文章编号 1674-2915(2010)03-0279-06

丝杠精度双频激光干涉测量中的阿贝误差实时补偿

齐向东[1],滕丽华[1,2],于海利[1,2]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:提出一种利用双频激光干涉仪检测光栅刻划机分度丝杠的新型光路结构,推导出用于阿贝误差补偿的快速修正计算式,实现了丝杠测试过程中阿贝误差的实时修正,通过修正使不满足阿贝原则的测量系统获得了较高的测量精度。另外该方法还通过调整参考镜角锥棱镜消除了测量过程中丝杠轴向窜动引起的测量误差。实验结果表明,采用提出的方法在300 mm的丝杠行程内修正的最大阿贝误差为1.39 μm,补偿后最大残差仅为0.48 μm,有效地提高了丝杠测量精度。

关 键 词:光栅刻划机;丝杠;双频激光干涉仪;阿贝误差
中图分类号:TG85; TH741.3 **文献标识码**:A

Real-time compensation of Abbe error in measuring lead screw accuracy by dual-frequency laser interferometer

QI Xiang-dong[1], TENG Li-hua[1,2], YU Hai-li[1,2]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: A new optical structure in a dual-frequency laser interferometer for measuring lead screws in diffraction grating ruling engines is proposed, and a formula which can quickly correct the Abbe error is deduced in this paper. In the process of testing lead screws, because the Abbe error in the measured data can be compen-

收稿日期:2010-01-16;**修订日期**:2010-03-17
基金项目:"十一五"国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ2008-1);中国科学院重大科研装备研制项目(No. YZ200804);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005);吉林省科技发展计划项目(No. 20070523, No. 20086013)

sated in real time, the measurement system which doesn't meet Abbe principle can achieve high measurment accuracy. In addition, by adjusting the reference angle of the conical prisms, this method can also eliminate the measurement error induced by the axial movement of a lead screw in measuring process. The experimental result shows that the maximum residual error is only 0.48 μm within a 300 mm stroke after the maximum Abbe error of 1.39 μm is corrected. In conclusion, this method effectively improves the measurement accuracy of lead screws.

Key words: diffraction grating ruling engine; lead screw; dual-frequency laser interferometer; Abbe error

1 引 言

光栅刻划是当今最为精密的加工技术之一，经过60多年来的发展，光栅刻划机已由纯机械式刻划机、简易光电控制式刻划机发展到采用精密激光测量技术的闭环控制式刻划机。光栅刻划机的关键传动元件—丝杠的制作精度对刻划机的运行精度影响很大，直接关系到光栅的鬼线强度、杂散光强度和光栅分辨本领[1]，因此，在现代光栅刻划机制造过程中丝杠加工显得尤为重要。在丝杠的研磨与超精研磨工艺过程中，高精度的测量结果直接指导丝杠研磨，左右丝杠的加工精度。

丝杠的物理结构决定其螺距精度测量无法遵照阿贝原则，而阿贝原则是绝对测量的重要依据，被测量轴线只有在基准轴的延长线上才能得到精确的测量结果[2]。若丝杠直线度误差为10″，阿贝离轴量为100 mm，则引起的测量误差为4.85 μm，该误差大于高精度丝杠的周期螺距误差，甚至累积误差，因此，必须合理地设计丝杠测量结构来减小阿贝误差的影响[3~6]。本文采用被动消除阿贝误差的方法，通过双频激光干涉仪两通道测量装置实时补偿阿贝误差，实现了快速、可靠的高精度丝杠螺距误差测量。

2 测量原理及方法

常规的丝杠螺距检测方法主要有动态测量与静态测量两种。动态测量较之传统的静态测量具有测量精度高、重复性好、效率高、检测自动化程度高等优点，因此，目前在精密丝杠测量中一般采用动态测量。丝杠动态测量技术的基本工作原理是用丝杠的实际螺旋线与标准螺旋线同步比较的方法来求得被测丝杠的螺距误差，如图1所示。

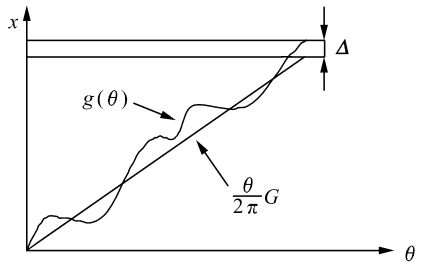

图1 丝杠螺距误差测量原理曲线

Fig. 1 Measurement principle curve of screw pitch error

图中 $g(\theta)$ 为测量螺旋线位移，G 为被测丝杠导程，θ 为被测丝杠转角。

丝杠螺距测量误差计算式如下：

$$\Delta = g(\theta) - \frac{\theta}{2\pi}G, \tag{1}$$

式中 Δ 为丝杠螺距误差。由式(1)可知，螺距误差涉及两个物理量的测量，即位移 $g(\theta)$ 和转角 θ。因此，为实现高精度螺距测量必须实现高精度的位移测量、角度测量，以及位移测量与角度测量的同步。

动态测量系统结构如图2所示。电机带动丝杠转动，增量式编码器产生与丝杠同步的角度基准信号；丝杠牵引螺母，螺母侧面装有防转臂，使两通道测量反射镜沿轴线方向移动，干涉仪接收器接收干涉信号实现位移测量；最后由PC机完成角度信号与位移信号同步采集，同时将干涉仪阿贝误差通道数据经运算补偿到位移测量通道数据中，实现阿贝误差补偿。

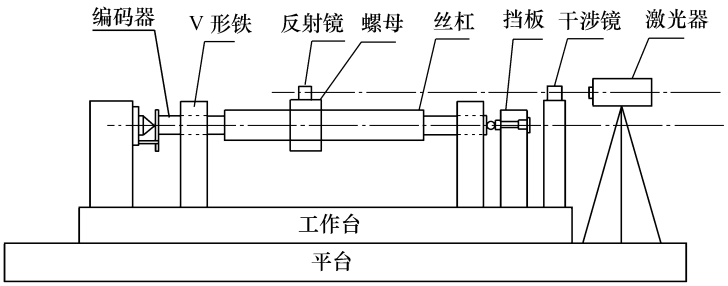

图 2　丝杠动态原理测量示意图

Fig. 2　Dynamic principle measurement of screw

3　测量系统光路结构

测量系统光路结构如图 3 所示,双频激光器发出的正交线偏振光由分光镜分为等强度的两束光,一路由反射镜反射到干涉仪 1,另一路入射到干涉仪 2。两干涉仪的测量光与参考光汇合并被接收器接收,从而分别构成位移测量通道与阿贝误差补偿通道。

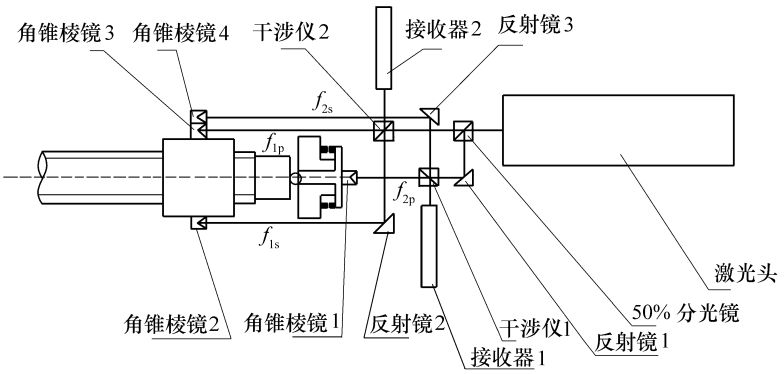

图 3　双频激光干涉仪测量光栅刻划机超精密丝杠光路图

Fig. 3　Light path of measuring lead screw of diffraction grating ruling engine using a dual-frequency laser interferometer

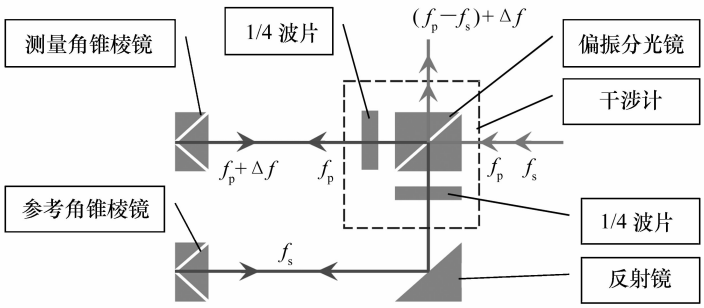

图 4　双频激光干涉仪测量原理示意图

Fig. 4　Measurement principle schematic of dual-frequency laser interferometer

3.1　位移测量通道

干涉仪具体结构如图 4 所示,偏振分光镜(PBS)将入射频率分别为 f_s, f_p 的两正交线偏振光分离。f_s 光入射到参考角锥棱镜并反射回至

PBS,两次经过1/4波片,偏振方向改变90°,透过PBS入射到接收器。f_p光入射到测量角锥棱镜并被反射回PBS,两次经过1/4波片,偏振方向改变90°,由于测量角锥棱镜位移产生多普勒效应,测量光频率将叠加频率Δf,f_p经PBS反射并入射到接收器。f_p,f_s频率差为2 MHz,接收器接收的是$f_p+\Delta f$与f_s两光束形成的拍频信号,该拍频信号与f_p和f_s形成的参考拍频信号量化后做异或处理,即可得到位移量的脉冲计数。测量角锥棱镜位移量$g(x)$与多普勒频移、脉冲计数值有如下关系:

$$g(x)=\frac{\lambda}{2}\int_0^t \Delta f\cdot \mathrm{d}t=N\frac{\lambda}{2}, \tag{2}$$

式中λ为激光波长,N为脉冲计数值。

利用式(2)即可计算出测量镜位移量,同时将参考镜通过弹性机构间接连接到丝杠的端面上,当丝杠产生轴向窜动时,测量镜与参考镜产生相同的频移量而抵消,从而消除轴向窜动引起的测量误差。

3.2 阿贝误差补偿通道

由图3可知轴向位移测量不符合阿贝原则,由于丝杠受重力产生形变和丝杠的直线性误差等因素影响,在测量过程中会使螺母产生转角偏差,从而引起阿贝误差。设阿贝离轴量为D,螺母的转角偏差为β,则阿贝误差为$\varepsilon_{\mathrm{Abbe}}=D\cdot\tan\beta$。通过实时测量螺母的转角偏差,求得阿贝误差,从而实现测量过程中阿贝误差的实时补偿。

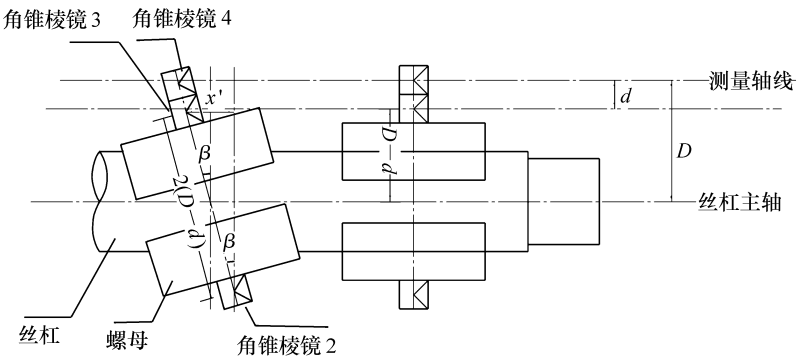

图5 阿贝误差测量示意图

Fig. 5 Measurement schematic of Abbe error

由于螺母具有较强的刚度,则阿贝偏转角可通过间接测量角锥棱镜3与参考角锥棱镜2得到。干涉仪测量原理类似于轴向测量,测量的是角锥棱镜3与4轴向方向的相对位移。设角锥棱镜3与4测量位移量为x',(如图5所示)则由式(2)可得阿贝偏转角β为:

$$\beta=\arcsin\left(\frac{x'}{2(D-d)}\right)=\arcsin\left(\frac{\frac{\lambda}{2}\int_0^t \Delta f'\cdot \mathrm{d}t}{2(D-d)}\right)=\arcsin\left(\frac{\lambda N'}{4(D-d)}\right), \tag{3}$$

式中N'为阿贝误差测量通道脉冲计数值,$\Delta f'$为测量、参考角锥棱镜的相对频移。

由式(3)可得阿贝误差修正量为:

$$\varepsilon_{\mathrm{Abbe}}=D\cdot\tan\beta=D\cdot\tan\left\{\arcsin\left[\frac{\lambda N'}{4(D-d)}\right]\right\}. \tag{4}$$

将测得的阿贝误差直接补偿到测量结果中,丝杠螺旋线位移为:

$$g'(x)=g(x)-\varepsilon_{\mathrm{Abbe}}. \tag{5}$$

通过式(5)可应用双频激光干涉仪电子技术板卡直接实现阿贝误差补偿。

4 测试结果

选取中国科学院长春光学精密机械与物理研究所2号光栅刻划机现有高精丝杠进行测量,测

量行程 L 为 300 mm,丝杠导程 G 为 1 mm。分别进行阿贝误差修正与不修正测量,单次测量时间为 40 min,测试数据曲线如图 6 所示。补偿前后丝杠螺距累积误差有明显差异,可见阿贝误差的存在影响丝杠的测量精度。计算可得出无阿贝误差修正的丝杠螺距累积误差为 37.05 μm,具有阿贝误差补偿时丝杠累积误差为 37.27 μm,由测试数据可得该丝杠的平均导程 $\overline{G}$ 为 0.999 87 mm。可见由于刻划机已经正常工作 40 多年,现有的 2 号光栅刻划机的分度丝杠磨损比较严重,具有较大的测量误差。

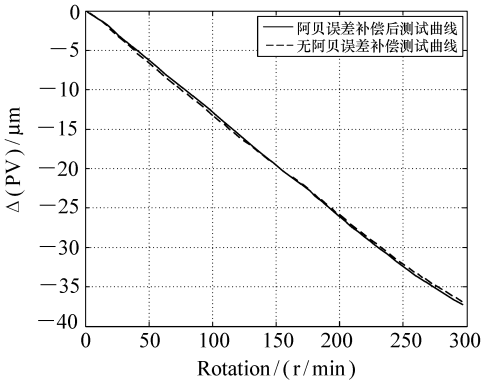

图 6　丝杠螺距误差测试曲线

Fig. 6　Measurement curve of screw pitch error

设丝杠导程 $G=\overline{G}$,得测试结果如图 7 所示,可见补偿后丝杠螺距误差明显减小。无阿贝误差补偿的螺距误差 PV 值为 1.42 μm,标准差为 0.36 μm。该测量方法测得最大阿贝误差为 1.39 μm,补偿后最大残差为 0.48 μm,螺距误差 PV 值为 0.90 μm,标准差为 0.24 μm。由测试曲线轮廓可以看出,进行阿贝误差补偿后明显补偿了由于丝杠和螺母自重变形所产生的影响。测量结果与该丝杠的实际使用情况具有较好的一致性。

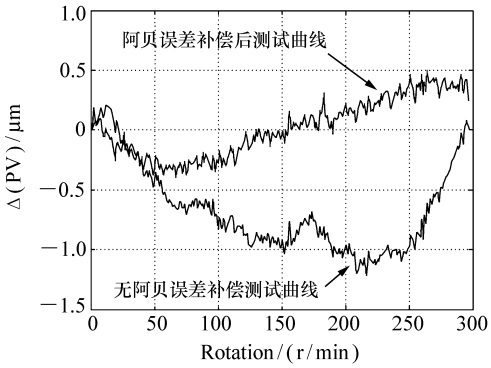

图 7　均值导程下的螺距误差测试曲线

Fig. 7　Measurement curve of screw pitch error under the mean lead

5　结　论

本文提出了利用双频激光干涉仪对丝杠测试过程中的阿贝误差进行实时修正的方法,实践证明该方法行之有效,可广泛应用于精密车床以及螺纹磨床等加工设备以及机床的改造中。该装置还实现了测试、数据记录及分析自动化,消除了人为因素引进的测量误差,保障其具有较高的测量重复性和较快的测试速度。所提出的方案结构简单,易于实现,可方便地应用于目前所使用的一般激光丝杠测量仪和新测量仪的研制。

参考文献:

[1]　祝绍箕,邹海兴,包学诚,等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
ZHU SH Q, ZOU H X, BAO X CH, *et al.*. *Diffraction Gratings*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)

[2]　马宏,王金波. 误差理论与仪器精度[M]. 北京:兵器工业出版社,2007.
MA H, WANG J B. *Error Theory and Instrument Accuracy*[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007. (in Chinese)

[3]　徐孝恩. 螺纹测量[M]. 北京:机械工业出版杜 ,1986.
XU X E. *Thread Measurement*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)

[4]　谢广平,殷纯永. 用于阿贝误差实时修正的三通道激光干涉仪的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,1995,(9):43-47.
XIE G P, YIN CH Y. The study on three-channel laser interferometer for real-time correction of Abbe error[J]. *Modular Machine and Automated Process Technol.*, 1995, (9): 43-47. (in Chinese)

[5] JANUSZ R,SAMBOR S,BIELENIN S,*et al.*. Ball screw inspection setup[J]. *SPIE*,2003,5144:847-854.
[6] SHIGENORI N,KOSHI T. Application of interferometry to the measurement of the pitch of threads on a lead screw[J]. *Appl. Opt.*,1996,5(4):609-613.

作者简介:齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅研制。
E-mail: chinagrating@263.net
滕丽华(1984—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事高精度大行程测量系统的研究。
E-mail:tenglihua123@163.com
于海利(1984—),男,吉林梅河口人,博士研究生,主要从事衍射光栅测试技术及纳米定位技术的研究。
E-mail:yuhailitc@163.com