

基于螺旋扫描的表面三维形貌快速测量

刘康¹, 孙庆龙², 卢志诚¹, 应志奇¹, 惠相君¹, 周鹏飞¹, 崔玉国^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 首信自动化信息技术有限公司, 河北 迁安 064400)

摘要: 为实现精密表面三维形貌的快速测量, 提出一种螺旋式扫描测量方法. 首先, 基于 x 、 y 、 z 向直线运动平台、DD 马达旋转平台以及激光位移传感器, 搭建三维形貌测量系统, 其中被测试件表面形貌的平面位置信息通过 x 向平台与 DD 马达同步运动所形成的螺旋扫描运动来获得, 被测试件表面形貌的高度信息由激光位移传感器来获得; 然后, 基于所搭建的测量系统, 对表面形貌为凹凸扇形的圆形试件的表面进行测量. 结果表明: 测量直径为 15 mm 的圆形区域所用的时间为 420 s, 能较好地实现被测试件表面形貌的快速测量.

关键词: 表面三维形貌; 快速测量; 螺旋扫描; 激光三角法

中图分类号: TH-39

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0020-05

随着精密与超精密加工技术的不断进步, 产品正朝着精密化方向发展, 这些精密产品中某些零件的表面为精密表面, 为获得这些精密表面的特征, 需要对这些表面进行三维形貌测量^[1-4]. 表面三维形貌是通过测量所获得的表面形貌的高度信息和平面位置信息来反映. 目前, 用于获得表面三维形貌高度信息的方法有接触式和非接触式两种, 而用于获得平面位置信息的扫描方法大都是栅格式扫描. 接触式测量主要用机械触针法^[5-6], 其横向分辨率较高, 纵向行程较大, 但触针与被测表面接触会产生机械压力, 从而会造成被测表面的损伤.

非接触式测量主要是光学测量法, 按照测量原理的不同, 又可分为共焦法、离焦法、干涉显微法及激光三角法等. 共焦法基于共焦成像原理进行测量, 具有良好的纵向层析成像能力, 但纵向线性范围窄, 且通常是单点测量, 测量速度慢^[7-8]. 离焦法利用像面共轭特性进行测量^[9-10], 其光路简单、使用方便、纵向分辨率高, 但纵向测量范围小, 且对被测表面的反射率较为敏感. 干涉显微法大多是利用白光干涉条纹的特性进行测量^[11-12], 该方法测量精度高、速度快, 但当被测表面不连续, 且相邻点高度超过光源波

长的 $1/4$ 时, 得不到有效的干涉图像, 因此不适合测量凹凸型表面. 激光三角法^[13-14]利用光电探测器接收被测表面反射的光信号, 通过几何三角原理计算得到物体的三维形貌, 具有结构简单、易于实现、测量范围大、测量速度快等优点, 因此被广泛采用. 基于光学测量法所实现的表面形貌测量系统, 大都采用栅格式扫描获得被测表面的平面坐标信息.

栅格式扫描方法每扫描一条线, 安装被测试件的平台都要进行一次加速、匀速、减速的过程, 并且一条线扫描完成后平台还需要调整测量方向, 这就使得整个测量时间变长, 从而使测量过程易受干扰及噪声的影响. 为了避免栅格式扫描方法存在的频繁加减速问题, 本文提出了一种获得被测表面三维形貌平面位置信息的螺旋式扫描方法, 并将其与激光三角法相结合, 以此来实现被测表面三维形貌的快速测量.

1 系统构成

图 1 给出了本文提出的螺旋式扫描测量系统, 包括 x 、 y 、 z 向直线运动平台、绕 z 轴转动的 DD 马达以及激光位移传感器. 其中, x 向平台位于 y 向平台上, DD 马达位于 x 向平台上, 被测试件放置于

收稿日期: 2018-01-22.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (51675288).

第一作者: 刘康 (1993-), 男, 湖北仙桃人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微/纳米定位技术. E-mail: liukangedu@126.com

*通信作者: 崔玉国 (1971-), 男, 吉林农安人, 教授, 主要研究方向: 微/纳米定位及精密测量技术. E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

DD 马达上, 激光位移传感器位于 z 向平台上, z 向平台位于大理石立柱上, y 向平台和大理石立柱位于大理石平台上, 大理石立柱和大理石平台均具有良好的抗振性。

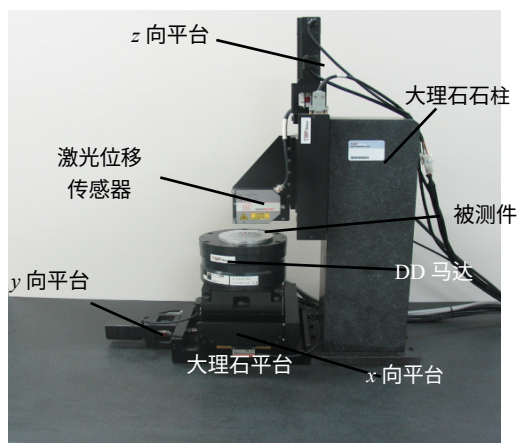


图1 测量系统

x 、 y 、 z 向平台的结构相同, 均由交流伺服电动机、联轴器、轴承、滚珠丝杠、交叉滚珠导轨、台体(包括动平台、定平台)、光栅尺、限位开关组成。其中, 交流伺服电动机、联轴器、轴承、滚珠丝杠、交叉滚柱导轨、台体用来实现机械运动; 光栅尺用来测量直线平台的运动位移; 限位开关用来限定平台的运动行程, 以免发生碰撞。 x 、 y 、 z 向平台的行程均为 50 mm, 最高速度为 $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 位移分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$, 定位精度为 $2.5 \mu\text{m}$, 重复定位精度为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 。DD 马达由旋转电机直接驱动旋转平台, 由定子、转子、磁性编码器组成。由于省去了减速器等传动机构, 从而可减小定位误差, 降低传动噪声。DD 马达的额定转速为 $2.4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$, 转角分辨率为 $0.49''$, 重复定位精度为 $\pm 1''$, 绝对精度为 $\pm 5''$ 。激光位移传感器用来获得被测试件表面形貌的高度信息, 其量程为 $\pm 1 \text{ mm}$, 线性度为 $\pm 0.03\%$ F.S., 纵向分辨率为 30 nm , 测量起点(距被测面距离 24 mm)的光斑大小为 $55 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$, 测量中点(距被测面距离 25 mm)的光斑大小为 $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$, 测量终点(距被测面距离 26 mm)的光斑大小为 $35 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$ 。

2 螺旋式扫描测量原理

螺旋式扫描测量系统通过 x 向平台和 DD 马达的同步运动来实现测量, 即当激光位移传感器所

发出的激光束同 DD 马达的旋转中心重合(通过调节 x 、 y 向平台实现)以及激光位移传感器处于其测量范围内(通过调节 z 向平台实现)时, 使 x 向平台和 DD 马达按给定的速度同步运动, 据此形成螺旋线(图 2)来完成对被测表面平面位置的测量。

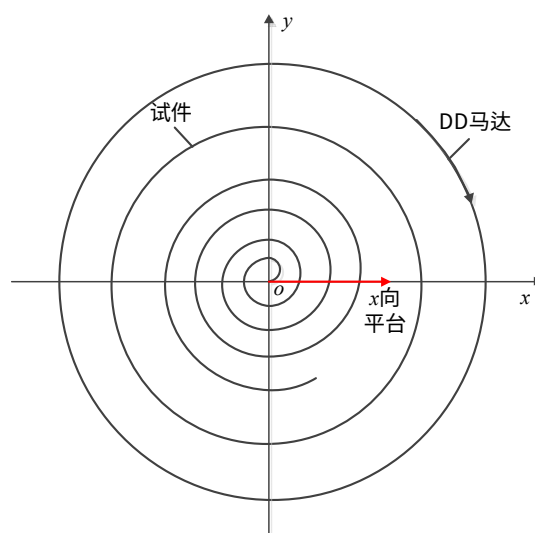


图2 螺旋式扫描示意图

3 激光三角法测量原理

图 3 给出了激光三角法的测量原理。由激光光源发出的光束经聚光镜后照射到被测表面, 被测表面反射出去的光信号经成像物镜后被光电探测器, 如线阵电荷耦合器件(Charge-coupled Device, CCD)所接收。由于被测表面高度不同, 反射到线阵 CCD 上的光信号在线阵 CCD 上的位置也有所不同, 如被测表面上的 A 点由线阵 CCD 上的 P 点所

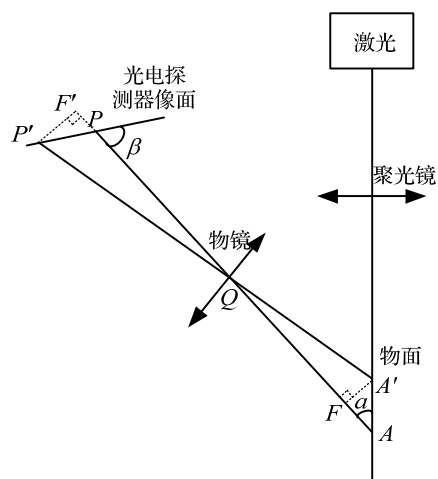


图3 激光三角法测量原理

接收, A' 点由 P' 点所接收, 但被测表面上的点与线阵 CCD 光敏面上的投影点是一一对应关系. 这里, 以激光光源光轴与物镜光轴的交点(这里设为 A 点)为测量基点, 被测表面的高度变化(图 3 中的 AA')便可以通过相似三角形 $A'FQ$ 和 $P'F'Q$ 求得. 由此可得:

$$\frac{A'F}{P'F'} = \frac{FQ}{F'Q}, \quad (1)$$

进一步可得:

$$\frac{AA' \times \sin \alpha}{PP' \times \sin \beta} = \frac{AQ - AA' \times \cos \alpha}{PQ + PP' \times \cos \beta}, \quad (2)$$

式中: PP' 为 A 点和 A' 点在线阵 CCD 光敏面上所成像点的距离; AQ 为物距; PQ 为像距. 于是, 可得被测表面的高度变化 AA' 为:

$$AA' = \frac{PP' \times AQ \times \sin \beta}{PQ \sin \alpha + PP' \sin(\alpha + \beta)}. \quad (3)$$

物距 AQ 和像距 PQ 满足成像定理, 即

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{AQ} + \frac{1}{PQ}, \quad (4)$$

式中: f 是成像物镜的焦距.

由于 f 和物距 AQ 已知, 故由式(4)可求出 PQ . 而 β 和 α 也已知, 这样由式(3)可求出被测表面的高度变化 AA' .

4 表面形貌测量实验

为了验证所提出的螺旋式扫描测量方法的有效性, 基于如图 1 所示的测量系统, 对如图 4 所示的具有凸凹相间扇形的圆形试件表面进行了测量. 在图 4 中, 白色扇形凸出, 黑色扇形凹陷. 被测试件的设计值如下: 凸凹扇形的扇形角为 10° , 凸凹扇形的高度差为 $20 \mu\text{m}$, 扇形区域的半径为 30 mm . 测量时, x 向平台直线运动的加速度为 $2.048 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 速度为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, DD 马达的加速度为 $3.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, 速度为 $0.34 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. 取被测试件表面直径为 15 mm 的圆形区域进行测量, 测量所用时间为 420 s .

图 5 给出了对被测试件表面直径为 15 mm 圆形区域的测量结果, 其中图 5(a)是被测表面的三维形貌, 图 5(b)是该三维形貌的平面投影. 观察图 5 可知, 除小部分中心区域的三维形貌略有不清晰外, 其他部分均能够较好地展现被测试件表面的三维形貌. 被测试件表面中心区域的三维形貌不

清晰是由于激光位移传感器的横向分辨率较低所导致. 可见, 螺旋式扫描方法能够较快、较好地实现被测表面三维形貌的测量.

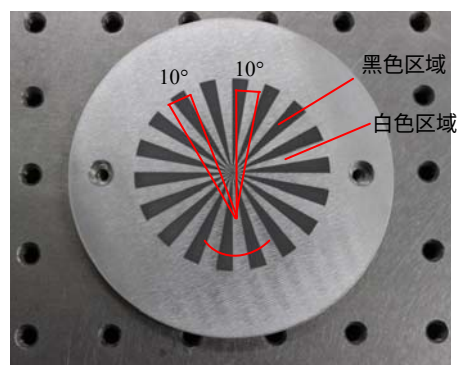


图 4 被测试件

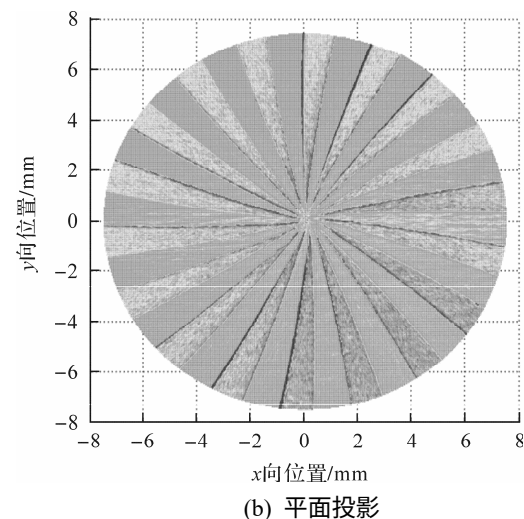
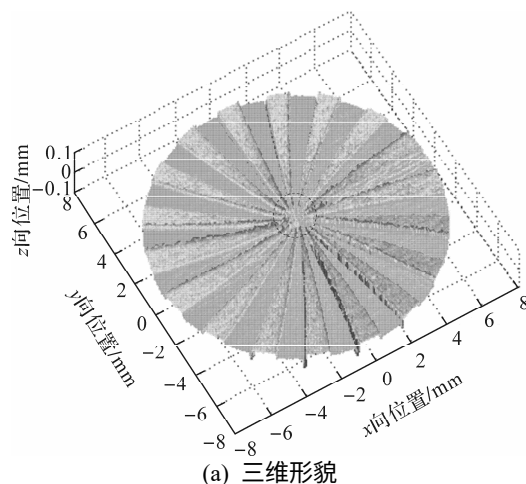


图 5 试件表面直径 15 mm 圆形区域的测量结果

图 6 给出了采用激光三角法螺旋式扫描测量方法所获得的被测试件部分剖面(图 4 中圆弧线所示)的波形. 根据图 6(a)给出的 5 个周期的波形数据,

计算得到波峰(图4中白色扇形区域)与波谷(图4中黑色扇形区域)之间的高度差为 $20.2\text{ }\mu\text{m}$ (该值为5个周期波形的平均值)。图6中小于零的波形(椭圆所框部分)是由激光加工过程中形成的深凹槽。

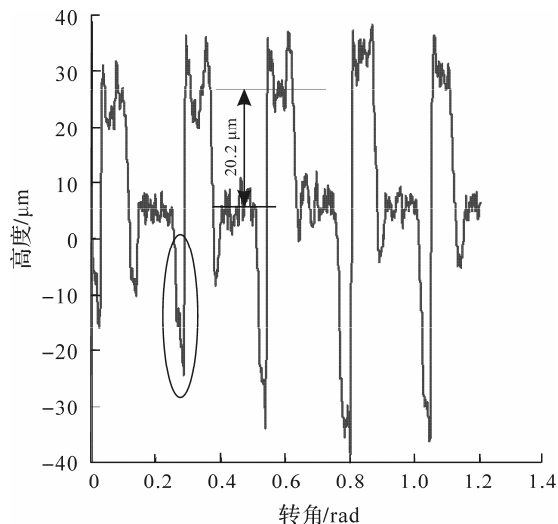
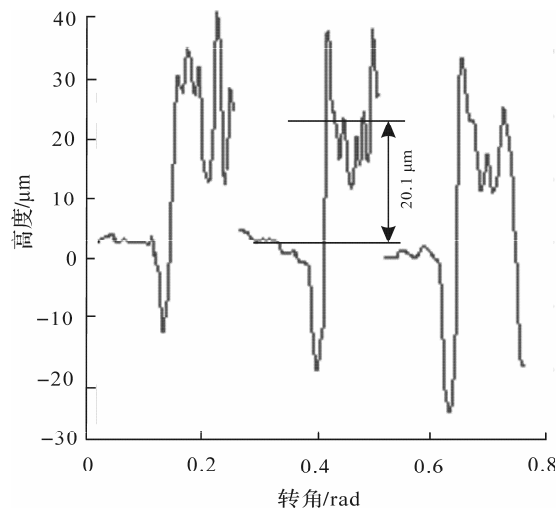


图6 试件剖面波形

为了验证本文所提出的螺旋式扫描测量系统测量结果的准确性, 采用商用显微镜(日本浩视公司 KH-8700)对被测试件表面形貌(测量区域为图4中圆弧线所示部分)进行了测量, 测量结果如图7所示。被测试件表面波峰与波谷之间的高度差



(a) 三维形貌



(b) 被测表面被剖开后的波形

图7 商用显微镜的测量结果

为 $20.1\text{ }\mu\text{m}$ (该值为3个周期波形的平均值)。受显微镜视场的限制, 每次只能测量一个周期的凸凹扇形形貌, 图7(b)中的3个波形是拼接而成, 因此波形是不连续的。

由图6和图7(b)可知, 基于本文所提出的激光三角法螺旋式扫描测量系统的测量结果, 与商用显微镜的测量结果基本一致。可见基于激光三角法的螺旋式扫描测量方法, 在实现快速测量的情况下, 也具有较高的测量精度。

5 结论

本文提出了基于使直线运动与旋转运动同步的螺旋式扫描测量方法, 该方法可实现被测表面的快速测量。采用 x 、 y 、 z 向平台、DD 马达以及激光位移传感器, 搭建了螺旋式扫描测量系统, 并对具有凸凹相间扇形的圆形试件表面进行了测量, 当测量直径为 15 mm 区域时, 所用时间仅为 420 s 。目前的商用显微镜只能通过图像拼接的方式来实现大面积测量, 要获得如此大的表面三维形貌, 至少需要花费若干小时。与商用显微镜的测量结果对比表明, 本文所提出的螺旋式扫描测量方法能够实现表面三维形貌的精密测量。

参考文献:

- [1] 周亮, 王振环, 孙东辰, 等. 现代精密测量技术现状及发展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8):1869-1878.
- [2] Sakaguchi A, Kawashita T, Matsuo S. Three dimensional analysis of a grinding wheel surface with image processing[J]. Advanced Materials Research, 2012, 565: 177-182.
- [3] 郭隐彪, 杨伟, 王振忠, 等. 大口径光学元件超精密加工技术与应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19):171-178.
- [4] Zhou L, Xia L, Chen P, et al. Three-dimensional measuring technique for surface topography using a light-sectioning microscope[J]. Applied Optics, 2012, 51(8):1162-1170.
- [5] Li Z, Brand U, Ahbe T. Step height measurement of microscale thermoplastic polymer specimens using contact stylus profilometry[J]. Precision Engineering, 2016, 45:110-117.
- [6] Leach R K, Giusca C L, Naoi K. Development and characterization of a new instrument for the traceable measurement of areal surface texture[J]. Measurement

- Science & Technology, 2009, 20(12):314-317.
- [7] 涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 基于小孔阵列的并行激光共焦显微检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2013(10): 1989-1994.
- [8] Jabbour J M, Malik B H, Olsovsky C, et al. Optical axial scanning in confocal microscopy using an electrically tunable lens[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(2): 645-652.
- [9] 陈力, 王军华, 徐敏. 像散法离焦检测系统的分析与校准[J]. 激光与光电子学进展, 2016(5):219-225.
- [10] Zhao J, Liu W. Visualization measurements of the morphology parameters in a parallel confocal system based on astigmatism method[J]. Optical Instruments, 2012, 34(5):5-10.
- [11] 崔长彩, 余卿, 张邀, 等. 金刚石砂轮表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12):3167-3174.
- [12] Lei Z, Liu X, Chen L, et al. A novel surface recovery algorithm in white light interferometry[J]. Measurement, 2016, 80:1-11.
- [13] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):1939-1947.
- [14] Liu J, Chen W Y, Chen F. Three-dimensional wheel topography measurement with laser triangulation[J]. Key Engineering Materials, 2012, 499:384-389.

Rapid measurement of three-dimensional topography on surface based on spiral scanning

LIU Kang¹, SUN Qing-long², LU Zhi-cheng¹, YING Zhi-qi¹, HUI Xiang-jun¹, ZHOU Peng-fei¹, CUI Yu-guo^{1*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Shouxin Automation Information Technology Co. Ltd., Qian'an 064400, China)

Abstract: A spiral scanning measurement method is proposed in order to realize rapid measurement of the three-dimensional topography of the precision surface. First of all, a three-dimensional topography measurement system is setup based on x , y , z linear motion platform, DD motor rotation platform and laser displacement sensor. the plane position information of the specimen's surface morphology is obtained by the spiral scanning formed by x platform and DD motor synchronous motion, at the same time the height information of the specimen's surface morphology is obtained by laser displacement sensor. Then, based on the built three-dimensional topography measurement system, a circular specimen with convex and concave fan shaped surface is measured. The results show that when the measured circular area of diameter is $\Phi 15$ mm, the total time is 420 s, so the spiral scanning measurement method can better realize rapid measurement of surface topography of the specimen.

Key words: three-dimensional topography on surface; rapid measurement; spiral scanning; laser triangular measurement

(责任编辑 史小丽)