

纳米三坐标测量机误差分离方法^{*}

杨洪涛 费业泰 陈晓怀

【摘要】 根据纳米三坐标测量机结构、误差分布特征和精度要求,选用微型三光束平面激光干涉仪分离测量机误差。设计了误差分离装置,实现了干涉仪平移、偏摆、俯仰和垂直高度的调整以及反射镜垂直角度的精密调整。从原理上分析了45°反射镜光路转折对干涉仪测量结果的影响,实验结果证实了该装置可以实现标准量示值误差、导轨直线度线值误差和俯仰、偏摆、滚转误差的一次性分离,减小传统仪器分离方法由于发热、振动和非实时测量带来的附加误差,误差修正精度可以提高5倍。

关键词: 纳米三坐标测量机 误差分离装置 设计 试验

中图分类号: TH721.1; TH161⁺.5 **文献标识码:** A

Error Separating Method of Nano Coordinate Measuring Machine

Yang Hongtao¹ Fei Yetai² Chen Xiaohuai²

(1. Anhui University of Science and Technology 2. Hefei University of Technology)

Abstract

Based on the Nano-CMM structure, error distribution characteristic and accuracy demand, the micro three light beam planar reflector laser interferometer was selected to separate the Nano-CMM error. The error separating device was designed to realize the accurate adjustment of parallel move, beat, pitch and height, and the horizontal angle between the reflectors. The influence on the measurement result of the interferometer, which is created by using the 45 degree reflector to deflect the beam, was analyzed on principle. The error separating results indicate that the single-time separating of the standard indicating error and the deviant, pitch and beat error of the guide strip can be realized by the device. The additive error created by the heat, vibration and non real-time measurement of the common instruments is decreased via the error separating device. The error correcting precision using this method is five times more than that of the ordinary method.

Key words Nano-CMM, Error separating device, Design, Experiment

引言

现有工业级的三坐标测量机难以实现纳米级的测量,因此近年来精度达纳米级且体积微型化的三维测量设备研究受到重视,只通过机械零件的加工和安装精度无法实现纳米级测量精度,必须利用实时误差感测及补偿系统。纳米测量机的测量精度取决于许多因素的交互影响^[1-3],各个误差之间存在

着相关性。纳米三坐标测量机工作时,主要利用双频激光干涉仪、激光自准直仪和测微仪组合进行常见误差的分离^[1-2]。激光干涉仪和激光自准直仪工作时存在发热和震动,但又必须和测量机放在同一工作环境下,这会使测量机产生附加的误差,因此必须选择合适的标定设备对误差进行分离。本文根据纳米三坐标测量机的结构和精度要求,利用 SIOS 微型三光束平面激光干涉仪设计相应的误差分离方

收稿日期: 2007-02-06

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50420120134)

杨洪涛 安徽理工大学机械工程学院 副教授 博士, 232001 淮南市

费业泰 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 教授 博士生导师, 230009 合肥市

陈晓怀 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 教授

案,以实现测量机多误差一次性高精度分离。

1 纳米三坐标测量机结构和误差分析

纳米三坐标测量机结构如图1所示^[3-5],由机台、工作平台、精密磁悬浮导轨、压电陶瓷线性马达和二维平面光栅尺、Z轴和测头组成。测量时Z轴带动测头在Z向上下移动,由纳米二维定位平台移动实现X、Y方向瞄准定位。测量范围25 mm×25 mm×10 mm,单轴不确定度为10 nm。整套测量机放置在控温精度为0.02℃的恒温箱内进行测量,机台桥架、工作平台、精密滑动导轨和Z轴由低热膨胀系数材料殷钢制作,机台台面由花岗岩制作。XY工作平台采用了共平面运动、力平衡和热平衡设计理念。Z轴的结构是在考虑力平衡、热平衡和轻量化设计理念基础上设计的。由于二维平面光栅安装在定位平台下方,光栅与平台表面存在平行度误差,因此测量机存在由直线度角运动误差引起的阿贝误差。同时测量机还存在标准量示值误差、导轨线值误差、热变形误差、测头瞄准误差、动态误差、软件误差等^[3-6]。

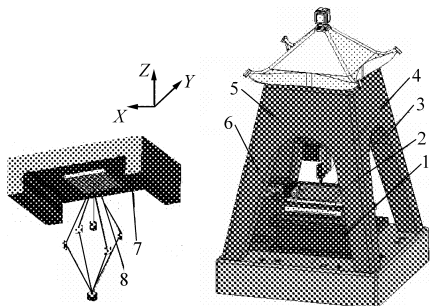


图1 纳米三坐标测量机结构图

Fig.1 Structural diagram of Nano-CMM

1.机台 2.导轨 3、7.工作平台 4.测头 5.Z轴 6.压电陶瓷线性马达 8.二维平面光栅

2 SP2000-TR型三光束平面镜干涉仪原理

为了建立测量机的精确误差模型,必须精确、实时地分离测量机的各个单项误差。从上述分析可以看出,测量机能够分离导轨系统的直线度角运动误差、直线度线值误差和二维平面光栅的示值误差,这些量受外界环境温度的影响较大,因此分离这些误差的标准设备必须与测量机同时放置在恒温箱内部,而且设备不能产生附加的热量使恒温箱的环境温度发生变化,不同种类的误差必须同时分离并加以补偿,才能保证测量机的实时测量精度。选择两台德国SIOS公司的SP2000型微型三光束平面镜干涉仪设计误差分离方案,同时测量X、Y、Z方向的标准量示值误差、导轨线值误差和导轨直线度运动误差。

SP2000-TR型三光束平面镜干涉仪一个光束的工作原理和光束分布图^[7]如图2所示,其结构图如图3所示。干涉仪测量头由对准仪、参考镜、光分配器和光电二极管组成。干涉仪和激光源通过光导纤维连接,连接的距离可达3~25 m。激光源、处理电箱和显示器可以安装在恒温箱外面,将激光源与纳米测量机分开,消除了由于光源发热和震动引起的附加误差。干涉仪的测量方式是通过光导纤维将耦合激光引入干涉仪,对准仪将激光对准。对准的激光在光分配器处分成两路,一路向上在参考镜上反射回来,另一路从光阑射出,照在测量镜上,并反射回来。两路反射光再通过光分配器进入光电二极管干涉环节,通过光电二极管对光波实现倍频,成倍提高光波的干涉分辨率。激光器输出波长为0.632 8 μm激光,要达到1.24 nm的分辨率,必须进行9倍频细分($\lambda/2^9 = 1.24$ nm)。经过细分后的两路光源存在光程的差别,而且在相位上有所区别,通过相位识别环节和计数环节,测出被测物的位置及运动方向。干涉仪测量范围为0~2 000 mm,SP2000-TR型干涉仪可以同时实现同一方向3个长度的测量,3束激光来源于同一光源,具有相同的波长。在测量过程中,由于测量镜是固定在测量机移动部件上,测量镜面与激光难免有一定的倾斜,激光干涉仪中的偏光仪特殊设计对一定的倾斜角度($2''$)是允许的,可以通过 $\Delta l = l(1 - \cos\alpha)$ (其中 Δl 为长度测量误差, l 为激光通过的距离, α 为水平或垂直方向倾斜角度)进行补偿。角度可以通过干涉仪3个光束的测量结果由 $\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 - l_2}{A_2}\right)$ (垂直方向)或 $\alpha = \arctan\left(\frac{l_2 - l_1}{A_1}\right)$ (水平方向)计算得到。其中 l_1 、 l_2 、 l_3 分别为三束激光测量的距离, A_1 、 A_2 为两光束之间距离,为11.973 mm和11.974 mm。分辨率为0.01''。

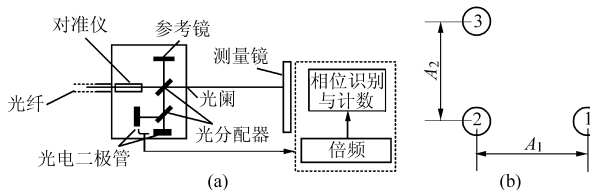


图2 微型三光束平面镜干涉仪原理图

Fig.2 Schematic diagram of micro three light beam planar reflector laser interferometer

(a) 干涉仪工作原理图 (b) 干涉仪光束分布图

3 纳米测量机误差分离装置与原理

3.1 误差分离实验装置

利用微型三光束平面镜干涉仪设计的误差分离

实验装置和反射镜架如图 3 所示。可调支架对干涉仪进行水平平移、偏摆、俯仰和垂直高度精密调节,反射镜架实现两反射镜的垂直角度精密微调。通过两种支架和其他设备进行微调,使干涉仪光路平行于工作台运动方向,反射镜垂直于运动方向,减小由于激光束与运动方向不平行而造成的干涉仪误差。

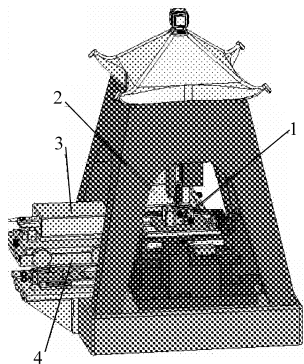


图 3 测量机误差分离实验装置结构图

Fig.3 Structural diagram of CMM error separating device

1.反射镜 2.干涉仪 2 3.干涉仪 1 4.可调支架

3.2 误差分离原理

以 X 向误差分离原理为例加以说明。当测量机沿 X 轴移动时,干涉仪 1 光束平行于工作台运动方向,这样可以实现测量机 X 向示值误差、直线度偏摆、俯仰误差的测量。同时干涉仪 2 激光束垂直于工作台运动方向,可以实现对测量机 X 向线值误差和直线度滚转误差的分离。滚转误差的分离原理如图 4 所示,可以看出 $\alpha_1 = \alpha_2$,其中 α_1 为干涉仪 2 测量的俯仰误差, α_2 为 X 向的滚转误差。

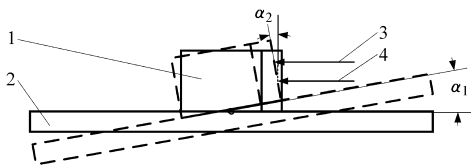


图 4 滚转误差分离原理图

Fig.4 Schematic diagram of roll error separating

1.反射镜 2.工作台 3.激光光束 3 4.激光光束 2

当测量机测头沿 Z 向运动时,如图 5 所示,将反射镜固定在 Z 轴末端,干涉仪 1 的激光束通过 45° 反射镜的转折,可以实现对 Z 轴示值误差、直线度俯仰、偏摆误差的测量,这时需要考虑 45° 反射镜对光束的转折是否影响测量结果的问题。干涉仪经过 45° 反射镜转折后成像的

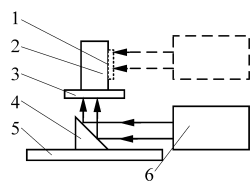


图 5 Z 轴误差分离示意图
Fig.5 Schematic diagram of error separating in Z direction

1.侧面反射镜 2.Z 轴 3.反射镜 4.45° 反射镜 5.工作台 6.激光干涉仪

光路图如图 6 所示,其中实线表示的光路为干涉仪反射镜没有偏转的光路,最终成像于 A 点,虚线表示的光路为反射镜偏摆 α 角后的光路,成像于 B 点,两点之间距离为 $l_4 + l_6$ 。现在计算成像点位置与 α 及直角棱镜角度偏差之间的关系,以判断其对干涉仪测量结果的影响。如图 6 所示,可建立关系式

$$\beta_2 = \frac{180^\circ - \beta_1}{2} \quad (1)$$

$$l_3 = \frac{l_1 \sin \alpha}{\sin(180^\circ - \beta_1 - \beta_2 - \alpha)} \quad (2)$$

$$l_4 = l_3 \sin \beta_2 \quad (3)$$

$$l_5 = l_2 - l_3 \cos \beta_2 \quad (4)$$

$$l_6 = l_5 \tan \alpha \quad (5)$$

所以

$$l_4 + l_6 = \left[l_2 - \frac{l_1 \sin \alpha}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta_1}{2} - \alpha\right)} \cos\left(90^\circ - \frac{\beta_1}{2}\right) \right] \tan \alpha + \frac{l_1 \sin \alpha}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta_1}{2} - \alpha\right)} \sin\left(90^\circ - \frac{\beta_1}{2}\right) \quad (6)$$

当 45° 反射镜角度 β_1 为 90° 没有偏差,考虑工作台实际结构和工作情况,取测量角度 α 为 10°, $l_1 = 50$ mm, $l_2 = 300$ mm,根据式(6)计算得到 $l_4 + l_6 = 0.972\ 224\ 722\ 801\ 50$ mm;当 45° 反射镜角度偏差 $\Delta\beta$ 为 15" 时,根据式(6)计算得到 $l'_4 + l'_6 = 0.972\ 224\ 728\ 801\ 05$ mm;从上述数据中可以看出 45° 反射镜的角度偏差对干涉仪测量结果没有影响。

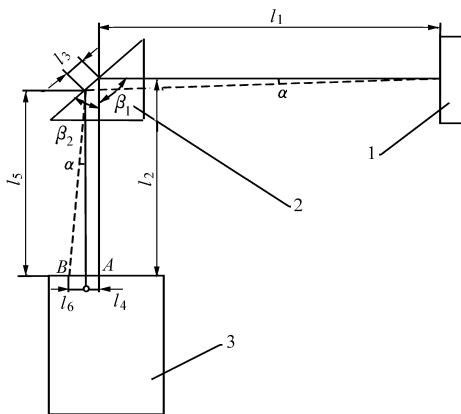


图 6 利用 45° 反射镜转折测量光路原理图

Fig.6 Light path deflected by 45° reflector

1.反射镜 2.直角棱镜 3.自准直仪

另外在 Z 轴的两个侧面贴上两块反射镜(如图 5 所示),利用可调支架调大干涉仪的高度,可以实现对测量机 Z 向线值误差和滚转误差的测量。

4 误差分离实验

设计的误差分离实验装置已经应用在如图 3 所

示的测量机组件 XY 纳米工作台实验装置中。为了比较所设计的实验装置与传统误差分离方法的分离效果,将该装置与 XY 纳米工作台放入具有隔震功能、控温精度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内,分离工作台 X 向导轨系统直线度的俯仰、偏摆误差和光栅的示值误差,并利用分离的误差对工作台 X 向定位误差进行修正,得到的工作台原始定位误差曲线和修正结果如图 7 中曲线 1 和 3 所示。同样利用 HP5529A 型双频激光干涉仪和精度为 $0.1''$ 的 99 型光电自准直仪分离工作台光栅的示值误差和 X 向导轨系统直线度的俯仰、偏摆误差。由于这两种仪器体积较大,无法放入恒温箱,只能放在控温精度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温室的光学平台上进行测试,激光干涉仪和自准直仪分开测量,这样在测量每种误差时存在着时间差,最后的误差修正结果如图 7 曲线 2 所示。比较曲线 2 和 3 可以看出,误差分离实验装置分离结果修正的精度,是利用传统误差分离实验装置分离结果修正精度的 5 倍多,这主要是由于减小了环境温度、湿度、气流、仪器发热、外界震动和仪器示值漂移的影响。

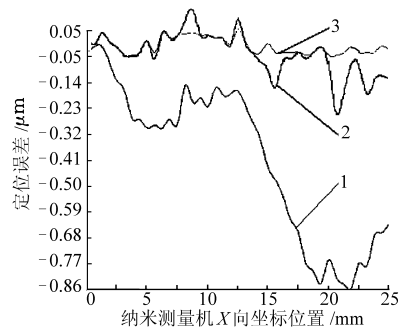


图7 工作台 X 向定位误差修正结果

Fig. 7 Positioning error correcting results in X direction of the working table

5 结束语

从上述的理论分析与误差分离实验中可以看出,利用微型三光束平面镜干涉仪设计的误差分离实验装置可以一次实现多误差的分离,避免激光干涉仪发热、震动等外界环境因素对测量机误差的影响,同时避免了使用单一功能的仪器分次非实时测量带来的附加误差。

参 考 文 献

- 1 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
- 2 钟振周,叶赐周,梁瑞方. 精密机械空间误差量测与补偿[M]. 台北:全华科技图书股份有限公司,2004.
- 3 杨洪涛,费业泰,陈晓怀,等. 纳米三坐标测量机不确定度分析与精度设计[J]. 重庆大学学报,2006,29(8):86~90.
- 4 王琦. 纳米三坐标测量机精度设计与误差修正[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- 5 卫兵,胡鹏浩,王继臣,等. 新型纳米三坐标测量机主体结构设计[J]. 农业机械学报,2007,38(1):158~160.
- 6 Fan K C, Chang S H, Chung T Y. Development of a micro-CMM for nanometrology[C]. Proc. of the Korean Precision Engineering Symposium, Seoul, Korea, 2001.
- 7 刘红忠,赵万华,李涤尘. 多坐标激光干涉仪用于纳米定位系统中的研究[J]. 光子学报,2002,31(5):593~595.

(上接第 133 页)

4 结束语

对微型柔性机构的拓扑优化理论进行了研究和

算法实现,将其应用于三维微动平台设计中。数值算例表明:SIMP 材料插值模式、有限元分析方法、伴随矩阵敏度求解技术以及网格过滤技术应用于三维微型柔性平台设计中是切实可行的。

参 考 文 献

- 1 高思田,王春艳,叶孝佑,等. 纳米技术与纳米测量[J]. 现代计量测试,2000,8(1):3~12.
- 2 杨启志,郭宗和,马履中,等. 三平移全柔性微动机器人机构的位置运动分析[J]. 农业机械学报,2006,37(11):96~99.
- 3 Sigmund O. On the design of compliant mechanisms using topology optimization[J]. Mechanics of Structures and Machines, 1997,25(4):495~526.
- 4 陆丹,刘毅. 功能梯度材料拓扑优化研究[J]. 科技导报,2007,25(7):38~40.
- 5 Bendsoe M P, Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. Archives of Applied Mechanics, 1999,69(9~10):635~654.