

空调通风 CFD 模拟在实际工程项目中的应用

尹 鹏

中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

[摘要]越来越多的城市建筑朝着科技化和现代化的方向发展,从而衍生出了许多大空间建筑,其在空间组织和设计方面具有独特的使用特性和表现效果,已经逐渐发展成为城市建筑设计的热点内容。因此在进行大空间建筑设计过程中,要注重空间组织与周围环境的协调作用,从而更好地提升设计美学效果,高大空间的室内气流组织是空调系统设计重点,直接影响到人在室内的舒适度,以及整个空间的使用品质。其中 CFD 可以预测仿真通风空调空间的气流分布情况,能考虑室内各种可能的内扰、边界条件和初始条件,能全面地反映室内气流分布情况,从而发现最优的气流组织方案,以指导设计,使其达到良好的通风空调效果。有助于降低建筑能耗,节省运行费用。

[关键词]舒适度;气流分布;气流组织;空调效果;建筑能耗;运行费用

DOI: 10.33142/ec.v7i12.14536

中图分类号: TU831.3

文献标识码: A

Application of CFD Simulation of Air Conditioning and Ventilation in Practical Engineering Projects

YIN Peng

China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing, 100013, China

Abstract: More and more urban buildings are developing towards technology and modernization, which has led to the emergence of many large space buildings. They have unique usage characteristics and performance effects in spatial organization and design, and have gradually become a hot topic in urban architectural design. Therefore, in the process of designing large space buildings, attention should be paid to the coordination between spatial organization and the surrounding environment, in order to better enhance the aesthetic effect of the design. The indoor airflow organization of tall spaces is a key focus of air conditioning system design, which directly affects the comfort of people indoors and the overall quality of space use. CFD can predict the airflow distribution in simulated ventilation and air conditioning spaces, taking into account various possible indoor disturbances, boundary conditions, and initial conditions, which can comprehensively reflect the indoor airflow distribution and discover the optimal airflow organization scheme to guide design and achieve good ventilation and air conditioning effects, which helps to reduce building energy consumption and save operating costs.

Keywords: comfort; airflow distribution; airflow organization; air conditioning effect; building energy consumption; operating costs

1 CFD 模拟有以下四个方面的应用

1.1 通风空调房间气流组织设计

CFD 可以预测仿真通风空调空间的气流分布情况,能考虑室内各种可能的内扰、边界条件和初始条件,能全面地反映室内气流分布情况,从而发现最优的气流组织方案,以指导设计,使其达到良好的通风空调效果。

1.2 建筑外环境分析设计

建筑外环境对建筑内部居住者的生活有重要的影响,建筑小区二次风、小区热环境等问题日益受到人们的关注。采用 CFD 可以方便地对建筑外环境进行模拟分析,从而设计出合理的建筑风环境。通过模拟建筑外环境的风流动情况,还可进一步指导建筑内的自然通风设计等。

1.3 室内空气品质研究

利用 CFD 技术研究室内空气品质问题,主要是通过模拟得到室内各个位置的风速、温度、相对湿度、污染物浓度等参数,从而评价通风换气效率、热舒适和污染物排除效率等。

1.4 建筑设备性能的研究改进

暖通空调工程的许多设备,如风机、蓄冰槽、空调器等,都是通过流体工质而工作的,流动情况对设备性能有着重要的影响。通过 CFD 模拟计算设备内部的流体流动情况,可以研究设备性能,从而改进其工作,降低建筑能耗,节省运行费用。

2 工程背景及负荷特点

2.1 工程背景

项目名称: 扬子江国际会议中心。

建设地点: 江北新区核心区,位于纬三路隧道西侧,滨江大道南侧,长江防洪堤外侧,滨江风光带东侧,与鼓楼区隔江相望。

规划总用地面积: 87388.98m²。

总建筑面积: 186320m²。

其中地上建筑面积: 131170m²;地下建筑面积: 55150m²。

建筑主要功能: 会议及展览中心、酒店。

会议及展览中心: 包含 3000m²的主会场、2700m²主宴

会厅、9000m²展厅。

酒店客房：自然间 377 间（钥匙间 330 间）。

建筑类别：单层公共建筑（展览厅）及高层民用公共建筑（会议中心及酒店）。

2.2 CFD 仿真过程的主要步骤

CFD (Computational Fluid Dynamics) 仿真是一种通过计算流体的数值模拟方法来研究流体力学问题的技术。它能够精确地预测流体的物理行为，并在实际应用中发挥重要作用。本文将介绍 CFD 仿真过程的主要步骤，以帮助读者了解该技术的基本原理和应用。

第一步：建立几何模型。

CFD 仿真的第一步是建立几何模型。在进行仿真前，需要收集实际问题的相关数据，并据此创建一个三维几何模型。这可以通过计算机辅助设计 (CAD) 软件或其他三维建模软件完成。建立几何模型时需要考虑问题的尺寸、形状和边界条件等因素。

第二步：离散网格生成。

离散化是 CFD 仿真的关键步骤之一。在此步骤中，需要将连续流体域分割成离散网格。这些网格通常是由简单的几何形状（如立方体或六面体）构成的。离散网格的精度和分辨率将直接影响到仿真结果的准确性。

第三步：物理建模与边界条件设定。

在进行 CFD 仿真之前，需要选择适当的物理模型和设定边界条件。物理模型可以是基于连续介质力学的 Navier-Stokes 方程，也可以是基于稀薄气体动力学的 Boltzmann 方程等。边界条件包括入口和出口条件、壁面条件、对称条件等。物理建模和边界条件的选择将决定仿真的结果和准确性。

第四步：数值求解。

在 CFD 仿真中，需要使用数值方法对所选的物理模型进行求解。常用的数值方法包括有限差分法、有限元法和有限体积法等。这些方法将选择的物理模型转化为离散形式的数值模型，并使用迭代算法来求解流体问题。

第五步：边界条件调整和预处理。

在进行数值求解之前，通常需要对网格进行预处理，以提高计算效率和准确性。此外，边界条件和物理模型也需要进行调整和验证，以确保仿真结果的合理性。

第六步：数值模拟和结果分析。

在对 CFD 仿真进行数值求解之后，可以开始进行数值模拟和结果分析。通过对仿真结果的可视化和定量分析，可以了解流体的流动特性、压力分布、速度场等信息。这对于解决实际问题、优化设计和改进工艺具有重要意义。

第七步：结果验证和模型修正。

CFD 仿真结果的准确性是评估模型和算法性能的重要指标。因此，在完成仿真分析之后，还需要对结果进行验证。这可以通过实验数据的对比或与现有理论模型的对比来实现。

本项目采用的湍流模型为室内 0 方程模型。与目前工程中应用最多的标准 k-ε 模型相比，室内 0 方程模型通过修正湍流黏度，考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况，同时在 ε 方程中增加了一项，从而反映了主流的时均应变率 E_{ij} ，因此在风工程计算中具有更高的精度。

重点模拟区域：中央走廊，详见图 1。

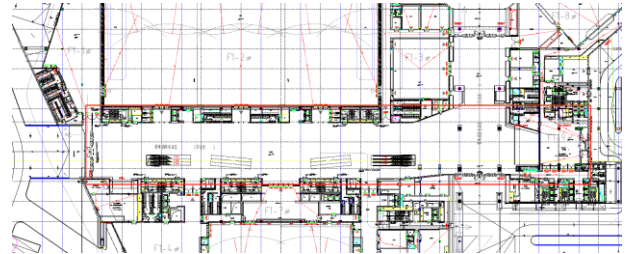


图 1 中央走廊建筑平面图

边界条件及外围护结构参数，详见表 1、表 2。

表 1 边界条件

边界	夏季	冬季
室外干球温度/℃	34.8	-4.1
室外湿球温度/℃	28.1	-5.2
人员负荷	10m ² /人，轻度劳动，显热 56kcal/h，散湿 102g/h	/
设备负荷 W/m ²	40	/
照明负荷 W/m ²	20	/

夏季室内干球温度设计要求：≤25℃；

冬季室内干球温度设计要求：≥20℃。

太阳辐射：夏季制冷工况选取 8 月 1 日下午 2:00 进行计算，冬季不考虑太阳辐射影响。

表 2 外围护结构参数

序号	部位	传热系数	综合太阳得热系数
1	屋顶	0.31	
2	外墙	0.47	
3	玻璃幕墙	1.9	0.27

地暖：进门处考虑 10m 进深敷设，地面散热温度 28℃。

模拟结果：

夏季送风温度：16℃/18.26℃；

冬季送风温度：22.64℃/22.06℃。

具体的几何模型（见图 2）及不同位置、不同类型风口流线图见图 3~图 14。

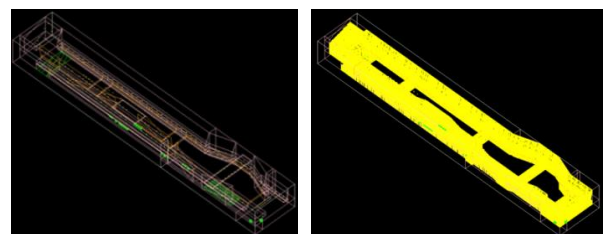


图 2 几何模型

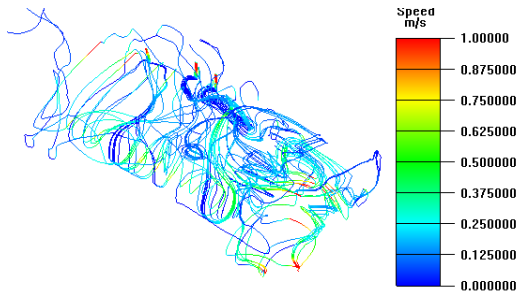


图3 一层气流组织典型百叶风口流线图

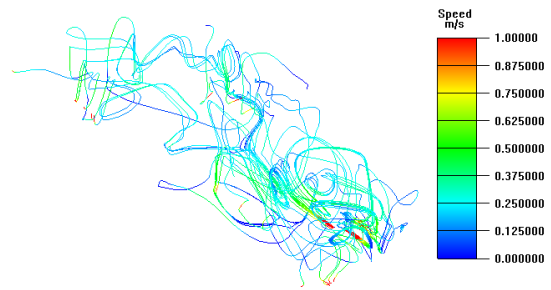


图8 东侧二层鼓型风口流线图

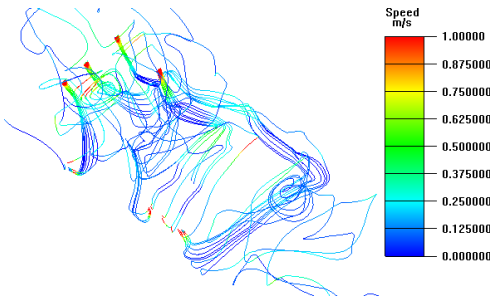


图4 一层气流组织典型条形风口流线图

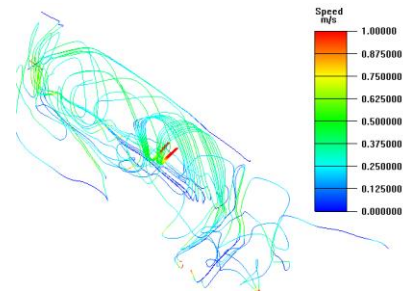


图9 二层典型侧送风鼓型风口流线图

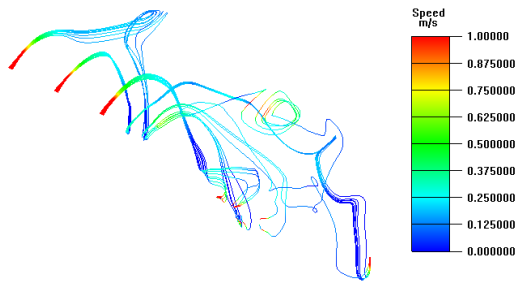


图5 一层气流组织典型鼓型风口流线图

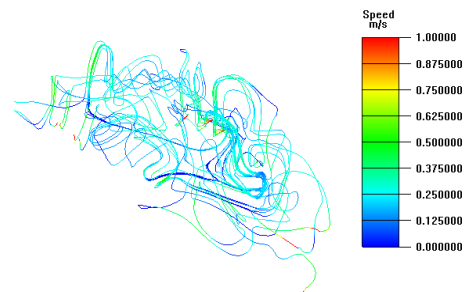


图10 三层典型侧送风鼓型风口流线图

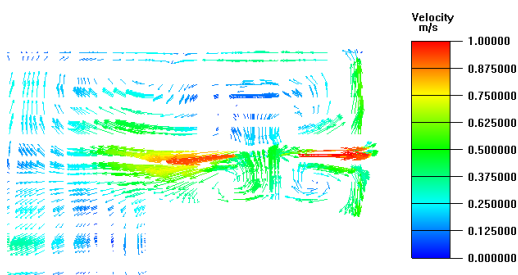


图6 东侧二层鼓型风口矢量图

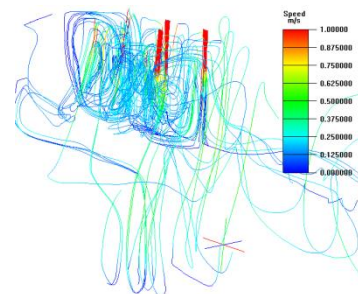


图11 三层典型鼓型风口流线图

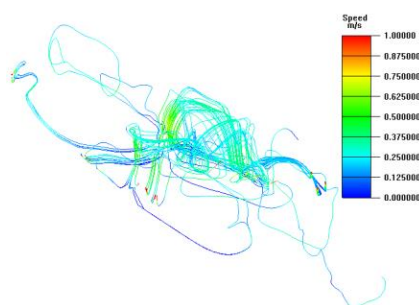


图7 二层典型百叶风口流线图

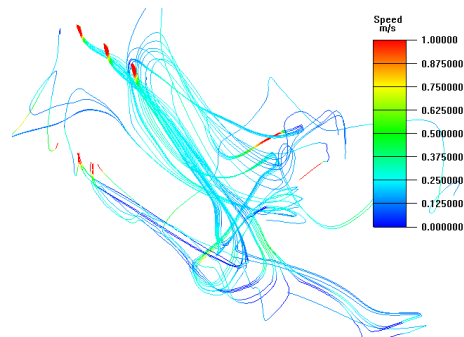


图12 三层典型下送百叶风口流线图

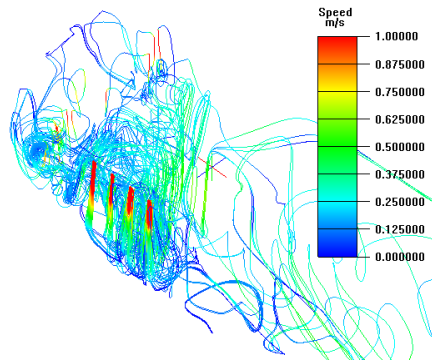


图 13 三层典型格栅风口流线图

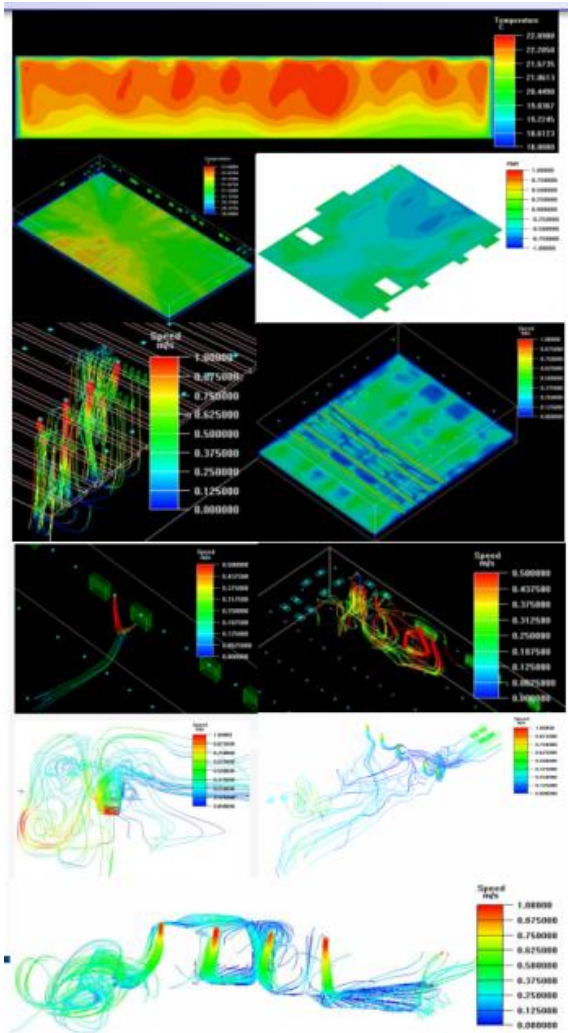


图 14 模拟结果汇总

设计方案模拟结论:

夏季工况风速场比较均匀,无明显吹风感,无通风死角;温度场分布较均匀,平均温度分别为一层 21.9℃,二层 21.4℃,三层 23.1℃,满足设计要求 25℃以下;舒适度满足 GB/T50785-2012 中 I 级标准;冬季工况风速场比较均匀,无明显吹风感,无通风死角;温度场分布较均

匀,平均温度分别为一层 19.9℃,二层 20.4℃,三层 20.8℃,温度基本满足设计要求;舒适度满足 GB/T50785-2012 中 I 级标准;

最终方案模拟结论:

从室内热舒适性来看,1m、1.5m 高度平面,整体均满足《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T50785-2012 中 I 级标准,即 $PPD < 10\%$, $-0.5 \leq PMV < +0.5$ 的要求。

从温度场来看,1m、1.5m 高度平面,满足夏季 $\leq 25^\circ\text{C}$,冬季基本满足 $\geq 20^\circ\text{C}$ 的设计要求(1层平面偏差 0.1℃)。

从风速场来看,1m、1.5m 高度平面无通风死角,无明显吹风感。

问题汇总:

温度不满足设计要求问题:

(1) 冬季温度分层明显,热空气聚集在室内空间上方,使用平面温度达不到设计要求;

(2) 冬季侧送风气流受热压影响上卷,导致气流到达使用平面时温度达不到换热需求;

(3) 部分回风口位置存在短路现象,导致部分送风未来得及与室内换热即排出室内,导致换热量小于设计值;

(4) 温度分区明显,部分区域冷/热量未达到设计需求覆盖区域。

温度不均匀问题:

(1) 季侧送风气流受热压影响上卷,导致横向射程不能覆盖使用区域;

(2) 受建筑形状、不同区域连通方式等因素影响,送风存在不同区域掺混问题,导致局部温度换热效果较差;

(3) 受精装影响,风口不能均匀布置,导致部分区域换热效果较差;

(4) 回风/排风口位置导致短路现象,局部送风与其他区域存在较大差异。

气流组织短路问题:

(1) 回/排风口位置在送风流线上(送风位置或送风角度设置与回/排风口位置布置),导致气流未经换热直接排出室内;

(2) 回风口尺寸受限,导致风口压差过高,部分送风被卷入回风口;

(3) 不同风口送风耦合,导致气流方向改变,在近回/排风口位置短路。

局部风速过高或存在死区问题:

(1) 不同风口送风耦合,速度变大,导致使用平面风速过高;

(2) 风口射程过高,调整送风角度,导致使用平面风速过高;

(3) 风口尺寸受限,长宽比过大,导致形成风幕效应,导致风口正下方风速过高,两排风口之间存在死区问题。

各空间优化结果:中央通廊室内空调参数见表 3。

表 3 中央通廊室内空调参数汇总表

	模拟参数		夏季		冬季	
			范围	均值	范围	均值
一层	风速, m/s	1.5m 平面(站姿)	0.03~0.25	0.138	0.03~0.31	0.158
	温度, °C	1.5m 平面(站姿)	19.8~23.7	21.9	19~23	19.9
	PMV	1.5m 平面(站姿)	-0.39~0.5	0.0707	-0.143~-0.45	0.16
	PPD, %	1.5m 平面(站姿)	5.13~12.5	7.43	3.7~10.86	5.99
二层	风速, m/s	1.5m 平面(站姿)	0.03~0.5	0.171	0.03~0.45	0.2
	温度, °C	1.5m 平面(站姿)	19.4~24.3	21.4	19.2~21.8	20.4
	PMV	1.5m 平面(站姿)	-0.39~0.5	0.0707	-0.32~-0.27	0.002
	PPD, %	1.5m 平面(站姿)	3.9~11.5	7.46	4.2~11.24	8.12
三层	风速, m/s	1.5m 平面(站姿)	0.03~0.35	0.147	0.03~0.37	0.155
	温度, °C	1.5m 平面(站姿)	20.8~24.3	23.1	19.7~21.2	20.8
	PMV	1.5m 平面(站姿)	-0.27~0.5	0.261	-0.06~0.3	0.089
	PPD, %	1.5m 平面(站姿)	5~13.3	7.71	5~9.38	6.86

3 结论

CFD 仿真是一种强大的工具,能够帮助工程师和研究人员解决复杂的流体力学问题。本文介绍了 CFD 仿真过程中的主要步骤,包括建立几何模型、离散网格生成、物理建模与边界条件设定、数值求解、边界条件调整和预处理、数值模拟和结果分析以及结果验证和模型修正等。通过深入了解这些步骤,读者可以更好地理解 CFD 仿真的原理和应用,并能够在实际工作中有效地运用这一技术。

[参考文献]

- [1] 龚光彩. CFD 技术在暖通空调制冷工程中的应用[J]. 暖通空调, 2012, 29(6): 25-27.
 - [2] Flake K K, 潭洪卫. 空调设计中的 CFD 应用[J]. 现代空调, 2011(1): 45-48.
 - [3] 董玉平. 高大空间建筑空调系统 CFD 模拟[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- 作者简介: 尹鹏 (1983.6—), 男, 汉, 学历: 本科, 专业: 建筑环境与设备工程, 研究方向: 空调通风。