

文章编号 1004-924X(2011)03-0515-05

基于共路光线漂移补偿的直线度测量

由凤玲,冯其波,张 斌

(北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要:针对影响激光测量直线度误差的主要因素之一激光光线漂移,提出了一种基于共路光线漂移补偿的直线度误差测量方法,给出了具体的测量原理和系统构成。从产生激光光线漂移的几个因素出发,理论分析了所产生的光线漂移对直线度误差测量的影响,建立了相对应的光线漂移补偿模型。结果表明,进行补偿后激光器出射光线引起的光线漂移在X方向的最大漂移量由 $28.4\ \mu\text{m}$ 减少为 $5.6\ \mu\text{m}$,Y方向的最大漂移量由 $21.6\ \mu\text{m}$ 减少到 $5\ \mu\text{m}$;由温度梯度引起的光线漂移经补偿后最大漂移量由 $65.7\ \mu\text{m}$ 减少为 $8.9\ \mu\text{m}$ 。实验结果与理论分析均表明,该方法能有效减少各种因素引起的光线漂移对直线度测量结果的影响,提高测量直线度误差的准确性。

关键词:激光测量;直线度误差;光线漂移;共路补偿

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.515

Straightness error measurement based on common-path compensation for laser beam drift

YOU Feng-ling, FENG Qi-bo, ZHANG Bin

(*Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: The laser beam drift is one of the key factors that influence on the accuracy of laser measurement of straightness errors, and a novel method for straightness error measurement based on common-path compensation for the laser beam drift was proposed. The measurement principle and system configuration were given, influences of the laser beam drifts caused by different factors on straightness error measurement were analyzed, and a compensation model was established. After compensation, the results show that the variation of emission beam is reduced from $28.4\ \mu\text{m}$ to $5.6\ \mu\text{m}$ and from $21.6\ \mu\text{m}$ to $5\ \mu\text{m}$ in X direction and in Y direction, respectively, and the variation of beam drift due to temperature gradient is from $65.7\ \mu\text{m}$ to $8.9\ \mu\text{m}$. Both experimental results and theoretical analysis show that the common-path compensation for the laser beam drift method can decrease greatly the influences of the laser beam drift on the straightness error measurement, and can enhance its measurement accuracy.

Key words: laser measurement; straightness error; beam drift; common-path compensation

收稿日期:2010-07-16;修订日期:2010-08-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50675017);科学仪器基础研究专项资助项目(No. 51027006)

1 引言

激光光束作为直线基准常用于各种形位误差的测量^[1-3],但激光束在传播过程中所产生的漂移,特别是角度漂移,限制了激光光束准直测量精度的进一步提高。为此,国内外学者进行了大量的研究,提出了多种补偿光线漂移的方法,如自适应光线补偿法^[4]:采用足够靠近的相邻光束,一束用于测量,另一束用于采集噪声,由于测量光路与监测噪声的光路不能完全共路,补偿效果受到影响;外光路封闭法^[5]:采用屏蔽管将测量光线封闭在一个均匀介质或真空中来有效减少光线的漂移,但其使用场所受限;数字补偿法^[6]:采用两只波长不同的氩离子激光器,分别测量不同波长激光的漂移,计算后进行补偿,存在系统复杂、激光器价格昂贵等不足。为此,本文提出了基于共路激光光线漂移补偿的直线度测量方法。该方法采用单模光纤耦合的半导体激光器为光源,并使测量直线度的光路与监测激光漂移的光路完全共路,具有光路简单、成本低等优点。理论分析和实验均表明所提出的共路激光光线漂移补偿方法能有效消除光线漂移对直线度测量的影响。

2 激光光线漂移测量

图 1 为测量激光光线漂移的原理示意图。激光器出射的光线经角锥棱镜反射后,经过透镜聚焦在二维探测器 PSD 上。

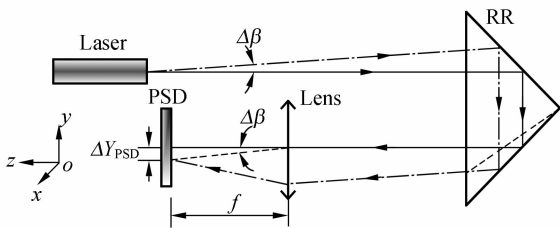


图 1 激光光线角度漂移测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement of laser angular drift

若激光出射光线存在角度漂移,经过透镜汇聚在位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD) 上的光电位置会发生变化,通过以下公式计算得到了光线在两个方向的角度漂移:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta X_{\text{PSD}}}{f}\right) \approx \frac{\Delta X_{\text{PSD}}}{f} \\ \Delta\beta = \arctan\left(\frac{\Delta Y_{\text{PSD}}}{f}\right) \approx \frac{\Delta Y_{\text{PSD}}}{f} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 分别是光束在 x, y 方向的角度漂移, $\Delta X_{\text{PSD}}, \Delta Y_{\text{PSD}}$ 分别为 PSD 上光斑在 x, y 方向产生的位置变化量, f 是透镜的焦距。

3 基于共路光线漂移补偿的直线度误差测量

图 2 所示为基于共路光线漂移补偿的直线度误差测量原理示意图。其中,光线 1 是无光线漂移且无角锥棱镜移动时的情况;光线 2 是激光器出射光线存在角度漂移时的情况;光线 3 是发生角度漂移且角锥棱镜移动时的情况。激光器出射光束经角锥棱镜上的角锥棱镜后向反射,经过半透半反镜 BS 后分为两部分光线,其中被 BS 透射的光线到达四象限光电接收器,用于直线度误差的测量^[7];另一束光被 BS 反射后,经反射镜 M_1 、聚焦透镜以及反射镜 M_2 后到达 PSD,进行光线

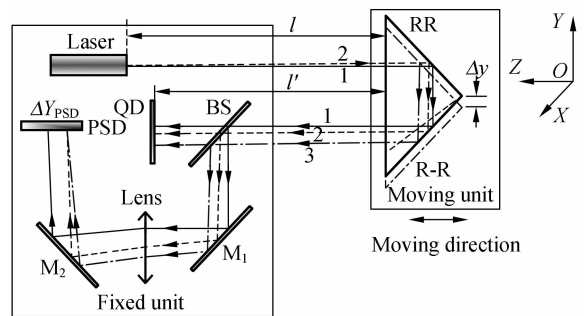


图 2 基于共路光线漂移补偿的直线度测量原理示意图

Fig. 2 Diagram of straightness error measurement based on common-path compensation for beam drift

漂移角测量以及对直线度误差测量的补偿。从图 2 可以看出:测量直线度误差的光路和监测光线漂移的光路在测量头外部是完全共路,各种因素带来的激光角度漂移可以被实时测量,并通过以下公式予以补偿:

$$\begin{cases} \Delta y = \frac{1}{2} [\Delta Y_{\text{QD}} \pm (l+l')] \cdot \Delta\beta \\ \Delta x = \frac{1}{2} [\Delta X_{\text{QD}} \pm (l+l')] \cdot \Delta\alpha \end{cases}. \quad (2)$$

一般 $l \approx l'$, 则公式(2)可写为

$$\begin{cases} \Delta y \approx \left(\frac{1}{2} \Delta Y_{\text{QD}} \pm l\right) \cdot \Delta \beta \\ \Delta x \approx \left(\frac{1}{2} \Delta X_{\text{QD}} \pm l\right) \cdot \Delta \alpha \end{cases}, \quad (3)$$

式中: Δx 与 Δy 分别是两个方向的直线度误差, ΔX_{QD} 与 ΔY_{QD} 分别是 QD 上光线在两个方向上的位置变化量, $\Delta \alpha$ 与 $\Delta \beta$ 分别是两个方向的光线角度漂移大小, l 是固定单元与移动单元之间距离。

4 理论分析

引起激光光线漂移的主要因素包括: 激光器本身温度变化、机械结构不稳定和环境变化, 下面简要分析不同类型的激光光线漂移对直线度测量结果的补偿效果。

4.1 激光器本身引起光线漂移

激光管点亮后, 受激光器放电管自身管体、放电管内和放电管外之间存在不稳定的温度梯度以及激光管材料的不均匀性等因素的影响, 激光器谐振腔两反射镜相对位置会发生变化, 从而使激光器输出的光束产生漂移^[8-11], 造成光线在各个探测器位置的变化, 其结果与如图 2 所示。基于式(1)测量得到激光器本身的光线漂移角 ($\Delta \alpha$, $\Delta \beta$), 按照公式(3)进行补偿, 可以完全消除激光器自身光线漂移角度对直线度误差测量的影响。

4.2 固体测量头机械位置变化引起的光线角度漂移

若固定测量头存在机械位置变化, 引起光线发生角度漂移, 造成光线在各个探测器位置的变化, 如图 3 所示。光线 1 是无光线漂移且无角锥棱镜移动时的情况, 光线 2 是测头位置变化引起角度漂移时的情况。假设激光器出射光方向矢量为 $\mathbf{A}_0 = [0 \ 0 \ -1]^T$, 当固定单元存在大小为 θ_x 的俯仰角时, 经过角锥棱镜后方向矢量变为 $\mathbf{A}_1 = [0 \ -\sin \theta_x \ \cos \theta_x]^T$, 其中 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为固定单元绕 X, Y, Z 坐标轴旋转角度, BS, M_1, M_2 反射矩阵分别为:

$$\mathbf{M}_{\text{BS}} = \mathbf{M}_{M_1} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \\ \sin \theta_x & \cos^2 \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_x \\ \cos \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_x & \sin^2 \theta_x \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{M_2} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta_x & -\cos \theta_x \\ -\sin \theta_x & \cos^2 \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_x \\ -\cos \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_x & \sin^2 \theta_x \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由此得到 PSD 光线的方向矢量为:

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{M}_{M_2} \cdot \mathbf{M}_{M_1} \cdot \mathbf{M}_{\text{BS}} \cdot \mathbf{A}_1 = [-1 \ -2\theta_x \ 0]^T. \quad (6)$$

经计算可得导轨 Y 方向直线度误差

$$\Delta y = \frac{\Delta Y_{\text{QD}}}{2} \pm \frac{(D-l-l')}{2|2-d/f|} \cdot \frac{\Delta Y_{\text{PSD}}}{f}, \quad (7)$$

式中: ΔY_{QD} 为 QD 读数变化, D 为 QD 到转轴距离, d 为转轴到 PSD 中心距离, ΔY_{PSD} 为光线在 PSD 的 Y 方向位置变化量, l, l' 分别为激光器、QD 到角锥棱镜的距离, f 为透镜焦距。

一般情况下近似有 $l \approx l' \gg D$, 且设计时 $d \approx f$, 则式(7)可以近似为:

$$\Delta y = \frac{\Delta Y_{\text{QD}}}{2} \pm \Delta \beta \cdot l. \quad (8)$$

与式(3)对比可以看到, 按照式(8)进行补偿后可以消除机械结构位置变化引起的光线角度漂移对直线度测量影响。

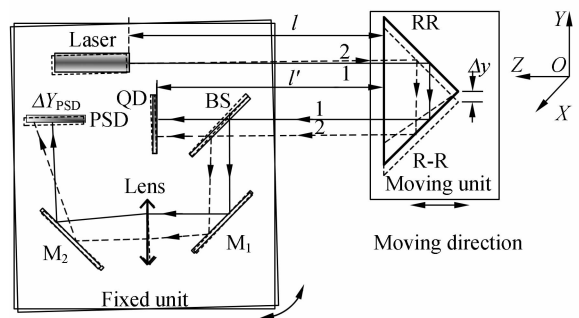
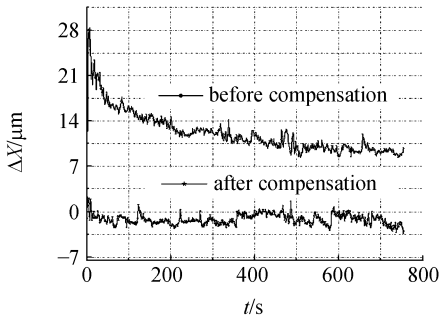


图 3 测头俯仰对直线度误差测量的影响

Fig. 3 Influence of pitches of measuring head on straightness errors

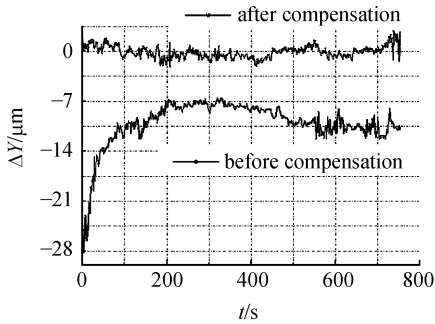
5 实验结果及分析

按照图 2 构建测量系统, 固定单元距移动单元 1 m, 将测量装置置于一个完全开放的环境, 使用一个电风扇对测量装置进行干扰, 自激光器点亮开始测量, 得到的结果如图 4(a), 4(b) 所示。进行补偿后, X 方向的最大漂移量由 $28.4 \mu\text{m}$ 减少为 $5.6 \mu\text{m}$, Y 方向的最大漂移量由 $21.6 \mu\text{m}$ 减少到 $5 \mu\text{m}$ 。



(a)对 X 方向的补偿

(a) Compensation for laser beam in X direction



(b)对 Y 方向的补偿

(a) Compensation for laser beam in Y direction

图 4 补偿激光器出射光线漂移

Fig. 4 Compensation for beam drift due to temperature change of laser

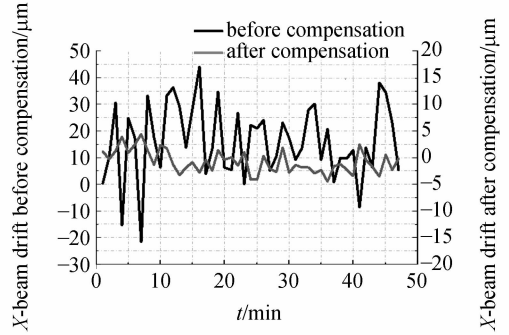


图 5 温度场突变引起光线漂移对直线度误差测量的补偿

Fig. 5 Compensation for beam drifts due to temperature gradients

在固定单元和移动单元之间放置一个加热的电烙铁,模拟一个突变的稳定场,得到的实验结果如图 5 所示。进行补偿后,X 方向的最大漂移量由 $65.7 \mu\text{m}$ 减少为 $8.9 \mu\text{m}$ 。

6 结 论

本文提出了一种基于共路光线漂移补偿的激光测量直线度误差的方法,分别建立了由激光器本身、机械漂移等引起光线角度漂移对直线度误差测量影响的数学补偿模型。理论分析和实验结果均表明,此方法能减少光线漂移对直线度误差测量的影响,提高测量的精度。

参考文献:

- [1] 匡翠方,冯其波,张斌. 直线导轨四自由度测量方法的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1266-1270.
KUANG C F, FENG Q B, ZHANG B. Study of the method for measuring four-degree-of-freedom geometric errors of a linear stage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1266-1270. (in Chinese)
- [2] 曹睿,张斌,方恒楚,等. 一种多自由度测量系统中滚转角测量的新方法的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2344-2348.
CAO R, HZANG B, FANG H CH, *et al.*. A method for roll-angle measurement in multi-degree-of-freedom measuring system[J]. *Actaoptica Sinica*,

2008, 28(12): 2344-2348. (in Chinese)

- [3] 翟玉生,冯其波,由凤玲. 基于直角棱镜的三维转角测量[J]. 光学学报, 2009, 29(s2): 309-312.
ZHAI Y SH, FENG Q B, YOU F L. A method of three-dimensional rotation measurement based on rectangular-prism[J]. *Actaoptica Sinica*, 2009, 29(s2): 309-312. (in Chinese)
- [4] 殷纯永,曾理江. 自适应直线度测量方法及其装置: 中国, 89103290. 8[P]. 1990.
YIN CH Y, ZENG L J. An adaptive method and device for straightness measurement; China, 89103290. 8[P]. 1990. (in Chinese)
- [5] Michael Reid Sogard. Laser interferometer having a sheath for the laser beam; US, 5708505[P].

- [6] ISHIDA A. Apparatus for measuring straightness: US,5333053[P]. 1994.
- [7] FENG Q,ZHANG B,KUANG C. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Optics & Technology*, 2004,36:279-283.
- [8] 冯其波,田芊,梁晋文. 自动读出的光纤激光准直系统[J]. 仪器仪表学报,1994,15(4):363-366.
FENG Q B, TIAN Q, LIANG J W. Display laser collimation system with fiber automatically[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1994, 15 (4):363-366. (in Chinese)
- [9] BORN M,WOLF E. *Optics Principle*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:111-112.
- [10] 方仲彦,殷纯永,梁晋文. 高精度激光准直技术的研究(一)[J]. 航空计测技术,1997,17(1):3-6.
FANG ZH Y, YIN CH Y, LIANG J W. Study on high accuracy laser alignment technique(1)[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997,17(1):3-6. (in Chinese)
- [11] 方仲彦,殷纯永,梁晋文. 高精度激光准直技术的研究(二)[J]. 航空计测技术,1997,17(2):5-8.
FANG ZH Y, YIN CH Y, LIANG J W. Study on high accuracy laser alignment technique(2)[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997,17(2):5-8. (in Chinese)

作者简介:



由凤玲(1980—),女,吉林榆树人,博士研究生,2002年于长春大学获得学士学位,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: 05118304@bjtu.edu.cn



冯其波(1962—),男,湖北麻城人,教授,博士生导师,1983年、1986年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,1993年于清华大学获得博士学位,现为北京交通大学理学院院长,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: qbfeng@bjtu.edu.cn



张斌(1972—),女,吉林长春人,副教授,硕士生导师,1994年于长春理工大学获得学士学位,1997年、2000年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,2002年于复旦大学博士后出站,主要从事光电检测、信息处理等方面的研究。E-mail: bzhang@bjtu.edu.cn