

基于二自由度PID前馈解耦的恒温恒湿控制系统设计

邱巧迪¹,徐世许¹,张鸚琦¹,王鹏程¹,王伟²

(1. 青岛大学 自动化学院,山东 青岛 266071; 2. OMRON 公司,山东 青岛 266032)

摘要:设计一种基于二自由度PID前馈解耦的恒温恒湿控制系统,利用阶跃响应实验测得系统响应曲线,结合机理法搭建数学模型,设计解耦环节,把多变量耦合控制系统处理为多回路互不干扰的单变量控制系统,使用二自由度PID控制器,调节PID参数,使外部干扰响应性能最优,目标值滤波器处理温湿度设定值,使目标值响应性能也达到最优。仿真结果表明,该控制系统减小了温度和相对湿度的互相干扰,保证了温湿度值平稳不抖动。

关键词:恒温恒湿箱;二自由度PID;前馈解耦;滤波器

中图分类号:TP273 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2021)05-0187-04

Design of Constant Temperature and Humidity Control System Based on Two Degree of Freedom PID and Decoupling Feedforward

QIU Qiaodi¹, XU Shixu¹, ZHANG Yingqi¹, WANG Pengcheng¹, WANG Wei²

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. OMRON, Qingdao 266032, China)

Abstract: A constant temperature and humidity control system based on two degree of freedom PID and decoupling feedforward was designed. In the step response experiments, controlled system step response curve was measured. By mechanism method, the model of the controlled system was established. Decoupling link was built to process multi-variable coupling control system into multi-loop single-variable one without interact interference. Two degree of freedom PID regulator was used to adjust PID parameter, which enables external disturbance response to achieve optimal performance. The set-point was processed by target value filter to obtain optimal performance. The simulation results show that the control system reduces the mutual interference between temperature and relative humidity and ensures stable temperature and humidity values without jitter.

Keywords: constant temperature and humidity box; two degree of freedom PID; decoupling feedforward; filter

0 引言

随着科研技术的不断发展,对温湿度性能指标的控制提出了更高的要求。在进行生物、医药、化学等科研实验时需要温湿度恒定,湿度的控制精度直接决定实验的成败^[1]。但目前国内市场大部分的国产环境试验箱都只对温度或相对湿度单参数控制,无法满足实际实验需求^[2]。部分进口试验箱虽然实现了温湿度联合控制,但是价格昂贵,后期也存在维护困难等缺点。

针对恒温恒湿箱的市场现状,开发了基于二自由度PID前馈解耦控制的恒温恒湿控制系统^[3]。通过解耦技术和二自由度PID算法的运用,减小了温度和相对湿度的互相扰动,提高了控制精度^[4],保证试验箱可以长时间稳定运行,同时通过引入物联网模块和触摸屏,既简化工作人员的操作流程,又可以在服务器端远程监管试验箱,提高了设备智能化水平。

1 硬件设计

系统硬件包括NX控制器、温控模块、除湿模块、加湿

模块、温湿度传感器等。NX控制器通过Ethernet/IP与OMRON NA触摸屏通信,通过温湿度传感器采集信号,各传感器信号以模拟量形式被采集到NX控制器中,并对传感器信息进行分析,使用RS-485串口通信调节温控驱动板、除湿驱动板和无线发射器的工作状态,组成了整个系统的硬件结构。在NX控制器中,利用Sysmac Studio编程软件编写程序,实现了温湿度信号采集、数据转换、温湿度控制量计算等功能。系统的硬件结构如图1所示。

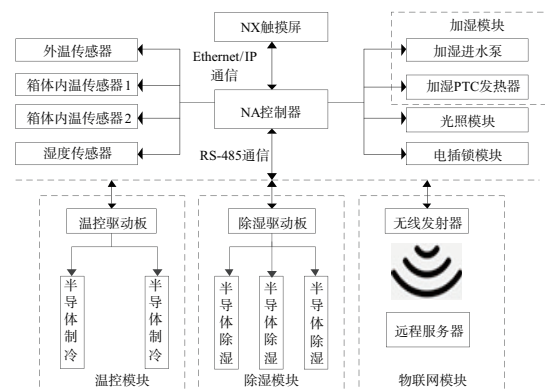


图1 控制系统硬件结构

第一作者简介:邱巧迪(1994—),女,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为计算机控制。

2 阶跃响应实验建模

在实际控制中,温湿度存在耦合情况,若不对温度和相对湿度两个回路进行解耦,两个回路之间互相干扰,会对控制效果产生极大的负面影响,严重时会导致温湿度振荡从而破坏系统的正常工作。在恒温恒湿试验箱系统的运行过程中,箱体内部风机、LED灯等电子元件散热以及箱体缝隙处的内外空气交换也会对温湿度造成干扰^[5],但是经过实验验证这些因素对温湿度的扰动极弱,因此可以忽略这些因素对温湿度的扰动,只考虑温湿度之间的耦合关系,将温湿度控制系统近似为双输入双输出系统^[6],其控制原理如图2所示。

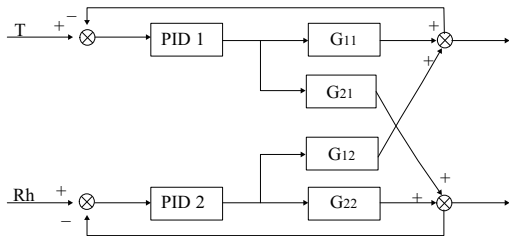


图2 恒温恒湿箱控制原理

考虑到温湿度耦合的复杂机理,采用阶跃响应实验建立被控系统的数学模型。文献[7]提出在温湿度变化过程中具有大时滞和大惯性等特性,因此对其进行了数学解析和建模^[8],得到了一阶传递函数如式(1)所示。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: K 为被控系统的放大系数; T 为惯性时间常数; τ 为时滞时间; s 为拉普拉斯变换后新的空间中的变量。

采用 Sysmac Studio 软件中的数据跟踪功能实时跟踪温湿度变化数据,并使用 Matlab 绘制阶跃响应曲线,重复多次测试并解出合适的数学模型^[9]。

设置湿度控制阶跃响应实验,在箱体内部温湿度稳定的情况下,调节湿度 PWM 控制字,实现调节电压占空比从而调节加湿进水量,温度回路则不加以控制,循环持续地进行加湿动作。湿度控制过程中温度对象的数学模型如式(2)所示。

$$G_{12}(s) = 0 \quad (2)$$

G_{12} 环节的产生是由于该系统采用的蒸汽加湿和冷凝除湿法调节湿度。

阶跃响应曲线无量纲化,即令

$$y^*(t) = \frac{y(t)-y(0)}{y(\infty)-y(0)} \quad (3)$$

解得

$$y^*(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} & t \geq \tau \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中仅有 T 和 τ 两个参数, t 为表示时间的变量,在湿度实验响应曲线中取两个不同时刻点代入式(4)中,通过计算得出 T_{22} 与 τ_{22} 。因此湿度控制过程相对湿度被控环节如式(5)所示。

$$G_{22}(s) = \frac{2}{604s+1} e^{-55s} \quad (5)$$

G_{22} 环节为湿度控制环节。

以同样的方式进行温度控制阶跃响应实验,在温湿度稳定和系统开环的情况下,调节温控 PWM 控制字,调节电压信号,改变半导体制冷片运行功率,使用 Matlab 处理得出阶跃响应曲线,通过计算得到温度控制过程被控环节:

$$G_{11}(s) = \frac{1.9}{810s+1} e^{-20s} \quad (6)$$

$$G_{21}(s) = \frac{-1.16}{610s+1} e^{-65s} \quad (7)$$

G_{21} 环节的产生则是由于温度的改变直接影响相对湿度, G_{11} 环节为温度控制环节。

3 解耦环节设计

常见的解耦环节设计方法有前馈补偿解耦设计、对角阵解耦设计和单位阵解耦设计等。该系统采用前馈补偿解耦设计方法,解耦环节的加入,使系统在解耦的基础上通过设计简单的控制器就可以达到极高的控制品质。温度、湿度的前馈补偿解耦原理如图3所示。

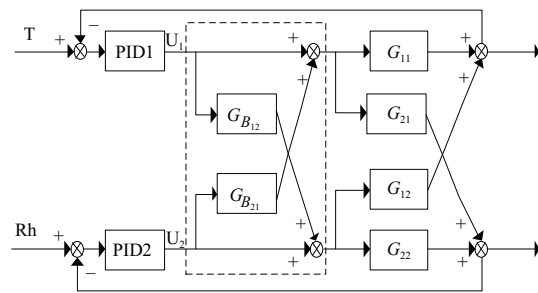


图3 前馈补偿解耦系统

图中 $G_{B_{21}}$ 和 $G_{B_{12}}$ 为前馈解耦环节,要实现温度和相对湿度回路的解耦,需要应用不变性原理如下:

$$U_1(s)G_{21}(s) + U_1(s)G_{B_{21}}(s)G_{22}(s) = 0 \quad (8)$$

$$U_2(s)G_{12}(s) + U_2(s)G_{B_{12}}(s)G_{11}(s) = 0 \quad (9)$$

解上式得出前馈补偿环节:

$$G_{B_{21}}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (10)$$

$$G_{B_{12}}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (11)$$

在前馈补偿环节计算过程中, $G_{B_{21}}(s)$ 滞后时间 65 s 与 $G_{B_{22}}(s)$ 滞后时间 55 s 相差不大,近似处理成二者相等,解得:

$$G_{B_{21}}(s) = 0.58 \frac{604s+1}{610s+1} \quad (12)$$

$$G_{B_{12}}(s) = 0 \quad (13)$$

$G_{B_{12}}(s)$ 为温度前馈补偿环节, $G_{B_{21}}(s)$ 为湿度前馈补偿环节。

4 二自由度PID控制器设计

根据本文恒温恒湿箱控制系统的功能需求,对PID控

制器进行设计(图4),要求温湿度既可以满足优良的设定值跟踪性能,又要具有干扰抑制的定值控制性能,而传统的PID控制器无法做到二者兼备,传统PID控制器传递函数如式(14)所示。

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (14)$$

式中: K_p 表示比例系数; T_i 表示积分时间常数; T_d 表示微分时间常数。

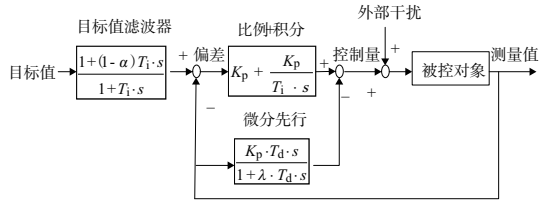


图4 带设定值滤波器的二自由度PID

由图4可知二自由度PID算法在结构上等价于在微分先行PID算法的基础上引入带可调参数 α 的滤波环节。微分先行PID算法只对输出测量值进行微分作用,消除了设定值改变时微分元素引起的输出跳变,即微分冲击,保证了控制器运行的稳定性。而比例先行PID算法则是使比例环节只对测量值起作用,从而消除比例冲击的影响。二自由度PID算法则是将微分先行PID算法与比例先行PID算法的特性糅合在一起,当参数 α, λ 在0~1之间任意取值时得到介于微分先行PID算法和比例先行PID算法的调节效果。

5 仿真与实现

5.1 Simulink 仿真

为了验证二自由度PID控制器和前馈补偿解耦控制设计对温度和相对湿度的控制效果,使用Matlab中的Simulink搭建了温湿度解耦控制系统模型,控制器环节分别对二自由度PID算法和常规PID算法进行仿真,并对其控制效果。

基于上述得到的温湿度被控回路、前馈补偿环节的传递函数,将温度目标值设定为20℃,相对湿度目标值设定为45%,利用Simulink组态的二自由度PID控制的仿真模型如图5所示,二自由度PID控制器仿真如图6所示。

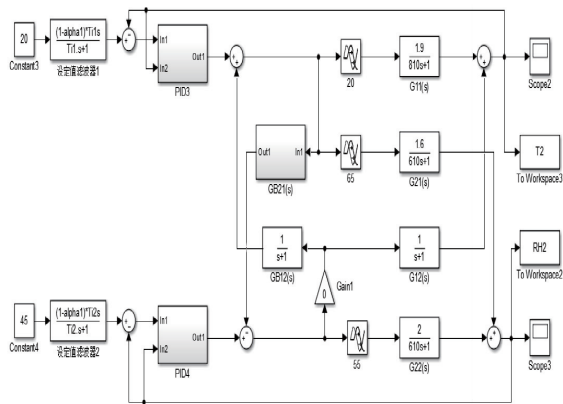


图5 温湿度控制系统二自由度PID解耦控制仿真

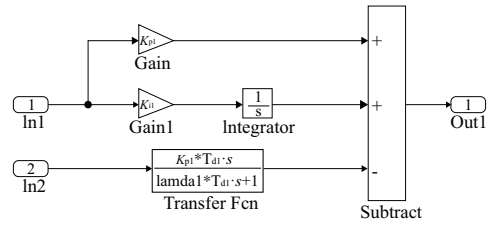


图6 二自由度PID控制器仿真

完成模型搭建工作后需要对模型中的PID参数进行整定。首先常规PID控制器采用经验法进行手动参数整定,并得出较为合理的PID参数如下:

$$K_{p1} = 0.5; K_{i1} = 0.00073; K_{d1} = 400 \quad (15)$$

$$K_{p2} = 0.5; K_{i2} = 0.00090; K_{d2} = 200 \quad (16)$$

其次通过引入二自由度参数对比得出二自由度PID控制器的控制优势。二自由度PID解耦控制中的PID参数与常规PID控制参数相同,二自由度参数如式(17)和式(18)所示。

$$\alpha_1 = 0.65; \lambda_1 = 0.1 \quad (17)$$

$$\alpha_2 = 0.65; \lambda_2 = 0.1 \quad (18)$$

将参数代入仿真程序中,运行得到常规PID解耦控制和二自由度PID解耦控制的温度控制过程曲线如图7所示,相对湿度控制过程曲线如图8所示。

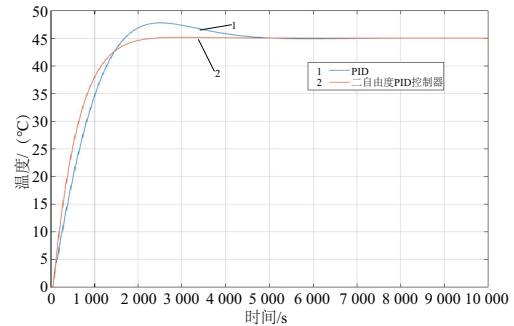


图7 温度控制过程曲线

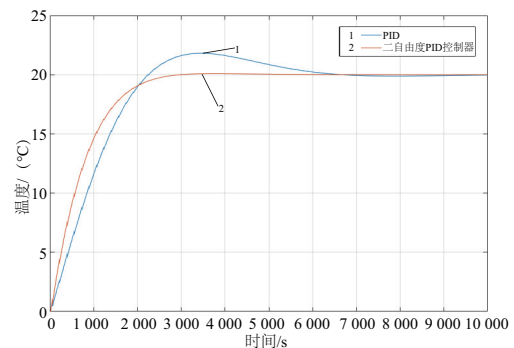


图8 相对湿度控制过程曲线

在仿真验证二自由度PID控制器使用时,通过调节PID参数,首先使外部干扰响应性能达到最优,然后利用目标值滤波器对设定的参数值进行处理,使该算法目标值响应性能也达到最优,进而实现二自由度最佳控制。而传统的PID控制器无法做到二者兼备,即如果重视目标值

跟踪性能整定PID参数,则会对外部扰动的响应速度变慢;如果强调外部干扰响应性能调节PID参数,又会产生过冲的现象。通过分析图7和图8,得到控制系统动态性能指标见表1。通过对比可以看出,采用二自由度PID解耦设计的温湿度控制系统的动态性能指标得到了显著提升,并且温湿度的调节时间、稳态误差完全满足系统设计需求。针对本文所描述的恒温恒湿箱被控系统的设计需求,要求温湿度既可以满足优良的设定值跟踪性能,又要具有干扰抑制的定值控制性能,该系统完全符合设计需求。

表1 常规PID解耦控制和二自由度PID解耦控制性能指标

| 性能指标 | 常规PID解耦控制 | 二自由度PID解耦控制 |
|------------|-----------|-------------|
| 温度调节时间/s | 7 383 | 4 000 |
| 温度最大偏差/℃ | 1.80 | 0.07 |
| 温度稳态误差/℃ | -0.12 | 0 |
| 相对湿度调节时间/s | 8 720 | 4 688 |
| 相对湿度最大偏差/% | 2.75 | 0.12 |
| 相对湿度稳态误差/% | -0.3 | 0 |

5.2 系统实现

系统软件实现了登录、温湿度趋势查看、温湿度参数设置、光照设置、状态监控等功能,可实时对系统进行控制。恒温恒湿箱控制系统经调试完成后投入实际使用,医疗平台要求温度范围在5℃~90℃时的稳态控制精度达到±0.1℃,相对湿度范围10%~80%时的控制精度达到±1%,由云医疗平台网站上截取实际温湿度控制效果如图9所示。

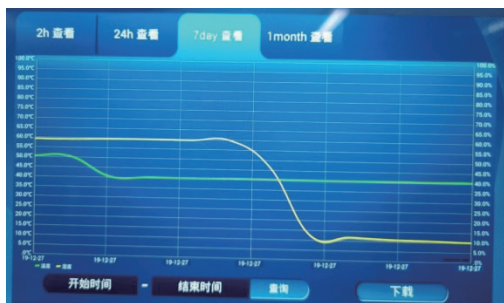


图9 二自由度PID解耦控制系统实际运行效果

恒温恒湿箱在初始50℃的条件下变更温度设定值为40℃,在1h内快速响应达到设定值,调节过程超调量1.3℃,稳态误差为0,并且在后续的湿度调节过程中保证温度恒定无抖动。箱体湿度保持在60%稳定运行,未受温度调节干扰,将湿度设定为10%,系统在3h内达到极限控制湿度,超调量小,稳态误差为0.2%,保证了试验箱的稳定运行。

6 结语

本文设计了一种基于二自由度PID前馈解耦恒温恒湿控制系统,实现了对恒温恒湿箱的温度和相对湿度的精确控制,具有稳定性好、效率高、操作简单等优点,并利用Sysmac Studio对NX控制器进行编程。现场运行效果表明,该控制系统极大地提高了工人操作效率和控制品质,且恒温恒湿箱工作稳定可靠。

参考文献:

- [1] 吴志勇. 环境试验箱变温工况的理论实验研究[D]. 天津: 天津商学院, 2006.
- [2] 胡振帮, 陈庆山, 辛大伟, 等. 利用压缩机制冷改进插床温度控制系统[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(11): 51-54, 121.
- [3] 朱启然, 李绍勇, 李鹏波. 空调房间温湿度PID解耦控制系统的仿真研究[J]. 控制工程, 2019, 26(5): 851-858.
- [4] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [5] WANG G, SONG L. Air handling unit supply air temperature optimal control during economizer cycles [J]. Energy and Buildings, 2012, 49: 310-316.
- [6] 朱启然. 空调房间温湿度PI^λD^μ解耦控制器的仿真研究及其性能分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [7] 吴志勇, 毕德纯. 温湿试验箱发展综述[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 63-67.
- [8] 刘德胜, 王征, 魏强. 基于模糊蚁群算法的微生物培养箱温湿度控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(8): 30-32, 46.
- [9] 秦镜洪, 张吉礼. 空调房间温湿度耦合模型[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(11): 14-18.

收稿日期: 2020-09-04