A Method for Controlling the Supply Air Temperature of Variable Air Volume Air Conditioning Based on Temperature Sensor Compensation*

CHANG Zhu[1*], ZHANG Xu[2], LI Shaohua[1]

(1.School of Equipment Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong Shanxi 030619, China; 2.School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: Under stable flow conditions, high-frequency noise causes temperature drift in the temperature sensor, making it difficult to accurately perceive changes in indoor temperature and thus affecting control effectiveness. Therefore, a method for controlling the supply air temperature of variable air volume air conditioning based on temperature sensor compensation is proposed. Empirical mode decomposition algorithm is used to remove high-frequency noise from temperature sensor measurement signals and temperature sensor measurement signals are reconstructed to avoid noise interference. Secondly, the BP(Back Propagation) neural network is used to eliminate residual temperature drift after compensation, improve the stability of the sensor, and obtain accurate temperature sensor compensation results. Subsequently, it is input into the upper computer controller and the supply air temperature is adjusted through follow-up control. The experimental results show that the average predicted mean vote(PMV) value of the proposed method remains stable around 0, making people feel more comfortable and satisfied. Within the range of air diffusion performance index(ADPI), with 30 measuring points, excellent temperature control of variable air volume air conditioning is achieved.

Key words: control science and engineering; supply air temperature control; temperature sensor; variable air volume air conditioning; BP neural network; intrinsic mode function

EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.019

基于温度传感器补偿的变风量空调送风温度控制方法*

常 珠[1*], 张 旭[2], 李少华[1]

(1.山西工程科技职业大学设备工程学院, 山西 晋中 030619; 2.河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘 要: 在稳定流场条件下, 高频噪声导致温度传感器产生温漂, 无法准确感知室内温度变化, 从而影响控制效果。为此, 提出基于温度传感器补偿的变风量空调送风温度控制方法。利用经验模态分解算法去除温度传感器测量信号中的高频噪声, 并重构温度传感器测量信号, 避免噪声影响; 其次, 通过 BP(Back Propagation) 神经网络消除补偿后的残余温漂, 提高传感器的稳定性, 获取精准的温度传感器补偿结果。随后, 将其输入到上位机控制器中, 通过随动控制调节送风温度。实验结果表明, 所提方法的平均热感觉指数(Predicted Mean Vote, PMV) 值稳定在 0 附近, 使人感到更加舒适和满意; 在空气分布特性指标(Air Diffusion Performance Index, ADPI) 范围内, 测点为 30 个, 实现了变风量空调温度的优异控制。

关键词: 控制科学与工程; 送风温度控制; 温度传感器; 变风量空调; BP 神经网络; 固有模态函数

中图分类号: TU214 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2068-08

与传统空调不同的是, 变风量(Variable Air Volume System, VAV) 空调[1] 在低负荷状态下运行时, 节能效果、人体舒适度、人体对环境的满意度都是最高的。通常情况下, VAV 空调的送风温度是固定的, 但是当区域电网负荷较低时, VAV 空调的送风量会随之减少, 虽然降低了风机能耗, 但是却会导致室内空气流动性差、温度较高等情况, 降低室内整体的热舒适性。为此, 相关的控制方法引起了学者的广泛关注。

在稳定流场条件下, 变风量空调系统的送风温度通常依赖于温度传感器提供的精确测量数据来进行有效控制。这些传感器在理想条件下能够准确反映室内温度, 从而实现精确的温控调节, 确保室内环境的舒适度与能效。然而, 空调系统往往运行在复杂多

项目来源: 山西省高等学校科技创新计划项目(2023L411)
收稿日期: 2024-10-21 **修改日期**: 2024-11-24

变的环境中,其中高频噪声成为影响温度传感器性能的一个重要因素。高频噪声来源于电气干扰、机械振动或气流扰动等,它们共同作用在温度传感器的敏感元件上,导致膜偏转和非线性误差的产生。这些误差不仅使得传感器读数偏离真实温度值,甚至引发“温漂”问题,即传感器输出值随时间发生不可预测的偏移。温漂问题严重削弱了温度传感器对室内温度变化的准确感知能力,进而影响到变风量空调系统的控制效果。此外,王艳等[2]将地铁设备用房负荷模型与 VAV 空调系统模拟平台进行集成,得到系统风量控制特性,并传输给末端 VAVbox 中的阀门系统,针对不同负荷需求,实现按需送风。如果末端 VAVbox 中的阀门系统响应不够迅速或准确,可能会导致风量调节的滞后或偏差,从而影响舒适度。杨世忠等[3]利用入侵杂草-萤火虫群算法对空调的送风温度-冷冻水阀系统模型进行控制。如果算法参数设置不当或系统存在传感器误差、设备故障等其他干扰因素,影响送风温度的准确性,进而影响舒适度。Hu 等[4]针对空调实施定期停用和重新启用策略。通过传感器获取房间温度,然后采用定期停用和重新启用策略,使房间温度趋于平衡状态,不会出现忽高忽低的情况。该方法主要针对房间温度进行控制,测点范围局限于这些特定区域。Hirasuga 等[5]在商业建筑中,开发并安装了两个节能空调系统。其中,对流系统是一种可变气流系统,它利用柯恩达效应将空气输送到整个房间,在没有管道的情况下,风扇功率降低了 83%。辐射系统是一种可变温度/水量控制系统,旨在根据室外湿度,即使室外空气温度接近 30 ℃,也能最大限度地利用自由冷却。如果未考虑其他系统或新风系统、排风系统等,可能无法全面评估和优化整个建筑内部的舒适度情况。

为了实现对室内温度变化的实时感知和精确控制,从而提高空调系统的舒适性和能效性,提出基于温度传感器补偿的变风量空调送风温度控制方法。在完成对温度传感器测量信号的去噪与重构后,将其输入到 BP 神经网络中进行训练,输出得到温度传感器的补偿结果;将温度传感器补偿与控制策略应用在上位机控制器中,通过设定最热临界区域和最冷临界区域的目标函数,完成对变风量空调送风温度的控制。

1　温度传感器测量信号重构

当同一变风量空调系统的不同末端要求不同送风温度时,设定合适的送风温度变得复杂。这要求使用高精度温度传感器和复杂控制逻辑来重构送风温度信号,以满足系统需求。然而,系统静压变化、末端风阀开度及送风机转速调节等因素均影响送风温度控制的精确性。因此,实际应用中需综合考虑系统性能和末端需求,通过合理设计和优化控制策略确保送风温度准确稳定,并定期对温度传感器进行校准维护,以确保其测量结果的准确性和可靠性。

温度传感器[6]收集 VAV 空调的温度物理量数据后,通过内部采集卡转为数字信号。此过程中,室内温度受人员活动、太阳辐射、设备发热等内外因素影响,产生快速波动,使数字信号含噪声,影响控制效果。因此,本文采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,EMD)法去噪。经验模态分解是一种用于处理非线性、非平稳信号的有效方法。该方法将复杂的信号分解为一系列本征模态函数(Intrinsic Mode Functions,IMFs)和一个残差。每个 IMF 代表信号中不同频率段的成分,具有明确的物理意义。EMD 算法是通过分析信号的局部特征,将信号分解为若干个简单的、具有单一频率成分的分量,从而实现对复杂信号的分解和分析。在此之前,对温度传感器信号作出 2 点假设:①通过分析极大值点和极小值点的发生时间,可以得到温度传感器测量信号的时间尺度特征;②其他类型的温度传感器测量信号不存在极大值点和极小值点,需要通过微积分运算才可以推理得到。

在上述 2 点假设成立的前提下,温度传感器信号会由于频率段的不同被分解为若干个固有模态函数[7](Intrinsic Mode Function,IMF)。

在实际的温度测量过程中[8-9],由于传感器本身的误差、电磁干扰、气流扰动等环境因素干扰,以及数据采集和转换过程中的噪声,测量信号中包含一定的噪声成分。这些噪声成分会干扰温度测量的准确性,影响控制系统的性能。高频噪声是温度传感器测量信号中常见的干扰源之一。它主要来源于传感器内部的电子元件、数据采集电路以及外部环境中的电磁干扰等。高频噪声具有频率高、幅度小、随机性强等特点,会导致测量信号的波动增大,使得温度读数不稳定,甚至产生误报或漏报的情况。因此,为了去除高频噪声对温度传感器测量信号的干扰,采用 EMD 方法进行去噪处理。首先,找出同一频率段内温度传感器测量信号 $t(u)$ 的极小值点和极大值点,用曲线依次将所有点分别连接在一起,并使 $t(u)$ 在两条曲线之间。假设极大值点和极小值点的平均值为 $n_1(u)$,将 $I_1(u)$ 看作是 $t(u)$ 的第一个分量,如果 $I_1(u)$ 存在极值点,且极值点数量比零点数量多出 2 倍以上,或者温度传感器测量信号在时

间轴上呈不对称分布,那么,就可以将 $I_1(u)$ 中的温度信号分量挑选出来。经过 p 次的挑选后,得到分量 $n_{1p}(u)$。给出一个分量 $d_1(u)$,当 $n_{1p}(u)=d_1(u)$ 时,就可将 $d_1(u)$ 看作是 $t(u)$ 的第一个分量。同时,利用式(1)将 $d_1(u)$ 和 $t(u)$ 进行分离,以此得到温度传感器测量信号中的残量 $s_1(u)$:

$$s_1(u)=t(u)-d_1(u) \tag{1}$$

将 $s_1(u)$ 看做是初始数据,重新代入到上述过程中经过 x 次的筛选,得到第 x 个分量 $d_x(u)$,即温度传感器测量信号重构结果为:

$$s_x(u)=s_{x-1}(u)-d_x(u) \tag{2}$$

根据频率段对温度传感器的测量信号进行排序处理,随后通过多次筛选,剔除测量信号中的高频噪声成分;接着,将不含高频噪声的低频 IMF 函数与温度传感器测量信号结合在一起,实现对温度传感器测量信号的重构。

2 基于 BP 神经网络的温度传感器信号补偿

温度传感器测量信号易受误差、噪声及室内快速温度变化影响,降低信号质量,影响控制成效。重构信号虽能改善,但仍存非线性偏离问题。为此,采用 BP 神经网络补偿方法,凭借其非线性拟合能力,对重构信号进行精细调整,确保温度测量的精确度和可靠性。

温度传感器测量变风量空调送风温度时呈现非线性特性,使得重构信号可能偏离真实值。为补偿这一偏差,利用 BP 神经网络[10-11]强大的非线性拟合能力能有效模拟复杂关系。BP 神经网络凭借其强大的非线性拟合能力,能有效地模拟温度传感器测量信号与真实温度之间的复杂关系。在信号重构后,将重构信号作为输入,真实温度值作为期望输出,对 BP 神经网络进行训练。通过反复调整网络的权重和偏置参数,使网络的输出逐渐逼近真实温度值。在信号重构后,将其输入 BP 神经网络进行迭代学习,以实现精确补偿。构建 BP 神经网络时,需平衡模型复杂度和隐含层神经元数量,以避免学习效果受损或训练结果偏差大,具体架构见图 1。

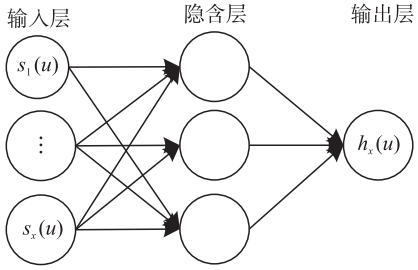


图 1 BP 神经网络架构图

将 $s_x(u)$ 作为温度误差特征数据输入到图 1 所示的 BP 神经网络中,输出节点为 $h_x(u)$,隐含层输入节点为 k,用来接收补偿控制变量值。层与层之间的连接权重为 w,输入层节点与温度传感器误差之间的规格化值为 δ。那么,可得到 BP 神经网络的输出为:

$$h_x(u)=\sum_{x=1}^{n} w_k s_x(u)-\delta_k \tag{3}$$

通过反复调整网络权重和偏置参数,逐渐逼近真实的非线性关系。这种逼近能力使得 BP 神经网络在面临新的、未见过的输入数据时,仍然能够给出相对准确的输出预测。

为了提升 BP 神经网络的外推泛化能力,在训练过程中采用了交叉验证、正则化等技术,以防止过拟合。通过这些措施,使 BP 神经网络在面对超出已有测量数据范围的温度时,仍然能提供较为准确的温度补偿结果。温漂是指温度传感器在长时间使用过程中,由于环境温度的变化或其他因素的影响,导致测量值发生偏移的现象。通过 BP 神经网络的补偿,有效地减小这种偏移,提高温度测量的准确性。以下为 BP 神经网络的训练流程步骤:

步骤 1 数据准备:收集温度传感器的测量数据及其对应的真实温度值,作为训练数据集。

步骤 2 网络初始化:设置 BP 神经网络的架构,包括输入层、隐含层和输出层的节点数量,以及连接权重和偏置参数的初始值。

步骤 3 误差计算:比较输出层的值与真实温度值之间的误差。

步骤 4 反向传播:根据误差计算连接权重和偏置参数的梯度,并更新这些参数的值。

步骤 5 迭代训练:重复前向传播和反向传播的过程,直到达到预设的训练次数或误差阈值。

通过训练,BP 神经网络能学习到温度传感器误差特征数据与真实温度值之间的非线性关系。在训练过程中,需平衡模型的复杂度和隐含层神经元数量,以避免过拟合或欠拟合现象的发生。训练完成后,BP 神经网络能实现对温度传感器信号的精确补偿。此外,通过上述过程提升 BP 神经网络的外推泛化能力,可以使其在面对超出已有测量数据范围的温度时,仍然能够提供较为准确的温度补偿结果:

$$p_k=\frac{1}{1+[h_x(u)^{-1}-1]^2} \tag{4}$$

3 VAV 空调送风温度控制实现

BP 神经网络用于温度传感器信号补偿虽能处

理非线性误差,但存在泛化弱、数据依赖重及计算复杂等挑战。为精确稳定控制 VAV 空调送风温度,需优化网络架构与参数,并融入实时反馈,确保信号准确性,从而提升系统性能和能效。

VAV 空调系统工作环境多变,BP 神经网络补偿难以全面适应。上位机控制器凭借更强数据处理能力,可实现稳定控制。为此,将 BP 神经网络补偿结果输入上位机,通过设定临界区域目标函数,采用随动控制调节送风温度和风量,灵活应对室内温度变化。VAV 空调送风温度控制逻辑示意如图 2 所示。

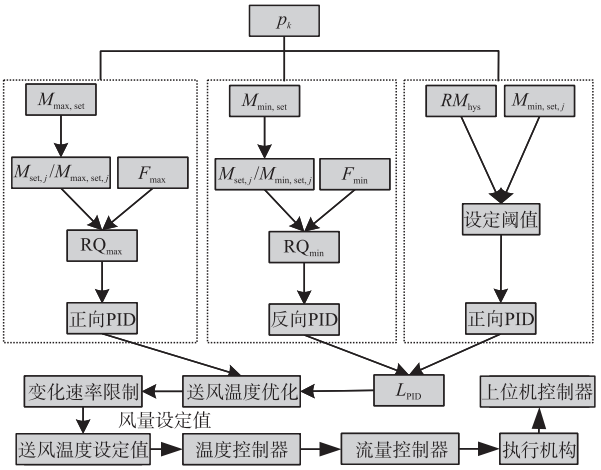


图 2　VAV 空调送风温度控制逻辑示意图

BP 神经网络的温度传感器信号补偿结果 p_k 是对原始温度信号进行修正后的值,它更准确地反映了实际的温度情况。因此,将 p_k 作为上位机控制器的一个输入参数,并基于此对上位机控制器设置一个风量设定值 $M_{set,j}$,VAV 空调的最大相对负荷和最小相对负荷分别为:

$$RQ_{max}=\max\left\{\frac{M_{set,j}}{M_{max,set,j}},j=(F_{max}+1),p_k\right\} \tag{5}$$

$$RQ_{min}=\min\left\{\frac{M_{set,j}}{M_{min,set,j}},j=(F_{min}+1),p_k\right\} \tag{6}$$

式中:$M_{max,set,j}$、$M_{min,set,j}$分别表示 VAV 空调设定的最大风量和最小风量[12-13],F_{max}、F_{min}分别表示相对负荷的较大系数和较小系数,j 表示 VAV 空调温度控制器的数量。

RQ_{max}区域被认为是最热临界区域。这个区域内反向 PID(Proportional Integral Derivative)的输出值为 H_{PID},当 H_{PID}的值较大时,说明该区域内的温度较大,需要降低 VAV 空调的送风温度,降低幅度为:

$$\Delta\theta_{down}=(\theta_{set,max}-\theta_{set,min})H_{PID} \tag{7}$$

式中:$\theta_{set,max}$、$\theta_{set,min}$分别表示 VAV 空调送风温度的最大值和最小值。

RQ_{min}区域为最冷临界区域,最小相对风量 $RM_{min,set}$是 $M_{min,set}$与 $M_{max,set}$的比。设定双向 PID 控制器[14-15]的值分别为 $RM_{min,H}$和 $RM_{min,L}$,综合值为 L_{PID},上位机控制器的相对精度为 RM_{hys}。当 L_{PID}值为正数时,说明该区域的温度较低,需要调高 VAV 空调的送风温度,调高幅度为:

$$\Delta\theta_{up}=(\theta_{set,max}-\theta_{set,min})L_{PID} \tag{8}$$

当 RQ_{max}和 RQ_{min}两个区域的负荷在同一时间发生增大或者减小时,在考虑了温度传感器补偿结果 p_k 后,上位机控制器不会对 VAV 空调的送风温度进行调整。

当 RQ_{max}和 RQ_{min}两个区域的负荷在同一时间发生增大和减小时,送风静压会达到最大值 $b_{set,max}$,考虑到温度传感器补偿结果 p_k,上位机控制器会根据式(7)和式(8)的降低幅度和调高幅度对 VAV 空调温度进行适当的调整,最优调整区间为[$(\theta_{set}-\theta_{down})$,$(\theta_{set}+\theta_{up})$],将 RQ_{max}和 RQ_{min}两个区域的热舒适性作为目标函数,如式(9)所示:

$$J=\min\{(PMV_{max}-PMV_{set})^2+(PMV_{min}-PMV_{set})^2\} \tag{9}$$

式中:PMV_{max}表示最热临界区域 RQ_{max}的热舒适性指标,PMV_{min}表示最冷临界区域 RQ_{min}的热舒适性指标,PMV_{set}表示热舒适性指标阈值。

本文提出了一种基于经验模态分解法和 BP 神经网络的 VAV 空调送风温度控制方法。首先,通过经验模态分解法对温度传感器测量信号进行去噪和重构,提高了温度数据的准确性。然后,利用 BP 神经网络对重构后的信号进行补偿,进一步提高了温度测量的精度。最后,将补偿后的温度数据输入到上位机控制器中,实现了对 VAV 空调送风温度的灵活控制。

在稳定流场条件下,室内温度分布相对均匀,且变化缓慢。这使得温度传感器能在一个相对恒定的环境中工作,减少了气流扰动、电气噪声等外部干扰对测量结果的影响。因此,温度传感器能提供更准确、更可靠的温度数据。这些数据为 VAV 空调系统的控制器提供了精确的输入信息,使得控制器能更准确地判断室内温度状态,并采取相应的控制策略。在稳定流场条件下,当室内温度升高时,控制器能迅速识别并降低送风温度;当室内温度降低时,控制器则能增加送风温度。这种基于精确温度数据的控制策略有助于维持室内环境的舒适性和能效性。综上所述,稳定流场条件为基于温度传感器测量数据控制 VAV 空调送风温度提供了有利条件。

4　实验测试

为了验证所提方法在实际应用中是否可以实现

对 VAV 空调送风温度的精准控制,将其与引言中提到的文献[3]入侵杂草-萤火虫群算法和文献[5]变流控制策略在季节温度变化较为明显的北方某个地区展开了对比实验测试。实验将型号为 RSV-TU 的 VAV 空调安装在北方某个地区的建筑物内,室内温度控制在 25 ℃±2 ℃,室内环境湿度保持在 50%±10%,温度传感器型号为 PT100,数据采集与控制系统为上位机控制器,实验过程由 MATLAB 进行仿真和分析,实验环境如图 3 所示。

(a)变频空调工作环境 (b) 监控现场

图 3 实验环境图

在图 3 所示环境中,进行实验。实验前,设定相关参数,如表 1 所示。

表 1 实验参数表

参数名称	值
室内环境温度	25 ℃±2 ℃
室内环境湿度	50%±10%
温度传感器型号	PT100
最大迭代次数	500 次
分解停止条件	剩余分量能量小于原始信号能量的 1%
高频噪声过滤阈值	0.1 Hz(高于此频率的信号视为噪声)
输入层节点数	10
隐藏层节点数	2 层(第一层 20 个节点,第二层 10 个节点)
输出层节点数	1(温度传感器补偿后的温度值)
学习率	0.01
训练次数	10 000 次
目标误差	0.001
最热临界区域目标函数	室内温度高于 28 ℃时,送风量增加至最大风量的 80%,送风温度调整至 24 ℃
最冷临界区域目标函数	室内温度低于 22 ℃时,送风量减少至最大风量的 40%,送风温度调整至 26 ℃
控制周期	每 5 min 检测一次室内温度并调整送风参数
初始送风量	最大风量的 50%
初始送风温度	25 ℃

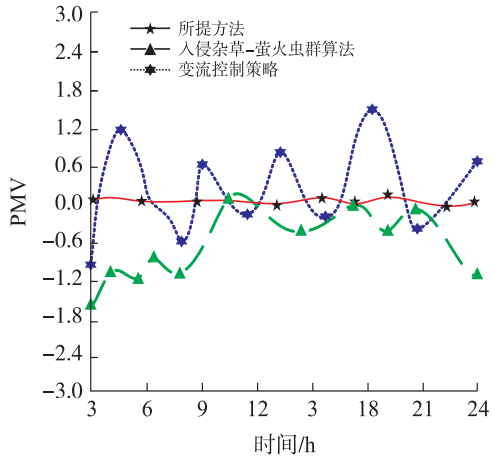
在实验过程中,使用数据采集系统实时收集室内温度、湿度、送风量、送风温度等参数,并记录在每个控制周期内的变化情况。将所提出的基于 BP 神经网络的温度传感器信号补偿方法、文献[3]中的入侵杂草-萤火虫群算法和文献[5]中的变流控制策略分别应用于 VAV 空调系统中,进行实时控制。在每个控制周期结束后,计算 PMV(预测平均投票值)和 ADPI(空气分布特性指标),以评估算法的控制效果。

实验首先按照实验环境图和实验参数表的要求,搭建实验平台,安装 VAV 空调系统、温度传感器和数据采集系统等设备。在正式实验前,对 VAV 空调系统进行调试,确保其能正常运行,并检查数据采集系统的准确性和稳定性。按照实验方法的要求,分别实施三种算法的控制策略,并记录实验数据。对实验数据进行处理和分析,计算 PMV 和 ADPI 等评价指标,以评估算法的控制效果。将三种算法的控制效果进行对比,分析本方法的优越性和适用性。

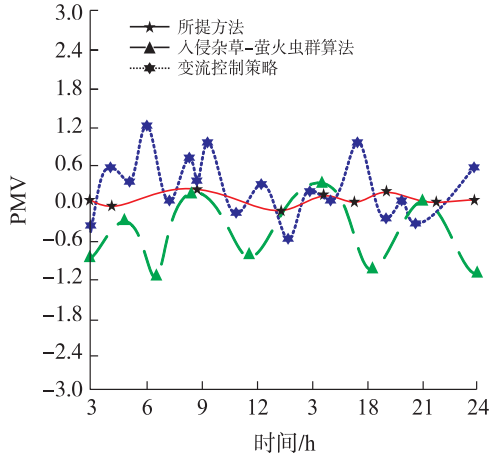
实验分别对夏季送风温度控制效果和冬季送风温度控制效果进行了测试,并选取 PMV 和空气分布特性指标(Air Diffusion Performance Index,ADPI)作为算法的评价指标。PMV 主要反映的是室内温度以及湿度对人体舒适性的影响程度,数值波动范围在[-3,+3]之间。当 PMV 值为 0 时,说明室内温度和湿度令人感到最舒适;当 PMV 值为正数且较大时,说明室内温度和湿度较高;当 PMV 值为负数且较小时,说明室内温度和湿度较低,后两种情况均降低了人体舒适性。

在同一天内,利用三种算法分别对建筑物室内 VAV 空调送风温度进行控制,得到的 PMV 值测试结果如图 4 所示。

通过观察图 4 可以很明显地看出,三种算法中,所提方法取得的 PMV 值始终在 0 附近波动,且没有出现较大的起伏。在夏季(图 4(a)),PMV 值大部分时间介于-0.1 至+0.1 之间;在冬季(图 4(b)),PMV 值则介于-0.2 至+0.2 之间,显示出极高的稳定性和舒适度。这表明该方法确保室内温度始终维持在人体感到最为舒适的范围内。这主要是由于该方法通过 BP 神经网络进行温度传感器信号补偿,将补偿后的温度数据应用于 VAV 空调送风温度控制中,实时、精确地根据室内环境和人体舒适度需求调整送风温度,从而确保室内温度始终维持在人体感到舒适的范围内;入侵杂草-萤火虫群算法取得的 PMV 值整体数值偏低,大部分时间低于-0.6,导致室内温度较低;变流控制策略取得的 PMV 值在 0 上下波动起伏较大,室内温度忽高忽低,无法提供令人感到舒适的温度。



(a) 夏季



(b) 冬季

图 4　三种算法 PMV 值对比图

ADPI 主要反映的是建筑物室内空调气流组织对人体满意度的影响,ADPI 的值越高,说明对建筑物室内环境感到满意的人员数量较多。通常情况下,当 ADPI≥80%时,就认为建筑物室内环境是让人感到满意的;当 ADPI = 100%时,说明建筑物室内环境让人的满意度最高。ADPI 的计算公式为:

$$\mathrm{ADPI}=\frac{N_0\times 100}{N}\%\tag{10}$$

式中:N 表示建筑物室内测点的总数量,实验取值为 50,N_0 表示满足−1.7 ℃<ΔET<+1.1 ℃的测点数量,其中,ΔET 表示有效温度差,计算公式为:

$$\Delta\mathrm{ET}=(t-t_i)-7.66(v_i-0.15)\tag{11}$$

式中:t、t_i 分别表示建筑物室内某个测点的温度和给定的温度,v_i 表示建筑物室内某个测点的空气流速。

在设备负荷、灯光、温度以及建筑物室内人员数量完全相同的环境内分别利用三种算法对 VAV 空调送风温度进行控制,并对比三种算法的 ADPI 值,结果如图 5 所示。

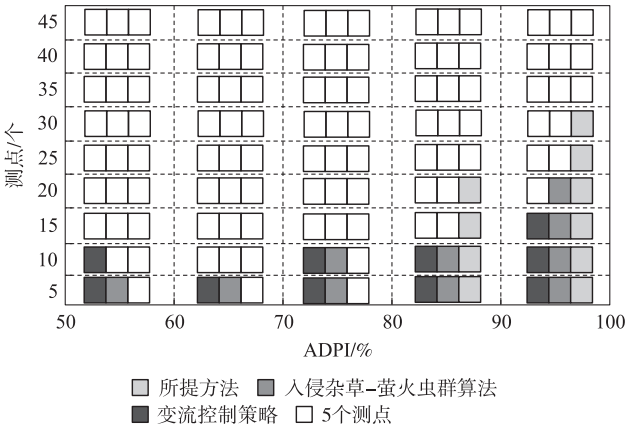


图 5　三种算法 ADPI 值对比图

通过观察图 5 可以很明显地看出,在 50%<ADPI≤60%区间内,入侵杂草-萤火虫群算法和变流控制策略分别含有 10 个和 5 个测点,而所提方法尚未达到该区间的测试条件;在 60%<ADPI≤70%区间内,入侵杂草-萤火虫群算法和变流控制策略均含有 5 个测点,同样地,所提方法未达到该区间的测试条件;在 70%<ADPI≤80%区间内,入侵杂草-萤火虫群算法和变流控制策略均含有 10 个测点,同样地,所提方法的测点数量较少;在 80%<ADPI≤90%区间内,所提方法、入侵杂草-萤火虫群算法和变流控制策略分别含有 20 个、10 个和 10 个测点;在 90%<ADPI≤100%区间内,所提方法、入侵杂草-萤火虫群算法和变流控制策略分别含有 30 个、15 个和 20 个测点。虽然在区间内的测点数量不能直接等同于控制效果的好坏,但反映了所提方法在不同条件下具有更强的适应性和稳定性。进一步分析发现,所提方法在 VAV 空调送风温度控制方面表现出更好的效果,主要是由于其基于经验模态分解法的温度传感器测量信号重构方法和优化策略。该方法更准确地根据室内环境的实时变化调整送风温度,从而在保证舒适度的同时提高能效。由此可以得出结论,所提方法对于 VAV 空调送风温度的控制效果,要比另外两种算法更让人感到满意。

为了更全面地评估所提方法在 VAV 空调送风温度控制中的效果,实验从夏季开始,持续至冬季,共进行了 6 个月的时间,以覆盖不同季节的温度变化。实验环境、温度传感器型号、EMD 算法参数、BP 神经网络训练参数以及上位机控制器设置均保持不变,与之前的描述一致。并与文献[3]的入侵杂草-萤火虫群算法和文献[5]的变流控制策略对温度传感器补偿前后的结果对比,实验结果如表 2 所示。

表 2 不同方法温度传感器补偿前后结果对比

季节	方法	温度传感器补偿前温度波动范围/℃	温度传感器补偿后温度波动范围/℃	PMV 平均值	ADPI 平均值/%
夏季	所提方法	24.2~27.1	24.6~25.7	−0.2	87
	入侵杂草-萤火虫群算法	23.7~27.6	24.1~26.2	−0.4	81
	变流控制策略	23.9~27.3	24.3~26.4	−0.3	83
秋季	所提方法	22.1~26.2	22.6~23.7	0.1	89
	入侵杂草-萤火虫群算法	21.6~26.7	22.1~24.2	−0.2	85
	变流控制策略	21.9~26.4	22.3~24.4	−0.2	86
冬季	所提方法	20.1~25.2	20.6~21.7	0.2	91
	入侵杂草-萤火虫群算法	19.6~25.7	20.1~22.2	−0.3	87
	变流控制策略	19.9~25.4	20.3~22.4	−0.2	88

由表 2 分析可知,在夏季、秋季和冬季三个不同季节中,所提方法在温度传感器补偿后均能有效缩小温度波动范围,相较于文献[3]的入侵杂草-萤火虫群算法和文献[5]的变流控制策略,所提方法展现出更高的温度控制精度。夏季时,所提方法将温度波动范围从 24.2 ℃~27.1 ℃缩小至 24.6 ℃~25.7 ℃,同时 PMV 平均值更接近 0,表明人体舒适度更高;ADPI 平均值达到 87%,表明气流组织更为合理。在秋季和冬季,所提方法同样表现出色,不仅温度控制更为稳定,而且人体舒适度和气流组织满意度也均高于其他两种方法。综上所述,所提方法在 VAV 空调送风温度控制中具有较高的应用价值和推广前景。

5 结论

变风量空调因其能耗低、操作方便在商场、办公楼以及居家日常生活中得到广泛应用,为了使其送风温度能根据室内温度进行自动调整,提出基于温度传感器补偿的变风量空调送风温度控制方法。首先,对温度传感器采集到的信号进行去噪处理,消除其中的高频噪声,并将余下的信号分为划分为若干个 IMF 分量,完成温度传感器测量信号的重构;然后,将温度传感器信号输入到 BP 神经网络中,经过迭代后完成对其误差的补偿;最后,将温度传感器补偿应用到上位机控制器中,并为变风量空调设定一个最热临界区域和最冷临界区域,在两个区域之间设定一个目标函数,在保证最佳热舒适性和满意度的前提下,实现了变风量空调送风温度的精准控制。

参考文献:

[1] 王迎慧,宋春光,陈顺龙,等. 变风量空调末端单元中均速管流量计的布设方法及优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2022,43(3):277-281.

[2] 王艳,李焱池,篮杰,等. 地铁设备用房 VAV 变风量系统控制特性研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(10):191-196.

[3] 杨世忠,逄铄. 基于改进入侵杂草算法的空调送风温度控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(2):250-256.

[4] Kitora H,Miyata S,Akashi Y. Feasibility and Effectiveness of Demand Response Control for District Heating and Cooling Systems with Thermal Storage Tanks[J]. Transactions of the Society of Heating,Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan,2023,48(313):11-21.

[5] Hirasuga N,Kato S,Akimoto T,et al. Comparing Convection VS. Radiant Air-Conditioning Systems in Office[J]. ASHRAE Journal,2023,65(4):26-29.

[6] 钟国文,潘盛辉. CaMoO4:Ho/Yb 温度传感器用发光材料的设计及性能研究[J]. 电子器件,2023,46(5):1263-1267.

[7] 张瑞林,涂兴华. 二次谐波的变分模态分解和小波阈值函数降噪[J]. 光学学报,2022,42(2):72-79.

[8] 闫佳伟,张丕状,倪沛东,等. WMS 温度测量中谐波信号锁相放大器的设计[J]. 测试技术学报,2023,37(3):214-220.

[9] 苗凌童,卢翼. 基于 PID 的大面积建筑室内恒温性自整定控制[J]. 计算机仿真,2023,40(12):369-373.

[10] 李振宏. 大数据背景下基于 BP 神经网络的跨境电商皮革服装销量预测[J]. 中国皮革,2023,52(6):104-109.

[11] 王宸,张军朝,许并社,等. 基于光效和 BP 神经网络的 LED 结温预测研究[J]. 电子器件,2024,47(2):496-501.

[12] Shi J F,Liu H Y,Yang X W. Precision Control for Room Temperature of Variable Air Volume Air-Conditioning Systems with Large Input Delay[J]. Energies,2024,17(17):4227.

[13] Igarashi H,Akimoto T,Hirasuga N,et al. Study of Coand Air-Conditioning System Compatible with Variable Air Volume Controls[J]. Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ),2022,87(791):29-39.

[14] 陈德好,杨志强,王玉琢. 基于变速积分 PID 控制的标准时间远程复现[J]. 计量科学与技术,2023,67(1):10-15.

[15] 任乐天,宋超,韩俊杰,等. 基于模糊神经网络 PID 控制的双向 DC/DC 变换器[J]. 北华大学学报(自然科学版),2023,24(5):671-677.

常　珠(1983—),女,汉族,山西绛县人,硕士,讲师,2008 年年毕业于长安大学,现就职于山西工程科技职业大学,主要研究方向:供热通风与空调工程,changzhu2313@ 163.com;

李少华(1992—),男,汉族,山西临汾人,博士,副教授,研究方向:传感器。

张　旭(1983—),女,汉族,河北省南宫市人,硕士,讲师,2008 年年毕业于长安大学,现就职于河北科技大学。主要研究方向:建筑环境与能源应用工程;