

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.008

专用密封圈及模具检测系统设计

梁 爽, 赵转萍*, 韩琦文

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对专用密封圈及其模具型腔参数进行高效检测的问题,对密封圈及其模具特征、检测干扰因素、误差计算模型方面进行了研究,对密封圈及模具检测的原理与组成进行了归纳,在建立检测系统的结构与控制模型基础上,提出了一种基于激光二维扫描传感器的检测系统,通过多截面多角度扫描轮廓离散点数据并进行了曲线拟合,以判断对象的特征参数是否符合要求。该检测系统由自行设计的四维精密运动平台与高精度三爪卡盘式运动转台组成工件承载定位平台,利用激光二维扫描传感器和 NI6229 型数据采集卡形成了数据采集通道,并分析了该系统测量坐标系的建立和实现方法,提出了基于最小二乘原理的曲线拟合和特征提取算法。研究结果表明:该检测系统不确定度达到 $9.84 \mu\text{m}$,能够有效解决对密封圈及其模具进行高效非接触式检测的问题,提高密封圈制造质量。

关键词:密封圈;激光二维扫描传感器;精密运动平台;数据采集卡

中图分类号:TH39;TB42;TP23

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0287-06

Testing system design of special sealing ring and its mould

LIANG Shuang, ZHAO Zhuan-ping, HAN Qi-wen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing-University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problems of efficient detection of the special sealing ring and the mold cavity parameters, the features of the special sealing ring and the mold, interference factor, error calculation models were researched, the principle and constitution of detection system were summarized, a new detection system based on laser scanning sensor was proposed. The characteristic parameters of the object can be judged by multi section and multi angle scanning the contour of discrete point data and curve fitting. In the detection system, the four-dimensional precision motion platform and high precision three jaw chuck movement table which form the artifact bearing positioning platform was designed. Then, data acquisition channel was formed by using laser two-dimensional scanning sensor and NI6229 data collection, the establishment and the realization method of the measuring coordinate of the system was analyzed. Finally, the curve fitting and feature extraction algorithm based on the principle of least squares was proposed. The results indicate that the uncertainty of this system can reach $9.84 \mu\text{m}$, and it can effectively solve the problem of the sealing ring and the mold for efficient non-contact detection, so as to improve the quality of sealing ring.

Key words: sealing ring; two-dimensional laser scanning Sensor; precision motion stage; data acquisition card

0 引 言

在航空航天、武器装备、船舶等制造业中大量应用

着密封圈,主要用于静密封和往复运动密封,对飞机各系统的密封性能起着重要作用,直接影响飞机的安全。现有密封圈的模具制造精度、配合质量、变形磨损程度都直接决定了密封圈的质量,影响其后续的密封效果。

收稿日期:2015-11-04

作者简介:梁爽(1991-),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事计算机辅助测控方面的研究. E-mail:liangshuang007@126.com

通信联系人:赵转萍,女,副教授,硕士生导师. E-mail:meezpzha@nuaa.edu.cn

因此必须从模具检测等方面进行改进,以提高产品的质量,提高生产效率。目前,对于密封圈模具进行测量的方法并不多,一般都是通过模具的制造工艺保证模具的合格性。中国航天科技集团公司第 510 研究所提出了一种利用压力检测密封圈质量的检测装置^[1],该装置虽然检测结果可靠,但所需装置较多检测过程繁琐并不适合高效率的检测。华中科技大学秦大辉等人^[2]利用光栅相移测量原理检测模具,这种方法成本较低但精度不是很高,对于高精度的密封圈模具检测有点力不从心。

在进行密封圈压膜生产过程中,对于尺度、类型多样化的模具并没有一个合适的检测方法来评判模具的质量与合格性。对成品密封圈的检测也同样如此,通常研究人员采用随机选取密封圈截面再通过显微镜观察的方法来进行检测,这种方法必须破坏密封圈同时也不能保证选取的截面是否准确,因此设计出一种非接触式的利用光学进行检测的系统是十分必要的。

1 检测系统工作原理

针对这种情况,本研究以航空应用中的 V 型橡胶密封圈以及 45°分型二开模密封圈模具为例,结合激光二维扫描传感器与其他关键技术,设计一套用于密封圈模具以及成品密封圈检测的专用设备。本研究所涉及的 45°分型二开模密封圈模具型腔截面呈圆形, V 型橡胶密封圈工作截面呈三角形,顶点到三角形底边高度 H 要求为 1 mm,公差 0~0.2,顶角 θ 要求为 45°,公差 $\pm 1^{\circ}30'$,其结构图分别如图 1、图 2 所示。

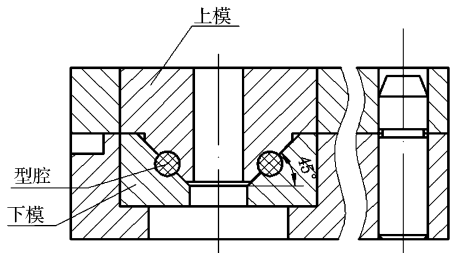


图 1 45°分型 O 形圈模具结构图

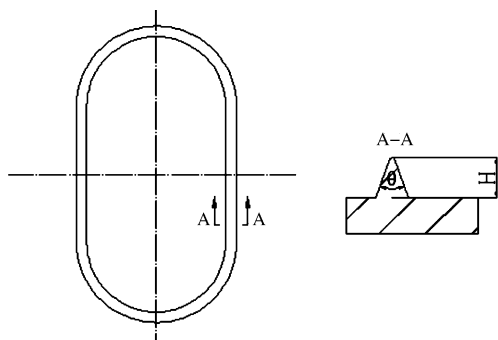


图 2 V 型密封圈结构图

专用密封圈及模具检测系统的基本原理为采用四维装夹定位技术装夹激光二维扫描传感器,并将所需测量的密封圈模具装夹与气浮测量转台之上,利用激光二维扫描传感器进行密封圈模具型腔截面轮廓数据的测量采集,同时转台旋转,采集完整一圈位置上的密封圈模具型腔多截面轮廓的信息。本研究对模具的轮廓信息进行分析计算,拟合出密封圈模具的完整空间曲面轮廓,以此来判断分析密封圈整体尺寸是否符合要求。同时可以根据要求,选取合适数量以及任意角度上的截面参数信息,判断密封圈截面是否符合要求。

根据上述测量原理,检测系统总体构成框图如图 3 所示。

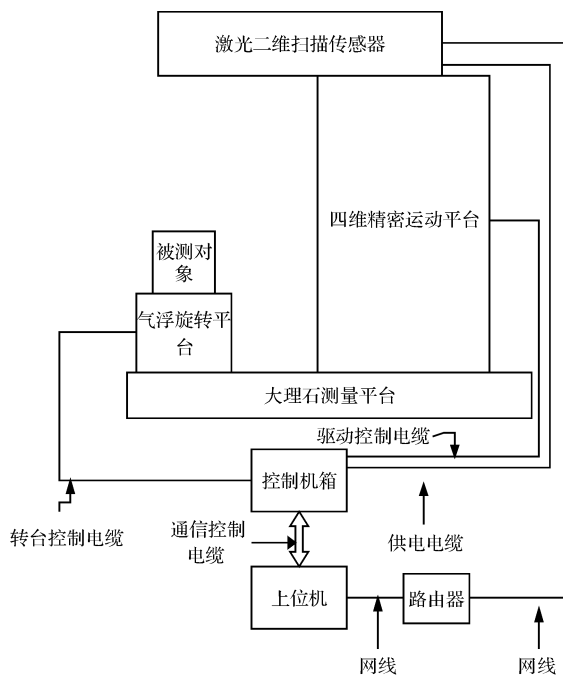


图 3 检测系统总体构成框图

激光二维扫描传感器的工作原理是基于光学三角测量原理(原理图如图 4 所示)。一条由半导体 1 产生的辐射激光 2,透过棱镜形成一条直线 3,投射到物体 7 上。被物体表面散射的激光被棱镜 4 采集并定向

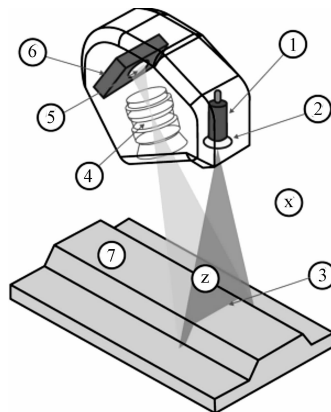


图 4 激光二维扫描传感器工作原理图

到一个二维 CMOS 阵列 5 上。通过信号处理器 6 分析由此产生的物体轮廓图像信息,计算出物体上的沿着激光线方向(X 轴)中的各个点的距离(Z 轴)。

该系统选用激光二维扫描传感器是深圳市真尚有科技有限公司的 ZLDS200-100 类型的传感器,其基本性能参数如表 1 所示。

表 1 激光二维扫描传感器性能参数

名称	参数
标称采样率/profiles \cdot s ⁻¹	250
最大采样率/profiles/s (ROI)	1 200
Z 、 X 轴线性度/%	± 0.1
X 轴分辨率/points \cdot profile ⁻¹	1 024
Z 轴范围/mm	100
测量范围起始(SMR)/mm	75
测量范围终止(EMR)/mm	175
X 轴范围(SMR)/mm	35
X 轴范围(EMR)/mm	70

工作流程包括建立测量系统坐标系、标定及测量操作。

(1) 根据旋转测量要求,保证激光扫描平面通过测量转台圆心。标准环规装夹在测量转台上,通过激光二维扫描传感器扫描检测标准环规直径来完成;

(2) 根据二维传感器原理,保证 X 、 Y 坐标量值准确性。可以通过采集标准环规信息,确定传感器坐标与测量转台坐标关系,完成量值标定;

(3) 同样需要保证采集得到的密封圈模具轮廓点的 Z 坐标准确性。装夹被测密封圈模具(工件),利用密封圈模具分型面(基准面)进行相对调高调平操作,二次调平后可进行被测件测量采集;

(4) 对于特殊类型密封圈模具,如上述 45° 分型密封圈,需要先利用标准 45° 量块进行传感器调平,然后再进行其余测量操作。

2 检测系统机械结构设计

检测系统需设计出合理的空间精密运动平台^[3]来满足 XYZ 三轴位移的进给,以及绕 Y 轴转动的要求。同时,还需设计出精密的测量转台,来装夹被测对象。检测系统采用的激光二维扫描传感器的参数如图 5、表 1 所示,该检测系统可以检测最大理论外径在 70 mm 以内的密封圈以及密封圈模具。

2.1 检测系统旋转机构

对于检测系统而言,要保证检测的正确进行需要有测量转台与激光二维扫描传感器构建出正确的空间坐标系,因此旋转机构必须能够在检测过程中保持稳定与精确。同时,考虑到需要对具有一定重量的模具

进行装夹,因此笔者考虑选用气浮转台再结合高精度三爪卡盘来作为检测系统的测量平台。高精度三爪卡盘装夹外径 ≥ 70 mm,定位精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

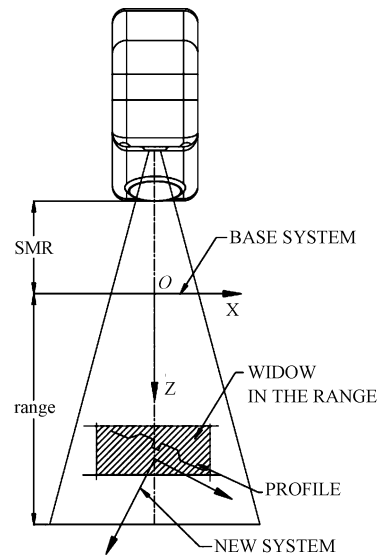


图 5 激光二维扫描传感器测量范围示意图

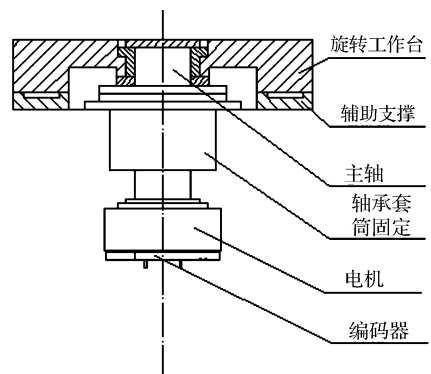


图 6 气浮转台结构示意图

测量转台需要较低以及稳定的转速以及较高的位置精度,因此选用大扭矩 MAXON 伺服电机^[4-6]进行驱动,同时搭载光电编码器^[7],实时给上位机传递旋转角度信息,组成全闭环反馈。气浮转台轴向/径向跳动精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

2.2 检测系统 XZ 轴位移进给机构

检测系统 XZ 轴位移进给机构直接提供激光二维扫描传感器的二维偏移,行程需 ≥ 150 mm。 XZ 轴负责将激光二维扫描传感器运送到可测范围内,在检测过程中起着辅助作用,因此 XZ 轴进给机构的定位精度并不会影响测量采集的精度。

XZ 轴位移进给系统采用二维滚珠丝杠直线平台,行程均为 200 mm。滚珠丝杠副选用南京工艺装备制造有限公司的 FFZD 内循环浮动式,其导程为 4 mm,直线导轨副选用南工艺生产的 GGC 微型滚动导轨副,

驱动元件选用步进电机^[8]。整体设计轻便,方便安装。

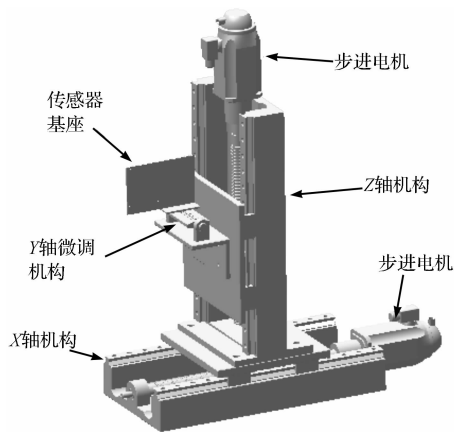


图 7 四维运动平台示意图

3 检测系统测控模块设计

检测系统测控模块是由上位机控制终端与下位机控制器共同组成。上位机基于 Visual C#语言编写,其数据管理层基于 SQL Server 数据库系统搭建。下位机控制器以 NI 公司的 6229 型数据采集卡为主控制器,上、下位机采用 USB 接口通信。

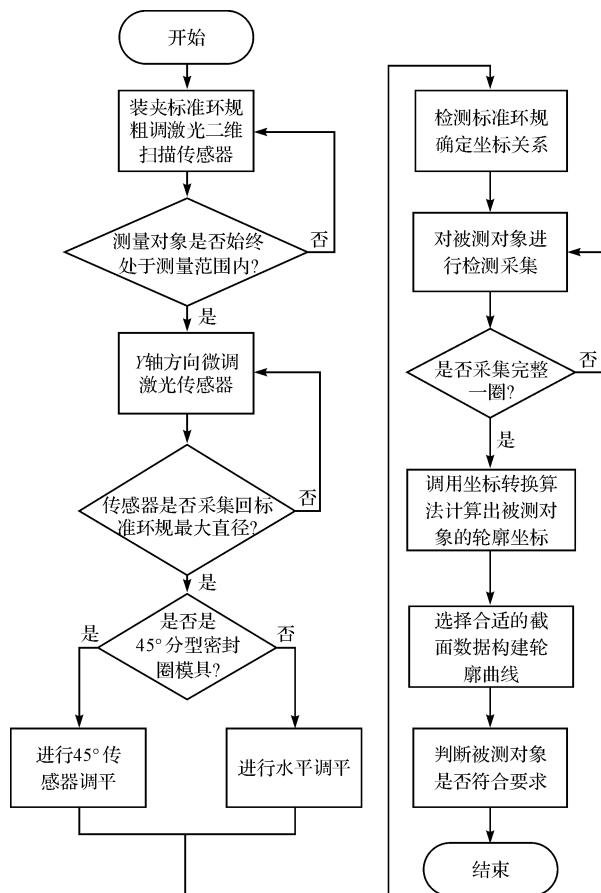


图 8 检测系统控制流程图

检测系统控制流程图如图 8 所示,首先本研究粗调激光二维扫描传感器,保证测量对象始终处于测量范围内。Y 轴方向微调激光传感器,使激光二维扫描传感器采集回标准环规最大直径数值,保证激光二维扫描传感器发射的激光线通过转台圆心以及采集的轮廓是测量对象的正确截面。如果是 45°分型密封圈模具,进行 45°传感器调平;如果是正常分型的密封圈模具,进行水平调平。检测标准环规,确定激光二维扫描传感器的坐标与转台空间坐标的关系,并修正坐标偏差,再装夹被测对象,启动转台开始检测采集,待完整一圈数据采集完成后,调用坐标转换算法,计算出被测对象在转台空间坐标系中的轮廓坐标,利用曲面拟合算法拟合出被测对象完整曲面轮廓,根据需求选择合适数量以及角度的截面数据,结合被测对象质量要求,判断被测对象是否符合要求。

3.1 基于 NI 数据采集卡的下位机控制模块设计

检测系统下位机是以 NI6229 型数据采集卡为核心的控制器,主要完成与上位机的通信、控制并驱动电机以及采集限位开关与光电编码器信号。

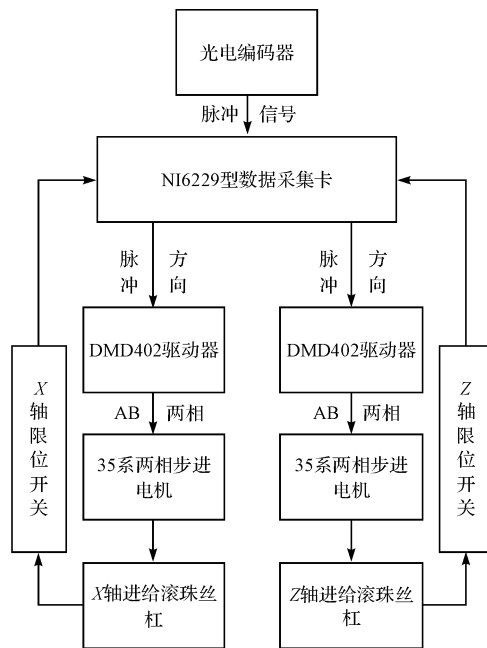


图 9 XZ 轴进给控制系统框图

XZ 轴进给控制系统框图如图 9 所示,XZ 轴进给系统均采用森创 35 系列两相混合步进电机作为其驱动元件,电机驱动器采用乐创 DMD402A 型步进电机细分驱动器。测量转台采用伺服电机进行驱动。NI6229 型数据采集卡通过通道发送脉冲数来控制电机的转动角度与速度,其分辨率设置为 1.35'/pulse。光电编码器的脉冲信号送入 NI6229 型数据采集卡中的计数器即可分辨出电机的旋转方向,同时记录光电

编码器码盘的旋转量。限位开关采用 OMRON 671 NPN 型光电传感器,输出的阶跃信号由 NI6229 型数据采集卡的模拟电压采集通道进行采集。

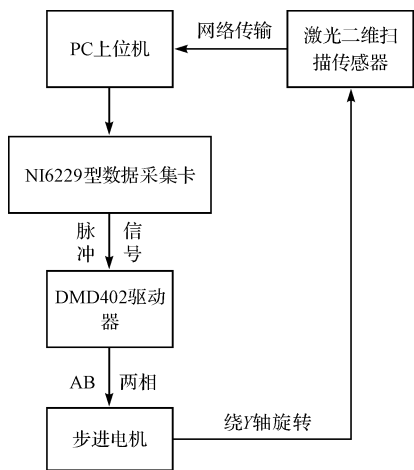


图 10 调平控制系统框图

调平控制系统框图如图 10 所示,绕 Y 轴转动驱动元件采用森创 28 系列两相混合步进电机。Y 轴转动系统分辨率设为 $0.001^\circ/\text{pulse}$,NI 数据采集卡通过通道发送脉冲数来控制伺服电机转动角度量与速度。PC 机软件系统通过网络接受激光二维传感器采集的数据,根据采集数据发送合适脉冲数控制伺服电机,进行激光二维扫描传感器的调平操作。

3.2 基于 Visual C#的上位机控制模块设计

检测系统上位机可划分为 3 大层次:应用层、算法层和数据层。操作人员通过应用层来执行整个校准过程,包括用户管理、设备管理、检测准备、开始检测;算法层负责系统的数值计算,包括工件轮廓坐标的生成、坐标转化以及曲面曲线拟合算法;数据层负责系统的数据管理,包括存储、查询、删除以及检测结果的打印输出。

4 检测系统算法

4.1 坐标转换算法

该检测系统在轮廓拟合过程中会遇到坐标转换^[9]的问题。激光二维扫描传感器直接采集的数据是根据其自身的坐标系 $O'X'Z'$ 而形成的坐标,需要将其转换成以测量转台圆心为原点的空间三维坐标系 $OXYZ$ 。

因为 Z' 轴与 Z 轴平行,故两个坐标系的原点垂直距离减去 $O'X'Z'$ 坐标系的 Z' 轴坐标可得到 $OXYZ$ 坐标系的 Z 轴坐标。

基于在测量之前进行的环规标定,可以获得标准

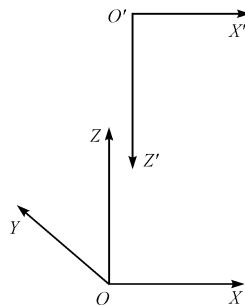


图 11 坐标转换示意图

环规的半径 R 在激光坐标系 $O'X'Z'$ 中 $O'X'$ 轴上的坐标值 $d_{O'X'}$,因而可得激光器坐标系与转台坐标系在投影面上的原点坐标距离 $D = R - d_{O'X'}$ 。因此,激光器坐标系 $O'X'Z'$ 与转台坐标系 $OXYZ$ 在 X 轴上的坐标之间存在如下关系: $d_{ox} = D + d_{O'X'}$ 。

这个坐标关系可以预先在标定完成之后,在确定坐标系关系算法中提前计算完成并直接进行对应数据补偿,使 $O'X'Z'$ 坐标系与 $OXYZ$ 坐标系投影到 XY 平面上后原点重合。

进而将 $O'X'Z'$ 坐标系与 $OXYZ$ 坐标系投影到 XY 平面上,坐标投影示意图如图 12 所示。

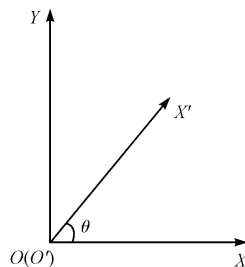


图 12 坐标投影示意图

因为转台在以固定转速进行旋转,故可以将其转换成 OX' 以固定转速在坐标系 OXY 中转动。坐标系 $O'X'Z'$ 的 X' 坐标相当于向量 OX' 的模,与 X 轴的夹角为 θ 。所以可知坐标系 $O'X'Z'$ 的 X' 坐标转换成空间三维坐标系 $OXYZ$ 的 X 轴坐标为 $d_{O'X'} \cos\theta$; Y 轴坐标为 $d_{O'X'} \cdot \sin\theta$ 。

4.2 离散点拟合曲面算法

经过测量和采集可以得到一组离散数据点 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 这里 x_i, y_i, z_i 为坐标值。由于这些数据点包含加工误差,轮廓函数 $f(x, y, z) = 0$ 的表达式预先无法知道,需要在给定的函数类 f 上根据这些离散数据作出逼近曲面。因为离散数据有误差,并不要求逼近曲面经过数据点,而只是要求逼近曲面 $f(x, y, z)$ 的误差的某个指标达到最小。该检测系统曲面拟合^[10-11]方法使用最小二乘法,通过使误差的平方

和最小,得到一个线性方程组,求解线性方程组就可以得到拟合曲面。

5 检测系统不确定度与实验分析

5.1 检测系统不确定度分析

检测系统的不确定度来源主要有:气浮转台轴向/径向跳动误差引入的不确定度 u_1 为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、高精度三爪卡盘定位精度误差引入的不确定度 u_2 为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 以及激光二维扫描传感器的 Z 、 X 轴线性度引入的不确定度。 Z 轴采集量程确定在 1.5 mm ,因此激光二维扫描传感器 Z 轴线性度引入的不确定度 u_3 为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$, X 轴采集量程确定在 2 mm ,因此 X 轴线性度引入的不确定度 u_4 为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

不确定度分量彼此相互独立,因此合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 4.92 \mu\text{m}$,最终的扩展不确定度 $U = k \times u_c = 9.84 \mu\text{m} (k = 2)^{[12]}$ 。由以上数据可知,扩展不确定度值满足本检准系统不确定度要求值 $\leq \pm 0.015 \text{ mm}$ 。

5.2 检测实验分析

该检测系统可以通过检测标准高度以及标准长度两组实验来验证本检测系统的可行性。本研究选用内径为 20 mm 的标准环规作为本检测系统的标准长度检测目标,进行 3 次检测,可得一组孔径值为 $\{20.010, 19.99, 20.005\}$,该组环规孔径示值误差绝对值分别为 $\{0.01, 0.01, 0.005\}$,该组误差均值在 0.015 mm 范围内。

本研究采用厚度为 1.1 mm ,精度等级 3 级的标准量块作为本检测系统的标准高度检测目标,同样进行 3 次检测,可得一组高度值为 $\{1.098, 1.109, 1.111\}$,该组环规孔径示值误差绝对值分别为 $\{0.002, 0.009, 0.011\}$,该组误差均值在 0.015 mm 范围内,因此可判断该检测系统满足测量精度要求。

6 结束语

本研究提出了一种基于激光二维扫描传感器的专用密封圈及模具检测系统,系统地介绍了测量系统的测量原理、机械结构的设计以及检测与控制部分的设计。

其非接触式、无损式的测量方法,可以保证检测对象在检测完成之后可以继续可靠使用。

该检测系统可以对一定范围内的多种尺度、多种类型的密封圈及模具进行检测,具有准确、高效的特点。通过不确定度分析,该检测系统不确定度达到 $9.84 \mu\text{m}$,后续工作中,可以采用误差补偿来提高运动平台的精度,以获得更好的测量性能。该检测系统利用光学方式弥补了橡胶密封圈接触式测量的缺点,同时填补了密封圈及其模具非接触式检测方式的空白。

参考文献(References):

- [1] 赵敏.一种航天用 O 形橡胶密封圈的漏率检测装置及方法[J].橡胶工业,2011,58(12):728-729.
- [2] 秦大辉,王从军,史玉升,等.基于白光相移原理的测量系统在铸造模具检测中的应用[J].中国铸造装备与技术,2008,2(6):49-50.
- [3] LIN Wei, XV Yang-fan. Design on the level control system with high-precision for the micro-motion platform[C]//Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 Wuhan [s. n.],2010:796-799.
- [4] 马天文,周建军,张亚平.基于伺服电机的齿轮箱传动精度检测系统[J].机电工程,2013,30(3):303-306.
- [5] 张丰收,祝鹏,冯崇,等.RV 减速器传动精度的研究[J].机械设计,2015,32(4):1-4.
- [6] 朱晓庚,王其勋,陈林,等.现代数控机床的精度分析[J].机械,2013,40(2):66-70.
- [7] 陈赞.单圈绝对式光电轴角编码器原理的研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2006.
- [8] 林鑫,余世明,朱建江.混合式步进电机细分控制方法优化策略研究与仿真[J].机电工程,2012,29(2):196-199.
- [9] 张卡,张道俊,盛业华,等.三维坐标转换的两种方法及其比较研究[J].数学的实践与认识,2008,38(23):121-128.
- [10] 曾清红,卢德.基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J].工程图学学报,2004(1):84-89.
- [11] 王仲,操晶晶,张立昆,等.基于图像的轮廓度测量与评定[J].光学精密工程,2009,17(2):395-401.
- [12] 国家质量技术监督局. JJF 1059-1999 国家计量技术规范[S].北京:中国计量出版社,2002.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

梁爽,赵转萍,韩琦文.专用密封圈及模具检测系统设计[J].机电工程,2016,33(3):287-292.

LIANG Shuang, ZHAO Zhuan-ping, HAN Qi-wen. Testing system design of special sealing ring and its mould[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):287-292.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>