

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-164-06

# 典型实验房间空调气流组织监测方案设计研究

李 翠 蔡 炜 王晓东 赵 美 蔡 健

(同济大学机械与能源工程学院 上海 200092)

**【摘要】** 有效地通风和合理的气流组织对于改善室内空气品质, 控制室内污染物浓度, 对实现健康建筑、舒适性空调有着重要的意义。室内空调气流组织方式多种多样, 对其效果的研究也很多, 但是多集中在理论分析, 而对气流组织效果的监测方面的研究较少, 且监测方法没有一个完成的体系。首先对空调气流组织现场监测和评价方法进行分析, 得知现场检测方法多以工程标准, 只是对室内气流组织的应用效果进行评价, 并不能完全反映气流组织的轨迹特征。其次, 为了更好的反映不同时刻空调气流组织的特征, 建立气流组织的监测方法, 以5m×3m×2.8m的一个典型实验房间为例, 利用计算模拟方法, 分析不同气流组织形式下温度、风速等衰减特征, 为室内气流组织现场智能监测测点布置提供依据。

**【关键词】** 气流组织; 实验室; 智能; 监测系统  
中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Design and Research of Air Distribution Monitoring Scheme for Air Conditioning in Typical Experimental Rooms

Li Cui Cai Wei Wang Xiaodong Zhao Mei Cai Jian

(School of Mechanical Engineering Tongji University, Shanghai, 200092)

**【Abstract】** Indoor air quality can be improved through effective ventilation and reasonable air distribution, and indoor pollutant concentration controlled has a great significance for realizing healthy building and comfortable air conditioning. Indoor air organization form is diverse, and each form has its own characteristics. For the air distribution, many research focus on the theoretical analysis, few study on the actual effect of air conditioning monitoring, and there is no complete system for intelligent monitoring. In this paper, field monitoring and evaluation methods are analyzed firstly, and the field test method is mostly engineering standard, it is not possible to evaluate the inhomogeneity of indoor temperature distribution. Based on the experimental study of air distribution, the design of intelligent monitoring system for air distribution in air conditioning building is studied. A 5m x 3m x 2.8m typical room is built, the characteristics of different air distribution patterns were simulated in software, and the temperature, wind speed are analyzed dynamically. The measurement points of different environmental parameters are arranged according to the air flow characteristics, and the field test results used to verify. Compare with the existing field monitoring standard method to perfect the intelligent monitoring design method. This study provides a basis for the monitoring design of indoor air flow.

**【Keywords】** air distribution; intelligent monitoring; field test; laboratory room

## 0 引言

空调房间的气流组织, 是指确定合适的送(回)

风口形式、位置、规格、数量和送(回)风风量、风速、温度等参数, 是关系着房间工作区的温湿度

作者(通讯作者)简介: 李 翠(1982-), 女, 博士, E-mail: licui20140718@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019-06-12

基数、精度及区域温差、工作区的气流速度及清洁程度和人们舒适感的重要因素,是工程设计中必须着重考虑的一个重要环节<sup>[1]</sup>。室内气流组织直接影响室内空气的湿度、流速、相对湿度、洁净度、舒适度。当气流组织设计不合理时可能会出现室内温度冷热分布不均,头脚温度梯度过大;流速过大,人员工作区处于冷风直吹,冷感明显;处于气流死角,污浊空气较难排出的情况。另外,空调室内气流组织不合理,还会造成空调系统设备选型偏大,增加空调的运行能耗和运行成本,直接影响建筑节能<sup>[2]</sup>。合理的气流组织能够带走室内的污染物,降低污染物浓度和改善室内空气品质,提高室内的热舒适性,保证实现健康舒适性空调,提高工作人员的工作效率,同时在节约建筑能耗上也有着重要的意义<sup>[3]</sup>。

另外,关于空调系统气流组织目前尚无整体可视化监测方案,导致无法根据用户需求实时对气流组织进行有效调控。在智能化发展的信息时代,应提高对气流组织特征监测研究。空调气流组织的监测与工程现场检测要求不同,更多的是关注气流的走向,以及与室内空气混合的过程。通过气流组织的可视化智能监测系统,了解气流组织的特性,同时也为提高空调能量的有效利用。

## 1 室内气流组织测量与评价

### 1.1 空调气流组织测量方法

关于气流组织特性的研究有理论分析和现场实测。理论层面的预测方法主要有:射流理论分析、模型试验、区域模型、计算流体力学(CFD)方法的数值模拟。射流理论分析方法始于上个世纪 80 年代,并于 90 年代建立了一系列射流公式用于室内空气分布的预测,但实际空调房间气流组织形式变化多样,采用射流公式计算势必会带来较大的误差<sup>[5]</sup>。数值模拟方法于 1974 年,第一次使用计算流体力学 CFD 方法来模拟室内空气流动状态。CFD 模拟方法是研究空调动态问题的有效和经济的方法。它可模拟和预测室内气流组织的分布,并获得室内速度,温度,湿度和有害物质浓度的物理量分布的细节,具有成本低、速度快、数据完整、可以模拟各种不同工况等优点,因而受到使用者的青睐<sup>[6]</sup>。

气流组织现场测试常用方法有烟雾法和逐点描绘法。烟雾法将棉球蘸上发烟剂(如四氯化钛、

四氯化锡等)放在送风口处,烟雾随气流在室内流动。仔细观察烟雾的流动方向和范围,在记录图上描绘出射流边界线、回旋涡流区和回流区的轮廓,或者采用摄影法直接记录气流形态。烟雾法比较快,但准确性差,只在粗测时采用。逐点描绘法是将很细的合成纤维丝线或点燃的香绑在测杆上,放在测定断面各测点位置上,观察丝线或烟的流动方向,并在记录图上逐点描绘出气流流型,或者采用摄影法直接记录气流形态。逐点测试方法比较接近于实际情况。

气流组织的现场测量方法中,如温度、湿度、风速、浓度等为基本分布参数,一般实验室或现场监测点的布置一般采用工程检测方法或测量高度上以平均测试方法<sup>[7,8]</sup>。

### 1.2 空调气流组织评价方法

在气流组织的评价指标中,如温度、湿度、风速、浓度等基本参数可直接进行测量出来,而且大多数指标必须以这些基本参数作为媒介,在此基数上进行分析或计算。常用气流组织的描述和评价主要从以下几个方法:(1)描述送风有效性的参数,送风能否有效到达考察区域,以及到达该区域的空气新鲜程度;(2)描述污染物排除有效性的参数,主要是污染物到达考察区域的程度,以及到达该区域的时间;(3)与舒适关系密切的有关参数<sup>[9]</sup>。在建筑中人员主要停留房间的气流组织应能满足:气流组织分布均匀,避免漩涡;公共建筑应根据不同功能区域合理组织气流,保证人员活动区位于空气较新鲜的位置;室内污染物的空气应及时排出<sup>[10]</sup>。

室内气流组织的优劣直接影响室内热环境的舒适性和空调设计的实现,同时也直接影响空调系统的能耗量。通常室内工作区由余热而形成的负荷只占全室总负荷的一部分;另一部分产生于工作区之上。良好而经济的气流组织形式,应在保证工作区满足空调参数要求的前提下,使空调送风有效地排出工作区的余热,而不使工作区以外的余热带入工作区,从而达到不增加送风量且提高排风温度的效果,直接排除这部分热量,以提高空调系统的经济性。为此引入评价室内气流组织经济性指标——能量利用系数 $\eta$ :

$$\eta = \frac{t_p - t_o}{t_n - t_o} \quad (1)$$

式中,  $t_n$ 、 $t_o$ 、 $t_p$  分别为室内工作区空气平均温度、送风温度及排(回)风温度。

### 1.3 室内气流组织评价案例分析

为了探测空调气流组织现场特征, 选定一个 9.6m×9m×3.5m 办公室, 测定柜式空调气流组织效果, 并采用能量利用系数进行经济性能评价, 能量利用系数计算公式如公式(1)。需要分别在室内工作区、送回风口处测温度, 为了提高气流的可视性, 在送风口处放置一个二氧化碳发生器。温度测量仪器一般采用热电偶, 工作区温度一般参考室内环境测试方法, 采用多点布置取其平均值(测试数据见表 1), 并通过计算求得。温度测点布置图如图 1 所示。

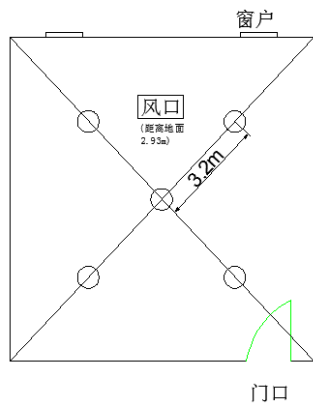


图 1 气流组织工作区测点布置图

Fig.1 Layout of air distribution working area measuring points

表 1 气流组织工作区温度测试值

Table 1 Temperature test value for the air distribution area

风口形状	送风方式	参数	单位	实测数据	平均值
百叶风口	侧送风	$t_n$ 室内温度	°C	21.44	21.44
		$t_o$ 送风温度	°C	33.4	41.5
		$t_p$ 回风温度	°C	23.5	25.3

注: 测点布置: 梅花状(如图 1 所示)。

将现场测试数据带入公式计算得到  $\eta=81.51\%$ , 虽然空调送出的风使得绝大多数能量得到了利用, 气流组织较为合理, 但是气流分布不均匀, 房间角落处温度高, 室内温度出现冷热不均。虽然空调气流的能量利用系数很高, 但实际应用效果还存在很大问题。

## 2 典型空调气流组织实验室监测方案设计

为了提高室内气流组织的应用效果, 以 5m×3m×2.8m 的一个典型实验房间为例, 利用计算模拟方法, 结合现场实测数据, 模拟不同气流组织形式下温度、风速等衰减特征, 分别对顶侧送下侧回和上侧送下侧回两种气流组织形式进行动态模拟, 送风速度为 2.5m/s, 送风温度 16°C。顶送风口位于顶板正中央, 侧面送风口靠近长边侧墙顶部中间位置, 回风口位于长边侧墙, 风口距地面 30cm, 具体如图 2 所示。通过两种不同形式为气流组织模拟结果的分析, 为气流组织现场智能监测测点布置提供依据。不同送风气流下的温度、速度等分布特征如下。

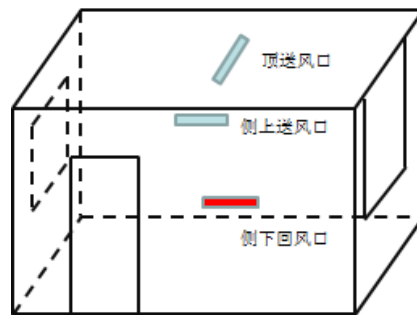


图 2 测试房间风口示意图

Fig.2 Test room and draught schematic diagram

### 2.1 顶送侧下回式气流组织动态特征

分别取  $X=2.5m$  处宽度截面,  $Y=1.5m$  处长度截面和  $Z=0.75m$  高度水平截面上, 分析顶侧送风气流组织下温度变化情况, 具体特征如下。

对顶送侧下回的气流组织, 温度在  $x$ 、 $y$  截面上的变化成对称分布, 具体如图 3、图 4 所示。不同时刻下, 温度具有明显变化。如在  $Z=0.75m$  高度的水平面上, 除风口正下方, 其他区域的温度变化从四周向中间逐渐降低。整个气流组织下, 温度变化很快, 约在 0.1s 就可以满足室内工作区

温度要求, 具体如图 5 所示。

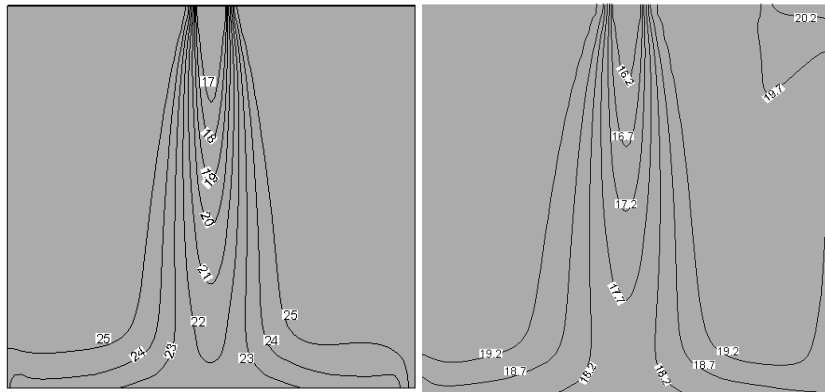


图 3 X=2.5m 处宽度截面处的温度分布情况

Fig.3 The temperature distribution at the width section at X=2.5m

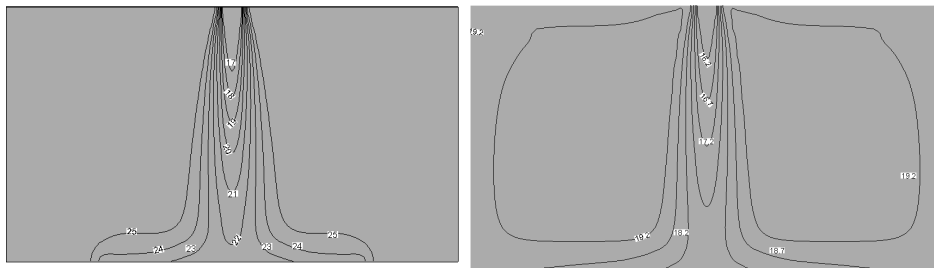


图 4 Y=1.5m 处长度截面处的温度分布情况

Fig.4 The temperature distribution at the length section at Y=1.5m

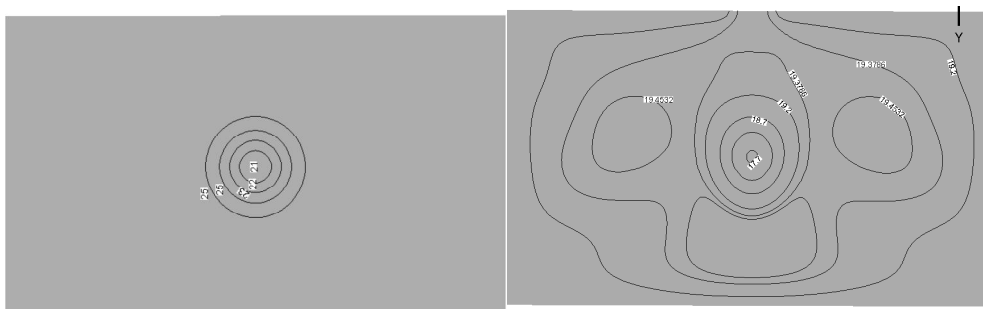


图 5 Z=0.75m 处水平截面上的温度分布情况

Fig.5 Temperature distribution on the horizontal section at Z=0.75m

### 2.2 侧上送侧下回式气流组织动态特征

分别取 X=2.5m 处宽度截面, Y=1.5m 处长度截面和 Z=0.75m 高度水平截面上, 分析侧上送风气流组织下温度变化情况, 具体特征如下。

对侧上送侧下回的气流组织, 温度在 y、z 截面上的变化成对称分布, 具体如图 6、图 7 所示。

在 Z=0.75m 高度的水平面上, 除风口正下方, 其他区域的温度变化从四周向中间逐渐降低, 具体如图 8 所示。整个气流组织下, 温度变化很快, 约在 0.1s 就可以满足室内工作区温度要求, 不同时刻下同温度变化是需要重点监控的。

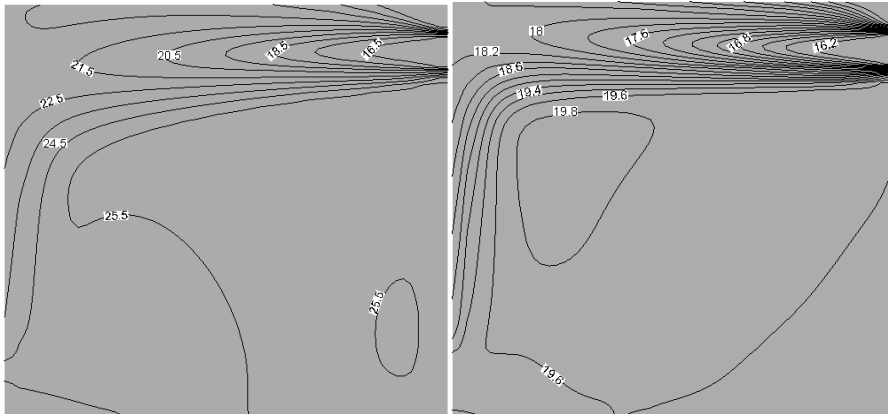


图 6 侧上送 X=2.5m 处宽度截面处的温度分布情况

Fig.6 The temperature distribution at the width section at X=2.5m for side supply air

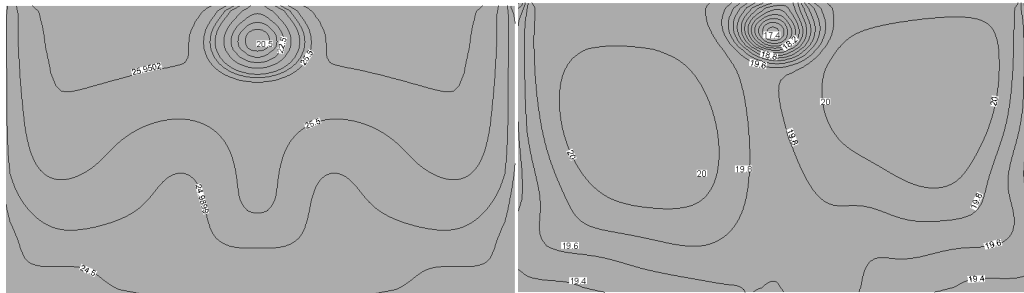


图 7 侧上送 Y=1.5m 处长度截面处的温度分布情况

Fig.7 The temperature distribution at the length section at Y=1.5m for side supply air

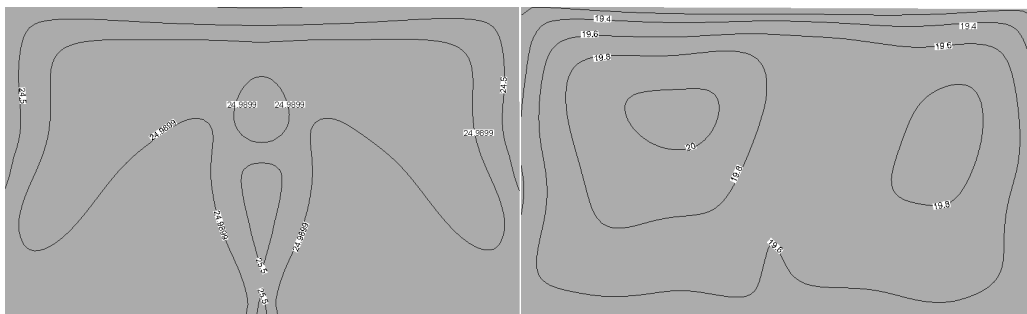


图 8 侧上送 Z=0.75m 处水平截面上的温度分布情况

Fig.8 Temperature distribution on the horizontal section at Z=0.75m for side supply air

### 2.3 不同气流组织形式下的风速分布特征

两种不同气流组织形式下的风速分布如图 9 和图 10 所示, 由图可以看出, 对于气流组织风速

的分布主要关注风口下不同高度风速变化情况。风速变化主要集中在顶送风风口正下方, 侧上送风水平方向逐渐变小。

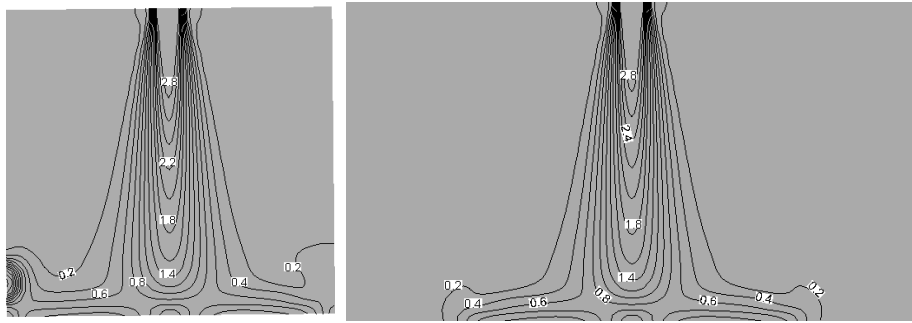


图 9 顶上送风气流组织风速分布特征

Fig.9 Characteristics of wind velocity distribution in overhead supply air distribution

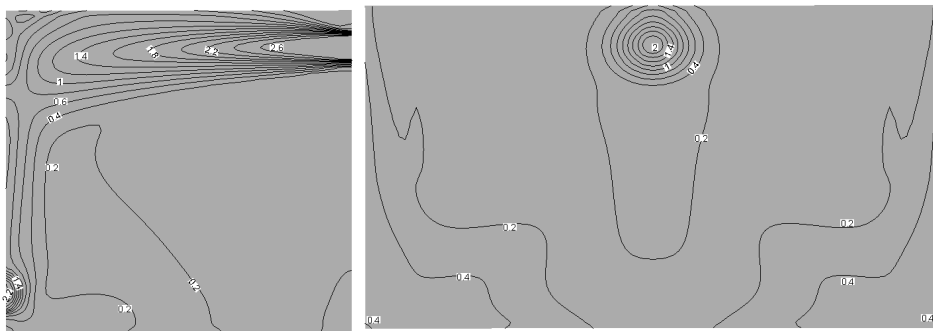


图 10 侧上送风气流组织风速分布特征

Fig.10 Characteristics of wind velocity distribution in upper side air distribution

### 2.4 室内气流组织监测方案制定

借助软件模拟,分析计算模拟结果可以很容易获得气流组织的变化特征,以及不同时刻下的动态特征,和室内温度达到稳态的时刻等。基于上述模拟结果,综合室内气流组织工程评价,制定室内气流组织监测方案,考虑必须同时满足顶送和侧上送风需要,室内温度监测点布置如下。两种不同送风形式下,室内气流组织的测点布置以空间均匀分布为基础,兼顾温度变化需求,制定布点方案。

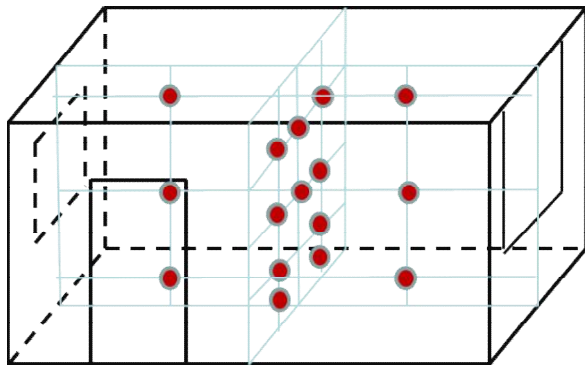


图 11 室内气流组织监测点布置示意图

Fig.11 Schematic diagram of indoor air distribution monitoring point layout

以顶送侧下回为例,为了提高室内气流组织的监测效果,  $X=2.5m$  处的宽度截面是气流组织分布比较明显的区域。高度方向可均匀布置 4-7 个点,宽度方向和长度方向上,以中心为主要布测区,成对称布置,至少布置三列布点,每列至少 3 个点,示意图如图 11 所示。

### 3 结论

工程标准中关于室内气流组织舒适性评价主要考虑气流的均匀性和平均温度分布特性,是一个综合评价结果,气流组织实验室监测中无法直接引用,应根据房间及空调气流形式设计专门的监测方案,为实验观察人员提供一个可视化的现场观测效果。因此,气流组织实验室智能监测系统的设计,首先应结合计算机模拟结果,制定气流组织监测方案;其次利用信息化、智能化技术,选择高精度的仪器仪表,或高清摄像技术,实时记录气流组织的相关参数,精准监测气流组织分布特征;另外,在气流组织特征观测时,与常规室内环境监测要求不

(下转第 184 页)