

基于热舒适度的办公建筑 HVAC 系统节能控制^①



逯广浩, 汪明, 谢浩田, 孙启凯

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

通讯作者: 汪明, E-mail: xclwm@sdjzu.edu.cn

摘要: 建筑节能控制是一个满足舒适需求条件下的多目标优化问题, 然而对于缺失运行数据的新建建筑, 如何控制供暖、通风和空调 (HVAC) 系统达到既舒适又节能的效果是一个控制难题. 针对这个问题, 本文首先建立了新建建筑空间模型, 然后对该模型进行能耗仿真分析, 在此基础上, 提出基于人员热舒适度的模糊控制算法, 得出最优控制区间, 从而在较低能耗水平情况下获得更长的热舒适天数, 达到既节能又舒适的目标. 基于人员热舒适度的节能控制对建筑 HVAC 系统绿色运行具有促进作用.

关键词: 热舒适度; HVAC 控制; 建筑节能; 能耗模拟

引用格式: 逯广浩, 汪明, 谢浩田, 孙启凯. 基于热舒适度的办公建筑 HVAC 系统节能控制. 计算机系统应用, 2021, 30(8): 31-39. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8017.html>

Energy-Saving Control of Office Building HVAC System Based on Thermal Comfort

LU Guang-Hao, WANG Ming, XIE Hao-Tian, SUN Qi-Kai

(School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Building energy-saving control is a multi-objective optimization problem considering the comfort demand. However, for the new buildings lacking operation data, it is a real conundrum to control the Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) system to achieve both comfort and energy-saving. Aiming at this problem, this study first builds the space model of new buildings and then carries out simulation of energy consumption on the model. On this basis, it puts forward a fuzzy control algorithm based on thermal comfort of personnel to determine the optimal operation interval. Therefore, longer days of thermal comfort are enabled under the condition of lower energy consumption, achieving the goal of both energy saving and comfort. The energy-saving control based on the thermal comfort of personnel can promote the green operation of HVAC systems in buildings.

Key words: thermal comfort; HVAC control; building energy saving; simulation of energy consumption

建筑节能是绿色建筑可持续发展方面的一项重要内容. 在住宅和商业建筑的能源消耗中, 供暖、通风和空调 (HVAC) 系统占总体能源消耗的 50%^[1]. 因而对建筑 HVAC 系统进行节能控制和优化, 是一项关键且有效的措施^[2]. 然而在我国, 一方面由于办公建筑是依据建筑设计标准进行设计和建造的, 通常缺乏针对办公建筑的外部环境、应用场景、室内设备等实际条件的

考量依据, 对不同情景下的建筑运维绩效没有进行全面有效的模拟与测试^[3]; 另一方面, 由于缺乏建筑专业知识, 客户一般也不会向设计院和建筑公司进行运维绩效方面的反馈^[4]. 这造成了建筑后期运行时不是处在最佳运行工况下, 无法保证既舒适又节能的满意效果. 为此, 对办公建筑的能源消耗情况进行模拟和评估, 通过对比气候条件、建筑设计、建筑围护结构、居住者

① 基金项目: 国家自然科学基金 (62073196, 61273326)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62073196, 61273326)

收稿时间: 2020-11-12; 修改时间: 2020-12-12; 采用时间: 2020-12-25; csa 在线出版时间: 2021-07-31

行为、设备系统控制、建筑运维等不同参数变化对能源消耗的影响寻求更好的建筑节能策略,这对研究建筑节能问题是非常必要的^[5]。

在所采取的建筑节能策略中,需要对热舒适性有深入了解,从而建立 HVAC 系统合适的节能策略,这是因为节能不应以牺牲用户的舒适度和工作效率为代价^[6]。因此在建筑能耗模拟的最终报告中,热舒适性报告是不可忽视的一部分,考虑建筑节能同时保证全年热舒适性也是最优的。当前的建筑能耗模拟软件程序,例如 EnergyPlus,可分析 HVAC 性能(满负荷/部分负荷)、设计运行策略和替代方案,并可在较大的时间范围(每年,每月,每天)提供精确的能耗评估^[7]。

针对建筑能耗分析,国内外众多研究人员使用建筑能耗模拟软件对建筑模型进行了能耗分析,Sardo-ueinasab 等利用 EnergyPlus 中的能源管理系统(EMS)模块开发了并联风扇供电的终端单元进行了建模和分析^[8]。石磊等通过建筑能耗模拟软件对内蒙古西部办公楼的能耗现状分析,利用统计学方法提出了针对办公建筑的节能策略^[9]。Al-janabi 等^[10]建立了自由浮动模型(free-floating aire system)、理想负载空气系统模型(ideal loads air system)和实际空气系统模型(detailed air system)对在建的斯坦利保利工程大楼进行了建模,并分析了不同建模方法之间的差异。

为使研究具有典型性,本文选用山东济南某办公建筑空间进行能耗模拟,主要开展了以下工作:(1)对建筑空间进行了建模;(2)进行 EMS 开发并进行能耗模拟;(3)基于 PMV 设计了基于数据和经验的 HVAC 控制策略,并对不同策略进行了分析对比,最终得出了最优控制区间。

1 建筑空间建模

为了使研究具有典型性,需要选择实际工程进行分析^[11],本文选取研究对象是位于山东省济南市的一座 25 层办公建筑中的办公空间。该办公空间位于整栋建筑的一层东南角,南部开窗,总建筑面积 672.1 m²。其内部隔断分为大办公空间、院长室、会议室、休息室和卫生间等子空间,建筑设计图如图 1 所示。大办公空间设计人数为 70 人,每人配备台式电脑 1 台,额定设计功率 400 W, HVAC 系统采用变风量空调系统,办公空间内部有 8 台送风设备;东部外墙无窗,南部外墙窗墙比为 42%,是一个典型的公共办公空间,院长室设

计人数为 2 人,每人配备台式电脑 1 台,额定设计功率 600 W,一台变量空调系统送风设备,内墙为玻璃隔断,外墙窗面积为 4.5 m²。会议室设计人数为 14 人,无电脑设备,一台变风量空调系统送风设备,内墙为玻璃隔断,外墙窗面积为 4.5 m²。休息室设计人数为 3 人,无电气设备。其它外部区域包括卫生间为其他空间空调设备供暖制冷,不予考虑。因此,办公空间建模的总面积为 456 m²,设置一个单独的 HVAC 区域, HVAC 系统采用变风量空调系统,温度设定点为制冷 25 °C、供暖 20 °C。



图 1 研究对象建筑设计情况

整个办公空间设计总人数为 89 人,其中休息室和会议室使用时间较短,且与其它空间人员有重合。因此不予考虑,定义实际设计人数为 72 人,其中大办公空间内设计人数为 70 人,院长室设计人数为 2 人。

对于建筑物照明,其功率密度按照国家标准设定为 11 W/m²。办公设备主要是台式电脑,每人配备 1 台,设计每位员工的可用设备功率为 400 W/人,院长室中的正副院长按 600 W/人设计。在设计时,办公空间的总人数设计为 72 人,设备功率与人员数量相匹配。通过调查该办公空间人员上班时间可以制定人员时间表,作为控制室内照明、电气设备以及 HVAC 系统的依据,调查后制定的人员时间表如图 2 所示。

根据国家制定的《室内空气质量标准》,夏季空调温度标准值在 22–28 °C 之间,冬季采暖温度标准值在 16–24 °C 之间。因此将制冷温度设定点设定为 25 °C,供暖温度设定点设定为 20 °C。

2 基于 PMV 优化控制

HVAC 系统的优化控制内容主要是节能和保证舒适度,对于 HVAC 系统节能的研究有许多先例,包括利用预估模糊 PID^[12]、自抗干扰控制^[13]、TR 智能算

法^[14]等先进控制技术达到节能的目的,也有基于舒适度的 HVAC 系统优化控制^[15,16].对于新建建筑,在对 HVAC 系统的优化控制进行研究的过程中,利用 EnergyPlus 的能源管理系统 (EMS) 进行 HVAC 系统优化控制模拟是一个直接且有效的手段^[17].

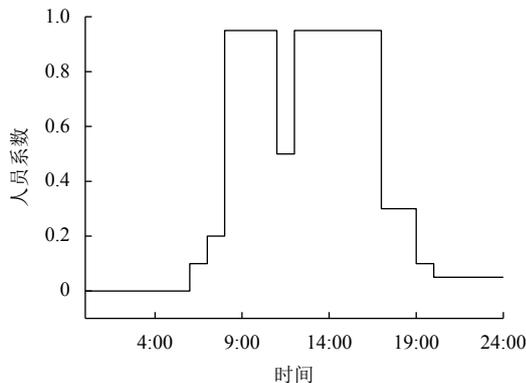


图2 工作日人员时间表

能源管理系统是 EnergyPlus 中可实现高级控制模块之一. EMS 能够访问各种传感器数据,并使用此数据来指挥各种类型的控制动作.其概念是在 EnergyPlus 内部模拟实际建筑中使用的数字能源管理系统可能实现的控制类型.在 EnergyPlus 控件的层次结构中,EMS 模块是建筑系统的高级通用监视控件,它支持建立各种变量,并使用 ERL (Energyplus Run Language) 编写控制程序,实现对建筑物能源相关系统的高级监督控制.由于热舒适性 (PMV) 需要考虑的因素较多,且建筑节能问题的研究中经常会有忽视热舒适度作用的情况存在,利用 EnergyPlus 进行 EMS 模块开发基于热舒适度的 HVAC 系统优化控制方法并进行分析是解决建筑节能问题的一项有意义的工作.

2.1 PMV 指标选择

自二十世纪六十年代建立了第一个基于 Fanger 的人体热平衡方程式的热舒适模型起, Fanger 热舒适度模型一直是最经典的热舒适模型^[18],热舒适模型包含 6 个参数:空气温度、辐射温度、相对湿度、风速、衣物热阻和活性. EnergyPlus 软件内置多种热舒适度模型,其中就包括 Fanger 模型,通过对输入文件中对象 People 进行相关设置可以输出 Fanger 模型的各项参数变量,最主要的两个判断人体热感觉的指标就是 PMV (预测平均热感觉指标) 和 PPD (预期不满意百分率).

PMV 模型采用 ARSHER55-2004 标准 7 分制,其指标如表 1 所示^[19].《民用建筑室内热湿环境评价标

准》中对不同热舒适等级的 PMV 和 PPD 值进行了规定,热舒适性等级规定如表 2 所示^[20].由于 Fanger 模型的两个主要指标 PMV 和 PPD 在考虑多中因素的情况下对人体感觉情况具有直观反映,因此选用 Fanger 模型进行 EMS 程序的开发.

表1 ARSHER55-2004 标准 7 分制

热感觉	热	暖	稍暖	适中	微凉	凉	冷
PMV值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

表2 热舒适性等级规定

热舒适等级	整体评价指标	
一级	PPD≤10%	-0.5≤PMV≤0.5
二级	10%≤PPD≤25%	-1≤PMV≤-0.5或+0.5≤PMV≤+1
三级	PPD≥25%	PMV<-1或PMV>1

在 EnergyPlus 中 PMV 与 PPD 的计算方式如下:

$$PMV = (0.303e^{0.036} + 0.0275)[M - W - 3.504(5.765 - 0.007H - P_a) - 0.42(H - 58.15) - 0.0172M(5.87 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9 \times 10^{-8} f_{cl}(T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] \quad (1)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp - [(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (2)$$

其中, M 为人体能量代谢率, W/m^2 ; W 为人体的机械功率, W/m^2 ; P_a 为人体周围空气水蒸气分压力, Pa; t_a 为人体周围空气温度, $^{\circ}C$; t_r 为平均辐射温度, $^{\circ}C$; f_{cl} 为人体服装面积和裸露面积, m^2 ; t_{cl} 为服装外表面温度, $^{\circ}C$; h_c 为表面传热系数, $W/m^2 \cdot k$.

2.2 变量

在 EMS 程序中,主要用到的变量类型传感器、执行器和全局变量等需要使用以下变量来进行整体区域的控制,虽然模型简化为单区域的 HVAC 系统,但经过变量执行设备的更改可以应用于多区域 HVAC 系统中.表 3 显示了用于实现基于舒适度控制算法的不同变量.

在设定的变量中,传感器的作用是获取建筑内部系统或组件的状态,全局变量的作用是对程序进行控制和计算,物理上并不存在,执行器变量的作用是控制组件完成基于 PMV 的温度设定点控制在 HVAC 系统中的运行.

表3 EMS程序变量表

变量用途	定义的变量名	变量类型	组件名称	执行元件类型
控制供暖设定点	HEATSP	Actuator	Living zone direct air	Zone Temperature Control
控制冷却设定点	COOLSP	Actuator	Living zone direct air	Zone Temperature Control
获取室内温度	BSTP	Sensor	Living zone direct air	—
获取冷却设定点	CoolSetPoint	Sensor	Living zone direct air	—
获取供暖设定点	HeatSetPoint	Sensor	Living zone direct air	—
获取PMV值	PMVSensor	Sensor	Living zone direct people	—
获取人员数量	PEOPLE	Sensor	Living zone direct people	—
室内空调模式	HModel	Global Variable	—	—
人员模式	PPModel	Global Variable	—	—

2.3 程序的调用

在 EnergyPlus 的模拟过程中, 需要定义 EMS 程序的调用点, 从而在合适的模拟步骤中调用设计的 EMS 程序. 在 EMS 模块中, ProgramCallingManager 是用于管理调用程序的时间点. 本次开发的 EMS 程序需要在模拟运行阶段: ① AfterPredictorAfterHVACManagers 和 ② InsideHVACSystemIterationLoop 进行程序的调用. 第一个调用点是调用程序 (ModelSet) 的部分, 该部分通过传感器得到室内环境数据判断舒适度程序的运行模式, 第二个调用点主要用来调用算法主程序, 即 (RUNPMVControl), 该程序作用是通过不同模式判断是否需要运行基于 PMV 的控制算法.

由于 PMV 指标的直观可控, 设计以 PMV 为控制量的基于经验和数据的空调设定点控制算法. EMS 程序算法如下.

Step 1. 取本次时间步长中的人数, 然后确定系统中的人员模式 (0-1), 当人员少于 10% 的情况下, 设定为 0, 应该关闭舒适度控制; 人员多于 10% 的情况设定为 1, 应该运行舒适度控制.

Step 2. 模式的判断选择是否运行舒适度控制程序. 当人员模式为 0 时不运行舒适度控制程序. 当人员模式为 1 时, 判断系统模式. 当系统模式为 0 时, 不进行程序的调用; 当系统模式为 1 时, 调用制冷模式的控制程序; 当系统模式为 2 时, 调用供暖模式的控制程序.

Step 3. 当前室内温度, 并且与设定点温度进行比较. 当室内温度位于设定点温度的死区内部时, 确定当前温度令人满意, 系统运行系统模式将设定为 0, 不进行舒适度控制运行; 当室内温度高于冷却设定点时, 系统模式将设定为 1 进行制冷; 当室内温度低于供暖设定点时, 系统模式将设定为 2 进行供暖.

Step 4. 运行控制程序, 调整全年舒适度. 控制程序是基于经验和数据的控制, 基本控制逻辑如模糊规则

表 4 所示, 将规则表精确化后进行 EMS 程序编写, 改变温度设定点的变化量, 如当 $PMV > 1$ 或 $PMV < -1$ 时, 温度设定点在 25 °C/20 °C 的基础上进行重新设定, 当 PMV 值为负时升高温度设定点, 当 PMV 值为正时降低温度设定点. 对模型进行多次建筑能耗模拟, 分析控制方法的可行性.

表4 EMS控制程序模糊规则表

SP/PMV	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
PB	1	0	0	0	0	0	0
PM	0.8	1	0.5	0	0	0	0
PS	0	0.8	1	0.5	0	0	0
ZO	0	0	0	1	0	0	0
NS	0	0	0	0.5	1	0.8	0
NM	0	0	0	0	0.5	1	0.8
NB	0	0	0	0	0	0	1

3 仿真实验及结果分析

3.1 模型能耗分析

自由浮动模型是没有对内部热量调节系统进行定义的建筑模型, 即没有定义 HVAC 系统的模型. 此类建筑模型的内部环境条件仅取决于建筑物的性能和外部天气的变化. 在 ASHRAE90.1 中自由浮动模型一般用于比较建筑能耗模拟的温度计算方面. 图 3 是办公空间的自由浮动模型运行结果. 当室内负载达到设计最大值后, 室内的温度最高可以达到 55.7 °C, 最低在 22.3 °C, 这说明设计数量的人员、设备和照明对整体空间的影响相当大, 且需要较高的冷却负载.

加入高性能变风量空调系统后的建筑能耗组成如图 4 所示, 由于大量设备带来的高热负荷, 制冷能耗占 HVAC 系统能耗 65.6% 左右.

调整人员设备数量为设计数量的 25%、50%、90% 进行能耗模拟, 得出其不舒适小时数情况如表 5 所示, 随着人员的增加全年不舒适小时数先减少后增

加,在达到最低之后制冷负荷增加,平均温度上升,舒适度下降,因此需要设计控制策略补足 HVAC 系统的制冷与供暖效果。

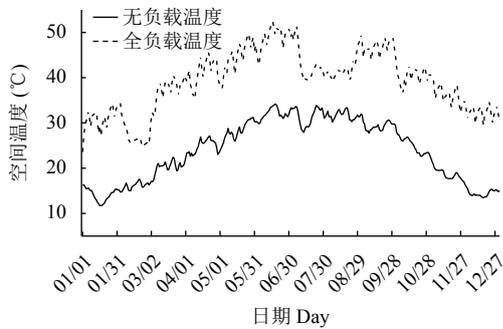


图3 自由浮动模型全年室内温度

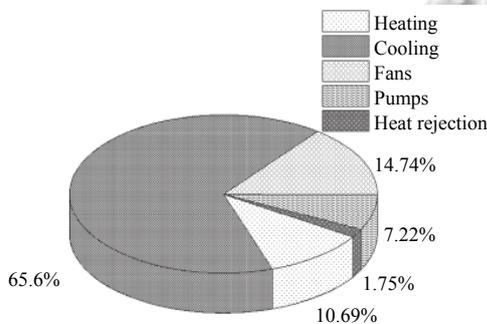


图4 变风量空调系统模型的全年能耗组成

表5 变风量空调系统全年不舒适小时数 (h)

人数	18	35	63	70
全年不舒适小时数	1902.75	1855.50	1780.25	1809.00

3.2 控制算法结果

根据不同的 PMV 值调节不同的温度设定点, PMV 绝对值高则温度设定点变化大, PMV 绝对值低则温度设定点变化小。调节不同的温度设定点变化幅度可以进行比较, 分析出较适合的控制温度, 达到改善全年舒适度的问题。将调节不同温度设定点的控制策略进行编号 (0~3), 其中控制策略 0 为不进行控制, 控制策略 1 为将温度设定点在 22/17 °C 到 28/23 °C 之间调整, 控制策略 2 及控制策略 3 温度设定点分别在 21/16 °C 到 29/24 °C 和 20/15 °C 到 30/25 °C 区间内调节。

调整并运行有 EMS 程序的建筑空间模型, 并在总能耗报告和全年变量变化两方面进行与不运行 EMS 程序的模型对照。总能耗报告中的内容主要进行全年能耗与全年不舒适小时数的对比, 能耗与舒适度数据如表 6 所示。具体的控制规则以控制策略 1 为例, 通过

EMS 中的 subroutine 使用 ERL 语言进行控制程序的编写, 设置温度设定点, 当 PMV 值为 3 以上时, 设定制冷温度设定点为 22 °C, 供暖温度设定点为 17 °C, PMV 值在 2 到 3 之间时设定制冷温度设定点为 23 °C, 供暖温度设定点为 18 °C, 其他相应调整幅度如表 7 所示, 其中表内数值为制冷/供暖温度设定点的温度。

表6 控制策略 0~3 的全年能耗与舒适度数据

项目	策略0	策略1	策略2	策略3
总能耗(kWh)	157783.92	157897.71	157916.80	157955.47
全年不舒适小时数(h)	1809.00	1765.25	1759.25	1756.75
全年制冷能耗(kWh)	22698.87	22763.54	22794.86	22839.26
全年供暖能耗(kWh)	3789.91	3820.20	3796.22	3775.70

表7 控制策略 0~3 的温度与 PMV 区间对应表 (°C)

PMV 区间	策略0	策略1	策略2	策略3
[+3, +∞)	25/20	22/17	21/16	20/15
[+2, +3)	25/20	23/18	22/17	21/16
[+1, +2)	25/20	24/19	23/18	22/17
(-1, +1)	25/20	25/20	25/20	25/20
(-2, -1]	25/20	26/21	27/22	28/23
(-3, -2]	25/20	27/22	28/23	29/24
(-∞, -3]	25/20	28/23	29/24	30/25

根据全年能耗与舒适性报告可以分析得出, 基于经验与数据的控制可以在增加能耗 100 kWh/年左右的的情况下达到增加超过 40 小时/年的舒适时间。对于整体数据而言, 控制程序对全年的舒适性有改善, 但舒适度改善精确到每个步长, 因而需要对全年的舒适度数据进行统计分析, 明确是否对全年运行程序的时间段内的舒适度均有改善, 改善程度如何。

比较 PMV 和 PPD 的变化, 分析运行 EMS 程序对全年舒适度的控制效果, 通过对全年运行时间内的 PMV 与 PPD 数据进行处理。对于 PMV 先求绝对值, 然后用控制策略 0 的数据分别与其它 3 种控制策略的数据进行做差, 输出为正值即可说明对全年的舒适度情况有正向影响。对于 PPD 指标的数据处理方法相同, 用控制策略 0 的数据与其它 3 种控制策略的数据做差, PMV 统计与 PPD 统计数据如图 5 和图 6 所示。

经过 PMV 数据对照, 可以得出, 运行控制策略 1~3 号的 EMS 程序的在全年情况下均对舒适度改善效果显著, 其中策略 1 与策略 2 在全年舒适度改善的平均表现较好, 策略 3 在全年舒适度改善的峰值表现较好, 然而策略 3 在舒适度改善的情况下有较多负值, 且整体能耗指标表现不佳。综合考虑 PPD 指标可以看

出, 策略 1 在全年的舒适度改善上要优于策略 2 与策略 3, 策略 3 在 *PPD* 指标上出现了较大幅度的振荡, 在

全年来看对舒适度的改善效果较差. 总体来说, 3 种控制策略都对舒适性有正面的影响.

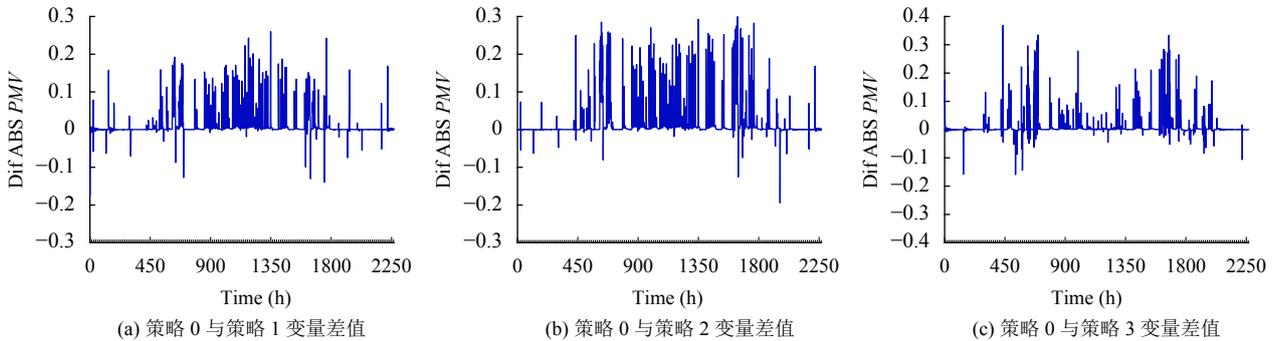


图 5 控制策略 0 与策略 1~3 全年 *PMV* 绝对值差

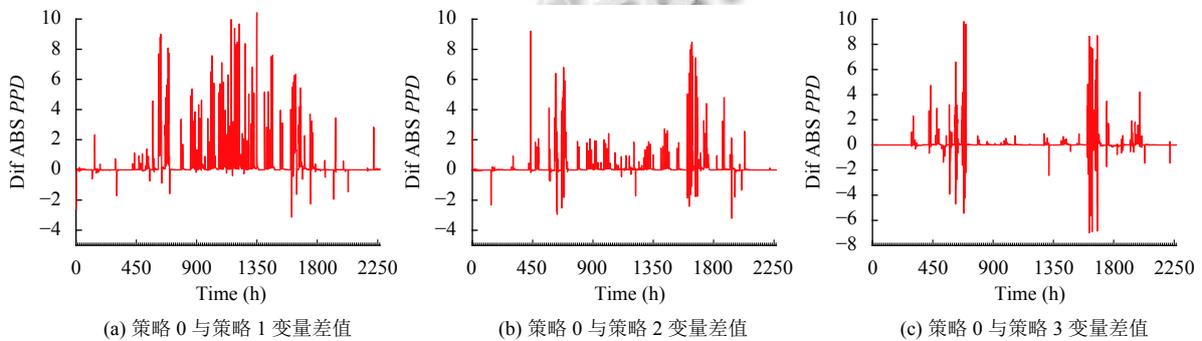


图 6 控制策略 0 与策略 1~3 全年 *PPD* 差

3.3 控制策略优化

虽然策略 1~3 有舒适度的改善效果, 但控制粒度较粗, 且控制精度较低, 为寻求更优的控制效果, 因此需要寻求更合适的控制策略. 因此, 对策略 1~3 进行控制程序改进, 将温度控制粒度由 1 °C 改变为 0.5 °C, 将控制策略编号为 4、5、6 号, 与控制策略 1~3 相似, 其控制规则如表 8 所示, 其中表内数值为制冷/供暖温度设定点的温度.

表 8 策略 4~6 的温度设定点与 *PMV* 区间对应表 (°C)

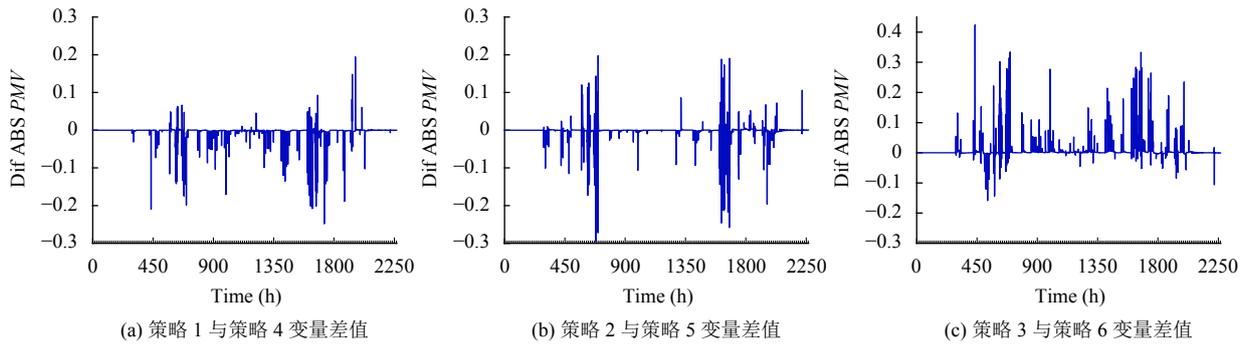
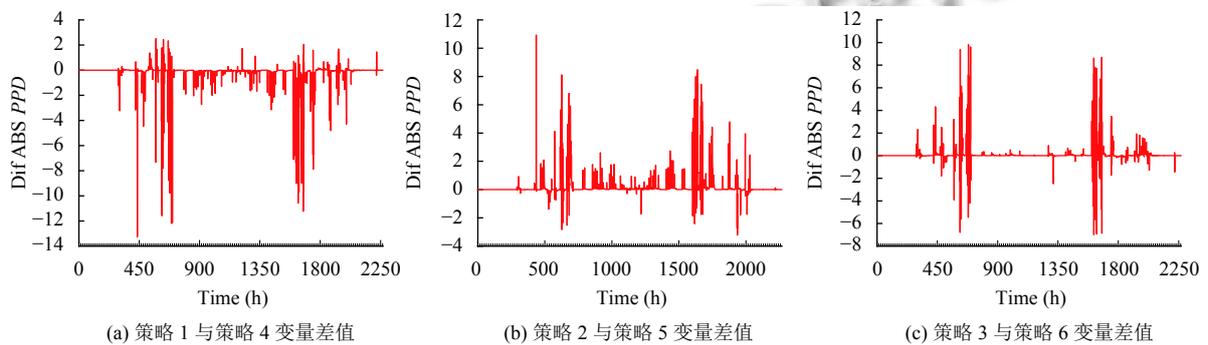
<i>PMV</i> 区间	策略 4	策略 5	策略 6
[+3, +∞)	22/17	21/16	20/15
[+2.5, +3)	22.5/17.5	21.5/16.5	20.5/15.5
[+2, +2.5)	23/18	22/17	21/16
[+1.5, +2)	23.5/18.5	22.5/17.5	21.5/16.5
[+1, +1.5)	24/19	23/18	22/17
(-1, +1)	25/20	25/20	25/20
(-1.5, -1]	26/21	27/22	28/23
(-2, -1.5]	26.5/21.5	27.5/22.5	28.5/23.5
(-2.5, -2]	27/22	28/23	29/24
(-3, -2.5]	27.5/22.5	28.5/23.5	29.5/24.5
(-∞, -3]	28/23	29/24	30/25

为研究温度控制粒度对控制效果的影响, 以策略 1~3 为对照组来分析策略 4~6 的舒适度数据. 通过改变温度控制粒度, 将全年运行程序时间内的 *PMV* 和 *PPD* 值进行处理, 分析温度控制粒度提高对全年舒适度的影响情况. 其中 *PMV* 与 *PPD* 的处理方法是求绝对值, 然后与相应的对照组做差, 策略 4 对应策略 1, 策略 5 对应策略 2, 策略 6 对应策略 3. 全年能耗与舒适度数据如表 9 所示, 全年 *PMV* 与 *PPD* 变化情况如图 7 和图 8 所示.

表 9 控制策略 4~6 的全年能耗与舒适度数据

项目	策略 4	策略 5	策略 6
总能耗(kWh)	157885.63	157915.57	157955.48
全年不舒适小时数(h)	1765.50	1757.75	1755.00
制冷能耗(kWh)	22764.55	22795.14	22838.23
供暖能耗(kWh)	3807.79	3794.95	3775.75

综合表 6 和表 9, 对比控制策略 1~3, 提高了控制粒度确实对能耗和舒适度有一定的影响, 但是改善的效果非常有限, 在全年时间段内只有几个小时的舒适度提高, 效果不明显. 因此需要从舒适度指标上进行分析.

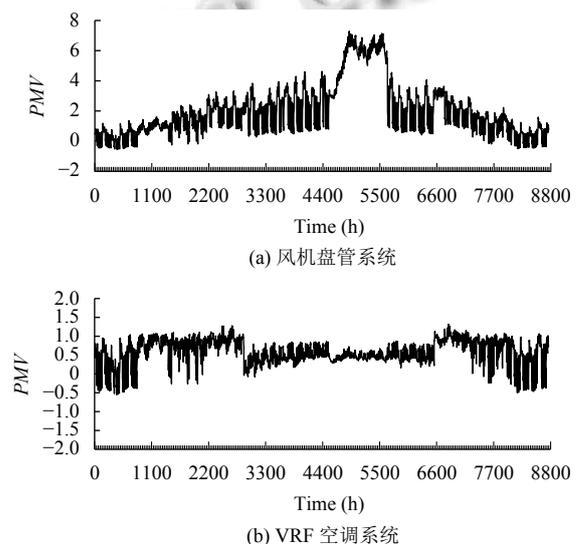
图7 对照组全年 PMV 绝对值差值图8 对照组全年 PPD 差值

分析图7与图8通过全年的 PMV 与 PPD 的变化趋势看,策略4相比于策略1, PMV 与 PPD 的绝对值做差为负的时间较多,整体控制效果差于策略1.策略5相比策略2,在 PMV 值上波动较大, PPD 值全年优于策略1,综合来看策略5控制效果优于策略2.策略6相比与策略3,全年 PMV 值表现优于策略3, PPD 值波动较大,但差值为负的时间较少且差值较小,总体来看控制效果优于策略3.在综合考虑模拟结果后可以得出结论,以 PMV 为控制量调节温度设定点的控制方法中,温度设定点在 4°C 以内波动为最优控制区间.

3.4 多场景应用情况

控制策略的应用研究主要面向于变风量空调系统较为单一,为验证控制策略在建筑能耗模拟中的适用性,对原建筑模型 HVAC 系统进行更改,建立风机盘管系统和可变性冷媒流量中央空调 (VRF) 系统进行控制策略适用性研究.对实验建筑模型来说,由于存在大量的制冷负荷,导致制冷能力较差的 HVAC 系统会导致舒适性差的后果.对风机盘管系统和 VRF 空调系统进行建筑能耗的模拟,其 PMV 值如图9所示.由图可知较变风量空调系统,风机盘管系统的热舒适性较差,

VRF 空调系统性能较好,应用控制策略 123 对两种模型进行 EMS 控制模拟,对其能耗与舒适性变化进行分析,可以得出控制策略的应用范畴.

图9 风机盘管系统和 VRF 空调系统全年 PMV 情况

对运行控制策略 1~3 的风机盘管模型和 VRF 空调模型进行能耗与舒适度的宏观分析,总能耗报告中

的内容主要进行全年能耗与全年不舒适小时数的对比, 能耗与舒适度数据如表 10 所示。

根据表内数据可以看出, 控制策略对风机盘管系统有一定的舒适度改良, 但对 VRF 空调系统基本没有影响, 根据图 9 全年 PMV 值可以看出, VRF 空调系统的热舒适性非常好, 大部分时间在不需控制策略更改温度设定点的 PMV 值内, 导致 EMS 程序运行时间短, 对全年影响较小。对风机盘管 PMV 值变化进行分析, 其 3 种控制策略下的 PMV 差值如图 10 所示。该控制策略对风机盘管系统影响较大, 且温度设定点调整幅度增加对热舒适性改善有较明显的正向效果。

根据模拟与分析可以得出结论, 基于热舒适度的温度设定点控制策略对热舒适性较好的 HVAC 系统影响较小, 对热舒适性较差的 HVAC 系统影响较大。

在热舒适性较差的 HVAC 系统作用下, 增加温度设定点的调整幅度可以更好地产生正面影响, 而在热舒适度较好的 HVAC 系统作用下, 增加温度设定点的调整幅度不一定对热舒适性有正向影响, 但总体来看不会产生负面影响。

表 10 风机盘管系统与 VRF 空调系统控制策略 0~3 的全年能耗与舒适度数据

参数数据	策略0	策略1	策略2	策略3
风机盘管模型总能耗(kWh)	143 843.63	143 926.24	143 978.35	144 034.98
风机盘管模型全年不舒适小时数(h)	2411.75	2402.2	2392.50 h	2363.75
VRF空调模型总能耗(kWh)	145 718.26	147 748.11	145 718.26	145 718.26
VRF模型全年不舒适小时数(h)	1658.50	1632.00	1658.50	1658.50

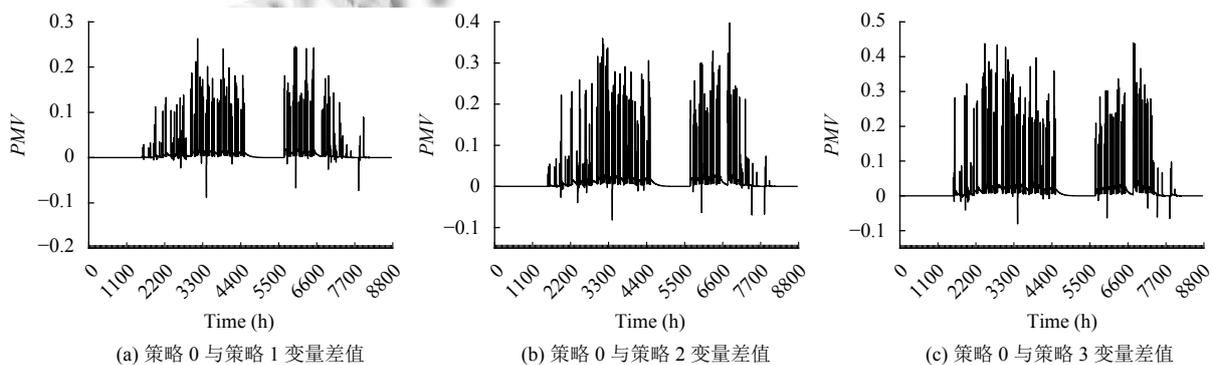


图 10 风机盘管系统全年 PMV 差值

4 结论

建筑 HVAC 系统控制与优化是保障建筑空间舒适、降低建筑能耗的关键环节。本文从舒适和节能的多目标角度出发, 针对典型建筑空间展开 HVAC 控制研究, 利用 EnergyPlus 的 Energy Manager System 模块建立了建筑空间能耗模型, 提出了基于数据与经验的温度模糊控制方法, 并对不同条件下的全年能耗进行了模拟, 在此基础上, 通过对 PMV 与 PPD 两个指标分析发现当温度设定点在 $21/16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $29/24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化的策略 2 控制效果最优。当将控制粒度细化到 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 发现细化控制粒度后策略 1~3 的表现并不相同, 其中策略 1 提高控制精度后控制效果下降, 策略 2 和策略 3 控制效果提高, 且策略 2 提高控制精度后变化较稳定, 因此得出结论温度设定点的控制在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右调整最能提高人体舒适度。最后进行了其它场景的应用

仿真, 模拟了在风机盘管系统和 VRF 系统下控制策略的影响情况, 得出结论控制策略可以有效改善性能较差的 HVAC 系统的热舒适性, 对性能较好的 HVAC 系统影响较小。

本文针对现实问题提出了基于数据和经验的室内舒适度控制方法, 并利用 EMS 进行了实际模拟, 经过多次模拟的实际数据分析, 并进行了多种场景的仿真及结果分析, 得出了针对 PMV 值较优的控制区间与控制策略适用范围。所做的研究成果将对建筑 HVAC 系统优化控制具有很好的支撑作用。

参考文献

- 1 EIA. Annual Energy Outlook. Washington: EIA, 2017.
- 2 Boyano A, Hernandez P, Wolf O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies

- based on energyPlus simulations. *Energy and Buildings*, 2013, 65: 19–28. [doi: [10.1016/j.enbuild.2013.05.039](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.039)]
- 3 Gómez JL, Pastoriza FT, Fariña EA, *et al.* Use of a numerical weather prediction model as a meteorological source for the estimation of heating demand in building thermal simulations. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102403. [doi: [10.1016/j.scs.2020.102403](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102403)]
 - 4 Al-Janabi A, Kavgić M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114222. [doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114222](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222)]
 - 5 Qian DF, Li YF, Niu FX, *et al.* Nationwide savings analysis of energy conservation measures in buildings. *Energy Conversion and Management*, 2019, 188: 1–18. [doi: [10.1016/j.enconman.2019.03.035](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.035)]
 - 6 Zhao QT, Lian ZW, Lai DY. Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment*, 2021, 2(1): 21–33. [doi: [10.1016/j.enbenv.2020.05.007](https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007)]
 - 7 Li HL, Yang Y, Lv KL, *et al.* Compare several methods of select typical meteorological year for building energy simulation in China. *Energy*, 2020, 209: 118465. [doi: [10.1016/j.energy.2020.118465](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118465)]
 - 8 Sardoueinassab Z, Yin P, O'Neal D. Energy modeling and analysis of inherent air leakage from parallel fan-powered terminal units using EMS in EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 2018, 176: 109–119. [doi: [10.1016/j.enbuild.2018.07.019](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.019)]
 - 9 Lu SL, Zheng SQ, Kong XF. The performance and analysis of office building energy consumption in the west of Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy and Buildings*, 2016, 127: 499–511. [doi: [10.1016/j.enbuild.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.008)]
 - 10 Al-Janabi A, Kavgić M, Mohammadzadeh A, *et al.* Comparison of EnergyPlus and IES to model a complex university building using three scenarios: Free-floating, ideal air load system, and detailed. *Journal of Building Engineering*, 2019, 22: 262–280. [doi: [10.1016/j.job.2018.12.022](https://doi.org/10.1016/j.job.2018.12.022)]
 - 11 张贺. 某大型公共建筑中央空调系统节能改造研究 [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2019.
 - 12 张俊雄. 基于预估模糊 PID 的空调系统控制研究 [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
 - 13 衡丽帆. 自抗扰控制技术在变风量空调温度控制系统中的应用研究 [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
 - 14 李程萌. 基于智能算法的变风量空调系统控制策略研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
 - 15 屈博艺. 基于热舒适度的空气源热泵供暖系统节能评价与控制优化 [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
 - 16 焦宗旭. 聚合温控负荷的成本优化与舒适度交易机制设计 [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
 - 17 Cetin KS, Fathollahzadeh MH, Kunwar N, *et al.* Development and validation of an HVAC on/off controller in EnergyPlus for energy simulation of residential and small commercial buildings. *Energy and Buildings*, 2019, 183: 467–483. [doi: [10.1016/j.enbuild.2018.11.005](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.005)]
 - 18 Omidvar A, Kim J. Modification of sweat evaporative heat loss in the PMV/PPD model to improve thermal comfort prediction in warm climates. *Building and Environment*, 2020, 176: 106868. [doi: [10.1016/j.buildenv.2020.106868](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106868)]
 - 19 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
 - 20 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50785—2012 民用建筑室内热湿环境评价标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.