DOI: 10.13382/j.jemi.B2105023

一种二级曲面测量装置的设计及其不确定度的标定

翁 川 尹自强
(广东工业大学机电工程学院 广州 510006)

摘 要:本文研制了一种二级曲面扫描测量装置,目的是解决传感器高精度和大量程之间的矛盾,让矢高较大的曲面的测量成为可能。采用二级测量系统,对高精度传感器的量程进行扩展,实现大量程高精度的曲面扫描测量。二级测量系统采用音圈电机驱动柔性铰链带动高精度传感器做直线运动,使被测曲面始终保持在高精度传感器的测量范围内并由高精度传感器的测量数据作为一级测量数据,高精度光栅尺对柔性铰链的位移测量数据作为二级测量数据,通过对两级测量数据进行处理即可获得测量点信息,最终实现了 5 mm 的量程扩展。同时,高精度光栅尺还作为柔性铰链伺服系统反馈装置。随后对二级测量系统进行性能评估,对其不确定度进行了分析计算,最后对测量装置的大量程扫描能力进行了实验验证,证明该装置具备大量程扫描测量的能力。

关键词: 曲面扫描;大量程;柔性铰链;二级测量
中图分类号: TH721 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4030

Design of a dual-stage surface measuring device and its uncertainty calibration

Weng Chuan Yin Ziqiang
(School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this paper, a dual-stage curved surface scanning measuring device is developed. The purpose is to solve the contradiction between the high precision and the large range of the sensors, which makes it possible to measure the curved surface with a large height difference. A dual-stage measurement system is used to expand the range of the high-precision sensor so that a scanning measurement for curved surfaces with a large range and high-precision is realized. The dual-stage measurement system uses a voice coil motor to drive the flexure hinge to move the high-precision sensor in a straight line, so the measured surface can be kept within the measurement range of the high-precision sensor. The measurement data of the high-precision sensor is taken as the first-stage measurement data, and the measurement data of displacement of the flexure hinge by the high-precision grating encoder is taken as the second-stage measurement data. The information of the measurement point can be obtained by processing the data of the dual-stage measurement system, and the range of 5 mm can finally be realized. At the same time, the high-precision grating encoder is also used as the feedback device of the servo system. Then, the performance of the dual-stage measurement system is evaluated, and the measurement uncertainty is analyzed and calculated. Finally, experiments are carried out on the large range scanning capability of the measuring device, which proves that the device has the ability of large range scanning measurement.

Keywords: surface scanning; large scale; flexible hinge; dual-stage measurement

0 引 言

随着超精密加工的不断发展,高精度曲面的应用越来越多,特别在光学领域,从球面、非球面到自由曲面,其对光学系统性能的提升越来越大,对加工和测量的要求也越来越高。尤其是自由曲面,它一般指缺少统一对称轴、具有非旋转对称结构的复杂曲面[1-2],这种复杂的结构,一方面提升了其应用的可能性[3-6],一方面又对其加工和测量提出新的挑战。因此,有必要对曲面的高精度

收稿日期: 2021-12-15 Received Date: 2021-12-15

测量进行研究。

从是否接触测量工件来看,一般将曲面测量分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量,如三坐标测量机(CMM)等方法虽然具有高精度、良好的重复性、大量程和较好的环境适用性等优点[7-8],但是容易对工件表面造成划伤,这对超精密加工,特别对表面质量要求较高的光学曲面而言,是难以接受[9]。相比之下,非接触式测量就不存在这个问题,且拥有较高的测量效率[10]。但是非接触式传感器往往很难兼顾高精度和大量程,这就导致了高精度传感器量程往往都比较小。如光谱共焦传感器和电容传感器等非接触式高精度传感器,它们的测量量程一般仅有几十到上百微米,这使得它们很难满足高低差较大曲面的测量要求。因此,为实现高低差较大曲面的高精度测量,需要对高精度传感器的量程进行扩展,许多学者对此提出了各种解决方案。

荷兰埃因霍温大学学者 Cacace[11] 运用折叠弹簧板柔性机构带动高精度传感器运动,对被测曲面实现跟随,使被测面始终保持在传感器测量范围内,再由干涉仪测量高精度传感器位移,结合干涉仪和高精度传感器数据获得曲面信息,实现大量程高精度的曲面测量。当测量方向垂直于测量面时,它的测量不确定度为 10 nm,测量倾斜 5°的表面时的不确定度为 35 nm。该测量系统也被应用到 NANOMEFOS 轮廓仪中[11-13]。浙江大学的 Du 等[14]研制了大量程复杂曲面测量装置,在高精度自由平台辅助下实现曲面跟随,实现高达 10 mm 的测量范围。

然而,上述测量仪器结构复杂,体积庞大,设计加工困难。因此本文研制了一种二级曲面扫描测量装置,通过音圈电机驱动一个复合柔性铰链带动高精度传感器进行直线运动,保证被测曲面始终保持在高精度传感器测量量程中。选用复合柔性铰链作为导向的原因是它能较方便的实现一个较大的直线位移,同时还具备重复性高、精度高、结构紧凑等优点。同时,由于刚度可控,使用柔性铰链作为导向元件可通过降低刚度来实现较高频率的往返运动,从而确保了测量的效率,提高了测量过程的跟踪精度。利用高精度光栅尺作为伺服系统的反馈元件和柔性铰链位移的测量元件,最后结合高精度传感器数据和光栅尺数据获得被测曲面被测点位置信息。

1 机械结构

图 1 所示为二级曲面测量装置机械结构图。其机械结构主要包括驱动元件、执行元件和反馈元件。该装置为一个二级测量系统,其主测量系统为一高精度传感器,柔性铰链由音圈电机驱动,带动光谱共焦传感器进行直线位移,保证被测量面始终保持在传感器测量量程内,保证传感器始终能进行采集测量。高精度光栅尺既作为控制铰链移动的伺服控制系统的反馈装置,又是作为二级测量系统的次级测量系统,对柔性铰链的位移,也就是高精度传感器的位移进行测量记录。最终结合高精度传感器和光栅尺数据,便能获得被测工件曲面的被测点的位置信息。同时,柔性铰链的行程大小定为 5 mm,这是由于在机械结构限制下,更大的行程和角度会增大装置的体积和测量误差,并且 5 mm 的行程足以应付大部分曲面的高精度测量[15]。

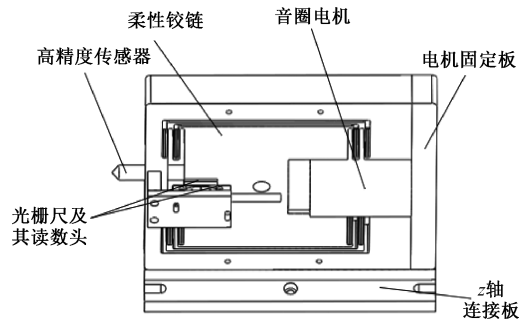


图 1 二级扫描测量装置机械结构示意图

Fig. 1 Mechanical structure diagram of the dual-stage scanning measurement device

驱动元件选用的是音圈电机,第 1 个原因是需要一个大行程高精度电机作为驱动元件来驱动柔性铰链进行直线运动,第 2 个原因是音圈电机具备结构简单、体积小、重量轻、响应快等特性,满足了所设计装置的小体积快响应的要求。因此音圈电机是驱动元件的最佳选择。音圈电机的选择将根据行程、所需驱动力、装置结构和伺服系统特性等设计要求进行。

执行元件的作用是带动高精度传感器进行直线运动,其基本要求是能达到所要求的行程,即 5 mm。其他设计要求包括尽可能小的结构、合适的刚度和较高的固有频率。柔性铰链具有高重复性,设计简单等优点,非常适合作为本设计的执行元件来实现直线运动。常用的柔性铰链有直角形、直圆形和椭圆形,然而这些常应用于微位移装置,要实现更大的位移,需要用到长而薄的柔性板,如图 2 所示。在实际运用中,柔性板长度受设计装置体积的限制,其厚度受加工公差限制,普通平行四边形柔性铰链(图 2)很难实现本文所述装置的设计要求[16]。

为了解决这个问题,复合平行四边形柔性铰链在大行程位移平台中被广泛应用,进一步的有人提出多级复合平行四边形柔性铰链的概念[17]。多级复合平行四边形柔性铰链通过串联 N 个如图 2 的单级平行四边形柔性铰链,使最终输出位移变为原来的 N 倍,图 3 为二级复合平行四边形柔性铰链的概念图。根据前文提到的设计要求,如图 4 所示,计划采用三级柔性铰链作为执行机构,设计成对称结构,能有效的抑制耦合位移,提高结构稳定

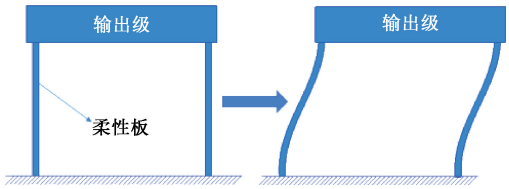


图 2　大行程平行四边形柔性铰链示意图

Fig. 2　Schematic diagram of large stroke parallelogram flexure hinge

性,从而提高控制精度,其中 l 为柔性板板长,h 为柔性板板厚,b 为柔性板板宽。

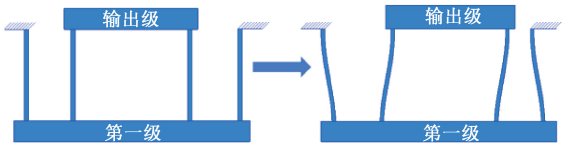


图 3　二级复合平行四边形铰链示意图

Fig. 3　Schematic diagram of two-stage compound parallelogram flexure hinge

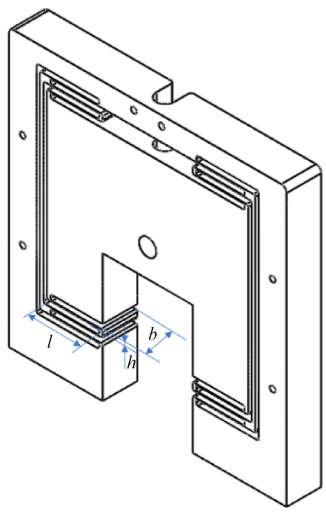


图 4　测量装置柔性铰链示意图

Fig. 4　Schematic diagram of flexure hinge of the measurement device

根据设计要求,需要确定柔性板参数长 l,宽 b 和厚度 h,以获得合适的刚度,足够的行程和紧凑的结构。首先需要确定使用的材料。为了实现大行程位移,需要选用屈服应力大、弹性性能好、疲劳寿命高、易加工、成本尽可能低的材料。综合考虑上述因素,决定选用 7075 铝合金,作为航空工业上常用的铝合金,其性能足够优秀,同时作为商用铝合金,性价比也是相对较高。其次是刚度的选择。为避免在遇到特殊情况(如突然断电)铰链恢复常态时光谱共焦传感器和工件碰撞损坏光谱共焦传感器,同时能产生足够力在断电状态下平衡传感器、铰链运动部分和音圈电机线圈的重力,柔性铰链刚度定为 10~14 N/mm。

根据普通平行四边形柔性铰链的刚度公式,图 2 所示柔性铰链刚度为:

$$K_1 = \frac{2Ebh^3}{l^3} \tag{1}$$

其中,E 为所用材料的弹性模量,b 为柔性板的宽度,h 为柔性板的厚度,l 为柔性板的长度。

本文采用三级复合平行四边形柔性铰链结构,根据复合平行四边形柔性铰链的性质,经过将普通平行四边形柔性铰链三级串联后,刚度变为原来的 1/3,同时采用了对称布置的结构,整体刚度将变为原来两倍,则所设计的柔性铰链刚度为:

$$K_2 = \frac{4Ebh^3}{3l^3} \tag{2}$$

同时,输入一个力 F_X,图 2 所示柔性铰链能产生最大双边位移为:

$$\Delta X_{\max 1} = \frac{\sigma_y l^2}{3Eh} \tag{3}$$

其中,σ_y 为材料的屈服应力。

根据复合平行四边形柔性铰链的性质,经过将普通平行四边形柔性铰链三级串联后,其最大位移变为原来的 3 倍,对称结构对最大输出位移没有影响,则所设计柔性铰链的最大输出位移为:

$$\Delta X_{\max 2} = \frac{\sigma_y l^2}{Eh} \tag{4}$$

为使结构尽可能紧凑,确定最佳的设计参数需要进行优化设计。根据图 4 所设计的铰链结构,对测量装置最终结构尺寸影响最大的参数为柔性板长 l,故优化目标是在合适刚度和尺寸限制(主要为加工公差限制)等条件下,取得最小的柔性板长度。优化函数确定以后,需要对控制条件进行确定。在前文中,已经对铰链的位移和刚度做出分析,作为控制条件如下所示:

$$X_{\max} = 5 \text{ mm} \tag{5}$$

$$10 \text{ N/mm} \leqslant K \leqslant 14 \text{ N/mm} \tag{6}$$

其中,$X_{\max}$ 为铰链可实现的最大位移,由式(4)决定,K 为铰链在运动方向的刚度,由式(2)决定。

另外,受加工精度影响,柔性板的厚度 h 不能过小,同时,为保证装置足够的强度,柔性板宽度 b 也不能过小,综合考虑之下,柔性板厚度 h 和宽度 b 的范围选择如下所示:

$$h \geqslant 0.5 \text{ mm} \tag{7}$$

$$b \geqslant 20 \text{ mm} \tag{8}$$

使柔性板的长度取最小值,利用 MATLAB 的 fmincon 函数,可实现寻找约束非线性或线性多变量函数的最小

值,按上述分析设置好优化函数和各约束条件,最终计算出铰链各参数如下:

$$l = 28.0 \text{ mm} \tag{9}$$

$$h = 0.5 \text{ mm} \tag{10}$$

$$b = 21.7 \text{ mm} \tag{11}$$

对上述参数进行圆整,最终确定下来的铰链参数结果如式(12)~(14)所示,此时刚度为 10.9 N/mm。

$$l = 28 \text{ mm} \tag{12}$$

$$h = 0.5 \text{ mm} \tag{13}$$

$$b = 20 \text{ mm} \tag{14}$$

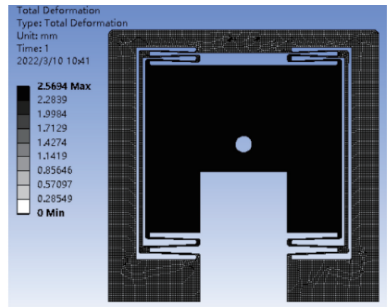
为验证优化结果的可行性,现对计算结果进行有限元仿真分析。使用 SolidWorks 按前文确定的铰链参数进行建模,并导入到 Ansys Workbench 中进行仿真。根据设计刚度估计出能实现计划最大行程所需的力,最终仿真结果如图 5 所示。如图 5 根据仿真结果可知,在 33 N 左右的力作用下,柔性铰链单向位移是 2.5 mm,可知柔性铰链的双向最大位移能达到要求的 5 mm。同时,由式(15)所示的刚度计算公式可以得到铰链刚度为 13.2 N/mm,也满足设计目标。同时,最大应力发生在柔性铰链柔性板与固定外框连接处,约为 138 MPa,远小于所选材料的屈服应力。可见,根据有限元仿真结果,由优化设计所获得的参数满足测量装置的设计要求。

$$K = \frac{F}{X} \tag{15}$$

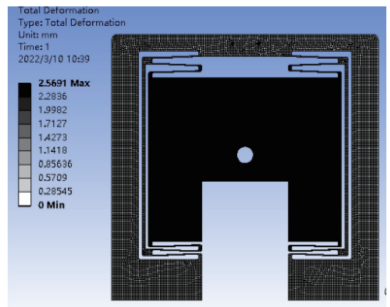
其中,F 为柔性铰链所受的力,X 为受力后柔性铰链的位移。

反馈装置如前文所述采用高精度光栅尺。首先,光栅尺作为伺服系统的反馈装置,对柔性铰链平台位移进行测量并反馈到控制器,形成全闭环控制,提高了控制系统的精度。其次,作为二级测量系统的次级测量系统,如图 6 所示,尽可能将其安装在与高精度传感器同个轴线上,以减小阿贝误差。通过对光栅尺测量功能的两次应用,有效的减小了测量装置的体积,减少了冗余结构,降低了设计,加工难度和所需成本。

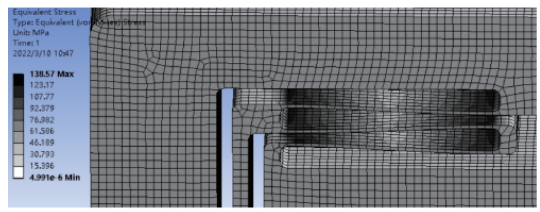
加工装配完成后的大量程曲面扫描测量装置如图 7 所示。



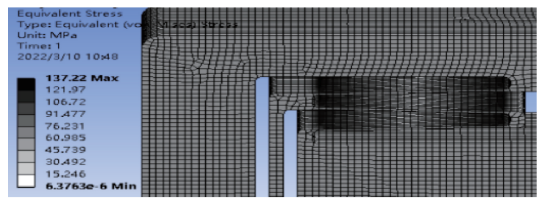
(a) 正方向位移仿真结果
(a) Simulation results of the positive displacement



(b) 负方向位移仿真结果
(b) Simulation results of the negative displacement



(c) 正方向应力仿真结果
(c) Simulation results of the positive direction stress



(d) 负方向应力仿真结果
(d) Simulation results of the negative direction stress

图 5 有限元仿真结果

Fig. 5 Finite element simulation results

2 控制系统

在完成装置的设计、加工和装配后,需要对装置的控制系统进行搭建、调试,以实现相应的运动功能,本节主要内容便是对装置控制系统的相关研究。

2.1 硬件设备

二级曲面测量装置控制系统采用工控机作为上位机,UMAC 控制器作为下位机的控制模式,并通过线性驱动器 TA330 对音圈电机进行驱动,从而实现柔性铰链的驱动,再由雷尼绍光栅尺对柔性铰链位移进行测量并反馈给 UMAC 控制器实现全闭环控制,光谱共焦传感器则通过以太网将测量数据再传输给上位机。

采用的 UMAC 控制器(universal motion and automation controller),是一款强大、灵活和易用的可编程多轴运动控制器。采用的驱动器 Trust Automation 的 TA330-E01 是第 4 代线性驱动器,具有真正的 ab 类线性放大器、无限分辨率和纯模拟吞吐量,并且没有数字转换损失。同时,TA330-E01 输出的是快速反馈的纯电流信号,几乎没有失真。TA330-E01 驱动器还可以实现高分

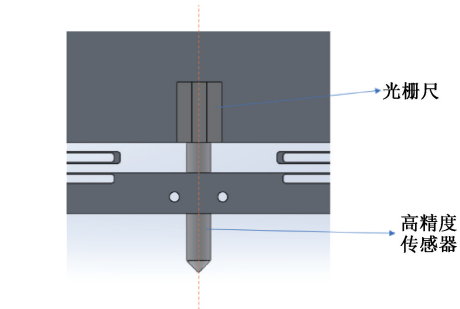


图 6　测量装置光栅尺装配示意图

Fig. 6　Assembly diagram of grating encoder for the measurement device

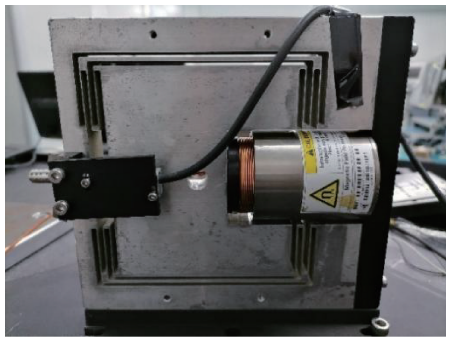


图 7　大量程曲面扫描测量装置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of the scanning measurement device with a large range and high precision for curved surface

辨率定位和低噪声应用,因此适合本测量装置的驱动需求。

2.2　控制调试

如图 8 所示,UMAC 控制器伺服系统采用的伺服滤波器是目前比较通用的 PID 滤波器,在调试简单的同时,功能又强大到足以为大多数系统提供优异的控制。PID 反馈滤波器由比例(P)、积分(I)和微分(D)项组成,每一项都对控制效果起到它自己的贡献。在 UMAC 控制器中,伺服滤波器既支持自动调整,也支持手动调整,为了能有更高的控制精度,选择对其参数进行手动调整,其调整程序界面如图 9 所示。

对该控制系统的调试主要是阶跃响应的调整,目的是使系统获得一个快速准确且稳定的响应,调整对象是比例增益 K_P、微分增益 K_d 和积分增益 K_i。其中,比例增益项为位置误差提供基本纠正措施,提供一个正比于误差大小的控制效果,以尽量减少误差。单独的比例增益行为像一个弹簧,而比例增益项的大小是弹簧常数,这个增益项越高,弹簧作用越硬。微分增益项提供了一个阻尼效果,通过提供一个正比于实际速度的、与该速度相反的控制效果。在这方面,它的作用就像一个的缓冲器或

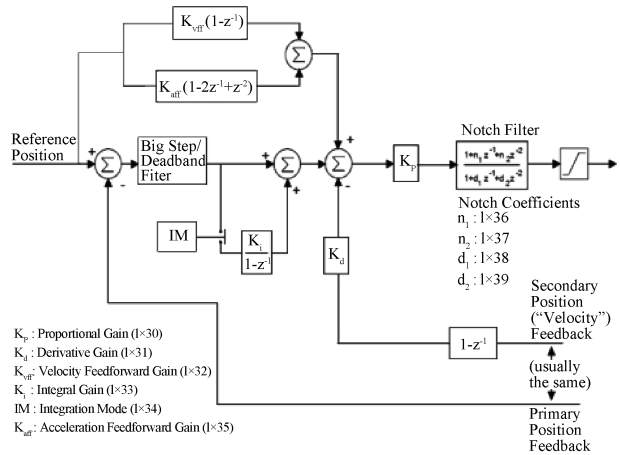


图 8　UMAC 控制器 PID 伺服系统示意图

Fig. 8　Schematic diagram of PID servo system of UMAC controller

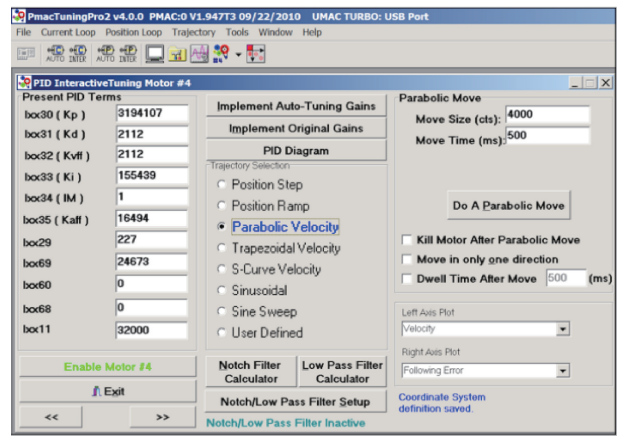


图 9　UMAC 控制器 PID 调整界面

Fig. 9　PID debugging interface of UMAC controller

减震器。微分增益项越高,阻尼作用越明显。积分增益项对一些效应引起的稳态误差提供校正,如摩擦,重力负载,切削负荷,模拟偏移。积分增益项控制位置误差积分项充电放电的速度,增益越高,作用越快。最终调整结果如图 10 所示。

3　不确定度的标定及分析

本节主要对完成的装置进行性能分析,主要工作是对二级测量系统进行实验以得到系统的不确定度。通过这项工作,获得所完成的二级曲面扫描测量装置的性能。

根据测量不确定度的相关标准,通常采用测量数据的标准差 σ 对测量系统的不确定度进行评定。一般地,会在标准差前面加个系数,常用的有 2 或 3。这是因为在统计学上,对于满足正态分布的测量数据,数据落在 $\pm 2\sigma$ 和 $\pm 3\sigma$ 的概率是 95.5% 和 99.7%。对于符合正态分布

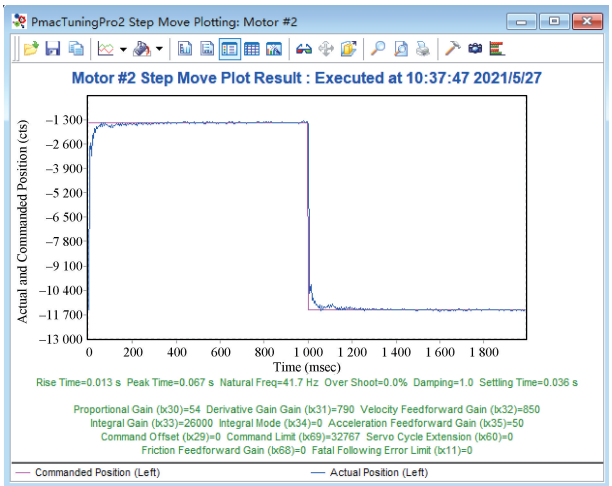


图 10 UMAC 控制器 PID 调整结果

Fig. 10 Results of PID debugging

的可以直接测得的数据,本文以 2σ 作为不确定度的评定参考,对于其他无法直接测量的或不呈正态分布的值以可能的最大误差作为评定参考,通过这种评定方式,系统的不确定度将被高估,这将有利于提高该测量装置在实际应用中的可靠性。

实验中选用的一级传感器是德国 Precitec 的高精度光谱共焦传感器,测量量程为 100 μm。该传感器具有高精度,测量角度大等优点,适合作为测量装置的一级测量系统。高精度光栅尺采用雷尼绍公司的增量式直线光栅尺编码器,经过细分后控制系统的脉冲当量是 1 nm。

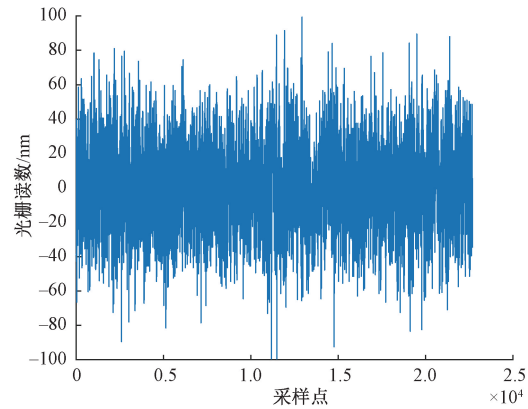
所设计的测量装置是个二级测量系统,所以测量的最终结果是两个测量系统的数据的整合。另一方面,当铰链处于平衡位置时记为零点,即光栅尺读数为 ±2.5 mm,经测试,带动传感器的往下运动是负方向,往上是正方向。测量开始时使铰链保持在光栅尺零点处并通过搭载该测量装置的装备移动装置至指定的光谱共焦传感器测量范围内,则此时测量坐标系的零点位置被固定到光谱共焦传感器和光栅尺读数均为 0 的位置上。由此可得最终测量结果:

$$X = X_1 - X_2 \tag{16}$$

其中,X 为被测面被测点在测量坐标系中的绝对位置值,X_1 为光谱共焦传感器的读数,X_2 为光栅尺读数。

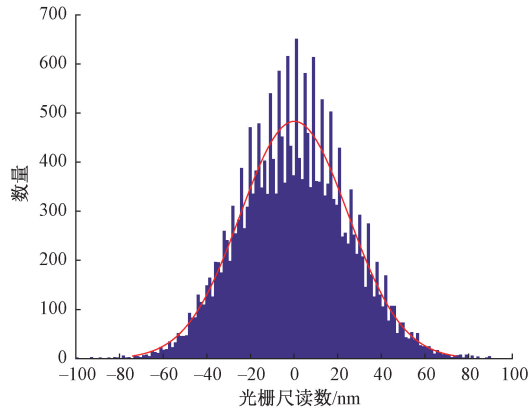
运用 umac 控制软件 Pewin32PRo2 自带功能对完成 PID 整定的测量装置的光栅尺测得的铰链位移数据进行采集,结果如图 11(a)所示,这些数据满足正态分布(图 11(b)),所以用 2σ 值对其不确定度进行评定。经计算,其 2σ 值为 49.5 nm。

由于光谱共焦传感器是固定在铰链上,所以上述铰链不确定度也应会在光谱数据中得到复现。进行如图 12(a)的实验,使用所设计的测量装置对静止平面平晶



(a) 光栅尺测量数据

(a) Data of the grating encoder measurement



(b) 光栅尺测量数据的分布

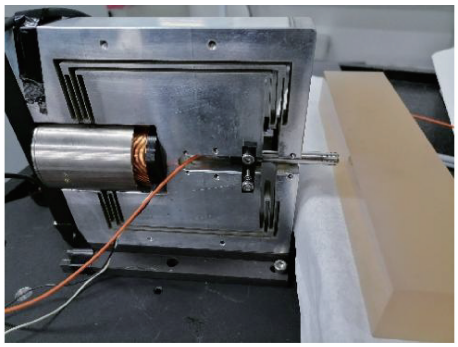
(b) Distribution of data measured by the grating encoder

图 11 光栅尺数据及其分布

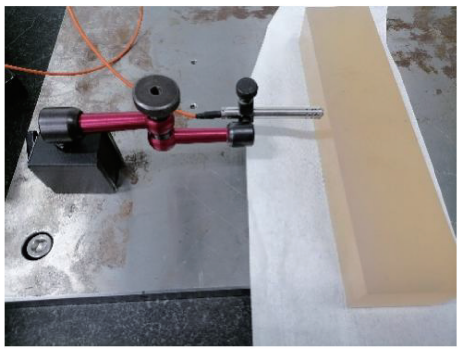
Fig. 11 Data of the grating encoder and its distribution

进行测量并对数据进行分析,计算所得的 2σ 为 50.5 nm。相比之下,如图 12(b)实验,将光谱共焦传感器固定并对静止平面平晶测量,对数据进行分析,计算所得的 2σ 值为 21.3 nm。所以可知,光谱共焦传感器数据包含柔性铰链震动的影响。

根据不确定的测量要求,需要先对引起不确定度的源单独分析,最终根据各个源的相关度综合得出整个测量装置的不确定度[18-19]。需要注意的是,光谱共焦传感器测量数据受柔性铰链影响,其测量数据会一定程度的反映测量柔性铰链运动的光栅尺的不确定的,在对两者综合处理后这部分不确定度应当被抵消。然而在实验中却发现并非如此,甚至扩大了最终结果的测量不确定度。猜测应为两者的数据的采样时间差导致采用数据产生错位从而扩大了测量不确定度。对此计划通过另一种数据处理方式来降低这种影响。将铰链前后两次相邻运动间光栅尺读数进行平均处理,所得数据作为在这段时间内光栅尺的读数。这样处理后,光栅尺的测量不确定度将转移到光谱共焦传感器数据上,之后再对光谱共焦传感器数据进行处理以降低误差。



(a) 测量装置不确定度实验
(a) Experiment on measurement uncertainty of the measurement device



(b) 不受铰链影响光谱共焦传感器不确定度实验
(b) Experiment on measurement uncertainty of the fixed spectral confocal sensor

图 12　不确定度对比研究实验

Fig. 12　Comparative experiment of measurement uncertainty

由上述分析可知,由于光栅尺的不确定度最终将转移到光谱共焦传感器读数中,因此,测量装置的最终不确定度可以直接测量获得,并且它由不受柔性铰链影响的光谱共焦传感器的不确定度和光栅尺的不确定度组成,同时还存在由于结构上导致的系统误差。

图 12 实验表明光谱共焦传感器的大部分不确定度,即装置的最终不确定度是由铰链振动造成的,同时光栅尺是铰链的测量和反馈装置,所以研究由光栅尺反馈的铰链结构的不确定度对提高装置整体不确定度是有意义的。对光栅尺数据进行 1~20 次的平均,所得结果如表 1 所示,绘制成曲线图如图 13 所示。

表 1　平均次数对光栅尺不确定度影响实验数据

Table 1　The effect of average times on the uncertainty of grating scale in experimental data

平均次数	20	18	16	14	12
2σ/nm	33.2	34.7	36.3	38.0	39.7
平均次数	10	8	6	4	2
2σ/nm	41.2	42.9	44.9	47.1	48.9

可以看出,测量数据的 2σ 值随着平均数据个数增加在不断下降,且下降幅度基本保持不变,为了保持足够的

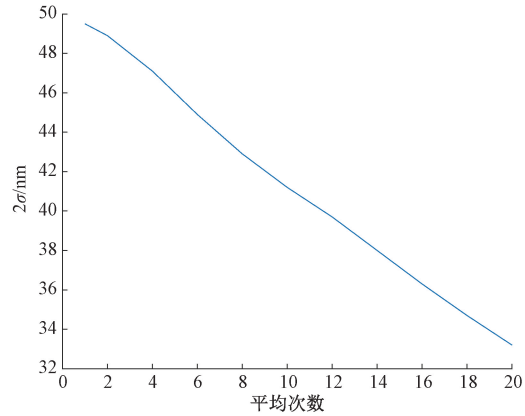


图 13　平均次数对光栅尺不确定度影响实验数据曲线

Fig. 13　Curve of the Influence of average times on measurement uncertainty of spectral confocal sensor

频率,取平均次数为 20。由前文的分析,若对光谱共焦数据也进行平均处理,理论上其复现的光栅尺不确定度也将会被大幅度降低,因此在随后的实验中对光谱共焦传感器的不确定度进行研究。

因此,为进一步提高测量装置的测量不确定度,计划对测量的光谱共焦传感器数据也进行平均处理以减小随机误差对测量结果的影响,根据统计学知识,进行平均的数据越多,测量数据的 2σ 会越小,但是,随着平均的数据变多,采样频率保持不变的话,获得数据将会减少,曲面信息可能丢失,因此将采样频率除以平均次数作为最终采样频率,这个值最小不能低于 100 Hz,以确保能获得足够的数据点保证曲面信息不丢失。

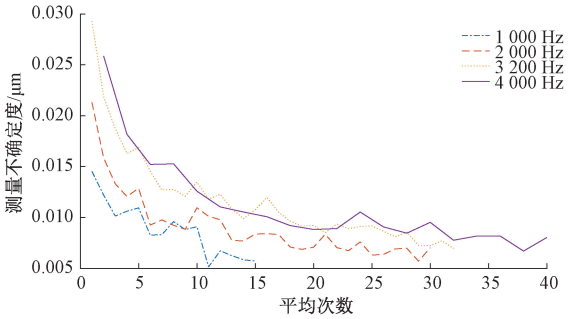
光谱共焦传感器具有多个采样频率,同时又可以根据实际情况对数据进行平均,平均次数应定为依次递加,同时最终采集频率控制在 100 Hz 以上。同样采用固定光谱共焦传感器,对静止平面平晶测量数据进行采集,设置光谱共焦传感器采样频率为 1 000、2 000、3 200、4 000 Hz。最终实验结果如图 14 所示。结果表明,在这光谱共焦的测量不确定度主要和最终采样频率相关,当最终采样频率越低测量不确定度越低,因此,后续实验用 2 000 Hz,20 平均的设置进行,这个时候的最终采样频率为 100 Hz,不确定度为 7.0 nm,此时光栅尺的不确定度也是按 20 平均记,即光栅尺的不确定度为 33.2 nm。

假设所设计的装置加工精度装配精度足够高,先忽略其他系统误差,根据测量不确定度的相关标准,系统的总体不确定可由式(17)计算:

$$S_1 = \sqrt{S(x_1)^2 + S(x_2)^2} \tag{17}$$

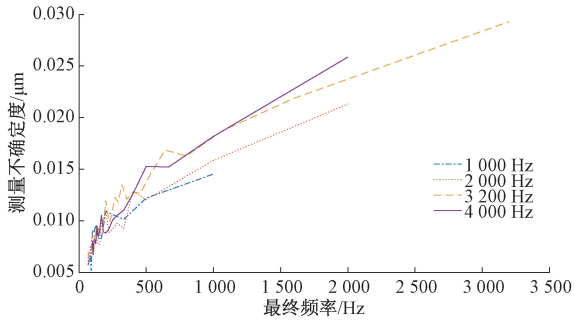
其中,S_1 为忽略加工误差装配误差时所设计的测量装置的整体不确定度,$S_{(x1)}$ 为不受柔性铰链影响的光谱共焦传感器的不确定度,$S_{(x2)}$ 为光栅尺的不确定度。

最终计算得二级测量系统的测量不确定度为



(a) 平均次数对传感器不确定度影响

(a) Influence of average times on measurement uncertainty of the sensor



(b) 最终频率对传感器不确定度影响

(b) Influence of final frequency on measurement uncertainty of the sensor

图 14 光谱共焦传感器不确定度实验结果

Fig. 14 Experimental results of measurement uncertainty of the spectral confocal sensor

33.9 nm。

所设计装置测量不确定度由图 12(a)实验测量得出,在 2 000 Hz 频率,20 平均的条件下,其 2σ 值为 35.1 nm,会比计算所得的要大。这部分不确定度可能是由于装置的加工,装配误差导致其他系统误差引入的。若考虑这项误差,修改式(17)为:

$$S_2 = \sqrt{S(x_1)^2 + S(x_2)^2 + S_A^2} \tag{18}$$

其中,S_2 为考虑加工误差和装配误差时所设计的测量装置的整体不确定度,S_A 为其他系统误差。

由式(18)可计算出该测量装置其他系统误差约为 9.1 nm。

4 量程扩展测量实验

本节主要介绍了进行量程扩程测量实验的过程,包括实验的设计和平台的搭建、实验的进行和实验数据的处理。

为验证该二级测量装置能否实现预计功能,实现高精度传感器的量程扩展,设计如图 15 测量实验验证。测量对象是一矢高 300 μm(超过光谱共焦传感器量程),直径为 16 mm 的非球面工件。利用 aerotech 气浮直线运动平台带动测量工件做直线运动,二级测量装置固定住进行测量。

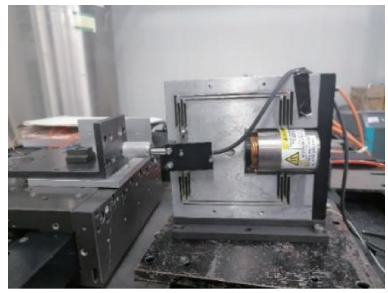


图 15 量程扩展验证实验

Fig. 15 Validation experiment of range expansion

为实现传感器的量程扩程,设计如下曲面跟随程序。在光谱共焦传感器的量程范围内设定一个测量区间,一旦测量表面离开这个区间便驱动音圈电机控制柔性铰链带动传感器移动使测量表面回到这个区间的中间位置,每次移动柔性铰链均把柔性铰链的位移记录起来,用以进行最终结果的数据处理,实验中这个测量区间定为 20~80 μm,随后编写上位机程序进行测量。进行实验,所得的原始测量结果如图 16 所示,利用记录的柔性铰链位移对对应数据进行移动拼接最终获得所测曲面结果如图 17 所示,证明了该装置具备自由曲面大量程扫描测量能力。

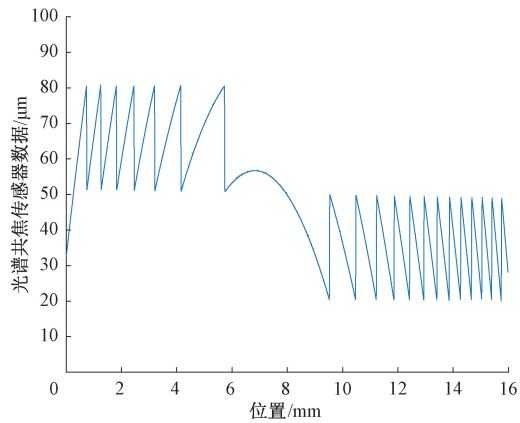


图 16 量程扩展实验原始数据

Fig. 16 Original data of range expansion experiment

5 结 论

本文设计了一种二级曲面扫描测量装置,解决了非接触式传感器高精度和大量程难以兼顾的问题,从而使高低差较大曲面的高精度扫描测量成为可能。装置采用二级测量系统来实现高精度传感器量程的扩展。其中一级测量系统采用光谱共焦传感器,用于被测曲面的直接测量,并通过柔性铰链带动光谱共焦传感器进行位移,使

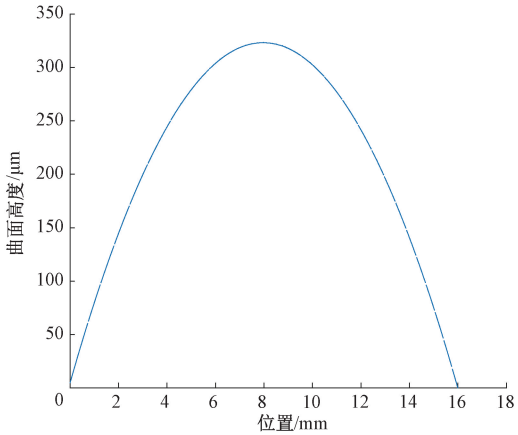


图 17　量程扩展实验结果

Fig. 17　Experimental results of range expansion

被测面始终保持在传感器测量范围内,光栅尺作为二级测量系统,对柔性铰链的位移,即光谱共焦传感器的位移进行测量,结合光栅尺和光谱共焦传感器的测量数据,最终得出被测点信息。在对硬件进行设计加工装配后,对控制系统进行搭建,控制和调试。随后对二级测量的不确定度进行实验标定,实验表明该二级系统的不确定度可以达到 35. 1 nm。最后对装置的大量程扫描测量能力进行实验,证明了该装置具备大量程扫描测量能力。

参考文献

[1] 朱日宏,孙越,沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报,2021,41(1):161-178.
ZHU R H, SUN Y,SHEN H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021,41(1) 161-178.

[2] WILLS S. Freeform optics: Notes from the revolution[J]. Optics & Photonics News, 2017, 28(7) :34-41.

[3] WEI S, ZHU S, FAN Z, et al. Multi-surface catadioptric freeform lens design for ultra-efficient off-axis road illumination[J]. Optics Express, 2019, 27(12): A779-A789.

[4] WANG Q, CHENG D, WANG Y, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. Applied Optics, 2013, 52(7) 88-99.

[5] NIE Y, MOHEDANO R, BENÍTEZ P, et al. Multifield direct design method for ultrashort throw ratio projection optics with two tailored mirrors[J]. Applied Optics, 2016, 55(14):3794.

[6] HOWARD J M, WOLBACH S. Improving the performance of three-mirror imaging systems with freeform optics[C]. Freeform Optics. Optica Publishing Group, 2013: FT2B. 6.

[7] 何改云, 黄鑫, 郭龙真. 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 395-401.
HE G Y, HUANG X, GUO L ZH. Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty[J] Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(3): 395-401.

[8] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚. 三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5):43-50.
WEI SH H, ZHANG J Y, FENG X G. Dynamic error analysis and compensation of CMM high speed measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):43-50.

[9] MATHIA T G, PAWLUS P, WIECZOROWSKI M. Recent trends in surface metrology[J]. Wear, 2011, 271(3): 494-508.

[10] 李茂月,马康盛,许勇浩,等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(5):19-31.
LI M Y, MA K SH, XU Y H, et al. Research on morphology measurement error compensation method based on the monocular structure light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(5):19-31.

[11] CACACE L A. An optical distance sensor: Tilt robust differential confocal measurement with mm range and nm uncertainty [D]. Eindhoven: Technische Universiteitndhoven, 2009.

[12] HENSELMANS R, CACACE L A,KRAMER G F Y, et al. The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics[J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 35(4): 607-624.

[13] BOS A, HENSELMANS R, ROSIELLE P, et al. Nanometre-accurate form measurement machine for E-ELT M1 segments[J]. Precision Engineering, 2015, 40: 14-25.

[14] DU H L, ZHOU Z Z, SUN Z Q,et al. Full area covered 3D profile measurement of special-shaped optics based on a new prototype non-contact profiler[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(6): 823-846.

[15] HENSELMANS R, GUBBELS G P H, VAN DRUNEN C, et al. NANOMEFOS non-contact measurement machine for aspheric and freeform optics [C]. International Conference on Space Optics—ICSO 2010. SPIE, 2017, 10565: 495-500.

[16] XU Q. Design, testing and precision control of a novel long-stroke flexure micropositioning system [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70(6): 209-224.

[17] AWTAR S, PARMAR G. Design of a large range XY nanopositioning system [C]. Asme International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference, 2013:387-399.

[18] 关静宇,王中宇,李双. 手持式激光扫描仪测量不确定度的蒙特卡洛法评定[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14):72-76.
GUAN J Y, WANG ZH Y, LI SH. Monte Carlo assessment of measurement uncertainty for handheld laser scanners [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(14):72-76.

[19] 陈洁, 郑中民, 李凌梅,等. 基于光学分度头的测斜仪校准装置研制[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(7):133-137.
CHEN J, ZHENG ZH M, LI L M, et al. Development of calibration equipment for clinometer based on optical dividing head [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(7):133-137.

作者简介

翁川, 2019 年于广东海洋大学获得学士学位,现为广东工业大学机电工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为精密测量。
E-mail: 644827901@qq.com

Weng Chuan received his B. Sc. degree from Guangdong Ocean University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Guangdong University of Technology. His main research interest includes precision measurement.

尹自强(通信作者),1991 年于湘潭大学获得学士学位,1996 年于国防科技大学获得硕士学位,2003 年于国防科技大学获得博士学位,现为广东工业大学机电学院教授,主要研究方向为精密工程等。
E-mail: zqyin@gdut.edu.cn

Yin Ziqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xiangtan University in 1991, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 1996 and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2003, respectively. Now he is a professor in Guangdong University of Technology. His main research interests include precision engineering and so on.