

# 红外测温传感器预热模型及积分分离控制算法

赵舜楠<sup>1</sup>, 童耀南<sup>1,2</sup>, 陈松<sup>1</sup>, 陈振光<sup>3</sup>

- (1. 湖南理工学院 信息科学与工程学院, 湖南 岳阳 414006;
2. 信息光子学与空间光通信湖南省重点实验室, 湖南 岳阳 414006;
3. 东莞市振海电子科技有限公司, 广东 东莞 523430)

**摘要:** 非接触式医用红外测温仪在低温环境下工作时, 易受到外界热传导影响, 甚至产生热冲击现象。为解决此问题, 提出一种红外传感器内部环境温度预热系统及控制方法。在红外传感器金属外壳上粘贴加热材料, 并建立红外传感器预热模型。使用 PID 算法使传感器内部环境温度快速稳定在设定的目标值。仿真实验结果表明, 积分分离式 PID 控制算法优于传统 PID 控制算法, 能在更短的时间内稳定控制温度, 可有效克服热冲击影响。

**关键词:** 红外测温; 热冲击; 温度控制系统; 积分分离式 PID

中图分类号: TH77

文献标识码: A

文章编号: 1672-5298(2022)02-0023-06

## Infrared Temperature Sensor Preheating Model and Integral Separation Control Algorithm

ZHAO Shunnan<sup>1</sup>, TONG Yaonan<sup>1,2</sup>, CHEN Song<sup>1</sup>, CHEN Zhengguang<sup>3</sup>

- (1. School of Information Science and Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China;
2. Key Laboratory of Hunan Province on Information Photonics and Freespace Optical Communications, Yueyang 414006, China;
3. Dongguan City Zhenhai Electronic Technology Co., Ltd, Dongguan 523430, China)

**Abstract:** When the non-contact medical infrared thermometer is used in low temperature environment, it is easy to be affected by the external heat conduction, which may further cause thermal shock phenomenon. In order to solve this problem, a preheating system and control method for warming-up the internal environment temperature of infrared sensor were proposed. The preheating material was pasted on the metal shell of the infrared sensor, and the preheating model of the infrared sensor was established. The PID algorithm was used to make the internal environment temperature of the sensor quickly stabilize at the set target value. The simulation results show that the integral separation PID algorithm is superior to the traditional PID algorithm, and can stabilize the temperature in a shorter time, so it can effectively overcome the influence of thermal shock.

**Key words:** infrared temperature measurement; thermal shock; temperature control system; integral separation PID

## 0 引言

近年来, 随着大规模发热性传染疾病在全球范围内不断爆发, 能快速、精准测量体温的非接触医用红外测温仪被广泛应用。虽然红外测温仪在常温工作环境下的测量精度可媲美水银体温计, 但是当其内部温度和工作环境温度不平衡时, 就会形成热交换, 温差过大时甚至产生热冲击, 影响测量精度, 在极为特别的情况下导致无法正常工作。尤其是当红外耳温计从低温环境插入高温耳道时, 热冲击现象不可避免。

为了减少工作环境温度对传感器的影响, 通常采用温度补偿的方法<sup>[1]</sup>。Shen<sup>[2]</sup>等提出一种新的双模调制红外温度测量方法, 该方法基于由运算放大器 AD8551 和 P 沟道 MOSFET 组成的开关电路, 通过硬件实现温度补偿。也有用软件算法实现温度补偿的方法, 任焜<sup>[3]</sup>等将红外传感器输出特性各阶系数进行一维变量标定, 再采取二次多项式进行拟合, 实现温度补偿。吕鸣晨<sup>[4]</sup>等采用遗传算法对 BP 神经网络进行优化, 对传感器输入与输出之间关系进行训练, 并得到更好的 BP 网络初始权值和阈值, 完成温度补偿。虽然上述温度补偿方法在传感器内部温度和工作环境温度偏差较小时能让红外测温仪的精度提高, 但在温

收稿日期: 2021-04-13

**基金项目:** 湖南省科技计划项目(2017SK2164, 2019TP1014); 湖南省普通高校教学改革研究项目(湘教通[2019]291 号); 湖南理工学院科研创新团队项目(2019-TD-10); 东莞市振海电子科技有限公司产学研合作项目(JSHT-L-2020-064)

**作者简介:** 赵舜楠, 男, 硕士研究生。主要研究方向: 嵌入式系统与物联网技术

**通信作者:** 童耀南, 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 信号处理与物联网技术等

差偏大的情况下, 红外测温仪仍无法进行准确测量, 通常需要在工作环境下放置 30 分钟以上, 温差基本平衡后才能正常工作. 本文提出一种硬件和软件相结合的混合式红外热冲击补偿方法. 通过在红外传感器外壳上封装加热材料, 并运用积分分离式 PID 算法进行控制, 使得传感器内部温度快速稳定在设定值. 通过此方法可以极大减少平衡温差的时间, 让红外测温仪在低温环境下也能快速准确地进行测量.

## 1 红外测温原理及环境温度影响

### 1.1 红外测温原理

非接触式红外测温仪主要采用热电堆红外传感器, 直接感应人体热辐射. 根据黑体辐射理论, 物体的辐射能量为

$$M(T_{\text{obj}}) = \sigma \varepsilon T_{\text{obj}}^4, \quad (1)$$

其中  $M$  为物体的辐射能量,  $\sigma$  为斯蒂芬—玻尔兹曼常数,  $\varepsilon$  为物体表面的发射率,  $T_{\text{obj}}$  为物体的温度. 热电堆红外传感器的测温原理基本满足式(1), 但物体散发的辐射能量不仅包括自身热量, 还包括空气中的工作环境温度  $T_{\text{amb}}$  的能量. 基于此原理, 热电堆红外传感器通过热端探测物体辐射能量, 冷端检测传感器内部环境温度, 结合两者之差得到输出电压信号  $U$ . 故热电堆红外传感器的输出特性公式为

$$U = K\varepsilon(T_{\text{obj}}^{4-\vartheta} - T_{\text{amb}}^{4-\vartheta}), \quad (2)$$

其中  $K$  为红外传感器总因子,  $\vartheta$  为待定因子, 表明红外传感器不是特定的函数曲线. 图 1 为红外传感器电压输出特性曲线, 由图 1 可知, 红外传感器在不同的工作环境温度下对应不同的输出电压和物体温度曲线, 当温差较小时可以看作是一次曲线, 在温差较大时可看作是高次曲线.

### 1.2 环境温度影响引起的热冲击现象

工作环境温度是影响红外测温仪精确性的主要因素之一. 根据式(2)可知, 当工作环境温度和红外传感器内部环境温度存在温差时会形成热交换, 大量的热交换将导致热冲击的产生, 影响冷端对环境温度的测量并导致无法准确测量物体温度. 例如在低温环境下使用红外耳温计测量鼓膜温度时, 耳温计通常无法正常工作.

可以通过热电偶的阶跃温度响应来分析热冲击对热电堆的影响<sup>[5]</sup>, 其公式为

$$T - T_0 = (T_e - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3)$$

其中  $T$  为热电偶的指示温度,  $T_0$  为热接触点的初始温度(未工作时和冷端温度一致),  $T_e$  为阶跃温度(热端温度),  $\tau$  为热电偶的时间常数. 通常热电偶的阶跃温度响应曲线如图 2 所示. 热电堆是由多个热电偶串联形成, 所以热电堆的热冲击响应特性类似于热电偶的阶跃温度响应. 当热电堆的热接触点初始温度  $T_0$  远低于目标温度  $T_e$  时, 热电堆的响应时间会更长, 也就是说红外测温仪需要花费更长的时间才能准确测量人体实际体温.

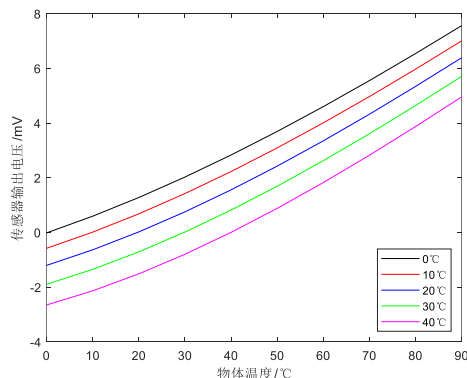


图 1 红外传感器电压输出特性

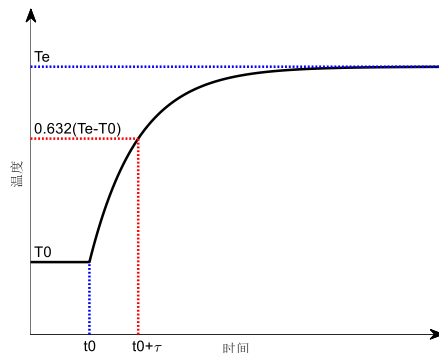
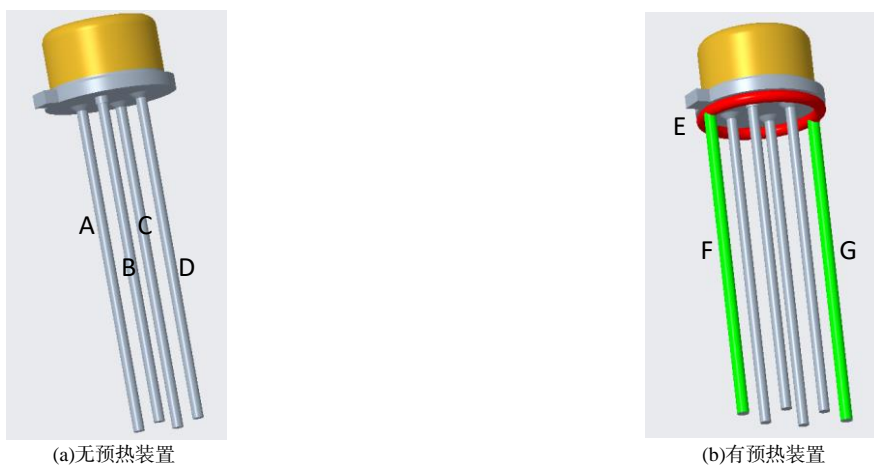


图 2 热电偶的阶跃温度响应曲线

## 2 红外传感器预热模型

### 2.1 预热工艺设计

红外传感器内部环境温度与工作环境温度偏差过大时, 需要花费较长时间平衡温差来减少热冲击对红外测温精度的影响, 这降低了红外测温仪的实用性. 为了解决此问题, 可在传感器外部封装加热材料, 如图3所示. 图3(a)为传统红外传感器模型, (b)为有预热装置的红外传感器模型. 将加热材料粘贴在红外传感器底座下方能够降低热损耗, 减少热传递时间. 然后通过PID控制算法对预热系统进行控制, 将红外传感器内部环境温度快速升高并稳定在设定值, 缩短内部温度平衡时间, 实现在温差过大的情况下也能准确测量物体温度, 例如在低温环境下快速精确测量耳温.



(A)地极; (B)热电堆正极; (C)热电堆负极; (D)NTC 热敏电阻正极 (E)预热装置; (F)预热装置负极; (G)预热装置正极

图3 热电堆红外传感器模型工艺

### 2.2 预热模型构建

由图3可知, 红外传感器预热系统主要由红外传感器和预热装置两个模块组成. 预热装置传递给整个预热控制系统的能量可分为两部分, 一部分被红外传感器内部吸收, 提高了其内部环境温度, 另一部分被红外传感器的封装外壳所散发. 设红外传感器获得的总能量是 $W$ ,  $W_1$ 是红外传感器内部所获得的能量,  $W_2$ 是红外传感器封装外壳散发的能量. 根据能量守恒定律可推导出以下公式<sup>[6]</sup>

$$W = W_1 + W_2 = C_1 \frac{dT_1}{dt} + k_1 T_1, \quad (4)$$

其中 $C_1$ 为空气的比热容,  $T_1$ 为红外传感器内部温度,  $k_1$ 为红外传感器封装外壳的散热系数. 对式(4)进行拉氏变换并移相可求得

$$G_1(s) = \frac{T_1(s)}{W(s)} = \frac{1}{C_1 s + k_1}. \quad (5)$$

由于预热系统是一个复杂过程, 所以在式(5)中添加滞后环节, 得到预热模型

$$G_1(s) = \frac{T_1(s)}{W(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (6)$$

其中 $K$ 为系统的静态增益系数,  $T$ 为系统的时间常数,  $\tau$ 为系统的时间滞后常数. 实验表明, 取 $T = 60$ ,  $K = 1$ ,  $\tau = 80$ 时, 模型仿真结果与实际情况比较一致.

## 3 预热系统控制器设计

### 3.1 传统PID算法

传统PID控制的模拟输出微分方程为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]. \quad (7)$$

由于 CPU 控制是一种采样控制, 故需要对式(7)进行离散化处理, 表达式为

$$u(k) = K_p \left( e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)), \quad (8)$$

其中  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数,  $T$  为采样周期, 这些系数都可以根据实际情况调控;  $k$  为采样序列 ( $k=1, 2, 3, \dots$ ),  $e(k-1)$  和  $e(k)$  分别是在第  $k-1$  和  $k$  采样时刻的误差信号. 虽然传统 PID 算法具有计算简单和误差敏感度较低等优点而被广泛应用, 但会出现积分累积, 产生过大超调量、振荡剧烈和迟滞性等现象. 为了避免此缺点, 本文使用积分分离式 PID 算法来设计预热控制器.

### 3.2 积分分离式 PID 控制算法

PID 算法引入积分是为了消除系统静差, 但容易引起积分的累积. 积分分离式 PID 控制算法<sup>[7]</sup>是一种在数字 PID 算法的基础上增加积分控制环节的改进算法. 设置一个阈值, 当系统的反馈值与设定值的偏差量大于该阈值时, 只进行 PD 控制, 消除积分控制对系统稳定性的影响, 避免超调量增大; 当偏差量小于阈值时, 加入积分控制, 以消除系统静差. 其原理如下:

- (1) 设置一个阈值  $\varepsilon > 0$ .
- (2) 在积分项前乘上一个值  $\beta$ .
- (3) 若  $|e(k)| > \varepsilon$ , 则  $\beta = 0$ .
- (4) 若  $|e(k)| \leq \varepsilon$ , 则  $\beta = 1$ .

积分分离式 PID 算法的数学关系式为

$$u(k) = K_p e(k) + \beta K_i \sum_{j=0}^k e(j)T + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}. \quad (9)$$

根据积分分离式 PID 算法, 红外传感器预热控制系统的控制策略描述如下:

- (1) 红外传感器中的冷端用于检测内部实际环境温度, 该温度由 ADC 转换为数字信号并存储在 MCU 存储器中.
- (2) 通过收集的实际环境温度与设置的目标环境温度进行比较来获得当前温度偏差.
- (3) 依据环境温度的偏差, 采用积分分离式 PID 算法输出具有相应占空比的 PWM 调节信号. 然后通过 PWM 信号控制加热功率, 使传感器内部环境温度快速升高并稳定在设定值.
- (4) 对于红外耳温计, 将加热目标温度设置为接近耳道实际环境温度.
- (5) 如果实际环境温度高于设定温度, 则停止加热.

积分分离式 PID 算法的控制原理图和程序设计流程图分别如图 4 和图 5 所示.

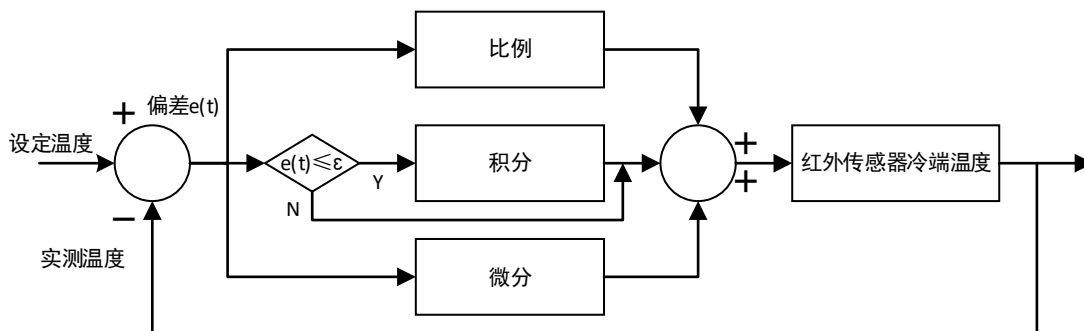


图 4 数字式积分分离式 PID 算法控制原理

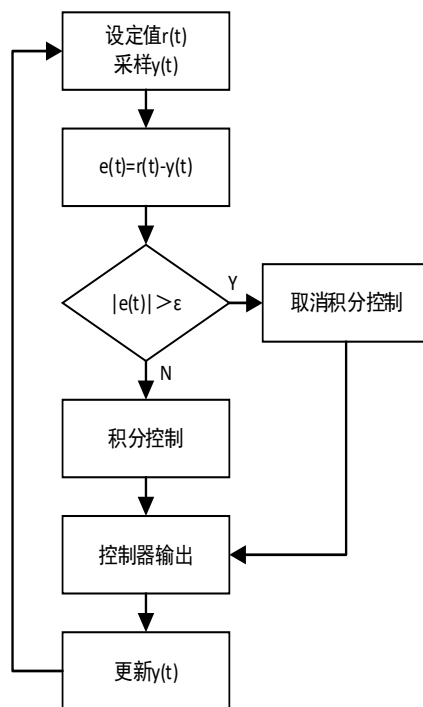


图 5 积分分离式 PID 控制算法流程

#### 4 预热模型仿真结果及分析

根据式(8), 在 MATLAB 软件中的 Simulink 模块上建立仿真模型, 如图 6 所示。

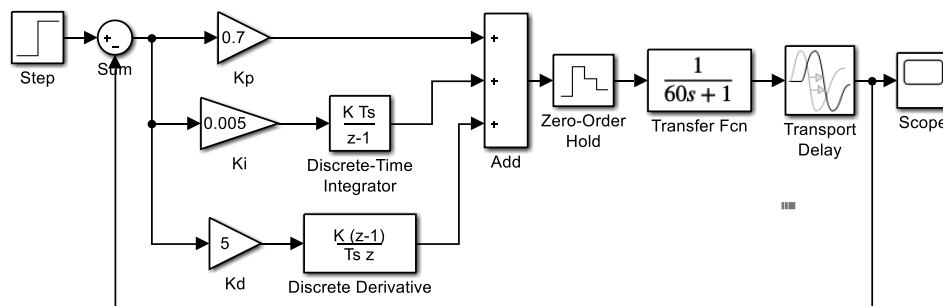


图 6 传统 PID 算法仿真控制模型

通过试凑法得到  $K_p = 0.8$ ,  $K_i = 0.005$ ,  $K_d = 3$ ,  $T = 0.02$ , 分别在红外传感器内部环境温度为  $5^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$  情况下进行仿真实验, 结果如图 7 所示。

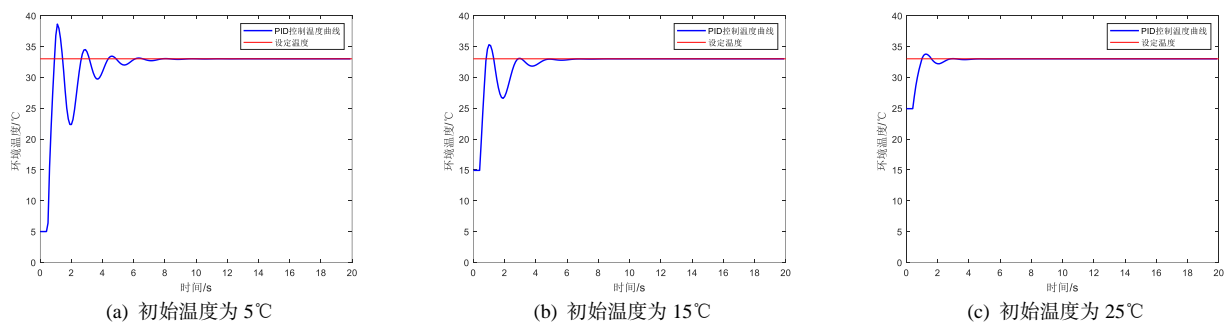


图 7 传统 PID 算法在不同初始温度下的环境温度响应曲线

从图 7 可以看出, 传统 PID 控制算法在传感器内部环境温度和设定温度偏差过大时, 系统产生的超调

量较大, 振荡剧烈且调节时间较长, 需要在 6 s 后才能稳定下来. 随着温度偏差的进一步减小, 传统 PID 算法的温度控制时间就变短. 由于传统 PID 算法无法满足需求, 因此采用积分分离式 PID 算法, 根据式(9)建立仿真模型如图 8 所示, 仿真实验结果如图 9 所示.

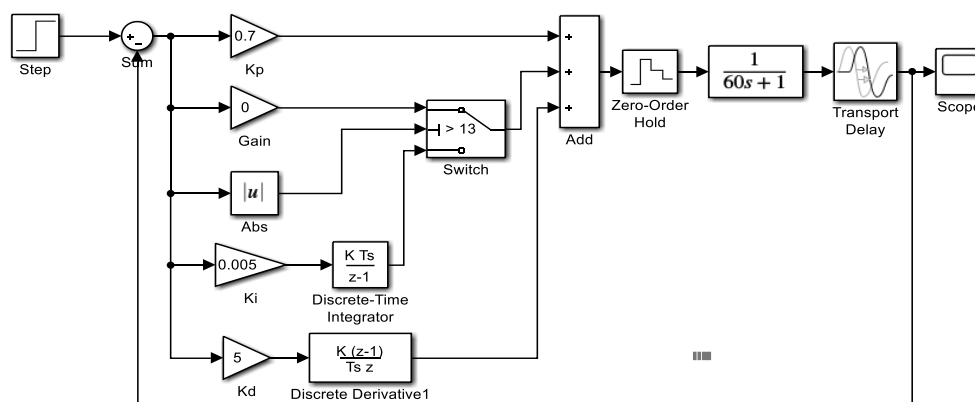


图 8 积分分离式 PID 仿真控制模型

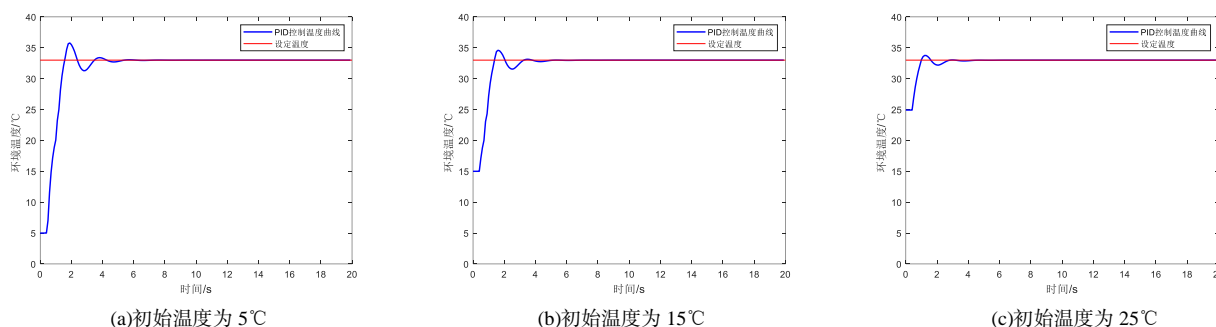


图 9 积分分离式 PID 算法在不同初始温度下的环境温度响应曲线

通过图 9 可以看出, 积分分离式 PID 算法有效解决了在温度偏差过大时因积分累积所产生的系统超调及振荡问题, 系统可在 3 s 左右将传感器内部的环境温度稳定下来, 比传统 PID 控制时间缩短了一半, 所以在低温环境下测量耳道鼓膜温度时, 积分分离式 PID 算法对红外传感器内部环境温度预热的控制效果比传统 PID 控制更好.

## 5 总结

为克服热冲击对红外测温的影响, 研究和设计了基于积分分离式 PID 算法的预热系统, 构建了预热模型. 仿真实验结果表明, 采用本文方法能实现在不同初始环境温度下使红外传感器内部环境温度快速稳定在设定值的功能, 积分分离式 PID 控制算法优于传统 PID 算法, 能有效减小系统的超调量和振荡频率, 大幅度缩减系统预热稳定时间. 本文方法可用于提高红外测温设备的低温环境适应性能.

## 参考文献:

- [1] 李 琼, 赵钰虎, 饶文昊. 疫情期间红外测温枪检测的基础理论和实验研究[J]. 华北科技学院学报, 2020, 17(4): 67~73
- [2] Shen C, Chen S, Guo Y. A novel infrared temperature measurement with dual mode modulation of thermopile sensor[J]. Sensors, 2019, 19(2): 336.1~336.10
- [3] 任 焜, 胡益民, 吴 坚, 等. 一种实用红外测温仪数字温度补偿方法[J]. 传感器技术, 2004, 23(12): 59~61
- [4] 吕鸣晨, 刘清倦, 孙 星, 等. 基于 GA-BP 神经网络温度补偿的红外温度传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019 (3): 19~22
- [5] 郝晓剑, 段向港, 曾清波, 等. 阶跃温度场在热电偶时间常数测试中的应用[J]. 中国科技论文, 2017, 12(11): 1285~1289
- [6] 余昌源. 电加热锅炉温度控制系统的设计及实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014
- [7] 于惠玲. 基于积分分离模糊 PID 的烧结温控系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(3): 70~74