界节点采用附加源项法处理就能得到一系列节点的线性方程组

$$a_p T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (5)$$

式中: a_p 为自身影响系数; a_E 、 a_W 分别为左右相邻节点影响系数; T_P 、 T_E 和 T_W 分别为本节点及左右相邻节点的温度; b 为内热源有关系数。各系数具体形式与边界条件及微分方程有关,求解线性方程式(5)就能得到围护结构温度分布。

1.2 耦合方法

1.2.1 顺序耦合

顺序耦合是模拟室内环境最直接的方法,原理如图 1 所示^[3]。给定一室内温度由流动模型方程计算通风量,然后将计算出的通风量代入热模型方程中计算温度。计算出的温度并不代入流动模型方程中,而是就此终止计算。该方法会产生很大误差。

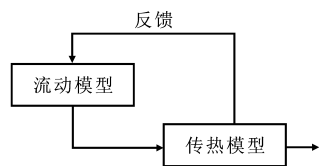


图 1 顺序耦合

Fig. 1 Sequential Coupling

可以利用循环,将计算的房间温度与假定的温度相比较,如果误差超出限定值,则用计算的温度进行下

一轮迭代,直到满足误差限定值,然后进入下一时间步长进行迭代,用此方法对典型计算季节的气象参数进行计算,可以得到温度及通风量的周期变化曲线,从而达到对室内环境的模拟。

1.2.2 乒乓耦合

在第1个时间步长内,给定一初始室内温度,由流动模型方程计算出通风量,然后将计算结果代入热模型方程中,计算出的温度再代入流动模型方程中,计算出第2个时间步长的通风量,依次类推。该方法计算速度快,但产生的误差也较大。用此方法对室内环境模拟时,室温为渐变过程,而且时间步长不宜过大,原理如图2所示。

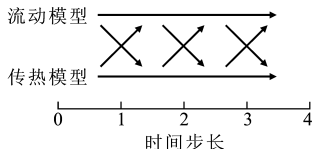


图2 乒乓耦合

Fig. 2 Ping-pong Coupling

宏观耦合模型虽然不能得到瞬时区域内部的详细信息,但流动过程采用 Network 模型可大大减少计算量,比微观耦合方法更适合大的计算区域或更长时间的非稳态问题的模拟,并能得到室内参数随时间的变化过程曲线。

2 微观描述耦合模型

微观描述耦合模型是基于计算流体力学原理对室内环境参数进行计算,即 CFD 方法。CFD 方法是从微观角度出发,针对某一区域,利用质量、能量及动量守恒等基本方程对流场模型进行求解,分析其空气流动状况。通过 CFD 提供的直观、详细的信息,便于设计者对特定的房间或区域进行通风设计策略调整,使之更有效地实现模拟。与宏观描述耦合模型相比,微观描述耦合模型由于要离散整个计算区域,节点方程多,计算量较大。

微观描述耦合模型根据求解区域的不同可分为分区求解法、整场求解法两大类^[4]。本文中先介绍耦合过程的数学描述,然后分别叙述其原理。

2.1 数学描述

2.1.1 流体流动

假定建筑围护结构和室内流体的物理特性与温度无关并忽略房间内辐射换热。进行 Boussinesq 假设后的不可压缩流体流动 N-S 方程如下^[5-6]:

连续性方程

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (6)$$

动量方程

$$\frac{\partial(UU)}{\partial X} + \frac{\partial(VU)}{\partial Y} + \frac{\partial(WU)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\sqrt{R_a/P_r}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \quad X \text{ 方向} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(UV)}{\partial X} + \frac{\partial(VV)}{\partial Y} + \frac{\partial(WV)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\sqrt{R_a/P_r}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \quad Y \text{ 方向} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(UW)}{\partial X} + \frac{\partial(VW)}{\partial Y} + \frac{\partial(WW)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\sqrt{R_a/P_r}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) + \theta \quad Z \text{ 方向} \quad (9)$$

能量方程

$$\frac{\partial(U\theta)}{\partial X} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial Y} + \frac{\partial(W\theta)}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{R_a P_r}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \quad (10)$$

控制方程无因次特征参数取:特征长度 L , 房间热壁面保持恒温 T_K , 房间冷壁面保持恒温 T_C , 特征温度 $\Delta T = T_K - T_C$, 特征速度 NL ($N^2 = g\beta\Delta T/L$), 其他无因次参数定义如下

$$\left. \begin{aligned} (X, Y, Z) &= (x, y, z)/L \\ (U, V, W) &= (u, v, w)/(NL) \\ \theta &= (T - T_C)/\Delta T \\ P &= p/[\rho(NL)^2] \\ P_r &= \nu/a \\ R_a &= g\beta\Delta TL^3/(\nu a) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: g 为重力加速度; ν 为流体的动力粘度; β 为流体热膨胀系数, $\beta = 1/T_C$ 。

2.1.2 固体导热

围护结构导热方程为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = 0 \quad (12)$$

由式(12)可见, 固体导热方程仅需确定温度这一标量, 而流动方程却需解含多个变量的矢量, 所以导热问题相对流体流动问题而言, 其计算规模相对较小, 计算所需的存储空间及计算花费都要小得多。

2.2 耦合方法

2.2.1 分区求解

分区求解法是把整个求解区域划分为流体区域与固体区域两部分, 然后分别建立方程, 并要求流体与固体交界面满足“界面方程”条件: ①温度相等, 界面上网格划分相同或网格节点重合, 自动满足界面处温度相等条件 $T_{w1} = T_{w2}$; ②热流平衡 $q_{w1} = q_{w2}$; ③耦合对流传热边界 $-(\lambda\partial T/\partial l)_1 = [h(T_w -$

T_f)]₂,本文中假设区域 1 为固体,区域 2 为流体, l 为壁面的外法线。最后假定耦合边界的温度分布,对一个区域进行求解,得到边界信息后传给另一区域进行计算,可得到新的耦合边界信息,根据新的信息又对第一个区域进行计算,重复直到收敛。此解法的界面方程也比较复杂,用于处理复杂室内环境问题(如流体与固体的界面复杂、流体与固体分散分布等)的能力有限,原理如图 3 所示。这种计算方法的收敛快慢取决于边界耦合信息的传递,与块结构化网格原理相似,只是物理分区概念不同。

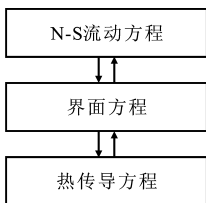


图 3 分区求解
Fig. 3 Separated Region Solution

2.2.2 整场求解

整场求解又称直接耦合,它是求解耦合问题的有效方法,这时把不同区域中的热传递过程组合起来作为一个统一的换热过程来求解,将不同的区域流动模型方程和热模型方程合并,采用通用控制方程组同时解出,区别仅在广义源项和广义扩散系数的不同。该方法比分离式求解方法更加精确,省去了不同区域之间的反复迭代过程,使计算时间显著缩短^[7]。整场求解已成为计算耦合问题的主导方法,但由于单位时间步长计算量大,从而对计算机要求很高,因此只适合计算区域小的问题(如电子器件的散热问题、单体房间的模拟等),原理如图 4 所示。

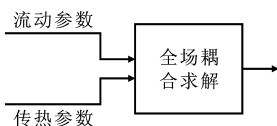


图 4 整场求解
Fig. 4 Direct Coupling

3 模拟解法的应用

目前按主要功能的不同分析建筑通风特性和热特性的常用软件有: CONTAMW、COMIS、Lesocool 与 NewQUICK、TRNSYS、BLAST 等。由于软件本身的局限性及自然通风与热传递相互影响的复杂性,至今建筑热过程和通风过程耦合的计算工具还不多,因而在建筑环境的导热与对流换热的耦合研究过程中,为了全面地预测建筑热特性和通风特性之间的关系,要借助于现有的分析流体流动和固体导热的一些软件,将通风模拟软件与热模拟软件进行耦合,开发出适用于热耦合分析的软件。

3.1 宏观描述耦合模型的实现

图 5 为宏观模型求解思想的流程^[8]。初始化变量后(假定室内温度等),通过质量和能量守恒原理迭代求得流动特性,把流动特性传入传热模型求流

体温度,不断更新变量的值,直到热平衡条件满足,进一步模拟一个完整的设计周期就能得到通风量、温度等参数随时间的变化图^[9-10]。这种方法比先计算传热模型更为常用,文献[1]中在此思想上做了有意义的研究。

目前关于耦合求解软件仍然很少,且都有一定的局限性,并不能完全适合多种问题的研究需要,因此,需在现有的基础上进一步开发高效热耦合分析软件。

3.2 微观描述耦合模型的实现

本文中用通用 CFD 流动软件模拟室内气流组织的数值计算,将计算范围扩至建筑围护结构外表面,把建筑围护结构传热与建筑室内环境作为整体进行计算与分析,将固体与流体的界面特性参数采用调和平均处理,以满足界面处的热流平衡要求,固体区域作为粘度无穷大的流体来保证其速度为零。

本文中假设研究对象为 4 m×3 m 的房间二维简化模型,其中左侧有一厚度为 1 m 的墙体,其他 3 边假定墙体为零厚度的固体边界,墙体左边热壁面保持定温 $T_w = 305$ K,墙体右边的壁面为耦合边界,房间右侧冷壁面保持定温 $T_c = 295$ K;其他壁面则为绝热条件;速度在壁面处均取无滑移边界条件: $u = v = w = 0$ 。由于导热系数的不同,在不同的求解区域产生不同的温度梯度,按照误差整场均匀化有利加速收敛的思想,应建立不同密度的网格。笔者认为此准则性原理有待进一步优化,计算中采用了自适应网格技术,结果如图 6 所示。

室内自由对流流动完全是因温度不同而引起,速度场由温度场产生反过来又影响温度场,二者相互耦合影响,如图 6 所示。由于热壁面的影响,流体沿着左边热墙体壁面向上,右侧冷壁面作用效果相反,使气流冷却下沉,从而产生如图 7 所示的右旋驱动流,在墙体和室内空气处的耦合边界温度和热流满足连续条件,用 CFD 软件求解整场问题完全符合客观的物理过程,但在实际的通风模型中都有进出口条件,进行数值求解前就需给出定义(人为给定假设),这就限制了此法在通风计算中的有效性。

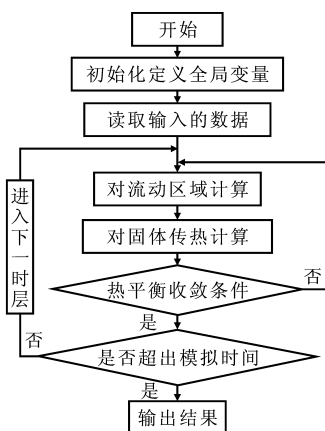


图 5 耦合流程
Fig. 5 Flow of Coupling

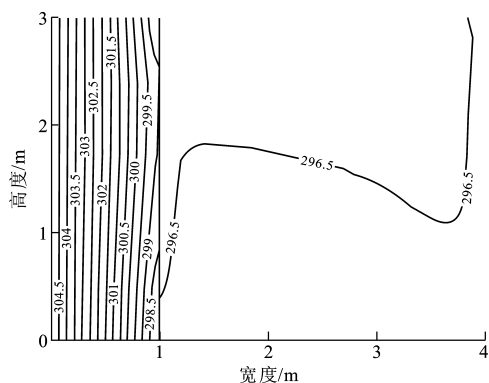


图6 温度等值线(单位:K)

Fig. 6 Contour of Temperature(Unit:K)

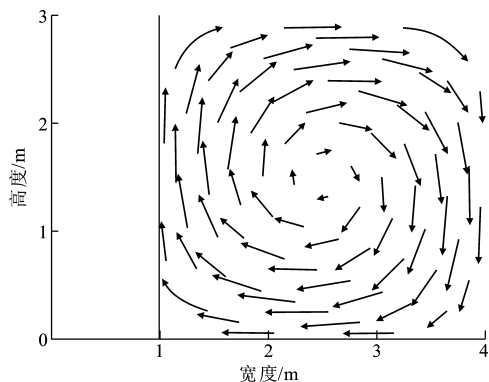


图7 速度矢量

Fig. 7 Vector of Velocity

4 结 语

笔者对建筑室内环境的耦合问题做了详细的分析,对耦合问题的宏观描述及微观描述思想进行了介绍,并在此基础上叙述了宏观描述求解思想在软件开发上的实现,对开发高性能的热耦合模拟软件有重要的意义,最后在CFD软件中应用微观模型求解思想,把建筑围护结构传热与室内流动作为整体进行耦合求解,数值模拟结果表明,将传热与自然对流模拟的耦合概念应用于数值模拟,能直观有效地揭示室内环境中复杂的空气流动状态与传热传质行为规律,但由于假设限制了该方法在通风计算中的有效性,因此有待进一步研究和开发实用、高效的热耦合分析软件。

参考文献:

References:

[1] 王 怡,刘加平. 居住建筑自然通风房间热环境模拟方法分析[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(3):1-4.
WANG Yi, LIU Jia-ping. Simulation Methods in Nat-

ural Ventilated Residential Building[J]. Building Energy & Environment,2004,23(3):1-4.

[2] 王 怡. 寒冷地区居住建筑的夏季室内热环境研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
WANG Yi. Study on the Indoor Thermal Environment in Summer for Residential Building in the Cold Zone[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2003.

[3] FRANCIS A. Natural Ventilation in Building[M]. London:Science Publishers,1998.

[4] 张 玲,尹应德,汤广发,等. 共轭传热室内自然对流数值模拟研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2003,30(2):91-95.
ZHANG Ling, YIN Ying-de, TANG Guang-fa, et al. A Numerical Study of Conjugate Natural Convection in a Square Enclosure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2003,30(2):91-95.

[5] 张 玲,张 楠,汤广发,等. 共轭传热室内环境数值预测模型[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2002,29(4):93-97.
ZHANG Ling, ZHANG Nan, TANG Guang-fa, et al. Numerical Prediction Model for Indoor Environment Combined with Conjugated Conduction[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2002,29(4):93-97.

[6] 霍小平,葛翠玉. 建筑室内热环境测试与分析[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):75-78.
HUO Xiao-ping, GE Cui-yu. Analysis and Test of Thermal Environment Data in Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(2):75-78.

[7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:485-488.
TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2001:485-488.

[8] KOINAKES C J. Combined Thermal and Natural Ventilation Modeling for Long-Term Energy Assessment: Validation with Experimental Measurements [J]. Energy and Buildings,2005,37(4):311-323.

[9] AXLEY J, GROT R. The Coupled Airflow and Thermal Analysis Problem in Building Airflow System Simulation[J]. ASHRAE Transactions,1989,95(2):621-629.

[10] TUOMAAIA P, RAHOLA J. Combined Air Flow and Thermal Simulation of Buildings[J]. Building and Environment,1995,30(2):255-265.