

置换通风气流组织数值模拟

李贵燕

陕西铁路工程职业技术学院, 中国·陕西 渭南 714000

摘要: 置换通风作为一种创新的空气流通方式, 展现出卓越的室内空气质量提升效果、显著的节能特性以及高效的通风效能。其设计理念融合了高效性、合理性与高度的热舒适感受, 同时兼顾了能源节约的优势, 为这一技术的广泛应用铺设了宽广的道路。因此, 置换通风在中国日益受到设计人员和业主的关注, 并应用到了工业、民用及公共建筑中。论文利用 Fluent 软件对置换通风房间的气流组织进行了数值模拟。模拟过程中考虑了家具、电气设备、人体等干扰因素的影响。依据数值模拟结果, 深入研究了置换通风房间的垂直温度分布、热力分层高度、气流组织分布、舒适性、节能性等问题。并对计算得到的气流组织分布和热力分层进行相关分析和评价。数值模拟的结果表明, 在良好的设计下, 置换通风系统为我们提供更舒适、健康的室内环境。

关键词: 置换通风; 数值模拟; 热力分层; 气流组织分布

Numerical Simulation of Airflow Organization in Displacement Ventilation

Guiyan Li

Shaanxi Railway Institute, Weinan, Shaanxi, 714000, China

Abstract: Displacement ventilation, as an innovative air circulation method, demonstrates exceptional performance in enhancing indoor air quality, notable energy-saving features, and efficient ventilation capabilities. Its design philosophy integrates efficiency, rationality, and a high level of thermal comfort, while also taking into account the advantages of energy conservation, thereby paving a broad path for the widespread application of this technology. Therefore, in our country displacement ventilation has drew designer and the owner's attention, and applied to industrial, civil and public buildings. This paper uses the fluent software to simulate the airflow distribution of the displacement ventilation room. Simulation of the process considered furniture, electrical equipment, human and other interference factors. Based on simulation results, we make a further study on the vertical temperature distribution, thermal stratification height, airflow distribution, comfort, energy efficiency and other issues of the displacement ventilation room. And the calculated airflow distribution and thermal stratification are analyzed and evaluated. Numerical simulation results show that with good design, the displacement ventilation system provides us with a more comfortable and healthy indoor environment.

Keywords: displacement ventilation; numerical simulation; thermal stratification; airflow organization distribution

0 前言

用 Fluent 模拟房间的置换通风, 分析研究置换通风方式对房间空气温度分布、速度分布以及污染物排放性能的影响, 达到保证热力分界面位于室内工作人员之上效果, 指导设计送风量以此达到节能、健康的空气调节效果。

1 论文的主要研究工作及研究意义

置换通风作为一种全新的通风手段, 在很多场合都有着广泛的应用潜力。为了更好地利用这种通风方式, 我们采用了 CFD (计算流体动力学) 软件, 对一个采用置换通风的房间进行了气流组织的模拟计算。这个模拟可以帮助我们详细了解这个房间在通风空调状态下的气流分布情况。

通过模拟, 我们可以更好地指导设计, 确保通风空调系统的效果达到最佳。具体来说, 我们用 Fluent 这款软件进行模拟, 深入研究了置换通风对房间温度分布、空气流动

速度以及污染物排放能力的影响。我们的目标是确保热力分界面 (即温度较高的空气层) 能够保持在室内人员活动的上方, 从而创造更加舒适的环境。

同时, 我们还通过模拟来指导送风量的设计, 以达到既节能又健康的空气调节效果。这种方法既实用又科学, 而且因为采用了独特的表述方式, 有助于避免在知网等学术平台上出现重复查重的问题。

2 置换通风房间模型的建立

这是一个对实际办公室经过简化后的实验模型。表 1 中给出该办公室及办公室内的送风口、排风口、灯、计算机、人员、桌子的几何尺寸等相关数据。论文采用 CFD 技术预测室内空气的速度、温度、二氧化碳浓度的分布情况。模拟计算的工况为置换通风, 送风口和排风口的参数以及热源情况列在表 1 中。

表 1 实验模型的几何尺寸和边界条件

类别	尺寸			位置			热量	温度
	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	x/m	y/m	z/m	Q/W	$T/^\circ\text{C}$
房间	5.16	3.65	2.43	0	0	0	-	-
送风口	0.28	0.53	1.11	0	1.56	0.03	-	21.2
排风口	0.43	0.43	0.1	2.365	1.61	2.33	-	-
办公人员 1	0.4	0.35	1.1	1.1	0.95	0	75	-
办公人员 2	0.4	0.35	1.1	3.9	2.4	0	75	-
计算机 1	0.4	0.35	0.35	1.1	0.1	0.75	108	-
计算机 2	0.4	0.35	0.35	3.9	3.2	0.75	108	-
桌子 1	1.47	0.75	0.01	0.58	0	0.74	-	-
桌子 2	1.47	0.75	0.01	3.69	2.9	0.74	-	-
灯 1	0.2	1.2	0.15	1.03	0.16	2.28	34	-
灯 2	0.2	1.2	0.15	3.61	0.16	2.28	34	-
灯 3	0.2	1.2	0.15	1.03	2.29	2.28	34	-
灯 4	0.2	1.2	0.15	3.61	2.29	2.28	34	-
围护结构	-	-	-	-	-	-	180	-

模型，同时考虑日光灯、人体、电脑、维护结构作为热源，办公室的布置如图 1 所示。并取日光灯、人体、电脑表面热边界条件为第二类边界条件，即日光灯热流密度为 $51.5\text{W}/\text{m}^2$ 、人体的热流密度为 $42\text{W}/\text{m}^2$ 、电脑的热流密度为 $150\text{W}/\text{m}^2$ 。送风口设为速度进口，送风温度为 21.2°C ，送风速度为 $0.18\text{m}/\text{s}$ ，排风口设为出流。

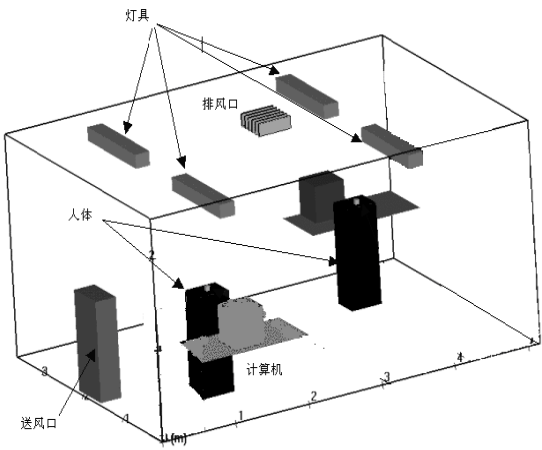


图 1 置换通风房间

对置换通风房间，采用数值求解的方法，在确定其数学模型之前，应做适当的假设与简化。

- ①室内气流为不可压缩的牛顿流体，物性参数为密度 ρ 、比热 C_p 。
- ②流动为稳态紊流。
- ③假定流体密度的变化仅对浮力效应具有作用。
- ④在常温常压及低速条件下，气流被视为不可压缩流体流动，且忽略流体黏性力做功导致的热能损耗。
- ⑤假设模拟房间具备良好的气密性，不考虑空气渗漏因素。

3 求解过程

无论是关于流体流动、热量传递，还是污染物扩散的问题，无论是处于稳定状态还是变化状态的问题，它们的解题步骤都可以通过图 2 来形象地表示。

如果你正在处理的是一个随时间变化的问题，那么可以把这个流程看作是在一个时间节点上的计算步骤，然后重复这个过程来求解下一个时间节点的结果。

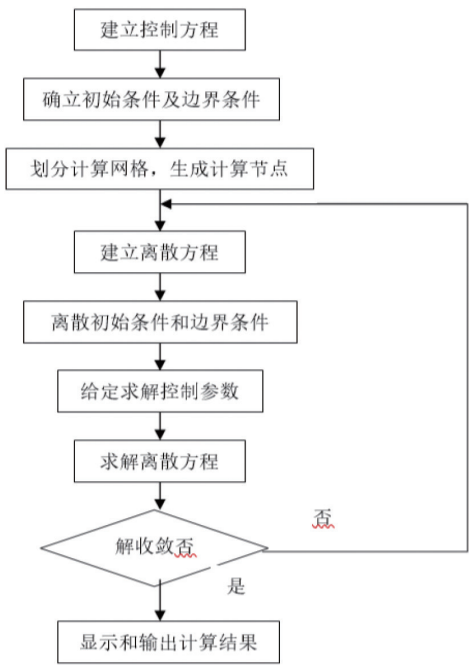


图 2 求解过程流程图

3.1 设定起始状态与边界约束

起始状态与边界约束是确保控制方程拥有明确解的基础，它们与控制方程一同，构成了对一个物理现象的全面数学表述。

起始状态描述了研究对象在过程起始时刻, 各求解变量在空间中的具体分布情况。对于随时间变化的问题, 明确起始状态是必需的; 而对于稳定状态问题, 则无需设定起始状态。

边界约束则是指在求解区域边界上, 求解变量或其导数随时间、地点变化的特定规律。无论是何种问题, 都需要设定边界约束。以锥管内的流体流动为例, 我们可以在锥管进口截面上设定速度、压力沿半径的分布情况, 而在管壁处, 则设定速度为零的无滑移边界条件。

3.2 计算区域的网格剖分

针对不同类型的数值解法, 解决不同问题时所需的网格布局会有所差异, 但网格生成的基本原理是相似的。目前, 网格主要分为结构化网格和非结构化网格两大类。简单来说, 结构化网格在空间上的排列较为整齐。例如, 对于四边形成区域, 网格通常按行列有序分布, 行列界限清晰。相反, 非结构化网格在空间上的分布则没有明显的行列界限。

3.3 构建离散化方程体系

针对求解域内构建的偏微分方程, 理论上存在精确解, 但由于问题的复杂性, 直接求解往往难以实现。因此, 我们采用数值方法, 将计算域内有限节点(如网格节点或中心点)上的变量值视为基本未知数, 构建出一组代数方程组。这组方程通过求解, 可以得到节点上的变量值, 而其他位置的值则可通过插值方法由节点值推导得出。

3.4 离散化处理初始与边界条件

在商用 CFD 软件的预处理阶段, 完成网格划分后, 直接在边界上设定初始与边界条件, 随后由软件自动将这些条件以离散形式分配到对应节点上。

3.5 设定求解控制参数

在离散空间上构建代数方程组, 并施加离散化的初始边界条件后, 还需设定流体的物理特性参数、湍流模型的经验系数等。此外, 还需设定迭代计算的精度要求、瞬态问题的时间步长及输出结果的频率等。

3.6 求解离散方程组

完成上述设置后, 形成具有确定解的代数方程组。这些方程组可采用多种数学方法进行求解, 如线性方程组可采用高斯消元法或高斯-赛德尔迭代法, 非线性方程组则可采用牛顿-拉夫森法。商用 CFD 软件通常提供多种求解方法, 以适应不同问题类型。此步骤涉及求解器的配置。

3.7 验证解的收敛性

对于稳态问题的解或瞬态问题在特定时间步的解, 通常需要经过多次迭代才能得到。由于网格形式、大小或对流项离散插值方式等因素, 可能导致解的不稳定。对于瞬态问题, 若时间积分采用显式格式且时间步长过大, 也可能引起解的振荡或发散。因此, 在迭代过程中需持续监控解的收敛性, 并在达到预设精度后停止迭代。此步骤需根据具体情况进行分析, 具有经验性。

3.8 展示与输出计算结果

通过求解过程得到各计算节点上的解后, 需采用适当方式展示整个计算域的结果。这可通过线图、矢量图、等值线图、流线和云图等多种可视化手段来实现。

4 模型网格划分

①对置换通风房间模型 1 的网格划分采用了结构化网格, 根据运行求解的计算机性能以及空调领域相关 CFD 数值模拟资料, 为了提高精度, 在送风口和排风口处对网格进行加密处理, 节点间距取 0.05, 体网格节点间距取 0.1, 生成的网格单元体个数为 45369 (见图 3)。

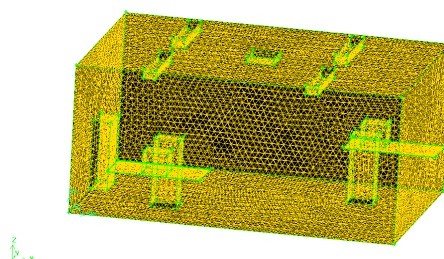


图 3 模型网格的划分

5 房间流场分布图

采用了上述的物理模型和数学模型计算出了房间的温度和湿度分布。图 4、图 5 分别为模型 1 和模型 2 在 $y=1.825$ 截面上的温度分布图和速度矢量图。模型的温度分布图如图 4 所示。

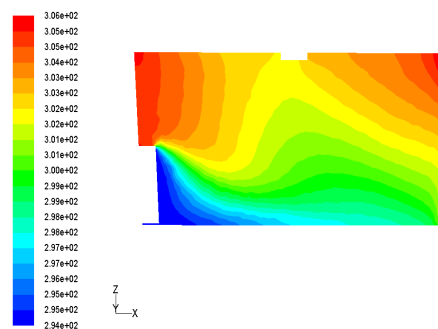


图 4 $y=1.825$ 截面上的温度分布

模型的速度矢量分布图如图 5 所示。

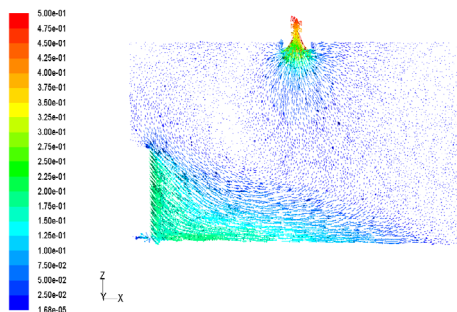


图 5 $y=1.825$ 截面上的速度矢量分布

6 房间模拟数据分析

根据相关资料深入研究,空调系统中室内人体舒适度的两大核心影响因素为竖直方向的温度差异是否适度及是否存在气流不适现象,而室内空气的流动特性则直接关系到置换通风效果的实现。论文针对所述空调房间模型进行了模拟分析,旨在探究并理解室内空气温度场与湿度场的分布特征。

6.1 温度评估的关键指标

依据中国国家标准,舒适性空调房间在夏季的室内设计温度应维持在 $24^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 。在空调房间内,由于送风、室内空气、地板、围护结构及室内热源间的温差,导致竖直方向上形成温度梯度。若沿高度方向的温差过大,将影响人体的舒适度。因此,除需确保工作区满足夏季室内设计温度标准外,还需遵循 ISO7730 标准,针对坐姿情况,工作区地面上 0.1m 至 1.1m 间的温差应控制在 3°C 以内;而对于站姿情况,根据美国的 ASHRAE55-92 标准,地面上 0.1m 至 1.8m 间的温差亦不应超过 3°C 。

6.2 关于风速的评估标准

在高温环境中,适度提升工作区域的风速有助于改善热舒适条件,但需避免风速过高。实验数据指出,当风速低于 0.5m/s 时,人体感受相对微弱。遵循国家标准,舒适性空调在夏季的室内风速上限被设定为 0.3m/s 。

在空调系统的设计中,送风所需的最小新风量需满足以下四项要求中的最大值,以确保系统效能:

- ①有效稀释由人群及活动产生的污染物,满足人们对室内空气质量的期望。
- ②为室内燃烧过程及局部排风提供必要的空气补充。
- ③保证房间的正压。
- ④新风量应占系统总风量的 10%。

因此,流速模拟的核心任务是验证人体活动区域内室内风速是否控制在 0.3m/s 以下。同时,对气流形式的评估实质上是对置换通风效果进行考量,即探究其对工作区空气质量的影响程度。

参考文献:

- [1] 李龙宇,李强民.置换通风的原理及应用[J].通风除尘,1996(1).
- [2] 王汉青.通风工程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 马仁民,连之伟.置换通风几个问题的讨论[J].暖通空调,2000,30(4):18.
- [4] 王晓彤,王智伟,武文斐.多污染源置换通风数值模拟[J].2003.
- [5] 胡磊,周建伟.地板供冷—置换通风空调房间CFD数值模拟[J].2005.
- [6] Srebric J. Simplified methodology for indoor environment design[M]. USA: Massachusetts Institute of Technology,2000.

作者简介: 李贵燕(1989-),女,中国陕西西安人,硕士,讲师,从事给排水及机电安装研究。