

基于铂电阻和硬件闭环控制的食物干燥设备恒温控制系统

A thermostatic control system for food drying equipment based on platinum resistance and hardware closed-loop control

舒望¹ 陈光伟²

SHU Wang¹ CHEN Guang-wei²

(1. 湖南汽车工程职业学院, 湖南 株洲 412001; 2. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412001)
(1. Hunan Automotive Engineering Vocational College, Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

摘要:针对现有食物干燥设备恒温控制系统的控制精度不高和响应速度慢的问题,提出并设计了一种基于铂电阻为温度感应器件、硬件闭环控制电路进行恒温控制的食物干燥设备恒温控制系统。试验结果表明,系统的恒定温度误差在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,恒温平均响应时间为4 min 56 s,能有效提高系统的恒温控制精度和响应速度。

关键词:干燥设备;恒温控制;铂电阻;闭环控制;响应速度

Abstract: Aiming at the problems of low control precision and slow response speed of the existing food drying equipment thermostatic control system, this paper presents and designs a kind of food drying equipment thermostatic control system based on platinum resistance as temperature sensing device and hardware closed-loop control circuit for constant temperature control. The test results show that the constant temperature error of the system is within $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the average response time of constant temperature is 4 min 56 s, which can effectively improve the system constant temperature control accuracy and response speed.

Keywords: food drying equipment; constant temperature control; platinum resistance; closed-loop control; response speed

干燥设备被广泛地应用于食品加工过程。干燥设备的核心部件在于恒温控制系统,常见的控制系统多由温度感应、加热执行、温度设定、调整控制等部分组成。王萌^[1]提出一种基于径向基神经网络,采用DS18B20传感

器的恒温控制系统。武新等^[2]设计了一种基于热电偶为感温元件的恒温控制系统,其恒温控制精度为 $\pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温响应时间为360 s。王银玲等^[3]设计了一种以ATmega8单片机为核心、数字温度传感器DS18B20为传感器的恒温控制系统,通过温度比较的方式实现恒温控制。蔡有杰等^[4]提出了一种采用DS18B20数字温度传感器均匀布点、AT89C52为控制器的恒温监测和控制系统。上述采用DS18B20温度传感器为温度反馈环节,由于传感器本身的精度都只能达到 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致整个恒温控制系统的精度不高。另外,采用单片机作为恒温控制器,只是用简单的温度比较和PID算法,受限于控制器的运行速度,整个恒温控制系统的响应速度不快。

研究拟提出一种基于铂电阻和硬件闭环控制电路实现的恒温控制系统,通过电压比较器的输出控制可控硅的导通角,对加热器的功率进行调整实现恒温控制功能,以期解决现有恒温控制系统存在的精度和响应速度问题。

1 恒温控制系统基本结构及基本原理

以热分干燥设备为研究对象,其恒温控制部分结构示意图如图1所示,在恒温箱内部设置有加热器、温度和湿度传感器,加热器在恒温控制系统的控制下功率可变,从而实现不同的加热量。温湿度传感器用于感应内部的温度和湿度,将其作为反馈信号送给恒温控制系统。

食物干燥设备恒温控制系统如图2所示,主要由微控制模块和恒温控制模块组成。

微控制模块以AVR系列单片机为核心,通过旋转编码开关进行温度的调整和鼓风机开关的控制;温湿度传感器采用DHT22,用以采集干燥设备的温湿度送入单片机;液晶显示器实现实时温度、湿度、鼓风机状态以及设置温度的数字化显示;数模转换电路实现将温度设置值

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(编号:16C0822)

作者简介:舒望,男,湖南汽车工程职业学院副教授。

通信作者:陈光伟(1966—),男,湖南工业大学高级实验师。

E-mail: 994941804@qq.com

收稿日期:2020-04-06

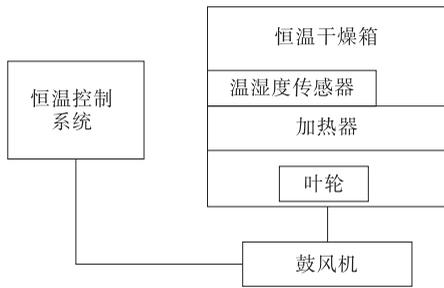


图 1 食品干燥设备恒温控制部分结构示意图
Figure 1 The structural diagram of the food drying equipment thermostatic control system

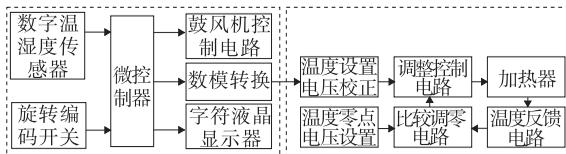


图 2 控制系统结构框图
Figure 2 The structure block diagram of the control system

转换成模拟电压去控制恒温控制模块。

恒温控制模块通过温度设置电压校正电路将微控制模块输出的温度设置电压进行校正后,作为控制输入信号给到调整控制电路。由安装在干燥设备内部的铂电阻

PT1000 构成的温度反馈电路将设备内的实时温度转换成模拟电压,由于铂电阻在温度为 0 °C 时阻值为 1 000 Ω,通过温度反馈电路的恒流源激励后会输出 1 V 的直流电压,为了使温度与电压值直接对应以便于控制,去除零点电压,将温度 0~100 °C 对应输出电压为 0~1 V^[5-7]。

电路中温度零点电压设置电路的作用是产生稳定可调的零点参考电压与铂电阻反馈的电压,通过比较调零电路进行减法运算后,产生一个温度与电压值直接相关的温度信号电压提供给调整控制电路。调整控制电路将去零点后的传感器信号电压与校正后的温度设置电压进行比较并产生一个可变的控制电压控制可控硅的导通角,达到改变加热器的工作电压的目的,从而实现了恒温控制^[6]。

2 恒温控制系统设计

2.1 微控制模块电路设计

微控制模块电路如图 3 所示,单片机选用性能稳定的工业用 AVR 单片机 ATmega16,12 864 字符液晶显示器构成显示电路,旋转编码开关构成的电路实现温度设置的调整、鼓风机开关控制,鼓风机的控制通过继电器实现。

温湿度传感器采用湿度分辨率为 0.1% RH,温度为 0.1 °C 的 DHT22 单总线数字传感器,具有电路结构简单、精度高的特点。

数模转换电路采用 TI 公司的 12 位高速数模转换器,该转换器具有功耗低、转换速率快等特点,完全可以

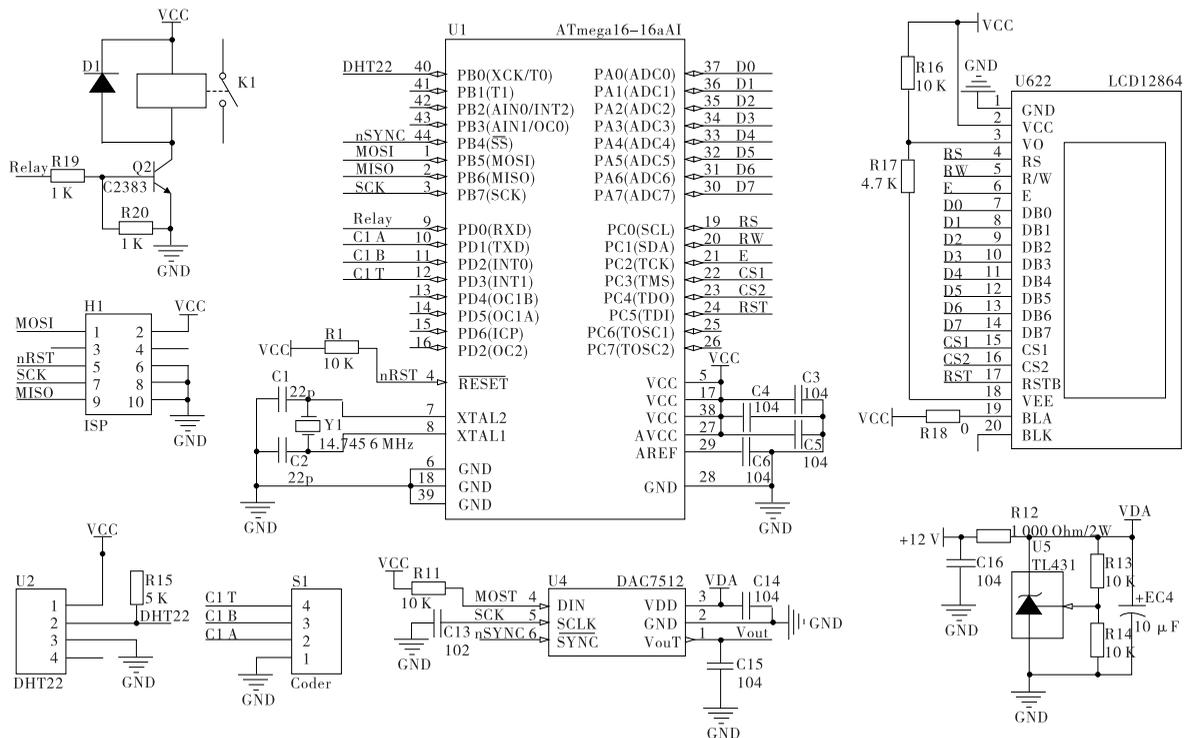


图 3 微控制模块电路
Figure 3 Microcontrol module circuit

满足设计要求。其电源供电由精密稳压器 TL431 组成的稳压电路提供,该电路可实现稳定的 5 V 供电。

2.2 微控制模块软件设计

微控制模块的软件设计中字符液晶的显示控制、旋转编码开关的检测、继电器的控制、数模转换控制等都比较简单,单片机的主控制流程如图 4 所示。在进行 DA 转换控制时,为了配合后续温度设置电压校正电路,要求其输出模拟电压为 0.0~2.4 V,即给到 DAC7512 的最大数字值应为 0x07AE[2.4 V/(5 V/2¹²)],但 DA 受限于电路结构其输出电压会有偏差,可以通过后续电路进行校正。

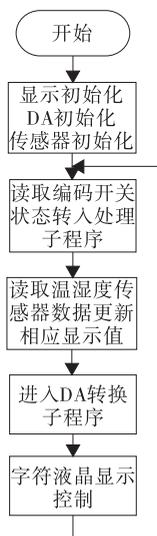


图 4 单片机控制主流程图

Figure 4 The main flow chart of MCU control

2.3 恒温控制模块电路设计

2.3.1 比较调零相关电路设计 恒温控制模块中的温度反馈、零点电压设置、比较调零等电路如图 5 所示,温度反馈电路由精密稳压电源 TL431 组成恒流源,恒流源的电流设定在 1 mA。电流流过铂电阻 PT1000 后,在其两端产生一个与温度呈比例变化的电压。根据 PT1000 的温度特性可知,温度为 1 °C 时阻值为 1 003.908 Ω,则经过恒流源激励后的输出电压为 1.003 V^[8-9]。

如图 5 所示,温度零点电压设置电路由精密稳压电源 TL431 组成可调稳压电源,因 PT1000 在 0 °C 时的阻值为 1 000 Ω,经恒流源激励后输出 1 V 的电压,要使得输出电压与温度值形成 0~120 °C 对应 0.0~1.2 V 的比例对应关系,需要减去 0 °C 时的电压,所以该电路的输出应调整至 1 V,即电容 C10 两端的电压为 1 V。

比较调零电路由两个集成运放组成,U8A 构成减法器,该减法器的输出电压与输入的关系如式(1)所示。

$$\frac{R_{17}}{R_{15} + R_{17}} U_{o1} = \frac{R_{17}}{R_{15} + R_{17}} U_{sig} - \frac{R_{14}}{R_{14} + R_{16}} U_{zero} \quad (1)$$

式(1)中各电阻都取相等值 10 kΩ,所以该电路的输出与输入之间的关系变为 $U_{o1} = U_{sig} - U_{zero}$ 。

温度为 0 °C 时 PT1000 的输出电压为 1 V,零点电压设置为 1 V,经减法器运算后输出 $U_{o1} = 0$ V,但温度为 1 °C 时,减法器的输出 $U_{o1} = U_{sig} - U_{zero} = 1.003$ V - 1.000 V = 0.003 V,根据上述设计,1 °C 的输出电压应为 0.01 V,因此在减法器后级还需要设计一个比例运算电路将输出电压放大大约 3.3 倍。

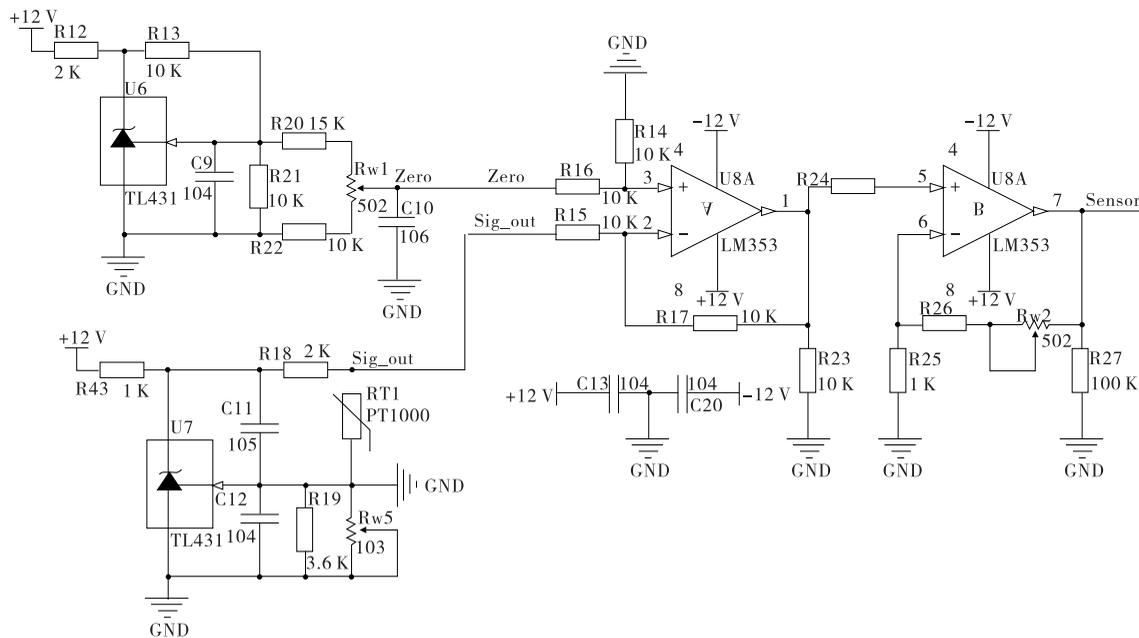
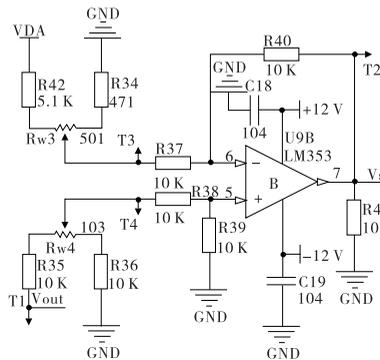


图 5 温度反馈及比较调零相关电路

Figure 5 The relevant circuit of temperature feedback and compare-zero setting

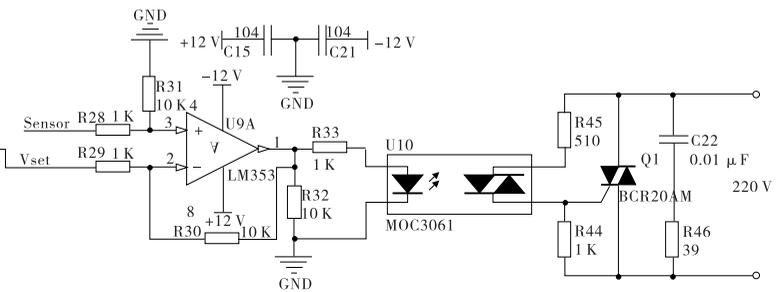
图 5 中 U8B 构成同相比例运算电路,通过调节反馈回路的电位器可使得输出电压固定在 0.01 V,由于 PT1000 的温度特性几乎为线性,因此该电路可实现温度为 0~120 °C,对应输出电压为 0.0~1.2 V。



2.3.2 调整控制相关电路设计 恒温控制模块中的温度设置电压校正、调整控制电路如图 6 所示,微控制模块中 DA 的输出电压在 0.0~3.2 V,但铂电阻 PT1000 反馈的温度信号电压为 0~1 V,因此需要对温度设置电压进行

图 6 调整控制及温度设置电路

Figure 6 The circuit of adjustment control and temperature setting



校正。将温度设置为 0 °C,如设置电压 Vset 不为 0 时,可调节反相端电位器 RW3。电路调试时,先设置温度为最大值 120 °C,此时 DA 输出应为 3.2 V 左右,调节 RW4 使 T4 测试点约为 1.2 V,使比较器输出 Vset 和 DA 输出的比例约为 0.5。通过该校正电路后设置电压可实现 0.0~1.2 V 调节,对应温度 0~120 °C。

反复调节比较调零电路的 Rw1 和 Rw2,使恒温控制电路趋近于理想值。在调整前设定温度和恒定温度之间的对比关系如表 1 所示。

调整控制单元电路由集成运放构成电压比较器,将比较调零电路输出的干燥设备内实际温度电压值与用户温度设置电压进行比较并放大后用来控制光耦的导通强度,当设置电压大于传感器感应电压时,即设置温度大于实际温度,比较器输出正电压光耦的红外管发光,可控硅导通,所接的外部加热器工作,温度上升。当设置电压小于传感器感应电压时,即设置温度低于实际温度,比较器输出负电压光耦的红外管截止,可控硅也截止,所接的外部加热器停止工作。

由表 1 可知,恒温控制电路的误差率随着温度的升高在逐渐减小,符合图 7 中直线 c 的特性关系。在调试过程中为了达到最佳的效果,可根据下述方法进行调试。

3 恒温控制曲线的线性拟合及试验分析

如图 7 所示,直线 a 为理想条件下当设定温度与实际测量温度相等,温度值呈现为一条斜率为 1、过零点的直线。但实际情况是一条斜率为 k,常数项为 Δt (可正、可负)的直线,如图 7 中的直线 c 所示。这种情况下可采用下述方法进行调试。

3.1 恒流源及比较调零电路的调整

(1) 先将电路温度设定在 t_1 (40 °C),待温度恒定后,得到一个实际测量温度值 T_1 。

该部分电路调试时,在铂电阻 PT1000 的回路中串入电流表,调节 Rw5 使电流固定在 1 mA。调节零点电压设置电路的 Rw1,使输出电压为 1 V。断开铂电阻 PT1000 的电压输出,为比较调零电路的反相端接入输出电压为 1.078 V(铂电阻 20 °C 时的输出电压)的稳压源,调整 Rw2 使电路输出电压为 0.2 V。

(2) 再将电路温度设定在 t_2 (80 °C),待温度恒定后,得到一个实际测量温度值 T_2 。

3.2 调整控制电路的调整

(3) 将上述两个温度值代入直线 c 的方程,得到一组二元一次方程,如式(2)所示。

连接外接的加热器,将温度设置为 20 °C,使用温度计测量铂电阻处的温度,正常情况下应为 20 °C。但在整个恒温控制过程中,加热器的响应、铂电阻的安装位置、集成运算放大器的参数等,都会导致恒温控制电路中设定温度与恒定控制温度存在一定的偏差。这时可以通过

表 1 调整前设定温度和恒定温度对比[†]

Table 1 The comparison of set temperature and constant temperature before adjustment

设定温度/°C	恒定温度/°C	误差率/%
40.0	47.2	+18.00
50.0	56.2	+12.40
60.0	65.0	+8.33
70.0	73.8	+5.43
80.0	82.8	+3.50
90.0	91.7	+1.89
100.0	100.6	+0.60

[†] 检测环境温度为 21.6 °C。

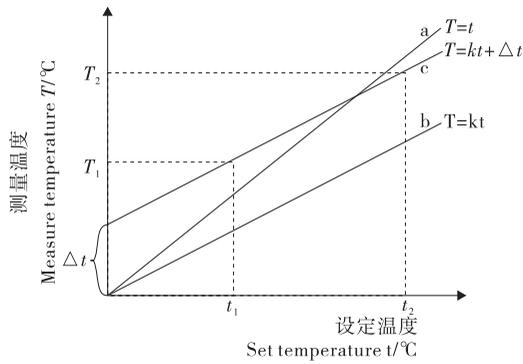


图 7 设定与测量温度对应图

Figure 7 The corresponding figure of the set temperature and measure temperature

$$\begin{cases} T_1 = kt_1 + \Delta t \\ T_2 = kt_2 + \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

(4) 通过求解上述方程可以得出该直线的斜率 k 和 Δt 。

(5) 电路调试时,调节比较调零电路中的 R_{w1} ,使测量温度为 $T_2 - \Delta t$ 的值。这时温度的直线方程就变成直线 b 的方程 $T = kt$ 。

(6) 再调节比较调零电路中的 R_{w2} ,改变比例运算放大电路的放大倍数,从而改变直线 b 的斜率,使直线 a 和直线 b 重合,调整后的恒定温度与设定温度之间的对比如表 2 所示。

3.3 试验分析

为验证恒温控制系统的恒温特性和响应速度,文中开展了相关试验研究。文章选择某电加热型干燥设备,外形尺寸为 $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 100\text{ cm}$,在环境温度为 $21.6\text{ }^\circ\text{C}$ 时开展恒温试验,温度设定范围 $40 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,每 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 取一个测试点,测得的实际温度和设定温度对应关系如表 2 所示。

由表 2 可知,系统的恒温温度偏差在 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,平均偏差为 $0.057\text{ }^\circ\text{C}$,平均误差率为 0.094% ,恒温精度非常高。去除表 2 中 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温耗时,恒温控制系统每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 平均耗时为 $4\text{ min } 56\text{ s}$,随着设定温度的升高恒温的时间会显著增加。

4 结语

食品干燥机是食品加工过程中非常重要的设备,传统的干燥机在实现恒温控制时,闭环控制系统中的温度反馈环节多采用数字式温度传感器,这种方式受限于器件本身的测温精度,导致系统的恒温精度不高,且数字式温度器件响应速度较慢。针对上述缺陷,试验设计了一种采用铂热电阻 PT1000 为感温元件,再配合闭环恒温控制的食物干燥设备恒温控制系统,试验结果表明该系统可实现恒温控制功能,且系统工作稳定、可靠。但由于控

表 2 设定温度和恒定温度对比

Table 2 The comparison of set temperature and constant temperature

设定温度/ $^\circ\text{C}$	恒定温度/ $^\circ\text{C}$	误差率/ $\%$	耗时/ s
40.0	39.9	-0.25	358
50.0	49.9	-0.20	238
60.0	60.0	0.00	243
70.0	70.0	0.00	255
80.0	80.0	0.00	269
90.0	90.1	+0.11	350
100.0	100.1	+0.10	422

制系统发热部件和保温设计的问题,在恒温响应时间上还有待提高,后续将针对干燥设备的发热效能和热损失开展研究。

参考文献

- [1] 王萌. 食品加工智能恒温控制系统设计[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 219-222.
- [2] 武新, 李光林, 廖金权. QPQ 氮化盐分析仪恒温控制系统的设计与实验[J]. 仪表技术与传感器, 2019(10): 25-29.
- [3] 王银玲, 孙涛. 基于单片机的恒温箱控制系统设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 103-106.
- [4] 蔡有杰, 吴志东, 王雪峰, 等. 顺流式玉米烘干塔温度控制系统开发与改进[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 85-89.
- [5] 林凯, 李迪. 一种三线制铂电阻温度传感器信号调理电路设计[J]. 信息通信, 2017(4): 67-68.
- [6] 周鹏程, 王志. 基于铂电阻多测点温度测量系统及其应用[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(6): 158-160.
- [7] 顾吉林, 刘森, 耿杨, 等. 基于 PT100 的高精度温度测量电路的设计[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 101-103.
- [8] 霍钰, 王功. 基于铂热电阻的高温检测系统设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(4): 108-110.
- [9] 党向婷, 肖军. 基于恒流源激励的 PT100 测温电路在锅炉控制系统中的应用与研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(5): 77-80, 85.