

基于舒适度的酒店客房环境监测与调节系统

张耘川, 马小林, 吴倩茹, 罗杰鸿, 刘盈, 王沛锋

(武汉理工大学信息工程学院, 武汉 430070)

摘要: 随着生活水平的提高, 人们开始追求更加舒适的环境。而酒店客房空调大多采用梯度调节方式解决舒适问题, 实现方式上具有较大局限性。为了实现对酒店客房环境的监测与调节, 以 PMV(Predicted Mean Vote)和热舒适方程为基础, 得出人体在不同环境下的最适温度, 为使调节更加人性化, 综合考虑用户手动调温行为习惯后, 控制电路模块采集数据和实现算法及空调的智能控制。主要创新点在于: 从人体实际感知入手研究问题, 以最适温控系统代替传统梯度调温, 提出了一种新算法。该算法综合考虑用户调温习惯, 更贴近用户真实热感觉, 兼顾了人性化与节能环保的设计原则。

关键词: 空调工程; 热舒适; 酒店客房; 行为习惯; 空调控温

中图分类号: TU831.3

Hotel room environment monitoring and regulation system based on comfort degree

Zhang Yunchuan, Ma Xiaolin, Wu Qianru, Luo Jiehong, Liu Ying, Wang Peifeng

(The School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the improvement of living standards, people began to pursue a more comfortable environment. The hotel room air conditioning mostly use gradient adjustment to solve the comfort problem, to achieve a greater degree of limitations. In order to realize the monitoring and adjustment of the hotel room environment, based on PMV (Predicted Mean Vote) and thermal comfort equation, the optimal temperature of the human body under different environments is obtained. In order to make the regulation more humane, Behavior habits, the control circuit module to collect data and realize the algorithm and the intelligent control of air conditioning. The main innovationHotel room environment monitoring and regulation system based on comfort degree is that: from the actual perception of the human body to start to study the problem, with the most appropriate temperature control system instead of the traditional gradient thermostat, put forward a new algorithm. The algorithm takes into account the user's temperature control habits, closer to the user's real hot feeling, taking into account the human nature and energy saving design principles.

Key words: air-conditioning engineering; thermal comfort; hotel room; behavior custom; air-conditioned

0 引言

目前大多数酒店客房空调仅能检测到室内温度和湿度, 基于人所设定的温度调节室内的温度为设定值, 当室内外扰量变化较大时, 往往会存在不直接、不迅速、不舒适、不节能的问题^[1-2]。此外, 当用户入住酒店时往往会选择极端的温度设定, 不仅造成极大的浪费, 而且会带给用户不适感。1984 年国际标准化组织 (ISO) 提出了室内热环境评价与测量的标准

基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金 (2017-XX-B1-06)

作者简介: 张耘川 (1996-), 男, 本科生, 主要研究方向为自动控制、智能调节

通信联系人: 马小林 (1984-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信与控制. E-mail: maxiaolin0615@whut.edu.cn

化方法（ISO7726）后，用 PMV（预测平均评价指标）和 PPD（预测不满意百分数）指标来描述和评价热环境已经成为空调温度控制的理论依据。在此基础上，基于 Rumelhart 等人提出的 BP 算法和 Minorsky 提出的 PID 算法，产生了一系列基于人体舒适度的空调温度调节算法。但是，BP 神经网络对初始权值敏感、容易陷入局部极小值、隐含层结构难以确定等^[3-4]。PID 控制对于具有时变性、大滞后性的控制对象效果往往不是很理想^[5-7]。同时，住户在房间里可能会不满足于自动控制系统设定的温度，空调温度调节算法应结合用户个人需求进行调节^[8]。本课题提出的基于人体舒适度的空调智能温控系统，在考虑顾客行为习惯之后，提出一种用户行为与热舒适算法的平衡设计，相比于一些传统温度控制算法，本文提出的算法更贴近用户真实热感觉，兼容了人性化与节能环保的目的。

1 系统构成及工作原理

系统主要由 STM32 微控制器、温湿度传感器、黑球辐射温度计、光线感应器、电容触摸按键模块等组成，结构框图如图 1 所示。

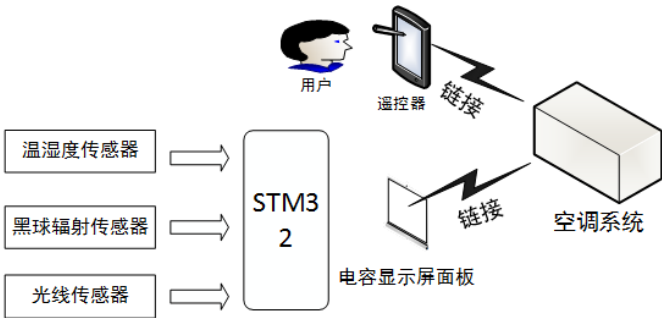


图 1 系统结构框图
Fig. 1 System block diagram

本系统选取了 SHT10 温湿度传感器，负责获取酒店客房内实时环境温度和相对湿度值^[9]，串行数据输出至 STM32 微控制器，为最适环境温度算法提供参数。黑球温度计主要负责测量实感温度，环境中的辐射热被表面涂黑的铜球吸收，使铜球内气温升高，用温度计测量铜球内的气温，并根据客房环境温度及风速计算出环境中自然对流时的平均辐射温度。STM32 微控制器负责处理外接传感器所采集的环境数据，并通过设定的算法来输出对应的调节指令，发射控制信号。电容触摸按键模块选用 ATK-4.3'TFTLCD 电容触摸屏模块，负责完成人机交互以及环境数据的显示，该触摸屏采用 NT35510 驱动，该芯片直接自带 GRAM，无需外加驱动器，因而，STM32 可以轻易驱动。该系统的硬件结构图如图 2 所示。

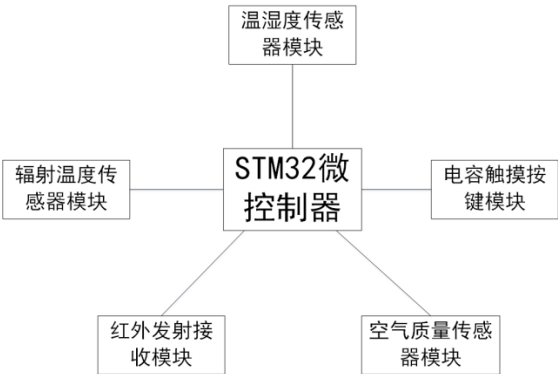


图 2 硬件结构图
Fig. 2 Hardware structure diagram

2 基于用户行为分析的算法研究

在人体众多的舒适需求中,热舒适一直是环境评价体系的重要方面,人体的热舒适度受到诸多因素的影响,评价环境热舒适的指标很多,其中以 PMV 预测热舒适的指标最具代表性,其包含了与人体热舒适感相关的诸多影响因素,是目前最全面、应用最广泛的热环境评价指标。

2.1 综合指标热舒适方程

人体需要维持正常的体温,要使体内产热量与散热量保持平衡,为了进行各种方式的散热计算,人体的总热平衡方程式为:

$$M - W - C - R - E - S = 0 \quad (1)$$

式中有 6 个变量:人体能量代谢率 M 、人体所做机械功 W 、人体外表面向周围环境以对流形式散发的热量 C 、人体外表面向周围环境以辐射形式散发的热量 R 、汗液蒸发和呼出水蒸气带走的热量 E 、人体所需热量 S 。上式中各变量单位均为 W/m^2 。

为了得出综合的舒适指标,丹麦工业大学 Fanger 教授提出了描述人体稳态条件下的能量平衡热舒适方程^[10],前提条件是:第一,人体处于热平衡状态,且蓄热量为零;第二,皮肤平均温度适应最佳舒适;第三,人体拥有最佳排汗率。热舒适方程式为:

$$\begin{aligned} (M - W) = & f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) + 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ & + 3.05[5.733 - 0.07(M - W) - P_a] + 0.42(M - W - 58.2) \\ & + 1.73 \times 10^{-2} M(5.867 - P_a) + 0.0014M(34 - t_a) \end{aligned} \quad (2)$$

式中有 8 个变量:人体能量代谢率 M 、人体所做的机械功 W 、空气温度 t_a 、空气中水蒸气分压力 P_a 、环境平均辐射温度 $\bar{t}_r$ 、服装表面系数 f_{cl} 、服装外表面温度 t_{cl} 、黑球体与空气的对流换热系数 h_c , 试验中, f_{cl} 和 t_{cl} 均由服装热阻值 I_{cl} 决定, h_c 与风速存在一定函数关系, W 取零。故热舒适方程体现了人体处于热平衡状态时, M 、 t_a 、 P_a 、 $\bar{t}_r$ 、 I_{cl} 、 v_a 六个影响因素之间的恒定关系^[11]。

2.2 预测平均评价指标 PMV(Predicted Mean Vote)

PMV 是由 ASHRAE 的热感觉指标来预评估一群人的平均热舒适指标。Fanger 用统计学手段推导出了人体热负荷与 PMV 之间的等式关系

$$PMV = 0.303 \exp(-0.036 M) + 0.0275 TL \quad (3)$$

式中: L : 人体热负荷($M-W$), W/m^2 。

上述方程将环境变量与服装热阻以及人体新陈代谢率等个人因素综合在一起提出了 PMV 等衡量标准。以实际空调环境下人体热反应和热舒适度与 PMV 的关系为主,综合其他不同环境对人体热舒适度的影响,利用 PMV 公式计算出实际环境下最迎合人体舒适性的冬夏室内空调环境参数,实测结果允许有 10% 的受试者不满意,此时对应的 PMV 区间是(-0.5, +0.5)。

2.3 用户行为与热舒适算法的平衡设计

考虑到顾客的习惯,进入客房后可能会选择极端温度的设定,造成极大的浪费,但有部分用户确有自己的温度需求,由最适温度算法得出的温度未必是人体所感觉的最适环境温度,为协调这一矛盾,本文采用试验测试及调查问卷的形式深入研究。

问卷中同时标定采样点的湿度和温度, 问卷涉及的的主要内容: PMV 和平均热感觉 MTS (Mean Thermal Sensation)。冷热感评级按照 Fanger1973 年相关研究分为七级; 同时依照冷热感评级把干湿度分为七级; 主观舒适度分为四级; 具体分级参照表 1。在调查过程中, 服装热阻值、风速、平均辐射温度取一定值。

表 1 受试者的感觉尺度

Tab. 1 The subject's sensory scale

	-3	-2	-1	0	1	2	3
冷热感	很热	热	较热	适中	较冷	冷	很冷
干湿度	很湿	湿	较湿	适中	较干	干	很干
主观舒适度				舒适	稍不舒适	不舒适	很不舒适

调查结果表明, 武汉市夏季大部分酒店客房空调温度低于夏季实际空调环境的中性温度 25℃; 冬季酒店客房空调温度也大多高于冬季实际空调环境的中性温度 23℃。在对实际酒店客房空调环境中人体热舒适性统计中, 选择了 274 名夏季调查对象和 248 名冬季调查对象, 测试对象的年龄区间为 18 到 50 岁, 男女比例相等, 为避免大部分受试者已经适应武汉四季气候而影响测试准确性, 本调查所选择的测试对象在武汉居住时间的平均值大约为 1 年。实验选择酒店房间若干 (各配置有相同型号的空调 1 台)。

根据式 2 和式 3 得, 服装表面系数 f_{cl} 、服装外表面温度 t_{cl} 均可由服装热阻 I_{cl} 来决定。服装热阻由受试者的着衣量来等价换算: $I_{clo}=0.82\Sigma I_{clo}$, $I_{clo}=0.155K\cdot m^2/W$ 。根据测试对象的数据统计得到夏季着衣量平均值为 0.34 clo, 冬季着衣量平均值为 1.37 clo。

而本次测试的对象仅限酒店住户, 所以活动量也不大, 平均值为 1.2met (人体新陈代谢率单位 1met=58.15W/m²), 相当于轻活动量范围。表 2、3 中统计了冬夏季节不同湿度及温度条件下的 PMV 和 MTS 值。

表 2 夏季不同湿度下的 PMV 与 MTS 值

Tab. 2 PMV and MTS values at different humidity in summer

湿度 40% 夏季空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-2.73	-2.15	-1.93	-1.81	-1.65	-1.38	-1.06	-0.82	-0.42	-0.04	0.24	0.57	0.93	1.13	1.35
MTS	-1.42	-1.16	-1.02	-0.95	-0.84	-0.67	-0.49	-0.31	-0.19	-0.06	0.02	0.41	0.82	1.05	1.23
湿度 50% 夏季空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-2.88	-2.49	-2.14	-2.03	-1.83	-1.47	-1.35	-0.74	-0.26	0.24	0.48	0.72	0.93	1.13	1.46
MTS	-1.62	-1.32	-1.04	-0.97	-0.74	-0.59	-0.46	-0.31	-0.14	0.02	0.37	0.53	0.94	1.13	1.67
湿度 60% 夏天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-2.83	-2.38	-2.04	-1.78	-1.46	-1.23	-1.12	-0.86	-0.35	-0.04	0.18	0.34	0.45	0.68	1.21

MTS	-1.58	-1.36	-0.96	-0.85	-0.82	-0.73	-0.61	-0.47	-0.36	-0.17	0.02	0.14	0.20	0.58	0.71
湿度 70% 夏天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-2.81	-2.24	-1.93	-1.72	-1.47	-1.23	-1.05	-0.73	-0.48	-0.13	0.27	0.46	0.78	0.99	1.23
MTS	-1.67	-1.12	-0.84	-0.72	-0.59	-0.32	-0.15	-0.04	0.12	0.25	0.29	0.41	0.67	0.89	0.91
湿度 80% 夏天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-2.85	-2.65	-2.03	-1.78	-1.64	-1.35	-1.03	-0.76	-0.47	-0.13	0.25	0.49	0.73	1.02	1.23
MTS	-1.56	-1.04	-0.79	-0.73	-0.64	-0.47	-0.21	-0.11	-0.03	0.23	0.37	0.61	0.79	1.03	1.34

130

表 3 冬季不同湿度下的 PMV 与 MTS 值
Tab. 3 PMV and MTS values at different humidity in winter

湿度 40% 冬天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-1.72	-1.59	-1.36	-1.23	-1.03	-0.74	-0.26	0.24	0.47	0.70	0.92	1.25	1.37	1.41	1.58
MTS	-0.74	-0.67	-0.62	-0.55	-0.49	-0.24	-0.17	-0.09	0.05	0.14	0.52	0.95	1.03	1.33	1.68
湿度 50% 冬天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-1.62	-1.27	-1.15	-0.97	-0.69	-0.34	-0.03	0.13	0.25	0.47	0.61	0.78	0.92	1.13	1.24
MTS	-1.03	-0.87	-0.79	-0.72	-0.64	-0.51	-0.39	-0.14	-0.02	0.17	0.21	0.37	0.53	0.70	0.97
湿度 60% 冬天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-1.68	-1.48	-1.29	-1.19	-0.99	-0.62	-0.21	0.22	0.45	0.67	0.86	1.15	1.25	1.34	1.55
MTS	-0.81	-0.71	-0.65	-0.58	-0.52	-0.27	-0.21	-0.07	-0.03	-0.15	0.55	0.97	0.99	1.29	1.57
湿度 70% 冬天空调															
温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-1.65	-1.44	-1.22	-1.13	-0.91	-0.56	-0.14	0.27	0.55	0.74	0.97	1.23	1.33	1.52	1.64
MTS	-0.85	-0.77	-0.71	-0.66	-0.59	-0.36	-0.29	-0.17	-0.11	0.47	0.86	0.95	0.97	1.21	1.52
湿度 80% 冬天空调															

135

温度 (°C)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PMV	-1.68	-1.47	-1.29	-1.20	-1.01	-0.63	-0.23	0.37	0.69	0.79	1.06	1.32	1.41	1.65	1.72
MTS	-0.83	-0.72	-0.69	-0.63	-0.52	-0.31	-0.22	-0.14	-0.05	0.42	0.77	0.83	0.84	1.13	1.41

本测试结果中的数据取所有被测试者的 PMV 值和 MTS 值进行平均得到。其中，MTS 描述了人体实际平均热感觉，本调查采用调查问卷的方法，使被测试者填写感觉等级，最后进行平均。

以夏季相对湿度为 60%为例可绘制实际空调环境下 PMV-MTS 关系图，如图 3 所示。

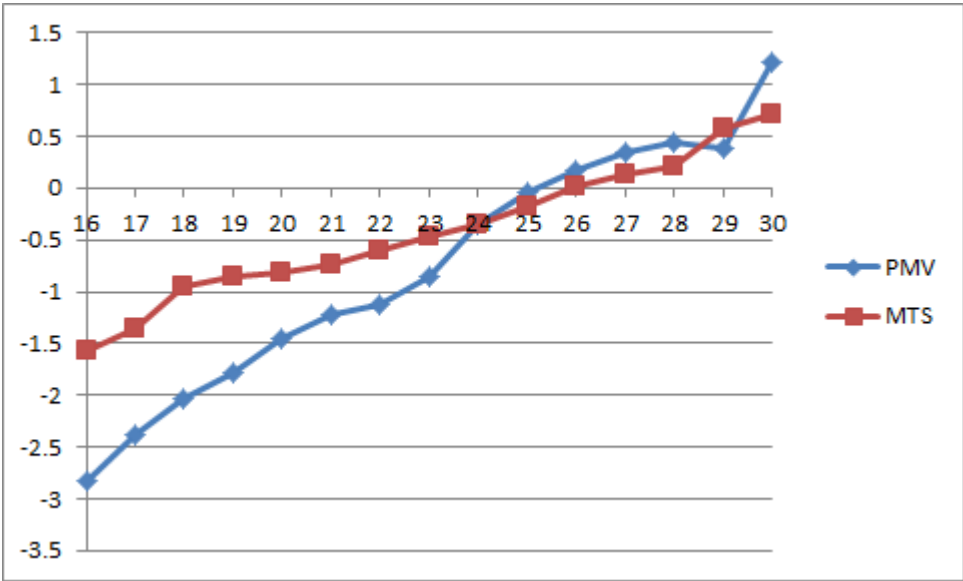


图3 PMV 与 MTS 曲线对比图

Fig. 3 Comparison of PMV and MTS Curve

由线性回归方法，根据以上所测数据以及曲线对比可得 MTS 与 PMV 之间的关系为： $MTS=0.0472+0.413PMV$ 。经大量数据统计可得，在实际空调环境下，夏季与冬季一些参数如热中性温度、热环境参数（即温度及湿度）对比具体如表 4

表 4 实际空调环境下夏季与冬季参数对比

Tab. 4 Comparison of summer and winter parameters in actual air - conditioned environment

	实际空调环境下	
	夏季	冬季
热环境参数	16℃-30℃	
	40%-80%	40%-80%
热中性温度	25℃	23℃
MTS 与 PMV 的关系	$MTS=0.0472+0.413PMV$	

从图 3 中可以看出 PMV 与 MTS 在不同环境下的差异，即表明住户在房间里可能会因为不满足于自动控制系统设定的温度而去手动调整空调温度，此时算法需要协调预测最适温度及客户习惯温度。第一个实验表明 PMV 理论值并不一定符合人体实际感受，点出传统算法局限性，同时获取了算法设计中需要的关键数据（MTS 曲线图）。通过分析调查结果以及关系图，本系统决定在算法设计中采取如下设计思路来协调矛盾：程序执行图如图 4 所示。

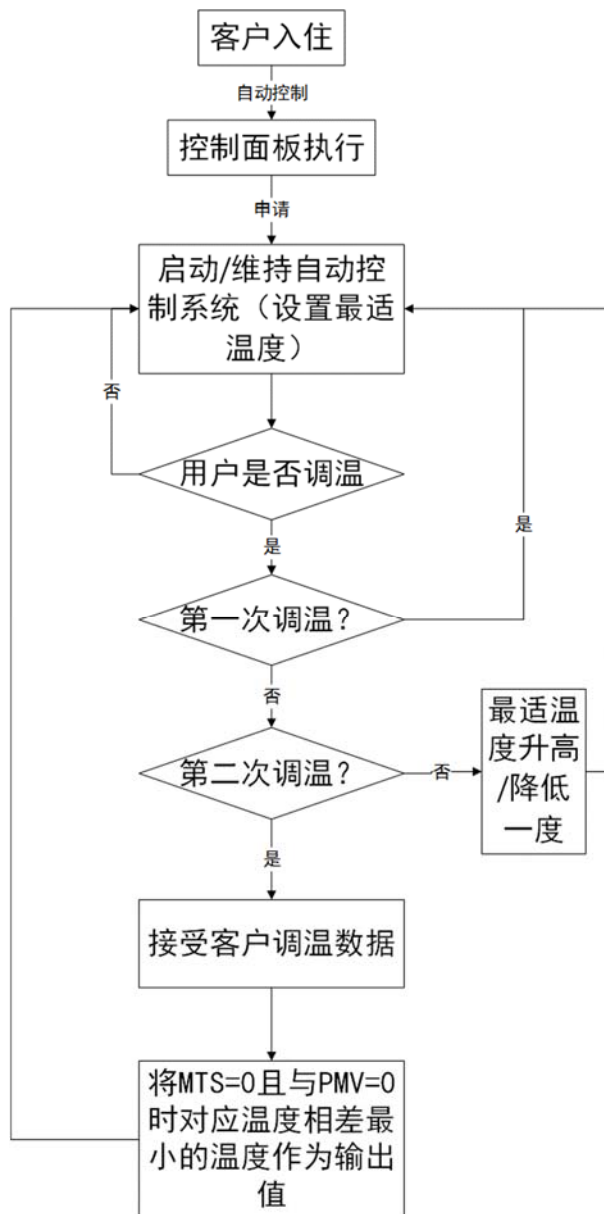


图4 程序执行图

Fig. 4 Program execution diagram

3 系统测试分析

本设计基于单片机实现对空调系统的控制输出，并将其应用于酒店客房空调系统中。在算法的实际设计上，以试验测试及调查问卷的深入研究为基础，最终确立，当用户有实际调温需求时，将当时 $MTS=0$ 且与 $PMV=0$ 时对应温度相差最小的温度作为输出值，以达到平衡用户行为和最适温度的目的。为了能够较直观地体现该系统的节能性与舒适性，本研究分别对系统进行了测试调查和分析。

3.1 系统节能效果分析

就本系统的节能效果分析，本文设置两组对比试验来验证算法的节能效果。

对照实验一（冬季）如下：

该对照实验选取了基本相同的实验环境，如完全相同尺寸大小与格局的酒店客房，使用

时间相等且型号相同的空调,基本相同的人员结构等。对客房一的空调不做任何处理,客房二的空调采用本研究的酒店客房环境监测与调节系统。将两台空调的初始温度都设置为某一温度(在本实验中,设置为 20℃),空调运行时间为晚上 20:00 到次日 8:00,共计 12 小时,并用数字式功率计测量空调功耗。得到数字功率计示数分别得到的实验组和对照组的实际功耗并进行对比。其中冬季功耗比较图如图 5 所示:

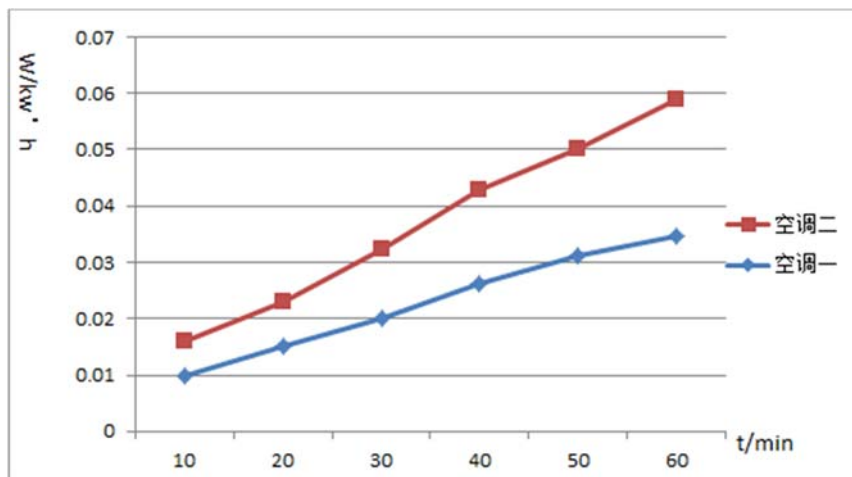


图 5 冬季能耗对比图

Fig. 5 Comparison of winter energy consumption

对照试验二(夏季)如下:

基本对照实验原理与实验一相同,将测试时间选在夏季。通过数字功率计示数分别得到实验组和对照组的实际功耗并进行对比。其中夏季功耗比较图如图 6 所示:

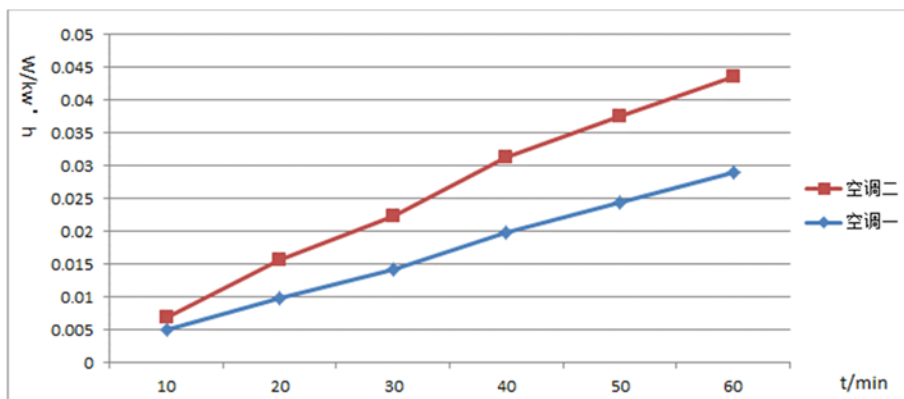


图 6 夏季能耗对比图

Fig. 6 Comparison of summer energy consumption

通过比较冬季与夏季能耗对比图,可得出实验组空调相对于对照组空调实际节能约在 7%左右。

3.2 系统体验效果分析

为了验证本系统带给人的舒适度,本文通过统计调查设计实验验证人性化及舒适性:

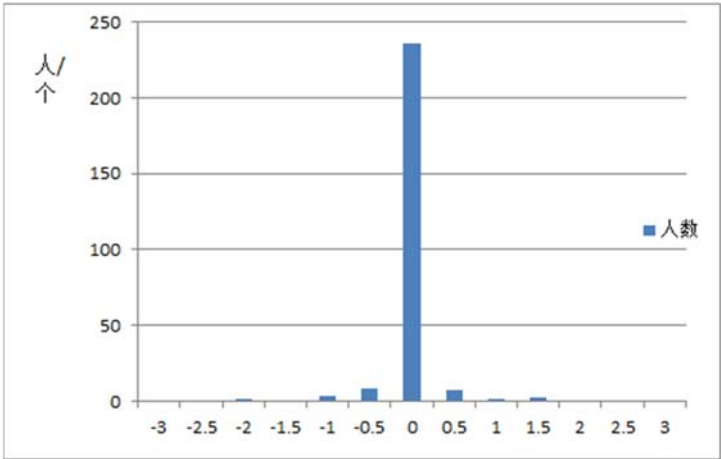
为了验证冬夏两季系统的可行性,本文进行了两次实验。冬季实验时间为 2016 年 12 月 27 日到 2017 年 1 月 17 日,夏季实验时间为 2016 年 7 月 6 日到 2016 年 7 月 20 日。

在保证男女比例相等、各年龄段人数相同的情况下,使其体验采用了智能温控系统的空调房,并在第二天对这一天的个人体验进行打分。调查选取了完全一样的实验环境,提供被调查人相同的地理环境和包括空调型号在内的房间条件。为了优化 MTS 等级,得到更为具体的数据,本实验对表 1 进行了更加精确的细化,统计数据并对其进行整理分析。其中,冬

190季随机抽取 264 人，得到的数据如表 5 和图 7（横坐标为 MTS 等级，纵坐标为该等级人数分布）所示，夏季随机抽取 276 人，得到的数据如表 6 和图 8 所示。

表 5 冬季用户体验打分统计表
Tab. 5 Winter users' experience score statistics table

	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
舒适感	极冷	很冷	冷	较冷	稍冷	微冷	适中	微热	稍热	较热	热	很热	极热
人数	0	0	2	1	4	8	236	7	2	3	1	0	0



195图 7 用户体验分数分布图
Fig.7 Users' experience score distribution diagram

通过冬季调查统计分析可知，本系统对温度的调节使人感觉舒适的占 89.4%，用户打分的平均值为-0.0039，接近于 0，几乎达到了人体最舒适的状态。

表 6 夏季用户体验打分统计表
Tab. 1 Summer users' experience score statistics table

200

	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
舒适感	极冷	很冷	冷	挺冷	稍冷	微冷	适中	微热	稍热	挺热	热	很热	挤热
人数	0	0	2	1	3	7	252	6	3	1	1	0	0

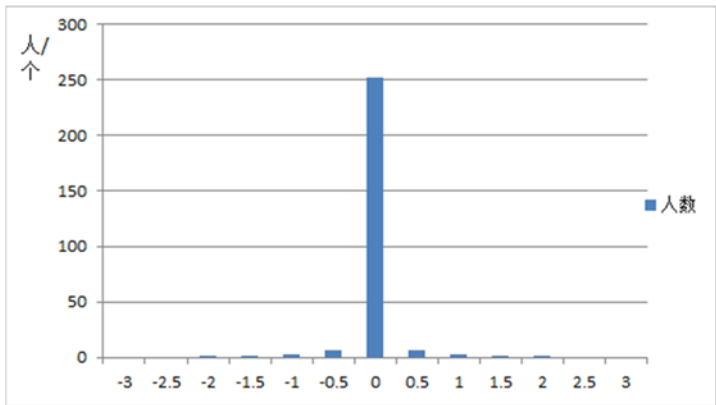


图 8 用户体验分数分布图
Fig.8 Users' experience score distribution diagram

205 通过夏季调查统计分析可知,本系统使人感觉舒适的人数占到 91.3%,用户打分平均值为-0.0091,接近于 0,几乎达到了人体最舒适的状态。

经过冬夏两季的调查分析,本文可以证明该系统在制冷、制热两方面基于热舒适度智能调节温度的可行性,且其能很好地达到人体的满意值。在该系统的工作下,人体舒适度有所提高。

210 通过测试与调查,可以根据数据发现,整个控制调节过程平稳迅速,节能效果明显,且本算法设计在实际应用上协调了预测最适温度值和客户习惯温度值,解决纯理论研究在实际应用中的矛盾,能达到用户较高的满意度。相较于其他研究方案,具有明显的可行性与优越性。

4 结语

215 本文的目的是为了提升用户在酒店客房使用空调的舒适度,克服用户使用过程中一些不良习惯产生的资源浪费,针对传统的 PMV 公式以及 SET 标准计算的不足,提出了一种协调用户控温行为与理论值的最适环境温度控制系统。首先根据传统热舒适方程和 PMV 公式算出最适温度,当用户手动控制温度,则由当前湿度值决定此时 PMV-MTS 关系图,将此时 MTS=0 且与 PMV=0 时对应温度相差最小的温度作为输出值,如若用户再次手动调整温度,220 则在第一次协调后的温度基础上依次增加或降低一度,直至用户手动调整的温度值。相比于一些传统温度控制算法,本文出的算法更贴近用户真实热感觉,兼容了人性化与节能环保的目的。

225 本文提出的系统虽然在人性化与节能的兼容性上有了很大提升,但是空调系统对热湿环境调节的时滞性无法消除,使得控制无法拥有充分的计算和调节时间,对系统进行足够多频次的调节,即很难到达最优调节点,而是无限靠近最优点,使空调总是逼近最优点运行。

[参考文献] (References)

- 230 [1] 张清琳.温度控制与热舒适控制空调系统舒适性及节能性比较研究[D].长沙:湖南大学,2012.
[2] 吴添兴.酒店中央空调系统节能设计应用分析[J].江西建材,2016,5:43-44.
[3] 张小琼.基于改进萤火虫群优化算法的 BP 神经网络研究[D].南宁:广西大学,2015.
[4] YU Yao、WANG Xianquan,ZHU Guilin et al .Study of Temperature Control System Based on BP Neural Network Self-Tuning PID Controller[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 6:1360-1363.
[5] 李虎.BP 算法的改进及其在 PID 优化控制中的应用研究[D].西安:西安科技大学,2012.
235 [6] El X, LING H. Robust visual tracking using L1 minimization .[C].Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computer Vision. Berlin, German.2009.1436-1443.
[7] GURBAN E H, ANDREESCU G D. Comparison of modified smith predictor and PID controller tuned by genetic algorithms for greenhouse climate control[C].IEEE 9th international symposium Oil applied computatuional intelligence and informatics. At timisoara, romania: SACI, 2014: 79-83.
240 [8] 蒋志恒,张明媛,袁永博.兼顾节能效益的建筑室内热舒适温度调整研究[J].建筑经济.2016,37(3): 84-88.
[9] 袁萌,王彦淞.室内空气温湿度对人体热舒适性影响的实验研究[J].建筑节能,2014,4(8):17-20.
[10] Fanger P O.Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
245 [11] 李文菁,杨昌智.不同热环境下的人体热感觉[D].长沙:湖南大学,2006.