

挂壁式变频空调器温度场特性与热舒适研究

陈守海，高童，王军，王铁，王宏超

(海信(山东)空调有限公司, 山东青岛, 266071)
(18678928335, chenshouhai@hisense.com)

摘要: 伴随着人们日益增长的美好生活需求, 变频空调器日益普及, 与此同时对空调运行的舒适度提出更高的要求, 但国内对空调的研究仍主要集中在换热效率和能效方面, 以用户体验为导向的研究不足。本文从实际使用效果角度出发, 通过仿真模拟与试验验证两种方式对挂壁式空调制热空气温度场特性和人体热舒适性进行深入分析, 揭示了制热量与人体热舒适性矛盾性规律的结论, 由此提出了挂壁式变频空调器制热量、风量和热舒适性等多维耦合设计的理念, 为舒适变频技术与升级提供重要依据。

关键词: 热舒适性, 温度场, 温度均匀性, 变频空调

Research on Temperature Field characteristics and Thermal comfort of Wall Type Frequency conversion Air Conditioner

Chen Shouhai Gao Tong Wang Jun Wang Tie Wang Hongchao
(Hisense (Shandong) Air-conditioning Co., Ltd. Qingdao 266071)

Abstract With the increasing demand for better life, the frequency conversion air conditioner is becoming more and more popular. At the same time, it puts forward higher requirements for the comfort of air conditioning operation. However, the domestic research on air conditioning is still focused on heat transfer efficiency and energy efficiency. The research of user-experience-oriented research is insufficient. This paper starts from the view of practical application effect, to analyze the characteristics of temperature field and thermal comfort of wall type air conditioner heating mode by simulation and test. The conclusion of the contradictory between heating capacity and human body thermal comfort is revealed, and put forward the concept of multi-dimensional coupling design by heating capacity, air volume and thermal comfort on wall type air conditioner, which provides an important basis for the research and upgrading of comfortable frequency conversion air conditioning technology.

Keywords Thermal comfort; Temperature field; Temperature uniformity; Frequency conversion air conditioner

0 前言

随着我国经济的持续高速发展, 人民生活水平也快速提高, 空调由最初的“生活奢侈品”逐渐转变为日常生活用品。与此同时, 人们已远不满足于空调基本的制冷制热、节能降噪的需求, 对室内空气舒适度的调节要求越来越高^[1-2]。目前国内空调在舒适性方面的设计主要集中在制冷风吹人风避人、除湿控制方面, 在制热温度场均匀性、人体热舒适性方面的设计很少。

本文从舒适性的角度出发, 根据多种空调房间舒适性的评价方法, 对挂壁式空调制热空气温度场特性和人体热舒适性进行深入研究, 探讨揭示了同风量下, 制热量越大出风口温度越高, 房间温度均匀性越差的规律性结论, 并用多种仿真模拟方法以及实验分析验证了本文所示结论, 由此提出了挂壁式变频空调器以人体热舒适性实际体验为导向的多维耦合设计理念, 对探索新一代舒适变频空调技术提供有力支撑, 对改善人居环境、减少能源的消耗具有重要的意义^[3]。

1 理论基础

作者简介: 陈守海, (1988-), 男, 工程师, 从事空调制冷系统开发和热舒适性研究工作。

1.1 PMV 和 PPD

PMV 的全称是预计平均热感觉指数，由丹麦的 Fanger 教授提出，是一个描述人的热感觉与人体热负荷之间关系的实验回归公式，将人的热感觉分为从热到冷 7 个等级，如下表所示。目前，PMV 是国际通用的公认最为全面和准确描述人体的热感觉的一个舒适性指标。

表 1 平均热感觉评价等级及描述

评价等级	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
感觉描述	热	暖	稍暖	适中	稍凉	凉	冷

PPD 的全称是预计不满意百分数，其指标来表示人群对热环境不满意的百分数，同样是由 Fanger 教授提出，用以弥补 PMV 的不足，当 PMV 为 0 时，PPD 为 5%，这意味着在室内热环境处于最佳的热舒适状态时仍然有 5% 的人感到不满意。ISO7730 对 PMV 的推荐值为 -0.5~+0.5 之间，即允许人群中有 10% 的人感觉不满意。

1.2 房间温度精确性

基于人体工程学和人体舒适性评价体系的研究，在《GB_T 33658-2017 室内人体热舒适环境要求与评价方法》基础上，总结提出了评价空调制热运行用户主观体验的客观指标：房间温度精确性。房间温度精确性由四种客观参数评价指标组成，分别为温度偏差、温度均匀性、温度波动、垂直温差。

1.2.1 温度偏差

(1) 定义：在规定的试验条件下，室内温度达到热稳定状态后，房间内实测温度平均值与空调器设定温度的差值。

(2) 理论公式：在被测空调器的制热工况下，在室内温度达到热稳定状态后，按照公式 (1) 计算房间规定时间内实测温度平均值与空调器设定温度的差值。

$$\Delta t = | t_p - t_s | \dots\dots\dots (1)$$

式中：

Δt ——温度偏差，℃；

t_p ——房间实测温度，℃；

t_s ——样机设定温度，℃。

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{n}$$

其中，

t_{pi} ——第*i*个测温点的实际温度（选取的规定时间内温度的平均值），℃；

n ——测温点个数。

1.2.2 温度均匀性

(1) 定义：在规定的试验条件下，室内环境达到热稳定状态后，在同一时刻，不同测点温度的差异状况。

(2) 理论公式：室内热环境稳定后，测量规定时间内所有温度检测点的温度值。按照公式 (2) 计算室内温度均匀性。

$$T_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (t_i - t_m)^2}{m-1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

T_s ——瞬时温度均匀度；

t_i ——检测点*i*的瞬时温度，℃；

t_m ——所有测点的瞬时平均温度，℃；

m ——测点总数。

整个室内的温度均匀度 (\bar{T}_s) 为所有测点瞬时温度均匀度的平均值。

1.2.3 温度波动性

(1) 定义：在规定的试验条件下，达到热稳定状态后，室内温度的变化幅度，用同一测点温度的平均值在规定时间内的标准偏差来表示。

(2) 理论公式：室内热环境稳定后，测量室内所有温度检测点的温度值。单个测点的温度波动 (T_σ) 用该测点温度在规定时间内的标准偏差表示，见公式 (3)。

$$T_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N - 1}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

T_σ ——该测点的温度波动；

N ——在规定时间内该测点记录的温度个数；

t_i ——该测点的瞬时温度；

\bar{t} ——该测点在规定时间内的平均温度。

整个室内环境的温度波动 (\bar{T}_σ) 为所有测点温度波动的平均值。

1.2.4 垂直温差

(1) 定义：在规定的试验条件下，室内环境达到热稳定状态后，人员头脚位置垂直方向上存在的空气温差。即坐姿时，1.0m 处温度与 0.1m 处温度的差值。

(2) 理论公式：室内热环境稳定后，测量规定时间内室内人员坐姿状态下的头脚位置处所有温度检测点的温度值。按照公式 (4) 计算室内垂直空气温差。

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^k (t_{hk} - t_{lk})}{k} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

T_v ——垂直空气温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_{hk} ——采集时间内，室内垂直方向上人员坐姿时头部高度位置处 (1.0m) 检测点的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_{lk} ——采集时间内，室内垂直方向上人员坐姿时脚踝高度位置处 (0.1 m) 检测点的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

k ——头部或脚踝高度平面上的测点总数。

2 仿真计算

2.1 物理模型和数值模型

设置一挂壁式房间空调器试验房间大小设定长 \times 宽 \times 高分别为 4.42m \times 4m \times 3m，空调器安装在东墙上，该房间三面墙都是外墙，只有北墙是内墙，房间的结构示意图如图 1 所示。

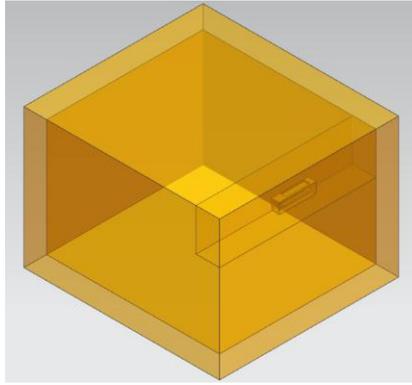


图 1 房间结构示意图

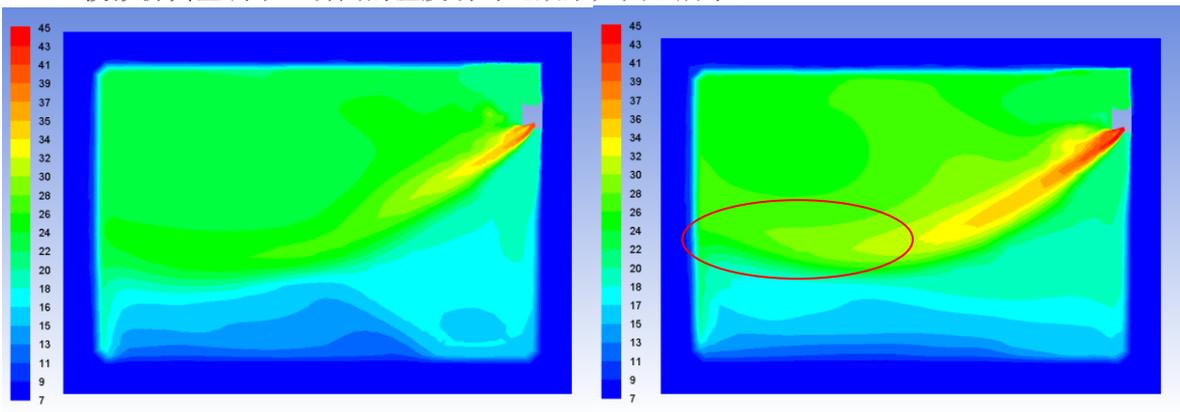
设定送风风量为 700m³/h 不变，分别模拟出风口温度为 40℃和 45℃送风室内温度分布，内外墙、天花板和地面均按照对流换热边界条件考虑，送风口采用均匀的速度入口，其值根据风量计算得出，回风口根据经验设定为 50Pa，用 Fluent 软件、模拟数据插值、PMV、PPD 四种方法进行模拟仿真和验证。统一取值 1.5 小时时刻数据进行分析。

在对实际空调房间制热送风的过程建立简化的数学模型时，遵循以下两点假设：

- 1) 由于无太阳辐射得热并且实验过程房间密闭除空调外无其他任何电器工作，所以建模时忽略门和窗，并且忽略内部得热的影响；
- 2) 模型采用不可压缩空气计算，采用 Boussinesq 假设密度随温度变化。

2.2 Fluent 模拟分析

Fluent 模拟仿真空调中心切面的温度场对比效果如图 2 所示。



(a) 40℃

(b)45℃

图 2 Fluent 模拟出风口温度送风室内温度场分布图

从图 2 中对比可见，制热量大出风温度高的 b 图，热风尾部出现往上飘的现象。为了进一步清晰描述上图现象，用模拟数据插值法进行进一步分析。

2.3 模拟数据插值分析

将房间进行网格划分，以垂直于空调安装面的中心二维截面为例，高度方向取离地 0.1m、0.5m、1.0m、1.5m、2.0m 五个区域点，平行方向由空调安装面至房间对面墙壁均分为 7 个区域点。根据 Fluent 模拟结果，对出风口温度为 40℃和 45℃两种情况分别提取网格区域点的温度值如表 2 和表 3 所示。

表 2 40℃送风各测温点模拟数据

长编号 高度	7	6	5	4	3	2	1
0.1m	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	13.6	15.3
0.5m	15.3	15.3	13.6	13.6	13.6	15.3	15.3
1.0m	23.5	23.5	25.2	23.5	18.6	16.9	16.9
1.5m	23.5	21.9	21.9	23.5	26.8	23.5	18.6
2.0m	21.9	21.9	21.9	21.9	23.5	26.8	31.8

表 3 45℃送风各测温点模拟数据

长编号 高度	7	6	5	4	3	2	1
0.1m	10.8	10.8	8.9	10.8	10.8	12.7	14.6
0.5m	14.6	16.5	14.6	14.6	14.6	16.5	16.5
1.0m	18.4	22.2	26.0	24.1	20.3	18.4	18.4
1.5m	26.0	26.0	26.0	27.9	31.7	29.8	20.3
2.0m	24.1	24.1	24.1	26.0	27.9	27.9	37.4

对上述表格中网格区域点的温度值用数值插值法进行模拟仿真，房间温度场对比效果如图 3 所示。

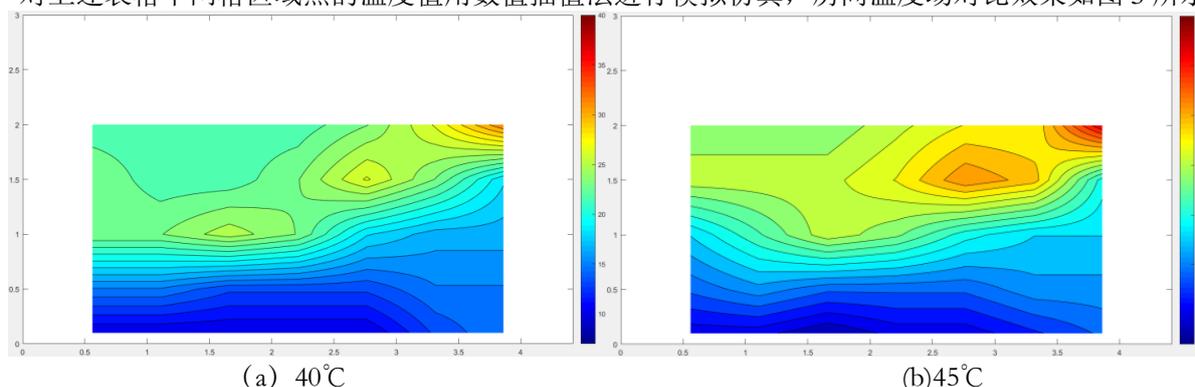


图 3 模拟数据插值出风口温度送风室内温度分布图

从图 3 中清晰可见，45℃对应的温度场，在热风尾部严重上浮，从温度梯度上来看，45℃对应垂直温差大，温度均匀性差。

分别计算 1.2 节所示房间温度精确性相关指标参数，汇总于表 4 中。

表 4 40℃和 45℃送风温度数据对比

对照参数	40℃送风	45℃送风
房间平均温度 (℃)	18.9	20.4
温度均匀性 (℃)	5.6	6.9
垂直温差 (℃)	9.7	9.8

从表 4 中可见，45℃出风温度情况由于制热量大其房间平均温度值高于 40℃情况，但其温度均匀性和垂直温差均差于 40℃时，与前面的仿真结果完全吻合。

为了进一步细化清晰展示垂直温差的规律，将各高度点与 2.0m 处温度点取垂直温差汇总于表 5，将各相临高度垂直温差汇总于表 6。

表 5 各高度垂直温差（与 2.0m 处对比）

垂直温差	40℃送风	45℃送风
0.1m-2.0m	12.8	16.0
1.0m-2.0m	9.7	11.9
1.5m-2.0m	5.4	6.8

表 6 各相临高度垂直温差

垂直温差	40℃送风	45℃送风
0.1m-0.5m	3.1	4.1
0.5m-1.0m	6.6	5.7
1.0m-1.5m	3.1	5.7
1.5m-2.0m	3.3	4.3

从表 5 和表 6 更加清晰的看到，45℃送风从各种维度的垂直温差均大于 40℃送风。

2.4 PMV 云图和 PPD 云图仿真分析

本文用采用编程的手段输出两种工况下房间中面的 PMV 云图和 PPD 云图，进一步验证本文所提结论。相关结果对比图如图 4 和图 5 所示。

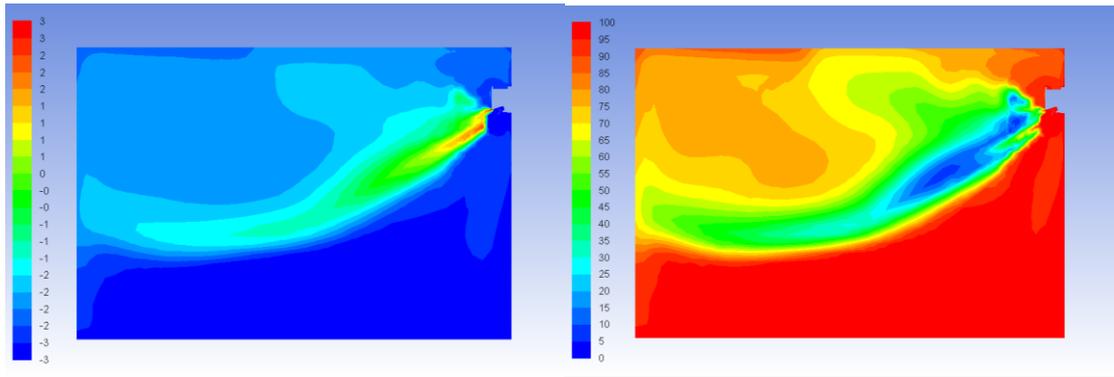


图 4 40℃送风 PMV 云图（左）和 PPD 云图（右）

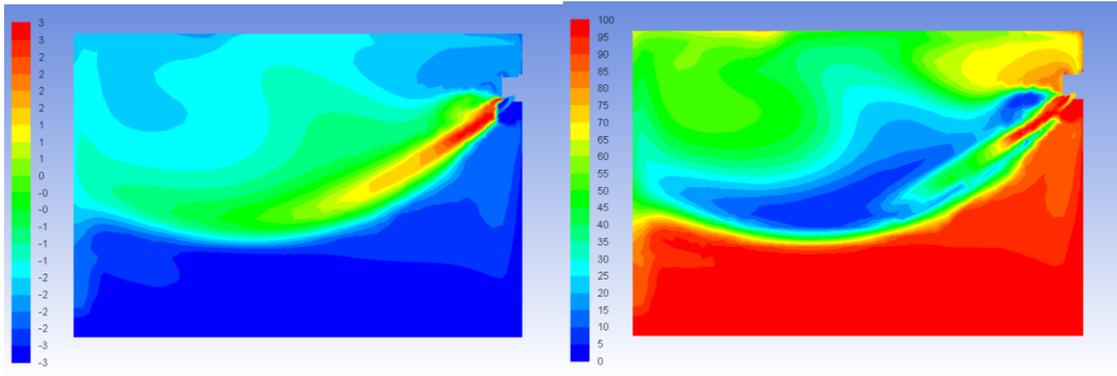


图 5 45℃送风 PMV 云图（左）和 PPD 云图（右）

通过图 4、图 5 上下对比可见，虽然 45℃送风时空调房间的舒适区域更大，但主要集中在房间上部，虽然更多的热量输送到房间中，但是几乎全部作用在房间上层空间，致使底层空间的舒适性基本没有改变，热量大量被浪费掉，垂直温差反而提高。说明提高送风温度并不是提高房间人活动区域舒适性的有效手段，反而会导致能量的浪费，与上文分析结果一致。

3 实验分析

3.1 试验方案

取三套制热能力不同的挂壁式空调器，风量一致、导风板摆动方式一致。先在焓差室分别进行能力对比测试，然后再安装于标准化用户体验热舒适性实验室进行人体热舒适性对比测试与分析。试验方案如表 7 表 8 所示。

表 7 能力测试试验方案

项目	工况(室内干球/室内湿球; 室外干球/室外湿球)	方式
额定制热自由运行	20/15; 7/6	三样机同基准下对比测试
低温制热	20/15; 2/1	
超低温制热	7/4.3; -7/-8	
低温制热 3	20/15; -7/-8	

表 8 舒适性试验方案

项目	说明
实验室	标准化用户体验热舒适性实验室（长宽高为 4.42×4×3m）
机型	样机 1、样机 2、样机 3
试验项目	制热房间温度精确性：制热 20 度开机（7/6；7/6）自由温升
试验方式	风门设置扫略，每个试验运行 6 小时
关键温度点	房间平均温度、房间内部水平方向、垂直方向温度梯度
对比方案	制热房间温度精确性四参数，1 小时、2 小时、3 小时时刻温度场

舒适性实验室如图 6 所示。



图6 标准化用户体验热舒适性实验室

3.2 试验数据分析

按照表7所示试验方案，三样机制热能力测试数据如表9所示。

表9 三样机制热量对比汇总表

项目	样机1	样机2	样机3
额定制热自由运行 (W)	4550	4921	5010
低温制热量 (W)	3777	3941	3988
超低温制热量 (W)	4194	4625	4750
低温制热3 (W)	3221	3564	3638

从能力测试数据来看，制热各种工况下，制热量大小规律一致：样机1 < 样机2 < 样机3。按照表8所示试验方案，三样机进行舒适性试验结果分析如下。

3.2.1 温度场分析

对三样机，运行1小时、2小时、3小时时刻温垂直安装面中心截面的二维度场图进行对比分析。图



7图8图9分别为样机1样机2样机3温度场对比图。为同比，下面所有温度场图统一标尺为9-31分12分度，一种颜色代表1.83度。

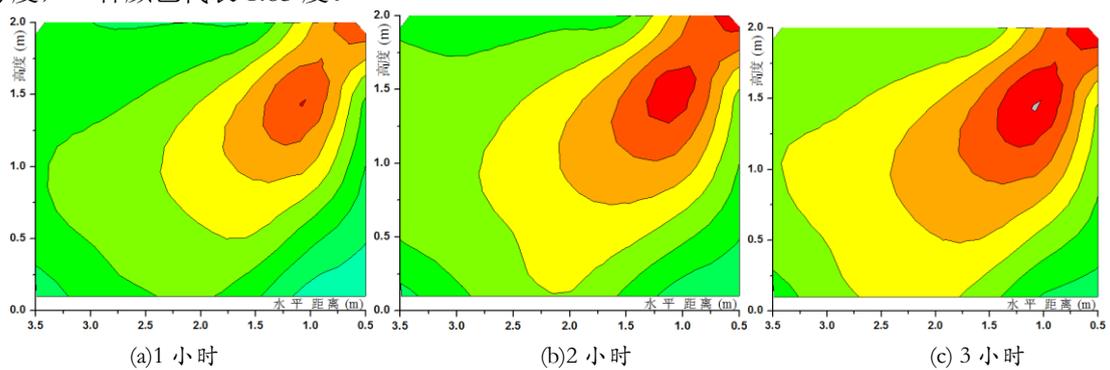


图7 样机1温度场图

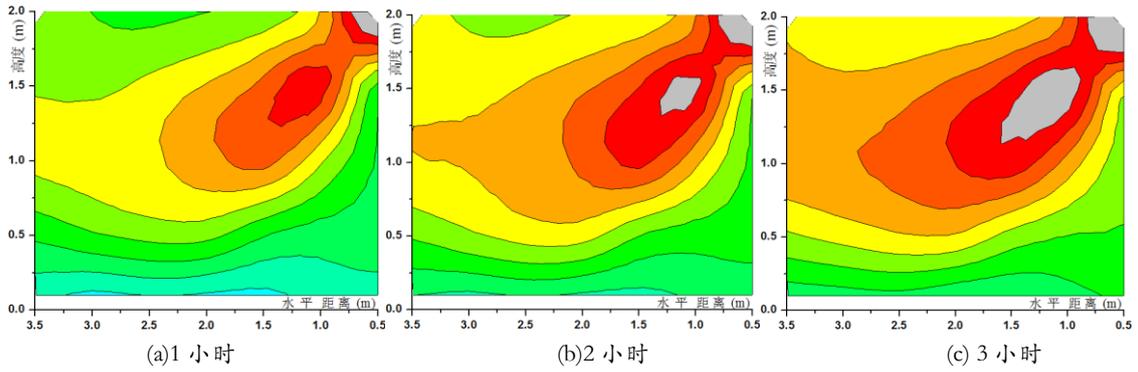


图 8 样机 2 房间温度场图

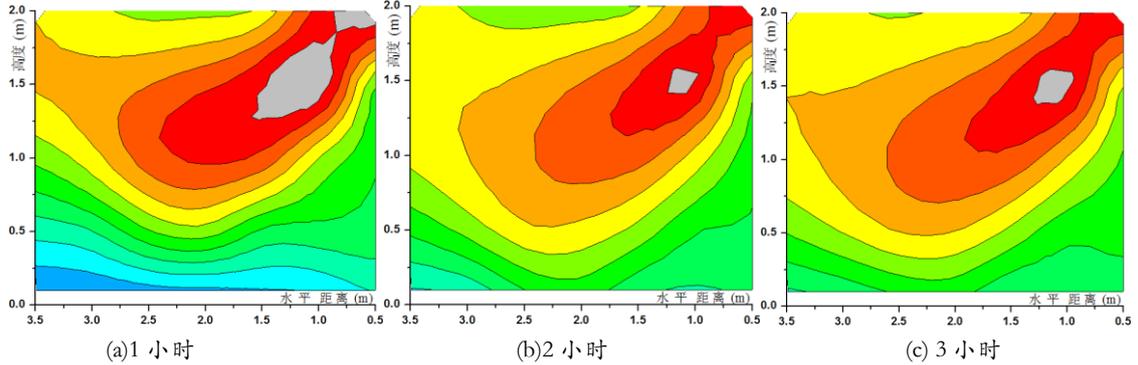


图 9 样机 3 房间温度场图

纵向对比图 7、8、9，清晰可见房间总热量：样机 1<样机 2<样机 3，与表 8 试验数据完全符合。同时对比可见，样机 2 相对比样机 1 热量往上飘，热风没有完全吹至最底部，样机 3 此问题更明显。与前文仿真分析结果完全一致，由此得出结论：同风量同出风角度下，制热量越大，出风口温度越高，上下热冷空气温度差越大，上下空气密度差越大，上部热风更不容易吹下来，房间温度均匀性越差，房间垂直温差越大。

3.2.2 房间温度精确性分析

按照 1.2 节公式分别计算三样机三时刻的温度精确性四参数，结果如表 10 和所示

表 10 四参数实测对比表

评价项目	样机 1	样机 2	样机 3
温度偏差	1.18	1.44	1.48
温度均匀性	2.01	2.66	2.83
温度波动性	0.45	0.33	0.36
垂直温差	2.06	4.19	4.35

从四参数可见温度均匀性和垂直温差规律完全同前文所述。

4 结论

①本文基于空气物理特性，从用户体验角度出发提出以下结论：同风量同出风角度下，挂壁式变频空调器制热量越大，出风口温度越高，上下热冷空气温度差越大，热冷空气密度差越大，热风更不容易吹下来，房间温度均匀性越差，房间垂直温差越大，大量热量被浪费。极限情况为空调制热量为 0，整个房间温度完全一致为低温，反而温度均匀性和垂直温差均为 0，指标最佳。本文通过四种仿真模拟和实验实际数据对比验证了以上结论。

②评判变频空调器制热舒适性好坏不能仅看某参数，应兼顾多参数进行耦合判定。

③挂壁式变频空调器设计不能一味追求制热量的提升，而应从用户实际体验房间温度均匀、舒适角度

出发，考虑制热量、风量、风道曲线、热舒适性等进行多维耦合设计。此设计理念对探索新一代高效、节能、舒适变频空调提供有力支撑，对提高空气舒适度、改善人居环境具有重要意义。

参考文献

- [1] 李惠. 分体式空调制热运行时室内温度场流场的特性研究[D]. 天津商业大学, 2013.
- [2] 曾德良. 基于多变量内模解耦控制的室内舒适度全自动控制系统[J]. 家电科技, 2016.
- [3] 张智. 空调制冷制热时室内气流及温度分布数值研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4):458-460.
- [4] GB_T 33658-2017 室内人体热舒适环境要求与评价方法. 2017.
- [5] ISO 7730 热环境人类工效学—PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定.