

[温度控制]

基于红外温度测量的黑体炉温度控制系统分析

文/云南电网有限责任公司电力科学研究院 唐 标 李 博 王 恩 杨 明
云南电网有限责任公司红河供电局 刘 戡
云南电网有限责任公司楚雄供电局 施 旺

为解决黑体炉手动测温不准确等问题，提出了基于红外温度测量的黑体炉温度控制系统。首先分析了红外测温的原理，针对黑体热源辐射建立了数学模型。其次提出了黑体炉温度控制原理和流程，说明了自抗扰控制系统以及其在黑体炉温度控制中的改进。最后利用仿真系统说明了红外温度测量的影响因素以及自抗扰控制与PID控制方法的优势，验证了所提方法的有效性。

由于自然界中不存在绝对的黑体，黑体炉常用于近似模拟黑体人工辐射源。在黑体炉的设计和温度控制系统中，为保持黑体温度的均匀性，需要对黑体炉的温度进行控制。现阶段将自动控制理论引入黑体炉控制，能够解决手动控制带来的不确定性。为提升控制准确度，本文对黑体炉温度控制和测量系统进行研究，提出基于红外测温 and 自抗扰控制的系统。

目前对黑体炉温度控制的研究主要集中在控制方法上，唐璐等分析了基于非定常模型的黑体炉模糊PID控制。赵萍等提出了基于模糊理论的黑体炉系统故障诊断方法，并建立了基于神经网络的黑体炉温度时序预测模型。

针对自抗扰控制在温度控制中的应用，辛瑞昊等设计了基于自抗扰控制器的电锅炉温度控制系统。徐新乐等提出了基于线性降阶自抗扰技术的推杆炉温度控制。文定都研究了ADRC串级控制在电加热炉温度控制中的应用。陶荣等提出了电动机温度时滞耦合系统自抗扰控制仿真。廖金权设计了电动机温度时滞耦合系统自抗扰控制仿真系统。

上述研究中，对黑体炉的温度控制系统的研究较少，而针对自抗扰控制的研究较多。因此，本文提出将自抗扰控制应用于黑体炉温度控制中，并对温度控制系统进行设计。

为此，本文首先针对黑体热源辐射建立了数学模型。其次提出了黑体炉温度控制原理和流程，说明了自抗扰控制系统以及其在黑体炉温度控制中的改进。最后利用仿真系统说明了红外温度测量的影响因素以及自抗扰控制与PID控制方法的优势，验证了本文所提方法的有效性。

红外测温原理

所有表面温度高于绝对零度的物体均持续向外辐射红外线，因此，物体表面温度以及红外线热辐射之间存在固有关系。下式给出了在某些具体条件下红外测温的主要原理。

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_0} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \varepsilon_0) T_u^n - \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) T_a^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中， T_0 、 T_r 、 T_u 和 T_a 分别为测量温度、辐射温度、环境温度及大气温度； ε_0 为测量物体的辐射率； τ_a

基金项目：云南电网变电站巡检机器人主站管理平台运维及实用化推广（项目编号：056200MS62200006）。

为大气透过率。

红外温度量测误差计算式如下

$$\frac{dT_0}{T_0} = \frac{1}{n\varepsilon_0 T_0^n} \left\{ \left[\varepsilon_0 (T_0^n - T_u^n) \right] \frac{d\varepsilon_0}{\varepsilon_0} - n(1-\varepsilon_0) T_u^n \frac{dT_u}{T_u} - \left[\varepsilon_0 T_0^n + (1-\varepsilon_0) T_u^n - T_a^n \right] \frac{dT_a}{T_a} - \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) n T_a^n \frac{dT_a}{T_a} + \frac{n}{\tau_a} T_r^n \frac{dT_r}{T_r} \right\} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,测量误差与 T_0 、 T_r 、 T_u 、 T_a 、 ε_0 和 τ_a 均有关。

黑体热源建模

黑体热辐射源是一种具有一定热容量的物体。当系统充电时,发热元件的温度逐渐升高。但黑体的温度不能够立即上升到设定值,这是由于黑体的惯性导致的。通过热传导和热辐射的方式,黑体的温度逐渐升高。考虑到热辐射的原因,在能量的交换和输出响应过程中有一定延时。

另外,当对温度进行测量时,信号传输也有一定延时。因此,可以将黑体视为具有一阶惯性时延的控制物体。

假设黑体热源输入为 Q_i ,散逸热为其输出 Q_o ,传感器量测的实际温度为 T_s ,黑体会吸收输入和输出之间的热量差,其数学模型为

$$Q_i - Q_o = \frac{dQ_m}{dt} = cm \frac{dT_s}{dt} \quad (3)$$

式中, c 为金属热容; m 为质量; dT_s 为温度的变化率。

当黑体被加热时,输出功率等于 Q_i ,表达式为

$$Q_i = P = k_1 i \quad (4)$$

式中, k_1 为转换系数; i 为系统输入电流。

本文仅考虑黑体与空气之间的热交换,则输出为

$$Q_o = qA = hA(T_b - T_c) \quad (5)$$

式中, T_b 为黑体温度; T_c 为环境温度; h 为空气热交换系数; q 为热流密度; A 为黑体的总表面积。

将式(5)改写为

$$cm \frac{dT_s}{dt} + kT_c - D = k_1 i \quad (6)$$

式中, $k=hA$; $D=hAT_c$ 。

系统的控制变量为逆变器电流 i 和系统输出温度 T_s ,即 $u=i$, $y=T_s$ 。

对式(6)进行拉普拉斯变换,得到

$$cm \frac{dT_s}{dt} + kT_c(s) = k_1 u(s) \quad (7)$$

若环境温度为热稳定, $T_c=T_s=y$,则

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k_1}{C_s + k} \quad (8)$$

其中 $C=cm$ 为黑体热辐射热容。考虑到测量时延和黑体固有热惯性,计及 τ 为控制信号和测量值之间的延时,则

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (9)$$

式中, K 为开环增益; T 为惯性时间常数。

黑体炉温度控制原理

1. 控制原理

黑体的温度控制性能辐射源不取决于传感器和测量设备。利用普朗克定律得到测量数据,并将其传输至量测设备进行校准。

黑体辐射热源需要逐步加热,达到设定温度。该温度需要在黑体温度平衡过程中保持恒定。在稳态阶段,需要克服外部干扰,保持温度的恒定。

黑体辐射源由温度控制器进行控制,确定输入电压的幅值。利用铂热电阻对温度进行测量,并在温度传输至PC端时对温度进行实时监控。通过比较监测的实际温度和温度控制器的设定温度,实现对温度的控制和校准。通过温控电阻将信号发送至温度控制器,校准功率输出,保持温度在设定值附近。其具体流程如图1所示。

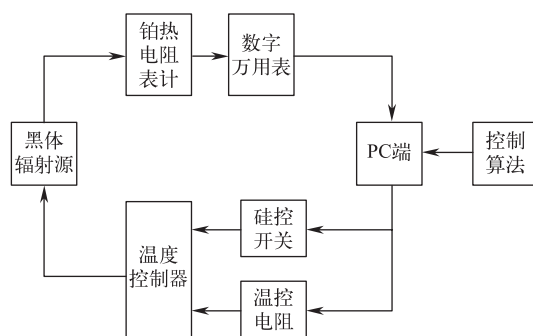


图1 温度控制流程

2. 自抗扰控制

自抗扰控制(ADRC)能够实现对不确定因素的估计和补偿,是一种由PID(比例积分微分)控制发展而来的技术,其结构如图2所示。

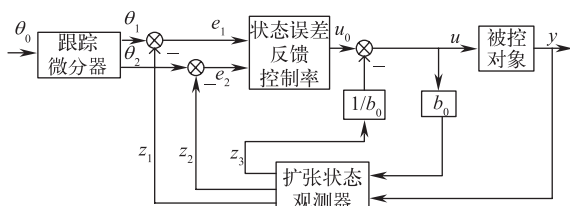


图2 ADRC控制结构

可以看出，ADRC主要由跟踪微分器（TD）、扩张状态观测器（ESO）和状态误差反馈控制率（SEF）三部分组成。其核心思想是根据被控对象输出 y 和控制量 u 的信息，以简单的积分串联型作为标准型，利用控制率对扰动进行补偿。

本文根据第2节的内容对ADRC进行改进，设计的黑体温度控制系统如图3所示。

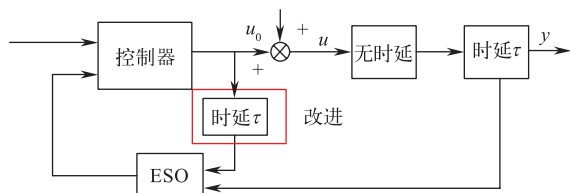


图3 黑体炉ADRC控制结构

本文考虑时延 τ 在ESO中的影响，得到稳定的控制结果。

仿真分析

本文利用所提的红外测温及ADRC温度控制原理对黑体进行仿真。温度改变量在 $-60\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。本文 K 取1.3， T 取70，时延 τ 为85。

1. 红外温度测量结果分析

设定温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大测量距离为6 m，得到红外温度测量与距离的关系如图4、图5所示。

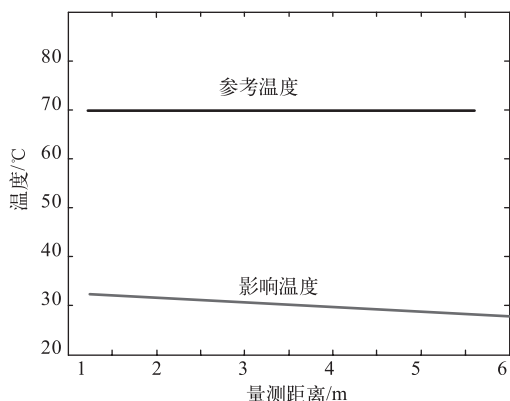


图4 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时距离对测量的影响

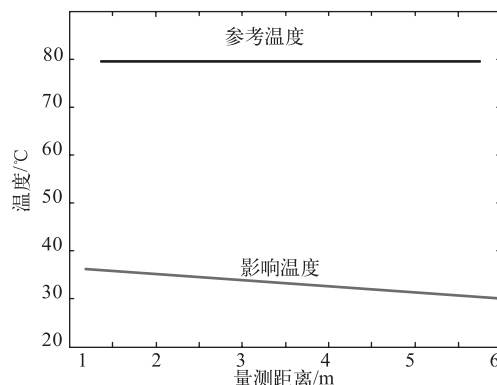


图5 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时距离对测量的影响

可以看出，随着距离的增加，黑体温度的测量值逐渐下降，其中温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的下降程度略低于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的情况。

2. ADRC控制仿真

本文考察阶跃响应下ADRC与PID方法的对比。输入扰动持续至820 s，ADRC在扰动82 s之后可以进行输出跟踪误差校准，而PID则需要96 s。ADRC与PID防跃响应对比如图6所示。

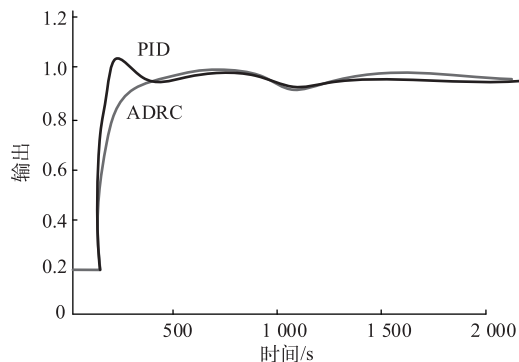


图6 阶跃响应对比

由图6可以看出，ADRC的控制性能优于PID，并且暂态稳定时间更短，稳定性更佳。

结束语

本文提出了一种红外温度测控以及黑体炉温度控制系统。通过仿真分析，说明了红外温度测量系统对于测量距离的灵敏度较高，随着温度的升高，测量距离对温度测量结果的影响逐渐减小。同时自抗扰控制相比传统比例积分微分控制的灵敏度更高，响应能力更好。说明ADRC的稳定平台的跟踪能力和扰动抑制能力得到了显著的提高。EA

(收稿日期：2021-06-17)