

# 非确定性密闭舱室温湿度控制系统研究

姜陈欣, 高立娥, 张文博, 李 乐, 刘卫东

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 复杂的水下环境会对常规条件下的测量设备及传感器性能产生影响; 因此模拟水下温湿度环境对于水下设备及传感器的性能测试及标定具有重要意义; 针对非确定性密闭舱室温湿度精确控制需求, 重点研究了一种温湿度动态控制系统; 首先设计了温湿度控制系统的硬件结构和软件功能模块; 其次, 研究了一种 P-Fuzzy-PID 控制方法, 并建立了温度的模糊 PID 控制模型, 在不同温湿度范围内分别采用不同的控制方法实现分段控制, 给出了温度和湿度的实际最终控制结果; 最后, 实现了温湿度控制系统的人机交互功能, 并对控制结果进行了分析; 实验结果表明本控制系统在实际应用过程中, 能够满足非确定性密闭舱室温湿度控制的工程需要, 相比传统控制方法, 在控制响应快速性、控制精确性、人机交互友好性以及系统智能性等方面都具有一定优势。

**关键词:** 非确定性; 温湿度控制; 模糊 PID; 分段控制; 人机交互

## Research on Temperature and Humidity Control System of Uncertainty Closed Cabin

JIANG Chenxin, GAO Li'e, ZHANG Wenbo, LI Le, LIU Weidong

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The complex underwater environment affects the performance of measuring equipment and sensors under common conditions. Therefore, simulating the underwater temperature and humidity environment is of great significance for the performance testing and calibration of underwater equipment and sensors. In response to the need for precise control of cabin temperature and humidity in an indeterminate airtight cabin, this work focus on a dynamic control system for temperature and humidity. First, the hardware structure and software function modules of the temperature and humidity control system are designed. Secondly, a P-Fuzzy-PID control method is studied, and a fuzzy PID control model of temperature is established, and controls are used piecewise, the method realizes segmented control, gives the final control results of temperature and humidity in reality. Finally, this work realizes the human-computer interaction function of the temperature and humidity control system, and analyzes the control results. The experimental results show that the control system can meet the engineering needs of non-deterministic airtight cabin room temperature and humidity control in reality application process. Compared with traditional control methods, it has the advantages on rapid control response, control accuracy, human-computer interaction friendliness and system intelligence and other aspects have certain advantages.

**Keywords:** uncertainty; temperature and humidity control; fuzzy PID; subsection control; human-computer interaction

## 0 引言

随着我国深入推进建设海洋强国进程的不断加快, 载人潜水器和潜水艇的发展取得了长足进步<sup>[1-3]</sup>, 但相比传统陆上环境, 水下环境复杂, 且作业条件多变, 加之水下密闭舱室温度高, 湿度高, 陆上设备和传感器的稳定性和可信度可能会因环境改变而受到影响, 为了对传感器和其他

设备进行标定和校验, 测试常规条件设备在特种温湿度条件下的性能, 于是, 较为精确地模拟潜艇舱室温湿度环境有着极其重要的理论价值和工程价值。舱室本身的热量丧失、舱室内部设备和运动体工作时对舱室温度的影响、温度变化对相对湿度的影响, 水下作业人员各项生命活动造成的温湿度改变导致增加了水下密闭舱室温湿度动态控制

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-04-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61903304); 国家重点研发计划项目(2016YFC0301700); 中央高校基本科研业务费项目(3102020HHZY030010); “111”引智计划(B18041.0)项目。

作者简介: 姜陈欣(1997-), 男, 陕西柞水人, 硕士生, 主要从事工业智能系统控制方向的研究。

高立娥(1962-), 女, 陕西西安人, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水下航行器控制与系统仿真、水下机器人、智能化控制系统方向的研究。

李 乐(1986-), 男, 陕西西安人, 工学博士, 助理教授, 主要从事水下机器人协同控制等方面研究。

刘卫东(1962-), 男, 陕西西安人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水下航行器导航与控制、水下目标探测与识别方向的研究。

引用格式: 姜陈欣, 高立娥, 张文博, 等. 非确定性密闭舱室温湿度控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 105-110.

的不确定性。国内外对于温湿度控制的研究已经较为成熟<sup>[4-6]</sup>，但涉及非确定性水下密闭舱室的温湿度动态控制系统较为少见，本文针对这一问题展开研究。

模糊 PID 是模糊逻辑控制理论与传统 PID 控制的结合，在 PID 算法的基础上，以误差  $E$ 、误差变化率  $E_c$  作为输入，利用模糊控制规则进行模糊推理，并查询模糊矩阵表进行参数的调整，以满足不同时刻的  $E$  和  $E_c$  对 PID 参数自整定的要求。文献 [7] 提出了一种数据融合和模糊解耦的控制策略，有效解决了温湿度控制系统中传感器可靠性低、温湿度耦合的问题。文献 [8] 将模糊自整定 PID 控制算法应用于 3D 生物打印设备，提高了系统鲁棒性，降低了达到稳态的时间，并大大降低了超调量。文献 [9] 将自适应模糊 PID 算法与前馈补偿解耦算法结合设计的控制器应用于焓差实验室，仿真结果较好，实现了温湿度的完全解耦。文献 [10] 提出了一种基于模糊 PID 参数自整定的细胞培养箱温度控制算法，在控制稳定性方面获得了比传统 PID 控制更好的控温效果。文献 [11] 提出了一种基于模型参考自适应 PID 的高压釜温度控制方式，通过仿真实验证明，该控制方案能够有效减少超调量，改善动态特性。

研究表明，温度变量和湿度变量具有耦合性，当绝对湿度不变时，温度每上升  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度下降约  $5\%$ ，而湿度对温度的影响较弱。且环境温度相较环境湿度，前者变化速度较慢。针对这一特性，对温度和湿度进行串联补偿解耦，使原本耦合的温度变量和湿度变量等效成为两个独立的温度和湿度控制子系统<sup>[12-15]</sup>。本控制方法在具体实现的过程中，先以舱室温度为主要控制对象进行控制，达到控制要求后，再对湿度进行控制。

## 1 温湿度控制系统总体结构

### 1.1 硬件设计

温湿度控制系统的硬件主要由主控设备、循环除湿机、加湿器、恒温缓冲水箱、加热制冷循环机、温湿度传感器组以及舱体和管道等组成，具体组成如图 1 所示。

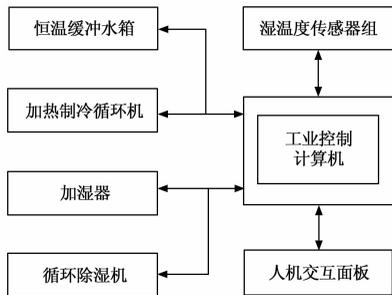


图 1 总体结构硬件框图

其中主控设备为工业控制计算机。循环除湿机和加湿器控制舱室湿度，两设备与管道鼓风机以及舱室间通过 PU 软管相连，并在舱室前盖门处安装风机，使舱室空气均匀分布，提高温湿度传感器信度。舱室外壁以  $3\text{ cm}$  为间隔均

匀密布紫铜管，恒温水箱进出水口和加热制冷循环机进出水口与铜管相连，接口处连接电磁阀，铜管内注水，通过调节水温以热传导方式控制舱室内部温度，铜管与舱室外壁间隙间通过填充导热硅脂以增加接触面积，使舱室内部升温均匀，减少热量散耗，铜管外贴合包裹发泡橡胶以减少热量散失，外层再安装铝盖板提高舱室结构强度。密闭舱室结构如图 2 所示，当前舱室盖门处于开启状态，各温湿度传感器均匀布放在舱室内部以实时监测舱室内部温湿度情况，温湿度传感器兼具温度测量和湿度测量功能，其敏感探头伸入舱室内部，模拟水下温湿度环境时，盖门关闭，舱室内部设置需要标定和校验的各类仪器设备和运动体。

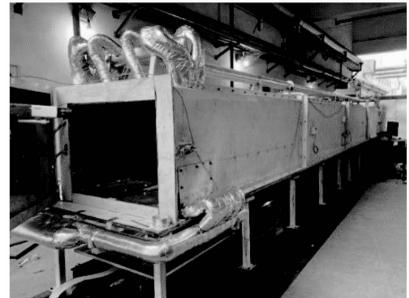


图 2 密闭舱室实物图

### 1.2 软件功能

温湿度控制系统的软件功能主要包括系统运行状态检查、温度控制、湿度控制、人机交互界面、控制系统与主控机通信等基本功能。

#### 1.2.1 系统运行状态检查

主要检查工业控制计算机、加湿器、循环除湿机、加热制冷循环机和恒温缓冲水箱等主要设备的运行状态，及时进行故障诊断和报警提示。

#### 1.2.2 温度控制

温度控制部分主要根据设定温度和舱室当前温度，计算出预设温度，并通过恒温缓冲水箱执行 P 控制和模糊 PID 控制对舱室温度进行预先粗控。在舱室温度接近设定温度时，温度控制部分从恒温缓冲水箱切换为加热制冷循环机的 PID 控制。

#### 1.2.3 湿度控制

主要根据设定湿度和舱室当前湿度，计算出预设湿度，并对加湿器和除湿机进行控制管理。当舱室湿度超过设定湿度时，湿度控制部分通过循环除湿机对舱室空气进行循环除湿；当舱室湿度低于设定湿度时，湿度控制部分控制加湿器对舱室空气进行加湿；当舱室湿度达到设定湿度范围时，湿度控制部分控制加湿器和循环除湿机暂停加湿或除湿工作。

#### 1.2.4 交互界面

交互界面软件主要用于显示舱室的温湿度监测值，水管和气管电磁阀的开/断状态，加湿器、循环除湿机、加热制冷循环机和恒温水箱等主要设备的运行状态。为操作

人员提供舱室温湿度的状态信息和系统运行信息, 由工业控制计算机软件在后台自动进行温湿度控制和系统运行管理。

### 1.2.5 温湿度控制系统与主控机通信

温湿度控制系统与主控机采用以太网进行通信, 温湿度控制系统主要接收主控机的温度、湿度设定值, 并实时地将检测到的舱体温湿度数据上传到主控系统, 以便主控系统及时了解温湿度控制系统的运行状态。

软件功能结构图如图 3 所示。

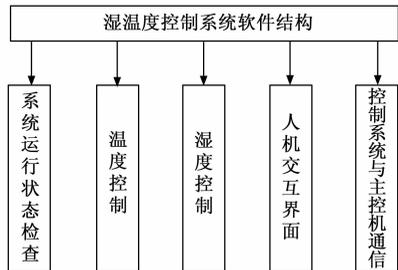


图 3 软件功能结构图

温湿度控制系统的主控操作界面如图 4 所示。界面上方为各温度传感器和湿度传感器采集数据的实时显示。中部为舱体和管道的物理位置布放示意。下方左部为温度控制子系统界面, 其中包括温度预定总设置, 当前舱室温度显示以及恒温缓冲水箱和加热制冷循环机的单独控制部分, 下方右部为湿度控制系统, 包括湿度预定总设置, 当前舱室湿度显示以及除湿机和加湿器的单独控制部分。

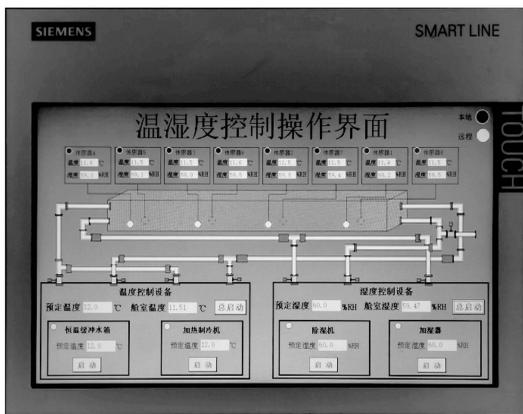


图 4 软件操作界面

## 2 温度控制系统

### 2.1 模糊 PID 算法

经典 PID 控制方法原理简单, 可靠性强, 广泛运用于现代工业控制领域, 但其缺点也十分明显, 即控制对象参数稍作改变, 经典 PID 控制无法实时调整 PID 参数, 而模糊 PID 控制很好的克服了这一问题, 其主要方法是利用模糊逻辑并且根据一定的模糊规则对 PID 参数进行实时优化<sup>[16-18]</sup>。本文研究的模糊控制结构图如图 5 所示。

根据误差  $E$  和误差的变化量  $Ec$  自动调节 PID 控制的参

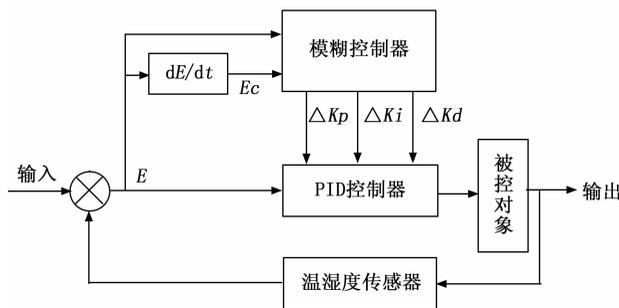


图 5 模糊 PID 算法

数, 根据给定模糊规则进行模糊推理, 最后对模糊参数进行解模糊, 在线输出 PID 控制参数<sup>[19-20]</sup>。在制定模糊 PID 算法的规则时, 以温度偏差  $E$  以及温度偏差变化率  $Ec$  器的输入变量,  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  作为模糊控制器的输出变量, 建立双输入—三输出模糊控制系统, 将模糊值分为 7 档, 即  $NB$  (负大),  $NM$  (负中),  $NS$  (负小),  $ZO$  (零),  $PS$  (正小),  $PM$  (正中) 以及  $PB$  (正大), 其中输入变量  $E$  和  $Ec$  的模糊论域均取  $[-6, 6]$ , 输入变量  $E$  和  $Ec$  的物理论域分别取  $[-20, 20]$ 、 $[-0.4, 0.4]$ , 输出变量  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  的模糊论域均取  $[-3, 3]$ , 输出变量  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  的物理论域分别取  $[-10, 10]$ 、 $[-1, 1]$  和  $[-6, 6]$ 。结合专家经验和生产实践, 调整规则如下:

- 1) 当误差  $|E|$  较大时, 为了使系统具有较快速的跟踪能力, 应取较大的  $Kp$  和较小的  $Kd$ , 但为了避免超调, 应适当限制积分作用, 故需取较小的  $Ki$ ;
- 2) 当偏差  $|E|$  为中等大小时, 为了降低系统的超调量,  $Kp$  应取较小值, 且为了兼顾系统的响应速度,  $Ki$  和  $Kd$  的取值应为中等大小, 且  $Kd$  的值对系统影响相对较大;
- 3) 当误差  $|E|$  为较小值时, 为了使系统获得更好的稳定性,  $Ki$  和  $Kd$  的值应取较大值, 且为了兼顾系统的抗干扰性能, 当  $|Ec|$  值较大时,  $Kd$  应取较小值; 当  $|Ec|$  的值较小时,  $Kd$  应取较大值。

基于以上分析, 得到模糊规则表如表 1, 根据设定的模糊控制规则, 得到  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  的曲面观测窗如图 6~8 所示, 得到  $E$  和  $Ec$  的隶属度函数曲线如图 9 所示,  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  的模糊规则表建立好后, 运行过程中, 工业控制计算机通过对模糊逻辑规则的结果进行处理、查表和运算, 对  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  进行在线自动调整, 即可完成对  $Kp, Ki, Kd$  的实时整定。  $Kp, Ki, Kd$  的计算公式如式 (1), 式中  $Kp, Ki, Kd$  是 PID 控制器的比例、积分、微分系数;  $K'p, K'i, K'd$  是最初整定的 PID 参数;  $\Delta K'p, \Delta K'i, \Delta K'd$  是通过模糊推理得到的 PID 参数增量值。

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (1)$$

表 1 模糊控制器  $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$  模糊规则表

U		Ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
	NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
	NS	PB/NB/ZO	PM/NS/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
	ZO	PB/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
	PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
	PM	PS/ZOPB	ZO/ZO/PM	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
	PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

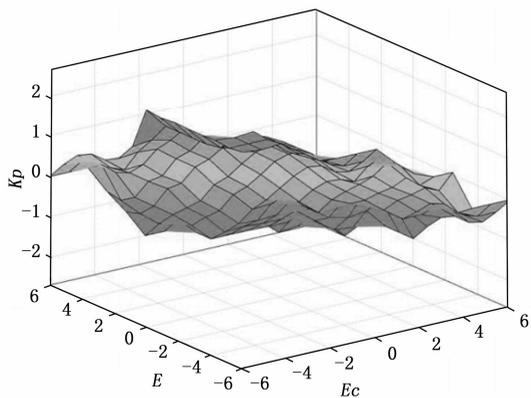


图 6  $\Delta Kp$  曲面观测窗

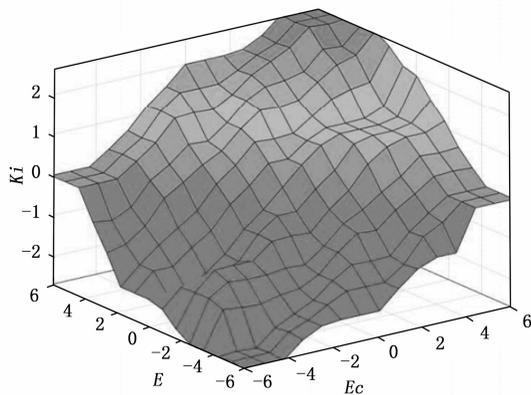


图 7  $\Delta Ki$  曲面观测窗

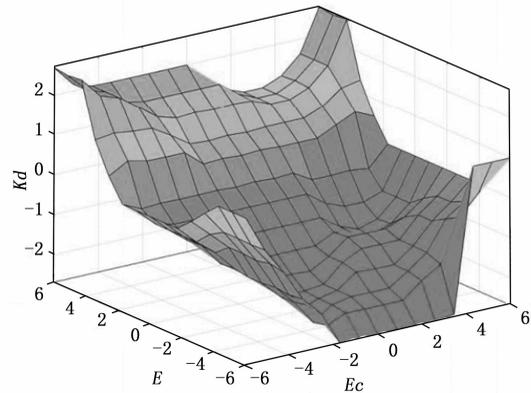


图 8  $\Delta Kd$  曲面观测窗

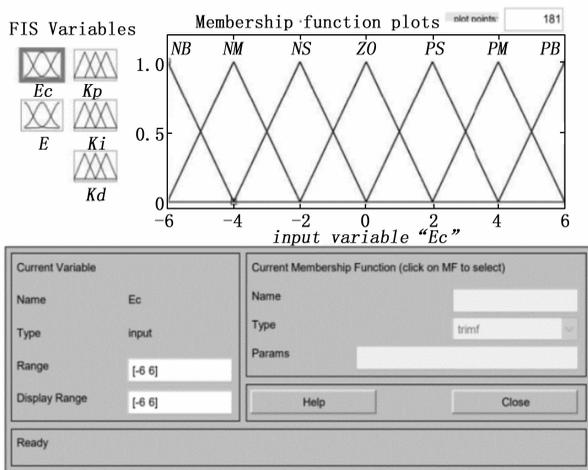


图 9 隶属度函数曲线

2.2 温度控制流程

温度控制过程中，设定目标温度为  $T'$ ，当前温度为  $T$ ，以  $T'$  和  $T$  的差值为依据利用 P-Fuzzy-PID 控制方法进行分段控制。

当  $|T' - T| \geq 10\%$  时，首先启动恒温水箱执行 P 控制进行调节；

当  $5\% \leq |T' - T| \leq 10\%$  时，恒温水箱执行模糊 PID 控制进行调节；

当  $|T' - T| \leq 5\%$  时，关闭恒温水箱，启动加热制冷循环机执行 PID 控制方法进行精细调节，直至实时监测舱室温度等于设定温度，而后加热制冷循环机待机，程序流程图如图 10 所示。

2.3 温度控制结果

在温度控制系统实验过程中，密闭舱室在零时刻的初始温度为  $21^\circ\text{C}$ ，设定目标温度为  $55^\circ\text{C}$ 。给定 PID 控制的初始值  $K'p=8, K'i=0.5, K'd=1$ ，工业控制计算机通过对模糊逻辑规则结果进行处理、查表和运算，即可完成对  $Kp, Ki, Kd$  的实时整定。实验共持续 120 min，控制过程分 P 控制、模糊 PID 控制和 PID 控制 3 个阶段，舱室内的空气温度由均匀布放在舱室两侧内壁的 8 个温度传感器测得，各传感器的具体物理位置布放示意图 4 中部所示，温度变化曲线如图 11 所示。

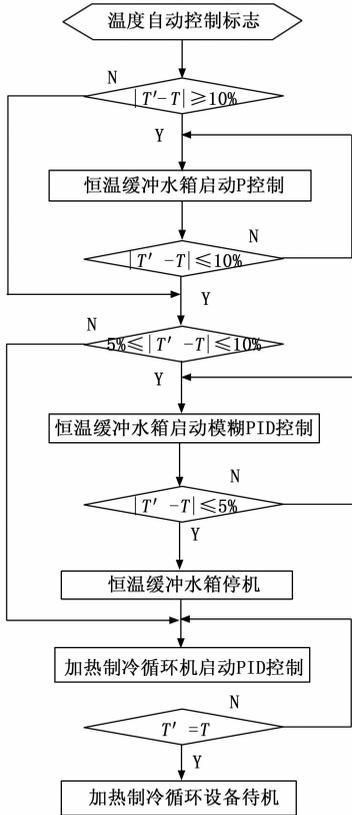


图 10 温度控制程序流程

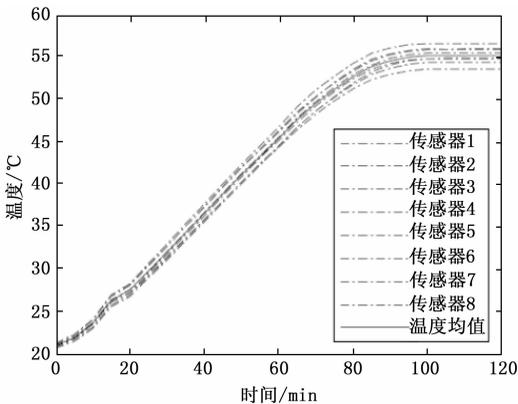


图 11 舱室温度控制变化曲线

0~70 min, 恒温水箱执行 P 控制, 温度上升较为迅速, 在 70 min 时刻, 舱室温度达到 49.59℃; 70~90 min, 恒温水箱继续单独工作, 系统转入模糊 PID 控制过程, 在 90 min 时刻, 舱室空气平均温度达到 54.6℃; 此时, 恒温水箱停机, 加热制冷循环机单独工作, 系统转入 PID 控制过程, 在加热制冷循环机单独控制之下, 舱室温度在 55.0 ± 0.5℃ 附近基本保持不变, 控制精度达到 99.09%。

可以看出, 温度控制过程中, 控制结果没有超调量, 且系统响应较为迅速。但由于舱室长度较长、测定温度的传感器布放在舱壁的两侧且各自间距离较远、紫铜管中水回流不畅、导热材料导热效果不佳等等物理原因, 各传感

器温度在后期出现了差距变大的现象。

### 3 湿度控制系统

#### 3.1 湿度控制方法

湿度控制过程中, 设定目标湿度为  $RH'$ , 当前湿度为  $RH$ , 若  $RH' > RH$  则启动加湿器, 若  $RH' < RH$ , 则启动除湿机, 直至湿度指标满足要求, 两设备均待机。

为了在不同论域内采用不同的控制方法实现湿度的分段控制, 湿度控制系统采用 P-Fuzzy-PID 控制方法, 即起始  $|r(t) - c(t)| \geq 10\%$  时, 使用比例控制, 以提高响应速度, 快速接近控制需求; 当  $|r(t) - c(t)| \leq 10\%$  时, 系统转入模糊 PID 控制, 以提高系统的阻尼性, 减小超调量; 当  $|r(t) - c(t)| \leq 5\%$  时, 系统转入 PID 控制, 利用积分环节消除稳态误差, 以提高系统的控制精度, 控制原理图如图 12 所示。

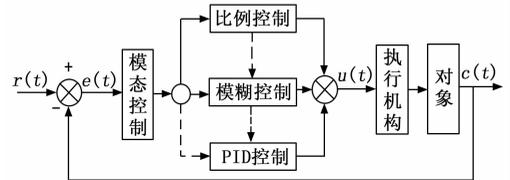


图 12 P-Fuzzy-PID 控制原理

#### 3.2 实验结果与分析

在进行湿度控制时, 输入目标湿度值为 50%RH, 初始湿度测量值为 35%RH, 温度测量值为 54.8℃, 启动控制过程。

0~30 min, 加湿器执行 P 控制, 湿度上升较为迅速, 30 min 时, 舱室湿度达到 46.10RH%; 30~90 min, 加湿器执行模糊 PID 控制, 90 min 时, 舱室湿度达到 49.77RH%; 90 min 之后, 系统执行 PID 控制, 舱室湿度维持在 50.0 ± 1.0RH% 附近并基本维持不变, 控制精度达到 98%, 此时, 舱室内空气温度平均值为 55.5℃。

舱室内湿度变化曲线如图 13 所示, 可以看出, 湿度控制过程中, 湿度有少量超调, 但达到初步精度的时间很短, 达到目标精度后舱室湿度较为稳定, 且湿度控制过程中对温度的影响在温度控制精度要求范围内。对比温度和湿度的控制结果, 温度控制的精度要稍高于湿度控制, 其原因在于, 加湿方法主要是通过加湿器产生水蒸气, 再由鼓风机鼓入舱室内部, 除湿方法主要是通过除湿机向舱室内部鼓入干燥空气, 加湿过程和除湿过程的响应均较快, 波动稍大, 而温度控制方法来自于舱壁上密布的紫铜管的热传导, 响应较慢, 波动较小。

### 4 结束语

1) 本文对密闭舱室温湿度控制策略进行了深入研究, 针对非确定性密闭舱室温湿度控制需求, 设计了一型温湿度动态控制系统, 基于模糊 PID 控制算法, 在不同论域内采用不同的控制方法实现分段控制, 实际试验结果表明, 设计的温度控制系统能够在 70 分钟内使舱室温度达到初步目标精度, 90 分钟内满足控制要求精度; 设计的湿度控制

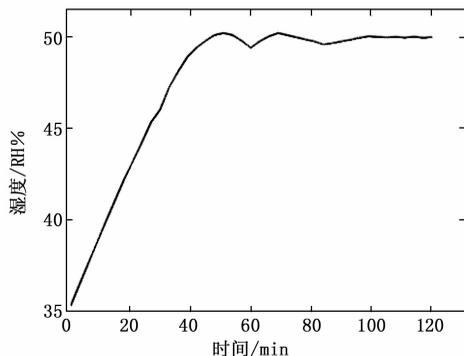


图 13 舱室湿度控制变化曲线

系统能够使舱室湿度在 30 分钟内使达到初步精度, 90 分钟内满足控制要求精度, 应用的 P-Fuzzy-PID 控制方法在密闭舱室的温湿度控制实践过程中收到了较好效果。

2) 本文设计的控制系统响应速度快, 温度控制过程中无超调量, 湿度控制过程中达到初步目标精度速度快, 系统稳定可靠。设计并论证的系统较为精确地模拟了潜艇舱室温湿度环境, 研究结果有一定理论价值和工程价值。

#### 参考文献:

- [1] 苏玉民, 庞永杰. 潜艇原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005: 1-53.
- [2] 朱忠, 杨立华, 司马灿. 美俄水下载人探测作业装备发展 [J]. 中国造船, 2019, 60 (2): 217-226.
- [3] 任玉刚, 刘保华, 丁忠军, 等. 载人潜水器发展现状及趋势 [J]. 海洋技术学报, 2018, 37 (2): 114-122.
- [4] YUAN H, WANG Z, XIA L. Design of Temperature and Humidity Detection System for a Material Warehouse Based on GM [C] // 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 2020, 2516-2519.
- [5] ALTAYEVA A, OMAROV B, CHO Y I. Towards Smart City Platform Intelligence: PI Decoupling Math Model for Temperature and Humidity Control [C] // 2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), Shanghai, China, 2018, 693-696.
- [6] Abid A, et al. An Optimized Honey Dehydration System with Drying Air Temperature and Relative Humidity Control [C] // 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Selangor, Malaysia, 2019, 305-310.
- [7] 田国柱, 丁洁. 基于 RobotStudio 的多工业机器人制链生产线的仿真设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (12): 123-124, 133.
- [8] 陆叶. 基于 RobotStudio 的机器人柔性制造生产线的仿真设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016 (6): 157-160.
- [9] 杨利, 陈柳松, 谢永超. 基于 RobotStudio 的芯片智能分拣生产线设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021 (8): 137-141.

- [7] LONG W, LI F, LUO L, et al. The design of temperature and humidity Control System for Incubation based on data fusion and fuzzy decoupling [C] // 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2015, 386-391.
- [8] WU X, WANG X, HE G. A Fuzzy Self-tuning Temperature PID Control Algorithms for 3D Bio-printing Temperature Control System [C] // 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Hefei, China, 2020, 2846-2849.
- [9] LI M, WEI J, SHEN T. Temperature and humidity decoupling control for enthalpy difference Laboratory [C] // 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2018, 1174-1178.
- [10] 刘大军, 胡舜迪, 史振志, 等. 基于模糊 PID 参数自整定的细胞培养箱温度控制算法 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 45-48.
- [11] 王玉华, 郑骁健. 基于模型参考自适应 PID 的高压釜温度控制 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 105-108.
- [12] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设计与仿真 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (21): 51-55.
- [13] 彭梦迪, 郑晟. 高精度恒温箱温度控制系统的实现 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (2): 9-12.
- [14] 王洪航, 高巍. 模糊解耦算法在温湿度控制中应用的研究 [J]. 计算技术与自动化, 2018, 37 (1): 31-34.
- [15] 范蟠果, 刘经纬, 王超然, 等. 基于 PLC 的模糊 PID 冷却液温度控制系统的设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2020 (1): 69-72.
- [16] 孙宏伟. 基本 PID 控制算法的自动化温湿度控制器 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [17] 周艳平, 庄岩. 一种粒子群模糊 PID 控制算法在温室中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 116-119.
- [18] BENYEZZA H, BOUHEDDA M, ZERHOUNI M C, et al. Fuzzy Greenhouse Temperature and Humidity Control based on Arduino [C] // 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), Medea, Algeria, 2018, 1-6.
- [19] ILI FLORES S A, KONNO H J, MASSAFRA A M, et al. Simultaneous Humidity and Temperature Fuzzy Logic Control in Neonatal Incubators [C] // 2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA), Buenos Aires, Argentina, 2018, 1-6.
- [20] 闫新峰, 金文, 耿健, 等. 某机载特种设备舱高可靠温度控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (12): 95-98.
- [20] 刘涛. 一种多机器人协同的装配生产线的设计 [J]. 机电信息, 2017 (18): 136-137.
- [21] 高茂源, 王好臣, 丛志文, 等. 基于 RobotStudio 的机器人上下料工作站仿真分析与优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020 (8): 60-63.
- [22] 赵锡恒. 基于 RobotStudio 的工业机器人装配工作站仿真应用 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (8): 204-206.

(上接第 104 页)