

基于嵌入式的煤炭含水量检测系统设计

张娜¹, 宋金堂^{2*}, 时维佐², 吴峰华¹, 王昊¹, 尹竞瑶¹, 刘美佳¹

¹沈阳城市学院, 辽宁 沈阳

²沈阳百学科技有限公司, 辽宁 沈阳

Email: *1539588728@qq.com

收稿日期: 2021年4月28日; 录用日期: 2021年6月29日; 发布日期: 2021年7月6日

摘要

煤炭中的含水量是个十分重要的指标, 直接影响产品工艺和质量。因此设计一款含水量检测系统, 根据测量物质不同, 可以选择不同的模式, 实现一键测量, 并且可以通过人机交互界面实时绘制温度曲线, 测量结束后可以通过热敏打印机将结果打印出来, 方便科研人员记录实验结果。设计解决了恒流源易受温度干扰问题、PT100温度转换非线性等问题。该含水量检测系统加热部分是一个电阻炉, 针对加热炉的滞后性和时变性, 提出了一种新型控制方案, 可在电阻炉数学模型不确定的情况下, 通过被控温度的偏差和偏差的变化率的大小, 选择不同的控制规则, 使炉温快速达到设定温度。

关键词

水分测定, 电阻炉, PID控制, 模糊控制器, 温度控制

Design of Coal Water Content Detection System Based on Embedded Chip

Na Zhang¹, Jintang Song^{2*}, Weizuo Shi², Fenghua Wu¹, Hao Wang¹, Jingyao Yin¹, Meijia Liu¹

¹Shenyang City University, Shenyang Liaoning

²Shenyang Baixue Technology Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Email: *1539588728@qq.com

Received: Apr. 28th, 2021; accepted: Jun. 29th, 2021; published: Jul. 6th, 2021

Abstract

The moisture content in coal is a very important index which directly affects the process and qual-

*通讯作者。

文章引用: 张娜, 宋金堂, 时维佐, 吴峰华, 王昊, 尹竞瑶, 刘美佳. 基于嵌入式的煤炭含水量检测系统设计[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(3): 173-181. DOI: 10.12677/jsta.2021.93020

ity of the product. Therefore, to design a multi-purpose water measuring equipment, according to different measuring materials, you can choose a different model to achieve one key measurement, and the temperature curve can be plotted in real time through the human-computer interaction interface; after the end of the measurement the results can be printed out by thermal printer, to facilitate the operator to record the results of the experiment. The design resolves the problem that constant current source is easy to be disturbed by temperature, the nonlinear temperature conversion of PT100, and other problems. The heating part of the moisture measuring instrument is a resistance furnace. Aiming at the lag and time variation of heating furnace, a new control scheme is proposed. In the case of uncertain mathematical model of resistance furnace, different control rules can be selected through the deviation of the controlled temperature and the change rate of the deviation, so that the furnace temperature can reach the set temperature quickly.

Keywords

Determination of Moisture Content, Resistance Furnace, PID Control, Fuzzy Controller, Temperature Control

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在冶金制造、食品加工、矿业开采、地质化工、石油化工等诸多行业的质量检验或科研教学中,水分含量的测定都十分重要[1] [2]。对于煤炭行业,煤的含水量如果过高,就会严重影响煤的质量和用途,对其贸易价格、运输方式、二次加工利用等都有很大的影响,所以水分的测定十分重要。但是,目前国内的含水量检测系统大多还处于国际下等水平,还存在自动化控制程度低、温度动态控制精度差、显示界面不友好、功能单一等问题。本文根据工程实际出发,设计了一款基于嵌入式的煤炭含水量检测系统,解决了测定仪工作时由单向升温大时滞和时变等造成的温度控制精度差的问题。针对系统的传递函数不确定的问题,系统运用了模糊控制理论,控制器经过模糊推理根据控制系统的实际响应情况,对系统的PID参数在线进行整定,可以加快系统的响应,增加系统的稳定性,而且超调量小,符合实际生产[3] [4]。本系统还设计了友好的人机交互界面,可以通过上位机界面直接设置煤炭含水量检测系统的设定温度、PID参数、电机开关等参数,定时绘制当前温度曲线并显示,并能实时监测控制量。

2. 系统总体设计方案

煤炭含水量检测系统的控制系统结构如图1所示,本系统以电阻炉为主要控制对象,由PT100铂电阻测量被控对象的温度,由温度变换引起PT100阻值变化,将其两端电压通过调理、放大,送至16位积分型AD转换芯片,AD芯片通过内置增益放大器,将信号放大,再通过内置的滤波器滤掉工频的干扰,最后将采集回来的电压转换成对应的数字信号送入单片机主控制器,单片机根据AD芯片的特性,将输入的数字信号转换成电压信号进行线性修正,再转换成温度得到与设定值之间的偏差,单片机计算出相应的控制量,由DA运放转换成4~20 mA电流信号控制可控硅的导通角[5],从而控制电流,进而控制煤炭含水量检测系统的温度。单片机通过串口和485通信协议与外接设备通信,包括上位机、触摸屏、热敏打印机、电子称等设备。上位机软件能够随时在线修改参数,包括设定温度、PID参数、电机开关等,并且能根据下位机定时发送的数据,绘制出最新温度值和时间的曲线。

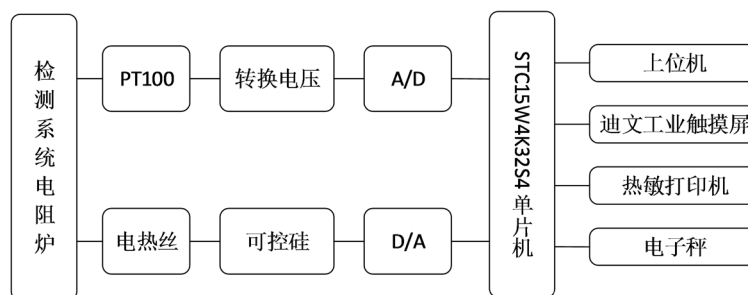


Figure 1. The principle diagram of the control system of the intelligent water content detection system

图 1. 煤炭含水量检测系统控制系统原理图

3. 硬件系统设计

煤炭含水量检测系统硬件系统主要由单片机最小系统、温度采集转换系统、温度控制系统、电源管理系统和人机交互系统五部分组成。模块化设计思路，由上至下层层设计，这种设计方法容易在设计初期发现问题并及时解决。

3.1. 煤炭含水量检测系统电源设计

煤炭含水量检测系统内部的单片机、LM137、A/D、D/A、max232、SN75176 均为 5 V 供电，热敏打印机、电子秤、迪文工业触摸屏为 15 V 供电，而 lm358 运算放大器则需要 24 V 供电，多种类的供电需求给设计带来难度[6]。根据实际情况出发为了减小设计的复杂性同时降低成本，系统采用双电源供电 5 V、12 V 输入。为了使系统能正常的工作，需要将电压升到 24 V，考虑到升压的效率，系统选用了 DCDC 升压芯片 LM2577，输入电压范围 3.5~40 V 输出最大电流 3 A，转换效率达到 70% 以上，符合设计要求。在电源设计时需要注意，由于煤炭含水量检测系统的内部有精密微弱信号采集系统，所以电源的纹波的大小对信号能否正确采集有很大影响，为了减小纹波，在电源的输入端加上一个 100 uF 和 100 nF 的电容器进行滤波，大电容相当蓄水池的作用，当瞬间电流过大可以补充电能，防止电压被拉下，小电容能滤掉电源里面的高次谐波，使电源更纯净。系统双电源地采取 0 欧电阻单点接地的方法，来减少“公共地阻抗耦合”和“低频地环路”。

3.2. 温度数据采集及 A/D 转换电路设计

温度传感器采用的是 PT100 热电阻传感器，Pt100 是电阻式温度传感器，PT100 的阻值随温度的变化而变化，所以测温的本质就是测量 PT100 的电阻，根据欧姆定律，设计引入一个恒流源通过 PT100，再测量 PT100 两端的电压变化[7]，这样通过计算便可得出当前温度值。电流通过导体会发热，电流如果过大 PT100 会发热影响测量精度，所以最后权衡测量电压的动态范围和发热影响，折中后选择 400 uA 恒流源。在设计恒流源时，设置参数的电阻直接影响输出电流精度，所以 R1 和 R4 都是用的千分之一精度的电阻，在串联多线圈精密电位器调整，使输出的电流更精确、更稳定。恒流源采用的是 TI 公司的 LM137，采用零温度系数电流源方案如图 2 所示。

AD 转换采用的是 ADI 公司的 AD7705。它是完整 16 位、低成本、 Σ - Δ 型 ADC，4 个 AD 采集通道，可以接成两个全差分模拟输入通道，适合低速、高精度模数转换。AD7705 正常工作需要外接 12.4576M 晶振及参考电压，根据以上特性，LM134 输出的 400 uA 恒定电流通过一个 6.25 K 的精密电阻，将 AD7705 的参考电压输入引脚接在电阻两端，电流流过 6.25 K 的千分之一精度的电阻会产生一个 2.5 V 的差分电压，给 AD7705 提供一个参考电压，然后电流流经 PT100 再流经适配电阻 R2 汇入地线。这样通过一个

恒流源将温度传感器和 AD 采集联系到了一起。为了消除外接干扰使测量更准确，在 PT100 上并联一个 1 μF 的电容，两个对地的 10 μF 电容。适配电阻 R2 的作用是将 PT100 两端的电位抬高，具有动态特性，这样才能和 R5 参考电阻配合使用。消除温漂和干扰。设计图如图 3。

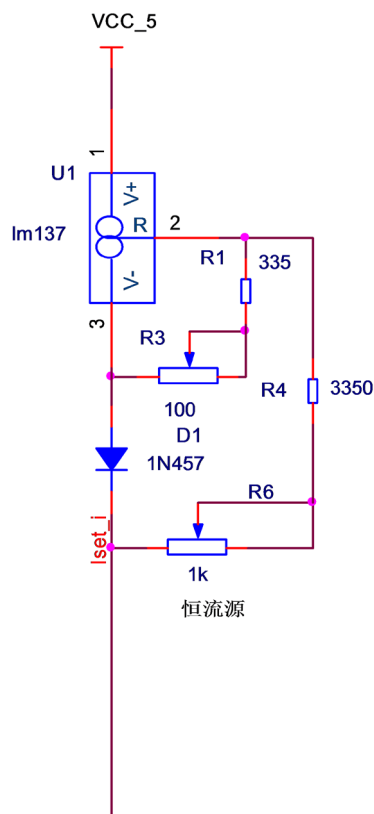


Figure 2. 400 μA constant current source design circuit
图 2. 400 μA 恒流源设计电路

3.3. 煤炭含水量检测系统 DA 转换电路设计

煤炭含水量检测系统最终输出为 4~20 mA 的标准电流控制信号，然而单片机的输出只有电压信号。因此需要设计 1~5 V 到 4~20 mA 对应的转换电路，首先设计单片机输出 1~5 V 模拟信号，有两种设计方案。一种是由单片输出 PWM 占空比可调的方波，另一种是外接 DA 转换芯片直接输出电压信号。如果用单片机内部的 PWM 输出，虽然可以输出占空比可调，但是根据数据手册可知，STC15W4K32S4 内部集成的是 8 位 PWM 输出，控温的范围是 100~300 度可调，那么 8 位的 PWM 相对于系统温度范围来说分辨率太低，很难调节达到稳定状态，因此选用第二种方案。AD5320 是 ADI 公司推出的一款单电源供电、12 位轨对轨满幅电压输出、低功耗数模转换芯片。AD5320 的基准电压源取自供电电源输入端，能够提供最宽的动态输出范围。三线制 SPI 串行通信接口，与标准的 SPI 通信协议兼容，30M 的时钟频率提供高速转换。该器件内部集成上电复位电路，保证上电 D/A 转换器的输出稳定在 0V，符合本系统的设计要求，因此选用此设计方案。

3.4. 继电器驱动电路图

煤炭含水量检测系统给矿石加热时，为了让炉内温度更均匀所以在炉膛内加了一个风扇，风扇是 220

V 单相交流电动机，通过继电器控制电机的旋转，当要测量温度时将风扇停止。另外加热炉的底部安放控制电路，温度过高会影响测量精度，所以在炉子下部装有 4 个风扇，系统根据控制电路温度控制风扇转动排热。由于单片的 IO 口输出电流能力有限，所以通过光耦隔离驱动达林顿管 ULN2003 来间接控制大功率风扇的状态。由于继电器吸合瞬间会产生大的电磁干扰，断开瞬间也可能产生很大的反向电流，所以将单片机的控制 IO 通过光耦与 ULN2003 隔离开，每个继电器都并联一个反向二极管，以消除反向电流。

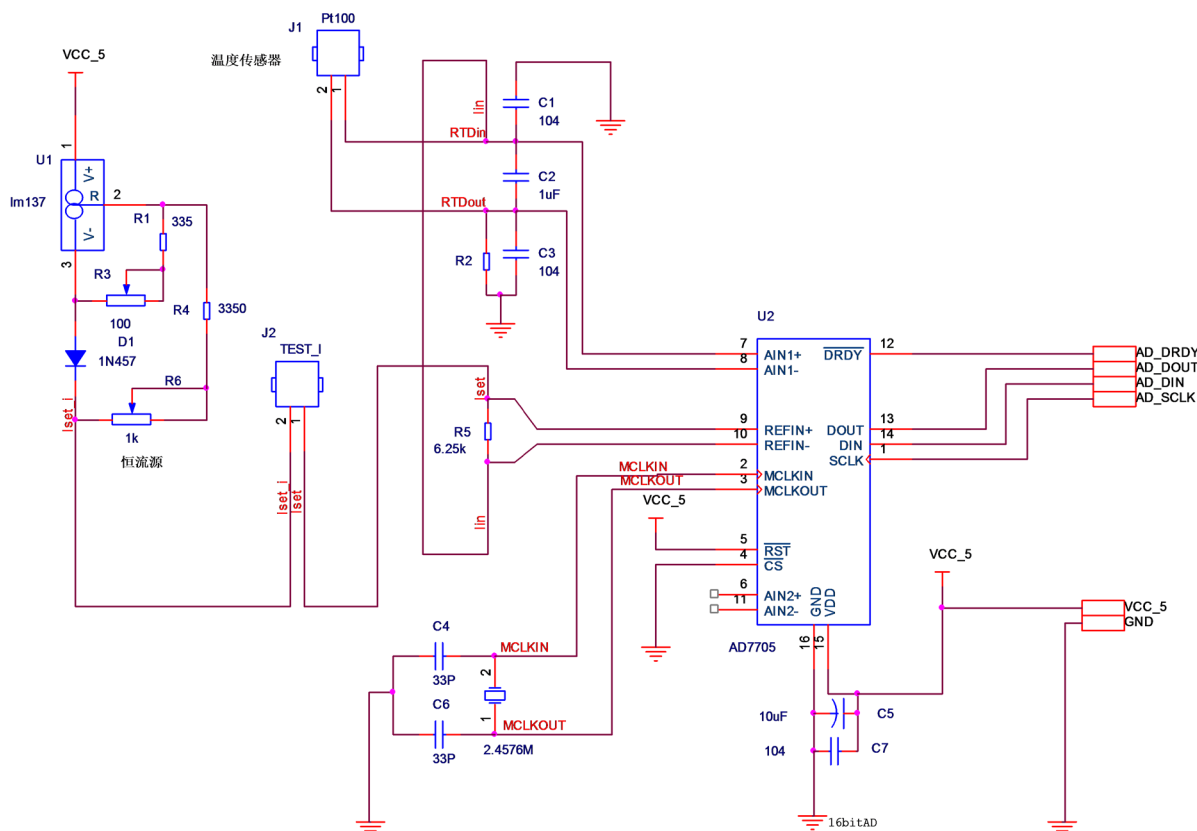


Figure 3. Digital-to-analog conversion and temperature drift elimination circuit

图 3. 数模转换及消除温漂电路

4. 系统软件设计

上位机软件是基于 LabVIEW2012 设计的，在实际调试中，由于要频繁的更改算法参数，每次修改都要重新下载程序，很不方便。所以上位机软件要实现在线修改参数功能，并且能实时绘制出温度给定和时间的曲线[8]。根据这些需求开始搭建软件调试平台。

4.1. 上位机软件

系统要通过上位机直接设置煤炭含水量检测系统的设定温度、PID 参数、电机开关等参数，因此人机交互界面的设计必须满足实用美观、操作简单等需求，上位机显示屏可以显示和绘制当前温度及曲线，并能实时监测控制量，上位机和下位机的通信方式是串口通信，由于要传输大量的数据，所以在串口通信的基础上，再加上定长的通信协议，下位机定时 2 s 更新向上位机发送一次数据，更新温度及控制量，上位机将更新的数据绘制成曲线，调试人员根据设定一个温度，即相当于对系统给定一个冲击，通过观

测响应曲线，可以判断出系统状态，然后调整参数。

4.2. 下位机软件设计

煤炭含水量检测系统控制单元要完成实验参数及模式设定、数据采集、数据处理、数据显示等功能。除了上文所述的必要硬件组件，还要有一个“大脑”——软件算法。煤炭含水量检测系统主程序结构图如图4所示，上电首先进行初始化，然后判断温度设定键是否被按下，根据设定情况决定是否进入工作状态，当完成温度设定后按下运行键使系统进入检测状态。

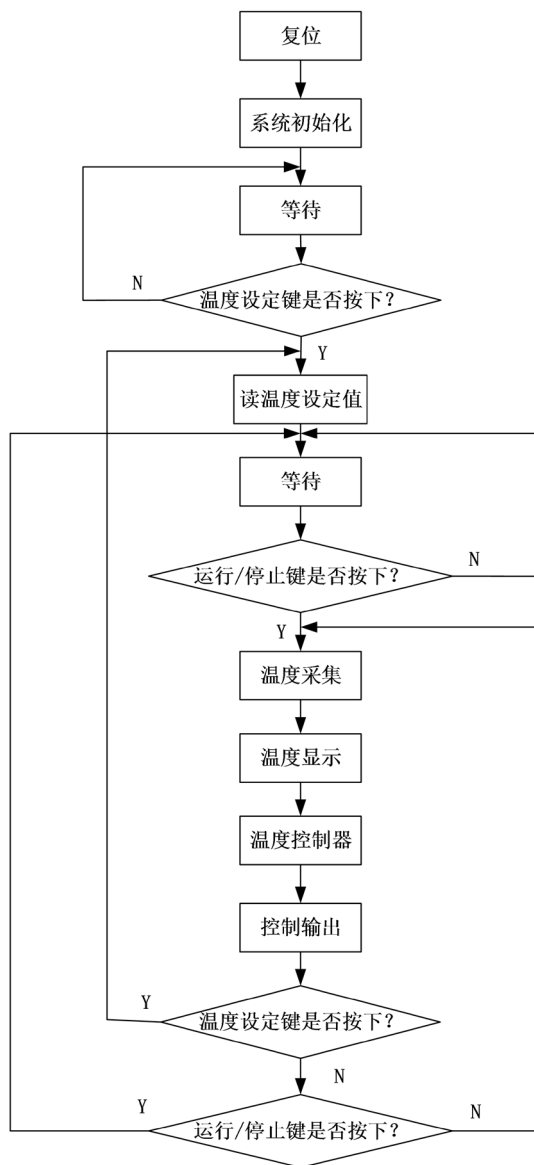


Figure 4. Main program structure diagram

图4. 主程序结构图

5. 系统现场测试

系统的功能调试。此阶段是检验系统功能，发现潜在问题的重要阶段，直接决定系统最后表现出的

性能, 因此调试不仅需要大量的时间, 而且还需要科学的方法进行调试。为了得到准确真实的数据, 尽量保证测试时的基础条件是相同的, 比如室内温度、炉内温度、设定温度、风扇的状态等, 都要保持一致。

首先在炉内空载时进行控制恒温调试。由于四季温度变化幅度比较大, 所以要实现控制炉内温度恒定为平均温度值 25 度。煤炭含水量检测系统中加热的电阻炉, 一般都属于一阶对象和纯滞后的一阶对象 [9], 因此被控对象的传递函数可表示为:

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

其中: K_f ——被控对象的放大系数, T ——被控对象的时间常数, τ ——纯滞后时间。

先假设被控对象为 $G(s) = \frac{1}{1+100s} e^{-20s}$, 采样周期 2.5 s。根据经验设置一组 PID 控制参数, 让系统自己控制加热, 系统响应曲线如图 5 所示。

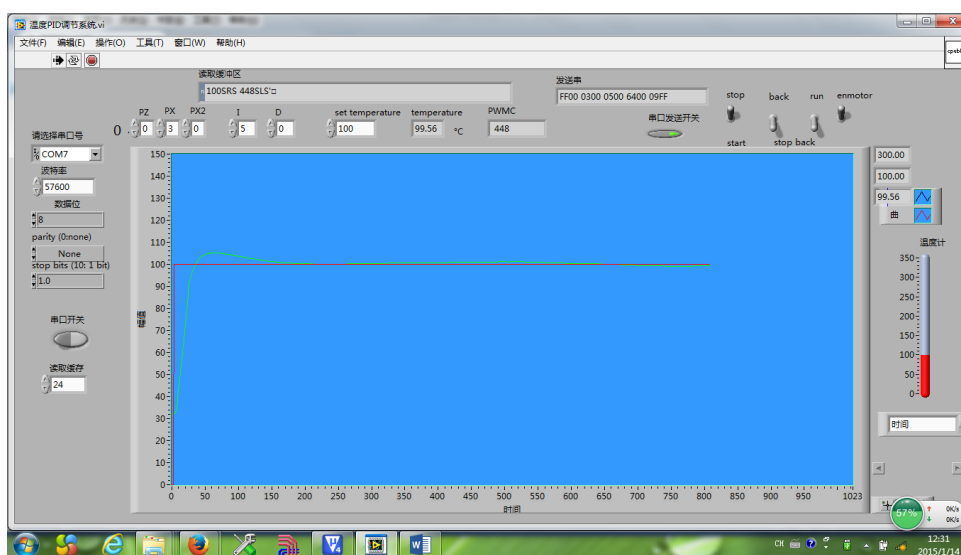


Figure 5. System response curve

图 5. 系统响应曲线

当空载调试稳定后, 开始带上负载调试。被加热负载选用 500 g 的小煤块加入 50 g 的水, 如图 6 所示。当加上实验负载后, 由于系统的传递函数发生了变化, 之前的得到的 PID 控制参数发生了变化, 经过了大量的实验调试修改参数, 得到响应曲线如图 7 所示。



Figure 6. Coal block for experiment

图 6. 实验用煤块

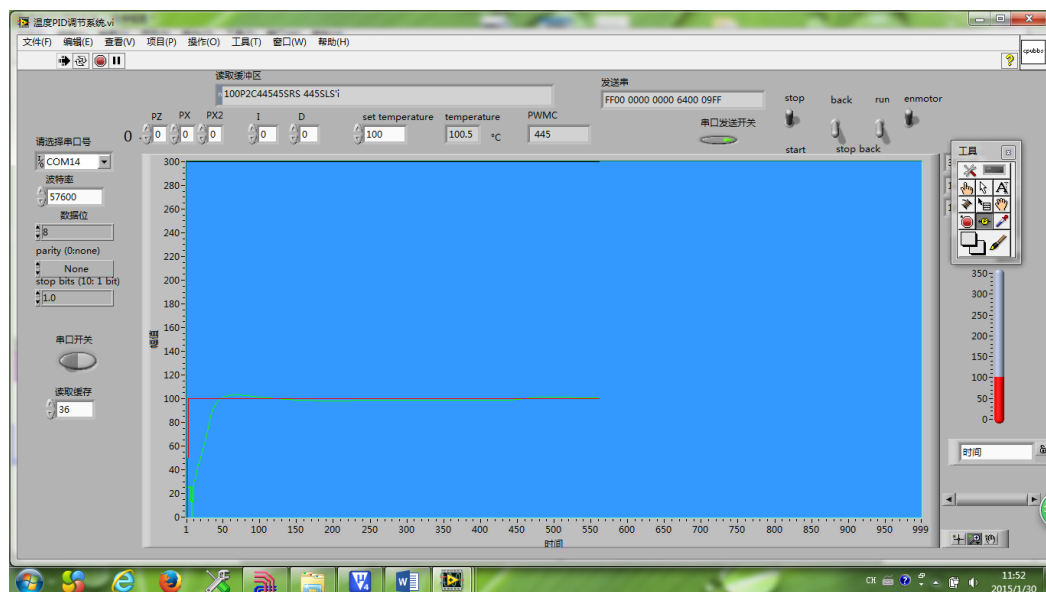


Figure 7. System response curve that meets the requirements
图 7. 符合要求系统响应曲线

从图 7 可以很明显地看出系统有着良好的稳定性, 和抗干扰能力。通过几个月的时间进行大量验证调试, 证实了煤炭含水量检测系统能很好的满足工程实际中对煤炭中含水量恒温检测的需要。系统能快速稳定的达到期望值, 并且在期望值附近的振幅很小, 满足工程实际需要。

6. 结束语

基于嵌入式的煤炭含水量检测系统相比于传统的水分测定设备, 功能更加强大, 测量精度更加准确, 经过理论分析论证, 本系统不仅能够用于煤炭中含水量的测量, 还支持多种类矿石中含水量测量, 如铁、铜、铝等矿石中水含量的测量, 并且有两种测量模式——恒重法和恒时法。系统还具有较强的自适应能力和鲁棒性, 能够适应多干扰、变参数和非线性控制过程的要求。本系统具有适用性强、精度高、稳定性高等特点, 可广泛应用于各类矿石中含水量的测量。

基金项目

辽宁省自然科学基金项目“融合 V-SLAM 与深度学习的仿人机器人智能行为研究”(2019-ZD-0345)、“仿人机器人视觉环境认知与类脑智能行为研究”(2020-CSLH-41)、沈阳市高层次创新人才项目“仿人机器人若干关键技术研究及应用推广”(RC190324)、沈阳市科技创新平台建设规划市级重点实验室项目: 沈阳市仿人机器人重点实验室(18-007-0-10); 教育部高等教育司 2020 年第一批产学合作协同育人项目: “高校人工智能专业师资训练营”、沈阳市教科工委 2020 年在沈高校“双服务”项目: 基于深度学习技术的移动端电子取证系统; 2019 年度沈阳市高层次创新人才项目: “仿人机器人若干关键技术研究及应用推广(RC190324)”。

参考文献

- [1] 孟敏, 李自成, 袁园, 王泽来. 含水率分析仪矿化度自动标定系统设计[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(2): 73-76.
- [2] 龙雯琪, 潘海婷, 朱日龙, 张霖琳, 李憬然, 谢沙, 朱瑞瑞. 加热方式对固体废物水分含量测定的影响研究[J]. 中国环境监测, 2021, 37(2): 135-141.

-
- [3] 戈剑. 模糊控制与模糊控制器国内应用概况[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2017(4): 21-26+48.
 - [4] 吴登国, 李晓明. 模糊参数自整定 PID 控制器的仿真研究[J]. 电气传动自动化, 2013, 35(3): 7-10+24.
 - [5] 白美卿, 高富强. 电阻炉炉温控制中的可控硅触发技术[J]. 自动化仪表, 1996(2): 31-34.
 - [6] 杨建国. 你好放大器[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-209.
 - [7] 张修太, 胡雪惠, 翟亚芳, 等. 基于 PT100 的高精度温度采集系统设计与实验研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(6): 812-815.
 - [8] 高宏岩, 王誉钱. 基于 LabVIEW 和单片机的自动控制系统综合实验[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(1): 53-57.
 - [9] 李晓丹. 模糊 PID 控制器的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2005.