

文章编号:1004-4213(2010)02-0311-5

激光干涉测长未对准误差分析*

杨新刚, 黄玉美

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要:分析了激光干涉测长原理,建立了测长光路中角锥棱镜的光线偏移模型及内部光程模型,推导了忽略直线度误差及角度误差的未对准误差对定位误差测量结果影响关系的简洁表达式,进行了定位误差的测定实验,给出了未对准误差的一种定量评估方法.

关键词:激光测量系统;未对准误差;定位准确度;角锥棱镜;误差分析

中图分类号:TH741

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103902.0311

0 引言

激光干涉仪作为数控装备准确度检测的常用手段,具有检测准确度高、数据可靠及效率高等优点,已列入机床检测方法的相关国际及国家标准^[1-2].然而这种检测手段的测量准确性在很大程度上却依赖于测量过程中各种误差诱因的减小或消除,在高准确度测量过程中尤其如此^[3-5].定位准确度是数控装备制造、调试及验收过程的一项重要质量指标,在直线轴定位准确度激光干涉测量过程中,影响测量准确度的原始误差可以分为以下两类:与环境变化有关因素和与测量系统安装及光路调整有关因素^[6].对于前者中的系统性成分,在商品化的激光干涉仪测量系统中通常由集成在系统中的一个独立补偿单元来进行修正;后者主要包括阿贝误差及未对准误差.阿贝误差的修正可归结为将同一运动在某一坐标系下的描述变换到另一坐标系下;未对准误差是由于激光束与运动轴轴线之间的不平行所造成的测量长度和被测对象实际移动距离之间的差异,是激光测长过程中普遍存在的一种误差.激光测长普遍采用角锥棱镜作为位移检测元件,本文结合 Renishaw 激光干涉仪,对采用角锥棱镜作为位移检测元件时的未对准误差的进行了详细分析并进行了相关实验.

1 激光干涉测长原理分析

Renishaw 激光干涉仪测长原理如图 1,图中反射镜均采用具有平行反射特性的角锥棱镜,激光器包括 He-Ne 激光光源和干涉信号的光电检测电路.从激光光源发出的光束,经由分光镜分为两路即参

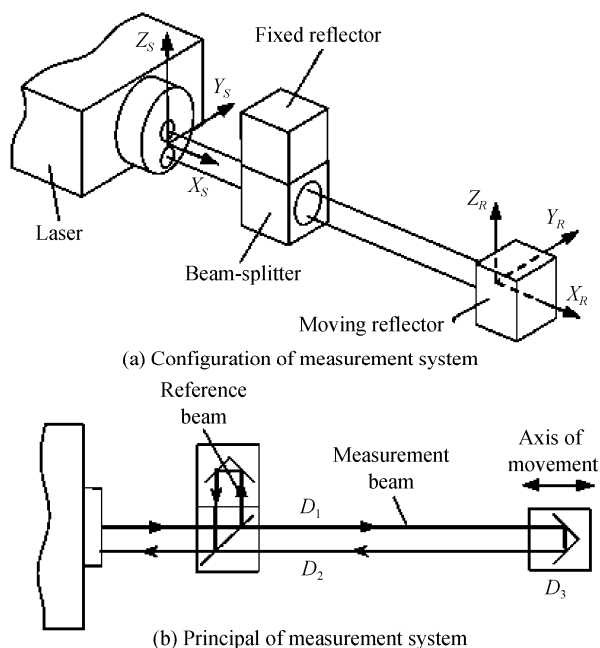


图 1 检测系统组成及工作原理
Fig. 1 Configuration and working principle of measurement system

考光束和测量光束,并分别从固定反射镜和可动反射镜反射回来经分光镜形成一道干涉光束.测量光束光程由三部分组成,分别是入射光程 D_1 、角锥棱镜内部光程 D_2 和返回光程 D_3 .当被测对象与固定于其上的可动反射镜一起移动时,测量光束相对参考光束的相对光程就会发生变化从而引起干涉条纹的移动,据此判断运动的方向和测定运动的距离.按图 1 配置形式进行定位准确度测量时,可认为参考光程不变,因此测量光程相对参考光程的变化量就是测量光程的变化量.被测对象的测量移动量 D_t 可表示如下

$$D_t = (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) / 2 \quad (1)$$

式中 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 的增量.

图 1 中 ΣS 为测量坐标系,固定于激光器上, X_s

* 国家自然科学基金(50875209)资助

Tel: 029-82312713

Email: yxingang@163.com

收稿日期: 2009-03-23

修回日期: 2009-06-25

轴平行于出射激光束; ΣR 固定于移动反射镜上, Y_R 坐标轴通过 E 点, Z 轴平行于 \overline{FG} . 记移动反射镜的实际位移量的大小为 D_a , 则未对准误差 $e = D_a - D_i$.

2 光线传播的矢量表示

如图 2, n, n' 分别为入射光所在介质的折射率和折射光所在介质的折射率, \mathbf{A}, \mathbf{B} 分别为入射光线和反射光线矢量, \mathbf{N} 为界面法线单位矢量, \mathbf{C} 为折射光线矢量, α, β, γ 分别为入射角、反射角和折射角, 则与 \mathbf{A} 长度相等的反射光线矢量可表示为^[7-8]

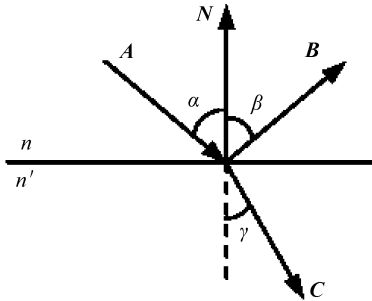


图 2 反射与折射
Fig. 2 Reflection and refraction

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} \quad (2)$$

若 \mathbf{A} 的长度为 n , 则长度为 n' 折射光线矢量可表示为

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} + p\mathbf{N} \quad (3)$$

式中, $p = n \cos \alpha - n' \cos \gamma$, 其中 $\cos \alpha = -\mathbf{A} \cdot \mathbf{N} / n$, $\cos \gamma = [1 - (n/n')^2 \sin^2 \alpha]^{1/2} = [1 - (n/n')^2 + (n/n')^2 \cos^2 \alpha]^{1/2}$.

在 ΣI 坐标系下, 将经过 P_L 点, 方向矢量为 N_L 的光线 L 记为 ${}^I L = [{}^I P_L, {}^I N_L]$, 将经过 P_M 点, 法向矢量为 N_M 的空间界面 M 记为 ${}^I M = [{}^I P_M, {}^I N_M]$. 则, 光线 L 与界面 M 的交点可表示为

$${}^I P = \frac{{}^I N_M \cdot ({}^I P_M - {}^I P_L)}{{}^I N_M \cdot {}^I N_L} {}^I N_L + {}^I P_L \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)是对激光测长光路中光线方向和位置变化进行理论分析的基础.

3 测长光路中的角锥棱镜特性分析

在角锥棱镜上建立坐标系如图 3, 其中 ΣC 原点位于角锥棱镜顶点, 以其三个直角边为坐标轴, ΣR 固定于移动反射镜上. 记 O_C 为 O , 入射光依次经过图 3 面 ΔEFG 的折射, 面 ΔEFO 、面 ΔFGO 、面 ΔEGO 的反射, 面 ΔEFG 的折射后平行于入射光返回. 设 a 为角锥棱镜直角边长, 在 ΣC 下各界面依次表示为

$${}^C M^{EFG} = [{}^C P_M^{EFG}, {}^C N_M^{EFG}] = [(a, 0, 0)^T, (\sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3)^T]$$

$$\begin{aligned} {}^C M^{EFO} &= [{}^C P_M^{EFO}, {}^C N_M^{EFO}] = [(0, 0, 0)^T, (0, 1, 0)^T] \\ {}^C M^{FGO} &= [{}^C P_M^{FGO}, {}^C N_M^{FGO}] = [(0, 0, 0)^T, (1, 0, 0)^T] \\ {}^C M^{EGO} &= [{}^C P_M^{EGO}, {}^C N_M^{EGO}] = [(0, 0, 0)^T, (0, 0, 1)^T] \end{aligned} \quad (5)$$

由图 3, ΣC 在 ΣR 下的描述可用齐次坐标变换

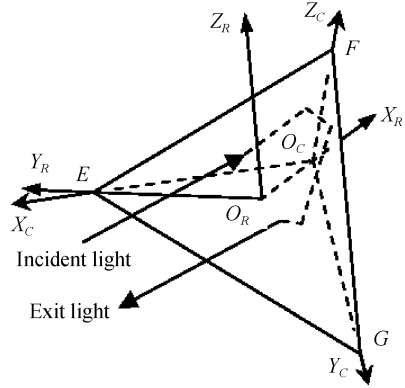


图 3 角锥棱镜光路简图
Fig. 3 Optical path in cube-corner prism

表示为

$${}^R T = [{}^R R, {}^R P] = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}/3 & -\sqrt{3}/3 & -\sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3a \\ \sqrt{6}/3 & -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & 0 \\ 0 & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, ${}^R R$ 为 ΣC 到 ΣR 的旋转矩阵, ${}^R P$ 为 ΣC 原点在 ΣR 下的表示.

3.1 角锥棱镜的光路偏移

记入射光经界面 ΔEFG 折射后在 ΣC 中的表示为 ${}^C L = [{}^C P_L, {}^C N_L]$, 其中 ${}^C P_L$ 为面 ΔEFG 上一点

$${}^C P_L = \begin{bmatrix} {}^C P_{LX} \\ {}^C P_{LY} \\ a - {}^C P_{LX} - {}^C P_{LY} \end{bmatrix}, \quad {}^C N_L = \begin{bmatrix} {}^C N_{LX} \\ {}^C N_{LY} \\ {}^C N_{LZ} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(2)、(4)、(5)、(7)可依次求得在 ΣC 中表示的光线传播路径与面 ΔEFO 、面 ΔFGO 、面 ΔEGO 、面 ΔEFG 的交点 ${}^C P_L^{EFO}$ 、 ${}^C P_L^{FGO}$ 、 ${}^C P_L^{EGO}$ 、 ${}^C P_L^{EFG}$, 其中

$${}^C P_L^{EFG} = \begin{bmatrix} \frac{2a {}^C N_{LX}}{{}^C N_{LX} + {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ}} - {}^C P_{LX} \\ \frac{2a {}^C N_{LY}}{{}^C N_{LX} + {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ}} - {}^C P_{LY} \\ \frac{a(-{}^C N_{LX} - {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ})}{{}^C N_{LX} + {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ}} + {}^C P_{LX} + {}^C P_{LY} \end{bmatrix} \quad (8)$$

为推导出入射光线与出射光线相互位置关系的简洁表达式, 记入射光在 ΣR 中的表示为 ${}^R L = [{}^R P_L, {}^R N_L]$, 其中 ${}^R P_L$ 为面 ΔEFG 上的点, $|{}^R N_L| = n$

$${}^R P_L = \begin{bmatrix} 0 \\ y_r \\ d_r \end{bmatrix}, \quad {}^R N_L = \begin{bmatrix} {}^R N_{LX} \\ {}^R N_{LY} \\ {}^R N_{LZ} \end{bmatrix}$$

由式(6)可得 ${}^R\mathbf{P}_L$ 在 ΣC 下的表示

$${}^C\mathbf{P}_L = {}^C\mathbf{R}^{TR}{}^R\mathbf{P}_L - {}^C\mathbf{R}^{TR}{}^C\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sqrt{6}y_r/3 + a/3 \\ -\sqrt{6}y_r/6 - \sqrt{2}d_r/2 + a/3 \\ -\sqrt{6}y_r/6 + \sqrt{2}d_r/2 + a/3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(3)、式(6)可得入射光经界面 ΔEFG 折射后的长度为 n 的光线方向矢量在 ΣC 下表示

$${}^C\mathbf{N}_L^{EFG} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}{}^R N_{LX} + \sqrt{6}{}^R N_{LY} + \sqrt{3}p}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}{}^R N_{LX} - \sqrt{6}{}^R N_{LY} - \sqrt{2}{}^R N_{LZ} + \sqrt{3}p}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}{}^R N_{LX} - \sqrt{6}{}^R N_{LY} + \sqrt{2}{}^R N_{LZ} + \sqrt{3}p}{3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(9)、(10)各分量分别作为 ${}^C N_{LX}$ 、 ${}^C N_{LY}$ 、 ${}^C N_{LZ}$ 及 ${}^C P_{LX}$ 、 ${}^C P_{LY}$ 、 ${}^C P_{LZ}$ 的值代入式(8),并按式(6)将结果的各分量表示在 ΣR 下得

$${}^R\mathbf{P}_L^{EFG} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2a{}^R N_{LY}}{\sqrt{3}(p - {}^R N_{LX})} - y_r \\ \frac{2a{}^R N_{LZ}}{\sqrt{3}(p - {}^R N_{LX})} - d_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 角锥棱镜内部总光程

根据光线传播路径上的点 ${}^C\mathbf{P}_L$ 、 ${}^C\mathbf{P}_L^{EFO}$ 、 ${}^C\mathbf{P}_L^{FGO}$ 、 ${}^C\mathbf{P}_L^{EGO}$ 、 ${}^C\mathbf{P}_L^{EFG}$ 可求得角锥棱镜的内部总光程为

$$D_2 = \frac{-2n'a}{{}^C N_{LX} + {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ}} \quad (12)$$

取空气折射率 $n=1$,则 $|{}^R N_L|=1$,令 $|{}^C N_L|=1$,由式(6)得 ${}^C N_L = {}^C\mathbf{R}^{TR}{}^R N_L$,得 ${}^C N_{LX} + {}^C N_{LY} + {}^C N_{LZ} = \sqrt{3}{}^R N_{LX}$,其中 ${}^R N_{LX} = \cos \gamma = \sqrt{1 - (n/n')^2 \sin^2 \alpha}$,则总光程与入射角 α 的关系可表达如下

$$D_2 = \frac{2n'^2 a}{\sqrt{3n'^2 - 3\sin^2 \alpha}} \quad (13)$$

式(11)反映了经角锥棱镜反射后光线偏移的情况,式(13)反映了影响角锥棱镜内部光程变化的因素。

4 未对准误差建模

如图4, ΣS 为测量坐标系, ΣR 及 $\Sigma R'$ 位置分别表示测量行程起始和终止时移动反射镜的位置.行程起始时,出射光为 $\overline{P_{S_1} P_{R_1}}$,返回光为 $\overline{P_{R_2} P_{S_2}}$,行程终止时,出射光为 $\overline{P_{S_1} A}$,返回光为 $\overline{CP_{R_3}}$,其中 P_{S_1} 、 P_{S_2} 、 P_{S_3} 位于平面 $Y_S O_S Z_S$ 上, P_{R_1} 、 P_{R_2} 、 P_{R_3} 位于平面上 $Y_R O_R Z_R$ 上, A 、 C 位于平面 $Y'_R O'_R Z'_R$ 上.图中, P'_{R_1} 、 P'_{R_2} 位于平面 $Y'_R O'_R Z'_R$ 上且 $\overline{P'_{R_1} P_{R_1}}$ 、 $\overline{P'_{R_2} P_{R_2}}$

平行于轴运动方向, B 位于 $\overline{P_{S_2} P_{R_2}}$ 的延长线上且在平面 $Y'_R O'_R Z'_R$ 上. φ 为轴运动方向与光束的夹角, ζ 、 η 分别为水平和垂直方向上的激光束的偏斜角; θ 为垂直于运动方向的平面与 $Y_R O_R Z_R$ 平面的夹角.忽略测量过程中直线度误差的影响并假设测量过程中角锥棱镜的姿态不变.

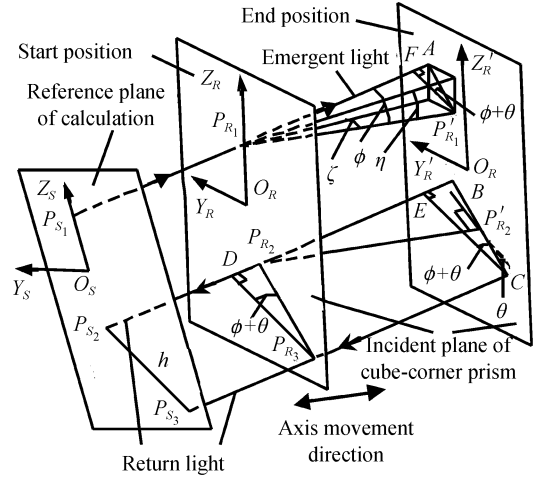


图4 未准直误差分析

Fig. 4 Misalignment errors analysis

由式(11)可知,出射光线与角锥棱镜入射面交点的位移矢量等于返回光线与角锥棱镜入射面交点的位移矢量,则 $\overline{P_{R_1} A} = \overline{CP_{R_2}} = \overline{P_{R_2} B}$,故 $\overline{P_{R_3} P_{R_2}} = \overline{CB} = 2\overline{P_{R_1} A}$,则有

$$\overline{DP_{R_2}} = 2\overline{P_{R_1} A} \sin(\varphi + \theta) = 2\overline{FA} \quad (14)$$

由式(13)可知,在入射角不变情况下,角锥棱镜内部光程量不发生改变(即 $\delta_2 = 0$).角锥棱镜的实际移动距离 $D_a = \overline{P_{R_2} P_{R_2}}$,由式(1)及(14),得角锥棱镜的测量移动量

$$D_t = (\delta_1 + \delta_3)/2 = (2\overline{P_{R_1} A} - \overline{DP_{R_2}})/2 =$$

$$\overline{P_{R_1} F} = D_a \cos \phi$$

则未对准误差

$$e = D_a (1 - \cos \phi) \quad (15)$$

未对准误差与 ζ 、 η 关系可表示为

$$e = D_a \left(1 - \sqrt{\frac{\cos^2 \zeta \cos^2 \eta}{\cos^2 \zeta - \cos^2 \zeta \cos^2 \eta + \cos^2 \eta}} \right) \quad (16)$$

未对准误差随 D_a 及 ϕ 的变化如图5.可见,在 ϕ 一定时,行程越大则所产生的未对准误差绝对值越大.

由图4几何关系可以看出 $\overline{P_{S_3} P_{S_2}} = 2\overline{P_{R_1} F}$,因此未对准误差也可表示为

$$e = \sqrt{\overline{P_{R_1} F}^2 + \overline{P_{R_1} F}^2} - D_t = \sqrt{D_t^2 + \frac{1}{4}h^2} - D_t = \frac{h^2}{8D_t} \quad (17)$$

式中, $h = \overline{P_{S_3} P_{S_2}}$,即测量光束回光的偏移量.式(17)

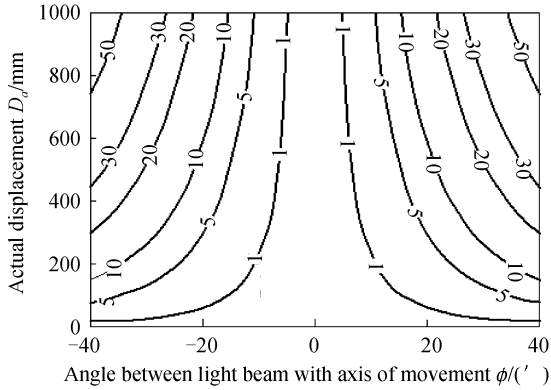


图5 未对准误差与 ϕ 及 D_a 关系

Fig. 5 Relationship of misaligned errors with ϕ and D_a .

给出了未对准误差的一种简单估计方法。

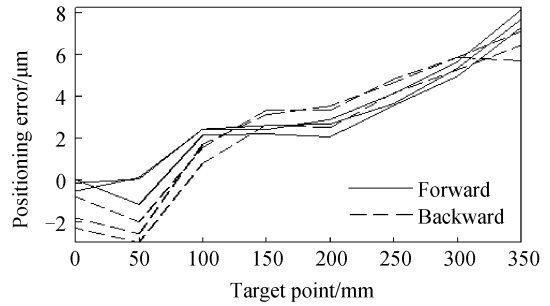
5 机床直线轴测长实验

Renishaw 激光器回光孔允许的光斑偏移量约为 5 mm. 在实际利用激光测长功能进行机床定位准确度检定过程中,为缩短调光时间,在很多情况下是能以正常回光且光强能保证数据可靠采集作为调光的标准,而很少定量考虑未对准误差对测量过程的影响。

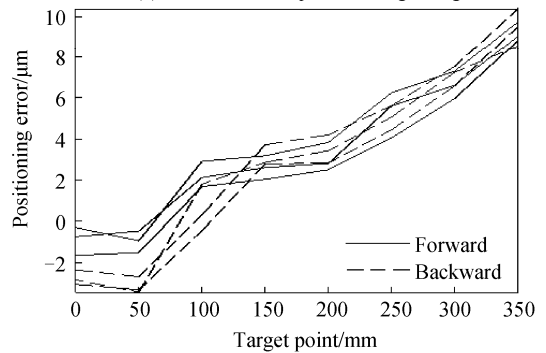
消除或减小未对准误差可从如下几个方面入手:1)准直光束.这种方法往往会导致调光时间大大增加或需要专门的光束准直装置.2)测定激光光束与运动轴的夹角补偿未对准误差.由于 Agilent、Renishaw 等激光干涉仪测量系统测定直线度时并不以光束作为测量基准,因此测定激光光束与运动轴的夹角在通常的激光检测系统中无法实现^[9].3)估算未对准误差大小以去除未对准误差.本文对本实验室开发的数控复合机床 X 轴定位准确度进行了测定,为提高测量准确度及缩短测量辅助时间,根据光束回光的偏移量,按式(17)去除了未对准误差影响取得了较好的效果。

采用 Renishaw 激光干涉仪测量系统直线轴定位误差测量实验结果如图 6(a),图中的 3 条虚线和 3 条实线,分别代表 3 次去程和 3 次回程的位置误差测量数据,测量总行程为 350 mm,每隔 50 mm 为一目标位置,机床运动部件沿运动轴线运动并在每目标位置停留足够时间以测量位置误差数据,共往复测量 3 次,行程起始与终点的越程量为 5 mm.按照 ISO230-2 标准,由测量结果计算得反向差值为 2.197 μm ,定位准确度为 12.092 μm .由于存在未对准误差,回光孔光斑平移量大约 3 mm,可按式(17)估算出在 350 mm 目标点上所产生的未对准误差为 3.214 μm ,故在目标点 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 mm 的未对准误差为 0, 0.459, 0.918, 1.378,

1.837, 2.296, 2.755 μm ,将各测点未对准误差叠加到各测点误差数据点上对数据进行修正,对修正后的数据按照 ISO230-2 标准的评定结果如下:反向差值为 2.197 μm ,定位准确度为 14.967 μm .



(a) 3mm offset of spot of emergent light



(b) 0mm offset of spot of emergent light

图6 定位误差测量结果

Fig. 6 Measuring results of positioning errors

为验证修正后的结果,进行了仔细调光使得在测量过程中激光回光偏移量接近于 0,这时可认为未对准误差为 0,按照同样的测量方法所得测量数据曲线如图 6(b).按 ISO230-2 标准,计算得反向差值为 2.175 μm ,定位准确度为 15.393 μm .可以看出,尽管存在较大的未对准误差,但按本文方法修正后定位准确度的结果与其理想结果已经很接近。

6 结论

结合 Renishaw 激光干涉仪,在介绍激光干涉测长的原理基础上,对未对准误差进行了系统地理论分析并进行了相关实验.1)分析了激光测长原理,给出了角锥棱镜作为测长传感器的光路偏移模型及内部光程模型,为在存在未对准误差情况下对其它测量误差与定位误差测量结果耦合关系的进一步分析奠定了基础.2)给出了在忽略运动轴的直线度偏差及角度偏差条件下的未对准误差模型及根据回光偏移量估计未对准误差的简洁表达式.3)进行了定位误差激光测量实验,结果表明根据回光偏移量来估计未对准误差,并从结果中加以去除以减少辅助时间提高测量准确度是一种有效方法。

参考文献

- [1] MENG Kai, QIAO Wei, LUO Zhao-hui. Application of

- advanced detecting instrument in the accuracy acceptance of NC machine tool[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2003, (11):76-77.
- 孟凯, 乔炜, 骆朝晖. 先进检测仪器在数控机床准确度验收中的应用[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2003, (11):76-77.
- [2] GB/T 17421. 2-2000, Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes [S]. Beijing: Stands Press of China, 2000.
- GB/T 17421. 2-2000, 机床检验通则第二部分: 数控轴线的定位准确度和重复定位准确度的确定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [3] DAI Rong, XIE Tie-bang, CHANG Su-ping. A one-dimensional nano-positioning stage [J]. *China mechanical Engineering*, 2006, 17(2):115-118.
- 戴蓉, 谢铁邦, 常素萍. 纳米级定位准确度一维位移工作台[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(2):115-118.
- [4] CHENG Wei-ming, GE Yi-jun. Error analyses for measuring of laser interferometer in precision positioning [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2006, 20(4): 287-290.
- 程维明, 葛铁君. 精密定位中的激光干涉测量误差分析[J]. *上海工程技术大学学报*, 2006, 20(4):287-290.
- [5] YANG Jun, LIU Zhi-hai, YUAN Li-bo. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2):364-369.
- 杨军, 刘志海, 苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, 37(2):364-369.
- [6] LIU Jun, MU Hai-hua, SUN Ye-ye, et al. Error analysis and compensation in laser interferometry [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006, (9):181-184.
- [7] ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [8] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, LIU Xin. Analysis of reflection property of cube-corner retro-reflector with vector expression[J]. *J Applied Optics*, 2004, 25(2):25-27, 50.
- 匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性[J]. *应用光学*, 2004, 25(2):25-27, 50.
- [9] SCHWARZ W. Straightness measurements for accelerator structures[C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Accelerator Alignment. Tsukuba: IWAA, 1995: 477-490.

Misalignment Error Anglysis in Laser Interference Length Measurement

YANG Xin-gang, HUANG Yu-mei

(School of Machinery and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on analysis of laser interference length measurement principle, optical path offset model and length of optical path in cube-corner prism model are given, and a simple expression of influence relationship of misalignment error and positioning error is derived with neglecting of straightness errors and angle errors. Positioning errors measurement experiments are carried out and a quantitative estimation method for misalignment error is given.

Key words: Laser measurement system; Misalignment error; Positioning accuracy; Cube-corner prism; Error analysis



YANG Xin-gang was born in 1972. He is a Ph. D., his main research interests focus on design methods, errors calibration and compensation technology of multi-axis NC equipment.



HUANG Yu-mei was born in 1941. She is a professor and a Ph. D. supervisor at Xi'an University of Technology. Her research interests focus on innovative developments on mechanical manufacturing NC equipments.