

# 微间隙焊缝磁光成像 NN-KF 跟踪算法

高向东, 张 驰, 周晓虎

(广东工业大学 广东省计算机集成制造重点实验室, 广州 510006)

**摘 要:** 针对紧密对接微间隙焊缝, 分析基于磁光成像的神经网络补偿卡尔曼滤波(kalman filtering compensated by neural network, NN-KF)跟踪算法, 建立焊缝位置测量模型并运用卡尔曼滤波对焊缝位置偏差进行最优预测. 卡尔曼滤波进行最优估计需建立准确的系统模型和观测模型, 而在焊缝跟踪过程中, 系统噪声具有非先验性. 对于针对测量模型误差、过程噪声和测量噪声对卡尔曼滤波结果的影响, 运用反向传播(back propagation, BP)神经网络对卡尔曼滤波结果进行修正, 补偿模型误差及噪声统计不确定性造成的滤波误差. 结果表明, BP神经网络补偿卡尔曼滤波算法能有效抑制滤波发散, 减小噪声干扰影响, 提高焊缝跟踪精度.

**关键词:** 磁光成像; 焊缝跟踪; 卡尔曼滤波; 神经网络

**中图分类号:** TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)01-0009-04

## 0 序 言

在激光等厚对接焊过程中, 精确控制激光束对中焊缝是保证激光焊接质量的前提<sup>[1]</sup>. 传统焊缝跟踪方法主要为结构光视觉法, 将可见光谱段的结构光横跨于焊缝位置, 在焊缝处形成结构光的突变特征, 通过视觉传感器并经过图像处理识别焊缝位置<sup>[2]</sup>. 然而当焊缝间隙小于0.1 mm时, 结构光在焊缝处的变形极小, 难以对焊缝进行识别与跟踪. 以法拉第磁光效应为理论基础的磁光成像技术, 是一种可以获取紧密对接、肉眼难以分辨的微间隙焊缝的新方法<sup>[3]</sup>. 针对焊接过程中存在较多干扰因素, 可以应用卡尔曼滤波算法减小噪声影响, 提高焊缝跟踪精度.

卡尔曼滤波是一种最小方差状态估计算法, 广泛应用于信息和跟踪系统领域<sup>[4,5]</sup>. 卡尔曼滤波器在理论上是渐近稳定的, 但并不能保证滤波器算法在实际应用中都具有收敛性. 这是因为在实际应用中如焊接系统通常无法得到精确的系统模型和噪声模型, 导致卡尔曼滤波递推算法过程中出现计算误差. 为了抑制滤波器发散, 分析一种利用神经网络补偿卡尔曼滤波的方法, 用神经网络修正卡尔曼滤波误差, 融合卡尔曼滤波的最优估计能力和神经网络

的学习能力, 提高焊缝跟踪的准确性.

## 1 磁光检测焊缝试验

### 1.1 试验系统及焊缝检测原理

试验系统包括激光 YAG 焊接机、三轴运动工作台(含夹具)、磁光传感器、磁场发生器等, 如图1所示. 试验材料选用厚度为1.84 mm的低碳钢板, 试件运动由工作台的精密伺服电动机驱动, 磁光传感器连接于激光焊接头上, 在跟踪过程中摄取焊缝磁光图像.

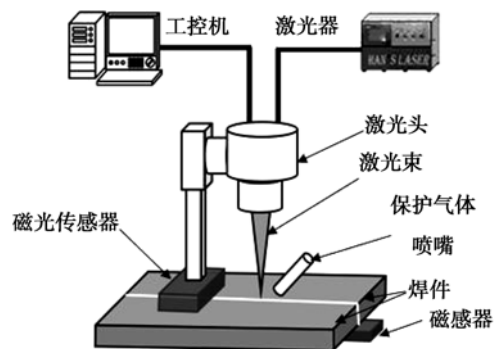


图1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

磁光传感器基于法拉第磁旋光效应原理, 线偏振光经磁光介质时, 其振动面会由于焊缝磁场的存在转过角度 $\theta$ , 并主要与外磁场强度、光在介质中经过的路程有关. 利用磁场测量仪测量偏离焊缝4 mm

收稿日期: 2015-05-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51675104); 广东省科技发展专项资金资助项目(2016A010102015); 广州市科技计划资助项目(201510010089); 广东省计算机集成制造重点实验室开放基金资助项目(CIMSOF2016008)

区域内的磁感应强度,如图 2 所示,磁感应强度分布如图 3a. 所示改变激励磁场强度(激励电压),得到磁感应强度分布如图 3b 所示(高度 0.5 mm),图像横坐标为焊缝中心位置的偏移量,纵坐标为垂直方向磁感应强度大小. 由磁感应强度分布可看出,紧密对接焊缝在电磁场激励下,焊缝处的垂直磁感应强度相对于焊件其它区域发生变化. 随着激励磁场强度的增加或焊件上方距离的减小,磁场在焊缝处的变化越明显. 图 4a 为磁光传感器测得的一幅焊缝磁光图像,由于焊缝处于 N 极和 S 极之间,其对应的磁场强度有个变化过程,对应的磁光图像出现由亮到暗的过渡带,并包含了焊缝的位置信息.

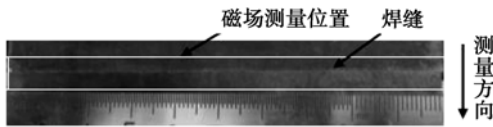
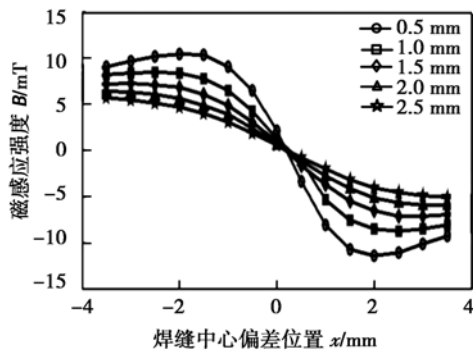
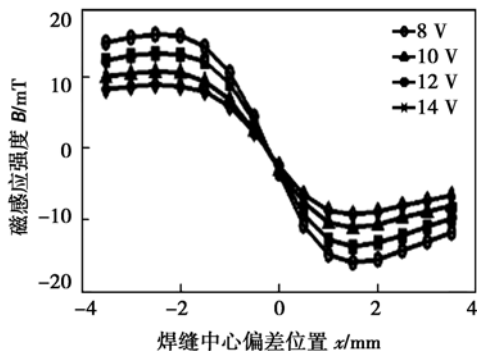


图 2 焊件正面图

Fig. 2 Top view of weldment



(a) 焊件上方不同高度的磁感应强度分布



(b) 磁场激励电压对应的磁感应强度分布

图 3 焊缝区域磁感应强度分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of weld region

## 1.2 焊缝中心提取

对图 4a 的焊缝磁光图像进行中值滤波去噪和灰度变换图像处理,得到每一列灰度分布图,如图 4b 所示. 由图可知,每一列的灰度分布特征近似,

焊缝位置主要对应 70 ~ 220 (灰度) 之间. 对图像进行二值化处理,提取包含焊缝信息的过渡带,根据磁场对称性可知过渡带中心对应焊缝中心,如图 4c 所示.

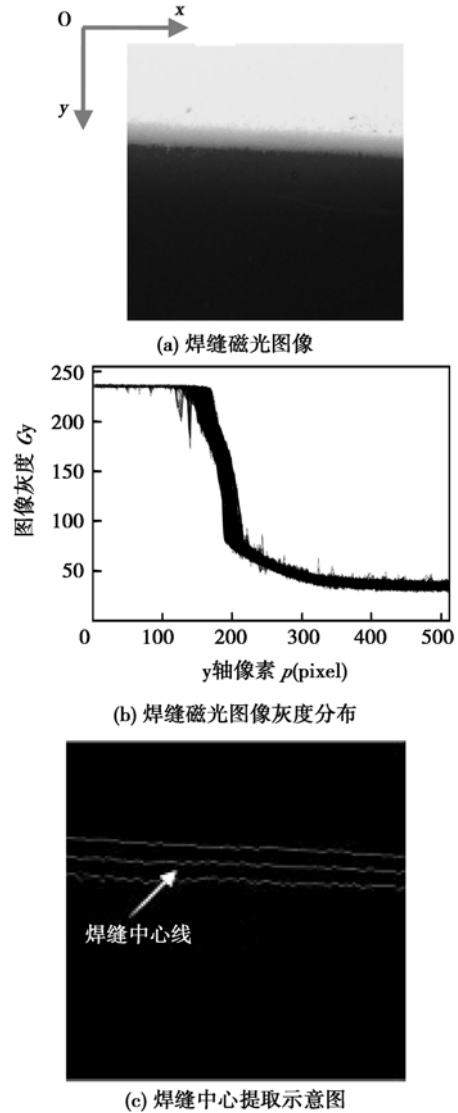


图 4 焊缝磁光图像分析

Fig. 4 Analysis of weld magneto-optical image

## 2 系统状态方程和测量方程

在试验过程中,焊件固定于工作台并与激光头在  $x$ - $y$  平面上做相对运动. 由于焊缝偏差主要集中在  $x$  方向,因此只对  $x$  方向上的偏差进行分析. 设  $k$  时刻焊缝中心位置坐标为  $x(k)$ ,  $(k+1)$  时刻的坐标为  $x(k+1)$ ,则有

$$x(k+1) = x(k) + t \dot{x}(k) + \frac{1}{2} \omega_x(k) t^2 \quad (1)$$

式中:  $\omega_x$  为焊件在  $x$  方向上的随机加速度;  $t$  为采样时间;  $\dot{x}(k)$  为  $x(k)$  的一阶量数.

为了应用卡尔曼滤波消除焊接过程的噪声影响,建立焊缝中心位置状态方程和焊缝位置测量方程. 为此以焊缝中心位置坐标构成状态向量,该状态向量包括焊缝中心的当前位置、相对速度和前一采样时刻的位置.

由式(1)可以得到系统状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}(k) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}t^2 \\ t \\ 0 \end{bmatrix} \omega_x(k) \quad (2)$$

$$= A(k)\mathbf{X}(k) + B(k)\omega_x(k)$$

式中:  $\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ x(k-1) \end{bmatrix}$  为系统状态向量.

为了准确地给出焊缝位置的测量信息,测量向量由焊缝中心位置参数及位移量构成,即  $\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix}$ , 则测量方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{X}(k) + \begin{bmatrix} v_{xp}(k) \\ v_{\Delta x}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= H\mathbf{X}(k) + V(k)$$

式中:  $v_{xp}(k)$  为焊缝位置参数测量噪声;  $v_{\Delta x}(k)$  为位移参数测量噪声.

### 3 BP 神经网络补偿卡尔曼滤波

#### 3.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波处理对象是随机信号,利用系统噪声和观测噪声的统计特性,以系统观测量作为滤波器的输入,以系统的状态量作为滤波器的输出,滤波器的输入与输出之间用时间更新和观测更新相联系. 卡尔曼滤波流程可以用式(4)~式(9)表示<sup>[1]</sup>, 即

$$\mathbf{X}(k|k-1) = A(k-1)\mathbf{X}(k-1|k-1) \quad (4)$$

$$P(k|k-1) = A(k-1)P(k-1|k-1)A^T + Q \quad (5)$$

$$\mathbf{K}(k) = P(k|k-1)H^T / (HP(k|k-1)H^T + R) \quad (6)$$

$$\mathbf{X}(k|k) = \mathbf{X}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)\tilde{\mathbf{Z}}(k) \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}(k) = \mathbf{Z}(k) - H\mathbf{X}(k|k-1) \quad (8)$$

$$P(k|k) = (I - \mathbf{K}(k)H)P(k|k-1) \quad (9)$$

式中:  $Q$  为系统过程噪声协方差阵;  $R$  为测量噪声协方差阵.

#### 3.2 BP 神经网络补偿卡尔曼滤波

在焊接过程中,系统过程噪声方差矩阵  $Q$  和观测噪声方差矩阵  $R$  很难精确得到,不仅会导致滤波结果不精确,还可能导致滤波发散. 状态转移矩阵

$A$  和测量矩阵  $H$  有时也难以确定,如果根据不精确的系统模型进行滤波同样有可能引起滤波发散. 此外焊接过程中模型存在摄动,即  $Q, R, H, A$  参数随时间发生变化,则需要及时估计出变化参数,进而调整滤波增益矩阵  $K$ .

卡尔曼滤波误差  $\Delta\hat{\mathbf{X}}(k|k)$  可以分为由噪声统计特性不确定性带来的滤波误差  $\Delta\hat{\mathbf{X}}_{\text{nos}}(k|k)$  和由系统模型不确定性带来的滤波误差  $\Delta\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}(k|k)$ , 即

$$\Delta\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \Delta\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}(k|k) + \Delta\hat{\mathbf{X}}_{\text{nos}}(k|k) \quad (10)$$

考虑到卡尔曼估计新息值  $\tilde{\mathbf{Z}}(k) = \mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k|k-1)$  包含建模误差,增益  $K(k)$  是噪声方差的函数,所以神经网络的输入选用  $\tilde{\mathbf{Z}}(k)$  和  $K(k)$ , 输出值为滤波补偿值. 网络的作用为减小滤波误差,提高滤波精度和抑制滤波发散. 带有误差补偿的卡尔曼滤波算法结构如图 5 所示,最终滤波输出为

$$\tilde{\mathbf{X}}(k|k) = \mathbf{X}(k|k) + \Delta\hat{\mathbf{X}}(k|k) \quad (11)$$

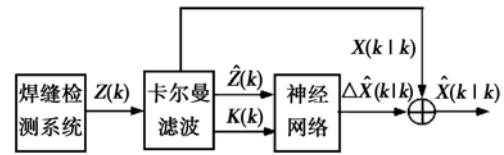


图 5 神经网络补偿卡尔曼滤波示意图

Fig. 5 Structure of neural network compensating for KF algorithm

卡尔曼滤波补偿过程采用 BP 神经网络,利用满足精度的样本离线训练神经网络,网络输入为卡尔曼滤波计算过程中的测量新息值  $\tilde{\mathbf{Z}}(k)$  和滤波增益  $K(k)$ , 输出为滤波值结果与真实值之间的差  $e$ . 测量信息经卡尔曼滤波处理后得到滤波结果,同时将滤波的状态参量输入给训练好的神经网络,神经网络输出补偿值,最后将补偿值与滤波结果结合得到神经网络修正卡尔曼滤波的最优估计. 网络输入层有 2 个神经元,输出层有 1 个神经元,采用一个隐含层,经试验得到当隐含层神经元数  $n = 5$  时,网络可以精确逼近训练样本且不出现过拟合.

### 4 试验结果与分析

试验材料选用两块紧密对接低碳钢板,尺寸为  $100 \text{ mm} \times 79 \text{ mm} \times 1.84 \text{ mm}$ ,焊缝间隙为  $0 \sim 0.1 \text{ mm}$ ,焊件运动由工作台驱动. 为便于观察,将磁光传感器与焊件相对运动控制在较低的速度. 试验采用偏斜焊缝路径,充分反映实际生产环境中激光焊接的跟

踪情况. 激光头行走路径斜跨焊缝, 依次经历左偏、对中、右偏三种情况. 分析动态序列焊缝磁光图像, 通过图像处理得到焊缝中心, 计算焊缝跟踪偏差, 得到焊缝位置参数测量值.

焊接过程中的状态噪声和测量噪声统计特性都未知, 为比较传统卡尔曼滤波 KF 与 NN-KF, 取  $Q = 1 \times 10^{-4}$ ,  $R = [5 \ 0; 0 \ 5]$ , 通过 KF 对焊缝偏差进行最优估计. 建立 BP 神经网络, 以卡尔曼滤波试验结果的前 300 组测量信息值和滤波增益数据为网络训练的输入样本值, 以 300 组滤波误差值数据为网络训练输出目标样本值, 把训练后的网络与 KF 相结合得到新的 BP 神经网络补偿卡尔曼滤波算法. 用 NN-KF 处理后 200 组数据得到焊缝偏差滤波结果, 如图 6 所示. 用焊缝偏差测量值及滤波值减去真实值得到焊缝跟踪误差, 见图 7.

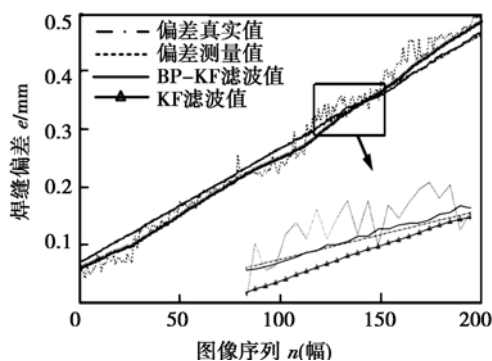


图 6 焊缝位置偏差

Fig. 6 Schematic diagram of the seam deviation

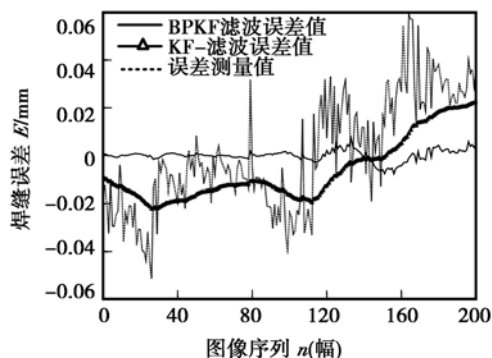


图 7 焊缝跟踪误差图

Fig. 7 Error plots of measurement of KF and NN-KF for seam tracking

表 1 为焊缝跟踪误差统计. 磁光传感器可以探测到焊缝处微小的磁场变化, 分辨率可达 0.01 mm/pixel, 因此其检测的焊缝位置信息较精确, 平均误差为 0.02 mm, 经过 KF 及 NN-KF 滤波后的误差进一步减小. 相比传统卡尔曼滤波, NN-KF 滤波的

最大误差、平均误差和均方根误差都有较大幅度的减小. 因此, NN-KF 滤波能更好地抑制噪声干扰, 得到更精确的焊缝位置.

表 1 焊缝跟踪误差统计

Table 1 Statistics of seam tracking errors

	最大误差 $E_{max}/\text{mm}$	平均误差 $E_{ave}/\text{mm}$	均方根误差 $E_{std}/\text{mm}$
测量误差	0.059	0.020	0.024
KF 滤波误差	0.023	0.013	0.014
NN-KF 滤波误差	0.012	0.008	0.004

## 5 结 论

(1) 采用磁光成像传感方法可以提取焊缝的位置信息, 通过建立系统状态方程和测量方程, 应用卡尔曼滤波对焊缝中心位置进行最优估计.

(2) 针对系统的模型误差和噪声统计特性不确定性带来的滤波误差, 采用 BP 神经网络对卡尔曼滤波结果进行修正, 补偿了噪声特性和系统数学模型不准确性带来的滤波误差, 提高跟踪控制算法的稳定性和精确性, 准确获取焊缝位置.

## 参考文献:

- [1] Gao Xiangdong, You Deyong, Katayama Seiji. Seam tracking monitoring based on adaptive Kalman filter embedded elman neural network during high power fiber laser welding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11): 4315-4325.
- [2] 邹怡蓉, 都 东, 曾锦乐, 等. 基于多视觉特征获取与信息融合的焊道识别方法[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 33-36.  
Zou Yirong, Du Dong, Zeng Jinle, et al. Visual method for weld seam recognition based on multi-feature extraction and information fusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 33-36.
- [3] Gao Xiangdong, Liu Yonghua, You Deyong. Detection of micro-weld joint by magneto-optical imaging[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62:141-151.
- [4] Schuhmann T, Hofmann W, Werner R. Improving operational performance of active magnetic bearings using Kalman filter and state feedback control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 821-829.
- [5] 张 轲, 金 鑫, 吴毅雄. 基于卡尔曼滤波的焊缝偏差实时最优估计[J]. 焊接学报, 2009, 32(12): 1-4.  
Zhang Ke, Jin Xin, Wu Yixiong. Optimal estimation algorithm for real-time welding deviation based on Kalman filtering[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 32(12): 1-4.

作者简介: 高向东, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接自动控制. 发表论文 200 余篇. Email: gaofd666@126.com