

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612038

# 面向高温的 NTC 温度检测系统设计优化及标定

张元飞<sup>1,2</sup>, 樊绍巍<sup>1</sup>, 刘 宏<sup>1</sup>, 谭久彬<sup>3</sup>

(1. 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150001; 2. 机械制造系统工程国家重点实验室(西安交通大学), 西安 710054; 3. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为利用负温度系数(NTC)热敏电阻实现定区间高温检测, 提出一种基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法. 利用 NTC 热敏电阻标称值, 针对目标温度区间进行温度检测系统参数的初始优化设计; 采用期望相对温度跟踪控制策略, 确保该测温系统输出的稳态值分别处于上下边界附近; 采用标准测温设备测量实际温度, 并判断实测温度范围是否满足设计需求; 如果不满足要求, 计算与实际温度对应的 NTC 热敏电阻阻值, 修订 NTC 参数, 进而实现该温度检测系统的参数再调整; 通过熔融沉积成型实验平台, 进行了实验验证. 实验结果表明, 所提优化设计方法是有效的, 实现了定区间高温检测系统优化设计, 有利于提高温度检测系统的测量精度.

**关键词:** 熔融沉积成型; NTC 热敏电阻; 温度测量; 优化设计; 温度标定

**中图分类号:** TH811 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)01-0018-06

## Optimal design and calibration of NTC thermistor based temperature measurement system for high temperature application

ZHANG Yuanfei<sup>1,2</sup>, FAN Shaowei<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>, TAN Jiubin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics and System (Harbin Institute of Technology), Harbin 150001, China;

2. State Key Laboratory for Manufacture System Engineering (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710054, China;

3. Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To apply a negative temperature coefficient(NTC) thermistor to achieve high temperature detection in a fixed interval, a parameter optimization method of a temperature measurement system (TMS) is proposed based on an expected relative temperature tracking control strategy. First of all, the parameters of TMS are initially optimized for a target temperature range based on nominal values of a NTC thermistor. Then, using an expected relative temperature tracking control strategy ensures that the steady outputs of TMS are within a specific distance to the upper and lower boundaries. Thirdly, the actual temperature range, which is measured by a standard temperature measurement device, is determined if it meets the design requirements. If it does not, the resistances of NTC thermistor is calculated corresponding to the actual temperatures, the parameters of NTC thermistor is amended, and then the parameter readjustment of TMS is achieved. At last, experiments are carried out by means of a Fused Deposition Modeling platform and the results show that the proposed parameter optimization method is valid, which realizes the optimal design of TMS for the fixed interval, and is helpful to improve the measurement accuracy of TMS.

**Keywords:** fused deposition modeling; NTC thermistor; temperature measurement; optimization design; temperature calibration

热敏电阻是一种功能半导体,其阻值随着温度的变化而变化. 阻值随温度升高而降低的一类热敏电阻,称之为负温度系数(negative temperature

coefficient,NTC)热敏电阻. 相比热电偶和热电阻, NTC 热敏电阻具有灵敏度高、热惯性小和性价比高优点<sup>[1]</sup>, 因此在汽车和家电等需要温度检测和控制场合得到广泛应用<sup>[2-5]</sup>. 然而, 这些应用主要局限在常温领域, 主要原因有两方面: 一方面是商品化的 NTC 热敏电阻只提供常温热敏指数  $B$  值, 另一方面是该值具有温变特性<sup>[6]</sup>. 上述因素制约了 NTC 热敏电阻在高温测量领域的应用发展.

因此, 本文旨在促进 NTC 热敏电阻在高温精确测量领域的应用, 实现定区间温度检测系统优化设计. 以熔融沉积制造为例, 主流耗材有 ABS 和 PLA

收稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503095); 机器人技术与系统国家重点实验室自主研究课题(SKLR201501A01); 机械制造系统工程国家重点实验室(西安交通大学)开放课题(SKLR2015014)

作者简介: 张元飞(1983-), 男, 博士, 助理研究员;  
刘 宏(1966-), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师;  
谭久彬(1955-), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师  
通信作者: 张元飞, yuanfei.zhang@hit.edu.cn

两种工程塑料<sup>[7]</sup>. 前者熔点为 200 ℃ 左右, 喷嘴温度一般设定为 210~230 ℃; 后者熔点为 180 ℃ 左右, 喷嘴温度一般设定为 190~220 ℃. 由于熔融沉积成型表面质量、尺寸精度及有害物质释放量等受温度影响<sup>[8-9]</sup>, 所以需要进行严格的温度控制. 然而, 实现上述控制目标的前提必要条件是高精度温度检测. 对于这类高温应用场合, 如果仅仅根据常温  $B$  值进行测温系统设计, 将无法实现高温区段的精确定位, 进而导致该系统的温度检测精度下降.

NTC 热敏电阻的  $B$  值随温度变化而变化, 导致利用基本公式进行阻-温特性拟合的实际效果较差. 因此 Hoge<sup>[10]</sup> 和 Steinhart 等<sup>[11]</sup> 提出了 Steinhart-Hart 和 Hoge 等标定公式, 并进行热敏电阻的阻-温特性拟合分析. Chen<sup>[12]</sup> 根据 NTC 热敏电阻生产商提供的数据, 综合评价了上述标定公式的优劣. Ilic 等<sup>[13]</sup> 和 Yu 等<sup>[14]</sup> 也开展了相关研究工作. 然而, 上述分析仅仅考虑了 NTC 热敏电阻自身的阻-温特性, 忽略了测量电路对温度测量系统性能的影响. 虽然有学者开展了不同测量电路及电路参数对测温系统性能的影响研究<sup>[15-16]</sup>, 但是却忽略了 NTC 热敏电阻的  $B$  值变化的影响.

为了解决上述问题, 本文提出一种基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法, 实现针对特定温度区间的基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统优化设计; 针对水槽恒温箱法不适用的温度标定场合, 提出基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法; 在熔融沉积成型实验平台上, 进行实验验证.

## 1 温度检测系统优化设计

### 1.1 NTC 热敏电阻的阻-温特性

在有限温度范围内, NTC 热敏电阻的阻-温特性近似满足如下指数关系式:

$$R_T = R_{T_0} \exp \left( B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right). \quad (1)$$

式中:  $T$  为实际开氏温度,  $T_0$  为基准开氏温度 (通常为 25 ℃ 对应的开氏温度),  $B$  为 NTC 热敏电阻的热敏指数 (通常由 25 ℃ 和 50 ℃ 的零功率电阻值计算得到),  $R_{T_0}$  为 NTC 热敏电阻在温度为  $T_0$  时的零功率电阻值.

### 1.2 信号采集处理电路设计及参数优化

该信号采集处理电路由惠斯通电桥、差分放大器、A/D 转换器和数字信号采集处理器构成, 如图 1 所示. 采用电源隔离 ( $V_{A1}$  和  $V_{A2}$  表示两种模拟电源电压,  $V_D$  表示数字电源电压) 及地线单点短接 (短接电阻  $R_4$  的阻值为零) 的方式, 降低数字信号对模

拟信号的影响.

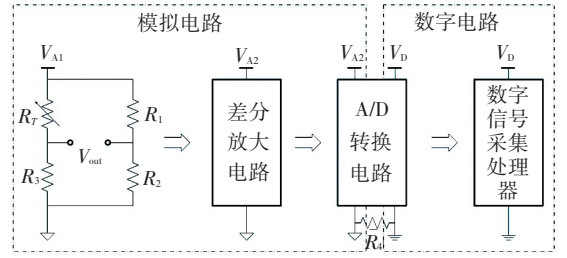


图 1 信号采集处理电路框图

Fig.1 Diagram of signal acquisition and processing circuit

通过分析可知, 惠斯通电桥输出的电压满足下式:

$$V_{out} = V_{A1} \left( \frac{R_3}{R_3 + R_T} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (2)$$

如果已知 NTC 热敏电阻  $R_T$  在期望温度区间  $[T_L, T_H]$  所对应的边界参数  $R_{T_L}$  和  $R_{T_H}$ , 通过优化  $R_3$  的参数, 就可实现上述原始电压信号变化量的最大化, 进而有效提高原始电压信号的信噪比. 利用式 (2), 可求得

$$\Delta V_{out} = V_{A1} \left( \frac{R_3}{R_3 + R_{T_H}} - \frac{R_3}{R_3 + R_{T_L}} \right). \quad (3)$$

根据式 (3), 令  $\partial \Delta V_{out} / \partial R_3 = 0$ , 可得  $R_3$  的最优值为

$$R_3 = \sqrt{R_{T_H} R_{T_L}}. \quad (4)$$

为了实现  $R_1$  和  $R_2$  参数设计不依赖于边界参数  $R_{T_L}$  和  $R_{T_H}$  的目的, 将式 (4) 代入式 (2), 同时令  $V_{out}|_{R_T=R_{T_H}}$  等于负的  $V_{out}|_{R_T=R_{T_L}}$ , 可得

$$R_1 = R_2. \quad (5)$$

对于差分放大电路而言, 为了实现正负差分电压信号的放大倍数统一化设计, 将参考电压设置为  $V_{A2}/2$ . 将式 (4) 和 (5) 代入式 (2), 通过比较法便可确定差分放大电路的放大参数  $K_p$  的优化值为

$$K_p = \frac{V_{A2}/2}{V_{out}|_{R_T=R_{T_H}}} = \frac{V_{A2}(\sqrt{R_{T_L}} + \sqrt{R_{T_H}})}{V_{A1}(\sqrt{R_{T_L}} - \sqrt{R_{T_H}})}. \quad (6)$$

对于 A/D 转换电路而言, 应根据期望温度测量范围和测量精度  $\varepsilon_T$  共同确定. 为了降低放大后的模拟电压信号的量化误差对测量精度的影响, A/D 转换器的位数  $N$  应满足下式:

$$2^N \geq 10(T_H - T_L) / |\varepsilon_T|. \quad (7)$$

根据上述差分放大原理, 构建 A/D 转换器输出的数字量  $x$  与原始模拟电压信号  $V_{out}$  的相互关系如下:

$$x = 2^N \frac{V_{A2}/2 + K_p V_{out}}{V_{A2}}. \quad (8)$$

### 1.3 基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法

如果被检测物体的有效工作温度区间为  $[T_{WD}, T_{WU}]$ , 那么考虑测温边界允许偏差  $\Delta T$ , 可以确定该温度检测系统的期望测温区间满足下式:

$$[T_L, T_H] = [T_{WD} - \Delta T, T_{WU} + \Delta T]. \quad (9)$$

为了实现基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统的优化设计的目标, 本文提出了基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法, 如图 2 所示.

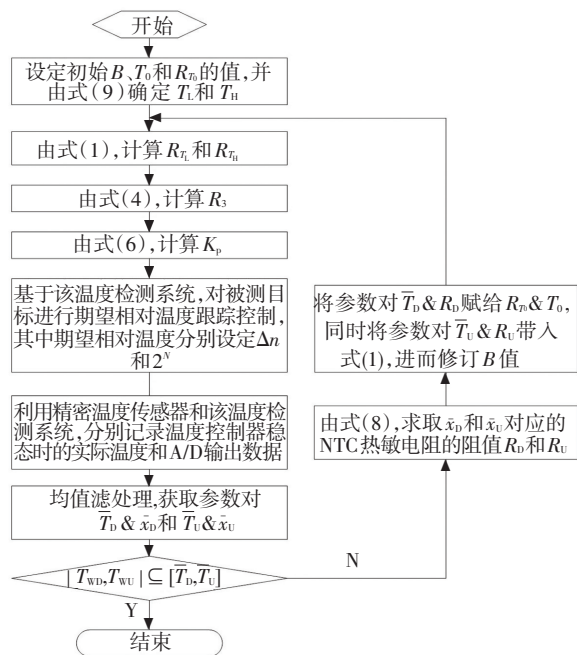


图 2 基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法

Fig. 2 Circuit parameter optimization method of temperature detection system based on desired relative temperature tracking control strategy

相关参数优化调整过程可以划分成 10 个步骤:

**步骤 1** 首先, 根据生产商提供的 NTC 热敏电阻参数, 设定初始  $B$ 、 $R_0$  和  $T_0$  的值; 然后, 根据实际应用需求, 利用式(9), 确定该温度检测系统的期望测温区间的边界参数  $T_L$  和  $T_H$ ;

**步骤 2** 利用式(1), 计算与期望测温区间的边界参数对应的 NTC 热敏电阻的阻值  $R_{TL}$  和  $R_{TH}$ ;

**步骤 3** 利用式(4), 计算惠斯通电桥分压电阻  $R_3$  的优化值;

**步骤 4** 利用式(6), 计算差分放大电路放大倍数  $K_p$  的优化值;

**步骤 5** 基于该温度检测系统, 对被测目标进行期望相对温度跟踪控制, 其中期望相对温度分别

设定为  $\Delta n$  和  $2^N$ , 且  $\Delta n$  选定准则为  $> 2\% * 2^N$  的最小整数. 并确保两次跟踪控制结果, 即 A/D 输出的稳态值, 到边界的距离在  $1\% * 2^N$  以内;

**步骤 6** 利用精密温度传感器和该温度检测系统, 分别记录温度控制器稳态时的实际温度和 A/D 输出数据. 其中精密温度传感器的精度应高于该温度检测系统的期望设计精度一个数量级;

**步骤 7** 利用均值滤波处理方式记录数据, 获取参数对  $\bar{T}_D$  与  $\bar{x}_D$  和  $\bar{T}_U$  与  $\bar{x}_U$ ;

**步骤 8** 判断  $[T_{WD}, T_{WU}]$  是否包含于  $[\bar{T}_D, \bar{T}_U]$ , 如果是, 则结束; 否则, 执行步骤 9;

**步骤 9** 利用式(8), 反向求取  $\bar{x}_D$  和  $\bar{x}_U$  对应的 NTC 热敏电阻的阻值  $R_D$  和  $R_U$ ;

**步骤 10** 将参数对  $\bar{T}_D$  与  $R_D$  的值赋给  $T_0$  与  $R_0$ , 同时将参数对  $\bar{T}_U$  与  $R_U$  代入式(1), 修订 NTC 热敏电阻的  $B$  值, 然后返回步骤 2.

## 2 基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法

为了提高基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统的测温精度, 通常采取水槽恒温箱和万用表检测相结合的方式获取原始阻-温数据, 而后采取 Steinhart-Hart 或 Hoge 等公式进行拟合标定. 虽然这种标定能够提高 NTC 热敏电阻的阻-温模型精度, 但是却忽略了实际应用时信号采集处理电路的参数偏差对温度测量精度的影响. 同时, 受水的沸点温度影响, 上述方式无法获取高于此温度的 NTC 热敏电阻的阻-温数据.

因此, 针对被测目标正常工作温度高且加热功率可控的场合, 如熔融沉积制造的打印头, 提出一种基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法, 如图 3 所示.

首先, 配置高精度温度传感器, 将其布置在 NTC 热敏电阻附近, 并用高导热系数的绝缘导热硅脂填充两者之间以及与被测目标之间的空气隙, 提高热传导性能;

然后, 利用被测目标的自加热功能, 进行加热功率缓增或缓减开环控制, 完成其在期望温度范围内的温度场缓慢变化控制;

其次, 同时记录高精度温度传感器测量数据和基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统采集的 A/D 数据, 而后提取一系列特定温度点对应的 A/D 值;

最后, 将多次测量提取的 A/D 值进行均值滤波处理, 而后采用最小二乘法进行多项式拟合标定.

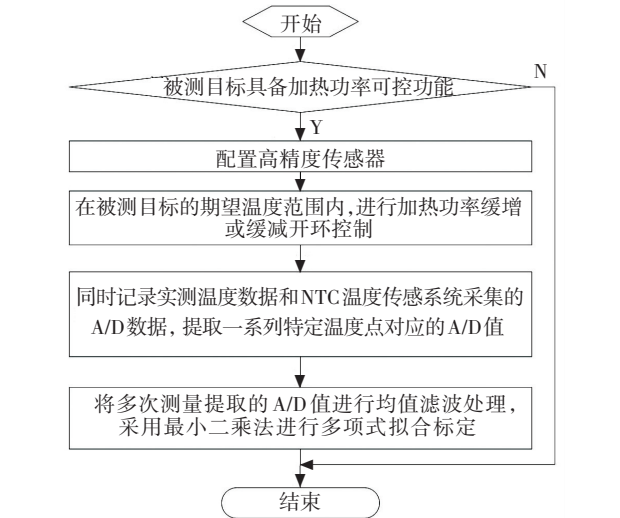


图 3 基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法  
Fig.3 Calibration method of temperature measurement system based on heating-power-slowly-change-control strategy

3 实验验证

由于熔融沉积制造的打印头具备加热功率可控特性,因此以打印头测温应用为背景验证本文所提基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统参数优化调整方法和标定方法的有效性.

3.1 基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统参数优化

对于熔融沉积制造而言,兼顾主流耗材 ABS 和 PLA 打印任务的喷嘴有效工作温度区间  $[T_{WD}, T_{WU}]$  为  $190\sim 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 当测温边界允许偏差  $\Delta T$  设置为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该温度检测系统的期望测温区间  $[T_L, T_H]$  为  $180\sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

选用的 NTC 热敏电阻的常规参数如表 1 所示,其中  $B$  和  $R_{T_0}$  的参数值精度为  $\pm 1\%$ .

表 1 NTC 热敏电阻常规参数

| Tab.1 Normal parameters of the NTC thermistor |              |                          |                   |                          |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| $T_0/\text{K}$                                | $B/\text{K}$ | $R_{T_0}/\text{k}\Omega$ | 最大功率/ $\text{mW}$ | 使用温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
| 298.15                                        | 3 950        | 100                      | 45                | $-40\sim 300$            |

高精度温度传感器采用 K 型热电偶,测量设备采用 Fluke 54 II,其测量精度为  $\pm(0.05\%+0.3\text{ }^{\circ}\text{C})$ . 基于上述设备的测量精度,通过式 (7) 可得, A/D 转换器的位数  $N$  应  $>10$ . 考虑到现有商品化 A/D 转换器的位数影响,选取 12 位 A/D 转换器.

NTC 热敏电阻信号采集处理电路参数  $V_{A1}$ 、 $V_{A2}$ 、 $R_1$  和  $R_2$  分别设置为  $3.3\text{ VA}$ 、 $3.3\text{ VA}$ 、 $1\text{ k}\Omega$  和  $1\text{ k}\Omega$ . 这里参数  $V_{A1}$  的设置应格外注意,确保 NTC 热敏电阻在实际使用过程中的功耗远小于其最大功率,降低自热影响.

利用本文所提的基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法,进行参数优

化. 由于跟踪精度对参数优化无影响,所以重点是确保 A/D 实际输出相对稳定(便于提取数据). 因此这里采用“常量前馈+P 控制器”,进行相对温度跟踪控制.

以首次参数优化过程为例,期望相对温度跟踪控制结果如图 4 所示:当期期望相对温度设置为  $82$  时,稳态后均值  $\bar{x}_D$  为  $22$ ,而实际温度均值  $\bar{T}_D$  为  $170.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;当期期望相对温度设置为  $4\ 096$  时,稳态后均值  $\bar{x}_U$  为  $4\ 067$ ,而实际温度均值  $\bar{T}_U$  为  $219.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 由于不满足条件  $[T_{WD}, T_{WU}] \subseteq [\bar{T}_D, \bar{T}_U]$ , 所以需要进行二次参数优化调整. 通过式 (8) 求取  $R_D$  和  $R_U$  分别为  $1\ 070.5\ \Omega$  和  $390.5\ \Omega$ ,进而可计算出 NTC 热敏电阻的高温  $B$  值修订结果约为  $4\ 450\text{ K}$ ,相比常温  $B$  值变化了约  $12.7\%$ .

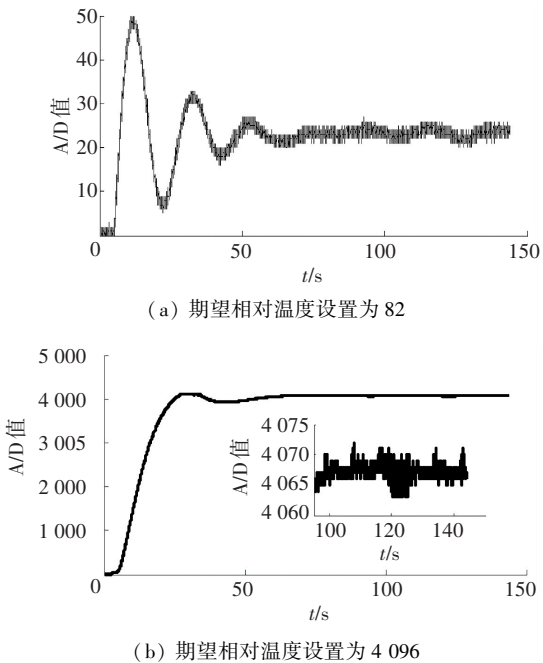


图 4 在首次参数优化过程中,期望相对温度跟踪控制结果  
Fig.4 The desired relative temperature tracking result in parameter optimization process at the first time

信号采集处理电路的参数优化结果如表 2 所示,通过两次优化循环便满足了设计指标,因此无需进行再优化.

表 2 信号采集电路参数优化结果

| 优化循环次数 | $R_3/\Omega$ | $K_p$ | $[\bar{T}_D, \bar{T}_U]/^{\circ}\text{C}$ | $[T_{WD}, T_{WU}] \subseteq$ |
|--------|--------------|-------|-------------------------------------------|------------------------------|
|        |              |       |                                           | $[\bar{T}_D, \bar{T}_U]$     |
| 1      | 646          | 4.01  | $[170.2, 219.8]$                          | 不满足                          |
| 2      | 485          | 3.57  | $[185.4, 234.3]$                          | 满足                           |

3.2 基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统标定  
虽然采用相对温度跟踪控制方法能够实现 A/D 数据稳态输出,但涉及到“常量前馈+P 控制器”的

控制参数调整,导致利用这种方式获取原始标定用数据的效率低下. 为了提高获取原始数据的效率,利用本文所提标定方法,采用加热功率缓减开环控制策略,获取原始 A/D 数据,同时记录实测温度数据. 实施过程如下:

首先,依据 3.1 节期望相对温度跟踪控制实验,确定大致初始加热功率的常量值范围;然后,通过缓增的方式,确定最大 A/D 输出所对应的加热功率最小值;其次,以该值进行加热控制,保持大约 5 min;最后,以每 400 s 降低一个加热功率单位值的方式,进行加热功率缓减开环控制,并记录相关数据.

以其中的一个降加热功率区段实验结果(图 5 所示)为例进行分析,可知实际温度的缓降速率 $<0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,且 A/D 值与实际温度值变化趋势一致,便于后续提取与特定温度点对应的 A/D 值,表明了加热功率缓减开环控制策略的有效性.

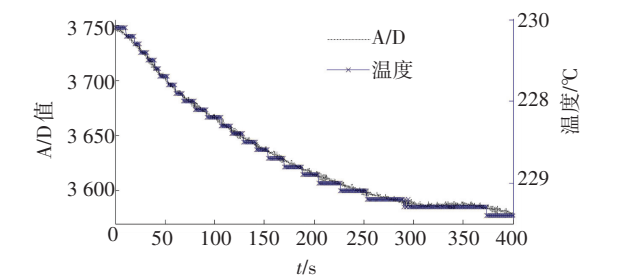


图 5 在加热功率缓减过程中,某个区段的实验结果  
Fig.5 A section of the experimental results in the course of heating power slowly declined

通过对多次测量提取的 A/D 值进行均值滤波处理,获取标定用离散数据,如表 3 所示.

表 3 标定用离散数据

Tab.3 Discrete data for calibration

| 序号 | 实际温度/ $^{\circ}\text{C}$ | A/D 均值 | 序号 | 实际温度/ $^{\circ}\text{C}$ | A/D 均值 |
|----|--------------------------|--------|----|--------------------------|--------|
| 1  | 233.3                    | 3 957  | 22 | 212.3                    | 2 409  |
| 2  | 232.3                    | 3 901  | 23 | 211.3                    | 2 332  |
| 3  | 231.3                    | 3 814  | 24 | 210.3                    | 2 246  |
| 4  | 230.3                    | 3 754  | 25 | 209.3                    | 2 168  |
| 5  | 229.3                    | 3 676  | 26 | 208.3                    | 2 089  |
| 6  | 228.3                    | 3 602  | 27 | 207.3                    | 2 005  |
| 7  | 227.3                    | 3 545  | 28 | 206.3                    | 1 924  |
| 8  | 226.3                    | 3 462  | 29 | 205.3                    | 1 851  |
| 9  | 225.3                    | 3 390  | 30 | 204.3                    | 1 759  |
| 10 | 224.3                    | 3 318  | 31 | 203.3                    | 1 670  |
| 11 | 223.3                    | 3 242  | 32 | 202.3                    | 1 598  |
| 12 | 222.3                    | 3 177  | 33 | 201.3                    | 1 509  |
| 13 | 221.3                    | 3 091  | 34 | 200.3                    | 1 431  |
| 14 | 220.3                    | 3 016  | 35 | 198.3                    | 1 261  |
| 15 | 219.3                    | 2 944  | 36 | 196.3                    | 1 101  |
| 16 | 218.3                    | 2 864  | 37 | 194.3                    | 938    |
| 17 | 217.3                    | 2 803  | 38 | 192.3                    | 766    |
| 18 | 216.2                    | 2 695  | 39 | 190.3                    | 595    |
| 19 | 215.3                    | 2 639  | 40 | 188.3                    | 431    |
| 20 | 214.3                    | 2 547  | 41 | 186.3                    | 277    |
| 21 | 213.3                    | 2 483  | 42 | 184.3                    | 104    |

利用最小二乘法进行多项式拟合标定,拟合结果如表 4 所示. 通过分析可知:相比一次和二次多项式拟合,三次多项式拟合的和方差、均方差显著下降,同时确定系数得到提升;相比四次多项式拟合,三次多项式拟合的性能参数变化不大. 因此这里采用三次多项式拟合,完成基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统标定. 标定结果如图 6 所示,其中三次多项式的系数,按照幂指数由高到低排序分别为  $8.246\text{e-}11$ 、 $-1.913\text{e-}7$ 、 $1.216\text{e-}2$  和 183,且拟合剩余误差的绝对值 $<0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

表 4 基于最小二乘法的多项式拟合结果

Tab.4 Polynomial fitting results based on the least square method

| 多项式次数 | 和方差 SSE | 均方根 RMSE | 确定系数 R-square |
|-------|---------|----------|---------------|
| 1     | 7.356 0 | 0.423 60 | 0.999 1       |
| 2     | 0.642 9 | 0.126 80 | 0.999 9       |
| 3     | 0.234 9 | 0.077 61 | 1.000 0       |
| 4     | 0.227 8 | 0.077 43 | 1.000 0       |

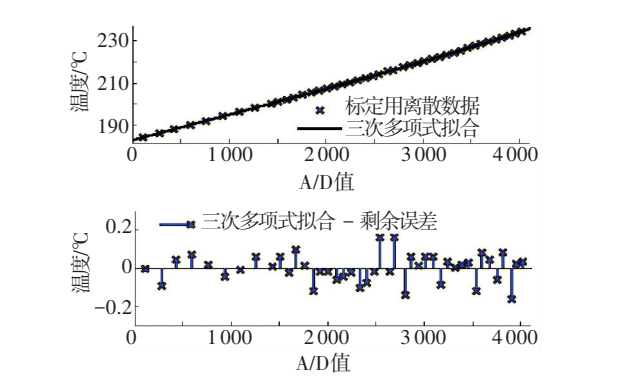


图 6 基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统标定结果

Fig.6 Calibration result of the temperature measuring system based on NTC thermistor

通过综合分析可知,实验结果充分验证了本文所提基于 NTC 热敏电阻的温度检测系统参数优化调整方法及基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法的有效性.

4 结 论

1)本文提出的基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法,有效解决了因热敏指数变化而导致的实际温度检测区间与设计不符的问题,为面向特定高温温度区段的温度检测系统性能优化提供了保障.

2)提出的基于加热功率缓变控制策略的温度检测系统标定方法,在无法应用传统水槽恒温箱法进行温度标定的场合具有显著优势. 上述方法在熔融沉积成型平台上得以成功应用,实验结果表明了

所提优化设计及标定方法是有效的.

参考文献

[1] PALLÁS-ARENY R, WEBSTER J G. Sensors and signal conditioning [M]. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000: 94-109.

[2] 陈飞, 周彬, 秦志春. 负温度系数热敏电阻用于半导体桥火工品射频防护的研究 [J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(1): 171-175. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2012.01.005.

CHEN Fei, ZHOU Bin, QIN Zhichun. Application of NTC thermistors in radio frequency protection of semiconductor bridge initiators [J]. Journal of Nanjing University of Science & Technology, 2012, 36(1): 171-175. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2012.01.005.

[3] KAMAT R K, NAIK G M. Thermistors-in search of new applications, manufacturers cultivate advanced NTC techniques [J]. Sensor Review, 2002, 22 (4): 334 - 340. DOI: 10.1108/02602280210444654.

[4] 范家成. 热敏电阻器市场现状 [J]. 电子元件与材料, 1997, 16(2): 1-5. DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.1997.02.001.

FAN Jiacheng. Present situation of thermistor market in China [J]. Electronic Components and Materials, 1997, 16(2): 1-5. DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.1997.02.001.

[5] 王永秋, 王庆国. 电动客车动力电池温度测量电路及仿真 [J]. 客车技术与研究, 2010 (4): 37-38. DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2010.04.009.

WANG Yongqiu, WANG Qingguo. Temperature measurement circuit and simulation of electric vehicle power battery [J]. Bus Technology and Research, 2010 (4): 37-38. DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2010.04.009.

[6] 孙庆龙. NTC 热敏电阻温度特性研究 [J]. 大学物理实验, 2013 (4): 16-17+26. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2013.04.011.

SUN Qinglong. Study on temperature characteristics of NTC thermistor [J]. Physical Experiment of College, 2013 (4): 16-17+26. DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2013.04.011.

[7] HAFSA M N, IBRAHIM M, WAHAB M S, et al. Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material [C]//Applied Mechanics and Materials. Zurich: Trans Tech Publication Ltd, 2014: 55-59. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.55.

[8] 刘孟林. 温度对熔融沉积成型表面质量影响的研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.

LIU Menglin. Study on the effect of temperature on the surface quality of fused deposition modeling [D]. Shenyang: Shenyang University of Architecture, 2012.

[9] DENG Yelin, GAO Shijie, CHEN Ailu, et al. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction [J]. Building and Environment, 2016, 104: 311-319. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.05.021.

[10] HOGE H J. Useful procedure in least squares, and tests of some equations for thermistors [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(6): 975-979. DOI: 10.1063/1.1141091.

[11] STEINHART J S, HART S R. Calibration curves for thermistors [J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1968, 15(4): 497-503. DOI: 10.1016/0011-7471(68)90057-0.

[12] CHEN C. Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors [J]. Measurement, 2009, 42(7): 1103-1111. DOI: 10.1016/j.measurement.2009.04.004.

[13] ILIC D, BUTORAC J, FERKOVIC L. Temperature measurements by means of NTC resistors and a two-parameter approximation curve [J]. Measurement, 2008, 41(3): 294-299. DOI: 10.1016/j.measurement.2006.11.007.

[14] YU Cong, ZHOU Wangchao, SUN Bin, et al. Study on NTC thermistor characteristic curve fitting methods [C]// Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, ICCSNT 2011. Washington DC: IEEE Computer Society, 2011: 2209-2213. DOI: 10.1109/ICCSNT.2011.6182415.

[15] MAWIRE A. A simple experiment to determine the characteristics of an NTC thermistor for low-temperature measurement applications [J]. European Journal of Physics, 2012, 33(5): 1135-1145. DOI: 10.1088/0143-0807/33/5/1135.

[16] 范寒柏, 谢汉华. 基于 NTC 热敏电阻的三种高精度测温系统研究 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1576-1579. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.012.

FAN Hanbai, XIE Hanhua. Study with high precision on three typical temperature measurement based on NTC thermistor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(11): 1576-1579. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.012.

(编辑 杨 波)