

碗形塞加工误差双目视觉在线检测方法

张志佳^{1,2}, 尹秀萍¹, 苑玮琦¹, 周自强², 钟玲¹

(1. 沈阳工业大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 江苏省机电产品循环利用技术重点建设实验室, 江苏 常熟 215500)

摘要: 碗形塞主要用于堵塞发动机工艺孔, 其加工精度高, 直径尺寸公差要求在微米数量级。目前对碗形塞的加工误差检测主要还是人工检测方式, 人工检测精度低且不能满足现代化生产的在线检测要求, 因此提出利用双目视觉实现碗形塞加工误差在线检测的方法, 将碗形塞放在一个旋转机构上匀速旋转, 利用两台平行方向放置的摄像机采集碗形塞直径端面的多组图像, 通过所提出的端面杂质去除方法校正检测结果, 再通过数据处理获得碗形塞直径和锥度的加工误差。搭建了基于双目视觉的碗形塞加工误差在线检测系统并进行在线测试, 测试结果表明该方法能够满足碗形塞的测量要求并实现在线检测。

关键词: 双目视觉; 在线检测; 加工误差; 远心光学; 多线程

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1217002

Online detection method of binocular vision based on mechanical error for bowl plug

Zhang Zhijia^{1,2}, Yin Xiuping¹, Yuan Weiqi¹, Zhou Ziqiang², Zhong Ling¹

(1. School of Software, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Jiangsu Electromechanical Products Recycling Technology Key Construction Laboratory, Changshu 215500, China)

Abstract: Bowl plugs were mainly used for plugging auxiliary holes on the engines, the processing precisions were high, required diameter tolerance was micrometer. At present the bowl plugs mechanical errors were mainly manual detections, manual detections precisions were low and can not meet the requirements of modern production online detections. Therefore proposes a method of used binocular vision to detect bowl plugs machining errors, put the bowl plugs on a rotating mechanism for constant speed rotations, two parallel cameras acquire multi groups diameter end face images. Used the proposed end face impurity removal method calibration test results, through data processing to obtain bowl plugs diameters and tapers mechanical errors. Set up a binocular vision online detection system for bowl plugs machining errors. The test results show that this method can meet the bowl plugs detection requirements and achieve online detections.

Key words: binocular vision; online detection; machining errors; telecentric optic; multithread

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2014020116); 江苏省机电产品循环利用技术重点建设实验室开放基金(KF1508)

作者简介: 张志佳(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事自动化控制、机器视觉检测、图像处理与模式识别方面的研究。

Email: zzjsut@126.com

0 引言

碗形塞主要用于堵塞发动机的工艺孔来满足冷热加工的工艺需求,其结构简单,造价相对螺塞较低,可靠性相对较高,因此得到广泛的应用^[1]。碗形塞大多为冲压件,生产过程中模具的长期磨损和碗形塞内应力的存在都会导致碗形塞尺寸不良,进而出现发动机漏水、漏油现象。在批量生产过程中,对成品进行加工误差检测,不仅能够保证产品质量,而且还能够及时更换模具,避免因持续生产不合格产品而造成资源浪费。目前生产企业采用机械量具进行人工检测,其检测的精度和效率难以得到保证,面向企业自动化生产需要,文中提出采用视觉检测的方式进行碗形塞的加工误差在线检测。机器视觉检测技术在零件加工误差检测方面应用广泛,然而在大尺寸检测领域的检测精度不高,选用高分辨率摄像机和图像拼接技术都可以提高检测精度,然而高分辨率摄像机价格昂贵,拼接技术又不能完全补偿误差,采用机器视觉检测将面临如下问题:碗形塞的直径种类多,难以选择一个合适视场的镜头和合适分辨率的摄像机来满足不同直径种类碗形塞加工误差的检测要求;目前市场上单个摄像机的分辨率难以满足待检碗形塞所对应尺寸下的微米数量级分辨率检测要求;碗形塞直径端面存在的杂质对图像中直径检测的结果影响较大。

针对上述问题,文中搭建了一种双目在线检测系统,提出了一种基于并行处理的多线程在线检测方法。部分碗形塞形变的存在会造成不同方向上直径尺寸不一,因此将碗形塞放在一个旋转机构上匀速旋转,选用两台平行方向放置的高分辨率面阵摄像机配合使用两个双远心镜头同时采集碗形塞直径端面处的图像,通过所提出的端面杂质去除方法来校正检测结果,再通过数据处理获得碗形塞直径和锥度的加工误差。当检测同一规格的碗形塞时,由于镜头间距固定,累加碗形塞直径端面图像中的部分直径检测值和镜头间距,可以获得被检碗形塞的直径及锥度,进而判断碗形塞的合格性。目前能够达到检测要求的双远心镜头中,两个镜头之间的最小间距都大于被检直径。设计时将两个镜头分别放置在碗形塞的两侧,较大降低了被检直径对镜头选形的要求。

1 检测系统设计

碗形塞(如图 1 所示)加工误差在线检测系统中,采用双目视觉和单目视觉都可以满足检测要求。碗形塞直径种类多、目标尺寸大且设计精度高,利用单目视觉检测较大尺寸碗形塞的加工误差时,需要选用高分辨率摄像机和大口径远心镜头,但高分辨率摄像机价格昂贵,大口径远心镜头较为笨重,且被检直径不能无限增大;双目视觉检测方案通用性强,可以满足不同尺寸碗形塞微米数量级分辨率的检测需求,对于大尺寸的检测不需要增加摄像机的分辨率,较大地降低了设备成本,因此选用双目视觉检测方案利于提高系统实用性。

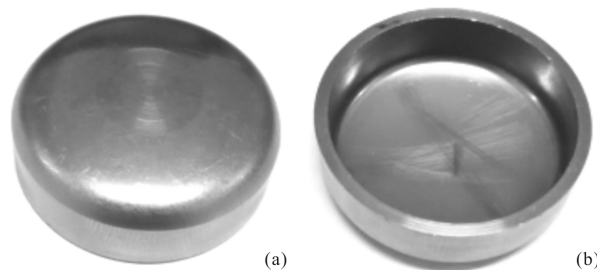


图 1 碗形塞实物图

Fig.1 Bowl plug physical figure

文中设计的碗形塞加工误差在线检测系统模型如图 2 所示。检测过程中,利用两台平行方向放置的高分辨率面阵摄像机配合使用两个双远心镜头同时采集旋转碗形塞直径端面处的图像并传送到计算机中,通过编写的软件实现碗形塞加工误差检测,一旦检测出不合格碗形塞,计算机发出警示音。

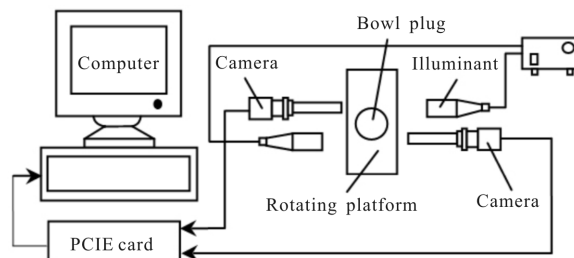


图 2 碗形塞检测系统模型图

Fig.2 Bowl plug detection system model

系统由碗形塞旋转控制模块、远心光学成像模

块和图像处理模块组成,下面对各模块分别进行说明。远心光学成像模块是系统的重要组成部分,文中对该模块给出了详细设计过程,系统设计如图 3 所示。

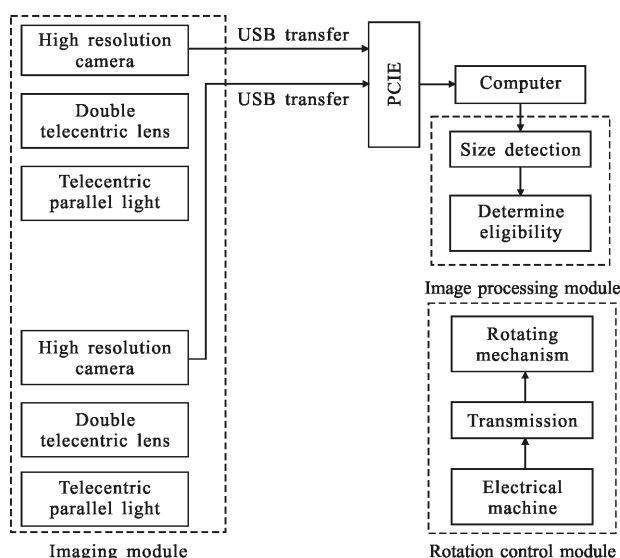


图 3 碗形塞检测系统设计图

Fig.3 Bowl plug detection system structure

1.1 碗形塞旋转控制模块

碗形塞旋转控制模块用来确定待检碗形塞的空间位置,保证碗形塞直径端面能够分别出现两个镜头的视场内;带动碗形塞匀速旋转,便于碗形塞成像;可以依据实验环境选择适合检测的最佳转速以实现摄像机在不同帧率下对图像的采集和处理。由电机、变速器和旋转机构组成。

1.2 远心光学成像模块

一台计算机控制两台摄像机并行采集碗形塞直径端面处的图像,采集到的图像由 USB 传输到 PCIE 总线上。远心光学成像模块由摄像机、双远心镜头、远心平行光源和 PCIE 扩展卡组成。

1.3 图像处理模块

图像处理模块融合两台摄像机的多组图像数据来获取被检碗形塞的加工误差,端面杂质去除方法对碗形塞表面存在的杂质干扰能起到较好的滤波效果,检测结果实时显示在人机界面上。图像处理模块由装有 Visual C++程序的计算机来实现。

1.4 远心光学成像模块设计

1.4.1 远心光学成像原理

端面为光滑曲面的碗形塞在背光源照射下,在普通镜头中成像时,一部分光线经直径端面反射后

会进入镜头中,使碗形塞端面在图像中为亮区域,而碗形塞在图像中应为暗区域,因此造成了检测差异。物距和像距的变化、镜头的偏移也会造成检测误差^[2-3]。双远心镜头可以消除上述检测误差,且无视差、畸变小,无需标定即可完成检测,更能直接、准确地获取碗形塞的加工误差,相对普通光学系统,提高了碗形塞图像边缘检测的准确性^[4-5]。

1.4.2 模块设计

远心光学成像模块主要由摄像机,镜头和光源组成。系统需达到微米数量级分辨率的检测要求;图像数据的传输速率要满足实时检测要求;摄像机靶面的水平宽度要大于碗形塞旋转时水平晃动的最大值。摄像机和镜头的合理搭配是获取优质图像的关键。双远心镜头可以消除物距和像距变化、镜头视角偏差所造成的误差,其无需标定的优点也降低了运算量,因此文中选用两台摄像机配合使用两个双远心镜头同时采集碗形塞直径端面图像。

系统可分辨被检碗形塞的尺寸计算公式为 $S = P/M$,其中 P 为像元尺寸, $2.2 \mu\text{m}$; M 为镜头放大倍率, 2; 为可被分辨的最小尺寸, $1.1 \mu\text{m}$,满足系统分辨率要求;图像由 USB 传输到 PCIE 总线上,一帧图像的采集传输时间为 9ms ,满足实时检测要求;摄像机靶面的水平宽度 5.7mm 大于碗形塞旋转时水平晃动最大值 2mm ,可以保证正常成像。系统选用专为远心光学设计的远心平行光源来实现照明,该光源平行度好,增加了镜头的自然景深和远心度;光源发出波长较短的绿光,在碗形塞端面处衍射不明显;光源采用背光照明,以光源高亮作为背景,以碗形塞阴影作为目标,突出碗形塞边缘,提高了检测精度。

系统由旋转控制模块、远心光学成像模块和图像处理模块组成,因此系统的检测精度取决于这 3 个模块。碗形塞旋转控制模块的端跳精度和偏心为几微米;远心光学成像模块可以分辨到 $1.1 \mu\text{m}$;图像处理模块可以实现碗形塞图像单像素级边缘检测,最多有 1 个像素的检测误差。因此系统可以实现微米数量级的检测要求。

2 在线检测算法

系统软件包括参数设置、多线程程序开发、图像采集、图像边缘检测、数据曲线绘制、加工误差获取、结果显示和数据保存八部分,在 Windows 操作系统

下采用 Visual C++ 语言编写而成, 图 4 是软件流程图, 融合碗形塞 0°、45°、90° 和 135° 方向上的两组互相垂直的检测值即可达到检测要求。

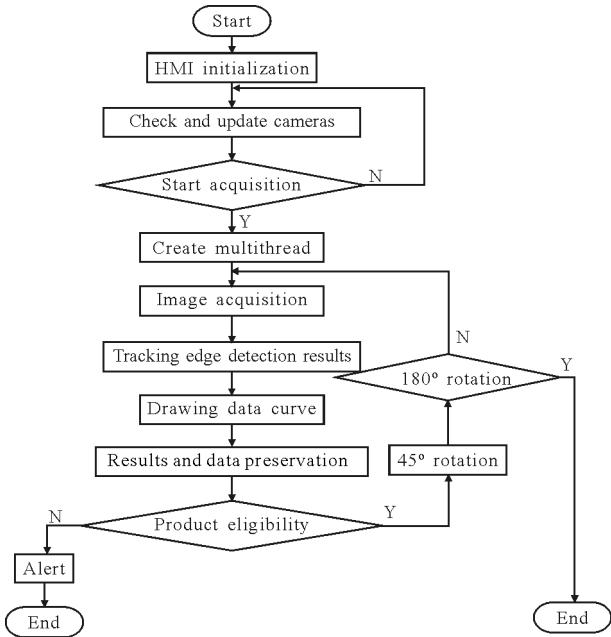


图 4 系统检测流程图

Fig.4 System software flow chart

算法具体实现步骤如下:

Step1: 图像预处理。为实现碗形塞加工误差的在线检测, 需要获取清晰的碗形塞图像, 对原始图像进行区域选择、灰度化、二值化、阈值分割、边缘检测等图像预处理操作后, 才能准确、快速地提取出图像中的特征参数^[6-7]。检测过程中只采集感兴趣的图像区域, 有助于提高图像处理速度, 减少图像储存空间。

Step2: 边缘检测。图像边缘像素灰度值变化迅速, 具有梯度最大值。背光源照射下碗形塞直径端面在图像中呈现为暗区域, 背景为亮区域, 图像亮暗交界处像素的灰度差值最大, 利用梯度法进行单像素级边缘检测。检测过程中, 图像边缘检测值实时显示在人机界面上, 点击界面上的“标注边界”按钮可以实时跟踪图像边缘检测结果, 进而验证边缘检测的准确性。

Step3: 端面杂质去除法。碗形塞端面的杂质将直接影响检测结果。限幅滤波法能够有效克服偶然因素引起的误差, 但无法抑制周期性误差; 滑动滤波法能够有效克服周期性误差, 但无法抑制偶然误差^[8-9]。为了达到较好的去噪效果, 文中结合限幅滤波法和

滑动滤波法提出了端面杂质去除方法, 其中 R_n 为此次直径检测值, R_{n-1} 为上次直径检测值, k 为限幅阈值。每次获取新的直径时均需判断: 若 R_n 与 R_{n-1} 相差小于 k , 则此次直径检测值有效; 若 R_n 与 R_{n-1} 相差大于 k , 则此次直径检测值无效, 将 R_n 及其前面连续 $N-1$ 个 R 值求和取平均, 均值作为此次采样值^[10]。经大量实验验证, K 取 4, N 取 10 能达到较好的滤波效果, 计算公式如下:

$$R_n = \begin{cases} R_n & |R_n - R_{n-1}| \leq k \\ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} R_{n-i} & |R_n - R_{n-1}| > k \end{cases} \quad (1)$$

Step4: 加工误差检测

碗形塞加工误差检测包括直径加工误差检测和锥度加工误差检测两部分, 计算公式如下:

$$R_n = b_{n1} + b_{n2} + c \quad (2)$$

$$T = (R_n - R_{n^*}) / h \quad (3)$$

式中: R_n 为碗形塞第 n 个下端直径, 即碗形塞直径值; b_{n1} 为碗形塞第 n 个左边直径端面图像中的部分直径检测值; b_{n2} 为碗形塞第 n 个右边直径端面图像中的部分直径检测值和镜头间距, 可以获得被检碗形塞的直径。 T 为锥度; R_{n^*} 为上端直径; h 为高度。同理, 碗形塞的第 m 个直径计算公式为:

$$R_m = b_{m1} + b_{m2} + c \quad (4)$$

跟公式(2)比较可以看出, 碗形塞第 n 个直径检测值和第 m 个检测值之间的差异为:

$$R_n - R_m = (b_{n1} + b_{n2}) - (b_{m1} + b_{m2}) \quad (5)$$

直径公差检测值与镜头间距无关, 只与左右两幅图像中碗形塞的部分直径检测值有关, 适用于不同直径规格微米数量级分辨率的检测需求, 如图 5

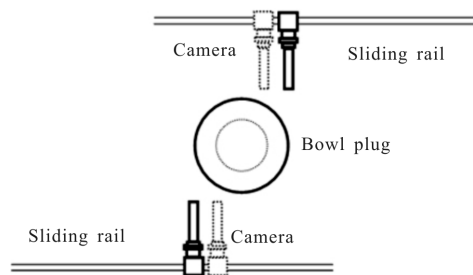


图 5 不同规格碗形塞加工误差检测示意图

Fig.5 Different specification bowl plug machining error detection

所示, 当检测不同直径规格的碗形塞加工误差时, 只

需将摄像机沿滑道滑行至碗形塞边缘处采集其直径端面图像即可完成加工误差检测。

3 多线程程序设计

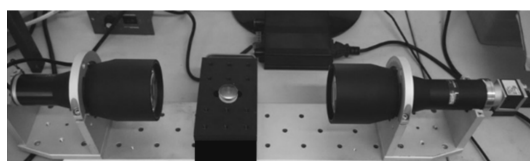
为了确保两台摄像机在一台计算机上同步工作,可以创建多个进程或是在一个进程中创建多个线程。在多 CPU 系统中,多进程或多线程都有助于提升 CPU 的利用率。进程结构存在开销大、内核瓶颈、资源浪费等问题,而多线程间通信方便,可以解决物理并行性和逻辑并发性等问题,显著地提升系统的并行性^[11]。因此选用多线程结构来确保两台摄像机同步工作。

系统采用 Win32API 动态链接库来实现多线程的创建,此方法效率高,简单有效,主要引用 Windows 核心库“Kernel32”中与线程相关的函数来完成线程的创建、激活和终止^[12]。将整个程序分成四个线程:两个数据采集处理线程:控制两台摄像机同步工作,记录数据并保存图片;数据显示线程:从数据缓冲池中提取数据,显示检测结果;主线程:负责响应人机交互的各项功能^[13]。在两个采集处理线程中选取一个子线程完成两个采集处理线程的数据累加,进而得到最终检测结果,这需要两个线程间能够进行通信,线程间主要采用了全局变量和 Message 消息机制两种通信方式。线程之间是并行运行的,防止某个线程未完成,已经开始累加,分别在每个采集处理线程中加入 1 个信号量,用于判断是否达到累加条件,保证了线程间通信和数据累加的准确性,起到优化程序的作用。

4 实验与结果分析

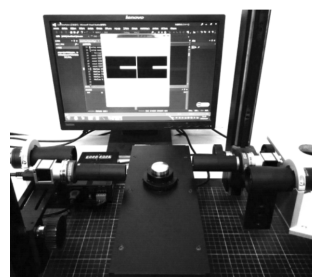
4.1 检测系统与实验过程

文中选用单、双目视觉检测系统分别对碗形塞加工误差进行在线检测,单目视觉检测系统和双目视觉检测系统分别如图 6 所示。



(a) 单目视觉检测系统

(a) Monocular vision inspection system



(b) 双目视觉检测系统

(b) Binocular vision inspection system

图 6 系统实物图

Fig.6 System physical figure

在双目视觉检测系统中,被检碗形塞的直径远远大于镜头视场,两台间距固定、平行放置的摄像机同步采集碗形塞直径端面处的图像,经图像处理后可以获得碗形塞左右直径端面图像中的部分直径检测值,累加镜头间距即为被检碗形塞直径(下端直径);同理可以获得碗形塞的上端直径,上下端直径之差与碗形塞高度相比即为碗形塞锥度。由于镜头间距固定,直径公差检测值与镜头间距无关,只与两幅碗形塞直径端面图像中的部分直径检测值有关。因此可以满足不同直径规格微米数量级分辨率的检测需求。人机界面如图 7 所示,采集和显示的是感兴趣的碗形塞图像区域,绿线用来实时跟踪边缘检测结果,红、蓝曲线分别是滤波前后的直径数据曲线,检测结果实时显示在人机界面上,一旦检测出不合格产品系统会发出警示音。



图 7 碗形塞检测系统人机界面图

Fig.7 Bowl plug detection system HMI

4.2 实验结果

文中选用单、双目视觉检测方案分别对已标号的 100 个碗形塞样本进行加工误差检测,累加碗形塞图像中的部分直径检测值和镜头间距,可以获得被检碗形塞的直径。样本中合格碗形塞直径为 $\phi 35_{+0.036}^{+0.042}$ mm,锥度为 1:20,部分实验数据如表 1 所示,从表中可以

清晰地看出单、双目视觉检测系统都可以准确地判断碗形塞合格性,然而单目视觉检测系统成本高,精度低,而双目视觉检测系统通用性强,对于大尺寸碗形塞加工误差的检测不需要增加摄像机的分辨率即可达到高精度的检测要求,较大地降低了设备成本,且检测结果更接近实际结果,因此就系统的实用性、通用

表 1 碗形塞加工误差检测结果(单位:mm)

Tab.1 Bowl plug machining error detection results(Unit: mm)

Number	Actual diameter	Binocular vision inspection values	Monocular vision inspection values	Actual taper	Detection taper	Detection result	Correct or not
1	35.035	35.035	35.037	1:20	1:20	Qualified	Yes
2	35.041	35.040	35.042	1:20	1:20	Qualified	Yes
3	35.038	35.038	35.039	1:20	1:20	Qualified	Yes
4	35.041	35.041	35.041	1:20	1:20	Qualified	Yes
5	35.037	35.039	35.037	1:20	1:20	Qualified	Yes
6	35.030	35.030	35.034	1:20	1:20	Unqualified	Yes
7	35.033	35.034	35.032	1:20	1:20	Unqualified	Yes
8	35.039	35.039	35.039	1:21	1:21	Unqualified	Yes
9	35.031	35.030	35.031	1:20	1:20	Unqualified	Yes
10	35.034	35.034	35.033	1:20	1:20	Unqualified	Yes

性和准确性而言,双目视觉检测方案更具有优势。

多线程程序可以保证两台摄像机同步工作,此时两台摄像机各自采集处理一幅图像的时间和一台摄像机采集处理一幅图像的时间很接近,因此节约了大量的图像采集处理时间。系统选用 acA2500-14 μm 型号的摄像机,传感器尺寸为 2592 \times 1944,满分辨率时的最大帧率为 14 fps,在满足检测要求的情况下,只采集感兴趣的 200 行图像区域可以较大地缩短系统的运行时间。在 VC 图像处理平台进行加工误差检测,每秒可以完成 2 个碗形塞的检测;人工检测需要将碗形塞放置在两个依据加工误差上下限制的大小不一的标准孔中,分别旋转 4 次,最快需要 4 s 完成一个碗形塞的检测。实际生产线每秒生产 2 个碗形塞,双目视觉在线检测的速度远远高于人工检测且能够满足在线检测要求。

4.3 系统误差来源及改进方向

系统用来实现碗形塞加工误差精密检测,因此碗形塞偏心旋转、镜头偏移以及外界震动等不良因素都会对检测结果造成直接影响。

4.3.1 偏心旋转

碗形塞偏心旋转会严重影响图像质量;引发物

距变化,导致图像模糊;碗形塞不平稳旋转,导致图像拖影;碗形塞边缘超出镜头视场或光源照射范围,导致成像失败。图 8 是偏心旋转时的检测示意图,虚线表示标准检测时碗形塞的位置,实线表示偏心旋转检测时碗形塞的位置。旋转机构本身具有微小的端跳精度和偏心,但不会对检测结果造成较大影响,旋转平台上突出小圆台的直径与碗形塞内径相同,可以牢牢地固定住碗形塞,进而保证碗形塞与旋转机构同心旋转。

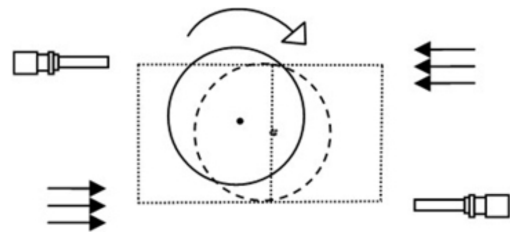


图 8 偏心旋转检测示意图

Fig.8 Eccentric rotation detection

4.3.2 镜头偏移

镜头偏移包括镜头高度不一致和镜头放置不平行两种情况,这两种情况都会改变镜头间距。镜头高

度不一致将导致镜头间距偏大,如图 9(a)所示,其中虚线表示标准检测时的镜头间距,实线表示镜头高度不一致时的镜头间距,黑色实心圆点表示镜头聚焦位置。镜头放置不平行时,镜头的聚焦位置不在碗形塞直径两端,而在弦两端,镜头间距存在不可预知的差异,如图 9(b)所示,其中虚线箭头代表镜头,实线代表镜头间距。通过镜头支撑杆上的微米刻度进行调节可以保证两个镜头高度一致;镜头通过高精度夹持器固定在严格平行的高精密滑道上,夹持器保证镜头与所在轨道垂直,即保证两个镜头平行放置,进而消除镜头放置不平行带来的检测误差。

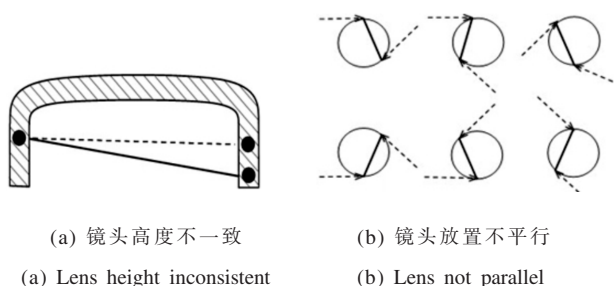


图 9 镜头偏移示意图
Fig.9 Lens offset schematic

4.3.3 噪声干扰

外界震动会导致碗形塞、镜头以及光源之间的相对位置发生变化;碗形塞表面的杂质会严重影响碗形塞的图像边缘检测结果。这些变化都是短暂的,会在数据曲线图上形成幅值较大的噪声,滤波环节可以平滑此类曲线,一般的轻微震动和表面杂质并不会对检测结果产生较大影响。

5 结论

文中选用单、双目视觉检测系统分别对碗形塞的加工误差进行在线检测,实验结果表明单、双目视觉检测系统都可以准确地判断碗形塞的合格性,然而单目视觉检测系统成本高,精度低,难以满足较大尺寸碗形塞微米数量级分辨率的检测要求;因此文中研发出一套碗形塞加工误差双目视觉在线检测系统,利用两台摄像机采集碗形塞直径端面的多组图像,通过端面杂质去除方法校正检测结果,获得碗形塞直径和锥度的加工误差,进而判断碗形塞的合格性。两个镜头放置在碗形塞的两侧弥补了镜头间距大于被检直径的不足。所设计的双目视觉检测系统

能够满足碗形塞直径种类多和微米数量级分辨率的检测要求,较大地降低了设备成本,该系统通用性强,效率高,准确性好,能够实现在线检测。

参考文献:

- [1] Wang Suqing. Measuring bowl plug cone angle flexible special gauge [J]. *Metal Working (Metal Cutting)*, 2015(2): 53-54. (in Chinese)
王苏清. 测量碗形塞圆锥角柔性专用检具 [J]. 金属加工(冷加工), 2015(2): 53-54.
- [2] Chen Sha, Ye Yutang, Liu Lin, et al. High-precision and fast visual inspection method on irregular edge for PIN [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23 (12): 2368-2372. (in Chinese)
陈莎, 叶玉堂, 刘霖, 等. PIN 边缘不规则形态的高精度快速视觉检测方法研究 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(12): 2368-2372.
- [3] Wang Hong. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3212-3216. (in Chinese)
王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3212-3216.
- [4] Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 423-427. (in Chinese)
闫兴涛, 杨建峰, 薛彬, 等. 利用光纤传像束的内窥镜物镜设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 423-427.
- [5] Lu Tao, Fu Donghui, Chen Xiaoyun, et al. High dynamic range imaging technology using DMD [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 644-650. (in Chinese)
吕涛, 付东辉, 陈小云, 等. 利用 DMD 获取高动态范围图像技术 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 644-650.
- [6] Sun Zhaolei, Hui Bin, Qin Mofan, et al. Object detection method based on saliency measure for infrared radiation image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2633-2637. (in Chinese)
孙照蕾, 惠斌, 秦莫凡, 等. 红外图像显著目标检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2633-2637.
- [7] Zou Beiji, Zhang Sijian, Zhu Chengzhang. Automatic localization and segmentation of optic disk in color fundus image [J]. *Optics and Engineering Precision*, 2015, 23(4): 1187-1195. (in Chinese)
邹北骥, 张思剑, 朱承璋. 彩色眼底图像视盘自动定位与

- 分割[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1187–1195.
- [8] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519–531. (in Chinese)
- 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519–531.
- [9] Hu Meng. Design and application of gas flow calculation module with temperature and pressure compensation [J]. *Automation Application*, 2015(1): 18–19+38. (in Chinese)
- 胡猛. 带温压补偿的气体流量计算模块的设计及应用[J]. 自动化应用, 2015(1): 18–19+38.
- [10] Liu Xingxing, Zhou Xiaojia, Yan Bin. Study of wireless sensor network localization based on energy detection [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(6): 884–887. (in Chinese)
- 刘新新, 周小佳, 闫斌. 无线传感器网络中基于能量检测的定位研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(6): 884–887.
- [11] Yuan Weiqi, Cheng Lijia. Design and implementation of ice cream stick quality detection system based on online visual inspection [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(8): 2679–2682. (in Chinese)
- 苑玮琦, 成丽佳. 雪糕棒质量在线视觉检测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(8): 2679–2682.
- [12] Miao Zhonghua, Lu Mingchao, Hu Xiaodong, et al. Development and application of intelligent monitoring and controlling system of cotton-picking machine based on virtual instrument technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 35–42. (in Chinese)
- 苗中华, 陆鸣超, 胡晓东, 等. 基于虚拟仪器技术的采棉机智能监控系统开发与应用 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 35–42.
- [13] Zhao Yuan, Jiang Xiaofeng. Optimized design for automatic test system based on multithreading[J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(7): 2124–2128. (in Chinese)
- 赵源, 姜小峰. 基于多线程技术的自动测试系统优化设计[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 2124–2128.