

三维测头耦合分析与校正

郭强,黄强先,吴奎,陈丽娟,李瑞君,李红莉

合肥工业大学

摘要: 基于微型迈克尔逊干涉原理和激光自准直原理构成的三维接触扫描测头,从机械结构误差分析了测头输出三路信号产生耦合的原因。为减小信号耦合对测量结果的影响,通过微纳米测量机三维定位工作台对测头三个坐标轴方向进行标定,最终采用四次多项式模型建立工作台位移和测头输出信号之间的关系。信号处理基于Labview软件实现,计算结果表明该模型误差在 $\pm 30\text{nm}$ 以内。

关键词: 触发测头;机械机构;耦合分析;坐标测量机;测头标定;校正

中图分类号: TG801;TH822

文献标志码: A

Coupling Analysis and Calibration of 3D Probe

Guo Qiang, Huang Qiangxian, Wu Kui, Chen Lijuan, Li Ruijun, Li Hongli

Abstract: Described a three-dimensional contact scanning probe which based on the principle of micro-Michelson interference and laser autocollimator, the coupling of three axes is analyzed from mechanical structure error. In order to reduce the impact of signal coupling on the measurement, the three-dimensional positioning table of the measuring machine is used to calibrate the three directions of the touch trigger probe. The quadratic polynomial model is used to establish the relationship between the worktable displacement and the probe output signal. The signal processing realized based on Labview software, the calculation results show that the error of the model is within $\pm 30\text{nm}$.

Keywords: touch trigger probe; mechanical structure; coupling analysis; coordinate measuring machine; probe calibration; correction

1 引言

测头是测量系统的传感器,也是坐标测量机的重要部件^[1],测头的性能对测量机的整体测量精度至关重要。随着微细加工技术的快速发展,各种微型器件相继问世,如精密机械零件、超精密光学元件、微电子机械系统(MEMS)器件等^[2],这些器件的几何尺寸一般在数十微米到数毫米之间,但还达不到纳米量级(1-100nm)。根据传感原理的不同,测

头传感器可分为电容式、电感式、压阻式和光电式等^[3]。国内外许多研究机构和计量单位都对三维微传感测头进行了研究,具有代表性的有:英国的 Peggs G. N. 等^[4]和瑞士的 Thalmann R. ^[5]研制的基于电容(电感)的测微位移测头;德国计量院的 Dai G. 等^[6]和国内李源等^[7]开发的基于压阻式测头; Michihata M. 等^[8]和 Fan K. C. 等^[9]在光学测头设计中也取得了一定的成果。接触式的三维测头具有测量精度高、测量力小等特点,测头结构设计一般采用对称性设计,机械机构比较复杂,由于加工和装调误差难以保证对称性,测量过程中会出现应力分布不均的情况。另外,测头的对称中心和热中心不在测

基金项目: 科技部 863 计划(2008AA042409);合肥工业大学教学研究资助项目(2016YQJY0103)
收稿日期: 2018 年 3 月

参考文献

- [1] 范晋伟,张兰清,王鸿亮,等. RV 减速器偏心轴随动磨床的加工精度分析[J]. 制造业自动化,2016,38(9):84-87.
- [2] 王庆明. 先进制造技术导论[M]. 上海:华东化工学院出版社,2007.
- [3] 何卫东,单丽君. RV 减速器研究现状与展望[J]. 大连交通大学学报,2016,37(5):13-18.
- [4] 张丰收,张琳琳,刘建亭,等. RV 减速器动态特性研究综

述[J]. 机械传动,2014,38(8):174-176.

- [5] 张海亮,张蕾. 精锻直锥齿轮测量技术分析及其解决方案[J]. 模具技术,2017(5):52-58.
- [6] 尹相辉,李大明. 一种偏心检具[J]. 齐齐哈尔大学学报,2011(2):84.
- [7] 许广智. 偏心轴的工艺改进[J]. 一重技术,2017(2):41-43.

作者:张蕾,硕士,工程师,哈尔滨量具刃具集团有限责任公司,150040 哈尔滨市

Author: Zhang Lei, Master, Engineer, Harbin Measuring & Cutting Tool Group Co., Ltd., Harbin 150040, China

杆测球上,会导致触发过程中测头输出信号出现耦合干扰现象,在精密测量仪器上更应该引起注意。

本文在已经研制成功的微纳米三维测头基础上,从测头机械结构误差入手,分析测头输出三路信号产生耦合的原因,搭建标定系统,通过微纳米三坐标测量机定位系统对测头进行校正。

2 测头结构及测量原理

(1) 测头结构

测头结构如图1所示,由二维平面角度传感器、微型 Michelson 干涉测长装置、受力变形悬浮机构和带有红宝石测球的测杆四部分组成。其中悬浮机构由4片对称铍青铜簧片构成,并将4片反射镜对称贴在上面。

(2) 测量原理

测头测量光路见图2,以沿着水平方向触碰测头为例进行说明。Michelson 干涉仪测长部分通过激光器1发出的准直光束通过分光棱镜后分为透射光和反射光两部分,一部分光束透射到弹性对称中心测量反射镜上,另一部分光反射到静止的参考镜上。从测量镜和参考镜反射回来的两路光束再次经过棱镜后会合产生干涉。

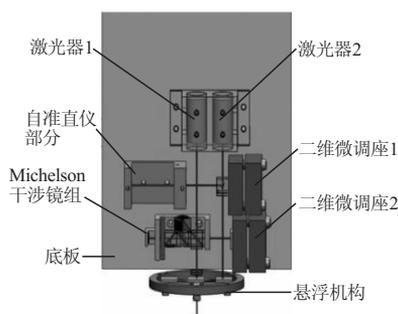


图1 测头结构

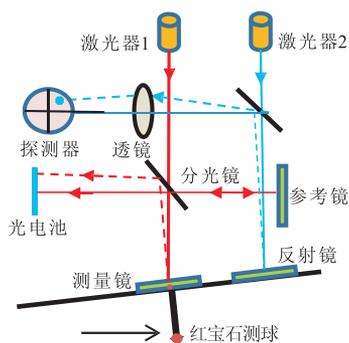


图2 测头测量光路

激光器2发出的平行光束,经过分光棱镜后打在平面反射镜上并被反射,反射的光束再次经过分光棱镜,部分光束经过透镜汇聚到四象限探测器上。

当被测物接近并触碰测头会引起平面反射镜角度的变化,同时四象限探测器上的聚焦光束位置也会有相应变化。可以利用输出电信号的变化来感测 X 、 Y 两个方向的小角度,接着对测头输出的电压信号进行标定即可得到位移信息。

3 测头信号耦合分析

测头机械结构加工和安装难以保证对称性设计,测量力分布不均匀,同时测头坐标系和测量机坐标系不可能完全一致,测头输出的三路信号会出现交叉耦合现象,即当沿着某一方向触碰测头,测头三路信号都有输出变化。

(1) 水平运动产生耦合

理论上激光器1的光束应该打在 o 点,由于加工和安装的偏差,导致测量光束不能恰好打在悬浮结构的对称中心 o 点,会在 x 方向和 y 方向分别有 l_x 和 l_y 的偏离。如图3所示,当被测物从水平方向触碰测头,会使得悬浮机构带动上面的反射镜发生偏转,反射镜在两个方向上的偏转角为 α 和 β 。此时不仅测头垂直方向存在阿贝误差,在角度反射镜发生偏转的同时,迈克尔逊测量镜也会出现同角度的偏转。

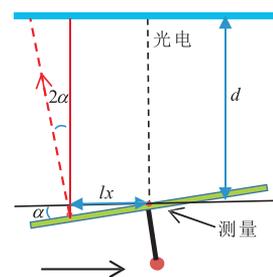


图3 反射镜偏转引起的光程差变化

当测量镜发生 α 角偏转,使得反射光束偏转 2α 角,会导致测量光束与参考光束相互分离,偏移量大到一定程度导致不能形成干涉。为了提高迈克尔逊干涉仪的抗反射镜偏摆能力,在迈克尔逊干涉仪测量镜前布置一个焦距为 f 的透镜,并使测量镜位于聚焦透镜的焦点位置。由测量镜偏转前后在两个方向上引起的光程差为

$$\begin{cases} \Delta x = l_x (\sin\alpha + \tan\alpha) + d \frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha} \\ \Delta y = l_y (\sin\beta + \tan\beta) + d \frac{1 - \cos\beta}{\cos\beta} \end{cases} \quad (1)$$

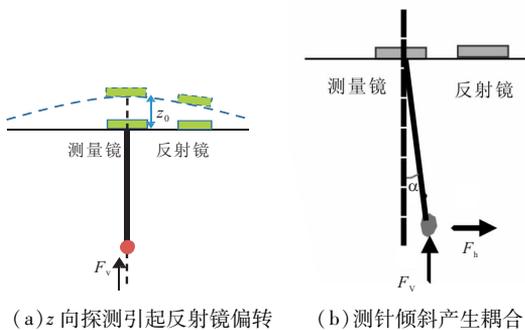
式中, α 角不超过 300 角秒, $d = f = 3.37\text{mm}$, 测量镜偏转角很小的情况下,由数学近似 $\sin\alpha \approx \alpha \approx \tan\alpha$ 。后面一项单是测量镜偏转引起的偏差可以忽略,上式可以简化为

$$\begin{cases} \Delta x = 2l_x\alpha \\ \Delta y = 2l_y\beta \end{cases} \quad (2)$$

如果测量光束在 x 方向偏离 o 点 1mm, 测量镜满量程偏转不超过 $300''$, 引起垂直方向的迈克尔逊干涉仪附加输出为 $2.9\mu\text{m}$, 耦合干扰现象非常明显, 与偏转角和阿贝臂成正比。

(2) 垂直方向运动产生的耦合

在垂直方向进行探测时, 由于测头垂直向探测导致悬浮机构发生应变, 从而带动反射镜角度产生微小变化, 如图 4a 所示。由此引起反射镜产生的角度变化一方面与垂直方向探测距离有关, 也和应力分布不均有关。



(a) z 向探测引起反射镜偏转 (b) 测针倾斜产生耦合
图 4 垂直方向探测引起的耦合

测头测杆安装过程中很难保证测杆垂直于悬浮结构, 测头在垂直方向进行探测, 测球会有水平和垂直两个方向的运动, 如图 4b 所示。小范围探测时, 测球输出位移与受力呈线性关系, 水平分力大小满足关系

$$F_h = F_v \tan\theta \quad (3)$$

引起测球水平输出附加位移为

$$\delta_h = k\delta\alpha \tan\theta \quad (4)$$

式中, θ 为测杆偏离垂直方向夹角; k 为测头水平方向和垂直方向刚度比值; δ_h 为测头垂直方向输出位移。测头安装好后, θ 、 k 均为常数, 即垂直方向探测距离越大, 水平方向产生的耦合越大。

(3) 坐标系不统一

由于安装偏差, 测量机机台坐标系与测头坐标系不一致, 理论情况下三维直角坐标系存在旋转和平移转换矩阵。为了简单说明, 以平面直角坐标系为例, 测头坐标系 oxy 和机台坐标系 OXY 之间满足齐次坐标变换, 即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(a, b) \text{rot}(x, \gamma) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\text{Trans}(a, b)$ 为平移矩阵; a 、 b 为沿着坐标轴方向的平移; $\text{rot}(x, \gamma)$ 为沿着坐标轴旋转矩阵; γ 为绕

着坐标轴旋转角。

计算结果为

$$\begin{cases} x = X\cos\gamma - Y\sin\gamma + a \\ y = X\sin\gamma + Y\cos\gamma + b \end{cases} \quad (6)$$

如果沿着工作台 X 向触碰测头, 测头会在 x 和 y 方向都存在输出, 即存在耦合干扰。如果对于三维坐标系来说, 会存在三个沿着坐标轴方向的平移和空间三个角度的偏转, 影响会更加明显。

4 测头校正

测头输出的三路信号之间存在耦合干扰, 为减小耦合干扰对测量产生的影响, 必须对测头输出信号进行校正。

4.1 测头标定

基于“331”布局设计原则的微纳米三坐标测量机^[10]对该三维测头进行校正, 该坐标测量机可以实现空间零阿贝误差测量, 系统具有 1nm 的测长分辨率和 0.3nm 的驱动分辨率。测量机三维工作台的激光标尺线垂直度误差在 $2''$ 以内, 工作台激光反射镜之间的垂直度误差在 $10''$ 左右, 可以对微纳米三坐标测头进行校正。

测头在各方向触发预行程为 $2\mu\text{m}$ 左右, 因此选择各方向标定 $5\mu\text{m}$, 空间标定范围为 $\pm 5\mu\text{m} \times \pm 5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 。利用纳米三坐标测量机闭环微动功能驱动载物台找到标准件 00 级量块工作面与测头的接触点, 对测头三个方向进行标定。以 $0.5\mu\text{m}$ 步进的方式触碰测头, 同时记录测量机工作台的位移和测头的三路输出信号。标定结果如图 5 所示, 标定过程中单轴工作台运动引起其他两工作台位移变化在 $\pm 25\mu\text{m}$ 以内。

为了方便起见, 将所有标定数据设置成从坐标 0 开始变化, 坐标轴横轴表示工作台位移, 竖轴表示标定过程中测头输出的电压信号和位移信号。

从标定数据来看, 测头一方面表现为各项异性 (见图 5a), 即使是 x 轴正向和负向输出曲线差别也较大; 输出信号的非线性。除此之外, 还体现出较大的耦合干扰, 尤其是测头 x 方向和 z 方向相互干扰比较大 (见图 5c)。

4.2 解耦模型

针对测头信号之间的耦合干扰和非线性, 文献^[11]提出了基于多元函数的一阶泰勒展开式的线性数学模型。由于测头输出信号存在非线性和各项异性, 模型效果并不理想。考虑到测量机工作台主要是以平行于坐标轴方向进行探测, 探测方向与测

头的标定方向一致,因此对于不同的探测方向可以分别建立数学模型。

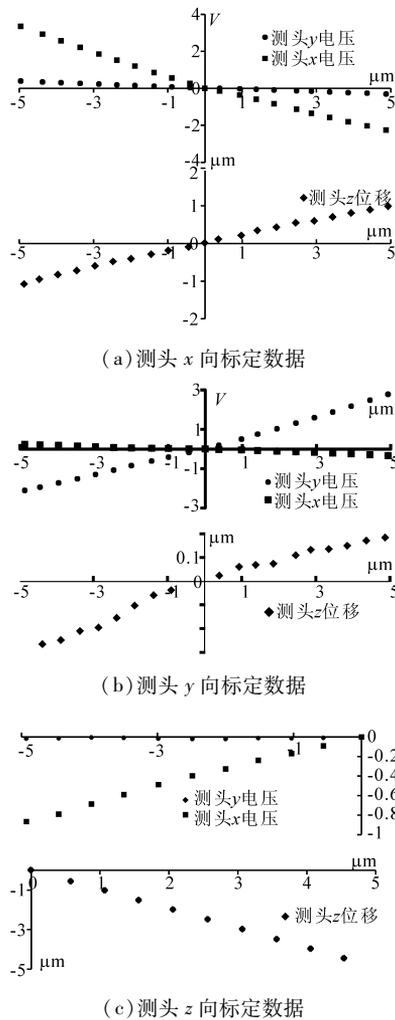


图5 测头各方向定数据标

以测头 y + 向模型为例,利用 excel 拟合 Y 工作台位移和测头 y 电压之间的四次多项式关系。如图 6 所示,测头 x 位移和 z 位移可以通过插值进行修正,通过 Labview 实现不同触发方向的信号处理。回归方程的整体拟合度为 1,说明因变量与自变量之间的拟合效果较好,计算结果表明各方向拟合偏差均在 ±30nm 以内。

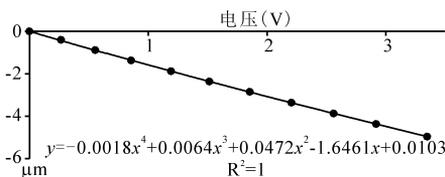


图6 各位置点拟合偏差

5 结语

本文以三维接触扫描测头为研究对象,详细分析了引起测头三路信号之间的耦合干扰因素,并搭

建测头标定系统对测头进行标定。对测头输出信号和工作台位移之间建立起四次多项式模型,模型误差在 ±30nm 以内。由于该模型是基于主方向探测建立的,对测量长度和平面度来说测量结果比较好,在测量空间曲面时引入模型误差。

参考文献

[1]刘祚时,倪潇娟.三坐标测量机(CMM)的现状和发展趋势[J].机械制造,2004,42(8):32-34.
 [2]王立鼎,褚金奎,刘冲,等.中国微纳制造研究进展[J].机械工程学报,2008,44(11):2-12.
 [3]Weckenmann A, Peggs G, Hoffmann J. Probing systems for dimensional micro-and nano-metrology [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(3):504-509.
 [4]Peggs G N, Lewis A J, Oldfield S, et al. Design for a compact high accuracy CMM[J]. Annals of the Cirp, 1999, 48(1):417-420.
 [5]Meli F, Kueng A, Thalmann R. Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 18(2):58790S-8.
 [6]Dai G, Bütefisch S, Pohlenz F, et al. A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(8):1-84.
 [7]李源,孙薇斌,邵力,等.基于MEMS微触觉测头和纳米测量机的扫描测量平台[J].仪器仪表学报,2009,30(3):580-585.
 [8]Michihata M, Takaya Y, Hayashi T. Desystem based on the laser trapping technique[J]. Annals of the Cirp, 2008, 57(1):493-496.
 [9]Fan K C, Cheng F, Chen Y J, et al. Probe technologies for micro/nano measurements[C]. Hong Kong:7th IEEE Conference on Nano technology, 2007.
 [10]黄强先,余夫领,宫二敏,等.零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J].光学精密工程,2013,21(3):664-671.
 [11]宫二敏.微纳米CMM测量探头标定方法研究及系统测试[D].合肥:合肥工业大学,2014.

第一作者:郭强,硕士研究生,合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,230009 合肥市

First Author: Guo Qiang, Postgraduate, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

通信作者:黄强先,博士,教授,合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,230009 合肥市

Corresponding Author: Huang Qiangxian, Doctor, Professor, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China