

一种高精度烘干温度控制器设计与实现

朱阁顺, 刘善慧, 赵庆海, 史文亮
(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 设计一种基于 ARM 的凹版印刷电子装备烘干温度控制器, 为印刷电子产品制造工艺提供较高且精准的烘干温度。**方法** 通过搭建 PT100 温度传感器的恒流源测温电路对烘箱内温度进行实时测量, 采集到的温度信号经过 AD 转换传输给控制芯片分析处理; 控制芯片利用固态继电器控制加热管通断, 通过变频器控制风机, 实现对烘箱内温度的控制。**结果** 实验表明, 该控制器能够实现的测量温度范围为 0~205 ℃, 测量精度能达到 0.1 ℃。**结论** 在加热管控制和风机控制的协同作用下, 烘箱内部可始终保持预设的温度, 满足印刷电子产品烘干工艺的要求。

关键词: 印刷电子; ARM; PT100; 恒流源

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)07-0141-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.07.026

Design and Implementation of High Precision Drying Temperature Controller

ZHU Ge-shun, LIU Shan-hui, ZHAO Qing-hai, SHI Wen-liang
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to design an ARM-based gravure printing electronic equipment drying system controller to provide a higher and accurate drying temperature for the printing of electronic products. The constant current source temperature measurement circuit of PT100 temperature sensor was built for the real-time measurement of the temperature inside the oven. The collected temperature signal was transmitted through AD conversion to the control chip for analysis and processing. The control chip controlled the on-off switching of heating tube through the solid-state relay. The fan was controlled by the frequency converter to achieve the control over the temperature inside the oven. Experimental results showed that the temperature measurement range of the controller was 0~205 ℃, and the measurement accuracy could be 0.1 ℃. Through the synergistic effect of the heating pipe control and the fan control, the inside of the oven can always maintain the preset temperature to meet the requirements of the drying process of printed electronic products.

KEY WORDS: printing electronics; ARM; PT100; constant current source

印刷电子技术是利用传统印刷工艺制造电子元器件和电子产品的新兴技术^[1]。凹版印刷装备具有工艺稳定、耐印力高、墨路短、墨层厚实等特点, 是生产印刷电子产品的理想设备之一^[2]。机组式凹版印刷装备已在先进国家尝试应用于智能标签^[3-4]、薄膜晶体管^[5-6]等高端电子制造领域。在印刷电子产品制造过程中, 印刷品油墨的烘干是非常重要的一个环节,

其烘干效果的好坏直接决定着印刷品的质量和印刷速度的设定。

印刷电子产品需要更高的烘干温度和烘干时间, 比如, 印刷薄膜晶体管要在 150 ℃ 的条件下持续烘干 5 s 左右, 而传统印刷电子产品的烘干温度多低于 100 ℃, 持续的时间要少很多, 且传统烘干温度控制方式多为开环控制, 控制精度低。目前国内, 张海燕

收稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51505376); 中国博士后科学基金 (2016M602844); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2016JQ5038)

作者简介: 朱阁顺 (1991—), 男, 西安理工大学硕士生, 主攻测控技术在印刷包装设备中的应用。

通信作者: 刘善慧 (1982—), 男, 博士, 西安理工大学副教授, 主要研究方向为机电系统耦合建模与解耦控制。

教授^[7]对凹版印刷机干燥系统进行了相关研究,对干燥系统装置和干燥方法进行了深入分析。李祥友^[8]提出了激光微细熔覆电子浆料柔性布线技术,实现了在陶瓷基板等绝缘基材表面制备导线及线路板。李殊晓^[9]介绍了一种恒压分压法精密测量三线制热电阻阻值的方法。刘澎^[10]研究了凹版印刷机热风干燥系统热能流向与品质,为烘干系统的设计与优化提供理论依据。刘琳琳^[11]研究了凹版印刷机热风干燥系统的工作特性。

针对现有传统热风对流烘箱烘干系统存在的问题和印刷电子产品的需求,设计一种基于 STM32 为控制核心的高精度温度控制器^[12],以满足印刷电子产品制造工艺的要求。

1 控制方案的设计

1.1 闭环控制系统的设计

设计的凹版印刷电子装备烘干温度控制系统为闭环控制,系统方案见图 1。执行机构为加热器和风机,控制对象为烘箱,控制量为烘箱内温度,通过 PT100 传感器实时测量烘箱内温度,并反馈给控制器,与控制器预先设定温度进行比较得到系统的偏差值,控制器根据这个偏差值对执行机构发送控制命令,实现整个烘干系统的闭环控制。

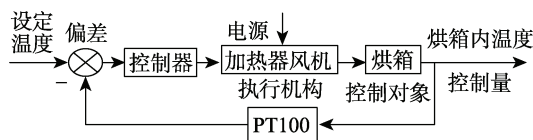


图 1 系统方案设计

Fig.1 The system scheme design

1.2 控制器方案设计

虚线框烘箱系统控制器见图 2,该控制器主要由控制芯片 STM32、通信电路、信号处理电路、固态继电器控制电路、风机控制电路、按键和 LCD 显示接口组成。其中控制芯片采用 STM32F103ZET6,温度传感器采用 PT100。PT100 安装在烘箱中,其采集到的温度模拟信号会通过信号处理电路传送至控制芯片进行信号分析处理^[13]。

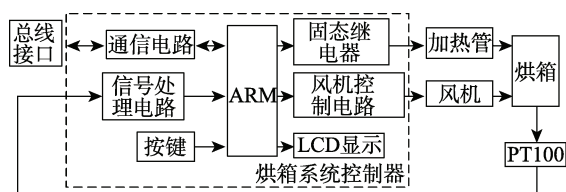


图 2 烘干系统控制器整体结构

Fig.2 Overall structure of the drying system controller

2 测温系统方案的设计

2.1 PT100 铂热电阻测温原理

铂热电阻温度测量原理是将温度值的变化转化为电阻值的变化。用测量电阻的方法得出当前温度值。铂热电阻的阻值 R_T 与温度 t 之间的关系是非线性的^[14],如式(1)所示,当温度在 $0 \sim 650^\circ\text{C}$ 时,有:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2) \quad (1)$$

式中: R_t 和 R_0 分别为温度为 t 和 0 时的电阻值。

2.2 测温电路的设计

控制器测温电路就是图 2 中的信号处理电路,该电路为 PT100 三线制恒流源电路,见图 3。该电路主要有运算放大器 U_1 和 U_2 ,型号为 OP291。图 3 中运算放大器 U_1 含有 2 个运算放大器单元 U_{1A} 和 U_{1B} ,运算放大器 U_2 含有 2 个运算放大器单元 U_{2A} 和 U_{2B} 。该电路包含恒流源电路、补偿线阻电路和二阶低通有源滤波电路。

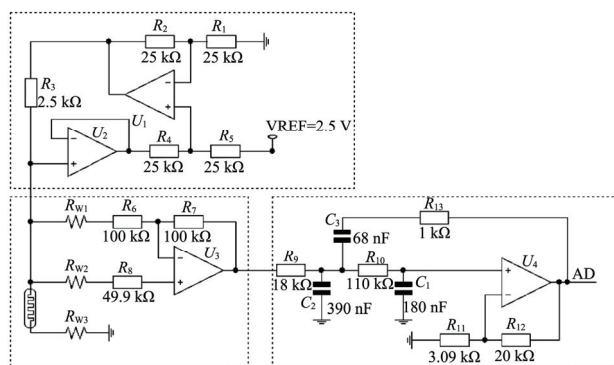


图 3 PT100 三线制恒流源电路

Fig.3 PT100 three-wire constant current source circuit

2.2.1 恒流源电路

恒流源电路有运算放大器芯片 U_1 、电阻 R_1 、电阻 R_2 、电阻 R_3 、电阻 R_4 、电阻 R_5 和参考电压 V_{REF} 构成,其中 $R_1=R_2=R_4=R_5=25\text{ k}\Omega$, $R_3=2.5\text{ k}\Omega$, V_{REF} 为 2.5 V 。

具体来说,放大器 U_1 、电阻 R_1 、电阻 R_2 、电阻 R_4 和电阻 R_5 构成差分放大电路,由于电阻 R_1 、电阻 R_2 、电阻 R_4 和电阻 R_5 的阻值相等,故而该差分放大电路的放大倍数 $G=1$,参照虚短和虚断原理可得:

$$V_{U1} = G \times 2.5 + V_{U2} \quad (2)$$

式中: V_{U1} 为运算放大器 U_1 输出端电压; V_{U2} 为运算放大器 U_2 输出端电压。

运算放大器 U_2 的反相输入端和输出端相连构成电压跟随器,因此可知:

$$V_{U2} = V_{U2+} = V_{U2-} \quad (3)$$

式中: V_{U2+} 为运算放大器 U_2 同相输入端电压; V_{U2-} 为运算放大器 U_2 反相输入端电压。

电阻 R_3 两端的电压为：

$$V_{R_3} = V_{U1} - V_{U2+} \tag{4}$$

由式（2—4）可算出流过电阻 R_3 的电流：

$$I = V_{R_3}/R_3 = 1\text{mA} \tag{5}$$

故而，该恒流电路可为 PT100 提供 1 mA 电流。

2.2.1 补偿 PT100 线阻电路

参照图 2，补偿线阻电路由运算放大器 U_3 、电阻 R_6 、电阻 R_7 和电阻 R_8 共同组成，其中 R_{W1} 、 R_{W2} 和 R_{W3} 分别为 PT100 的模拟线电阻， $R_6=R_7=100\text{ k}\Omega$ ， $R_8=49.9\text{ k}\Omega$ ，由模拟电路虚短和虚断可得出：

$$(V_{IN} - V_{U3-})/R_6 = (V_{U3-} - V_{U3})/R_8 \tag{6}$$

$$V_{IN} = V_{R_{W1}} + V_{PT100} + V_{R_{W3}} \tag{7}$$

$$V_{U3-} = V_{U3+} = V_{PT100} + V_{R_{W3}} \tag{8}$$

$$I_{U3-} = I_{U3+} = 0 \tag{9}$$

式中： V_{RWX} 为 PT100 线阻电压； V_{PT100} 为 PT100 两端电压； V_{U3-} 为运算放大器 U_3 反相输入端电压； V_{U3+} 为运算放大器 U_3 同相输入端电压； I_{U3+} 为运算放大器 U_3 同相输入端电流； I_{U3-} 为运算放大器 U_3 反相输入端电流。

由式（6—9）得出：

$$V_{U3} = V_{PT100} \tag{10}$$

由式（10）可知该 PT100 三线制补偿线阻电路可以补偿掉 PT100 的线阻。

2.2.1 滤波电路

图 2 中二阶低通有源滤波电路由运算放大器 U_4 、电阻 R_9 、电阻 R_{10} 、电阻 R_{11} 、电阻 R_{12} 、电阻 R_{13} 、电容 C_1 、电容 C_2 和电容 C_3 共同构成，其中 $R_9=18\text{ k}\Omega$ ， $R_{10}=110\text{ k}\Omega$ ， $R_{11}=3.09\text{ k}\Omega$ ， $R_{12}=20\text{ k}\Omega$ ， $R_{13}=1\text{ k}\Omega$ ， $C_1=180\text{ nF}$ ， $C_2=390\text{ nF}$ ， $C_3=68\text{ nF}$ 。

由虚短和虚断可知，该二阶低通有源滤波电路输出端电压为：

$$V_{U4} = (1 + R_{12}/R_{11})V_{U4+} \tag{11}$$

式中： V_{U4} 为运算放大器 U_4 输出端电压； V_{U4+} 为运算放大器 U_4 同相输入端电压， U_4 的输出电压连接到 STM32F103ZET6 的 AD 转换输入引脚。

2.3 流程图设计

该控制器测温系统流程见图 4。首先是软件模块初始化，主要包括：风机控制电路初始化、信号处理电路初始化、固态继电器控制初始化。初始化之后，启动风机，并进行实时测温，当测量得到的温度小于预设值时，固态继电器闭合，从而加热管工作，烘箱开始升温；当测量得到的温度大于预设值时，固态继电器断开，加热管不工作，烘箱开始降温。整个过程风机一直以合适的转速运行，保证烘箱内热风不断循环流通。

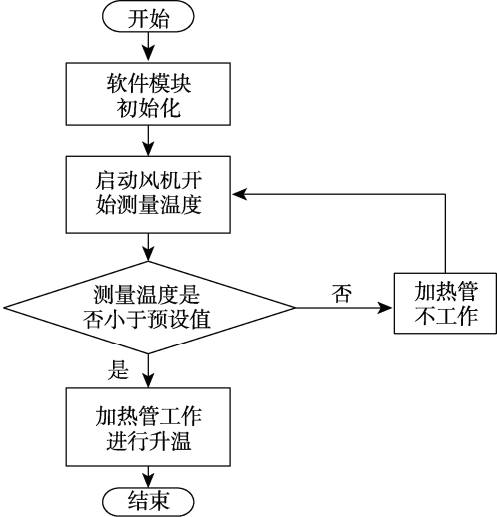


图 4 烘干系统软件总流程
Fig.4 Total flow of drying system software

3 实验结果与数据分析

3.1 PT100 测温标定

测温系统标定是依据 PT100 生产厂家的标准 PT100 分度表，分度表里含有 PT100 在 0~205℃ 各个温度点对应的电阻值，再用精密电阻箱代替 PT100，即将图 3 的 PT100 用精密电阻箱取代，调节电阻箱的取值，通过控制芯片自带的 12 位 AD 模块进行采样，得到各阻值下对应的电压输出 U_{OUT} 。标定数据见表 1。

表 1 测温系统标定数据					
Tab.1 Temperature measurement system calibration data					
分度表 温度/℃	电阻箱取 值/Ω	U_{OUT}/V	分度表 温度/℃	电阻箱取 值/Ω	U_{OUT}/V
0	100	0.7653	105	140.39	1.0731
5	101.95	0.7798	110	142.29	1.0876
10	103.90	0.7951	115	144.18	1.1021
15	105.85	0.8096	120	146.07	1.1166
20	107.79	0.8250	125	147.95	1.1303
25	109.73	0.8395	130	149.83	1.1448
30	111.67	0.8548	135	151.71	1.1593
35	113.61	0.8693	140	153.58	1.1730
40	115.54	0.8838	145	155.46	1.1875
45	117.47	0.8983	150	157.33	1.2020
50	119.40	0.9128	155	159.20	1.2157
55	121.32	0.9281	160	161.05	1.2302
60	123.24	0.9426	165	162.91	1.2447
65	125.17	0.9571	170	164.77	1.2584
70	127.08	0.9716	175	166.62	1.2729
75	128.99	0.9861	180	168.48	1.2866
80	130.90	1.0006	185	170.33	1.3011
85	132.81	1.0151	190	172.17	1.3148
90	134.71	1.0296	195	174.01	1.3293
95	136.61	1.0441	200	175.86	1.3430
100	138.51	1.0586	205	177.70	1.3575

表1中测量温度范围为0~205℃,满足凹版印刷电子装备烘箱的温度测量要求。基本原理为:通过调节精密电阻箱的阻值,从而改变输出电压 U_{OUT} 的取值,即改变了系统的温度测量范围。为了进一步减小由于硬件放大电路所带来的非线性误差,将表1中的数据用最小二乘法拟合,得到的曲线见图5。

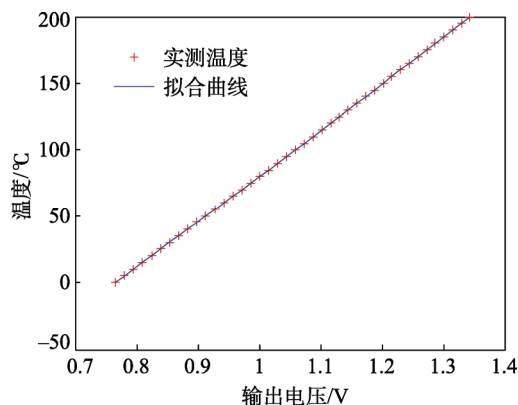


图5 测温系统的标定拟合

Fig.5 Calibration fitting of temperature measurement system

由图5可以得到一个关于电压和温度的多项式:

$$t = AU_{OUT}^2 + BU_{OUT} + C \quad (11)$$

式中: $A=18.583$, $B=307.0202$, $C=-245.8483$ 。通过单片机STM32的12位AD模块来采集电压 U_{OUT} ,再代入式(11)计算即可得到被测温度值 t ^[15]。

3.2 PT100 标定数据分析

为了验证该系统的测量精度,将PT100放入恒温箱中进行测量,每个温度点测量5min,并多次测量求平均值,将测量结果与恒温箱设定温度相减,求出绝对误差,见图6。

标定后的测温绝对误差见图6,从图6中可以看出测量的绝对误差控制在0.1℃以内,满足测量精度,完全满足凹版印刷电子装备烘箱的温度测量精度。

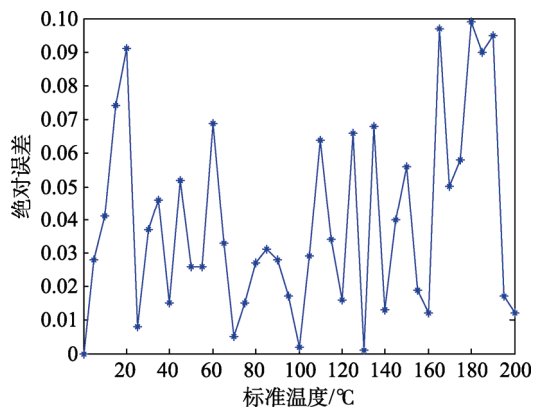


图6 测温系统标定后绝对误差

Fig.6 Absolute error after the calibration of the temperature measurement system

4 结语

该烘干系统控制器提出的PT100三线制补偿线阻恒流源测温电路很好地解决了凹版印刷设备生产印刷电子产品的烘干温度控制问题,通过该电路消除了PT100引线电阻带来的误差,并且在整个烘干系统控制过程中,风机作为辅助手段保证了烘箱的整个热风循环流通,提高了印品烘干质量,最后实验采用最小二乘法来消除测温系统的非线性,使系统的测量绝对误差小于0.1℃。

参考文献:

- [1] 崔铮. 中国印刷电子产业现状与前景展望[J]. 印制电路信息, 2013(12): 4—7.
CUI Zheng. China's Printing Electronics Industry Status and Prospects[J]. Printed Circuit Information, 2013(12): 4—7.
- [2] JUNG M, KIM J, KOO H, et al. Roll-to-roll Gravure with Nanomaterials for Printing Smart Packaging[J]. Journal of Nanoscience & Nanotechnology, 2014, 14(2): 1303.
- [3] ALLEN M, LEE C, AHN B, et al. R2R Gravure and Inkjet Printed RF Resonant Tag[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(11): 3293—3299.
- [4] PARK H, KANG H, LEE Y, et al. Fully roll-to-roll Gravure Printed Rectenna on Plastic Foils for Wireless Power Transmission at 13.56 MHz[J]. Nanotechnology, 2012, 23(34): 7.
- [5] NOH J, JUNG K, KIM J, et al. Fully Gravure-Printed Flexible Full Adder Using SWNT-Based TFTs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(11): 1574—1576.
- [6] LAU P H, TAKEI K, WANG C, et al. Fully Printed, High Performance Carbon Nanotube Thin-Film Transistors on Flexible Substrates[J]. Nano Letters, 2013, 13(8): 3864.
- [7] 张海燕, 商允振, 贺艳玲. 凹版印刷机干燥系统的研究[J]. 轻工机械, 2009, 27(4): 31—35.
ZHANG Hai-yan, SHANG Yun-zhen, HE Yan-ling. Gravure Printing Machine Drying System Research[J]. Light Industry Machinery, 2009, 27(4): 31—35.
- [8] 李祥友. 激光微细熔覆电子浆料柔性布线技术与设备[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
LI Xiang-you. Laser micro-clad Electronic Slurry Flexible Wiring Technology and Equipment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [9] 李殊晓, 郝赤, 龚兰芳, 等. 高精度三线制热电阻检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 135—139.
LI Shu-xiao, HAO Chi, GONG Lan-fang, et al. High-precision Three-wire Thermal Resistance Detection Method[J]. Instrumentation, 2008, 29(1): 135—139.

- [10] 刘澎, 向晨, 侯和平, 等. 凹版印刷机烘干系统的热力学分析[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 195—199.
LIU Peng, XIANG Chen, HOU He-ping, et al. Thermodynamic Analysis of Gravure Printing Machine Drying System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 195—199.
- [11] 刘琳琳, 由磊, 孙正成, 等. 凹印机热风干燥箱射流场数值计算与分析[J]. 包装工程, 2015, 36(17): 87—94.
LIU Lin-lin, YOU Lei, SUN Zheng-cheng, et al. Numerical Simulation and Analysis of the Jet Field in the Hot Air Drying Box of Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17): 87—94.
- [12] 唐凡森. 凹版印刷机热风型干燥系统的智能控制装置设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
TANG Fan-sen. Gravure Printing Machine Hot Air Drying System Intelligent Control Device Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [13] 许卓. 基于 ARM 的多通道温度采集系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
XU Zhuo. ARM-based Multi-channel Temperature Acquisition System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [14] 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.
ZHANG Xiu-tai, HU Xue-hui, ZHAI Ya-fang, et al. Design and Experimental Study of High Precision Temperature Acquisition System Based on PT100[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(6): 812—815.
- [15] 刘刚, 陈树新. 基于 STM32 的铂热电阻桥式测温系统设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2014, 29(1): 53—56.
LIU Gang, CHEN Shu-xin. Design and Implementation of Platinum Thermal Resistance Bridge Temperature Measurement System Based on STM32[J]. Automation and Instrumentation, 2014, 29 (1): 53—56.