

基于 PID 控制器和无线通信技术的 热泵测控系统设计

宗振威

(秦皇岛市计量测试研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 热泵系统广泛应用于供暖领域, 为了实现更高效的热泵系统控制, 对空气能热泵测控系统进行了总体方案设计, 引入了模糊控制与 Smith 预估补偿控制策略对 PID 进行优化; 在信息系统设计中, 采用了 MQTT 作为通信代理协议; 经实验测试, 当模糊 PID 控制器受到正弦干扰后, 在 510 s 后才达到设定温度; 而结合了 Smith 的模糊 PID 控制器在 1 250 s 时跌至温度最低值, 且其在 260 s 时便达到设定的温度值; 经实际应用, 设计的热泵测控系统在温度控制与系统运行方面均具有较强的鲁棒性与可行性, 为现代热泵系统的智能化控制提供了一种有效的方法。

关键词: PID 控制器; 无线通信; Smith 预估补偿控制; 热泵测控; 系统设计

Design of Heat-pump Measurement and Control System Based on PID Controller and Wireless Communication Technology

ZONG Zhenwei

(Qinhuangdao Institute of Measurement and Testing Qinhuangdao, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Heat pump systems are widely used in the heating field. To efficiently control heat pump systems, an overall scheme is developed for the air energy heat pump measurement and control system. Fuzzy control and Smith predictive compensation control strategies are introduced to optimize the PID controller. In the information system design, The MQTT is used as the communication proxy protocol. Through experimental testing, the fuzzy PID controller reaches the set temperature after 510 s with the sinusoidal interference. However, the Smith based fuzzy PID controller reaches the lowest temperature value at 1 250 s, reaching the set temperature value at 260 s. Through practical application, the designed heat pump measurement and control system has a strong robustness and feasibility in temperature control and system operation, providing an effective method for the intelligent control of modern heat pump systems.

Keywords: PID controller; wireless communication; Smith estimated compensation control; heat pump measurement and control; system design

0 引言

近年来, 随着现代化建筑的高速发展, 人们对工作与居住建筑环境的要求日益增大。冬天寒冷地区的现代建筑与高级公寓等建筑也开始增设采暖系统, 空气能热泵系统因具有安全、舒适、环保等特点成为采暖的首选^[1-3]。然而, 空气能热泵的控制系统较为复杂, 当前的控制技术尚不成熟, 难以达到高精度测量与控制^[4]。为此, 国内外研究者针对空气能热泵的控制问题开展了大量研究。自 20 世纪 90 年代起, 智能技术逐渐渗透进人们生活的方方面面。工业冶金、家用电器等采用了模糊控制技术, 发电厂、化工厂也引入了预测控制技术^[5-6]。其中, 模糊控制可以拆分为模糊与控制两个内容, 模糊是控制的基础, 也是整个智能控制技术的核心内容。近年来, 模糊控制融入热泵系统控制中, 且取得了一定成效。针对空气能热泵中存在的控制缺陷, 相关研究者在传统 PID 控制的基础上, 提出了模糊 PID 控制技术。与传统的 PID 控制相比, 该方法响应速

度较快, 超调较低。但这类方法存在精度降低、滞后性严重的问题^[7-9]。考虑到空气能热泵工作天气较为恶劣, 环境较为复杂, 热泵的制冷与制热效率均会受到外界环境的影响。因此有必要设计一个能够适应各种恶劣环境的、鲁棒性较优的热泵测控系统^[10]。基于此, 研究在模糊 PID 控制技术的基础上, 进一步引入了 Smith 预估补偿控制方法, 以实现空气能热泵测控系统的设计。研究的贡献在于, 在传统的 PID 控制技术的基础上, 先后引入了模糊控制以及 Smith 预估补偿控制。该方法有助于提升热泵测控的效率, 同时能够消除系统的滞后效应。

1 基于改进 PID 控制器与无线通信技术的热泵测控系统设计

1.1 热泵测控系统总体设计

空气能热泵主要包括循环泵、节流装置、外热交换器、压缩机等结构, 其能够实现制冷、制热以及除霜运转。在制冷过程中, 空压机将电能转化为热能以及机械能, 制冷

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-06-29。

作者简介: 宗振威(1988-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 宗振威. 基于 PID 控制器和无线通信技术的热泵测控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 211-216, 222.

剂通过吸收周围环境的热量进行制冷。在制热过程中,首先热泵会从室外的空气中吸收热能,然后通过制冷剂的循环,将吸收的热能传递到室内的热水供暖系统或者空调系统中。在制热模式下,制冷剂在室内机内的蒸发器中吸收室内的热量,接着经过压缩机的压缩作用,将热量释放到室外的空气中。液态制冷剂经过节流装置后转变为低温低压的气态制冷剂。随后,制冷剂重新进入压缩机,再次转变为高温高压气态,完成循环,这一过程又被称为逆卡诺循环^[11-13]。当外界温度较低时,换热器出现结霜现象,热泵测控系统通常会根据开机时反馈的相关参数来判断是否需要除霜。一旦确定需要除霜,系统将通过通道开关将热泵调整为供冷状态,制冷剂则会通过释放能量进行除霜。除霜完成后,系统将再次调整为一般状态,即供热状态^[14]。在进行热泵装置测控系统的设计时,需要满足相应的功能需求。其中,基本功能包含七个功能。第一,热泵能够实现目标温度的设定以及工作模式的变更。第二,用户能够随时查询机组的运行状态。第三,热泵能够实时显示温度的变化。第四,热泵的运行时间能够被人为设定。第五,热泵能够实现设置保存以及掉电参数的记忆功能。第六,热泵具有除霜以及结霜检测功能。第七,具有故障提醒与历史故障查询功能。保护功能涉及系统中的各类传感器、压缩机、排气侧温度等保护,其是确保系统正常运行的前提。远程联网功能则是指用户能够通过 APP 及网页实时查看热泵的运行状态并实现远程控制^[15-16]。根据测控系统的需求分析,研究进行了热泵测控系统总体方案设计。在系统的结构设计中,主要设计了三层结构,第一层为用户层,第二层为服务层,第三层为现场控制层,系统的结构如图 1 所示。

图 1 中,现场控制层为热泵测控系统的主体结构,其中的每个模块都负责特定的功能,并通过设定的通讯协议实现无线通信,进而实现整体测控系统的控制^[17]。在各个控制模块中,温度压力采集模块主要负责采集热泵测控系统的实时温度与压力数据。执行控制模块主要负责控制循环泵和压缩机的电源通断,并通过开关量输出控制接触器线圈的通断状态。该模块主要利用继电器进行通断电控制。压缩机是热泵系统的核心部件,对其进行调整能够控制热泵内的制冷剂流量。研究主要采用无刷直流电机(BLDC, brushless DC)驱动的直流压缩机,其内部并未设置霍尔传感器,因此设计了无传感器控制的硬件以及软件。

BLDC 的硬件系统包括 BLDC 本体、驱动电路模块、转子位置检测、主处理器模块以及光电隔离模块。软件设计中采用的主控芯片为 TMS320F28335,同时采用 C 语言开发 BLDC 无传感器算法。BLDC 的软件系统由主程序和中断程序组成,主程序主要实现电机的启动与关闭等,中断程序则进行转速的闭环控制以及计算。服务层主要负责与现场控制层和用户层进行数据通信,其包括服务程序和云服务器两个部分。用户层则由网页和移动应用程序(APP, mobile application)构成。当用户完成身份验证后,则能够使用网页或 APP 操控热泵系统,实现温度的实时查询与控制。在该系统中,用户能够根据自己的喜好和需求进行个性化设置,包括设置偏好温度、制定定时开关机计划等。此外,传感器和执行控制模块均位于现场控制层,用于监测和控制系统中的各种参数和设备。研究采用的温度传感器为负温度系数的半导体热敏电阻传感器,其测温范围为 $-40\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度仅为 1%,且常温阻值为 10K。压力传感器用于监测压缩机排气侧高压与吸气侧,两者的传感器量程分别为 $0\sim 4\text{ MPa}$ 、 $0\sim 2\text{ MPa}$ 。此外,系统中设有低压、高压保护传感器。传感器检测的参数包括开关量信号、温度与压力数据。开关量信号包括水流开关信号以及高压与低压保护信号。温度数据包括进口温度、出口温度、循环水的出水与回水温度等。压力数据则为吸排气侧采集的压力数据。

1.2 结合 Smith 的模糊 PID 控制器设计

1.2.1 模糊 PID 控制器设计

在空气能热泵测控系统中,主要以温度控制为主,传统的控制方法为 PID 控制。PID 主要结合了比例、积分、微分控制,操作简单,且自身具有特定的整定规则。然而,当前的控制系统构造繁琐,启动过程迟缓,非线性部件众多, PID 调节已难以满足热泵温度控制需求。同时,传统的 PID 控制难以应对具有复杂性时变特征的情况^[18-19]。为此,研究采用了模糊控制策略对 PID 控制进行了优化。模糊控制器包含了知识库、模糊化接口、模糊推理机以及解模糊接口。其中,知识库主要负责存储人为编辑的调理以及控制器的参数信息。模糊化接口负责将采集的数据映射为模糊量。模糊推理机相当于人脑,对模糊化的数据进行接收与处理,其遵循知识库中规定的条例。而解模糊主要将模

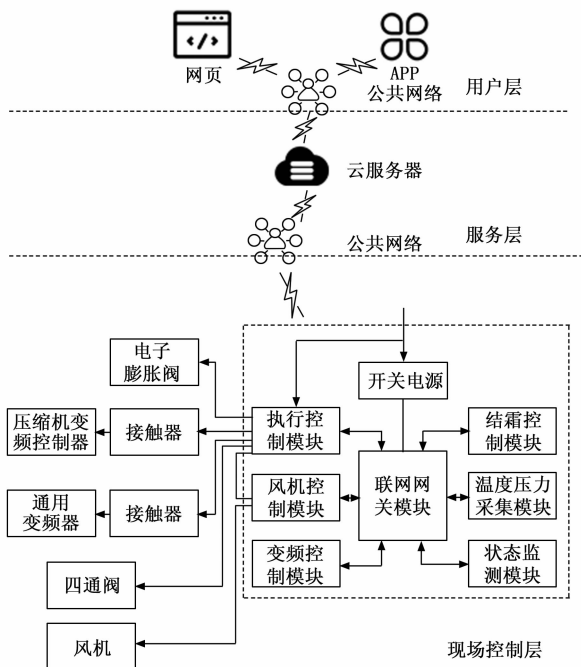


图 1 热泵测控系统的结构设计

糊化的数据进行清晰化处理。传统模糊控制系统的比例因子较为固定，在面对较为复杂，且变化性较大的环境时，其适应能力将大幅下降。为了能使控制系统在被控对象发生变化、环境变化或其他扰动情况下仍能保持稳定，研究提出根据系统的输出对比例常数进行实时调整，具体计算如式 (1) 所示：

$$U = \mathbf{K}_u \cdot f(K_e, K_{ec}) \quad (1)$$

式中， U 代表模糊化的输出量， \mathbf{K}_u 代表由比例、积分与微分 3 个控制器参数组成的矩阵。 K_e 表示误差的量化因子， K_{ec} 为误差变化率的量化因子。 K_u 、 K_e 以及 K_{ec} 的改变会引起系统控制的波动，因此研究在原 PID 参数的基础上，选择合适的比例因子对其进行实时调整，以提升控制质量。在模糊控制器的结构设计中，其结构主要取决于其输入和输出量。通常情况下，可以设置单个或多个初始参数和结果数值。在进行输入量的设置时，需要参照系统所需性能和目标指标，避免设置过多或过少。若输入量较多，算法的复杂性会加大，控制器的调整效率随之下降。若输入量较少，则影响控制的效果^[20]。研究设计的模糊控制器包含两个输入以及 3 个输出，输入包括实际进回水温度与设定温度之间的偏差值以及变化率。输出为微分系数 K_D 、积分系数 K_I 、比例系数 K_P 。在模糊控制器的输入中，进回水温度差的误差基本论域表示如式 (2) 所示：

$$e \in [-20, +20] \quad (2)$$

误差变化率的基本论域表示如式 (3) 所示：

$$ec \in [-35, +35] \quad (3)$$

3 个输出变量的基本论域中，各个参数的基本论域表示如式 (4) 所示：

$$\begin{cases} \Delta K_P \in [-0.04, +0.04] \\ \Delta K_I \in [-0.0006, +0.0006] \\ \Delta K_D \in [-0.15, +0.15] \end{cases} \quad (4)$$

量化因子的取值如式 (5) 所示：

$$\begin{cases} K_e = 0.3333 \\ K_{ec} = 0.114 \end{cases} \quad (5)$$

在进行模糊控制器设计时，隶属度函数对控制器的性能也具有重要影响。研究采用的隶属度函数为三角型，其是一种常见的隶属度函数形式，一般用于模糊逻辑控制系统中。隶属度函数的两个关键参数为左侧三角形的顶点位置与右侧三角形的顶点位置，两者能够进行灵活调整，适应不同的控制场景^[21-22]。模糊控制规则属于模糊控制器中知识库，建立在语言变量的基础上。用于描述模糊规则的控制命令为“if A and B, then C”。模糊规则的编辑主要以专家的经验以及系统的自身学习为主。模糊 PID 控制器的输入为空气源热泵负载温度与设定值之间转速的误差与误差变化率，输出为压缩机转速控制信号。为实现模糊 PID 控制，首先需要将控制器实际的输入量对应到模糊控制所需要的模糊集合中，考虑到控制系统的实时性，研究将模糊集合划分为 5 个论域，分别为 {负大、负小、零、正小、正大}，其表示为 {NB, NS, Z, PS, PB}。其中，模糊

PID 控制器的 ΔK_P 控制规则如表 1 所示。

表 1 ΔK_P 的控制规则

误差变化率	误差				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PB	Z	PS
NS	PB	PB	PS	Z	NS
Z	PB	PS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	PS	Z	Z	Z	PB

模糊 PID 控制器的 ΔK_I 控制规则如表 2 所示。

表 2 ΔK_I 的控制规则

误差变化率	误差				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PS	Z	Z
NS	PB	PB	PS	NS	NS
Z	PB	PS	Z	PS	PB
PS	PB	PB	PS	PS	PB
PB	NS	Z	Z	PS	PB

模糊控制也可被称为专家控制，其通过模仿人类分析事物以及决策的方式进行程序框架的设计。模糊推理是将系统输入的模糊量根据模糊规则转化为输出模糊量，其是关于模糊量的关系函数。考虑到研究设计的模糊 PID 控制器是双输入三输出结构，因此研究采用 Mamdani 推理方法进行模糊推理。Mamdani 型模糊推理算法采用极小运算规则对模糊蕴含表达的模糊关系进行定义，并且通过事先掌握的一组推理规则实现从输入到输出的推理计算，从而建立准确的辨识系统。模糊控制系统中一般包含三重模糊关系，其主要由模糊控制规则中的 3 个因素进行求解。推理得到的模糊子集需要转换为精确值，以得到最终控制量输出。由于模糊推理输出的取值范围不同，需要对其进行标准论域映射^[23]。研究主要对不同的基本论域进行模糊划分，以实现精确控制输出。一旦进行了模糊划分，模糊推理过程就能够根据输入的模糊子集以及模糊控制规则获取模糊输出。随后进行解模糊化处理，解模糊化又被称为逆模糊化，其主要负责将论域映射到输出接口，研究主要采用重心法进行逆模糊化计算，计算如式 (6) 所示：

$$\Delta K_P = \frac{\sum_{j=1}^{49} [\mu_{P_j}(\Delta K_P) \times \Delta K_P]}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{P_j}(\Delta K_P)} \quad (6)$$

式中， μ_{P_j} ($j = 1, 2, \dots, 49$) 表示比例系数基本论域的隶属度。同理可求得 ΔK_I 与 ΔK_D 。求解控制器的参数值计算如式 (7) 所示：

$$\begin{cases} K_P = K_{P_0} + k_{u_p} \Delta K_P \\ K_I = K_{I_0} + k_{u_i} \Delta K_I \\ K_D = K_{D_0} + k_{u_d} \Delta K_D \end{cases} \quad (7)$$

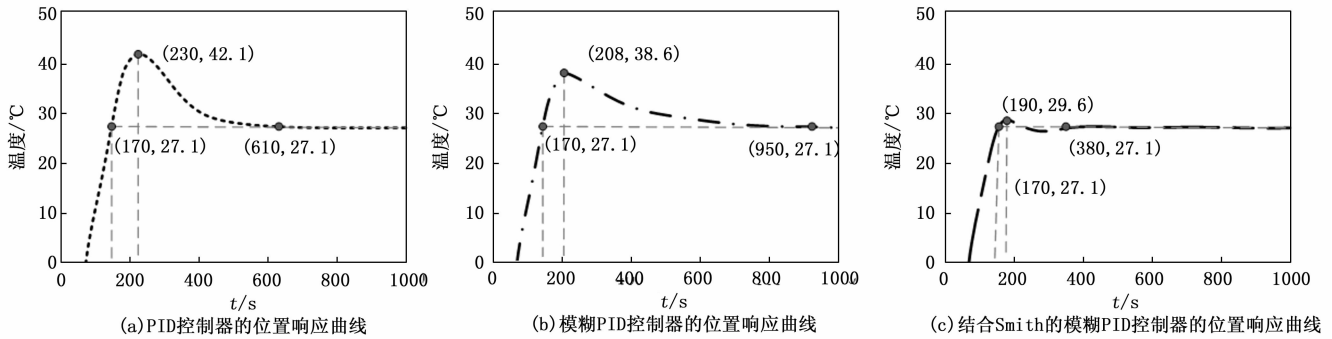


图 3 3 种控制器的位置响应曲线

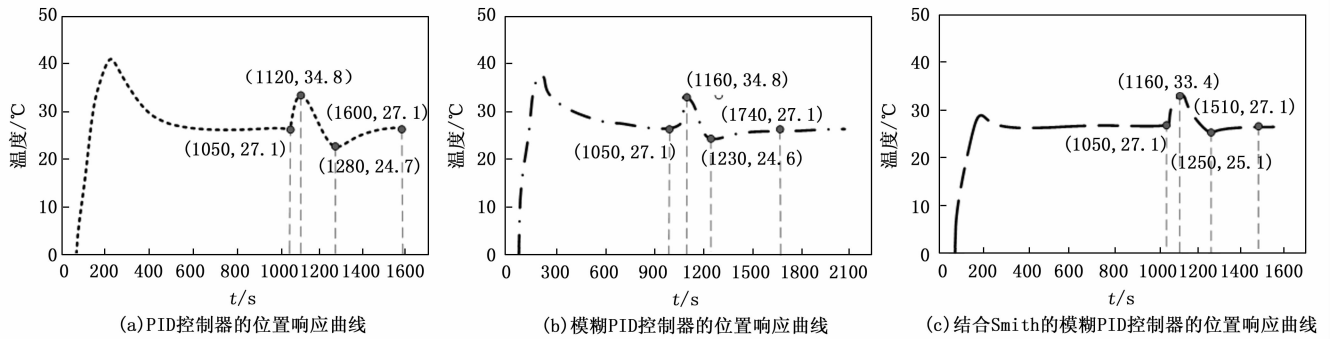


图 4 扰动条件下各个控制器的响应情况

提出的结合了 Smith 的模糊 PID 控制器的超调量仅为 9.2%，且仅在 200 s 时到达温度峰值，最高温度仅为 29.6 °C，190 s 后即达到稳定值。说明基于 Smith 改进的模糊 PID 控制器的控制效率最高，控制效果最优。

研究继续验证在扰动环境下，不同控制器的鲁棒性。在相同的条件下，研究在 1 050 s 处增加了一个放大 15 倍的正弦干扰信号，各个控制器的响应情况如图 4 所示。由图 4 (a) 可知，当 PID 控制器在 1 050 s 时受到正弦干扰后，其温度迅速提升至 34.8 °C，随后温度逐渐降低，160 s 后，温度下降至 24.7 °C。320 s 后回升至设定温度。由图 4 (b) 可知，当模糊 PID 控制器受到正弦干扰后，其温度在短时间内迅速提升，随后在 70 s 后跌至 24.6 °C。510 s 后稳定在设定温度。由此可以看出，与 PID 控制器相比，模糊 PID 控制器的调节时间较长，主要原因是模糊 PID 控制器不仅会受到滞后性的影响，还会因为降低了超调量造成调节时间的加长。由图 4 (c) 可知，结合了 Smith 的模糊 PID 控制器在 1 250 s 时跌至温度最低值，且其在 1 510 s 时便达到设定的温度值，而后趋于稳定。原因在于 Smith 预估补偿器能够有效缓解测控系统的滞后效应，能够快速调节温度，在外界干扰的情况下取得了良好的鲁棒性。

2.2 热泵测控系统实验分析

为验证研究设计的热泵测控系统的可行性，研究对其进行电源模块、系统功耗以及温度采集功能测试。测试环境在低温热泵性能实验室，在该实验室中，室内的水循环能够带走部分热泵机组制热量，并且能够为热泵机组提供

更合适的温湿度环境。热泵机组是与某空调企业联合设计而成的，采用模块化结构，即冷凝器、蒸发器等结构均集成在模块化机组中。在该机组中，压缩机、蒸发器、冷凝器、膨胀阀、电动机和风机、管道和阀门以及控制面板，这些硬件设备采购自多个供应商。压缩机与膨胀阀购自丹佛斯，蒸发器和冷凝器购自特鲁塔，电动机和风机购自西门子，管道和阀门购自爱森曼，控制面板购自霍尼韦尔。各个硬件设备的实物图如图 5 所示。

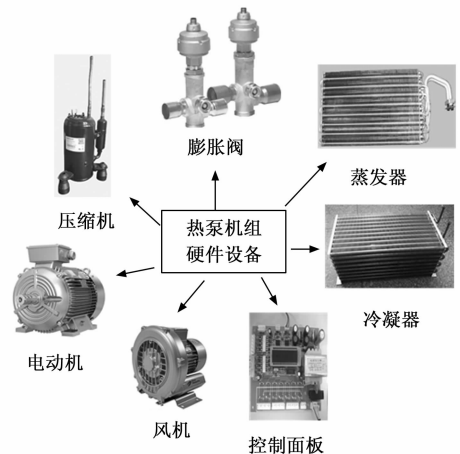


图 5 硬件设备实物图

研究首先对其进行电源模块以及系统功耗测试。其中，在电源测试中，采用的开关电源为 +5 V、+12 V 以及

+24 V, 实验将测控系统与 3 种开关电源分别接通, 分析不同情况下的系统工作状态。不同开关电源下电源模块的测试结果如表 3 所示。由表 3 可知, 当开关电源电压为 +5 V 时, 热泵测控系统的实际电压明显低于标准值, 其工作状态异常。而当开关电源电压为 +12 V 与 +24 V 时, 热泵测控系统的实际电压十分接近标准电压, 工作状态正常。

表 3 不同开关电源下电源模块的测试结果

电源电压	工作状态	标准电压	实际电压
+5 V	继电器不工作, 指示灯微亮, 通信异常。	+5 V +3.3 V	+3 V +1.48 V
+12 V	继电器正常工作, 指示灯正常, 通信正常。	+5 V +3.3 V	+4.98 V +3.25 V
+24 V	继电器正常工作, 指示灯正常, 通信正常。	+5 V +3.3 V	+4.97 V +3.28 V

研究接着对热泵测控系统的功耗进行测试, 实验将各个模块相互串联与功率计相接, 接着与开关电源连接。其中, 开关电源的电压值分别为 12 V 与 24 V。同时, 测试的状态包括联网状态与不联网状态。不同供电电压下的电流与功耗测试结果如表 4 所示。由表 4 可知, 当系统处于联网状态时, 系统的功耗均大于不联网的状态。其中, 当供电电压为 24 V 时, 系统在联网状态下的电流值为 0.391 A, 功率高达 9.38 W。而不联网状态下的电流值为 0.374 A, 功率仅为 8.98 W。此外可以看出, 在不同的供电电压下, 系统能够调整电流值, 保证功率在正常的范围内。其中, 在联网状态下, 供电电压为 12 V 与 24 V 的情况下的功耗值分别为 9.31 W、9.38 W, 两者仅相差 0.07 W, 验证了热泵测控系统的稳定性。

表 4 不同供电电压下的电流与功耗测试结果

联网状态	供电电压	电流值	功耗
联网	12 V	0.776 A	9.31 W
	24 V	0.391 A	9.38 W
不联网	12 V	0.735 A	8.82 W
	24 V	0.374 A	8.98 W

温度采集功能是热泵测控系统中的关键功能, 其中涉及多个关键温度参数, 这对于系统的运行稳定性至关重要。实验在特定的温度下采集了三组温度传感器的检测温度, 分析各个传感器的运行状态是否正常。温度采集功能测试结果如图 6 所示。在第一次温度采集结果中, 各个温度传感器采集的温度存在一定波动, 但波动范围不大, 最大差值仅为 0.05 °C。在第二次温度采集结果中, 各个温度传感器采集的温度值均为 25.55 °C, 说明在第二次温度信息采集过程中, 各个温度传感器的温度数值已达到平衡。此外可以看出, 在第三次数据收集过程中, 有两个传感器的读数显示异常, 分别为 400、500。说明翅片与循环水出水温度传感器发生了故障。其中, 读数为 400 表示未检测到传感器, 500 为传感器处于短路状态。综合来说, 研究所提出的热泵测控系统的温度采集功能能够正常运行, 具有较好的实际应用效果。

3 结束语

针对热泵测控系统的研发设计, 研究在模糊 PID 控制技术的基础上, 引入了 Smith 预估补偿控制方法, 并通过设定的 MQTT 协议进行无线通信。结果显示, 仿真实验中, 传统的 PID 控制器在 230 s 时的温度高达 42.1 °C, 超调量高达 55.4%。模糊 PID 控制器在 208 s 时的温度达到峰值, 其数值为 38.1 °C, 热泵测控系统的超调量高达 42.4%。研究所提出的结合了 Smith 的模糊 PID 控制器的超调量仅为 9.2%, 且仅在 200s 时到达温度峰值, 最高温度仅为 29.6 °C, 190 s 后即达到稳定值。在热泵测控系统实验中, 当开关电源电压为 +5 V 时, 热泵测控系统的工作状态异常。而当开关电源电压为 +12 V 与 +24 V 时, 热泵测控系统的实际电压十分接近标准电压, 工作状态正常。同时, 在不同的供电电压下, 系统能够调整电流值, 保证功率在正常的范围内。此外, 在温度采集功能测试中, 系统能够通过温度采集检测出传感器故障, 表明了测控系统能够正常运行。总的来说, 研究所设计的热泵测控系统具有较好的控制精度与鲁棒性。然而, 研究仅从理论上验证了热

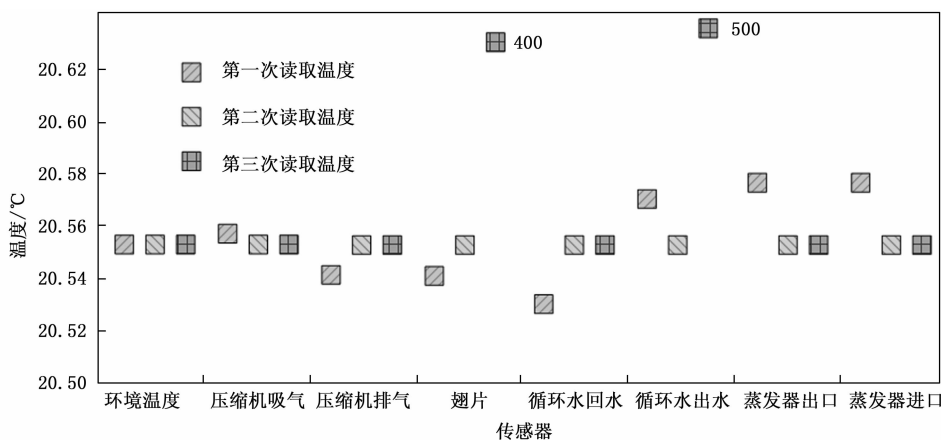


图 6 温度采集功能测试结果

(下转第 222 页)