

基于数字图像分析的颗粒生长监测技术

陈震, 陈鹿民

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:为了实现滚筒造粒过程中对球形颗粒生长的精确控制,提出基于数字图像分析技术的球形颗粒尺寸在线检测方法,使用工业数码相机搭建颗粒图像采集实验平台,开发图像分析软件。结果表明,该方法对单幅图像的分析时间为 0.9 s;系统对粒度检测的可重复精度约为 $\pm 1\%$,与千分尺测量的粒度相比,误差约为 $\pm 3\%$;该方法可用于构造造粒机的视觉反馈控制系统,以实现颗粒生长过程的闭环控制。

关键词:滚筒造粒;数字图像分析;颗粒粒度

中图分类号:TQ051.9 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2013)02-0007-04

Research on Particle Growth Monitor Technology Using Image Analysis

CHEN Zhen, CHEN Lumin

(School of Electromechanical Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To accurately control the spherical particle growth in rotary drum granulation, an on-line particle size inspection method based on the image analysis technology was proposed. Experimental platform of particle image recognition was built using industrial camera, and image analysis software was developed. The results show that the parsing time for a single image is 0.9 s. The repeated precision of the particle size measurement is around $\pm 1\%$, and the error compared with the micrometer measurement is around $\pm 3\%$. The proposed method can be used to structure vision feedback control system to granulator for realizing the closed-loop control of particle growth.

Key words: rotary drum granulation; image analysis; particle size

滚筒造粒是通过旋转筒体带动物料翻转完成造粒过程,具有容量大、工艺简单等优点;然而,现有造粒设备智能化程度低,颗粒检测多为离线检测,如筛分法、沉降法等^[1],产品质量较难控制。筛分法是最早使用的粒度分布分析方法^[2],该方法测量结果可靠,但

操作复杂。沉降法的检测速度虽然可以通过离心加速加快沉降,但检测速度仍较小^[3]。图像分析法是基于数字图像的颗粒测量技术,与筛分法可靠性相同,并且测量速度、经济性均有提高^[4]。该方法用于颗粒的在线检测,通过对颗粒粒径的实时监测,可提高造粒的成品率。Y. K. Yen 等^[5]利用图像分析技术对开放空间下皮带传输中的粗糙矿石颗粒进行在线检测,并对颗粒重叠对测量结果的影响进行了研究。S. Watano 等^[6]针对流化床造粒的特点,设计了在线检测系统,并实时检测颗粒的大小,动态控制造粒过程。本文中针对非金属矿造粒过程中需要实时监测滚筒造粒设备中颗粒生长情况,实现精确控制球形颗粒生长的要求,提出基于数字图像分析技术的球形颗粒尺寸在线检测方法,使用工业数码相机分段定期采集颗粒图像,并开发图像分析软件,搭建模拟检测环境的实验平台。

1 实验装置

滚筒造粒是一个动态调节的过程,造粒控制系统根据检测系统反馈的颗粒尺寸调节滚筒转速、物料加速度以及颗粒搅拌速度,其控制系统结构如图 1 所示。图像检测系统通过在线多点检测由颗粒采集平台获取的颗粒,可实时获取颗粒的生长状况。粒度检测系统由硬件系统和软件系统 2 部分组成:硬件系统主要负责颗粒图像的采集和为颗粒图像的计算提供硬件支持;软件系统涉及颗粒图像的降噪、重叠颗粒的分割以及特征数据的提取运算。

硬件系统由采集模块、存储计算模块和显示模块

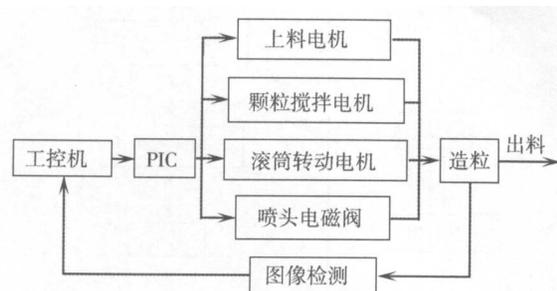


图 1 滚筒造粒控制系统结构

Fig. 1 Structure of rotary drum granulation control system

收稿日期:2012-10-12,修回日期:2012-11-18。

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863计划)项目,编号:SS2012AA063103。

第一作者简介:陈震(1988—),男,硕士研究生,研究方向为颗粒加工控制技术。E-mail:chen.andy1988@gmail.com。

通信作者:陈鹿民(1963—),男,教授,研究方向为机电系统。E-mail:luminchen@zzuli.edu.cn。

3 部分组成,分别执行颗粒图像的采集、颗粒尺寸的计算和计算结果的输出。颗粒图像采集实验平台结构如图 2 所示。实验平台使用 3×10^6 像素面阵电荷耦合器件(CCD)为图像采集设备,高亮度发光二极管(LED)白色背光为光源,2.2 GHz 主频双核电脑为图像处理设备。测量前,调节相机垂直于背光灯面板,并把球形颗粒均匀地布置在背光光源面板上;采集到的颗粒光学图像经数据采集卡转换成数字图像后传送到计算机;计算机调用图像处理软件分析提取图像特征信息,并将该信息存储至计算机硬盘。

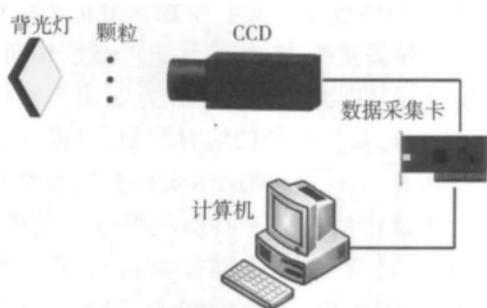


图 2 颗粒图像采集实验平台结构

Fig. 2 Experimental platform structure of particle image recognition

为了获得颗粒的实际值尺寸,可通过对相机标定将图像尺寸单位换算成实际尺寸单位。实验平台使用 5 mm 钢球对相机进行标记。可通过下式得出钢球的实际面积与图像像素值的比例因子 $K=0.02 \text{ mm}^2/\text{像素}$:

$$K = \frac{S}{N_p}, \quad (1)$$

式中: S 为拍摄图像的实际面积, mm^2 ; N_p 为该面积所占像素点数。

2 图形分析算法

图像分析流程如图 3 所示。颗粒图像分析算法由图像的预处理、阈值处理、重叠颗粒分割及特征信息提取等几部分组成。通过对颗粒图像的特征信息分

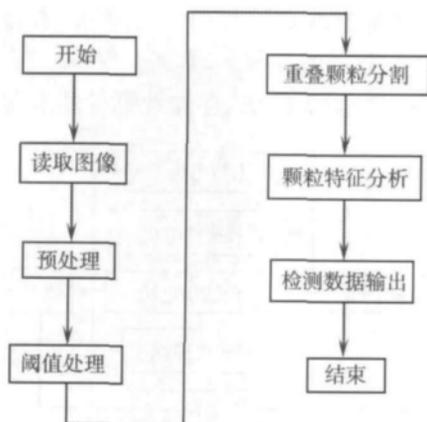


图 3 图像分析流程图

Fig. 3 Flow chart of image analysis

析,可计算出颗粒尺寸。

2.1 图像预处理

图像预处理可以在一定程度上抑制噪声对图像质量的影响,强化特征区域,降低外部干扰对测量结果的影响。在造粒机滚筒内,漂浮的原料粉末、电磁干扰等均会导致图像质量的下降。为了降低干扰,使用中值滤波对图像进行预处理。

中值滤波器是非线性数字滤波技术。该技术将与周围像素点灰度值的差比较大的像素点改取与周围点灰度值接近的真实值,从而消除孤立的噪声点^[7]。中值滤波器对椒盐噪声的去除效果较好,同时能保护图像边缘,其滤波输出为

$$g(x,y) = \text{med}\{f(x-k, y-l), (k, l \in W)\}, \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 、 $g(x,y)$ 分别为原始图像和处理后图像在 (x,y) 点的灰度值; W 为二维模板; med 为中值操作。

图 4 为颗粒的处理图像。传统中值算法的计算复杂度为 $O(r^2 \lg r)$, 其中 r 为模板半径。S. Perreault 等^[8]通过对列直方图 2 个像素点的增减变换,更新了内核直方图,将二维中值计算的平均复杂度由 $O(\lg^2 r)$ 和 $O(\lg r)$ 降至接近 $O(1)$, 处理结果如图 4(b) 所示。

2.2 图像阈值处理

图像的阈值处理将图像由灰度图转换为二值图。即当图像中某点的像素值大于或等于阈值 V_p 时,将该点像素值设为 1; 其他小于该阈值的点的像素点值设为 0。此时图像为用 0、1 表示的黑白图像(如图 4(c))。其原理表示为

$$B(x,y) = \begin{cases} 1, & h(x,y) \geq V_p, \\ 0, & h(x,y) < V_p. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h(x,y)$ 为图像中 (x,y) 点的灰度值; $B(x,y)$ 为 (x,y) 点在二值图像中的像素值。

为了获得合适的阈值 V_p , 将颗粒的轮廓清晰地划分出来,选用聚类法对图像阈值分割。阈值 V_p 应符合如下条件:

$$V_p = \frac{m_1 + m_2}{2}, \quad (4)$$

式中: m_1 为图像中像素值在 $0 \sim V_p$ 之间所有像素值的平均值; m_2 为图像中像素值在 $V_p + 1 \sim 255$ 之间所有像素值的平均值。

2.3 重合颗粒分割

形态学分水岭分割算法是基于拓扑理论的数学形态学分割算法,利用分水岭算法可实现图像快速分割,但噪声点和破碎颗粒会造成图像过分割。使用基于标记点的分水岭分割算法可解决过分割问题。该算法通过先验知识向计算机指定前景区域,从而与背景分离。

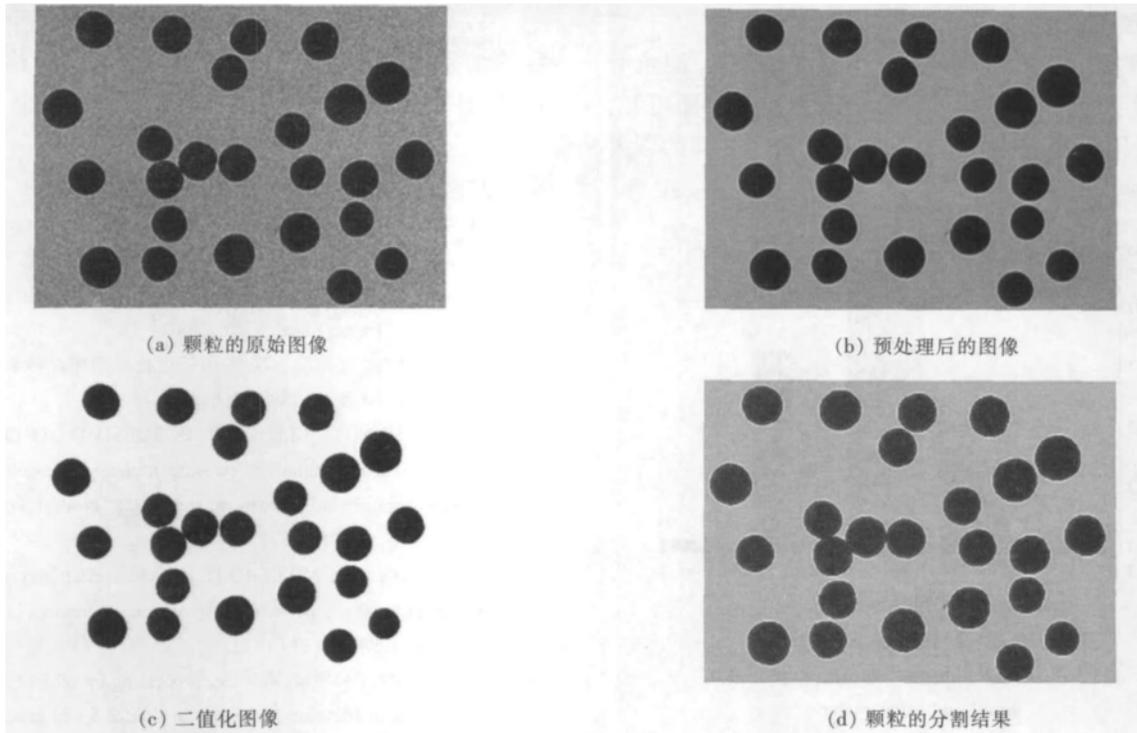


图 4 颗粒的处理图像

Fig. 4 Process results images of particles

· 颗粒测试与表征 ·

为了保证将颗粒与背景分离并将重叠颗粒分割, 使用颗粒中心点为标记点。通过 3×3 的结构元素对重叠颗粒腐蚀, 可使其细化分割成单个部分; 然后使用椭圆拟合算法找到颗粒的中心点。

最小二乘法是最早提出的椭圆拟合方法, 拟合原理是先设定一个椭圆参数, 然后计算 n 个待拟合点到所设椭圆的距离之和, 求出使这个和值最小的参数也就得到了最佳的拟合椭圆。椭圆隐式方程^[9]可表示为

$$F(a, p) = a \cdot p = qp^2 + bpq + cq^2 + dp + eq + f = 0, \quad (5)$$

式中: 椭圆方程系数 $a = [a, b, c, d, e, f]$, $a + c = 1$, 椭圆确定时 a, b, c, d, e, f 为常量, 当其为变量取不同的值时, 可获得不同的椭圆; 椭圆变量 $p = [p^2, pq, q^2, p, q, 1]^T$, (p, q) 为椭圆上的点。最小二乘法的基本原理为

$$D_{\min}(a, b, c, d, e, f) = \sum_{i=1}^n (ap_i^2 + bp_iq_i + cq_i^2 + dp_i + eq_i + f)^2, \quad (6)$$

式中: $D_{\min}(a, b, c, d, e, f)$ 为各样本点到待拟合曲线距

离和的最小值; p_i, q_i 为样本点值。为了减少噪声对椭圆拟合准确性的影响, 对需拟合图像边缘多次随机抽取样本点, 求得与图像距离最小的椭圆参数, 并将其作为拟合椭圆的参数。

浸没过程中, 水从不同标记点涌出, 其流经区域被浸没并给与与涌出点相同的标签。当被浸没区域拥有 2 个不同的标签时, 该区域为不同区域的边界, 并用新的标签标记该区域, 这样就能准确快速的获得颗粒轮廓^[10](如图 4(d)), 该算法对包含颗粒数为 200 的颗粒图像的处理速度约为 0.9 s。

3 结果与分析

3.1 可重复性测试

为了检测系统的可重复精度, 从样品中随机选取一部分颗粒。检测系统对该批样本重复 4 次检测。每次检测, 样本均随机重新排列。表 1 所示为粒径分布的质量分数。可以看出, 系统的可重复误差约为 $\pm 1\%$ 。

表 1 颗粒粒径分布测量的可重复性测试

Tab. 1 Repeatability test of particle size distribution measurement

检测次序	质量分数/%			
	1.18~<1.32 mm	1.32~<1.46 mm	1.46~<1.60 mm	≥ 1.60 mm
1	1.59	21.63	48.42	28.36
2	1.85	22.10	48.33	27.72
3	1.56	22.30	47.83	28.31
4	1.87	22.16	47.42	28.54
误差(最大值-最小值)	0.31	0.67	1.00	0.82

3.2 粒径测量测试

图 5 所示为对一批样品采用千分尺手工测量和采用本套系统测量获得的粒度分布对比。由图可知, 2 种测量结果的总体分布情况相似, 两者之间的误差约为 $\pm 3\%$ 。

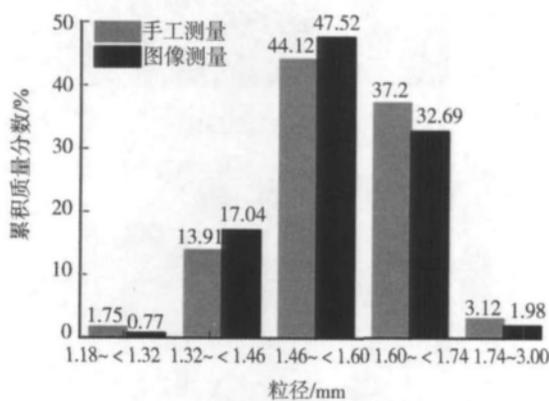


图 5 手工测量与图像测量的粒径分布

Fig. 5 Distribution of particle size measured by hand and micrometer

4 结论

针对滚筒造粒设备颗粒尺寸的生长控制问题提出了基于数字图像技术的颗粒生长监控技术, 该技术可快速、精确检测粒径在 1~3 mm 范围内的颗粒尺寸, 并将检测数据提供给造粒设备的控制系统, 用于构造造粒机的视觉反馈控制系统, 实现颗粒生长的闭环控制。

1) 基于数字图像技术的颗粒生长监控技术对单幅图像的分析时间为 0.9 s, 系统对颗粒尺寸测量的可重复精度可达到 $\pm 1\%$ 。

2) 系统对颗粒尺寸的测量结果与使用千分尺测量的结果相比误差约为 $\pm 3\%$, 该方法可实时检测颗粒粒度, 并可将检测数据提供给造粒设备的控制系统。

参考文献 (References):

- [1] SYVITSKI J P M. Principles, methods and application of particle size analysis[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1991.
- [2] ALLEN T. Powder sampling and particle size determination [M]. Netherlands: Elsevier Science Ltd., 2003.
- [3] 杨铁笙, 詹秀玲, 庞东明, 等. 图像处理技术用于泥沙颗粒分析的研究[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(6): 13-19.
- [4] IGATHINATHANE C, ULUSOY U, PORDESIMO L O. Comparison of particle size distribution of celestite mineral by machine vision Σ Volume approach and mechanical sieving[J]. Powder Technology, 2012, 215/216: 137-146.
- [5] YEN Y K, LIN C L, MILLER J D. Particle overlap and segregation problems in on-line coarse particle size measurement [J]. Powder Technology, 1998, 98(1): 1-12.
- [6] WATANOS, MIYANAMI K. Image processing for on-line monitoring of granule size distribution and shape in fluidized bed granulation[J]. Powder Technology, 1995, 83 (1): 55-60.
- [7] LUCAT L, SIOHAN P, BARBA D. Adaptive and global optimization methods for weighted vector median filters[J]. Signal Processing: Image Communication, 2002, 17 (7): 509-524.
- [8] PERREAULT S. Median filtering in constant time[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16 (9): 2389-2394.
- [9] FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476-480.
- [10] MEYER F. Color image segmentation[C] // International conference on image processing and its applications, 1992: 303-306.