

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.04.027

基于 MATLAB 热处理温度非接触式 测量系统设计研究^①

龚 恒, 张建军, 陈 睿

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 在数字图像处理技术应用于温度非接触式测量原理研究的基础上, 建立目标物辐射图像灰度值有关物体温度和辐射波长的函数关系式. 基于 MATLAB 软件平台和热辐射原理和光学成像原理, 运用 GUI 编程设计了一套碳钢热处理温度非接触式测量系统, 实现对加热工件温度的非接触测量, 该系统可实时完成对目标物图像采集存储和处理, 并同时完成温度和误差计算, 实验表明, 该系统可实时测量高温工件温度, 动态响应好, 热惯性低, 抗干扰性和精度较高.

关键词: 非接触式; 温度测量; MATLAB; 实时

中图分类号: TP274+.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)04-0164-06

目前金属热处理主要使用热电偶系统来测量加热炉内温度^[1], 虽然热电偶价格便宜, 并且测量精度高, 但也有诸多缺点: ① 对测量仪器及感温元件在恶劣环境下的使用寿命及性能的稳定性提出了更高的要求; ② 被测物体或介质的温度场分布不均匀, 增加了温度测量的误差; ③ 动态响应性能较差, 测温惯性大; ④ 只能实现对加热介质某点温度测定, 无法得到感应加热、微波加热等加热工件的准确温度. 目前常见的非接触式测温仪器有光学高温计和红外热像仪等^[2], 但是测温范围有限、价格高, 同时相对恶劣的工业生产环境也会影响其测量精度. 因此, 热处理行业生产需研发一种可实时测定物体表面温度并且精度高的测温设备, 这对进一步提高加热效率、优化加热过程等具有重要意义.

近年来, 国内外诸多专家学者基于数字图像处理方法, 应用单色法、比色法^[5]对高温炉、高温熔体、流体、水泥回转窑等弥散介质的高温检测展开了研究^[3-4].

基于数字图像处理技术的非接触式测温技术是基于 CCD 图像传感器, 综合应用光电图像检测技术、数字图像处理技术和热辐射理论的一种新型测温方法. 该方法具备非接触式测量的所有优点, 即响应快、不破坏被测温度场、测温范围大等优点.

本文在数字图像处理技术应用于温度非接触式测量原理研究的基础上, 基于 MATLAB 软件平台, 运用 GUI 编程语言设计了一套测温系统, 该系统可实现对目标物图像的实时采集及存储、实时处理及温度测量, 同时进行误差分析.

1 非接触式测温原理

温度是物体分子热运动强弱程度的宏观体现, 分子热运动均随温度升高而加剧. 温度高于绝对零

① 收稿日期: 2014-05-07

基金项目: 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2011AC1016); 重庆市应用开发计划重点项目(CSTC, 2013yykfB70002); 国家自然科学基金(51201140).

作者简介: 龚 恒(1989-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要从事机电控制和数字信号处理方面的研究.

通信作者: 张建军, 副教授, 硕士研究生导师.

度的任何物体,其内部分子或原子都有自动向低能级跃迁的趋势,在此跃迁的过程中都会以电磁波的形式不断地向外辐射出多种频率的热量,辐射通量按辐射光波波长呈稳态分布^[6-7],大小只与加热物体自身温度有关。

$$E(\lambda_0, T_0) = \frac{2\pi c^2 h}{(e^{hc/\lambda_0 k T_0} - 1)\lambda_0^5}$$

式中: $E(\lambda_0, T_0)$ 表示当加热物体绝对温度为 T_0 , 辐射出波长为 λ_0 时光谱的出射强度, 单位为 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{m}^2$; λ_0 表示辐射光谱波长, 单位为 m ; T_0 表示温度, 单位是 K ; $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, 表示光在真空中的速度; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 为普朗克常数; $k = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 为波尔兹曼常数。

若在 CCD 摄像机镜头前加装一个工作波长为 λ_s 滤光片, 即可得到在该波长下 CCD 摄像机输出图像的灰度值^[8]:

$$H_s = \frac{1}{4} \eta \mu t \cdot \left(\frac{2a}{f'} \right)^2 \cdot \frac{Y(\lambda_s) K(\lambda_s) \epsilon(\lambda_s, T) c_1}{(e^{c^2/\lambda_s T} - 1) \lambda_s^5}$$

式中: η 由加热物体炉标定得到, μ 为 CCD 感光元件光电转换特性值, $\epsilon(\lambda_s, T)$ 为光谱发射率, 根据假设条件, 此处为一定值, $Y(\lambda_s)$ 由 CCD 摄像机对波长为 λ_s 光谱辐射响应特性值, $K(\lambda_s)$ 则为镜头的透光率, t 、 $\frac{2a}{f'}$ 则由摄像机设定。

令

$$\tau_{\lambda_s} = \frac{1}{4} \eta \mu t \cdot \left(\frac{2a}{f'} \right)^2 \cdot Y(\lambda_s) \cdot K(\lambda_s)$$

对于某一测温系统而言, τ_{λ_s} 是恒定的。

则

$$H_s = \tau_{\lambda_s} \cdot \frac{\epsilon(\lambda_s, T) c_1}{(e^{c^2/\lambda_s T} - 1) \lambda_s^5}$$

由此得到了目标物辐射图像灰度值关于物体温度和辐射波长的函数关系式。通过在镜头前安装不同波段的滤光片, 从而获得相同温度下, 不同波长的辐射图像的灰度值, 由于

$$\frac{\epsilon(\lambda_R, T) \cdot \epsilon(\lambda_B, T)}{\epsilon(\lambda_G, T)^2} \approx 1$$

所以可得出温度的计算公式:

$$T = \frac{c_2 \cdot \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R} \right)}{\ln \frac{H_R \cdot H_B}{H_G^2} - \ln \frac{\tau_{\lambda_R} \cdot \tau_{\lambda_B}}{\tau_{\lambda_G}^2} + 5 \ln \frac{\lambda_R \cdot \lambda_B}{\lambda_G^2}}$$

2 系统硬件设计

测温系统的硬件系统包括三个模块: 光学成像、光电转换及图像数字化、图像处理及测温; 具体结构如图 1。

光学成像模块由中性衰减片和镜头组成, 衰减片安装在镜头前, 衰减片能按同一比例降低辐射光谱强度, 不仅能防止 CCD 过快饱和, 扩大响应范围, 同时还能保护镜头和 CCD 摄像机。通过调节镜头光圈大小和焦距, 可使得被测高温物体热辐射图像在 CCD 摄像机中呈现清晰的图像, 同时能有效控制光通量。

光电转换及图像数字化模块由彩色 CCD 摄像机和内嵌的图像采集卡组成。CCD 感光元件可实现光电转换, 形成与辐射图像相对应的模拟信号, 通过图像采集卡进行模/数转换, 形成计算机可以处理的数字图像, 再通过 USB 数据线与上位机实现实时通讯。

图像处理及测温模块由上位机、显示器等附件和编写的软件组成, 通过在上位机上运行图像处理和测温程序, 即可对从 CCD 摄像机传输过来的数字图像进行处理, 根据处理所得的特征值进行温度计算。

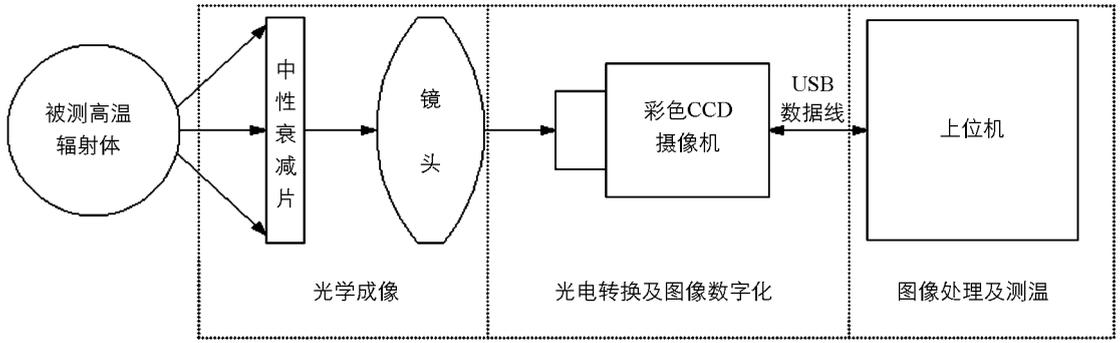


图 1 系统硬件结构示意图

3 系统软件设计

本系统通过彩色 CCD 摄像机拍摄加热过程中的零件表面的热辐射图像, 由于图像三基色的灰度值与辐射物体存在一一映射关系, 因此, 我们可以建立辐射物体表面温度与 R、G、B 三基色灰度值之间的关系, 依据这一关系来实现温度的测量. 但是在拍摄图像的过程中, 由于受到诸多因素的影响, 如电子噪声、暗电流等, 会导致三基色灰度值未必与温度始终保持单调的映射关系, 同时当温度很高时, 三基色某些灰度值已经达到饱和, 这样限制了测温范围. 所以本文设计的测温系统还需要具备对图像进行预处理来降低图像误差对测量结果的影响, 同时在温度计算算法上要结合实际情况关于温度的分布情况, 本文设计的算法是基于 BP 神经网络算法和最小二乘法^[9]实现实时测温的, 该系统还具备图像实时存储与显示功能.

3.1 图像实时监控模块设计

图像实时监控模块可以实时反映加热炉内物体的加热物态变化过程以及加热炉内的环境变化. 监控图像在显示器中显示, 在上位机前, 即可全面掌握加热炉的工作情况和工件的加热程度, 不仅有利于设备运行状况监测, 保障生产安全, 而且能有效降低劳动强度, 改善工作环境, 更重要的是能确保精确测量被加热工件的温度, 以避免传统粗放的生产方式. 其程序流程如图 2.

3.2 数字图像实时采集与存储模块设计

数字图像实时采集与存储模块, 其主要功能是根据生产实际情况, 在工件加热的过程当中, 拍摄工件表面热辐射图像并保存, 这一模块的功能是实现温度测量的基础. 实时信号采集与存储, 为温度的实时测量提供精确的动态数据, 并且存储的图像为后续对加热炉内工作环境和被加热工件物态随温度的变化过程的研究提供了数据支持. 其程序流程如图 3.

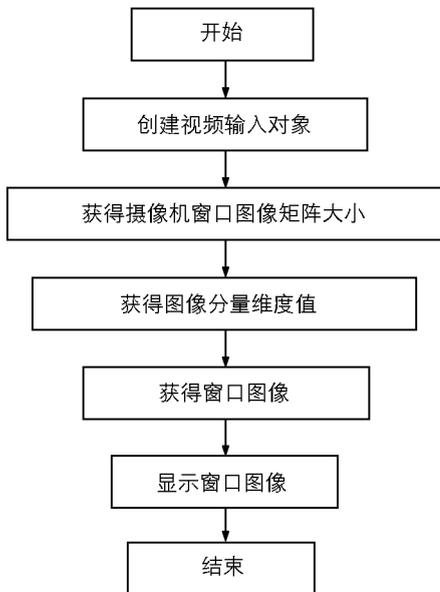


图 2 实时监控模块程序设计流程

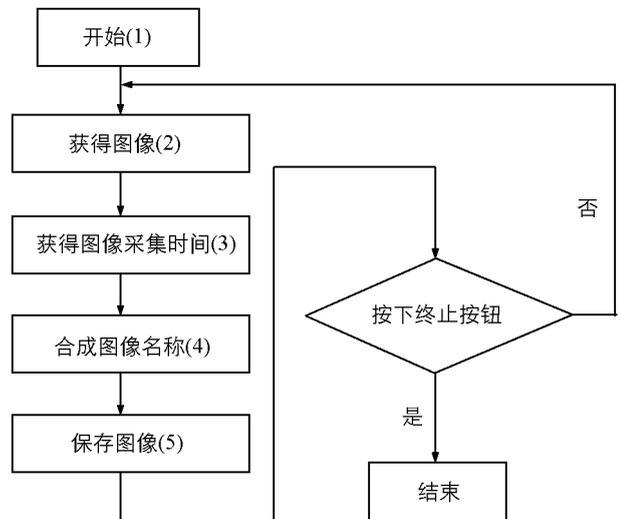


图 3 数字图像实时存储程序设计流程

3.3 图像实时处理模块设计

图像实时处理模块,是对实时采集的图像进行相关处理,得到与温度相关的特征值,该过程是实现温度实时测量的关键,该模块的设计涉及到程序运行时间与图像采集间隔时间的设定,更重要的是,图像处理方法的选择直接决定了特征值计算的精度和准确性,这直接影响着温度的测量,所以图像处理方法的选择显得至关重要.本文图像的处理方案是先对彩色图像进行三基色灰度均衡化处理以实现图像空域增强,再对图像进行频域滤波处理以除去噪声^[10-11].具体程序流程如图 4 和图 5.

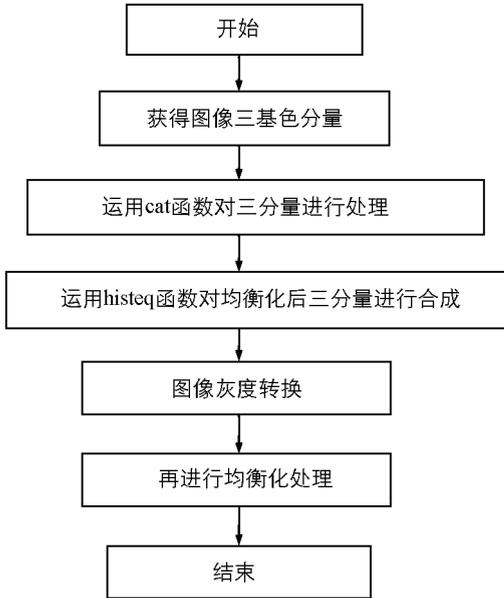


图 4 彩色图像直方图均衡化处理流程

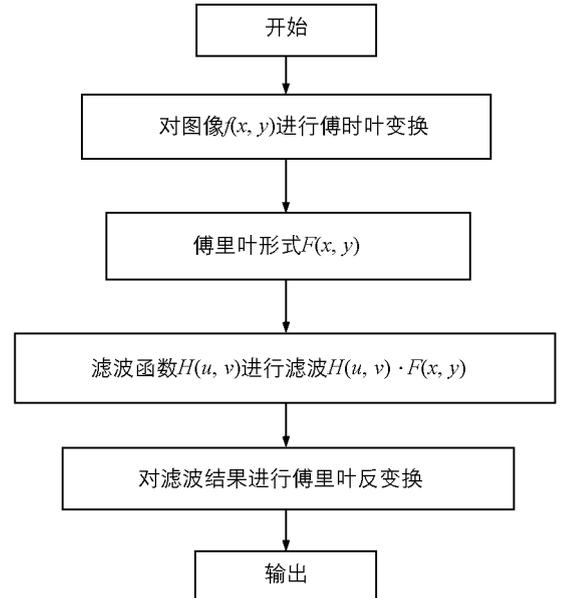


图 5 频域滤波处理流程

3.4 实时温度测量与误差分析

实时温度与误差计算模块是在前三个模块的基础上,基于最小二乘法、BP 神经网络算法、插值等算法来实现的.该模块可以实现温度的动态测量,换言之,本测温系统一经标定,既可以用来测定被加热工件在加热过程中任意时刻的温度,并进行误差的计算,结果一目了然,这为热处理温度的测量和控制提供了良好的基础,有利于提高热处理的自动化程度和表面热处理温度的控制精度.本文基于 MATLAB 软件平台,运用 GUI 编程^[12]设计了一套温度软测量系统平台.该平台包含两种模式:手动和自动,在手动模式下,工作人员可输入任意时刻的图像从而得到对应的温度和误差,在自动模式下,该系统可以实时采集与存储图像、实时处理图像、实时计算温度和误差,并将各环节的图像和数据以及对应的具体时间进行显示,具体工作流程如图 6.

表 1 软件平台计算温度值与标定温度统计表

标定温度/ ℃	高温回火温度段(500~580℃)					淬火温度段(840~900℃)			
	500	520	540	560	580	840	860	880	900
计算温度/℃	507	512	545	550	578	869	883.7	885	903
计算误差/%	+1.4	-1.5	+0.93	-1.79	-0.34	+3.45	+2.76	+0.57	0.7

由表 1 可知,在该温度段计算误差都在 3.5% 以内,满足工业使用要求,同时增加标定温度样本数量,对实时温度计算算法进行优化也能进一步降低误差.

以在标定实验中的 900℃ 的一幅图像为例,计算的结果分别为 903.764℃ 和 906.0869℃,误差分别为 3.764℃ 和 6.0869℃,均低于 0.7%,900℃ 是一个标定温度,但是计算值依然存在误差,这是因为测温系统进行标定所选取的特征值是相同温度下多幅图像特征值的平均值,同时算法自身也存在一定的误差.软件平台的工作界面如图 7.

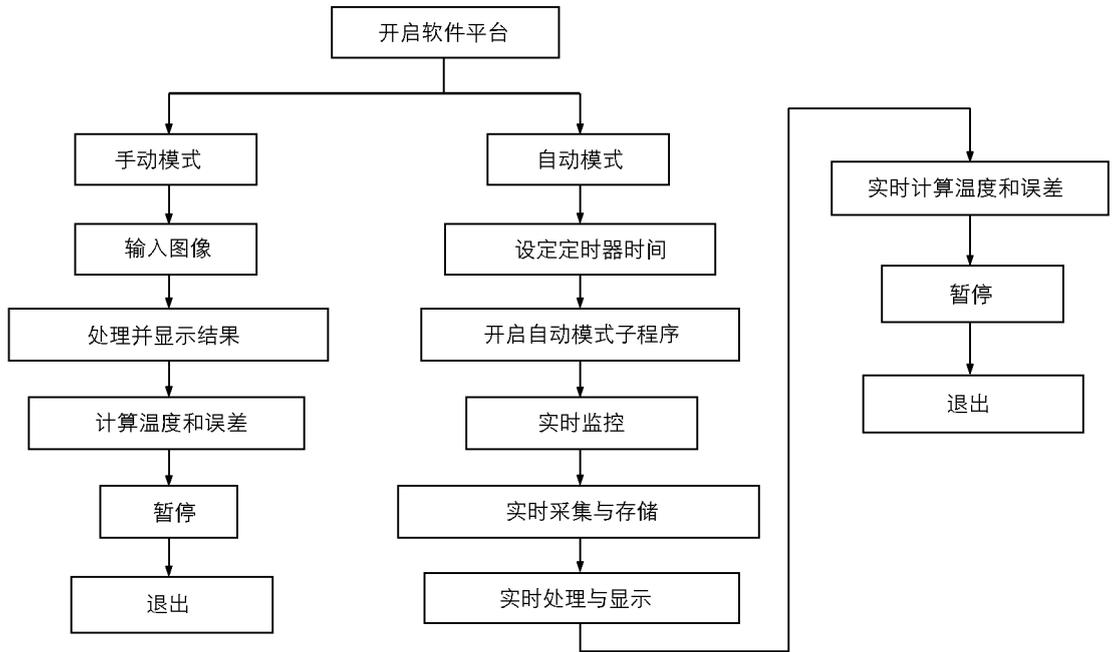


图 6 软件平台工作流程



图 7 软件平台工作界面

4 结 论

本文将数字图像处理技术应用于温度非接触式测量进行研究, 得到了目标物辐射图像灰度值有关物体温度和辐射波长的函数关系式. 文章基于 MATLAB 软件平台和热辐射原理及光学成像原理, 运用 GUI 编程, 设计了热处理温度非接触式测量软件平台, 实现对加热工件温度的非接触测量, 该平台集现场监控、实时图像采集与存储、实时显示、实时处理、实时温度计算和误差计算于一体. 该系统具有三个方面的优点: 第一, 可实时测量高温工件温度, 自动化程度高; 第二, 精度较高, 动态响应好, 热惯性低, 抗干扰能力强; 第三, 可用于表面加热工件温度非接触测量, 对表面加热温度的控制和优化加热过程, 提高表面热处理工件质量有重要意义.

参考文献:

- [1] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 124—138.
- [2] 李阳保. 基于数字图像处理技术的高温温度场软测量研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [3] 宋海鹰. 基于光电技术和图像处理技术的高温熔体非接触式测温系统的研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2004.
- [4] 杨超. 双炉膛电站直流炉辐射图像处理及燃烧诊断与优化控制 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2007.
- [5] 李汉舟. 基于数字图像处理的温度检测技术研究 [D]. 甘肃: 西北工业大学, 2002.
- [6] 李吉林. 辐射测温 and 检定/校准技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [7] 蒙建平, 杨经国, 谭华, 等. 热辐射谱的多道采集及最小二乘法温度解析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2002(5): 721—723.
- [8] 孙元. 基于 CCD 图像传感器的高温温度场非接触软测量研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [9] 史忠植. 神经网络 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 48—63.
- [10] 丁经纬, 马增益, 黄群星, 等. 炉膛火焰温度场重建非线性优化算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 136—139.
- [11] 吕燕. 基于阈值算法图像分割的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [12] 陈超. MATLAB 应用实例精讲——图像处理与 GUI 设计篇 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

Research of a MATLAB-Based Non-Contact Measurement System for Heat Treatment Temperature

GONG Heng, ZHANG Jian-jun, CHEN Rui

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Based on a research of the application of the non-contact temperature measuring principle to digital image processing, the paper establishes a functional formula of the target radiation image grey values on temperature and radiation wavelengths. Based on MATLAB software platform and the principles of thermal radiation and optical imaging, the paper designs a set of non-contact measuring system of carbon steel heat treatment temperature by GUI programming for the non-contact measurement of the heating temperature of workpieces. The system can finish real-time image collection, storage and processing with temperature and error calculation at the same time. Experimental results show that the system can do real-time measurement of the temperature of heat workpieces with good dynamic response, low thermal inertia, anti-interference and high precision, which satisfies the requirement of industrial application.

Key words: non-contact; temperature measurement; MATLAB; real-time

责任编辑 汤振金

