

基于视觉检测算法的浮球密封性检测系统

胡益旻,吴瑞明,傅 阳,柴亚珂

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

摘 要: 气密性是浮球最重要的性能指标,若浮球出现漏气将直接导致水位检测的失效。针对浮球密封性人工检测劳动强度大、效率低、容易漏检等问题,根据恒定水温下浮球密封检测过程中因泄漏而产生的气泡的数量和状态,搭建多工位视觉检测系统,实现浮球气密性的自动化检测。首先通过连续图像抓取获得气泡上升过程中形态实时变化情况,然后基于连续图像相减和形状滤波匹配算法完成气泡有无的判断,并建立气泡特征识别和统计的高斯混合模型以实现泄漏的定性分析和气泡数量的定量分析。经过现场试验,相比人工检测,浮球密封性视觉检测系统效率提高两倍左右,同时还可避免人工检测时因疲劳而产生的漏检风险。

关键词: 密封性检测;气泡;形状滤波;特征识别

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)01-0044-06

Floating ball sealing detection system based on visual detection algorithm

HU Yimin, WU Ruiming, FU Yang, CHAI Yake

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Air tightness is the most important performance indicator of the floating ball, as its leakage will directly lead to the failure of water level control. In response to heavy labor intensity, low efficiency and vulnerability to missing detection in the manual detection of floating ball sealing, a multi position visual detection system was established according to the number and state of bubbles generated in the process of floating ball sealing detection at constant water temperature. The system realized the automatic sealing detection of floating ball. Firstly, the real-time change of bubble shape in the process of rising was obtained by continuous bubble image grabbing. Then shape filter matching algorithm combined with continuous image subtraction were introduced for determining presence of bubbles, while constructing the Gaussian mixture model of bubble feature recognition and statistics dedicated to the qualitative analysis of leakage and the quantitative analysis of bubble number. The experimental

收稿日期: 2019-09-06

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E05003)

通信作者: 吴瑞明(1970—),男,浙江省义乌人,副教授,博士,主要从事无损评价和汽车检测研究。E-mail: wuruiming@163.com。

results show that compared to the manual detection, the efficiency of the visual detection system for floating ball sealing detection is increased about twice, and the risk of missing detection due to fatigue during the manual detection can be avoided.

Keywords: sealing detection; bubbles; shape filtering; feature recognition

密封性是密闭容器的重要性能指标,常见的检测方法有人工检测、高压检测^[1]、光学检测和超声检测等^[2]。人工检测仅根据恒温水中一定时间内的气泡产生情况进行判断,因此准确性低、随机性强。高压检测通过加压、观测压力变化特征进行检测^[3],如制动钳气密性检测^[4]、发动机进气门气密性检测、橡胶制品气密性检测等^[5-6],该方法可以迅速找到泄漏点,但不适合检测体积大的设备^[7]。光学检测,如采用红外热成像法对气密性进行检测,作用距离远、抗干扰能力强,但它只能判断设备表面的缺陷信息。基于超声的密封性检测^[8],如美国的 Javid Huseynov 团队^[9]通过计算漏孔声强和声压来确定漏孔的准确位置和大小,实现密封检测的量化分析,但该方法抗干扰能力弱,容易造成误检。另外,还可采用卤素检测仪^[10]等专用设备检测气体泄漏,专用设备的检测灵敏度高,但成本也较高。总体而言,已有检测方法操作较为复杂,数据采集受试验环境和试验设备影响较大,实用性一般。视觉检测作为一种新的检测方法,可以在恒定的条件下对检测结果进行量化分析,且采用非接触测量,不需要固定参考值,对每种状态都可以进行分析,避免固定参考值带来的误差,增强了检测的可靠性^[11]。因此,本文采用机器视觉检测方式,通过对恒定水温下产生气泡的运动特征分析来检测浮球密封性。

1 检测系统硬件环境

机器视觉检测系统包括采集装置、照明装置、图像处理系统、通信装置及执行装置^[12]。采集装置根据视野面积及检测精度对相机和镜头进行选择,由于获取较好的视野范围才能有较好的检测精度,因此要确保视野范围内均有图像出现,且无其他干扰因素。照明装置根据现场的检测环境,利用工业光源减少自然光带来的光线干扰。同时,不同的光源对成像的质量也有较大的影响,高质量的打光可以通过光源角度、大小、种类及颜色等让检测特征更加突出,从而满足取图要求。图像处理系统通过连续图像相减和形状滤波灰度匹配实现气泡有无的判断,并建立高斯混合模型以实现气泡运动特征的分析 and 气泡数量的统计。通信装置是对检测信息的结果反馈,根据判断条件得到的结果与上位机之间进行通信,通信传递信息包括数据、坐标及结果。常用的通信方式包括 IO 通信、串口通信及 TCP/IP 通信。IO 通信只是对结果做出 1 和 0 判断;串口通信和 TCP/IP 通信都可以对数据信息进行传递。本文选择的通信方式是 IO 通信,是在没有坐标和数字信息的情况下,以最简单的结果传递每个浮球的最佳通信方式。执行装置包括旋转电机、浮球载具、水浴锅不合格品剔除装置。检测论证过程是将检测物体放入浮球载具,由旋转电机带动载具和浮球进入水浴锅,待静置 3 s 后,相机开始拍照取图,对得到的图像进行软件分析。采用形状滤波匹配算法先对图像进行运算,再对运算得到的二值化图像^[13]进行图形的运动特征查找,在查找过程中利用高斯混合模型(Gaussian mixture mode, GMM)分类过滤处理,最后完成过滤后的各状态的特征匹配。

2 基于图像算法的气泡运动分析

2.1 气泡运动状态

浮球因泄漏在水里产生气泡,气泡在不断上升的过程中,由于压强的变化而逐渐膨胀,最后变成固定形态漂浮在水面。在气泡检测的过程中,通过图像运算得到不同阶段气泡的二值化图像。图像运算时,依托两幅图像或多幅图像点对点运算,根据灰度值之间的差异进行加、减、乘、除运算,得到输出图像。

2.2 气泡判别分析

黑白相机取图的灰度值范围通常为 0~255,而在图像运动过程中灰度值只会在区域内发生变化,根

据变化的值,给定阈值,进行差分图像相减运算,即减去图像变化过程中的相似部分,得到差异部分。检测选用 130 万像素的高帧率相机,相机分辨率为 $1\,280\text{ pixel} \times 1\,024\text{ pixel}$,针对视野范围内 $1\,280 \times 1\,024$ 个像素点进行逐个像素点相减。

2.3 气泡运动的图像运算

气泡运动过程中,由于选择高帧率相机,理论帧率 150 帧/s,在对图像继续运算时,去除图像相加减的初帧图像和终帧图像,帧率为 148 帧/s。对每秒采集到的 148 帧图像,采用文献[14]的方法进行差异分析。考虑到效率,我们把检测分为 5 个工位,如图 1 所示。

在符合设定的水温下,将 5 个检测工位分别浸入水中,静置 3 s 后,相机开始连续拍照取图,同时进行连续处理,分别得到气泡产生的 4 种状态,如图 2 所示。



图 1 气泡检测工位图

Fig. 1 Station map of bubble detection

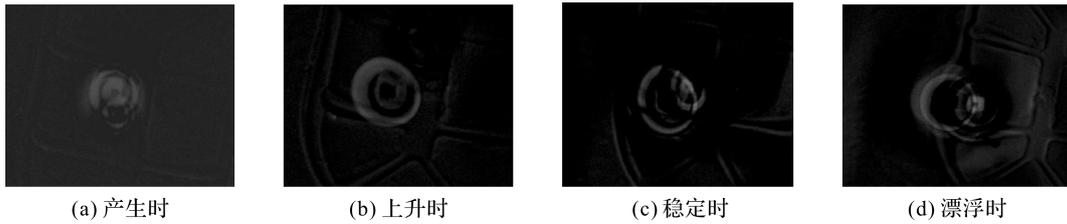


图 2 气泡产生的 4 种状态

Fig. 2 Four states of bubbles being produced

图像运算定义如下:

$$I(i, j) = |I_i - I_j|. \quad (1)$$

式(1)中: $I(i, j)$ 为单个像素根据阈值 ϕ_i 进行像素点相减得到的像素值。相减后,若 $I(i, j)$ 小于阈值,则输出灰度值为 0;若 $I(i, j)$ 大于阈值 ϕ_i ,则输出灰度值为 255。再根据二值化的像素点个数,生成对应的二值化图像。

由于每帧图像相减得到的图像各不一样,所以再根据每帧的图像特征对相应的图像特征进行匹配。完成特定数量的图像匹配后即可得到气泡的检测结果。

3 气泡运动特征查找和处理

3.1 运动特征查找

在气泡运动过程中,经过图像运算后得到二值化灰度图像,每帧二值化图像均伴有气泡依运动轨迹由产生到变大到稳定漂浮的状态变化。而在选取特定的状态特征图像时,根据运动状态做相似度匹配,若相似度匹配依据图像灰度值进行,则称为灰度值模板匹配^[15]。

相似度由绝对误差和 g_{SAD} 、误差平方和 g_{SSD} 两个函数来衡量^[16],计算公式如下:

$$g_{\text{SAD}}(r, c) = \frac{1}{n} \sum_{(u, v) \in T} |t(u, v) - f(r+u, c+v)|; \quad (2)$$

$$g_{\text{SSD}}(r, c) = \frac{1}{n} \sum_{(u, v) \in T} |t(u, v) - f(r+u, c+v)|^2. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $t(u, v)$ 为模板图像的 u 行 v 列的灰度值; $f(r+u, c+v)$ 为待测图像的 $r+u$ 行 $c+v$ 列的灰度值。

由式(2)~(3)可知,模板图像的灰度值 $t(u, v)$ 与待测图像的灰度值 $f(r+u, c+v)$ 越接近, g_{SAD} 和 g_{SSD} 越小,相似度越高。

在视觉检测中发现,自然光的光照变化对待测图像灰度值有较大的影响,光照越强,图像越亮,灰度值变大;反之,灰度值变小。待测图像灰度值的变化引起相似度函数值波动,造成匹配误差。为消除检测过程中自然光对图像灰度值的影响,采用归一化处理,以降低图像灰度值的亮度敏感性,增强鲁棒性。归一

化相关系数 Z_{NCC} 表述如下:

$$Z_{NCC} = \frac{1}{n} \sum_{(u,v) \in T} \frac{t(u,v) - m_t}{\sqrt{s_t^2}} \times \frac{f(r+u,c+v) - m_f(r,c)}{\sqrt{s_f^2(r,c)}} \quad (4)$$

式(4)中: m_t 为平均灰度值; s_t^2 为模板所有灰度值的方差; $m_f(r,c)$ 为待测图像平均灰度值; $s_f^2(r,c)$ 为待测图像所有灰度值的方差。

通过计算得到 $-1 \leq Z_{NCC} \leq 1$ 。当 $Z_{NCC}(r,c) = 1$ 时,模板与待测图像极性相同(如模板为白色对应图像也为白色);当 $Z_{NCC}(r,c) = -1$ 时,模板与待测图像极性不相同(如模板为白色对应图像却为黑色)。图 3 为基于黑色图像提取白色模板信息的图片。

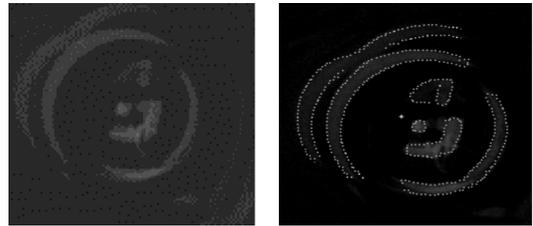


图 3 特征匹配处理

Fig. 3 Feature matching processing

3.2 运动特征分析

由于气泡运动特征图像是由图像运算而得,根据气泡产生的速度和大小不相同,需要在基于特征模板的选取上确定真实的边缘。通常需要根据图像对应的灰度值找到对应黑白图像亚像素边缘。在边缘查找时,由于边缘的黑色点或者白色点属于离散点,因此首先需要对离散点进行数据统计分析^[18]。若要找到边缘,则需找到该直线的线性回归方程进行计算。直线方程如下:

$$\hat{y} = a + bx \quad (5)$$

记 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 为 x 轴方向上各点的观察值, y 轴上对应的各点观察值记作 y_i , 离差 $y_i - \hat{y}$ 反映实际观察值 y_i 与回归直线上相应 \hat{y} 的偏离程度。相对于值的变化,离差值越小越好,越小表示接近程度越高,在直方图中,更逼近标准值,即直线拟合^[19]。

选取边缘局部图像如图 4(a)所示,其灰度值范围如图 4(b)所示,最小值为 1,最大值为 40。

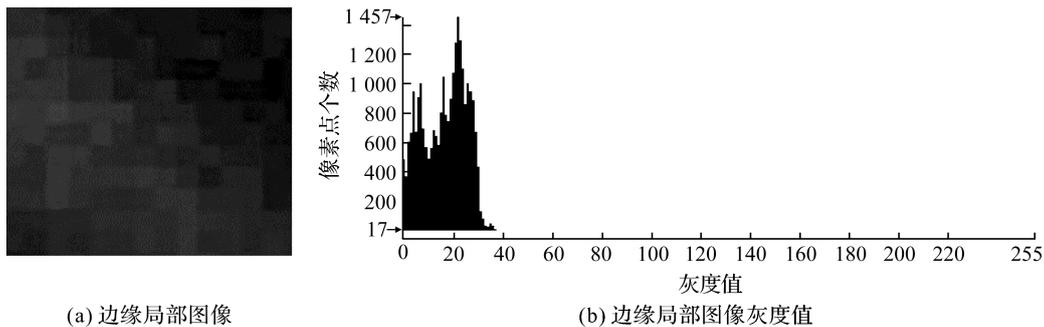


图 4 边缘局部灰度图及边缘局部灰度值分布

Fig. 4 Edge local gray image and edge local gray value distribution

再选取图 3 完整图像做灰度值范围分析,如图 5 所示,最小值为 1,最大值为 77。根据灰度值直方图分析数据,得到边缘灰度值的变化范围为 1~77,阈值为 5 的边缘拟合,如图 6 所示。

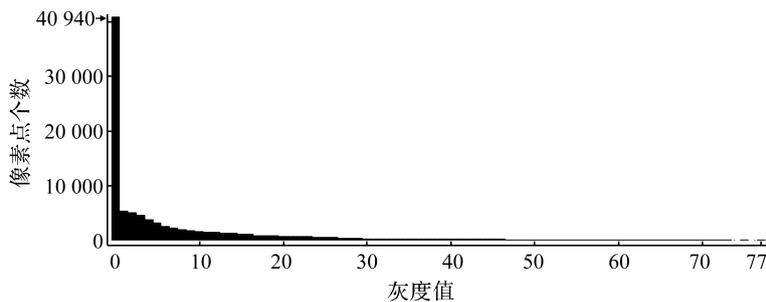


图 5 灰度值范围

Fig. 5 Gray value range

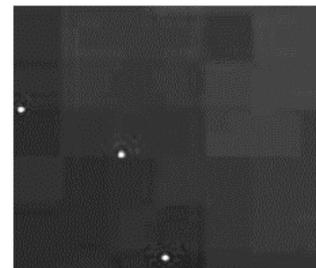


图 6 边缘拟合点位置

Fig. 6 Edge fit point position

3.3 气泡特征处理时的高斯混合模型

在完成特征匹配后发现,在 5 个浮球的气泡产生时,气泡的特征轮廓有其他干扰条件,导致匹配成功率不高。产生影响的原因是气泡产生较小,特征不明显,而且这个气泡产生时是非连贯的,即单位时间内可能只出现 1 个气泡,而非连续气泡;气泡的波动也会在水面波动的时候使得背景特征显现。考虑到效率原因,检测静置时间选取合适范围,避免过长时间的等待导致较小的气体泄露时产生的气泡趋于饱和。

为解决背景特征的影响,对气泡形态特征进行图像处理,即排除其他无关形状的干扰,在已经形成的特征中对气泡进行选取。对处理之前的图像进行灰度反转,以突出检测颜色的特征,如图 7 所示。由图 7 可知,左侧的其他条件及背景特征对检测有所干扰,因此需排除明显不同之处,以减小特征匹配时其他条件造成的干扰。

利用 GMM 即高斯概率密度函数精确地量化工物^[20]。一维高斯概率密度函数方程为

$$N(x, \mu, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\delta^2}(x - \mu)^2\right] \quad (6)$$

式(6)中: π 为权值因子; δ 为标准差,也称高斯半径; δ^2 为方差; μ 为均值。 μ 决定正态曲线的中心位置, δ 决定正态曲线的陡峭程度。

高斯混合是单高斯混合模型加权组合(维度一般不超过 15), GMM 能够平滑地近似任意形状的密度分布,密度函数如下:

$$S_{Pr}(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x, \mu_k, \delta_k^2) \quad (7)$$

式(7)中: K 为维度。任意一个高斯分布 $N(x, \mu_k, \delta_k^2)$ 称作这个模型的一个组成部分。GMM 是一种聚变算法,每个组成部分就是一个聚类中心。

经过 GMM 分类器后,得到的图像滤出圆形特征外的其他特征,获得检测区域内的圆形特征。处理后的图像如图 8 所示。测试 200 组图像进行图像运算及 GMM 分类器后的暗部像素点,即气泡轮廓像素点取值范围,对处理前后像素点范围内气泡数量进行统计,数据见表 1。



图 8 GMM 分类器处理后的图像

Fig. 8 Processed image of GMM classifier

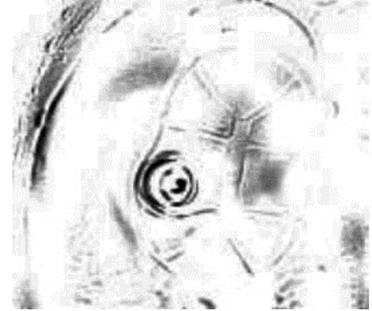


图 7 处理前气泡产生状态

Fig. 7 Bubble generation state before treatment

表 1 处理前后气泡个数变化对比

Table 1 Bubble number change before and after processing

像素点范围	处理前气泡个数	处理后气泡个数
0~180	33	49
181~500	45	68
501~1 500	48	57
1 501~3 000	74	26

3.4 应用及分析

在进行 GMM 分类器分类后,再对图像进行运算,抽取运算后的特征匹配并应用到 5 个浮球,对 5 个浮球做检测。在对上百组样品进行测试后,有气泡和无气泡的状态明显区分。进一步通过划分区域,防止浮球不在的区域产生瞬间的小气泡而对浮球的气泡检测造成干扰,从而影响浮球检测。

浮球密封性检测包括放料、静置、挑选、继续静置、再次挑选等步骤。人工检测与视觉检测的效率对比见表 2。在实验室条件下,采用人工检测可同时检测 2 个浮球,一个检测周期约 11 s(包括放料时间 6 s、静置时间 3 s 和检测时间 2 s),检测效率约 11 个/min;采用视觉检测可同时检测 5 个浮球,一个检测周期约 14 s(包括放料时间 9 s、静置时间 3 s 和检测时间 2 s),检测效率约 21 个/min,

表 2 检测效率统计

Table 2 Detection efficiency statistics

批次	(个·min ⁻¹)	
	人工检测效率	视觉检测效率
1	12	27
2	15	33
3	17	33
4	14	33
5	18	27

采用视觉检测还可避免因疲劳等原因造成的漏检现象。在生产企业员工熟练操作之后,视觉检测效率较实验室情况还有小幅的提升。

视觉检测时存在人工放料时间较长(9 s)的问题,因此在后续改进中,可利用机械手上料,传感器触发,全面替代生产工人,从而实现全自动化生产。

4 结 语

本检测系统对气泡产生的整个过程进行分析,基于不同运动状态的气泡特征,用形状滤波匹配算法进行分析判断,按设定阈值判断是否合格。视觉检测一次同时对5个浮球进行检测、剔除和分料,满足工业自动化要求。当具备恒温下会产生气泡的特性时,检测浸入水中的其他产品均可用此方法进行判断,从而提高生产效率。但对一些水面晃动的情况,需要进一步通过过滤的方式进行抽取、检测,以达到最佳提取效果。因此,在图像滤波算法上还有很大的改善空间。

参考文献:

- [1] 金根泰,李国韬.特殊螺纹气密封性检测装备国产化及其应用[J].石油管材与仪器,2019,5(2):17.
- [2] 王涛,王东颖,范伟.气体泄漏检测新方法的研究进展[J].液压与气动,2015(10):2.
- [3] 张应帅,王幼民,闫志超,等.汽车制动钳气密性检测实验台的最优控制[J].新乡学院学报,2017,34(9):56.
- [4] 赵坤,张恒.密封轴承气密性检测仪器的设计[J].机械,2018,45(6):76.
- [5] 暴永明,刘广东,吉有胜.发动机进气门气密性检测机构的设计[J].机械工程师,2018(12):163.
- [6] 范崇海.一种橡胶制品的气密性检测装置:201721026642.4[P].2018-03-06.
- [7] 安云凤.基于机器视觉的压力容器气密性检测系统设计[D].杭州:浙江理工大学,2016.
- [8] 王飞,吴国贵,和卫星.基于超声检测的新型二元混合气体传感器[J].自动化仪表,2017,38(12):78.
- [9] 叶子,王超.用于监测阀门泄漏的超高动态范围全光纤超声传感系统[J].传感技术学报,2016,29(7):958.
- [10] 廖蕴博,王亚俊,任智达.气压压差检法在机车用水冷基板上的应用[J].品牌研究,2018(6):97.
- [11] 陈庚,张伟,李存荣,等.基于机器视觉的钢轨对接焊高精度检测方法[J].铁道标准设计,2020,64(3):5.
- [12] 郭晓丽.机器视觉在零部件质量检测上的应用与研究[J].江西电力职业技术学院学报,2018,31(5):5.
- [13] 宋瑞祥,帅毓廷,吴醒乐,等.基于嵌入式机器视觉图像二值化算法及实现[J].科技创新与应用,2016(26):71.
- [14] 陈春涛.应用差值和比值运算抑制证据图像中的干扰成分[J].刑事技术,2011(1):46.
- [15] 安建妮,刘贵喜.利用特征点配准和变换参数自动辨识的图像拼接算法[J].红外与激光工程,2011,40(3):567.
- [16] JOANA V, GUILHERME C, FERNANDA P. SAD vs SSD methods for cyberknife ocr measurements[J]. Physica Medica,2016,32(3):313.
- [17] 修春波,马云菲,潘肖楠.基于距离融合的图像特征点匹配方法[J].计算机应用,2019,39(11):3158.
- [18] 潘帅嘉.高精度微小零件多参数检测系统的研究[D].重庆:重庆理工大学,2019.
- [19] MITRA B K, YOUNG R, CHATWIN C. On shadow elimination after moving region segmentation based on different threshold selection strategies[J]. Optics and Lasers in Engineering,2007,45(11):1090.
- [20] 刘明纲.基于高斯混合模型和 NSCT 的图像边缘检测方法[J].科技通报,2018,34(8):110.