

## 应用卡尔曼滤波技术的激光熔覆宽度检测

姜淑娟<sup>1,2</sup>, 王 可<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

**摘要:** 对金属零件激光成形过程闭环控制系统中, 熔覆宽度的检测技术进行了研究, 提出了一种基于卡尔曼滤波技术的熔覆宽度检测方法。利用视觉传感系统获取激光加工过程中的熔池图像, 经过图像处理与图像标定求熔覆宽度作为参量建立系统状态方程和测量方程, 应用卡尔曼滤波算法对图像上的熔宽和熔宽变化进行状态估计, 得到最小均方差条件下的熔覆宽度最佳预测值, 从而减小过程噪声和测量噪声引起的熔覆宽度测量偏差, 测量平均误差由 0.028 mm 降为 0.009 3 mm, 实现加工过程熔覆宽度的精确检测。实验结果证明: 将卡尔曼滤波技术应用到熔覆宽度检测过程中可以大大提高熔宽检测精度。

**关键词:** 熔宽检测; 卡尔曼滤波; 状态估计; 金属零件激光成形; 熔池图像

**中图分类号:** TP202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206003

## Application of Kalman filter in laser molten pool width detection

Jiang Shujuan<sup>1,2</sup>, Wang Ke<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** The laser molten pool width detection technology of the closed-loop control system in metal parts laser forming process was researched. A method of applying Kalman filtering for molten pool width detection in laser forming process was presented. The vision sensing system collected the images of the molten pool in laser forming process. The molten pool width calculated by image processing was used as a parameter to establish a state equation and a measurement equation. A Kalman filter recursively computed the solution over least squares approaches to equations which were established based on an estimation of the width and the displacement in width. The Kalman filter optimized the estimation of the molten pool width at the next sampling time and reduced the measurement errors caused by the process and sensor noises. Experiment results show that measurement average errors decrease from 0.028 mm to 0.009 3 mm. Experiments demonstrate the effectiveness and great improvement of precision by using the proposed algorithm in the molten pool width detection.

**Key words:** molten pool width detection; Kalman filter; state estimation; metal parts laser forming; molten pool image

收稿日期: 2016-04-09; 修订日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51375316; 51305280); 辽宁省自然科学基金(201202173)

作者简介: 姜淑娟(1977年-), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光快速成型与检测方面的研究。Email: 471731297@qq.com

## 0 引言

金属零件激光成形技术是一种新型的金属零件加工技术,它是利用高能量的激光束直接作用在金属粉末上,按照事先规划好的路径进行逐层逐道累积成形金属零件的<sup>[1-3]</sup>。目前该技术存在的一个最大问题是成形零件的质量难以保证,成形零件外形尺寸精度不高。解决这一问题的有效手段是实现加工过程闭环控制,通过对加工过程中输出参数的实时检测,当检测值与理想值之间产生较大偏差时,利用控制器调整激光工艺参数,从而达到改善最终成形零件质量的目的。目前,对加工过程输出参数的检测主要集中在对熔池温度场、熔覆高度以及熔池形状尺寸等参数的检测并形成闭环控制<sup>[4-6]</sup>,而对于熔覆宽度的实时检测或预测还未见报道。激光熔覆宽度是激光成形过程中一个重要中间过程输出参数。熔覆宽度是确定合理扫描间距,改善成形零件表面平整度的关键要素。熔覆宽度受很多加工参数影响,例如激光功率密度、扫描速度、送粉速率、光斑直径大小以及离焦量等都会对之产生影响,而这些参数在加工过程中往往难以保持恒定,从而导致成形过程中熔覆宽度不均匀,成形表面粗糙度大。对熔覆宽度进行实时检测并实现闭环控制是改善成形零件质量精度的一个有效途径,其首要问题是如何实现熔覆宽度的高精度实时检测,文中研究了基于卡尔曼滤波的激光熔覆宽度在线检测方法。

## 1 熔覆宽度视觉传感采集系统

激光成形过程中对熔覆宽度的实时检测是通过在高温液态熔池的实时检测实现的,利用接触测量法显然是不合适的,而视觉传感技术与图像处理技术的发展为熔池的在线检测提供了有效的方法<sup>[7]</sup>。视觉传感系统主要由 CCD 摄像机、窄带滤光片、图像采集卡以及 CPU 数据处理单元等组成,系统组成及安装位置如图 1 所示。窄带滤光片处于 CCD 镜头前,在一定程度上减小了加工现场噪声对图像的干扰。CCD 图像传感系统固定在激光器 Z 轴上,随同 Z 轴一起运动,在熔覆成形过程中与熔池保持相对位置不变,实现动态熔池图像实时采集。利用 Visual C++ 软件开发的应用程序结合 CCD 摄像机和图像

采集卡实现图像在线采集和实时数据处理。CPU 数据处理软件对图像进行灰度分析,通过设置合理阈值将熔池与背景分割,再提取熔池宽度信息,在事先标定好图像像素与实际距离关系的情况下,可以将用像素值代表的熔池宽度换算成实际的熔覆宽度。

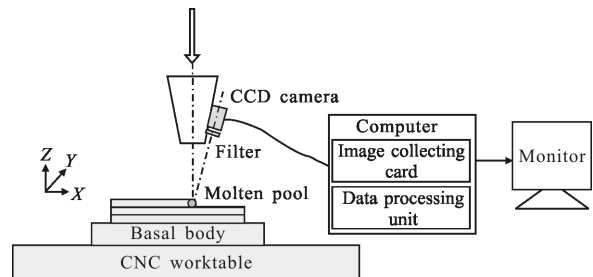


图 1 熔池图像采集与处理系统

Fig.1 Molten pool image collecting and processing system

然而基于图像的熔宽检测方法往往由于加工现场多种噪声对图像清晰度产生干扰,造成测量偏差较大。针对该问题,结合卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)技术的优点,文中建立了基于卡尔曼滤波技术的熔池图像熔覆宽度实时预测模型,利用视觉传感系统实时采集熔池图像,经过图像处理获取熔覆宽度和熔覆宽度变化信息,应用预测模型在时域递推计算信号的最佳估计值,该方法可以有效减小过程噪声和测量噪声对测量结果的干扰。

## 2 KF 在熔宽检测中的应用

### 2.1 熔宽运动状态方程的建立

卡尔曼滤波(Kalman Filtering, KF)技术是通过建立考察对象的状态方程和观测方程,并基于对象观测信号序列,采用一套递推算法求取系统状态的线性最小方差估计,从而获得滤除噪声的有用信号的最优估计方法<sup>[8-9]</sup>。

在  $k$  时刻,采集图像的熔宽测量方程为:

$$w_m(k) = w_r(k) + v_n(k) \quad (1)$$

式中:  $w_m(k)$  为熔宽测量值;  $w_r(k)$  为熔宽实际值;  $v_n(k)$  为测量噪声。

在  $k$  时刻,图像的熔宽变化测量方程为:

$$w_{\Delta m}(k) = w_{\Delta r}(k) + v_{\Delta n}(k) \quad (2)$$

式中:  $w_{\Delta m}(k)$  为熔宽变化测量值;  $w_{\Delta r}(k)$  为熔宽变化实际值;  $v_{\Delta n}(k)$  为熔宽变化测量噪声。

定义状态参数  $x_1, x_2$  和  $x_3$  分别为:

$$\begin{aligned} x_1(k) &= w_l(k) \\ x_2(k) &= \dot{x}_1(k) \\ x_3(k) &= x_1(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

该状态参数包括熔宽的当前值, 当前速度和前一时刻的熔宽值。

激光加工过程中熔池变化基本运动可看作是匀速直线运动附加系统随机扰动等因素引起的随机运动, 状态方程表示为:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix} \omega(k) \quad (4)$$

式中:  $\omega(k)$  为随机加速度, 为系统噪声;  $T$  为采样周期。

基于熔宽和熔宽变化的测量方程为:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} w_m(k) \\ w_{\delta n}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n(k) \\ v_{\delta n}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义  $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\Gamma = \begin{bmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ ,  $X =$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_n \\ v_{\delta n} \end{bmatrix}$$

则公式(4)和(5)可表示为:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \Phi X(k) + \Gamma \omega(k) \\ Y(k) &= HX(k) + v(k) \end{aligned} \quad (6)$$

公式(6)即为所描述系统的动态模型;  $X(k)$  为系统状态参量;  $Y(k)$  为对状态的观测信号;  $\omega(k)$  为系统噪声;  $v(k)$  为观测噪声;  $\Phi$  为状态转移阵;  $H$  为观测阵。  $\omega(k)$ 、 $v(k)$  的统计特性为:

$$\begin{cases} E[\omega(k)] = w(k) \\ E[v(k)] = \eta(k) \\ \text{cov}[\omega(k), \omega(i)] = Q(k)\delta_{kj} \\ \text{cov}[v(k), v(i)] = R(k)\delta_{kj} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $E$  为均值号;  $\text{cov}$  为协方差号;  $\delta_{kj}$  为 Kronecher  $\delta$  函数。

### 2.2 滤波估计递推算法

若  $\omega(k)$ 、 $v(k)$  为高斯白噪声, 则均值及协方差  $w(k)$ 、 $\eta(k)$  为零, 而  $Q(k)$ 、 $R(k)$  为已知常数, 应用卡尔曼滤波理论表示的递推算法为:

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)\varepsilon(k) \quad (8)$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \Phi\hat{X}(k-1) \quad (9)$$

$$\varepsilon(k) = Y(k) - H\hat{X}(k|k-1) \quad (10)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T[HP(k|k-1)H^T + R(k)]^{-1} \quad (11)$$

$$P(k|k-1) = \Phi P(k-1)\Phi^T + \Gamma Q(k-1)\Gamma^T \quad (12)$$

$$P(k) = [I_n - K(k)H]P(k|k-1) \quad (13)$$

初始条件为:

$$\hat{X}(0|0) = E[X(0)]$$

$$P(0|0) = \text{var}[X(0)] \quad (14)$$

卡尔曼滤波对状态  $X(k)$  的最佳估计值  $\hat{X}(k)$  可以看成用  $\hat{X}(k-1)$  的一步最佳预测值  $\hat{X}(k|k-1)$  再加上对新息的校正。

在实际激光成形中,  $\omega(k)$ 、 $v(k)$  通常是有色噪声, 其均值和协方差  $w(k)$ 、 $\eta(k)$ 、 $Q(k)$ 、 $R(k)$  是时变的, 需要采用自适应卡尔曼滤波估计, 即状态估计的同时对噪声均值及协方差也要进行估计, 噪声均值及协方差的估计算法为:

$$\hat{w}(k) = \frac{1}{k} [(k-1)\hat{w}(k-1) + \hat{X}(k) - \Phi\hat{X}(k-1)] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \hat{Q}(k) &= \frac{1}{k} [(k-1)\hat{Q}(k-1) + K(k)\varepsilon(k)\varepsilon(k)^T K(k)^T + \\ & P(k) - \Phi P(k-1)\Phi^T] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\hat{\eta}(k) = \frac{1}{k} [(k-1)\hat{\eta}(k-1) + Y(k) - H\hat{X}(k|k-1)] \quad (17)$$

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{k} [(k-1)\hat{R}(k-1) + \varepsilon(k)\varepsilon(k)^T - HP(k|k-1)H^T] \quad (18)$$

### 3 试验结果分析

为了检验卡尔曼滤波算法在熔宽检测过程中的应用效果, 进行了激光加工试验, 根据激光参数选择与激光成形效果实验, 选取一组成形效果较好的激光参数组合用于试验<sup>[10]</sup>, 具体试验条件如表 1 所示。

表 1 试验条件

Tab.1 Experiment condition

Laser power/W	Scanning speed /mm·s <sup>-1</sup>	Powder flowrate /g·min <sup>-1</sup>	Flow rate of argon /l·min <sup>-1</sup>	Material
700	4	8	3	Ni60

利用以上试验条件加工单道薄壁墙, 为减小成形设定高度与实际加工高度的不一致以及在加工拐

角处误差的影响,实验数据采用加工第一层薄壁时采集的熔池图像作为样本。采集频率设定为 10 帧/s,即采样周期为 0.1 s,实验中该层共采集 200 幅图像,单层加工用时 20 s。对采集的图像进行阈值分割,将熔池与背景分开,并进行必要的滤波处理,提取熔池宽度信息。

KF 法熔宽初始值在  $k=0$  时刻获得,熔宽变化速度初始值在  $k=0$  和  $k=1$  时刻获得,同时可获得  $P(0)$  初始值,将 KF 滤波递推计算公式中的公式(9)用公式(19)代替:

$$\hat{X}(k|k-1)=\Phi\hat{X}(k-1)+\eta(k) \quad (19)$$

熔宽估计值按公式(8)~(13)进行推算,检测过程中噪声按公式(15)~(18)递推计算统计噪声。在成形过程中,同时记录各采样点的图像法熔宽测量值和利用 KF 法的熔宽估计值,取前 10 s 实验数据绘制曲线如图 2 所示。

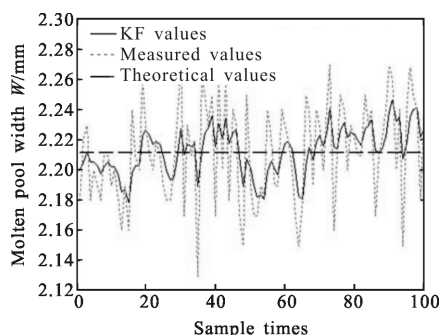


图 2 图像测量法熔宽值与 KF 估计值曲线

Fig.2 Experiment results of images measured values and KF values

从图 2 可以看出,应用卡而曼滤波预测结果比测量结果更接近理想值。比较整个试验过程熔宽的测量误差和滤波估计误差,测量误差的协方差为  $7.85 \times 10^{-3}$ ,滤波估计误差的协方差为  $8.19 \times 10^{-4}$ ,测量绝对误差平均值为 0.028 mm,而应用卡尔曼滤波估计产生的绝对误差平均值为 0.009 3 mm。可以看出:噪声干扰经过滤波后可以得到很大的抑制。在后续研究中,将应用卡尔曼滤波技术的熔覆宽度检测用于激光熔覆宽度闭环控制系统中,获得了均匀一致的熔覆宽度成形效果。

#### 4 结 论

金属零件激光成形技术是一项具有广阔应用前

景的新型金属零件加工技术,如何提高成形零件质量是这一技术面临的一项重要课题,基于图像的熔覆宽度检测与控制技术是解决这一难题的有效途径,而如何提高检测精度是这种方法的关键。将卡尔曼滤波技术应用到熔宽检测过程中能大大减小系统过程噪声和测量噪声对测量结果的影响,提高检测精度,为熔宽的精确控制提供保证。激光加工试验验证了该方法的有效性。在有色噪声的情况下,对噪声进行递推估计计算,使统计误差具有自适应性,卡尔曼滤波估计算法为无偏最优的。将卡尔曼滤波技术应用到激光熔覆宽度在线检测过程中,实现熔覆宽度的在线精确测量,为实现激光加工过程质量控制打下了基础。

#### 参 考 文 献:

- [1] Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, et al. Research of laser cladding forming technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-31. (in Chinese)  
宋建丽,李永堂,邓琦林,等.激光熔覆成形技术的研究进展[J].机械工程学报,2010,46(14):29-31.
- [2] Wang Wei, Li Xinyu, Yang Guang, et al. Microstructures and mechanical properties of laser deposition of TA15 titanium alloy with ultrasonic treatment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3559-3564. (in Chinese)  
王维,李新宇,杨光,等.超声场下激光沉积 TA15 钛合金的组织力学性能[J].红外与激光工程,2015,44(12):3559-3564.
- [3] He Qiang, Zhou Changchun, Bai Xiaoliang. Research on 3D laser rapid forming technology [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(19): 16-18. (in Chinese)  
贺强,周长春,白晓亮.3D激光快速成形技术研究[J].机床与液压,2015,43(19):16-18.
- [4] Hu Dongming, Radovan K. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing [J]. *Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(1): 51-60.
- [5] Ren Weibin, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Research advance and development of laser remanufacture closed-loop control systems [J]. *Laser Technology*, 2016, 40 (1): 103-108. (in Chinese)  
任维彬,董世运,徐滨士,等.激光再制造闭环控制系统的研究现状及发展[J].激光技术,2016,40(1):103-108.
- [6] Lei Jianbo, Yang Xicheng, Chen Juan, et al. Measurement of surface temperature field distribution in molten pool of laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (10):

- 1065–1068. (in Chinese)  
雷剑波, 杨洗陈, 陈娟, 等. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1065–1068.
- [7] Jiang Shujuan, Liu Weijun. Study on real-time measurement for laser molten pool temperature field by images colorimetric method [J]. *Information and Control*, 2008, 37(6): 1–5. (in Chinese)  
姜淑娟, 刘伟军. 利用图像比色法进行激光熔池温度场实时检测的研究[J]. 信息与控制, 2008, 37(6): 1–5.
- [8] Liu Tao, Zhang Wenping, Chen Huifang, et al. Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1643–1647. (in Chinese)  
刘涛, 张文平, 陈慧芳, 等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1643–1647.
- [9] Liu Lei, Shen Honghai, Zhang Bao. Application of Kalman filter in suppressing torque disturbance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2240–2244. (in Chinese)  
刘磊, 沈宏海, 张葆. 卡尔曼滤波器在抑制力矩扰动中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2240–2244.
- [10] Jiang Shujuan, Liu Weijun, Nan Liangliang. Laser cladding height prediction based on neural network [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 269–274. (in Chinese)  
姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 269–274.