

基于小波变换的红外热像钢水测温研究

马翠红 刘俊秋* 杨友良

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063009

摘要 基于热辐射测温原理,介绍了红外热像仪测温理论,为了提高钢水的测温精度,搭建了实验平台,获得了不同温度下的熔融金属(钢水)的红外图像。通过小波去噪方法获得信噪比较高的红外灰度图像,利用 Matlab 软件进行温度场等温线的绘制和形态学显示,使其能够真实的再现熔池表面温度场情况,从而达到测量精度和设计要求,此方法为熔融金属在线红外热像测温的研究打下了坚实的基础。

关键词 测量; 红外热像测温; 小波变换; 熔融金属; 图像处理; Matlab

中图分类号 TH811

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101001

Infrared Thermal Image of Molten Steel Temperature Measurement Based on Wavelet Transform

Ma Cuihong Liu Junmi Yang Youliang

College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China

Abstract Based on the principle of radiation temperature measurement, the theory of temperature measurement with infrared thermal imager is introduced, in order to improve the measurement accuracy of molten steel, an experimental platform is built, the infrared image of molten metal under different temperatures are obtained. Through the wavelet denoising method for infrared image with high signal-to-noise ratio, display temperature and morphology is obtained by using Matlab software, which can reproduce the molten pool surface temperature field real, so as to achieve the requirements of measurement accuracy and design. This method lays a strong foundation for molten metal on-line infrared temperature measurement.

Key words measurement; infrared thermal imaging temperature measurement; wavelet transform; the molten metal; image processing; Matlab

OCIS codes 100.2960;100.7410;110.3080

1 引言

随着科技的快速发展,各行各业对于产品质量好坏和生产效率高下都提出了极高的要求。在钢铁行业中,测温的精度直接影响着被控系统的稳定性和实效性,选择方便准确的温度测量与控制方法,对于炼钢过程中能源的节约及生产效率的提高都具有重要意义^[1-4]。因此提出了利用红外热像仪测钢水温度的方法。红外热像技术的可视化的特点,可以将温度场的分布、等温线的趋势以及与温度密切相关的浓度和密度一一的展示出来,为物质的定性、定量的分析提供了重要的研究依据^[5-6]。

为了能够实时、准确掌握炉内温度状况,本文利用红外热像测温技术,对红外热像仪采集到的图像在计算机中利用小波图像处理技术对其进行去噪处理,对这些图像进行实时处理,最后得到实时的温度分布图像^[7-10]。

2 红外热像仪测温原理

红外热像仪测温是靠接收被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。实际测温时,热像仪接收到的有效辐射包括被测目标自身辐射、目标反射周围环境物体辐射以及大气辐射三部分^[11-12]。

收稿日期: 2015-04-13; 收到修改稿日期: 2015-05-07; 网络出版日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61171058)

作者简介: 马翠红(1960—),女,教授,硕士生导师,主要从事复杂工业过程的建模与控制方面的研究。

E-mail: mch208@sina.com

*通信联系人。E-mail: liujunmi@163.com

被测物体表面的辐射亮度为

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \rho_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u), \quad (1)$$

式中第一部分为表面光谱辐亮度,第二部分为反射的环境光谱辐亮度, T_0 为被测物体表面温度, T_u 为环境温度, ε_{λ} 为表面辐射率, ρ_{λ} 表面反射率, α_{λ} 表面对环境辐射的吸收率。

作用于热像仪的辐射照度为

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} [\tau_{a\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)], \quad (2)$$

式中 A_0 为热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积, d 为该目标到测量仪器之间的距离,通常在一定条件下, $A_0 d^{-2}$ 为一个常值, $\tau_{a\lambda}$ 为大气的光谱透射率, $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气辐射率。

由于热像仪是工作在某一个很窄的波段, $3\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\sim 12\mu\text{m}$ 两个波段, ε_{λ} , α_{λ} , $\tau_{a\lambda}$ 通常可认为与 λ 无关,从而得到热像仪的响应电压为

$$V_s = A_R A_0 d^{-2} \{ \tau_a [\varepsilon \int_{\Delta\lambda} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) d\lambda + (1 - \alpha) \int_{\Delta\lambda} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) d\lambda] + \varepsilon_a \int_{\Delta\lambda} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_a) d\lambda \}, \quad (3)$$

式中 A_R 为热像仪透镜面积, R_{λ} 为探测器的光谱响应度,对于确定的热像仪为常值。

令 $K = A_R A_0 d^{-2}$, 并取 $\int_{\Delta\lambda} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T) d\lambda = f(T)$, 则(3)式变为

$$V_s = K \{ \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha) f(T_u)] + \varepsilon_a f(T_a) \}. \quad (4)$$

令 $V_s/K = f(T_r)$, 则(4)式变为

$$f(T_r) = \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha) f(T_u)] + \varepsilon_a f(T_a). \quad (5)$$

对于近距离测量 $\tau_a = 1$, 则有

$$f(T_r) = \varepsilon [f(T_0) - f(T_u)] + f(T_a). \quad (6)$$

由普朗克辐射定律得

$$T_r^n = \tau_a [\varepsilon T_0^n + (1 - \alpha) T_u^n] + \varepsilon_a T_a^n. \quad (7)$$

由(7)式可以得出被测表面真实温度公式

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\varepsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{1/n}. \quad (8)$$

当被测表面是灰体时,可以近似的认为 $\varepsilon = \alpha$, $\varepsilon_a = 1 - \tau_a$, 则(7)、(8)式变为

$$T_r^n = \tau_a \left[\varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n + \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) T_a^n \right], \quad (9)$$

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n (1 - \varepsilon) T_u^n - \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) T_a^n \right] \right\}^{1/n}. \quad (10)$$

(10)式为计算灰体表面的真实温度公式。近距离测量时, $\tau_a = 1$, 则(10)式变为

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_r^n - (1 - \varepsilon) T_u^n] \right\}^{1/n}. \quad (11)$$

因为钢水的表面温度很高,即 T_u/T_0 很小可忽略,则(11)式变为

$$T_0 = \frac{T_r}{\sqrt[n]{\varepsilon}}. \quad (12)$$

3 实验方案

本实验采用主要设备:1) 银泰机电设备厂生产的 YTKJ9.1A 新型电源控制板小容量中频炉,最大输出、输入功率为 15 kW;输出中频电压为 750 V;输出中频电流为 30 A;输出振荡频率为 4000 Hz。2) 红外热像仪采用的是 MAG30-110077,型号为 MAG30HT,探测器像素数为 384 pixel×288 pixel,镜头为 f15 F1 filt0.082,镜头焦距为 15 mm。3) 卓立汉光 MC600 位移台。

实验硬件示意图如图1所示。首先利用中频炉对钢进行加热至其融化,然后通过调节中频炉使钢水保持熔融状态,利用红外热像仪来接收高温钢水辐射出的红外线,把得到的图像传至计算机,通过热电偶测量出此时钢水的温度值。通过改变中频炉的功率,获得不同温度下钢水的红外图像。

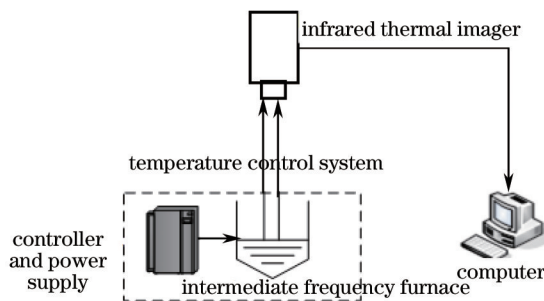


图1 硬件系统结构图

Fig.1 Structure of the hardware system

4 数据分析

1) 图像的去噪处理

由红外热像仪拍到的图像经过数据线传至计算机仍需进一步进行去噪处理。红外图像因为红外热像仪标定的环境和使用的环境不同导致得到的图像夹杂着很多的噪声,所以采用小波去噪的方法去除噪声。由于红外图像中的温度信号与噪声信号在频率特性上差别较大,中频炉内钢水温度变化较慢其信号属于低频信号,正好相反噪声信号变化明显其信号属于高频信号,正好利用小波函数的局部时频特性的特点,通过选取不同的阈值的方法的去去除高频分量,只保留实际温度场的低频分量,从而达到去噪的目的。小波去噪流程图如图2所示。

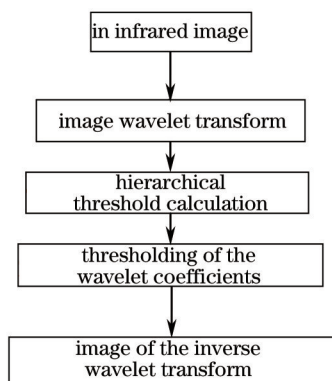


图2 小波的去噪流程图

Fig.2 Based on wavelet transform denoising flow chart

在Matlab中编程处理前后效果如图3所示。

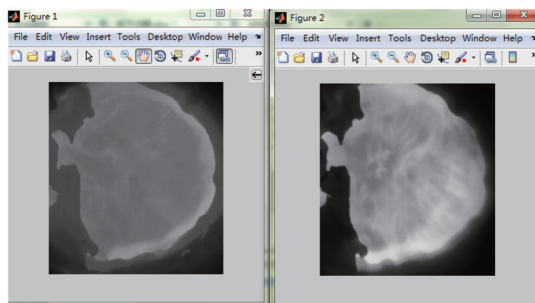


图3 去噪前、后红外图像

Fig.3 Infrared image with noise and denoising

由图3去噪前后红外图像对比可知,由于去除了高频噪声信号,去噪后的图像的的边缘比较清晰,图像中的噪声亮度明显下降,去噪后图像清晰地反映了钢水表面的温度场。

在去噪后的图像上选择与快偶测量点大致同一位置的采样点,将采样点灰度数据代入红外热像测温公式,将测得温度值记录。快偶直接测量值与红外热像仪测温值如表1所示。

从表1中可以看出,经过红外热像仪测温实验的图像处理,测量误差值不大于1%,达到了测量精度和设计要求。

表1 测量值与计算值实验数据对比表

Table 1 Comparison table of experimental data between measured values and calculated value

Thermocouple measurement / $^{\circ}\text{C}$	Infrared thermograph measurements / $^{\circ}\text{C}$	Error /%
1506	1498	0.60
1554	1548	0.42
1593	1582	0.71
1643	1636	0.43
1654	1644	0.62
1695	1683	0.69

2) 图像的形态学显示

形态学图像是用来研究热辐射体的一种图。图像形态学处理能够基于探测的思想,得到灰度和温度的关系特性,是温度检测中非常重要的一个处理方法。形态学显示主要利用图像中各个像素点所代表的温度值,以三维的视角表现了具体的熔池表面温度场分布情况,形象、直观,从而利于分析出图像的结构特征。温度场形态学图如图4所示。该图为1643 $^{\circ}\text{C}$ (热电偶)熔融状态钢水温度红外热像图经过处理所得。

3) 图像的等温线的绘制

在获取红外图像的温度场分布后,温度场图像中所有温度相等的点用线连接起来,这样可清晰地看出温度场的分布情况,便于分析解读。温度场等温线图如图5所示,该图为1643 $^{\circ}\text{C}$ (热电偶)熔融状态钢水温度红外热像图经过处理所得。

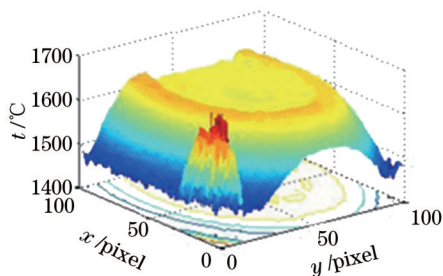


图4 温度场形态学图

Fig.4 Temperature field of morphology diagram

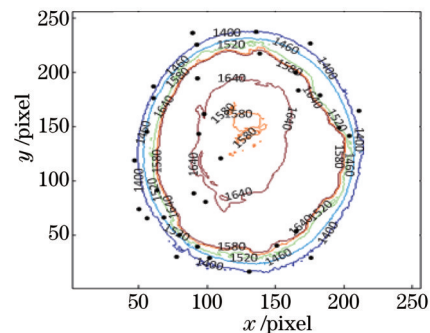


图5 温度场等温线图

Fig.5 Temperature field of the isotherm diagram

由图5中可以清晰地看出,熔融状态下的钢水温度场的分布情况,有利于钢水温度的准确测量。在实际生产过程中,温度的准确测量,有利于提高钢坯的质量,并且可以减少异常浇铸事件的发生。

5 结 论

本文通过红外热像仪测温实验获得不同温度下熔融金属的灰度图像,利用小波去噪得到信噪比较高图像,使钢水测量误差在1%,达到了测量精度和设计要求。利用Matlab软件对去噪的图像进行形态学显示和等温线的绘制,使其能够真实的再现熔池表面温度场情况。采用这一分析方法,大大缩短了分析时间,提高了工作效率,为把红外热像在线测熔融金属温度的方法应用到实际中去提供了可能。

参 考 文 献

- 1 Dai Jingmin. The development status and prospect of radiation thermometry[J]. Techniques of Automation & Applications, 2004, 23(3): 1-7.
戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3):1-7.
- 2 Cui Fangxiao, Fang Yonghua. Infrared background compression method based on brightness temperature spectrum[J].

- Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130001.
崔方晓, 方勇华. 基于亮温光谱的红外背景压缩方法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130001.
- 3 Li Yunhong. Research on Temperature Measurement Technology and Application Based on Infrared Thermal Imager [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 4 Zhang Jie. Study on Infrared Thermal Imaging Temperature Measurement Technology and Its Application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.
张 杰. 红外热成像测温技术及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- 5 Xu Hongwei, Wen Degang, Liu Yao, *et al.*. Influence of temperature field coupling on temperature field of laser quenching on cylinder circumferential surface[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 091407.
徐宏伟, 闻德刚, 刘 耀, 等. 温度场耦合对圆柱圆周表面激光淬火温度场的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 091407.
- 6 Chen Fuchang, Yu Chaoqun. Design of tunable grating filter based on high-precise temperature control[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111202.
陈福昌, 余超群. 高精度温控可调光栅滤波器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 111202.
- 7 Zhang Defeng. Matlab Wavelet Analysis[M]. 2nd Edition, Beijing: China Machine Press, 2012: 218-225.
张德丰. Matlab小波分析[M]. 第2版, 北京: 机械工业出版社, 2012: 218-225.
- 8 Elmahdy A H, Devine F. Laboratory infrared thermography technique for window surface temperature measurement [J]. ASHRAE Transactions, 2005, 111(1): 561-571.
- 9 Wang Xiaoyu. Research on the Key Technology of Infrared Image Analysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
王晓宇. 红外图像分析关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 10 Zhu Guoqing, Li Qingwu, Lin Shaofei, *et al.*. Infrared image enhancement algorithm based human visual system characteristic via non-subsampled contourlet transform domain[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011001.
朱国庆, 李庆武, 林少飞, 等. 基于人眼视觉特性的非下采样轮廓波变换域红外图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011001.
- 11 Lu Zifeng. Analysis of Calibration and Radiometric Measurement Error of Infrared Thermal Imager[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- 12 Wang Zhiguo. The Infrared Thermography Calibration Model Research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
王志国. 红外热成像仪测温定标模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

栏目编辑: 何卓铭