

# 基于机器视觉的锭坯轮廓在线检测系统研究

梁振振,马万太,钟霖,邓晓雷  
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**喷射成形是一种基于快速凝固技术的高温合金、高性能材料制备工艺,对喷射成形过程中沉积锭坯的轮廓及其形状特征进行实时、准确地检测是实现喷射成形工艺稳定性控制的关键。基于机器视觉技术研究了喷射成形锭坯轮廓在线检测方法,设计了视觉检测系统结构,对喷射成形生产环境下的锭坯轮廓图像处理算法进行了研究,提出了锭坯轮廓特征提取方法。实验和测试表明,轮廓及直径、喷射高度的检测精度可达1 mm,算法平均运行时间为0.83 s,可以长时间稳定地在线检测沉积锭坯的轮廓。

**关键词:**喷射成形;锭坯轮廓;机器视觉;尺寸检测

**中图分类号:**TP206 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)02-0199-04

## Research on Inspection System of Billet Contour Based on Machine Vision

LIANG Zhenzhen, MA Wantai, ZHONG Lin, DENG Xiaolei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Astronautics  
& Aeronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Spray forming is a preparation process of high-temperature alloy and high-performance material based on rapid solidification technology. Real-time and accurate detection of the contour and shape characteristics of deposited ingot during spray forming is the key to the stable control of spray forming process. In this paper, based on machine vision technology, the on-line detection method of jet forming ingot contour is studied, the structure of visual inspection system is designed and constructed, and the image processing algorithm of billet contour in spray forming production environment is studied. Besides, this paper proposes a new extraction method of the billet contour feature. Experiment and test results show that the detection accuracy of the contour, diameter and the spray height can come to 1 mm, and the average running time of the algorithm is 0.83 s, which can be used to stably do the on-line detection of the contour of the deposited ingot for long time.

**Keywords:** spray forming; ingot contour; machine vision; size inspection

## 0 引言

喷射成形作为继熔铸和粉末冶金后出现的一种新型材料制备工艺,具有快速凝固和近终形技术特点,在高性能合金材料领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。喷射过程稳定性是喷射成形工业化应用的基础。

喷射过程中,工艺参数的波动会直观反映在锭坯沉积表面形态的波动,如锭坯轮廓、锭坯直径、喷射高度的变化,而这些变化会导致雾化锥物质状态的变化,最终产生锭坯内部组织的不稳定和材料质量波动<sup>[2]</sup>。研究喷射成形过程中沉积锭坯的轮廓尺寸变化规律,可以为建立沉积锭坯与工艺参数关系模型提供依据,同时为实现工艺闭环控制提供反馈<sup>[3]</sup>。

喷射成形工艺是在高温、封闭、高粉尘的环境下进行的,沉积坯的轮廓尺寸检测必须采用非接触式的测量方法,主要有激光测量法和机器视觉法<sup>[4]</sup>。激光测量法采用激光测距仪通过测量距离的方法间接地检测沉积锭坯的直径、喷射高度信息。但该方法为单点测量,仅能检测

某一固定位置的尺寸;生产环境中大量粉尘使光线发生漫反射,使其工作不稳定。机器视觉法在尺寸测量、缺陷检测的应用较为广泛。采集的信息范围广,对沉积锭坯的特征提取更加多元化<sup>[5]</sup>。

本文基于机器视觉技术研究开发锭坯轮廓在线检测系统,实现对喷射成形过程锭坯轮廓及其形状特征的在线采集和处理。

## 1 锭坯轮廓检测系统总体方案

图1(a)为双喷嘴扫描斜喷式圆柱锭坯喷射成形装置。熔体经过喷嘴时,被高压惰性气体(氮气)破碎成由细小合金液滴组成的雾化锥,并高速飞行至沉积表面,雾化锥在沉积表面不断沉积、融合、铺展、生长形成圆柱锭坯。锭坯沉积生长的同时,收集器由电机/丝杠带动旋转并下拉。喷射过程中,沉积室为高粉尘环境。

图1(b)所示为工业相机安装示意图。相机水平安装,在图像采集前,由万向水平仪进行校准。相机位置高于沉积坯表面约30 mm,因此相机拍摄的沉积锭坯表面为

椭圆形。

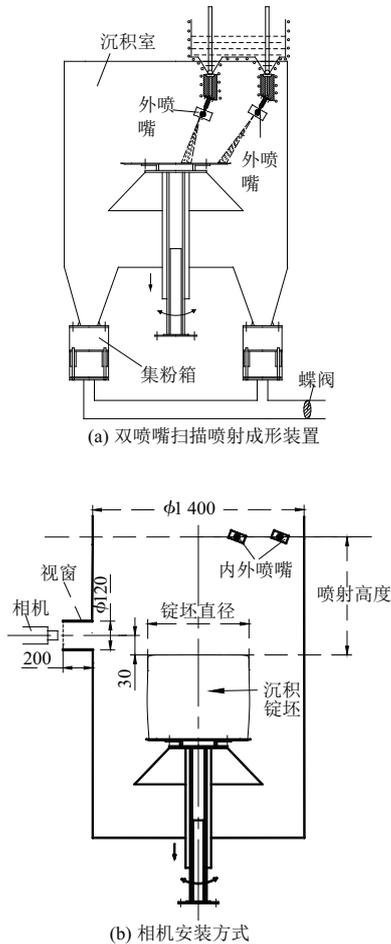


图 1 喷射成形装置及图像采集方式

根据喷射工艺对铈坯轮廓的检测要求,结合被测对象的环境背景,设计的喷射成形轮廓在线检测系统结构如图 2 所示。系统主要包括工业相机、相机镜头、光源及其布置、PLC、编码器、图像处理模块、人机交互模块等部分,系统可以通过以太网同时监控多条生产线。

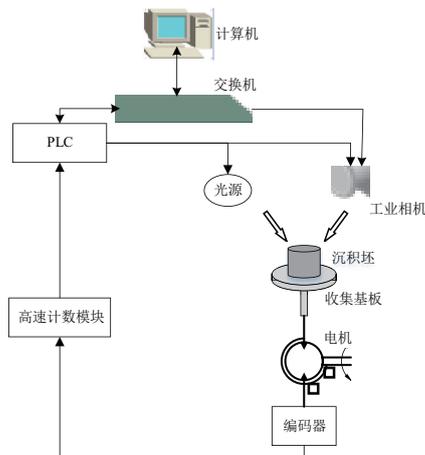


图 2 沉积铈坯尺寸检测系统结构

相机及光源的拍摄动作由 PLC 按照设定的图像采集周期触发控制,工业相机采集沉积铈坯的图像数据;工业

相机通过 GigE 通讯协议将图像数据传输给计算机;应用程序根据图像处理流程和算法对图像进行处理,提取图像中沉积铈坯的轮廓和尺寸特征,并显示和存储;在收集基板下拉机构的丝杠轴上安装编码器,采集和计算 1 个检测周期内收集底板的下降位移,用于拟合和生成铈坯生长过程。

## 2 图像处理算法

应用程序对相机采集的图像进行算法处理,获得铈坯轮廓、轮廓特征(直径、喷射高度),本文根据喷射成形工艺特点采用的处理算法主要包括:图像增强、阈值分割、轮廓提取、尺寸测量。

### 2.1 图像增强

熔体雾化是喷射成形过程之一,在喷射沉积中约有 30% 的过喷粉末沉积不到铈坯上,沉积室环境中存在大量的粉尘,是沉积铈坯图像的主要噪声源;此外,光照、外界环境或设备本身也会给图像带来噪声。在对沉积铈坯图像处理之前,必须对图像进行相应处理。

喷射成形沉积室中粉尘属于椒盐噪声,采用中值滤波去除噪声;图像中的外界环境其他设备属于白噪声,采用高斯滤波进一步进行图像的预处理。其中,中值滤波器使用  $5 \times 5$  模板,高斯滤波器模板为:

$[i,j]$	-2	-1	0	1	2
-2	0.018	0.082	0.135	0.082	0.018
-1	0.082	0.368	0.607	0.368	0.082
0	0.135	0.607	1	0.607	0.135
1	0.082	0.368	0.607	0.368	0.082
2	0.018	0.082	0.135	0.082	0.018

图 3(a) 所示为经过 ROI(Region of Interest 感兴趣区域)提取、去噪后的沉积铈坯灰度图像,图像深度为 8 位,图像分辨率为  $548 \times 340$ 。图 3(b) 为其灰度分布直方图,可以看出;其灰度分布范围为  $[7, 88]$ ,灰度仅仅分布在灰度级的低段区域,图像较暗、对比度低,不利于图像进行阈值分割。



(a) ROI 灰度图像

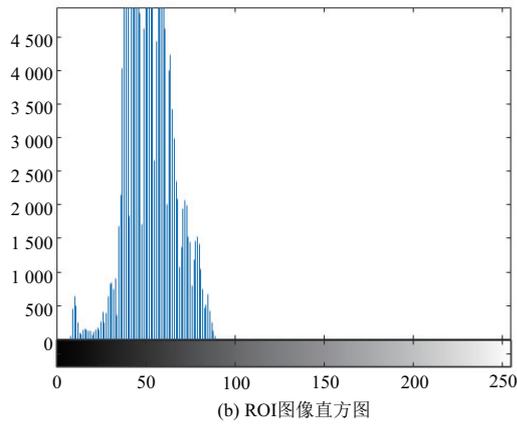
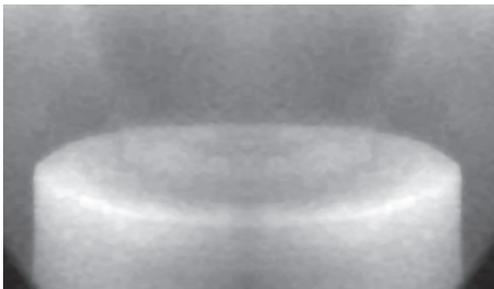


图3 ROI图像及其灰度分布

本文采用最大线性增强方法对图像进行增强处理。最大线性增强主要通过线性拉伸来宽展灰度的分布范围,从而增强图像对比度。其线性关系式为:

$$g(x,y) = \frac{[f(x,y) - a]}{b-a} \times 255 \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 分别为 $(x,y)$ 位置处变换前和变换后的灰度值; $a$ 、 $b$ 分别为原图像的最小灰度级别和最大灰度级别。图像增强效果如图4所示。可以看出:图像对比度得到了明显增强,灰度级范围从处理前的 $[7, 88]$ 扩展到了整个灰度级 $[0, 255]$ 。



(a) 灰度图像

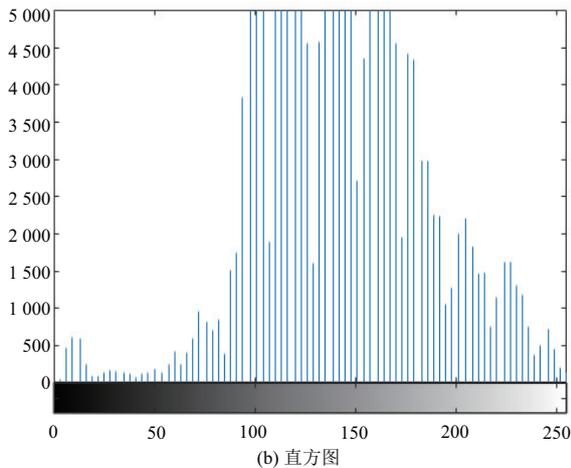


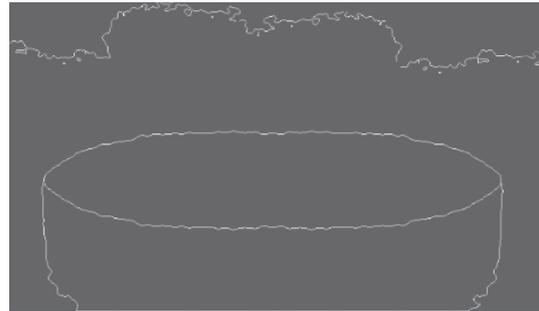
图4 最大线性增强后的图像及其灰度分布

## 2.2 边缘提取

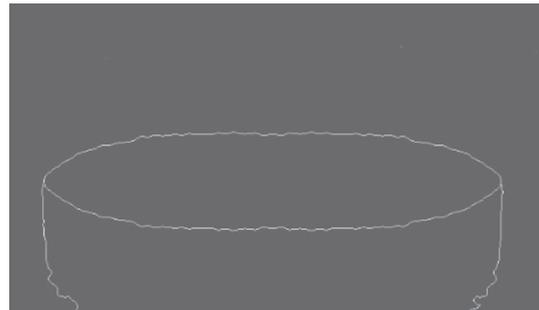
由于锭坯尺寸检测系统的对象是锭坯的增长过程,进

行阈值分割时,阈值的大小可能会发生变化。本文采用OSTU(最大类间方差法)自适应获取阈值,利用该阈值将灰度图像分割为二值化图像。获取二值化图像之后,使用findContours算法获取所有连通域的边缘。

图5(a)所示为findContours算法处理结果。由图可见,处理目标边缘之外,还存在许多其他无关边缘,因此需要筛选出目标边缘。本文根据沉积锭坯图像宽度、高度、宽高比3个变量的范围进行筛选。其中高度范围为 $[95, 340]$ ,宽度范围为 $[400, 584]$ ,宽高比范围为 $[1.5, 6]$ ,将不在指定范围之内的边缘剔除,筛选结果如图5(b)所示。



(a) findContours获取边缘



(b) 筛选后边缘

图5 边缘提取

## 2.3 轮廓特征检测

在沉积锭坯轮廓处理的基础上,进一步进行轮廓特征检测,检测内容包括:沉积锭坯直径和喷射高度。提出了沉积锭坯直径与高度检测算法,其原理如图6所示。其中直线 $O_1O_2$ 为沉积锭坯的中心线(为收集基板的回转中心,固定不变),直线 $O_1O_2$ 与椭圆交于 $P_1$ 、 $P_2$ 两点,线段 $P_1P_2$ 即为椭圆的短径。取线段 $P_1P_2$ 的中心 $O$ 即为椭圆的中心,

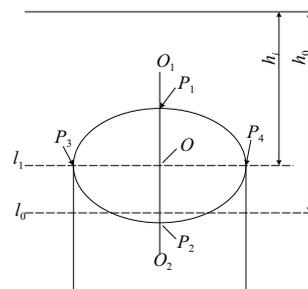


图6 尺寸检测原理

过中心  $O$  且与直线  $O_1O_2$  垂直的直线  $l_1$  与椭圆交于  $P_3$ 、 $P_4$  两点,线段  $P_3P_4$  即为椭圆的长径,也即沉积锭坯的直径。直线  $l_0$  为喷射成形装置收集器初始位置,即加工沉积锭坯表面的初始位置。 $h_0$  为沉积锭坯初始位置与喷嘴所在位置的垂直方向的距离。 $h_i$  为所求喷射高度,表示锭坯表面的当前位置与喷嘴之间的垂直距离,在图像中即为  $P_3$  或  $P_4$  任意一点的纵坐标。

### 3 系统测试

对系统检测精度和系统稳定性进行了测试。本文实验对象为某公司 SFZD500 生产线。喷射对象生产直径为 500 mm,高度为 1200 mm 的 7055 铝合金沉积锭坯。1 个锭坯的喷射时间约 50 min。

1) 在喷射过程中每隔 3 min(检测间隔 60 mm,下拉速度为 20 mm/min)采集 1 次锭坯图像,进行图像处理获得锭坯直径,共记录 20 组数据。然后由人工在相应位置测量锭坯直径。20 组测试结果表明,锭坯直径检测精度达到 1 mm,算法平均运行时间为 0.83 s。

2) 进行整个沉积锭坯生产过程的系统测试,采集图像并处理,记录锭坯直径测量结果,图像采集周期为 1 s。在整个检测过程中,系统工作稳定,符合沉积锭坯实际生产情况。

### 4 结语

本文基于机器视觉技术研究开发了喷射成形沉积锭坯轮廓在线检测系统,实现对喷射成形生产过程中的锭坯轮廓及其形状特征参数的实时、在线检测和处理。在 SFZD500 喷射成形生产线上对开发的系统进行了检测精度测试和系统稳定性测试。测试结果表明,系统检测精度达到 1 mm,算法平均运行时间为 0.83 s,可满足喷射工艺要求。系统能够长时间稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] SEOK H K, OH K H, RA H Y, et al. A three-dimensional model of the spray forming method[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, 29B(3): 699-708.
- [2] 曲迎东, 马振涛, 李晨希, 等. 柱状喷射沉积锭坯图像处理法的精确检测[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(2): 56-60.
- [3] 宋红媛. 喷射沉积管坯的形貌模拟及喷射高度的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [4] 刘腾. 双喷嘴喷射成形锭坯沉积生长机理研究及参数优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [5] 项森伟. 高温单晶硅液位和直径视觉检测关键技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

收稿日期: 2019-01-07

(上接第 198 页)

#### 参考文献:

- [1] 刘洋, 史黎明, 赵鲁, 等. 一种基于混合型磁链观测器的异步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 157-160.
- [2] 杨建飞, 胡育文. 永磁同步电机最优直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 109-115.
- [3] 杨金波, 李铁才, 杨贵杰. 一相开路双三相永磁同步电机建模与控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 167-173.
- [4] 吕帅帅, 林辉, 马冬麒. 基于最优占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 35-42.
- [5] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 80-85.
- [6] 于海, 刘英杰. 变频器在电厂中的应用及调试[J]. 电气技术, 2008(9): 97-99.

- [7] 张亮, 陈国栋, 蔡旭. 新型高压变频器设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 55-58.
- [8] 朱云国, 张兴, 刘淳, 等. 无刷双馈风力发电机的无速度传感器矢量控制技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 125-130, 136.
- [9] 孙国霞, 李啸聪, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-73.
- [10] 朱智勇, 余世明, 施金培. 基于模糊 PI 控制的三相异步电机 Simulink 建模与仿真[J]. 机电工程, 2012, (1): 53-57.
- [11] 卜文绍, 王少杰, 黄声华. 三相无轴承异步电机的解耦控制系统[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(12): 32-37, 43.
- [12] 王斌, 王跃, 郭伟, 等. 基于定子磁链降阶状态观测的永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014(3): 160-171, 195.

收稿日期: 2018-11-27