

基于激光三角位移传感器的双头螺杆在机测量系统

孙梦楠, 董社序*, 徐威, 刘明轩, 孙兴伟**

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 针对双头螺杆廓形参数难以实现高精度、高效率检测的问题,以四轴旋风铣床为载体,设计并实现了一种基于激光三角位移传感器(LTDS)的在机测量系统。为了提高系统的测量精度,基于变结构元广义形态学方法、多项式插值算法及椭圆拟合法,实现了含噪光斑图像质心的微米级提取,并进行了实验验证。为了避免最小二乘分段拟合方法在断点处不满足函数连续性和可导性的缺陷,提出了基于拉格朗日乘法法的点云信号光顺处理算法。最后根据信号重构结果实时计算廓形参数,判断加工质量。实验结果表明,设计的在机测量系统可在 39.7 s 内完成一个螺距的螺杆廓形参数检测,测量精度为 $\pm 9 \mu\text{m}$,其中长轴、短轴、螺距的测量不确定度分别为 0.72、0.69、1.65 μm ,显著提高了测量精度和效率。

关键词 测量; 螺杆转子; 激光位移传感器; 信号处理

中图分类号 TH161; TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL221025

1 引言

双头螺杆转子作为螺旋机械动力产生的关键基础零件,其廓形精度直接关系着产品的机械性能和使用寿命^[1]。目前其参数测量均为接触式,分为两类:采用千分尺等单项仪进行手动测量,该方法可实现在机检测,但其测量精度和效率较低;采用三坐标测量机(CMM)进行自动测量,该方法测量精度高,但脱机检测耗费大量辅助时间,同时又增加了测量的定位误差,且无法保证不合格螺杆修正后的精度。近年来,利用非接触扫描技术构建“加工-测量”一体化系统成为了一种提升零件制造精度的重要手段。付翔宇等^[2]基于瞬态干涉技术实现了大口径光学元件的非接触、高精度快速检测,但该系统体积较为庞大且测量范围较小,给在线检测增加了难度。王乐等^[3]通过融合结构光与偏振相机,构建了钢轨廓形的在线检测系统,但受相机内部标定过程的影响,系统测量效率偏低。候冠宇等^[4]与李乾等^[5]分别基于光栅投影与机器视觉完成了表面缺陷和高反光元件的三维轮廓在线检测,受测量设备分辨率的影响,系统误差偏大。相较于上述非接触测量技术,激光三角位移传感器(LTDS)兼具精度高、范围大、速度快、体积小、便于集成等特点,适用于工业在线检测。Li等^[6]利用多个LTDS组合测量方式,建立了汽车发动机缸体在线质量控制系统。Alam等^[7]研制了一种基于LTDS的纸张质量在机检测装置。崔昊等^[8]针对LTDS提出了一种多元自适应卡尔

曼滤波与非均匀B样条曲线拟合的联合标定方法,并将其应用于深度在线检测。刘凯媚等^[9]设计了基于二极管-互补金属氧化物半导体的新型LTDS,实现了在不同位置对玻璃厚度的快速检测。然而,上述应用均将LTDS的自身精度等同于整个测量系统的精度,缺乏对LTDS采集信号的有效处理,导致测量结果并不理想。Korosec等^[10]认为,信号的采集精度和重构精度将最终决定LTDS的准确性。

在信号采集方面,影响因素一般可分为测量系统固有特性(三角模型非线性、激光束扰动性、元件位置关系)、测量环境(环境光、温湿度、振动、非均匀折射率场)、被测物表面物性(颜色、亮度、曲率、测点倾角)三个方面^[11],上述因素均会导致光斑质心发生偏移,最终产生测量误差。因此,实现光斑质心的精准提取对提高LTDS信号采集精度至关重要。灰度质心法因操作简单、计算速度快而被广泛应用于光斑质心提取,但该方法对噪声特别敏感^[12]。Wu、Selami及Yin等^[13-15]分别利用Hessian矩阵法、改进高斯拟合法及三次Hermite样条插值法进行灰度质心提取,虽然在一定程度上提高了精度,但仍然无法提升算法的鲁棒性。Qi等^[16]利用Steger差分运算解决了鲁棒性问题,但含噪光斑图像的处理结果不理想。Liu、He及Jiang等^[17-19]分别采用图形处理器、十字结构光及现场可编程门阵列(FPGA)对Steger方法进行改进,增强了算法的抗噪声干扰能力,但仍然无法实现存在离群值和受干扰较大的光斑图像质心的精确提取。在信号重构方面,

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-08-02; 录用日期: 2022-09-07; 网络首发日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(52005347)、科技部中央引导地方科技发展专项(2022JH6/100300015)

通信作者: *dong_zhixu@126.com; **sunxw@sut.edu.cn

利用最小二乘法对信号进行分段拟合具有效率高和操作简单的优点^[20-21],然而在分段点处存在的不满足函数连续性和可导性的缺陷会导致拟合精度变差,从而影响测量结果。

针对以上问题,本文在四轴旋风铣床上设计了一种基于 LTDS 的双头螺杆廓形参数的在机测量系统。在 LTDS 信号采集方面,提出了一种可抗噪声干扰的新型光斑质心提取方法,先利用变结构元广义形态学方法和多项式插值算法,对含噪光斑图像的有效边缘进行快速定位,再根据椭圆拟合法进行光斑质心提取,最后进行实验验证。在 LTDS 信号重构方面,提出了基于拉格朗日乘数法的点云信号光顺处理算法,解决了最小二乘拟合在分段点处不满足函数连续性和可导性的问题,并对该算法进行建模和求解。实验结果表明,开发的测量系统可以完成双头螺杆廓形参数的在机精密检测,提高了测量精度和效率。

2 在机测量系统

双头螺杆转子旋风铣床结构如图 1 所示,根据螺

旋曲面成形机理可得四个联动轴:工件绕自身轴线旋转的轴 C_2 ,刀尖绕刀盘轴线旋转的轴 C_1 ,控制刀盘旋转轴线与工件旋转轴线距离的进给轴 X ,控制刀盘在工件轴向运动的进给轴 Z 。图 1 中箭头方向均为正向。工件由主轴卡盘、跟刀架、尾台顶尖装夹,以确保铣削稳定性。图 2 为基于 LTDS 的双头螺杆转子在机测量方案示意图,其中 Y 轴沿机床径向。螺旋曲面是由转子母线沿螺旋线运动而形成的,长轴 d_1 、短轴 d_2 和导程 F 为主要廓形参数,其中导程 F 为母线上一个头沿螺旋线运动一个周期的长度,一般将螺距 $w = F/2$ 作为替代检测参数。LTDS 通过可调节机械支架被安装在跟刀架侧壁,其激光束与机床 X 轴运动方向平行且过工件轴心,通过 X 轴和 Z 轴的运动将 LTDS 移动到被测位置。测量长轴 d_1 和短轴 d_2 时,LTDS 不动,工件沿 C_2 轴旋转一周即可获得截面廓形信号;测量螺距 w 时,工件不动,LTDS 沿 Z 轴移动相应长度即可获得轴向廓形信号。与手动检测方式一致,即在一个螺距内只需测量一个横截面的长轴和短轴。

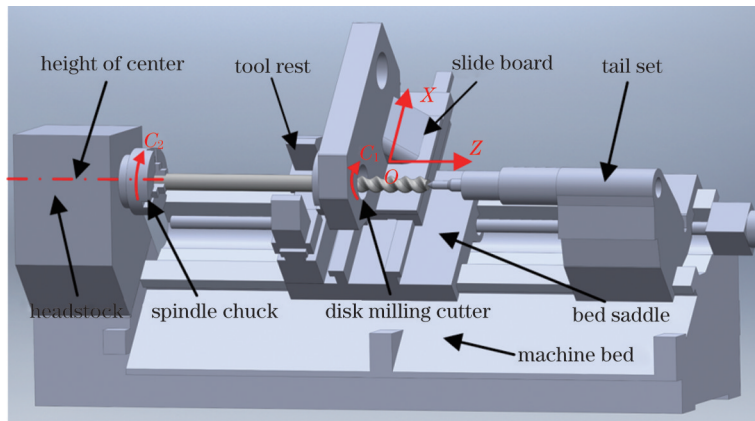


图 1 四轴双头螺杆转子旋风铣床

Fig. 1 Whirlwind milling machine for double-headed screw rotor with four axes

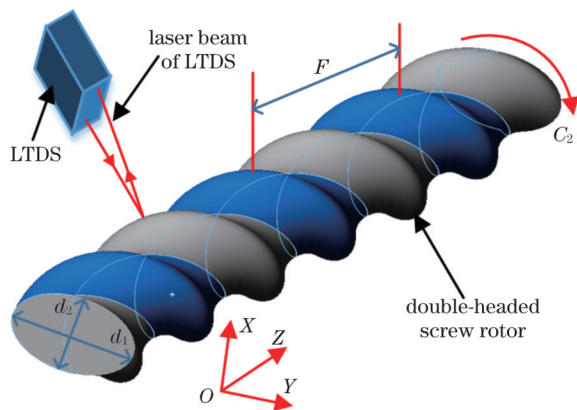


图 2 基于 LTDS 的双头螺杆转子在机测量方案

Fig. 2 LTDS-based on-machine measuring scheme for double-headed screw rotor

基于 LTDS 的双头螺杆转子在机测量系统如图 3 所示,其中图 3(a)为在机测量系统的装置图,由测量、

信号处理、数控三部分组成。测量部分包括 LTDS 及其控制器,LTDS 的测量范围为 ± 18 mm,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,重复性为 $0.1 \mu\text{m}$,线性度为全量程的 $\pm 0.02\%$,采样频率为 1 kHz ,通信方式为串行接口 (RS232) 和以太网;信号处理部分作为整个系统的核心,包含参数设置、信号处理、结果判定、补偿量计算功能,由计算机 (PC) 和数据采集板 (DAQ) 两部分组成;数控系统是整个测量-分析-补偿闭环过程的执行部分。

在机测量过程如下:测量前,利用信号处理部分设置 C_2 轴和 Z 轴编码器触发频率、主轴转速、 Z 轴进给速度、螺杆型号等参数,并通过 RS232 同步给数控系统。测量中,将 C_2 轴旋转编码器和 Z 轴丝杠编码器通过控制器分别接入 LTDS 的外部信号输入端,数控系统驱动时,LTDS 会在脉冲的有效边沿触发下发出信号。为了验证后续光斑质心提取方法对 LTDS 信号采集精度的

提升效果,将LTDS输出信号分为两类:一类为LTDS的光电耦合器(CCD)采集光斑图像信号通过9针串口(DB9)传输到DAQ,再利用所提方法进行光斑质心提取,将质心位置以数字信号形式通过通用串行总线(USB3.0)传输到PC;另一类为LTDS本身输出模拟量信号,经控制器处理后,以数字信号形式通过以太网传

到PC。应用点云信号光顺处理算法对两组数据进行拟合,根据重构廓形计算参数,判定加工质量,并将结果通过RS232通信给数控系统。对于不合格工件,在信号处理部分计算补偿量并作为公共变量存入数控系统,修正切削时可实时调用,从而实现在机测量的全闭环过程。图3(b)为在机测量系统的信号流程图。

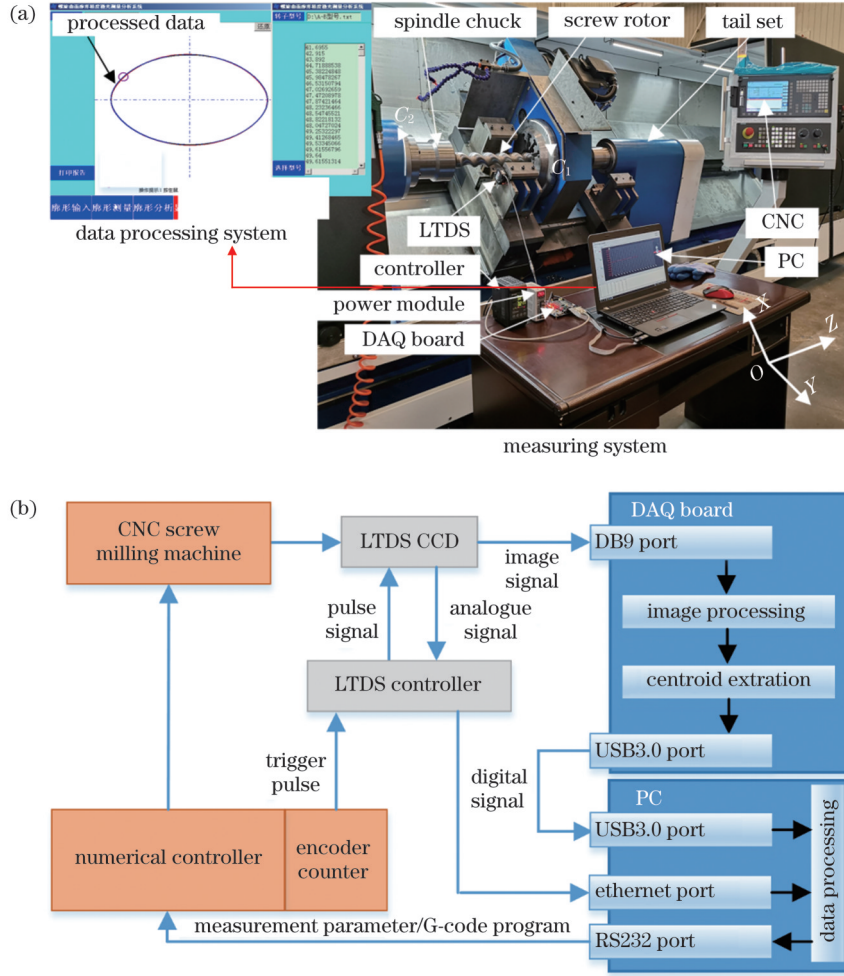


图3 基于LTDS的双头螺杆在机测量系统。(a)装置图;(b)信号流程图

Fig. 3 LTDS-based on-machine measuring system for double-headed screw. (a) Set-up diagram; (b) signal flow chart

3 信号处理算法

3.1 一种新型光斑质心提取方法

数学形态学现有的单一结构元方法可对图像信号进行局部修正与匹配,在提取信息边缘的同时抑制噪声,但方向和结构的单一性也会损失一些图像边缘的细节特征。因此,本节利用变结构元广义形态学边缘提取算法对光斑图像进行有效的边缘检测。

$f(x, y)$ 为二维离散空间 S^2 内的图像信号,设结构

元 $B(e, l)$ 为 S^2 子集,即 $B(e, l) \subset S^2$,则有形态膨胀(F_P)和腐蚀(F_F)分别为

$$F_P = \max_{(e, l) \in B} [f(x - e, y - l) + B(e, l)], \quad (1)$$

$$F_F = \min_{(e, l) \in B} [f(x + e, y + l) - B(e, l)], \quad (2)$$

式中: (x, y) 为采集点坐标; (e, l) 为结构元坐标。因此,广义形态学边缘提取算法获得的图像边缘 $E_{\gamma, \tau}(x, y)$ 可表示为

$$E_{\gamma, \tau}(x, y) = \left\{ [f(x, y) \oplus B_\gamma(x, y)] - [f(x, y) \ominus B_\tau(x, y)] \right\}, \quad (3)$$

式中: $B_\gamma(x, y)$ 和 $B_\tau(x, y)$ 为选定的变结构元,其中 γ 和 τ 为变结构元序号。

在方向和结构上变结构元具有对称和互补的优势,令累计平均值作为输出可在有效平滑噪声的前

前提下,完整提取各方向图像边缘的细节特征。因此,基于变结构元广义形态学提取的边缘图像 $E(x, y)$ 为

$$E(x, y) = \frac{1}{A} \left\{ \sum_{c=1}^{\theta} [E_{e,c+\theta}(x, y) + E_{e+\theta,c}(x, y)] \right\}, \quad (4)$$

式中: θ 为变结构元方向数量; A 为变结构元结构数量。

在式(3)、(4)中,传统边缘提取方法中的模板内求和乘积运算被求极大与极小值方法所替代,新方法只循环一次即可完成图像信号的边缘提取,易于并行处理且实时性强。

结合上述边缘图像提取方法,考虑实时性,为了提高定位精度,本节提出多项式插值亚像素边缘

定位算法。设 W 和 V 分别为 CCD 的 X 和 Y 方向上的间距, (x_ϕ, y_ζ) (ϕ 和 ζ 为边缘点坐标序号) 为边缘图像 $E(x, y)$ 上的边缘点,取以 x 为变量的三点 $E(x_{\phi-1}, y_\zeta), E(x_\phi, y_\zeta), E(x_{\phi+1}, y_\zeta)$ 灰度值作为函数,插值基点分别设为 $x_{\phi-1}, x_\phi, x_{\phi+1}$,代入二次多项式插值函数 $\alpha(x)$,令 $\frac{d\alpha(x)}{dx} = 0$ 求出 $\alpha(x)$ 最大值的亚像素位置 x_s ;相同方式取以 y 为变量的三点 $E(x_\phi, y_{\zeta-1}), E(x_\phi, y_\zeta), E(x_\phi, y_{\zeta+1})$,令 $\frac{d\alpha(y)}{dy} = 0$ 得亚像素位置 y_s ,则 (x_ϕ, y_ζ) 亚像素位置为 (x_s, y_s) :

$$\begin{cases} x_s = x_\phi + \frac{E(x_{\phi-1}, y_\zeta) - E(x_{\phi+1}, y_\zeta)}{E(x_{\phi-1}, y_\zeta) - 2E(x_\phi, y_\zeta) + E(x_{\phi+1}, y_\zeta)} \times \frac{W}{2} \\ y_s = y_\zeta + \frac{E(x_\phi, y_{\zeta-1}) - E(x_\phi, y_{\zeta+1})}{E(x_\phi, y_{\zeta-1}) - 2E(x_\phi, y_\zeta) + E(x_\phi, y_{\zeta+1})} \times \frac{V}{2} \end{cases} \quad (5)$$

基于变结构元广义形态学边缘提取算法,进行光斑轮廓上的边缘点选择,再利用多项式插值亚像素边缘定位算法,可得到有效边缘点的亚像素位置信息。为了进一步提升光斑质心的定位精度,本节利用最小二乘原理对光斑图像边缘进行椭圆拟合,将获得的椭圆中心代替光斑质心。椭圆一般表示为

$$\xi x^2 + \zeta xy + \psi y^2 + \delta x + \iota y + \nu = 0, \quad (6)$$

式中:参数 $\xi, \zeta, \psi, \delta, \iota, \nu$ 的最优解根据差值最小原理求出,再通过得到的椭圆一般方程计算质心坐标 (x_0, y_0) :

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\zeta \iota - 2\psi \delta}{4\xi\psi - \zeta^2} \\ y_0 = \frac{\zeta \delta - 2\xi \iota}{4\xi\psi - \zeta^2} \end{cases} \quad (7)$$

本节设计了一个含噪光斑图像灰度质心提取方法的验证实验。图 4 为搭建的光斑图像信号采集系统。其中,图 4(a) 为实验原理图,该系统由光纤激光器、准直透镜、耦合透镜、纳米伺服微位移平台、CCD、滤光片、DAQ、PC 组成。各部件参数如下:以 1550 nm 光纤传感器作为光源,光功率连续可调;CCD 的分辨率为 4000 pixel,像素尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,间距为 $7 \mu\text{m}$,扫描 1 frame 的时间为 5 ms;1500 nm 滤光片的最大宽度为 12 nm;纳米伺服微位移平台的重复定位精度为 2 nm;PC 配置为 I7 处理器,3.8 GHz 运算频率,8 GB 内存。另外,为了保证实验信号的实时传输、存储和处理,开发了专用 DAQ,其架构如图 4(b) 所示,主要包括 USB3.0 模块、ADS1274 模块和 DSPF2812 模块,通过 RS422 串口与 PC 和纳米伺服微位移平台相连,并应用 DSPF2812 模块控制位移平台伺服运动。PC 和 DAQ

的参数配置均与在机测量系统一致。

具体实验过程如下:光纤激光器发出的 1550 nm 光束经准直、整形透镜组后变成近似平行光,再经耦合透镜聚焦和滤光片透射,最终光斑落在 CCD 光敏面上。其中 CCD 被放置在耦合透镜焦点前,可通过改变 CCD 与透镜组距离来调节 CCD 光敏面上光斑半径大小;通过 PC 和 DAQ 控制三维微位移平台以实现 CCD 纳米级移动,从而改变 CCD 光敏面上的光斑位置坐标。CCD 采集的光斑图像经 DB9 接口传递到 DAQ 中,采用本节提出的光斑质心提取方法进行处理,最后利用 USB 将结果显示在 PC 上。实验中,调节激光器使其输出功率为 $10 \mu\text{W}$,设置 DAQ 采样频率为 1 kHz,利用纳米微位移伺服平台调节透镜与 CCD 的间距及光斑图像在 CCD 上的位置,使光斑半径大小为 $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$,光斑位置坐标为 (100, 100)。

实验获得的光斑图像信号如图 5 所示,其中图 5(a) 为获得的光斑真实图像,图 5(b) 为获得的光斑二值化图像。由图 5 可以看出,实验采集的光斑图像存在一定的随机噪声和背景辐射噪声。对其二值化图像进行如下处理:先利用变结构元广义形态学边缘提取算法对光斑图像的有效边缘进行检测;再根据多项式插值亚像素边缘定位算法对检测的有效边缘点进行定位;最后通过最小二乘法对定位点进行椭圆拟合,求出椭圆的质心,即为光斑质心。按照上述方法处理后的光斑图像如图 6 所示,其中图 6(a) 为处理后的光斑真实图像,图 6(b) 为处理后的光斑二值化图像。由图 6 可以看出,所提方法处理后的光斑图像更加规整和平滑,不仅充分地提取了光斑图像边缘的细节信息,同时也有效地抑制了图像噪声。

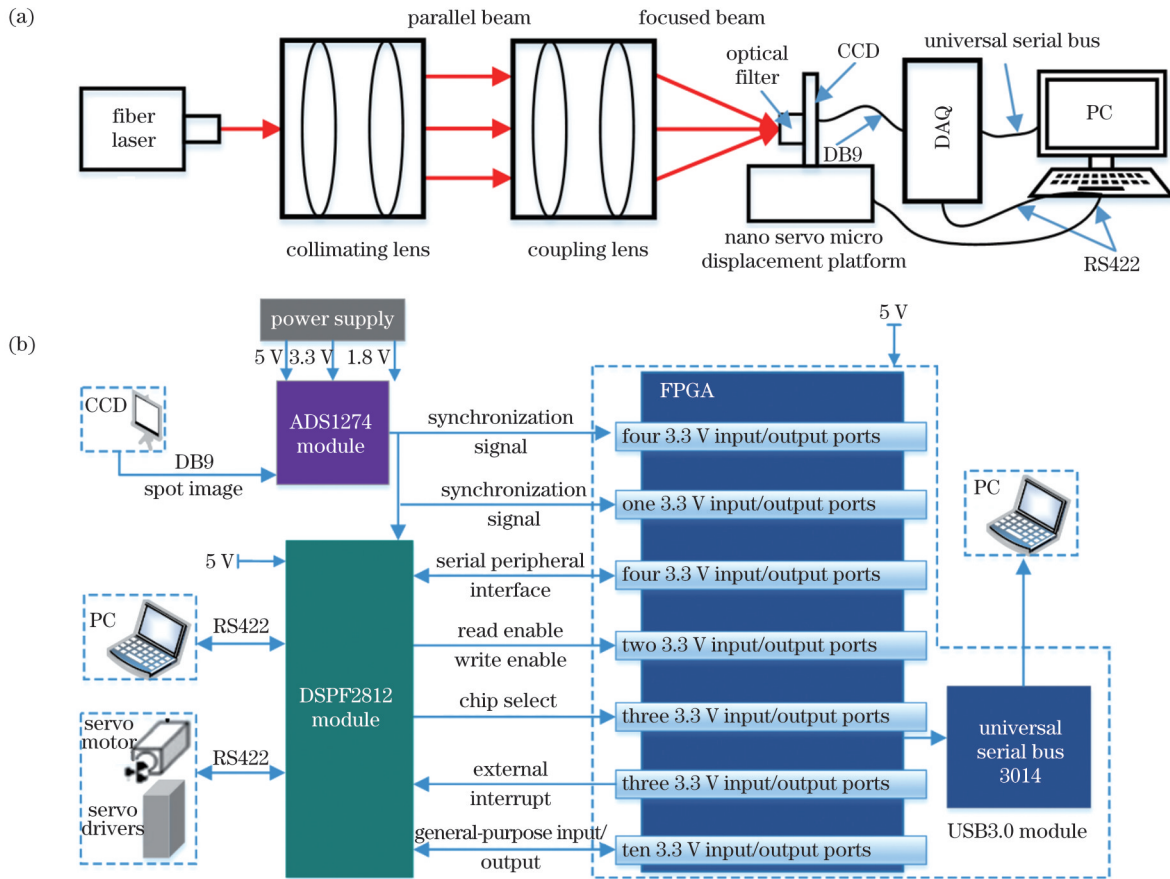


图 4 光斑图像信号采集系统。(a)原理图;(b)DAQ架构图

Fig. 4 Acquisition system for spot image signal. (a) Principle diagram; (b) DAQ architecture diagram

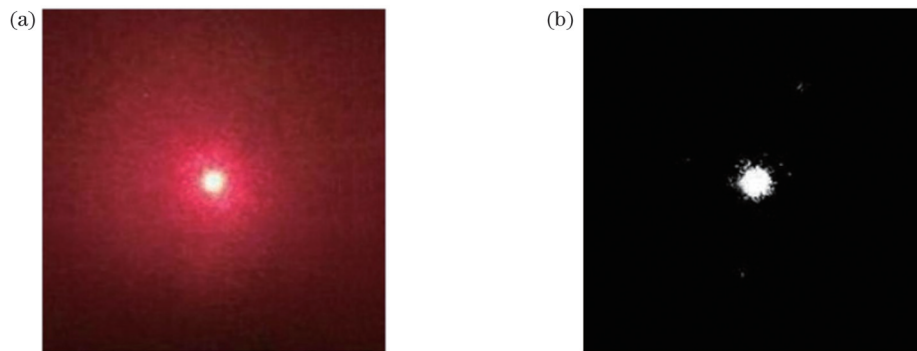


图 5 实验采集的原始光斑图像信号。(a)原始光斑的真实图像;(b)原始光斑的二值化图像

Fig. 5 Original spot image signals acquired through experiment. (a) Real image of original spot; (b) binarized image of original spot

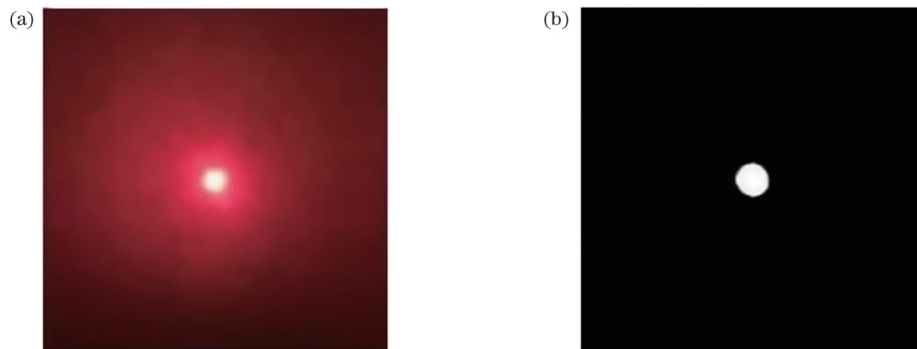


图 6 本文方法处理后的光斑图像信号。(a)处理后的光斑真实图像;(b)处理后的光斑二值化图像

Fig. 6 Spot image signals after processing by our method. (a) Real image of spot after processing; (b) binarized image of spot after processing

为了进一步对比本文方法在光斑质心提取精度方面的优势,分别采用灰度质心法、高斯拟合法、椭圆拟合法对图 5 所示的原始光斑质心进行提取,并对比 4 种方法的质心精度,对比结果如表 1 所示。在表 1 中,分别采用质心提取偏差的均方根值(RMS)和峰谷值(PV)来定量分析 4 种方法的质心提取精度,单位为 pixel,其中 PV 表示偏差的最大值,RMS 表示偏差的起伏情况,数据均为 10 次实验结果的平均值。分析可知,受原始光斑图像中的噪声的影响,高斯拟合法质心提取偏差的 RMS 值和 PV 值最大,质心精度最差;受原始光斑图像的复杂性和不规则性的影响,灰度质心法质心提取偏差的 RMS 值和 PV 值第二大,质心精度较差;受原始光斑图像强度不对称性和边缘模糊因素的影响,椭圆拟合法质心提取偏差的 RMS 值和 PV 值第三大,质心精度一般。而本文方法成功解决了在强度不对称和边缘模糊情况下椭圆拟合法误差较大的问题,光斑质心提取偏差的 RMS 值和 PV 值均最小,因此其质心提取精度最高。另外,实验中 CCD 采集光斑图像的分辨率为每英寸 300 pixel,故该图像中 1 pixel 对应 0.0846 mm,根据表 1 中质心提取精度结果可以看出,本节所提方法可以实现含噪光斑图像质心的微米级提取。

表 1 不同方法的质心提取精度

Table 1 Centroid extraction precisions of different methods

Method	RMS of deviation / pixel	PV of deviation / pixel
Gray centroid method	0.196	0.387
Gauss fitting method	0.205	0.412
Elliptic fitting method	0.183	0.354
Our method	0.147	0.269

3.2 一种新型点云信号光顺处理方法

由于 LTDS 扫描的双头螺杆转子廓形信息量较大,拟合操作不适合在全域上进行,需要在不同信息点段上分段多次拟合。然而,现有最小二乘法在分段处存在不满足函数连续性和可导性的缺陷,因此本节提出了一种基于拉格朗日乘数法的点云信号光顺方法。

窗口为曲线分段拟合所包括的点数区间,一个多项式方程对应一个窗口信息的一次拟合,完成后后移一个信息点组成新窗口继续拟合,直到最后一个窗口为止,即在总量为 n 的点云数据中,以 m 为单位划分窗口,则共有 $n-m+1$ 个窗口。设点云信息范围为 $[x_1, x_n]$,定义第 j 个信息点为 (x_j, y_j) , $j=1, 2, \dots, n$,则各窗口的逼近多项式为

$$g(x) = \begin{cases} g_1(x), x_1 < x < x_m \\ g_2(x), x_2 < x < x_{m+1} \\ \vdots \\ g_{n-m+1}(x), x_{n-m+1} < x < x_n \end{cases} \quad (8)$$

为保证在机测量过程的实时性,式(8)中各窗口信息点均用最小二乘法进行拟合,可求得各分段拟合多项式,则第 q ($q=1, 2, \dots, n-m+1$) 个窗口的多项式方程为

$$g_q(x) = \sum_{h=0}^M a_{qh} x^h, x_q < x < x_{q+m-1}, \quad (9)$$

式中: a_{qh} 为待定系数; h 为待定系数的编号; M 为待定系数个数。

为了保证在 x_q 处 $g_{q-1}(x)$ 过渡到 $g_q(x)$ 时曲线的连续性与光顺性,要求两段曲线在 x_q 处的函数值与一阶导数均相等,即加入端点约束条件 $g_{q-1}(x_q) = g_q(x_q)$ 与 $g'_{q-1}(x_q) = g'_q(x_q)$ 。

上述数学模型可被视为带极值约束问题,本节将基于拉格朗日乘数法将其转化为无条件极值问题并进行求解。在第 q 个窗口内引入拉格朗日乘子 μ_1 和 μ_2 , 并且设 $H_q = g_q(x_q) - g_{q-1}(x_q)$, $H'_q = g'_q(x_q) - g'_{q-1}(x_q)$, 则边界约束条件为 $H_q = 0, H'_q = 0$, 从而得到该数学模型的拉格朗日方程为

$$L = \sum_{j=q}^{q+m-1} \left(\sum_{h=0}^M a_{qh} x_j^h - y_j \right)^2 + 2\mu_1 H_q + 2\mu_2 H'_q, \quad x_q < x_j < x_{q+m-1}, \quad (10)$$

式中: j 为当前选定窗口序号。

改变待定系数 a_{qh} , 使拉格朗日函数值 L 最小, 进而使重构曲线最大限度逼近原始信息值。因此, 将 L 对所有 a_{qh} 求偏导, 并令其偏导数为零, 从而可得到信息点段 $[x_q, x_{q+1}]$ 的拟合曲线。根据该方法依次对每个窗口进行求解, 即得全域拟合曲线方程。

4 实验研究

应用上述在机测量系统在四轴双头螺杆转子旋风铣床上对某次铣削完成的螺旋曲面进行参数检测, 测量结果如图 7 所示。利用 3.1 节方法扫描的双头螺杆转子横截面廓形信号如图 7(a) 所示, 共采集 600 个离散点。再根据 3.2 节方法拟合点云信号, 为了提升效率, 按隔 10 取 1 的原则进行信号精简。拟合前确定窗口点数及方程阶数: 窗口点数过多, 则拟合效果差, 窗口点数过少, 则曲线光顺程度不达标, 且会增大信号处理过程中的计算量, 一般选择 4~8 为宜, 本次实验选择的窗口点数为 5; 多项式阶数最佳范围为 2~4, 实验结果表明, 以 2 阶多项式作为拟合函数时, 处理效果最佳。拟合结果如图 7(b) 所示, 其中“+”号表示精简后的离散信号, 实线表示拟合曲线, 可以看出各段拟合曲线的回归性良好, 算法可使曲线连续及一阶导数全局连续, 产生了较好的光顺效果, 同时避免了高次曲线拟合弊端。为了验证算法的拟合精度, 在图 7(b) 所示拟合曲线上取 10 个点与对应的原测量值进行比较, 结果如表 2 所示, 可以看出, 二者最大误差 R 不超过 ± 0.018 mm, 均方根误差 (RMSE) 为 0.011 mm, 残差

平方和(RSS)为 0.001,拟合曲线的精度较高、回归性良好。最后根据重构廓形计算长轴 d_1 和短轴 d_2 。螺

距 w 的测量信号处理方法与长、短轴一致,不再赘述。

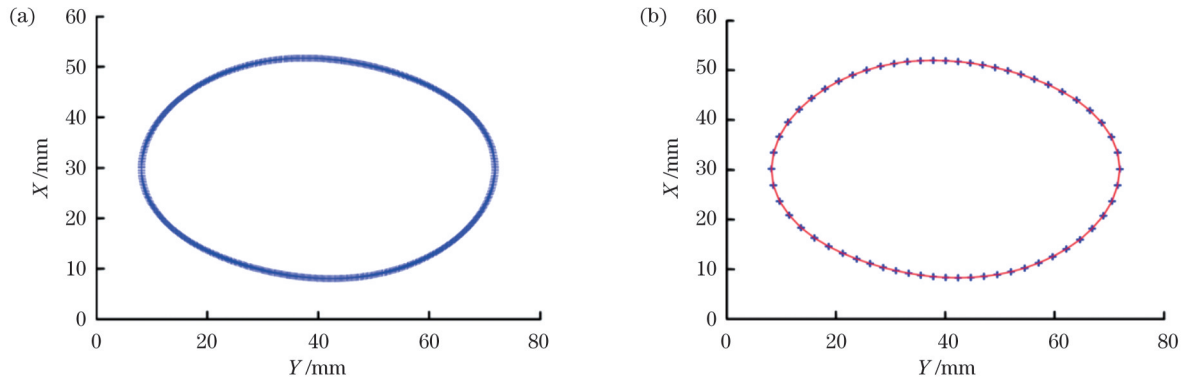


图 7 在机测量系统的检测结果。(a)利用 3.1 节方法采集的原始廓形;(b)利用 3.2 节方法拟合的双头螺杆转子廓形

Fig. 7 Test results of on-machine measuring system. (a) Original profile collected by method in section 3.1; (b) double-headed screw rotor profile fitted by method in Section 3.2

表 2 光顺处理前后数据对比

Table 2 Comparison of data before and after fairing processing

Before fairing processing		After fairing processing		R / mm
d_1	d_2	d_1	d_2	
71.495	33.310	71.495	33.315	0.005
70.370	36.455	70.370	36.446	-0.009
68.610	39.296	68.610	39.278	-0.018
66.408	41.758	66.408	41.766	0.008
63.954	43.830	63.954	43.828	-0.002
61.371	45.527	61.371	45.540	0.013
58.787	46.916	58.787	46.920	0.004
56.246	48.043	56.246	48.061	0.018
53.789	48.979	53.789	48.986	0.007
51.400	49.745	51.400	49.735	-0.010

为了检验在机测量(OMM)系统的能力,应用 CMM 对双头螺杆转子同一横截面进行对比测量,如

图 8 所示。由于 CMM 测量精度较高,因此将其结果作为实际加工螺杆的真实参数。图 9 为三种测量方法检测的廓形对比,其中图 9(a)为整体测量结果,图 9(b)为 OMM 与 LTDS 相对于 CMM 的局部测量误差曲线。由图 9 可以看出,OMM 相对于 CMM 的测量误差要明显小于 LTDS 相对于 CMM 的测量误差,OMM 检测的轮廓曲线更贴近 CMM 结果,这说明第 3.1 节的含噪光斑图像灰度质心提取算法可以提高 LTDS 的信号采集精度。为了进一步验证 OMM 的精度,分别对 3 种检测方法 10 次测量结果的平均值进行对比,结果如表 3 所示。分析可知,3 种检测方法所得结果与对应公称值的差值均在公差带范围内,说明螺杆转子加工合格。通过对比 OMM 和 LTDS 的检测结果可知,本文提出的光斑质心提取方法可以在一定程度上改善螺旋曲面测量中 LTDS 的测量精度;由 OMM 与 CMM 结果间的差值,可得本文设计的基于 LTDS 的双头螺杆转子在机测量系统的精度可达 $\pm 9 \mu\text{m}$ 。

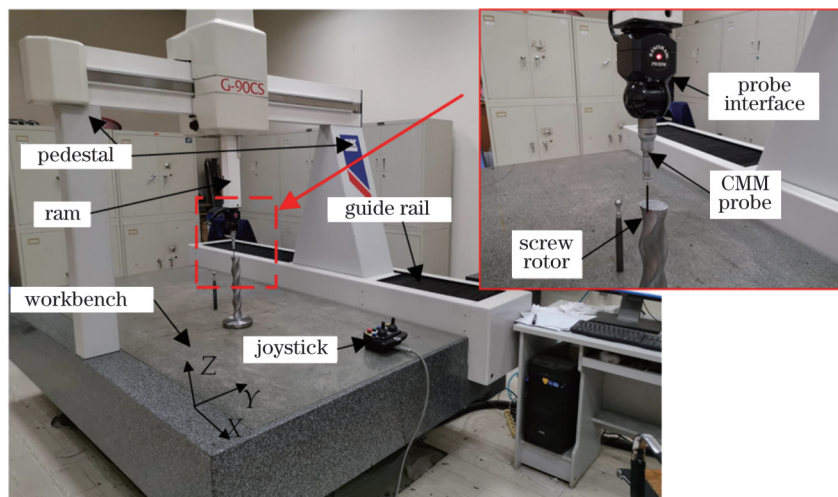


图 8 双头螺杆转子的 CMM 测量实验

Fig. 8 CMM measurement experiment of double-headed screw rotor

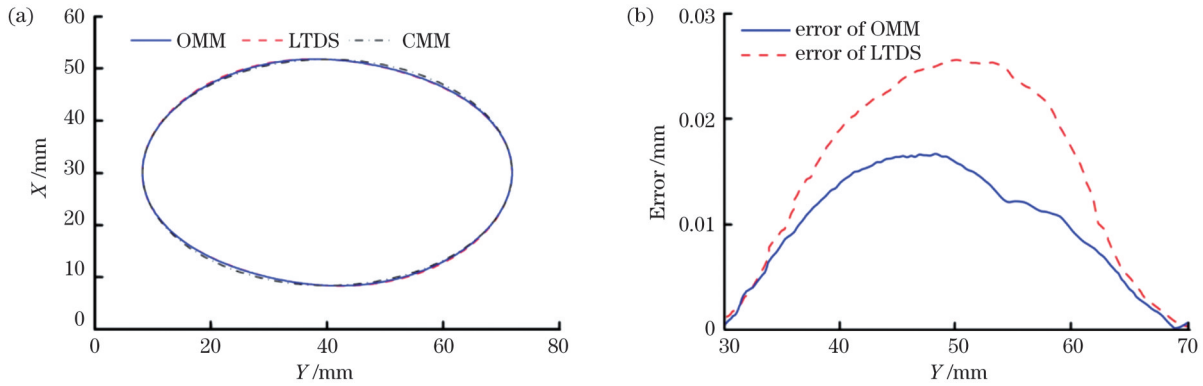


图9 三种测量方法检测廓形对比。(a)整体测量结果;(b)相对于CMM的测量误差

Fig. 9 Comparison of detected profiles of three measurement methods. (a) Overall measurement result; (b) measurement error relative to CMM

表3 不同测量方法的测量结果

Table 3 Measurement results of different measurement methods

Method	d_1 /mm	d_2 /mm	w /mm
CMM	59.973	41.983	102.016
LTDS	59.997	41.998	101.986
OMM	59.982	41.989	101.007
Measurement error	0.009	0.006	-0.009
Nominal value	60	42	102
Tolerance zone	$[-0.1, 0]$	$[-0.1, 0]$	$[-0.05, 0.05]$

为了保证在机测量系统结果的完整性,分别对长轴 d_1 、短轴 d_2 和螺距 w 的测量不确定度进行分析。以螺距 w 为例,其测量不确定度的主要影响因素有 LTDS 的分辨率和线性度误差、机床 Z 向的定位精度和导轨直线度、环境温度变化以及测量重复性,其中应用 A 类评定方法计算重复性引起的测量不确定度,其余因素引起的测量不确定度均用 B 类评定方法计算。具体方法为:LTDS 分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,则由传感器分辨率引入的测量不确定度分量 $u_1=0.1 \mu\text{m}$;LTDS 线性误差为全程的 $\pm 0.02\%$,该误差服从均匀分布,取包含因子 $\sqrt{3}$,测量螺杆长度为 110 mm ,则计算得 LTDS 线性误差引入的测量不确定度分量 $u_2=1.18 \mu\text{m}$;机床 Z 向定位精度为 $0.01 \text{ mm}/500 \text{ mm}$,该误差同样服从均匀分布,取包含因子 $\sqrt{3}$,测量螺杆长度为 110 mm ,则计算得机床 Z 向定位精度引入的不确定度分量 $u_3=0.13 \mu\text{m}$;相似地,机床 Z 向导轨直线度为 $0.05 \text{ mm}/1000 \text{ mm}$,其引入的不确定度分量 $u_4=0.32 \mu\text{m}$;在室温 t 为 $29 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,利用在机测量系统短时间内完成螺距 w 的 10 次测量,材料膨胀系数 $\alpha_1=1.1 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$,螺距 w 的公称值 $w_d=102 \text{ mm}$,则按 $\mu_5=\alpha_1 w_d(t-20)$ 计算得环境温度变化引起的测量不确定度分量 $u_5=0.12 \mu\text{m}$;根据表 3 中 10 次测量结果,利用贝塞尔公式和 A 类评定办法计算得测量重复性引起的测量不确定度分量 $u_6=0.16 \mu\text{m}$ 。由于以上各项测量不确定度分量相互独立,因此可以采用方和根计算螺距 w 的合成不确定度 $\mu_w=$

$\sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_4^2 + \mu_5^2 + \mu_6^2} = 1.65 \mu\text{m}$ 。相同方法计算得长轴 d_1 的合成不确定度为 $u_{d_1}=0.72 \mu\text{m}$,短轴 d_2 的合成不确定度为 $u_{d_2}=0.69 \mu\text{m}$ 。

综上所述,本文提出的基于 LTDS 的双头螺杆转子在机测量系统的测量精度可达 $\pm 9 \mu\text{m}$,长轴测量不确定度为 $0.72 \mu\text{m}$,短轴测量不确定度为 $0.69 \mu\text{m}$,螺距测量不确定度为 $1.65 \mu\text{m}$ 。测量过程中传感器进给速度 $F=200 \text{ mm}/\text{min}$,测量长度为 110 mm ,主轴转速为 $10 \text{ r}/\text{min}$,则螺杆转子单个螺距的测量耗时为 39.7 s 。

5 结 论

基于 LTDS 的双头螺杆廓形参数在机测量系统基于良好的数控资源,检测出不合格工件并进行修正。为了实现信号的精确采集,提出了可抗噪声干扰的光斑质心提取算法和基于拉格朗日乘数法的点云信号光顺算法,这些方法可应用于 LTDS 的逆向工程、精密检测等领域。装载着该系统的四轴双头螺杆转子旋风铣床已投入使用,实际运行结果表明,该系统测量精度为 $\pm 9 \mu\text{m}$,其长轴、短轴、螺距的测量不确定度分别为 0.72 、 0.69 、 $1.65 \mu\text{m}$,检测一个螺距耗时 39.7 s ,可满足在线生产中大尺寸工件精准控制与快速检测的要求。

参 考 文 献

- [1] 杨赫然,何源,孙兴伟,等. 螺杆转子砂带磨削装置开发及材料去除率预测[J]. 中国机械工程, 2021, 32(17): 2055-2062.
Yang H R, He Y, Sun X W, et al. Development of belt grinding devices for screw rotor and prediction of material removal rates[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(17): 2055-2062.
- [2] 付翔宇,王道档,吴振东,等. 用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 78-84.
Fu X Y, Wang D D, Wu Z D, et al. Compact transient interferometric measurement system used for online testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 78-84.
- [3] 王乐,方玥,王胜春,等. 基于偏振融合的钢轨廓形线结构光成像方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2211001.
Wang L, Fang Y, Wang S C, et al. Line-structured light imaging method of rail profile based on polarization fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2211001.

- [4] 侯冠宇, 吴斌, 何荣芳, 等. 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712003.
Hou G Y, Wu B, He R F, et al. Three-dimensional measurement method of defects based on binocular grating reconstruction and texture mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712003.
- [5] 李乾, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 利用相机响应曲线实现高反光元件三维面形测量[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712001.
Li Q, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three dimensional shape measurement of high reflective elements using camera response curve[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712001.
- [6] Li X Q, Wang Z, Fu L H. A laser-based measuring system for online quality control of car engine block[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1877.
- [7] Alam A, O'Nils M, Manuilskiy A, et al. Limitation of a line-of-light online paper surface measurement system[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2715-2724.
- [8] 崔昊, 郭锐, 李兴强, 等. 基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904003.
Cui H, Guo R, Li X Q, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904003.
- [9] 刘凯媚, 陶卫, 陈潇, 等. 可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104003.
Liu K M, Tao W, Chen X, et al. Laser triangulation method for glass thickness by automatically adapting to displacement change [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104003.
- [10] Korosec M, Duhovnik J, Vukasinovic N. Identification and optimization of key process parameters in noncontact laser scanning for reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(8): 744-748.
- [11] 董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 30-38.
Dong Z X, Sun X W, Liu W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 30-38.
- [12] Li Y H, Zhou J B, Huang F S, et al. Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method[J]. Sensors, 2017, 17(4): 814.
- [13] Wu S Q, Shen B, Wang J H. Super-resolution algorithm for laser triangulation measurement[J]. Lasers in Engineering, 2017, 38: 385-395.
- [14] Selami Y, Tao W, Gao Q, et al. A scheme for enhancing precision in 3-dimensional positioning for non-contact measurement systems based on laser triangulation[J]. Sensors, 2018, 18(2): 504.
- [15] Yin X Q, Tao W, Feng Y Y, et al. Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2653-2660.
- [16] Qi L, Zhang Y X, Zhang X P, et al. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm[J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13442-13449.
- [17] Liu X J, Zhao H S, Zhan G M, et al. Rapid and automatic 3D body measurement system based on a GPU-Steger line detector[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5539-5547.
- [18] He L Y, Wu S S, Wu C Y. Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 823-832.
- [19] Jiang J, Liu C, Ling S R. An FPGA implementation for real-time edge detection[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2018, 15(4): 787-797.
- [20] 张宇. 基于快速最小二乘法的两步随机相移算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0312003.
Zhang Y. Two-step random phase shifting algorithms based on fast least-squares method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0312003.
- [21] Dong Z X, Sun X W, Chen C Z, et al. A fast and on-machine measuring system using the laser displacement sensor for the contour parameters of the drill pipe thread[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1192.

On-Machine Measuring System Based on Laser Triangular Displacement Sensor for Double-Headed Screw Rotor

Sun Mengnan, Dong Zhixu*, Xu Wei, Liu Mingxuan, Sun Xingwei**

School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract

Objective The double-headed screw rotor is a common and critical power generating component and the accuracy of its profile has a direct bearing on the mechanical properties and service life of various products. The current profile accuracy measurement methods for double-headed screw rotors are all contact-type, and are divided into two type. One type is to manually measure the profile accuracy with a single-parameter instrument such as a micrometer. Although measurement accuracy and efficiency are both low, this method can be used for on-machine measurement. The second type refers to automatic measurement of the profile accuracy with a coordinate measuring machine (CMM). Despite its high measurement accuracy, this method consumes significant auxiliary time, increases the positioning error in off-machine measurement and cannot guarantee the post-correction accuracy of a nonconforming screw. To measure the profile of double-headed screw rotors with high precision and efficiency, an on-machine measuring (OMM) system based on a laser triangulation displacement sensor (LTDS) is designed and implemented by considering a four-axis whirlwind milling machine as the carrier.

Methods To improve the measurement accuracy of the system, the generalized variable-structural-element morphological method, polynomial interpolation algorithm, and ellipse fitting method are combined to realize micron-level centroid extraction from a noise-containing spot image. Then, the hybrid method is experimentally verified. Subsequently, a smoothing algorithm for point cloud data is devised based on the Lagrange multiplier method to avoid the defects associated with the piecewise curve fitting method, that is, function continuity and differentiability cannot be satisfied at piecewise points. Finally, the profile parameters are calculated in real time according to the data reconstruction results, and the machining quality is assessed.

Results and Discussions The measuring results are shown in Fig. 9. In comparison with that of the traditional LTDS-based measuring method, the profile measured through the OMM method is closer to the CMM result. This outcome indicates that the LTDS data acquisition accuracy can be improved with the proposed method in Section 3.1, that is, the generalized variable-structural-element morphological edge extraction algorithm is applied first to realize effective edge measurement of the spot image and then the polynomial interpolating subpixel edge positioning algorithm is applied to realize rapid subpixel positioning. Ultimately, centroid extraction is conducted through the ellipse fitting algorithm. As shown in Table 3, all difference values are within the acceptable tolerance zone for all three standard measuring methods compared with their corresponding nominal values, indicating that the screw rotor part is acceptable after machining. However, the proposed spot centroid extraction method can improve the measurement accuracy of traditional LTDS for a free-form surface compared to OMM. The profile accuracy of the screw rotor obtained through the proposed LTDS-based on-machine measuring system is within $\pm 9 \mu\text{m}$ from the difference values between OMM and CMM results.

Conclusions Such whirlwind milling machines configured with four-axis screw rotors have been placed in operation. Actual results indicate that the measurement accuracy using the proposed method is $\pm 9 \mu\text{m}$, in which the measurement uncertainties of major axis, minor axis, and screw pitch are 0.72, 0.69, and 1.65 μm , respectively, and measuring one screw pitch consumes 39.7 s. Therefore, the results indicate that the proposed on-machine measuring system can satisfy the requirements for accurate control and rapid measurement of large workpieces in actual operation.

Key words measurement; screw rotor; laser displacement sensor; signal processing