

面向激光追踪测量系统二维回转轴系的 误差分析及精度保证

宋辉旭, 石照耀, 陈洪芳, 孙衍强

北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124

摘要 为实现对数控装备测量精度的快速检测,面向激光追踪测量系统设计了一套二维万向节式回转轴系。将高精度标准球作为反射单元固定安装在基座上,保证了激光追踪测量系统具有较大的跟踪角度,同时避免了轴系回转时的窜动和游动对测量结果的影响。分析了轴系结构中主要几何误差对激光追踪测量系统测量精度的影响,研究了轴系跳动误差与测量精度的关系,并简化了轴系跳动误差模型。实验结果表明,当轴系跳动误差在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内时,由该误差引起的激光追踪测量系统的测量误差不足 $0.1 \mu\text{m}$,保证了激光追踪测量系统具有消除跳动误差影响的能力。

关键词 测量; 万向节式回转轴系; 标准球; 几何误差; 跳动误差; 激光追踪测量

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0504001

Error Analysis and Accuracy Assurance of Two-Dimensional Rotatory Axes for Laser Tracing Measurement System

Song Huixu, Shi Zhaoyao, Chen Hongfang, Sun Yanqiang

Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In order to realize rapid detection of measurement accuracy of numerical control equipments, a set of two-dimensional gimbal mount rotatory axes is designed for laser tracing measuring system. A high precision reference sphere serves as the reflection unit, and it is fixed on the base, which ensures laser tracing measuring system perform in a large tracking angle and avoids the influence on measurement accuracy caused by the movement of rotatory axes. The effect of the main geometric errors of axes on measurement accuracy of laser tracing measuring system is analyzed. The relation between run-out error of axes and measurement accuracy is studied, and the model of run-out error of axes is simplified. Experimental results show that measurement error of the laser tracing measuring system is less than $0.1 \mu\text{m}$ when the run-out error is within the range of $\pm 5 \mu\text{m}$, which indicates that the laser tracing measuring system can reduce the effect of run-out error.

Key words measurement; gimbal mount rotatory axes; reference sphere; geometric error; run-out error; laser tracing measurement

OCIS codes 120.3930; 080.2720; 260.3160

1 引言

随着制造业的不断发展,人们对加工设备与测

量设备的精度要求越来越高,因此有必要对数控装备的精度进行检测。激光干涉测量的基准是光的波长,测量分辨率可达到 1 nm ,测量误差可以达到

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-12-06

基金项目: 北京市科委科技计划项目(Z161100001516003)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053904)

作者简介: 宋辉旭(1989—),男,博士研究生,主要从事精密测量技术与仪器、光学仪器设计方面的研究。

E-mail: xuhuisong1989@126.com

导师简介: 石照耀(1964—),男,博士,教授,主要从事精密测试技术与仪器齿轮工程方面的研究。

E-mail: shizhaoyao@126.com (通信联系人)

10~50 nm,已经成为高端数控机床几何精度检测的主要方法^[1-2]。但是,使用激光干涉仪校准数控机床的检测周期长、测量效率低。为了提高测量效率,多使用激光跟踪仪校准数控装备^[3-4]。激光跟踪仪主要由能够实现自动跟踪的二维回转轴系和干涉测距系统组成,具有测量空间大、测量效率高、测量精度高、操作简单等特点,是工业测量领域中一种高精度的大尺寸测量系统。

传统的激光跟踪仪以平面镜作为系统内部的反射单元,将其安装在两轴线(垂直轴和水平轴)交点处,并以该交点作为机器坐标系的原点。激光跟踪仪中激光器发射的激光束由平面镜反射至测量空间并参与测量^[5]。由于反射镜直接与两轴系连接,两轴系的回转误差会改变反射镜的位置,因此不可避免地会对测量结果产生较大影响^[6-7]。日本产业技术综合研究所研发了多自由度、多维驱动的球形电机,并将其用于驱动激光跟踪仪的反射镜^[8-10]。使用球形电机的激光跟踪仪仅通过一个动作就能完成传统的跟踪系统两个电机的功能^[11-12],避免了轴系垂直度误差和轴系异面误差等对测量精度的影响。然而,球形电机对安装精度与控制过程的要求较高,导致球形电机难以推广。

本文面向激光追踪测量系统设计了精密的二维万向节式回转轴系,轴系以球度为 40 nm 的标准球作为激光追踪系统内部的反射单元,光学测量系统通过万向节回转轴系围绕标准球回转,保证激光追踪测量系统在增大角度测量空间的基础上,有效减小轴系跳动误差对激光追踪测量系统测量精度的影响。

2 激光追踪测量系统基本结构

设计的面向激光追踪测量系统的二维万向节式回转轴系结构如图 1 所示^[13]。标准球通过殷钢杆与标准球微调结构固定,并作为整体固定安装在激光追踪测量系统的基座上。通过对标准球微调结构的调节,可以改变标准球在空间中的位置。垂直回转轴系主要由支撑板、空心轴和精密转台构成,精密转台的回转轴线被定义为垂直轴。水平回转轴系主要由谐波减速器、激光头连接板和精密轴承构成,将谐波减速器端面回转中心与精密轴承端面回转中心的连线定义为水平轴。水平回转轴系通过激光头连接板与激光头连接,并作为整体固定安装在支撑板上,构成了万向节式回转结构,有效地增加了两轴系的回转范围。由于水平回转轴系在回转时受到激光头与支撑板的干涉,其回转范围为 $-20^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 。垂

直回转轴系在回转时没有受到结构上的限制,因此可以实现 $\pm 360^{\circ}$ 的回转。球度为 40 nm 的标准球作为反射单元不参与轴系的回转运动。激光追踪测量系统要求激光束、水平轴和垂直轴相交于一点,且该交点与标准球球心重合。在千分表的监测下,调节各微调结构(标准球微调结构、水平轴微调结构和激光头微调结构),可将 3 条轴线与标准球的偏心误差均控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。

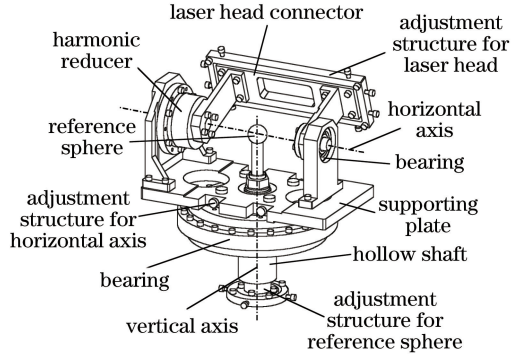


图 1 二维万向节式回转轴系结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of two-dimensional gimballed rotatory axes

激光头内部的光学测量系统如图 2 所示。由光纤准直器耦合的激光束在被平面反射镜反射后,照射到偏振分光镜(PBS)上。其中 p 偏振光作为参考光束经过 PBS,s 偏振光作为测量光束被 PBS 反射,经过 $\lambda/4$ 波片($\lambda/4$)后变为圆偏振光。圆偏振光经过目标靶镜的反射后由左旋圆偏振光变为右旋圆偏振光。一部分反射光被分光镜(BS)反射,照射到位置传感器(PSD)表面,产生的偏差信号用于控制两轴电机跟踪目标靶镜;另一部分反射光在经 $\lambda/4$ 后变为 p 偏振光。p 偏振光继续经过 PBS、 $\lambda/4$ 后变为圆偏

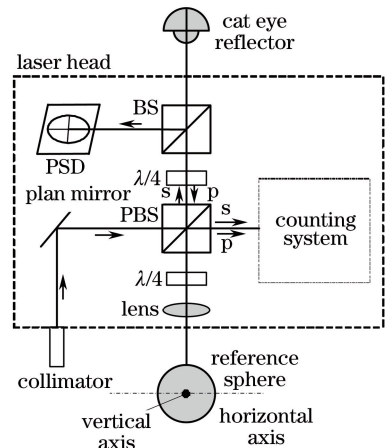


图 2 激光头内部光学系统

Fig. 2 Optical system in internal laser head

振光。圆偏振光被透镜聚焦在标准球的球心,并被标准球球面反射至 $\lambda/4$ 后变为 s 偏振光。s 偏振光经 PBS 的反射后与 p 偏振光相遇,再通过移相系统后产生相位依次相差 90° 的 4 路干涉信号。由计数器对干涉信号进行计数,得到精确的干涉测量值。

在理想情况下,目标靶镜以固定半径围绕回转中心回转时,激光干涉测量系统的测量值始终为零。而由于各项误差的存在,激光干涉测量系统的测量值发生变化。因此,激光干涉测量系统测量值的变化恰好能够反映出测量结果与各项误差的关系。

3 轴系误差分析

二维万向节式回转轴系的误差源可分为轴系几何误差和轴系跳动误差^[14]。轴系几何误差主要包括水平回转轴系两段轴同轴度误差、两轴系垂直度误差、两轴系异面误差以及垂直回转轴系轴锥角误差。轴系跳动误差包括轴系径向跳动误差和轴系轴向跳动误差。

3.1 几何分析

3.1.1 水平回转轴系左右两段轴同轴度误差

如图 3 所示,激光追踪测量系统轴系的水平回转轴系由左右两段轴组成。左段轴由伺服电机减速后直接驱动,右段轴由精密轴承支撑。由于存在加工误差和安装误差,左右两段轴不同轴,同轴度误差为 e_c 。同轴度误差会使两轴系交点与标准球球心产生固定的偏心量 $e_{CD} = e_c/2$ 。在同轴度误差使两轴系交点位于 Z 轴的条件下,当垂直和水平两轴系回转时,由该偏心量引入的激光追踪测量系统测量误差 Δ_{CV} 和 Δ_{CH} 分别为

$$\Delta_{CV} = 0, \quad (1)$$

$$\Delta_{CH} = \frac{e_{CD} \cos \alpha}{2} \left[\sin \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right], \quad (2)$$

式中 α 为水平轴实际位置与理论位置的夹角, φ 为水平轴回转角度。

3.1.2 两轴系垂直度误差

如图 4 所示,由于存在加工误差和安装误差,水平回转轴系与垂直回转轴系无法严格垂直,垂直度误差为 α_v 。该误差并没有使两轴系交点与标准球球心产生任何的偏心量($e_{VD} = 0$),故由垂直度误差引入的激光追踪测量系统测量误差 $\Delta_v = 0$ 。

3.1.3 两轴系异面误差

如图 5 所示,由于存在加工误差和安装误差,水平回转轴系与垂直回转轴系不相交,异面误差为 e_A 。该异面误差 e_A 使两轴系与标准球球心分别产

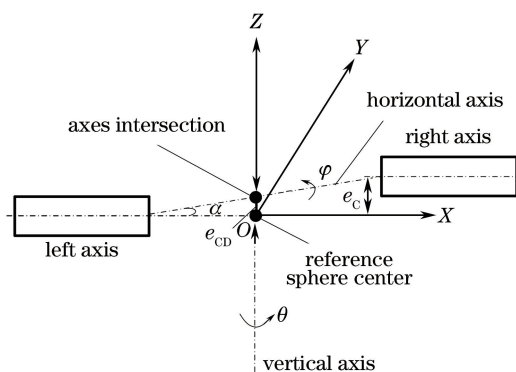


图 3 同轴度误差

Fig. 3 Diagram of proper alignment error

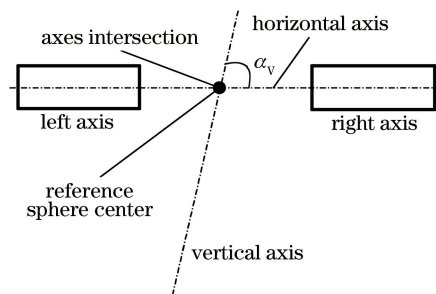


图 4 垂直度误差

Fig. 4 Diagram of squareness error

生偏心量 e_1 和偏心量 e_2 ,在两个偏心量的方向位于 Y 轴的条件下,当垂直和水平轴系回转时,由该异面误差引入的激光测量误差 Δ_{AV} 和 Δ_{AH} 分别表示为

$$\Delta_{AV} = \frac{e_2}{2} [\cos(\theta - \pi) - 1], \quad (3)$$

$$\Delta_{AH} = \frac{e_1}{2} \left[\sin \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right], \quad (4)$$

式中 θ 为垂直轴回转角度。

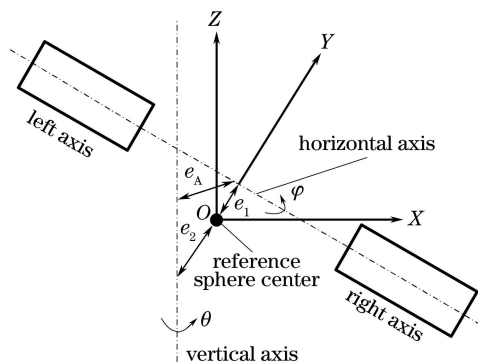


图 5 轴系异面误差

Fig. 5 Different surface error of axes

3.1.4 垂直回转轴系轴锥角误差

如图 6 所示,由于存在加工误差和安装误差,垂直回转轴系无法严格垂直于基座,而是以轴锥角 β_z 做摆动回转运动。垂直轴轴锥角误差会使两轴系交

点与标准球球心产生一定的偏心量 $e_z = L \tan \beta_z$ ，其中 L 为水平轴与支撑板之间的距离。在该偏心量的作用下，激光头以固定距离绕标准球回转，故由垂直轴轴锥角误差引入的激光测量误差 $\Delta_{zV} = 0$ ， $\Delta_{zH} = 0$ 。

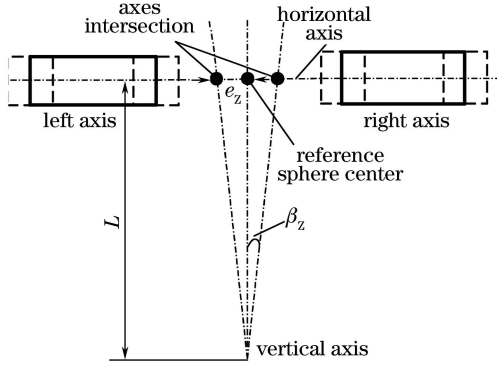


图 6 垂直回转轴系轴锥角误差

Fig. 6 Cone angle error of vertical rotatory axes

上述误差分析均是基于水平回转轴系和垂直回转轴系单独回转的理想情况，而在实际情况下，当两轴系同时回转时，激光追踪测量系统的测量误差是轴系结构中各项几何误差非线性耦合的综合结果。因此，需要对各项几何误差进行综合分析，建立统一的坐标系来计算系统测量误差，从而实现误差补偿。

3.2 轴系跳动误差分析

二维万向节式回转轴系的垂直回转轴系和水平回转轴系均由精密轴承构成，在其工作的过程中，两个回转轴系带动光学测量系统围绕标准球球心在空间跟踪目标靶镜回转。垂直回转轴和水平回转轴一共产生 4 项跳动误差^[15]，即垂直回转轴轴向跳动误差、垂直回转轴径向跳动误差、水平回转轴轴向跳动误差和水平回转轴径向跳动误差。为了方便分析，将上述 4 项跳动误差分为两类，即沿垂直激光束方向的跳动误差和沿激光束方向的跳动误差。标准球通过标准球微调结构与底座固连，不参与轴系的重转运动。在激光追踪测量系统跟踪目标靶镜运动的过程中，由于回转轴系跳动误差的存在，照射在标准球上的激光束在标准球体表面上做如图 7 所示的无规则运动。因此，由轴系跳动误差引起的标准球球体表面上的激光束光斑与目标靶镜之间的距离变化量在一定程度上反映了轴系跳动误差对激光追踪测量系统测量精度的影响。

利用电感测头对两轴系跳动误差进行测量，沿垂直激光束方向的跳动误差和沿激光束方向的跳动误差均在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内。

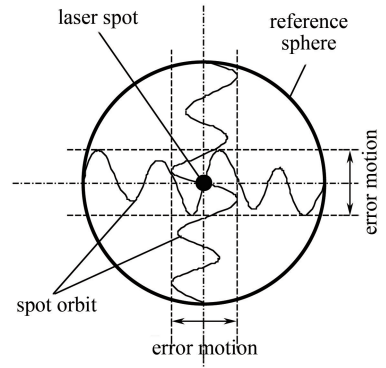


图 7 标准球球体表面上的激光光斑轨迹

Fig. 7 Laser spot orbit on the surface of reference sphere

1) 沿垂直激光束方向的跳动误差

根据激光追踪测量系统的跟踪测量原理，当激光束照射目标靶镜中心时，经过 BS 反射的激光束也会照射到 PSD 的中心。图 8 为由沿垂直激光束方向的跳动误差引起的激光束位置变化。位置①表示无跳动误差情况下 PBS 的理论位置，位置②表示由跳动误差引起的 PBS 偏心位置，位置③表示轴系回转后激光束指向目标靶镜中心时 PBS 的实际位置。虽然跳动误差会带动激光头以及内部所有光学元件在空间跳动，但通过对图 8 的分析可得，可以从相对运动的角度将跳动误差看作标准球在空间的运动。图 8 中 l_1 为变量，表示在跟踪运动过程中目标靶镜距 PBS 中心的距离； $l_2 = 50 \text{ mm}$ 和 $l_3 = 50 \text{ mm}$ 为常量，分别表示 PBS 中心距透镜中心和距激光干涉测量系统中心的距离；透镜的焦距 $f = 100 \text{ mm}$ ；标准球半径 $R = 7.9378 \text{ mm}$ ； $\delta_1 = 5 \mu\text{m}$ 表示由轴系跳动产生的激光束偏移量； γ 为沿 EF 方向与沿 CD 方向的两光束的夹角。

根据图 8 所示的几何关系，得到 PBS 距目标靶镜中心距离和目标靶镜距标准球球体表面光斑距离分别为

$$l_{BA} = \sqrt{(l_1 + l_2 + f)^2 - \delta_1^2} - (l_2 + f), \quad (5)$$

$$l_{AD} = \sqrt{(l_1 + l_2 + f)^2 - \delta_1^2} - \sqrt{R^2 - \delta_1^2}. \quad (6)$$

激光束在透镜和 PBS 中的传播路径如图 9 所示。根据几何关系，标准球球体表面入射光与反射光的夹角为 2ϵ ，即

$$2\epsilon = 2\arcsin(\delta_1/R) = 0.001260 \text{ rad}. \quad (7)$$

标准球球体表面光斑距透镜入射点 E 的距离为

$$l_{DE} = \frac{f - \sqrt{R^2 - \delta_1^2}}{\cos 2\epsilon}. \quad (8)$$

透镜的参数为：两个凸面的半径 $R_1 = R_2 =$

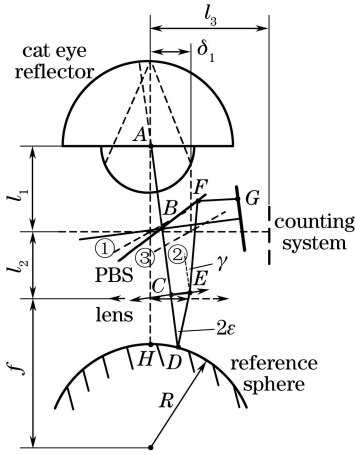


图 8 沿垂直激光束方向的跳动误差引起的激光束位置变化
Fig. 8 Variation of laser beam position caused by run-out error perpendicular to the direction of the laser beam

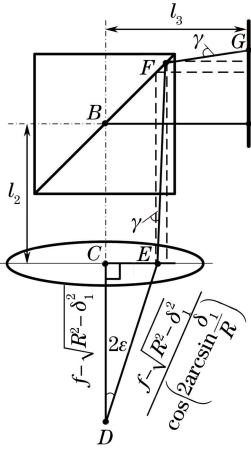


图 9 经标准球反射后激光束的传播路径
Fig. 9 Transmission path of the laser beam reflected by reference sphere

102.501 mm, 厚度 $t=5$ mm, 折射率 $n=1.5163$ 。如图 10 所示, d_{in} 和 θ_{in} 表示入射点为 E 的入射激光束的位姿, 可分别表示为

$$d_{in} = (f - \sqrt{R^2 - \delta_1^2}) \tan 2\epsilon = 0.115998 \text{ mm}, \quad (9)$$

$$\theta_{in} = 2\epsilon = 0.001260 \text{ rad}. \quad (10)$$

将上述已知参数代入矩阵, 则有

$$\begin{bmatrix} d_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R_1} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR_2} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\gamma = \theta_{out} = 0.000080 \text{ rad}. \quad (12)$$

根据图 9 所示的几何关系, 可得沿 EF 方向的出射光束与沿 FG 方向光束的距离之和为

$$l_{EF} + l_{FG} = \frac{l_2 + l_3}{\cos \gamma}. \quad (13)$$

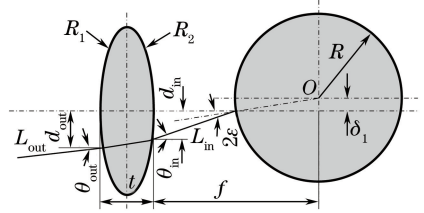


图 10 由跳动误差引起的激光束位姿变化
Fig. 10 Position and attitude variations of laser beam caused by run-out error

不论是否存在跳动误差, 测量光束在目标靶镜与标准球之间晶体内的光程相同, 即不需要考虑 A、B 点之间由晶体折射率引起的光程变化。但相比无跳动误差的情况, 存在跳动误差时, 激光干涉测量系统中由晶体折射率引起的光程变化为

$$\Delta_{CS} = (n_{CS} - 1) \frac{1 - \cos \gamma}{\cos \gamma} L_{CS} \ll 1 \text{ nm}, \quad (14)$$

式中 n_{CS} 为光学系统中光学晶体的折射率, L_{CS} 为所有光学晶体的总厚度。

因此, 在分析整个光路中由跳动误差引起的光程差时不需要考虑晶体的折射率, 仅计算 $l_{BA} + l_{AD} + l_{DE} + l_{EF} + l_{FG}$ 与理论值的变化即可, 则由跳动误差引起的光程差变化为

$$\Delta_1 = 2\sqrt{(l_1 + l_2 + f)^2 - \delta_1^2} - \sqrt{R^2 - \delta_1^2} - (l_2 + f) + \frac{f - \sqrt{R^2 - \delta_1^2}}{\cos 2\epsilon} + \frac{l_2 + l_3}{\cos \gamma} - l_3 - 2(l_1 + l_2 + f - R). \quad (15)$$

根据(15)式可得

$$\begin{cases} \text{Max}[\Delta_1] = 78 \text{ nm} \\ \text{Min}[\Delta_1] = 77 \text{ nm} \end{cases}, \quad (16)$$

$$\frac{d\Delta_1}{dl_1} = -2 + \frac{2(150 + l_1)}{\sqrt{-0.000025 + (150 + l_1)^2}} = 0. \quad (17)$$

(16)式说明当垂直激光束方向的跳动误差在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 范围内时, 由此产生的激光测量误差不足 $0.04 \mu\text{m}$, 并且激光测量误差与被测目标距离的远近无关, 仅与跳动误差大小相关。

2) 沿激光束方向的跳动误差

如图 11 所示, 当沿激光束方向产生跳动误差时, 测量光束的光程不会发生改变, 只有光斑直径发生了变化。

综上所述, 沿激光束方向的跳动误差不会影响激光测量精度, 而沿垂直激光束方向的跳动误差会使激光测量结果产生误差, 但该测量误差非常小, 可以忽略。

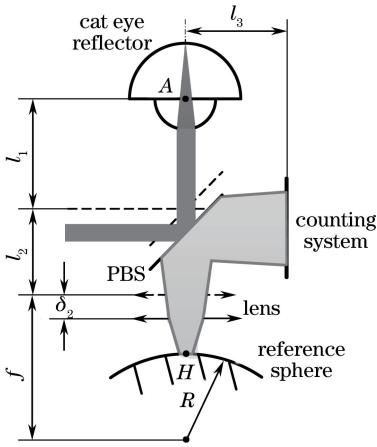


图 11 沿激光束方向的跳动误差引起的激光束位置变化
Fig. 11 Variation of laser beam position caused by run-out error along the direction of laser beam

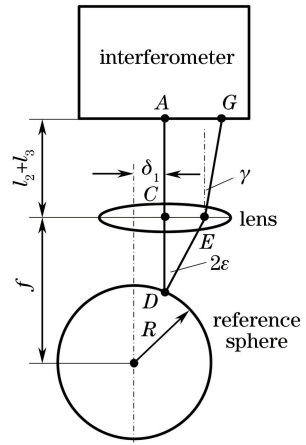


图 12 激光追踪测量光学系统的简化模型
Fig. 12 Simplified model of optical system of laser tracing measurement

4 实 验

为了便于实验研究,利用简化的实验模型研究跳动误差对激光追踪测量系统测量精度的影响。图 12为图 8的简化模型。为保证模型的准确性,要求激光干涉仪距离透镜中心的距离与理论情况保持一致,即 $l_{AC} = l_2 + l_3$ 。实验中,激光干涉仪和透镜固定不动,标准球相对于透镜做水平移动,用于模拟轴系的跳动误差。

图 13 为实验装置图。将激光干涉仪固定在三脚架上,通过微调激光干涉仪姿态,使激光束方向与光学平台平行。在激光干涉仪前端固定光阑和透镜。通过调节透镜在空间中的位置,使透镜光轴与激光束共轴线。在透镜焦点附近安装一个纳米定位平台,并将标准球固定在纳米定位平台上。通过微调标准球的空间位置,使反射光经光阑入射到激光干涉仪内部,并使其与干涉仪内部的参考光束发生

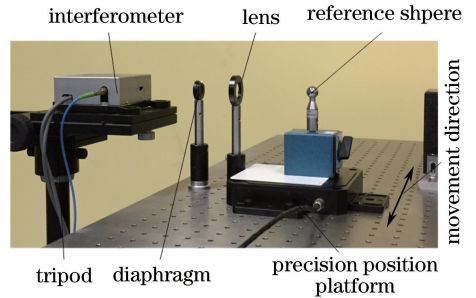


图 13 实验装置图

Fig. 13 Diagram of experimental setup

干涉。纳米定位平台按照图中所示的方向移动,将激光干涉仪读数的最小位置作为标准球的零点位置,此时标准球球心位于透镜焦点处。用纳米定位平台沿垂直激光束方向移动标准球,以模拟回转轴系沿垂直激光束方向的跳动。纳米定位平台以 $1 \mu\text{m}$ 为步长,分别向正反两个方向移动 $5 \mu\text{m}$ 。进行 4 次实验,并记录激光干涉仪的读数。激光干涉仪读数如图 14 所示。

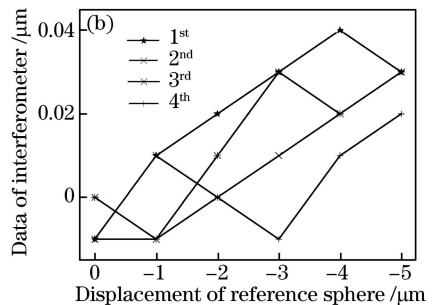
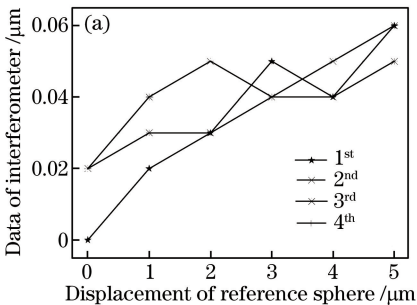


图 14 轴系跳动误差与激光测量误差之间的关系。(a)正方向;(b)负方向

Fig. 14 Relationship between run-out error of axes and laser measurement error.

(a) Positive direction; (b) negative direction

由测量结果可知,当标准球沿垂直激光束方向的正向移动至 $5\ \mu\text{m}$ 时,激光干涉仪的最大读数(即由跳动误差引起的激光测量误差)为 $0.06\ \mu\text{m}$;当标准球沿垂直激光束方向的负向移动至 $-5\ \mu\text{m}$ 时,激光干涉仪的最大读数为 $0.04\ \mu\text{m}$;当沿正反两个方向移动标准球时,激光干涉仪的读数稍有不同,原因在于:正反两个方向确定标准球的零点位置时存在定位误差,即向负方向移动标准球时,标准球的零点位置偏向于坐标轴的正方向(曲线呈现先下降后上升的趋势)。

5 结 论

设计了面向激光追踪测量系统的二维万向节式回转轴系,研究了其几何误差以及跳动误差与激光追踪测量系统的测量精度之间的关系。建立了各项几何误差模型,给出了基于水平回转轴系和垂直回转轴系单独回转的激光测量误差函数。利用相对运动的思想,简化了轴系跳动误差模型,并通过实验验证了该模型的正确性。实验结果表明,当轴系跳动误差在 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 以内时,由该跳动误差引起的最大激光测量误差为 $0.06\ \mu\text{m}$ 。在理论情况下,当跳动误差为 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 时,由此引起的激光测量误差最大为 $0.04\ \mu\text{m}$ 。实验结果与理论分析结果的一致性较好,证明了标准球的二维万向节式回转轴系使激光追踪测量系统具有消除轴系误差影响的能力。

参 考 文 献

- [1] Chen H F, Zheng B W, Shi Z Y, *et al.* CMM spatial coordinate correction method based on laser tracer multistation measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0304003.
陈洪芳, 郑博文, 石照耀, 等. 基于激光追踪仪多站位测量的 CMM 空域坐标修正方法[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0304003.
- [2] Zhang S. Machine tool product innovation and design [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 158-177.
张曙. 机床产品创新与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014: 158-177.
- [3] Li R G. Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 477-483.
李锐钢. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 477-483.
- [4] Yin J, Li M. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0408005.
殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差

- 测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.
- [5] Muralikrishnan B, Phillips S, Sawyer D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: a review[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 13-28.
- [6] Hughes B, Forbes A, Lewis A, *et al.* Laser tracker error determination using a network measurement [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(4): 045103.
- [7] Feng D Y, Gao Y G, Zhang W B. Elimination of shafting errors in photoelectrical theodolites with standard-bearings[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 605-611.
冯栋彦, 高云国, 张文豹. 采用标准轴承的光电经纬仪轴系误差修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 605-611.
- [8] Ibaraki S, Kudo T, Yano T, *et al.* Estimation of three-dimensional volumetric errors of machining centers by a tracking interferometer [J]. Precision Engineering, 2015, 39: 179-186.
- [9] Umetsu K, Furutnani R, Osawa S, *et al.* Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(12): 2466-2472.
- [10] Jiang H, Osawa S, Takatsuji T, *et al.* High-performance laser tracker using an articulating mirror for the calibration of coordinate measuring machine [J]. Optical Engineering, 2002, 41(3): 632-637.
- [11] Higuchi T, Suzumori K, Tadokoro S. Next-generation actuators leading breakthroughs[M]. London: Springer, 2010: 279-290.
- [12] Yano T. Multi dimensional drive system and their applications[C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006: 9075610.
- [13] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 45(1): 0104003.
陈洪芳, 孙衍强, 王亚伟, 等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 45(1): 0104003.
- [14] Zhang Z L, Zhu H, Zhou W H, *et al.* Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1205-1212.
张滋黎, 朱涵, 周维虎, 等. 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1205-1212.
- [15] Farago F T, Curtis M A. Handbook of dimensional measurement [M]. Connecticut: Industrial Press, 2014: 482-484.