

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106587

基于 OpenCV 的气泡检测系统设计

刁子健 张寿明

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650000)

摘要: 在现代工业生产中,对产品零部件的质量要求很严格,往往因一个零部件的气密性不行,而使产品的性能不能发挥出来,因此对产品的气密性检测提出了很高的要求。针对这一问题,设计了一套基于 OpenCV 的气泡检测系统,用来实现气密性检测。采用技术相对成熟的摄影法为基础,用来实时捕捉气泡图像,首先利用高斯滤波法去除气泡图像中的噪声,并对其进行二值化处理,然后使用基于大律法的 Canny 边缘检测算法检测气泡边缘轮廓,最后通过图像填充算法对气泡轮廓进行填充,并用受力分析法求气泡的体积等参数。为了验证系统的有效性,制作了简易的实验装置,用来判断气泡检测系统是否有效。实验结果表明,基于该算法的系统实时性高,运算速度快,剪度高且能够达到 94% 以上有效性。

关键词: 气泡检测系统; CCD 传感器; 图像处理; OpenCV

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Design of bubble detection system based on OpenCV

Diao Zijian Zhang Shouming

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: In modern industrial production, the quality requirements for product parts are very strict. Often the performance of the product cannot be exerted due to the poor airtightness of a part. Therefore, high requirements are put forward for the airtightness test of the product. Aiming at this problem, this paper designs a set of bubble detection system based on OpenCV, which can be used to achieve air tightness detection. The relatively mature technology of photography is used as the basis to capture bubble images in real time. First, Gaussian filtering is used to remove the noise in the bubble image, and the binarization process is performed, and then the Canny edge detection algorithm based on the big law is used. The edge contour of the bubble is detected, and finally the bubble contour is filled by the image filling algorithm, and the volume of the bubble is calculated by the force analysis method. In order to verify the effectiveness of the system, this paper made a simple experimental device to determine whether the bubble detection system is effective. The experimental results show that the system based on the algorithm has high real-time performance, fast calculation speed, high accuracy and can reach more than 94% effectiveness.

Keywords: bubble detection system; CCD sensor; image processing; OpenCV

0 引言

为了保证产品的质量,消除因气密性而带来的影响,一些滤芯类产品、压力容器在出厂之前需要做进一步气密性检测,如何高效、稳定检测产品气密性,成为该行业急需解决的问题。

液体中气泡的运动情况是复杂的,会受到操作条件和液体性质的影响,因此对气泡的检测也存在较大的难度。当前对气泡检测的方法主要有 3 种:干涉法、毛细管光电法和摄影法。其中干涉法是运用激光多普勒测速的方法,但因不同相对对光的反射折射效果不同,所以会造成测量结

果会有偏差。毛细管光电法在被测装置中插入端口为喇叭嘴形的毛细管不断进行抽吸,使得气泡不断吸入毛细管,流经光电检测器,但是这样会导致毛细管端口附近的流场发生变化,从而不能准确地测出气泡分布情况^[1]。摄影法是一种较为成熟的方法,国外 Rodriguez-Rodriguez 等^[2]用摄影法,利用 PIV 技术,实现气泡破裂的检测。故本文所采用的就是摄影法。

在边缘检测算法研究上,张聪聪等^[3]采用改进的 Canny 算子,弥补了传统缺陷检测的弊端。童胜杰等^[4]提出的改进边缘检测方法,在消除图像中的噪声以及工件表

收稿日期:2021-05-05

面缺陷,也取得了相应的成果。在对气泡体积参数的计算,王红一等^[5]分别运用了几何法和受力分析法对气泡体积进行了计算,对比不同方法下对气泡体积计算有何不同,总结出气泡体积计算的方法。为本系统计算漏气量提供了依据。

本文设计了一个基于 OpenCV 的气泡检测系统,将待测物体放入密封腔体中,将泄露出来的气体引导入水槽中,运用高速相机捕捉气泡,通过图像采集卡,传入计算机中,进行图像处理,计算出气泡的参数,间接求出漏气量,对比输入气体量与泄漏量,从而验证系统的有效性。

1 实验装置组成

图 1 所示实验系统示意图。从图 1 中可以看出整个系统主要有计算机、水槽、高速摄像机、封闭腔体、待测物体、自适应灯光和模拟泄露的注射器。在本实验中高速摄像机的放置位置是在气孔以上 20 cm 处,以便获取单个的气泡图像作为研究对象,减少实验误差。

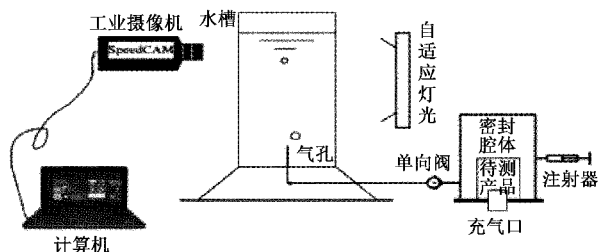


图 1 气泡检测实验装置

本实验设备用来模拟工业环境中气泡产生,可以检验产品的气密性,在本系统中主要用于验证气泡检测系统设计的有效性。在实验之前,需要向密封腔体充入低压气体,确保排除气管中的气体,避免管内气体,干扰实验。

图 2 所示为系统工作简图,主要分为 3 个部分,分别是图像采集模块(视觉传感系统)、计算机处理模块、显示器成像设备。以下是主要硬件介绍。

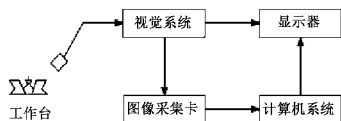


图 2 系统工作简图

1) CCD 传感器

CCD 传感器全名叫做电荷耦合器件图像传感器(charge coupled device),能把接触到的光纤信号转变成电荷信号,可以通过其他转换器转换为数字信号^[6]。一般市面上见到传感器芯片都是由硅制成的,CCD 的工作原理如图 3 所示。诞生之初,一直被当作电脑储存电路,不久 CCD 传感器就广泛的应用到信号处理和摄像领域。

CCD 传感器对比 CMOS 传感器,具有更高的灵敏度,噪声控制也要优于 CMOS 传感器,因此广泛应用高端设备

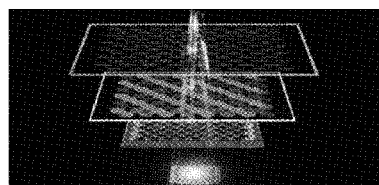


图 3 CCD 的工作原理

中,比如天文学的观察就广泛使用此类传感器,在一些数码相机也存在其身影。CCD 也有分辨率高的优点,主要的类型有面阵 CCD 和线阵 CCD 两种。

2) 图像采集卡

图像采集卡主要用来捕捉外界的光电信号、视频信号等模拟信号将其数字化导入通用计算机中,是一个数字图像采集的捕捉设备,也可以把导入到电脑里面的信号进行编辑处理。

图像采集卡是图像处理部分与数字采集部分的一个接口。对于采集,就是把读取到的模拟信号进行采样以后,将采集到的信号转换为数字图像进行输入处理的过程。由于图像采集的工作需要更加高速的传输速度来传送图像信号因子,那么普通的信号接口无法满足其方面的需求,需要寻求另一方面的方法来弥补此方面的不足,因此需要运用图像采集卡。

2 检测算法模型

在实际工业生产环节中,仅仅对气泡的参数做分析,完全不能满足工业产品的大规模、高效生产,因此在此气泡检测系统中增加了 PLC 控制模块,可以根据软件处理所得到的气泡的参数信息,传送到 PLC 中,进而控制执行机构进行相关运动,最终达到生产的自动化^[7]。

安装在气泡检测设备前方的工业相机来采集气泡的图像,然后将其送入到图像采集卡中,在经过采集卡传送到计算机中进行处理,分别按照图像的采集、预处理、二值化、边缘提取、填充、计算处理,然后求得相应的参数,然后把得到的参数以数字信号的形式送入 PLC 中,执行相关运动。

图 4 所示为算法流程。

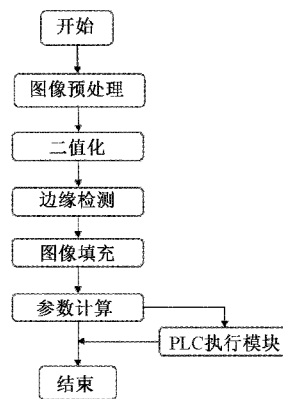


图 4 算法流程

2.1 图像预处理与二值化

在气泡检测过程中,高速摄像机捕捉的实时气泡图像,并不能直接通过边缘检测算法,把气泡的边缘特征从图像背景中分离出来。自适应光照也并不能完全去除环境所带来的噪点,因此为了得到稳定有效的边缘信息,必须消除噪声。

实时的气泡检测预处理和二值化,采用 3 个环节处理:

1) 伪气泡去除

在工业生产环境中,现场环境是随时变化,为了有效去除环境中以及形状上满足气泡特性的干扰,必须通过一定的方法去排除这些伪气泡。本系统中,这些伪气泡我们通过统计每一张图像固定位置出现气泡的概率来排除,通过发现某一个固定位置出现了高概率的气泡,则认为这不是伪气泡。

2) 高斯滤波处理

在图像传输过程中,常常因为多方面的因素,而造成个别数据的丢失或者噪声杂点的干扰,而使图像的质量大大降低,为了降低气泡图像中存在的噪声影响,因此有必要对图像进行去噪处理。本系统采用高斯滤波的方法,来降低这些缺陷带来的影响。

高斯滤波^[8]的去噪,是利用邻域内像素加权平均的方法来进行扫描处理的,需要对均衡状态下的气泡图片,按照卷积模板进行加权处理,如图 5(a)和(b)所示为高斯滤波处理后的图像,图 6 所示为 3×3 领域的卷积模板。

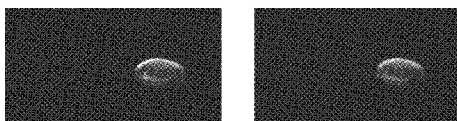


图 5 高斯滤波处理

1	2	1
2	4	2
1	2	1

图 6 高斯滤波卷积模板

3) 图像二值化

关于二值化,就是把一个图像中的像素点灰度设置为 0 或 1(也可以是 0 或 255),这种处理是把整个图像让其显示出明显的黑白效果。也就是把当前所拥有的 256 个灰度等级的图像选取合适的阈值进行黑白化处理,增强实时图像中气泡与背景之间的对比度。

在本设计中,使用的是固定阈值化的方法,采用 OpenCV 软件提供的阈值化函数 threshold^[9]对其进行二值化。根据参数 THRESH_BINARY 二进制阈值,需要对每位参数进行阈值化,然后将其得到的数值,划分一个范围,也即是大于 255 时,设置特定的 *thresh*,将低于 *thresh* 的灰

度值设置为 0,该类型的阈值化如下:

$$Dst(x,y) = \begin{cases} \max val, & src(x,y) > thresh \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

图 7 所示为二值化处理图。



图 7 threshold 二值化处理

2.2 边缘检测

在边缘检测算法中,Canny 算子的检测性能较好,但传统的 Canny 边缘检测器^[10],对于阈值的设置有严格的要求,阈值设置过大可能导致获取的边缘断裂,或者其他不连续的状态;设置太小,可能会检测一些因噪声产生的伪边缘,有可能还会把其中的噪声当作边缘信息提取出来,因此在本系统采用改进的 Canny 边缘检测器^[11-12],采用基于大律法的自适应阈值^[13-14]选取,作为改进点,从而实现自动化阈值设置,不需要人工设置。其基本思想是把图像像素分为两部分:背景与目标,通过计算类之间方差的最大值,获得最佳阈值。

受大律法算法的思想,可以把 Canny 算子中受到非极值抑制后的梯度幅值分为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 这 3 类,分别表示原图中的非边缘点、原图中是否为边缘点的点和原图中的边缘点。其中分别包含多少梯度幅值的像素如下:

$$\begin{cases} \{u_1, u_2, \dots, u_k\} \\ \{t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_m\} \\ \{t_{m+1}, t_{m+2}, \dots, t_l\} \end{cases}$$

其中, K 表示图像像素总数,灰度梯度为 j 对应的像素数为 k_j ,那么 j 的像素占据整个图像像素数的比率为:

$$P_j = \frac{k_j}{K}, j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

整个区间的梯度幅值期望为:

$$E = \sum_{j=1}^l p_j \quad (3)$$

则根据 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的梯度幅值的像素,可以求得定义评价函数 $\delta^2(n, m)$ 。

图 8(a)和(b)分别显示的是传统边缘检测器与自适应边缘检测器的效果图。



图 8 Canny 边缘检测结果

2.3 图像填充与气泡面积、体积计算模型

经过 Canny 边缘检测之后,需要对边缘处理之后的图

像进行填充处理,才能计算出气泡的面积、体积参数。图9所示为图像填充的效果。



图9 图像填充效果

1) 气泡面积

气泡面积是本系统的基本参数,为了方便计算面积,定义气泡连通域内像素总和为气泡面积,计算公式如下:

$$\bar{A} = \frac{\sum_j n_j}{w} \quad (4)$$

式中: \bar{A} 为气泡的平均面积, w 表示气泡的个数,在系统设计中,气泡的个数默认为1, n_j 表示像素值为 j 的点的数量。

2) 气泡体积

因为工业相机在拍摄时,气泡是运动状态的,会受到重力、曳力^[15]、浮力、虚质量力^[16]和液体的推力的影响。在不计重力以及液体推力的情况下,可以根据牛顿第二守恒定律计算出气泡的体积。图10所示为气泡受力分析图。

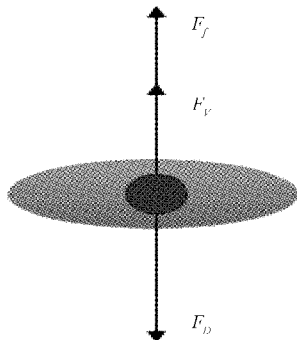


图10 气泡受力分析

由图10可以得出:

$$\begin{cases} F_f = \rho g V \\ F_v = 0.5 V \rho (v_1 - v_2) \\ F_D = -0.5 \rho C_D |v_1 - v_2| (v_2 - v_1) s \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_f 、 F_v 、 F_D 分别表示浮力、虚质量力和曳力,其中 ρ 表示液体密度, V 表示体积, C_D 表示曳力系数, s 是气泡的迎风面积, v_1 和 v_2 分别表示液体的流速、气体的流速。

根据牛顿第二守恒定律可出的平衡方程为:

$$ma = F_f + F_v + F_D \quad (6)$$

可以求出:

$$\bar{V} = \frac{C_D v_2^2 s}{w(2g - a)} \quad (7)$$

因为气泡在上升过程中会发生形变,采用受力分析的方式,会大大减小气泡形变所产生的误差。

2.4 PLC控制模块

图11所示为控制环节,在本系统中增加这一环节,提

供一种工业生产的解决方案。其主要的作用是分离产品,去除不合格产品。在PLC控制模块中,通过导入气泡的面积和气泡的体积参数,对比设置的参数,可以判断产品是否合格,然后通过驱动机构,把产品推送到相应的区域,从而实现检验产品的好坏。

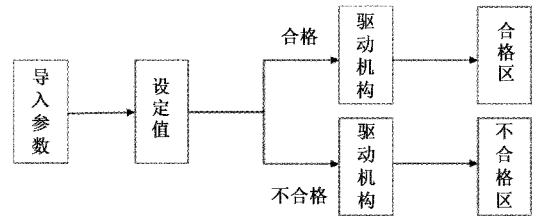


图11 PLC控制模块

3 实验验证与分析

为了验证气泡检测系统能否正确检测气泡,用搭建的实验样机如图1所示(计算平台为戴尔笔记本,高速摄像机为speed cam),对检测系统进行验证,通过比较气体输入量与漏气量,可以判断系统是否满足实际应用中的需求。

在实验中用注射器(容量 $v=1\ 000\ \text{mm}^3$)均速、定量向水槽中注入气体,用来模拟测量待测器件的漏气情况,因为重叠的气泡会给实验带来较大误差,所以对高速摄像机的放置位置有很高的要求,因此选择在出气孔20 cm的位置,以便获取单个上升的气泡作为研究对象,对气孔产生的每个气泡进行处理。本实验,需要分别向水槽匀速、定量注入5次相同容量的气体,然后分别计算每组第1个气泡、第2个气泡,依次类推的平均值,可以得到一组气泡参数,如表1所示。

表1 测量数据结果(泄漏量单位为 mm^3)

时间/min	1	2	3	4	5	6
1组泄漏量	37	86	143	188	226	278
2组泄漏量	40	71	127	183	238	289
3组泄漏量	34	81	135	180	242	288
4组泄漏量	31	77	131	193	223	284
5组泄漏量	33	75	133	192	236	280
气泡面积 \bar{S}/mm^2	13	21	33	40	46	52
漏气量 \bar{V}/mm^3	35	78	134	187	233	281

根据式(8)可以判断是否系统有效,其中 v 指注射器的体积容量。根据上述数据可以求得 $\sum \frac{4}{3} S \sqrt{\frac{S}{H}} - v = -0.043\ \text{cm}^3$
 $\sum V - v = -0.051\ \text{cm}^3$
 求得相对泄漏量相对误差的平均值为5.37%。

$$v = \frac{\sum \frac{4}{3} S \left(\sqrt{\frac{S}{H}} \right)}{\sum V} \quad (8)$$

1) 根据表 1 可以计算出输入和输出之间的差值,求得相对误差。根据测得的平均体积与实际输入气体量可以得出曲线变化图,如图 12 所示,此方法有着 94.63% 的有效性,能够实现快速高效稳定对待测物体的气密性检测,满足工业现场的需求。验证了基于 OpenCV 的气泡检测系统设计是有效可行的。

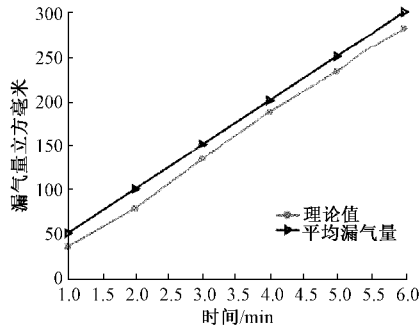


图 12 测量结果与输入值对比分析

2) 根据测得出来的结果相较于输入气体的体积整体是偏小的,导致这一原因,是因为密封腔体有一定的阻尼作用,一定程度上相当于阻尼器的作用,有一定的阻碍作用,导致气泡产生会有一定的延时效果。

3) 在实际的操作过程中,一方面有一定的气体会在操作过程中进入密封腔体内,另一方面在实验开始时需要对密封腔体引入少量气体,实际上并不能保证腔体完全密封,在检测物体的气密性时,很难对这一部分气体做到具体控制,因此会对实验产生一定的影响。

4) 在实例应用中,对待不同的待测物体,密闭腔体也有不同的结构,需要考虑生产环境,选择需要的设备。本系统可以用于对滤清器气密性检测^[17],其具体系统硬件操作平台如图 13 所示,黑色部分为密封腔体,需要充分考虑到密封腔体的气密性,以及设备的自动化程度,以便实现检测的自动化,提高生产效率。通过多次对滤清器进行检测,满足了对滤清器的气密性的在线监测。

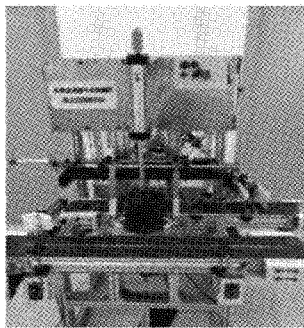


图 13 滤清器气密性检测平台

4 结 论

现阶段,对产品的气密性以及质量检测方法比较单一,

本设计通过用气泡检测的方法,可以达到检测目的,同时也可以判断待测物是否满足要求。本文通过设置工业摄像机的位置而得到单个气泡,方便处理,通过对气泡的受力分析可以求得气泡的漏气量,并对比输入气体的量,得出基于 OpenCV 的气泡检测系统是有效的,是符合工业现场的要求的,可以适用于一些精密器械的检测以及一些压力容器、滤芯类产品的气密性检测。

参 考 文 献

- [1] 吕术森,陈雪莉,于广锁,等.应用电导探针测定鼓泡塔内气泡参数[J]. 化学反应工程与工艺,2003(4): 344-351.
- [2] RODRIGUEZ-RORIGUEZ J, MARTINEZ-BAZAN C, MONTANES J L. A novel particle tracking and break-up detection algorithm: Application to the turbulent break-up of bubbles [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8): 1328.
- [3] 张聪聪,牟莉.基于机器视觉的图像边缘检测算法研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(12):80-85.
- [4] 童胜杰,江明,焦传佳.一种改进工件边缘检测方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(1):128-134.
- [5] 王红一,董峰.气液两相流中上升气泡体积的计算方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(11):2444-2449.
- [6] 寇玉民,盛宏,金祎,等. CCD 图像传感器发展与应用[J]. 电视技术,2008(4):38-39,42.
- [7] 徐自越. 基于 OpenCV 焊缝视觉跟踪图像处理的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2012.
- [8] 张东衡,唐志航,叶鸿明,等.一种气液两相流气相参数图像检测方法[J]. 计算机测量与控制,2006, 14(5):597-599.
- [9] 冈萨雷斯. 数字图像处理:二版[M]. 北京:电子工业出版社,2007:463-491.
- [10] R. C. 冈萨雷斯, R. E. 伍兹. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [11] 唐路路,张启灿,胡松.一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法[J]. 光电工程,2011,38(5):127-132.
- [12] 史久根,张亚.一种改进的自适应 Canny 算子边缘检测算法[C]. 2011 中国仪器仪表与测控技术大会论文集,2011:6.
- [13] 于晓海,张阳,须颖.一种改进自适应阈值的 Canny 算法[J]. 机械与电子,2020,38(1):6-9.
- [14] 宋人杰,刘超,王保军.一种自适应的 Canny 边缘检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2018, 38(3):72-76.
- [15] ZHANG L, CHAPUIS R P, MAREFAT V. Field permeability tests: Importance of calibration and synchronous monitoring for barometric pressure sensors [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 42(1): 43-63.

- [16] KREPPER E, VANGA B N R, ZARUBA A, et al. Experimental and numerical studies of void fraction distribution in rectangular bubble columns[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(4): 399-408.
- [17] 马学刚,丁正龙,李标,等. 滤清器气密性在线监测设备的研制[J]. 景德镇学院学报,2020,35(6):8-10,56.

作者简介

刁子健,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。
E-mail:1740229323@qq.com

张寿明(通信作者),博士,教授,主要研究方向为复杂工业过程控制。
E-mail:2931957518@qq.com