

# 自适应维纳滤波在钢水红外图像去噪中的应用

翟潘, 王平

(山东华宇工学院, 山东 德州 253011)

**摘要:** 红外测温系统的应用减少了人工测温的安全事故,但其温度的准确性取决于由红外热像仪获得的图像的质量。为了对钢水红外图像质量的影响,提出了基于自适应维纳滤波的去噪方法。通过自相关的参数指数衰减模型来控制算法的计算复杂性和敏感性,进而有效提高维纳滤波器的去噪性能。基于对不同温度下钢水红外图像的去噪处理,验证了所提去噪方法比维纳滤波和稀疏分解方法的图像去噪具有更好的去噪性能。

**关键词:** 红外测温; 图像去噪; 自适应维纳滤波; 红外辐射

**中图分类号:** TH811      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2021)07-0665-05

## Application of the Adaptive Wiener Filter in Infrared Image Denoising for Molten Steel

ZHAI Pan, WANG Ping

(Shandong Huayu University of Technology, Dezhou 254011, China)

**Abstract:** The application of an infrared temperature measurement system reduces the occurrence of safety accidents during manual temperature measurement. However, the accuracy of the measurement depends on the quality of the image obtained using the infrared thermal imaging camera. To reduce the influence of noise on the quality of molten steel infrared images, this paper proposes a denoising method based on adaptive Wiener filtering. The autocorrelation parameter exponential decay model is used to control the computational complexity and sensitivity of the algorithm, thereby effectively improving the denoising performance of the Wiener filter. Based on the denoising processing of molten steel infrared images at different temperatures, it is verified that the proposed denoising method has better denoising performance than Wiener filtering and sparse decomposition methods.

**Key words:** infrared temperature, image denoising, adaptive wiener filtering, infrared radiation

### 0 引言

随着控制和通信技术的快速发展与应用,传统的工业逐渐实现自动化、智能化<sup>[1]</sup>。尤其是钢铁冶金方面,智能自动化的实现解决了很多传统操作存在的安全隐患问题,如基于红外测温仪的钢水测温系统<sup>[2-3]</sup>。红外测温系统的应用逐渐替代了传统的人工测温,不仅提高了钢水的测温精度,还减少了人工测温的安全事故。

目前,红外测温技术在冶金行业得到广泛应用,尤其是钢水测温方面。其中钢水辐射的红外波长位于 $0.75\sim 1000\ \mu\text{m}$ ,红外测温技术基于钢水辐射的波长能量,得到其表面对面的温度<sup>[4]</sup>。以上红外测温技术是基

于红外辐射理论,即,自然界任何物体(温度在绝对零度以上)时时刻刻都在以电磁波方式向外辐射不同波长的能量。基于这个原理,红外测温技术可以根据辐射体的辐射波长能量,得到其表面对面的温度量<sup>[5]</sup>。基于钢水的红外热图像,可以得到实时的钢水温度<sup>[6]</sup>。红外测温原理主要依据于普朗克黑体定律、斯特藩-玻尔兹曼定律和维恩位移定律<sup>[7]</sup>。根据钢水辐射能量的红外分布图,可以得到对应的辐射体/钢水的温度。即钢水测量温度的准确性取决于由红外热像仪获得的图像的质量<sup>[8-9]</sup>。

由于实际炼钢环境和测温仪器等不确定性因素的影响,获得的钢水红外热图像存在大量噪声,直接影响最后的钢水测温精度<sup>[10]</sup>。目前,传统的红外图像

收稿日期: 2019-12-01; 修订日期: 2021-02-07.

作者简介: 翟潘(1985-),男,硕士,讲师,主要研究方向为钢铁冶金自动化。E-mail: 2681043194@qq.com.

基金项目: 山东省高等学校科技计划研究项目(J18KA378)。

去噪处理方法有维纳滤波去噪<sup>[11]</sup>和稀疏分解去噪<sup>[12]</sup>等方法。但这些方法都是假设钢水红外图像中的噪声都是独立普通的高斯白噪声,因此对于钢水红外图像中的混合噪声处理效果不太理想。

为了提高钢水红外图像的去噪效果,本文提出基于自适应维纳滤波的去噪方法。与基于稀疏分解去噪方法相比,本文所提方法在去除噪声后提高了钢水红外图像的细节信息保真度,即去噪后的图像更加真实。此外,在传统维纳滤波去噪方法基础上,本文提出的去噪方法通过建立信号和噪声的相关模型来改进小波去噪。通过自相关的参数指数衰减模型来控制算法的计算复杂性和敏感性。由此产生的自适应维纳滤波适应于小波系数,并有效提高了传统维纳滤波器的去噪性能。具体验证过程如下:首先,通过钢水测温平台获得不同温度下的钢水红外热图像。然后,利用所提方法对钢水红外热图像进行去噪处理,并与目前存在的维纳滤波去噪和稀疏分解去噪方法进行对比。实验对比结果验证了本文所提去噪方法可以去除红外热图像的噪声,并提高了去噪后钢水红外图像的峰值信噪比。

### 1 稀疏分解的去噪方法

与传统图像去噪方法不同,稀疏分解图像去噪方法从图像自身的统计特性出发,将图像分解成稀疏成分和其他成分,如下式:

$$x(m, n) = x_1(m, n) + x_2(m, n) \quad (1)$$

式中:  $x_1(m, n) = \sum_{k=0}^{n-1} \langle R^k x(m, n), g_{\gamma k} \rangle$ ;  $x_2(m, n) = \sum_{k=n}^{\infty} \langle R^k x(m, n), g_{\gamma k} \rangle$ ;  $x(m, n)$ 为原始图像;  $x_1(m, n)$ 为图像的稀疏成分(有用信息);  $x_2(m, n)$ 为图像的其他成分(噪声);  $g_{\gamma k}$ 为由参数组 $\gamma$ 定义的原子,  $\langle R^k x(m, n), g_{\gamma k} \rangle$ 为图像  $x(m, n)$ 的残余  $R^k x(m, n)$ 在对应原子  $g_{\gamma k}$ 上的分量,然后以图像的稀疏成分为基础重建图像,得到去除噪声后的图像。

### 2 传统维纳滤波器设计

假设图像信号  $s(m, n)$ 含有噪声信号  $w(m, n)$ ,含有噪声的图像估计信号为:

$$x(m, n) = s(m, n) + w(m, n) \quad (2)$$

线性估计器为:

$$\hat{s}(m, n) = x(m, n) * h(m, n) \quad (3)$$

式中:  $h(m, n)$ 最小均方误差。此外依据正交性原理,最优解  $h$  维纳滤波器满足:

$$R_{ss}(m, n) = [R_{ss}(m, n) + R_{ww}(m, n)] * h(m, n) \quad (4)$$

滤波器  $h$  的傅里叶变换为:

$$H(w_1, w_2) = \frac{P_{ss}(w_1, w_2)}{P_{ss}(w_1, w_2) + P_{ww}(w_1, w_2)} \quad (5)$$

式中:  $R_{ss}(m, n)$ 和  $R_{ww}(m, n)$ 是图像信号  $s$  和噪声  $w$  的自相关函数;  $P_{ss}(w_1, w_2) = \sigma_s^2$  是图像信号样本  $s(m, n)$ 的功率谱;  $P_{ww}(w_1, w_2) = \sigma_w^2$  是噪声  $w(m, n)$ 的功率谱,其中  $\sigma_s^2$  和  $\sigma_w^2$  分别表示  $s(m, n)$ 和  $w(m, n)$ 的方差。

因此,我们可以得到维纳滤波器为:

$$h(m, n) = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_w^2} \delta(m, n) \quad (6)$$

综上,可以发现最小均方平方误差(Minimum mean square error, MMSE)估计的解是简单的,但是其对信号和噪声的不相关假设并不完全准确。同样考虑小波变换的情况下,非正交结构会在变换域中导致有色噪声,从而使MMSE的解无效。

### 3 自适应维纳滤波器设计

为了限制计算复杂度并避免滤波器阶数增长带来的灵敏度问题和变换域导致的噪声问题,我们提出了一种自适应维纳滤波器,该滤波器使用指数衰减自相关模型进行设计。

类似于式(2), FIR (Finite Impulse Response) 维纳滤波器的卷积表达式为:

$$\hat{s}(m, n) = \sum_{(i, j) \in W_{m, n}} h(i, j) x(m - i, n - j) \quad (7)$$

$$W_{m, n} = \{(i, j); m - M \leq i \leq m + M, n - M \leq j \leq n + M\} \quad (8)$$

式中:  $W_{m, n}$ 表示中心在  $(m, n)$ 的  $(2M + 1)(2M + 1)$ 的方形窗口函数;  $M$ 是自适应滤波器的阶数。等式(7)右侧形成一个有限的块-Toeplitz 矩阵<sup>[13]</sup>:

$$(R_s + R_w) \mathcal{H} = \zeta \quad (9)$$

式中:  $R_s$ 和  $R_w$ 是  $(2M + 1)(2M + 1)$ 的 Toeplitz 矩阵,对应于两组自相关函数;  $\mathcal{H}$ 和  $\zeta$ 是关于滤波器系数和信号  $s$  自相关函数的  $(2M + 1)^2 \times 1$  向量。从方程(5)我们知道滤波器依赖于信号和噪声的相关性。一旦确定了相关系数,滤波器设计问题就简化为求解线性系统。

实验结果表明,自然图像的小波系数具有一定的聚类特性。换言之,小波系数的大小与其邻域无关。这种依赖性随着距离的增加而迅速衰减。使用简化符号  $r_{m, n} = R_{ss}(m, n)$ , 我们提出一个指数衰减模型:

$$r_{m,n} = r_{0,0} \gamma^{|m|+|n|}, (m,n) \in W_{0,0} \quad (10)$$

式中:  $\gamma$ 是衰变参数, 其随小波系数的尺度变化而变化。指数衰减模型代表了真实图像在其邻居上的系数。此外, 频带内自相关函数的变化通过变化的局部方差建模:

$$s_{m,n} := R_{ww}(m,n) = \begin{cases} \sigma_n^2, & m=0, n=0 \\ \delta_1 \sigma_n^2, & |m|+|n|=1 \\ \delta_2 \sigma_n^2, & |m|=|n|=1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\delta$ 是表示是特定表示尺度上小波域系数归一化的界。由于 $\delta$ 是随尺度变化, 因此噪声的相关模型也是变化的。

为了估计在相关模型中的参数, 我们为每个频带中的所有系数选择一个通用的衰减参数 $\gamma$ , 但是信号方差 $\sigma_s^2 = r_{0,0}$ 是根据上下文从每个单独的系数估计的。综上, 估计信号方差 $\hat{\sigma}_s^2(m,n)$ 表达式为:

$$\hat{m}_s(m,n) = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{w_{m,n}} x(k,l) \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_x^2(m,n) = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{w_{m,n}} (x(k,l) - \hat{m}_s(m,n))^2 \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_s^2(m,n) = \max(0, \hat{\sigma}_x^2(m,n) - \sigma_n^2) \quad (14)$$

基于小波域中的系数聚类, 通过式(12)~(13)建立信号和噪声的相关模型来改进小波去噪。通过自相关的参数指数衰减模型来控制算法的计算复杂性和敏感性。由此产生的自适应维纳滤波适应于小波系数, 因此可以有效提高维纳滤波器的去降噪声性能。

## 4 实验及数据分析

### 4.1 实验方案和去噪评价标准

如图1所示, 实验平台采用的设备如下: 中频率和对应电源变频柜的输出参数为额定功率 1000 kW, 额定频率 700 Hz, 输入电压 750 V/50 Hz; 红外热像仪型号为 FLIR A65, 灵敏度小于等于 0.08℃。透镜型号为 OLA30.4-350。本实验中采用融化较小的钢坯, 通过红外热像仪采集融化后的钢水红外热图像, 其中对应现场参数修正信息如表1所示。

为了验证所提方法对钢水图像去噪的效果, 本文用均方差 (mean squared error, MSE) 和峰值信噪比 (peak-signal-to-noise ratio, PSNR) 作为评价参数<sup>[14]</sup>。设  $U_1(m,n)$ 表示原始红外图像,  $U_2(m,n)$ 表示去噪后的红外图像, 其中  $m$  和  $n$  代表行和列, 则对应的均方差和峰值信噪比计算公式如下: :

$$MSE = \sum_{m,n} [U_1(m,n) - U_2(m,n)]^2 \quad (15)$$

$$PSNR = 10 \lg \left\{ \frac{K \times MAX^2}{\sum_{m,n} [U_1(m,n) - U_2(m,n)]^2} \right\} \quad (16)$$

由上可知, 去噪后图像对应的 PSNR 数值越高、MSE 数值越小暗示去噪方法对钢水红外图像中的噪声处理的效果越好。

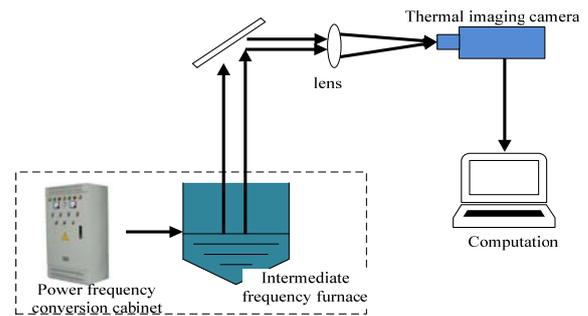


图1 钢水红外温度检测系统结构图

Fig.1 Structural diagram of molten steel temperature detection system

表1 用于温度修正的现场参数信息

Table 1 Information for temperature correction

Temperature/℃	25.0
Target distance/m	2.2
Atmospheric transmittance/%	100
Window transmittance/%	100
Global emissivity/%	62

### 4.2 数据分析

本实验用红外热像仪分别采集温度为 1600℃和 1696℃下的钢水红外热图像, 用本文提出的自适应维纳滤波方法进行去噪处理。对去噪后的图像分别与基于维纳滤波和基于稀疏分解去噪结果进行对比, 通过对比各方法的 MSE 和 PSNR 评价参数验证本文去噪方法的优越性。

如图2所示, 对采集的 1600℃时钢水红外图像进行去噪处理。Fig.2(b)~Fig.2(c)是采用维纳滤波和稀疏分解方法进行去噪处理后的钢水红外图像, Fig.2(d)为本文去噪方法处理后所得钢水红外图像。同样, 对在 1696℃时钢水红外图像进行去噪处理。基于以上 3 种去噪方法, 所得去噪后的钢水红外图像如图 Fig.3(b)~Fig.3(d)所示。

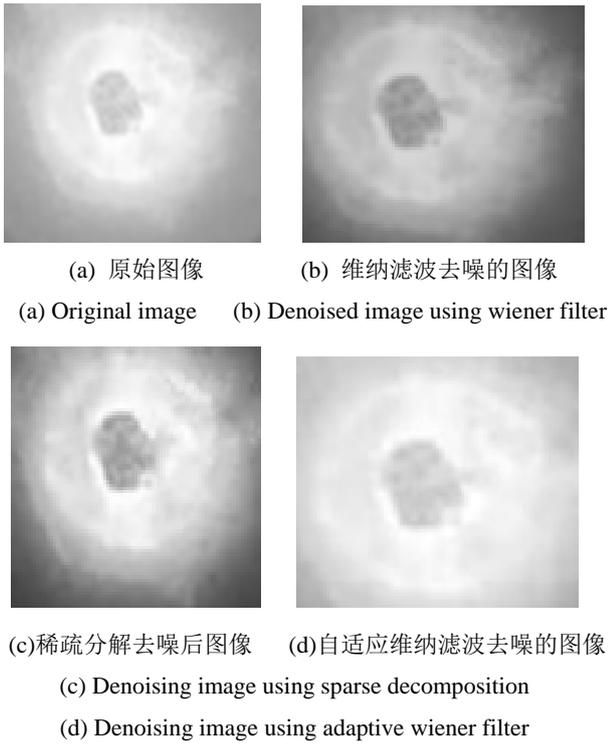


图2 1600℃的钢水红外图像去噪对比

Fig.2 Denoising comparison of molten steel infrared image at 1600℃

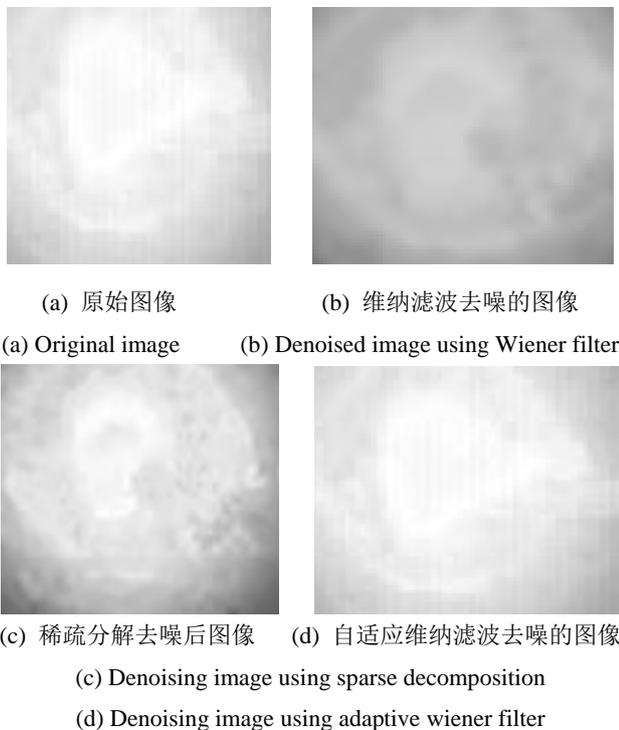


图3 1696℃的钢水红外图像去噪对比

Fig.3 Denoising comparison of molten steel infrared image at 1696℃

基于图2和图3的去噪后钢水红外图像,我们用MSE和PSNR来评价去噪效果,如表2所示。我们可以发现基于自适应维纳滤波去噪后图像的MSE和PSNR优于基于维纳滤波和稀疏分解去噪方法。

表2 不同温度下钢水红外图像去噪效果对比

Table 2 Comparison of denoising effect of molten steel infrared image under different temperatures

Noise processing method	MSE		PSNR/dB	
	1600℃	1696℃	1600℃	1696℃
Wiener filter	0.1130	0.1261	10.235	10.095
Sparse decomposition	0.0906	0.1001	18.539	19.168
FIR wiener filter	0.0798	0.0805	25.683	26.956

基于文献[10]中钢水温度与红外热图像灰度值之间的对应函数关系,我们取热电偶实时测量钢水温度1600℃时的去噪图像分析不同去噪方法对钢水测量精度的影响。表3的对比数据验证了本文提出的去噪方法可以提高去噪后的钢水红外热图像对应的钢水温度准确性。

表3 钢水温度数据对比

Table 3 Comparison of the steel temperature data

Original image Fig.2(a)	1525
Denoised image using wiener filter Fig.2(b)	1556
Denoising image using sparse decomposition Fig.2(c)	1576
Denoising image using adaptive wiener filter Fig.2(d)	1591

## 5 结论

本文针对钢水红外图像存的噪声处理问题,提出了基于自适应维纳滤波的去噪处理方法。通过实验验证,所提的去噪方法可以有效地去除噪声。此外,与基于维纳滤波和稀疏分解去噪方法的对比,所提去噪方法可以更好去除钢水红外图像的噪声,提高图像质量保真度。下一步我们将继续优化所提去噪方法的计算复杂度,以便快速地应用于实际钢水红外测温系统中。

## 参考文献:

- [1] 孙怀义,莫斌,杨璟,等. 工厂自动化未来发展的思考[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(9): 92-96.  
SUN Huaiyi, MO Bin, YANG Jing, et al. Thinking about the future development of factory automation[J]. *Automation and Instrumentation*, 2019(9): 92-96.

- [2] 王新宇. 基于红外图像处理的钢水测温方法研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.  
WANG Xinyu. Research on Temperature Measurement Method of Molten Steel Based on Infrared Image Processing[D]. Tangshan: North China University of Technology, 2016
- [3] 杨友良, 刘爱旭, 马翠红, 等. 基于红外 CCD 的钢水红外测温模型分析[J]. 激光技术, 2018, 42(4): 562-566.  
YANG Youliang, LIU Aixu, MA Cuihong, et al. Infrared temperature measurement model analysis of molten steel based on infrared CCD[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 562-566.
- [4] 杜玉玺, 胡振琪, 葛运航, 等. 距离对不同强度热源红外测温影响及补偿[J]. 红外技术, 2019, 41(10): 976-981.  
DU Yuxi, HU Zhenqi, GE Yunhang, et al. Influence of distance on infrared temperature measurement of different intensity heat sources and compensation[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(10): 976-981
- [5] 晏敏, 彭楚武, 颜永红, 等. 红外测温原理及误差分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004(5): 110-112.  
YAN Min, PENG Chuwu, YAN Yonghong, et al. Infrared thermometry principle and error analysis[J]. *Journal of Hunan University: Natural Science Edition*, 2004(5): 110-112.
- [6] Gharehaghaji N, Khezerloo D, Abbasiazar T. Image Quality Assessment of the Digital Radiography Units in Tabriz, Iran: A Phantom Study[J]. *Journal of Medical Signals and Sensors*, 2019, 9(2): 137-142.
- [7] Aviram G. Evaluation of human detection performance of targets embedded in natural and enhanced infrared images using image metrics[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(4): 885.
- [8] 杨友良, 王新宇, 马翠红. 自适应维纳滤波在钢水红外图像去噪中的应用[J]. 红外技术, 2015, 37(9): 733-735.  
YANG Youliang, WANG Xinyu, MA Cuihong. Application of adaptive Wiener filter in infrared image denoising of molten steel[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 733-735
- [9] 马翠红, 高悦, 孟凡伟. 稀疏分解在钢水红外图像去噪中的应用[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 628-632.  
MA Cuihong, GAO Yue, MENG fanwei. Application of sparse decomposition in infrared image denoising of molten steel[J]. *Applied Optics*, 2016, 37(4): 628-632.
- [10] 刘俊秘. 基于红外热像的钢水测温模型研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.  
LIU Junmi. Research on Molten Steel Temperature Measurement Model Based on Infrared Thermal Image[D]. Tangshan: North China University of Technology, 2016.
- [11] Maus M, Rousseau E, Cotlet M, et al. New picosecond laser system for easy tunability over the whole ultraviolet/visible/near infrared wavelength range based on flexible harmonic generation and optical parametric oscillation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 36.
- [12] 吴国忠, 李宏佳, 吕妍, 等. 太阳辐射对管道表面发射率测量影响分析[J]. 红外技术, 2016, 38(11): 980-983, 989.  
WU Guozhong, LI Hongjia, LV Yan, et al. Analysis of the influence of solar radiation on the measurement of pipeline surface emissivity[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(11): 980-983, 989.
- [13] Jain A K. *Fundamentals of Digital Image Processing*[M]. Singapore: Prentice-Hall, 1989.
- [14] 矫英祺, 任国全, 李冬伟. 光电系统图像质量评价方法综述[J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 966-971.  
JIAO Yingqi, REN Guoquan, LI Dongwei. Overview of image quality evaluation methods of photoelectric system[J]. *Laser and Infrared*, 2014, 44(9): 966-971.