

文章编号: 0258-7025(2007)05-0694-05

加速度对激光双频干涉仪测量误差的影响

张志平, 程兆谷, 覃兆宇, 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为了减少由于加速度所导致的激光双频干涉仪测量误差, 引入二阶多普勒频移, 建立了由被测物体加速度所引起的测量误差的理论模型。仿真结果表明, 在0.4s时间内0.6g加速度所引起的累积误差可达2.5nm左右, 这对于纳米精度的测量是不应忽视的; 初速度不为零时加速运动会引起更大的误差, 而减速运动所引起的误差则相对小。通过实验验证, 所测的误差变化趋势与理论模拟比较吻合。

关键词 测量; 激光双频干涉仪; 加速度; 累积误差; 多普勒频移

中图分类号 TH 744.3; TN 247 **文献标识码** A

Influence of Acceleration on the Error of Laser Dual-Frequency Interferometer

ZHANG Zhi-ping, CHENG Zhao-gu, QIN Zhao-yu, ZHU Jian-qiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to reduce the dual-frequency interferometer measuring error induced by acceleration of measured object, a theoretical model of the interferometry measuring error was put forward by considering second-order Doppler frequency shift. The simulated results show that when muzzle velocity is zero the cumulative error induced by acceleration of 0.6g can be up to 2.5 nm in 0.4 s, which is not negligible in nanometer measurement. Moreover, when muzzle velocity is not zero, the acceleration motion may result in more error and deceleration motion may result in less error. At last, experiments were done to validate the model.

Key words measurement; laser dual-frequency interferometer; acceleration; cumulative error; Doppler frequency shift

1 引言

激光双频干涉仪由于具有大测量范围、高分辨率、高精度及高速度等综合优势, 并且通过与不同的附件组合, 可进行长度、速度、角度、平面度、直线度和垂直度等的测量, 因此在精密和超精密测量领域中得到了广泛的应用, 尤其在光刻机的工件台和掩模台精密定位方面, 具有不可取代的地位^[1,2]。国内外学者对激光双频干涉仪已开展了较全面的研究^[3~5], 并取得了很大进展。

激光双频干涉仪是基于多普勒频移进行测量的, 而多普勒频移是由于光源与被测物体之间的相

对运动而产生的, 因此对被测物体的运动速度方面研究得比较多, 并取得了很大进展^[6~8]。实际上, 迅速发展的精密制造业不仅要求工件运动速度越来越高, 同时还要求工件作变速运动, 在不同的加速度下进行加工。以光刻机为例, 工件台和掩模台不断作变速运动, 目前300mm硅片生产线工件台扫描速度达到500~1000mm/s, 加速度达到0.6g~1.0g。Dover Instrument公司的HX300硅片台的加速度甚至可达2.0g。类似于这种变速运动系统的超精密测量, 考虑加速度的影响是十分必要的。本文研究了加速度对干涉仪测量精度的影响, 并进行了仿真

收稿日期: 2006-10-08; 收到修改稿日期: 2006-12-21

基金项目: 上海市科委(022261052)资助项目。

作者简介: 张志平(1981—), 男, 江西铅山人, 博士研究生, 主要从事精密光电测控研究。E-mail: zzp8101@siom.ac.cn

导师简介: 程兆谷(1942—), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光器及其应用、精密光电测控研究。

E-mail: zgcheng@siom.ac.cn

和实验验证。如无特别说明,文中所述“误差”均指“仅考虑一阶多普勒频移时,速度或加速度所导致的激光双频干涉仪原理性累积误差”。

2 理论推导

激光双频干涉仪的光学原理图如图 1 所示。稳频的双频 He-Ne 激光器发出一束偏振方向相互垂直、频率分别为 f, f_1 的线偏振光,经偏振分束器(PBS)后分为两束,参考光 f_1 经固定不动的参考角锥棱镜(RCC)反射后回到偏振分束器,测量光 f 经运动的测量角锥棱镜(MCC)后,也返回至偏振分束器。测量光产生多普勒频移,具有位移信息。两束光在偏振分束器重叠干涉后,经光电探测器(PD)转换成电信号进行测量。

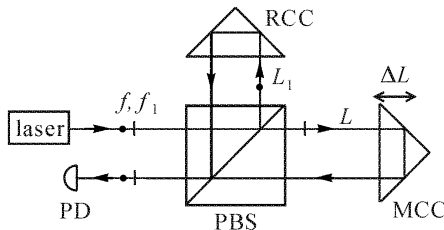


图 1 激光双频干涉仪的光路原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the laser dual-frequency interferometer

根据多普勒效应,当测量角锥棱镜相对光源作相对运动时,产生的多普勒频率 f' 为

$$f' = f \sqrt{\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)}}, \quad (1)$$

式中 f 为光源频率; c 为光在真空中的速度; v 为物体相对光源的运动速度,物体远离光源运动时为正,否则为负。在激光双频干涉仪中,可动棱镜的移动速度是 v ,由于光线射入可动棱镜,又从它那里返回,这相当于光电接收器相对光源的移动速度是 $2v$ 。所以(1)式变为

$$f' = f \sqrt{\frac{1 - (2v/c)}{1 + (2v/c)}}, \quad (2)$$

令 $g(v/c) = \sqrt{\frac{1 - (2v/c)}{1 + (2v/c)}}$,将 $g(v/c)$ 用级数展开,得到

$$g(v/c) = 1 - 2\left(\frac{v}{c}\right) + 2\left(\frac{v}{c}\right)^2 - 4\left(\frac{v}{c}\right)^3 + O\left(\frac{v}{c}\right)^4, \quad (3)$$

式中 $O\left(\frac{v}{c}\right)^4$ 为展开式的余项。将(3)式代入(2)式,

化简可得多普勒频移为

$$\Delta f = f' - f = 2f \frac{v}{c} - 2f \left(\frac{v}{c}\right)^2 + 4f \left(\frac{v}{c}\right)^3 + O\left(\frac{v}{c}\right)^4. \quad (4)$$

目前商业用的双频干涉仪原理是忽略高阶级数,只取(4)式里面的一阶级数,则多普勒频移写为

$$\Delta f = 2f \frac{v}{c}. \quad (5)$$

于是相对速度为 $v = \frac{\Delta f c}{2f}$,而位移是速度对时间的积分,所以所测的位移可表示为

$$L = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{\Delta f c}{2f} dt = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt, \quad (6)$$

而 $\int_0^t \Delta f dt$ 是在时间 t 内,计数器计得的脉冲数 N ,所以(6)式就变成

$$L = \frac{\lambda N}{2}, \quad (7)$$

这是目前商业用的激光干涉仪测长基本公式。

当式(4)考虑二阶级数时,多普勒频移为

$$\Delta f = 2f \frac{v}{c} - 2f \left(\frac{v}{c}\right)^2, \quad (8)$$

则速度可表示为

$$v = \frac{cf \pm c \sqrt{f^2 - 2f\Delta f}}{2f}, \quad (9)$$

(9)式中若取加号“+”,则速度接近于真空光速,因此舍去。令 $h(\Delta f) = \sqrt{f^2 - 2f\Delta f}$,将 $h(\Delta f)$ 进行二项式展开,考虑二阶情况并化简可得

$$v = \frac{\Delta f c}{2f} + \frac{\Delta f^2 c}{4f^2}, \quad (10)$$

将速度对时间积分

$$L = \int_0^t \left(\frac{\Delta f c}{2f} + \frac{\Delta f^2 c}{4f^2} \right) dt = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt + \frac{\lambda}{4f} \int_0^t \Delta f^2 dt, \quad (11)$$

(11)式就是考虑二阶级数时的测长公式。将(11)式与(6)式对比可知,只考虑一阶级数所产生的误差为

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{\lambda}{4f} \int_0^t \Delta f^2 dt = \frac{\lambda}{4f} \int_0^t \left[\frac{2fv}{c} - 2f \left(\frac{v}{c}\right)^2 \right]^2 dt = \\ &= \frac{c}{4f^2} \int_0^t \left(\frac{4f^2 v^2}{c} - \frac{8f^2 v^3}{c^3} + \frac{4f^2 v^4}{c^4} \right) dt = \\ &= \frac{1}{c} \int_0^t v^2 dt + \frac{1}{c^2} \int_0^t v^3 dt + \frac{1}{c^3} \int_0^t v^4 dt, \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中的最后两项分别为 10^{-16} 和 10^{-24} 量级,可以忽略不计,因此误差可表示为

$$\Delta l = \frac{1}{c} \int_0^t v^2 dt, \quad (13)$$

由(13)式可以看出,误差与相对速度和累积时间有

关,尤其是和速度的平方成正比,而与绝对距离无关。当相对运动速度 v 较小时,误差很小,可以忽略,但速度较大(尤其是变速运动)时,其导致的误差比较可观,在纳米超精密测量时不可忽略。当双频干涉仪与被测物体之间的相对运动为变速运动,则可以将 $v = v_0 + at$ 代入式(13),分析加速度对干涉仪测量累积误差的影响,表示为

$$\Delta L_a = \frac{1}{c} \int_0^t (v_0 + at^2) dt. \quad (14)$$

3 模拟仿真

为了直观地研究加速度对激光双频干涉仪测量误差的影响,利用 MATLAB 软件设计了一系列仿真。图 2 是不同加速度对激光双频干涉仪测量累积误差的仿真结果。若初速度 v_0 引起的误差为 ΔL_v ,而由加速度 a 所引起的误差为 ΔL_a ,既有初速度又有加速度所引起的误差为 ΔL_w 。比较图 2 可发现以下规律:

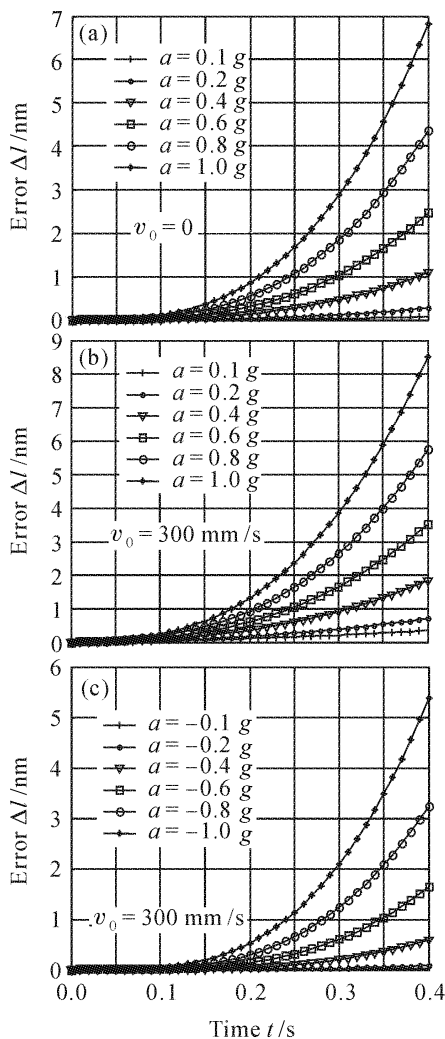


图 2 不同加速度时累积误差的模拟曲线
Fig. 2 Simulated curves of error in different accelerations

1) 初速度为零时(图 2(a)),测量误差与时间 t 和加速度 a 有关,而与位移无关,此时累积误差与 a^2 和 t^3 成正比;

2) 初速度不为零时,如果是作正向加速运动,即初速度和加速度方向一致时(图 2(b)),所带来的总误差略大于初速度和加速度分别所带来的误差之和,即 $\Delta L_w > \Delta L_v + \Delta L_a$;

3) 初速度不为零时,如果是作反向加速运动,即初速度和加速度方向相反时(图 2(c)),所带来的总误差略小于加速度和初速度分别所带来的误差之差,即 $\Delta L_w < \Delta L_a - \Delta L_v$ 。

图 3 是初速度为零时,经过不同的加速度之后,最后速度都达到 2000 mm/s 时所带来的误差仿真曲线。横坐标是从 0 加速到 2000 mm/s 所需要的时间,纵坐标是该段加速过程所导致的累积误差。由图 3 可知,加速度越小,加速到 2000 mm/s 所需时间越长,导致的累积误差也越大,相反,加速度较大时所导致的累积误差较小。

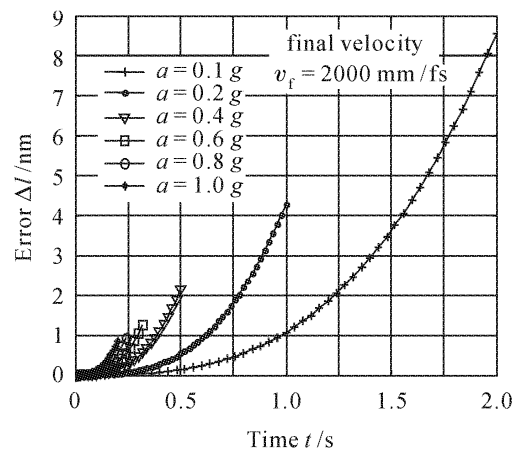


图 3 初速度为 0 时,经不同加速度使速度达 2000 mm/s 时所导致的误差曲线

Fig. 3 Simulated curves in different accelerated motions from 0 mm/s accelerating to 2000 mm/s

4 实验

为了验证测量误差随加速度的变化趋势以及理论模型的正确性,设计了如图 4 所示的实验系统。双频激光器发出偏振态互相垂直的两束光,到达偏振分束器后,一束作为参考光,经参考角锥棱镜(RCC)反射后回到偏振分束器,另一束作为测量光,经测量角锥棱镜(MCC)返回偏振分束器,两束光在偏振分束器重叠干涉后进入光电探测器(PD)并转化为电信号进行处理。实验中,测量角锥棱镜固定在精密制造的滑块上,滑块与倾斜光滑导轨之间充

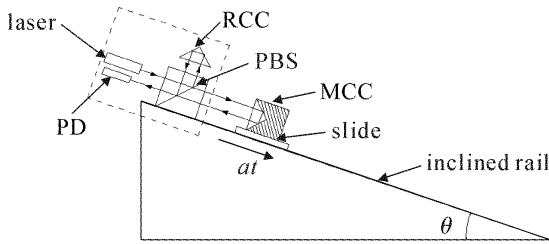


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Sketch map of experimental equipment

分润滑, 滑块可在导轨上作近似无摩擦运动。

根据力学分析可知, 不考虑导轨和滑块之间的摩擦力, 测量角锥棱镜在斜面上的加速度为 $a = g \cdot \sin\theta$, 通过改变倾斜角 θ , 可得到不同的加速度。通过计算可知, 当加速度 a 分别为 $0.1g$, $0.2g$, $0.4g$, $0.6g$, $0.8g$ 和 $1.0g$ 时的角度 θ 应分别为 5.7° , 11.5° , 23.6° , 37.9° , 53.1° 以及 90.0° 。实验所用激光双频干涉仪是美国 Agilent 公司生产的 HP5529A 型, 其初始分辨率为 10 nm , 经改进光路结构提高其光学细分, 其分辨率可达 1.24 nm ^[9,10]。目前要想得到更高的分辨率, 只有在现有基础上增加光学细分或电子细分。不过电子细分越大, 出现的相对误差也越大^[11]; 而光学细分越大则会减小干涉仪的最大可测量速度^[9], 这是激光双频干涉仪的两对矛盾, 要想解决这两对矛盾, 只有从根本上提高电路处理能力和增加 He-Ne 双频激光器所输出的频差。根据文献[9,12]的研究结果可知, 因受到光源频差的限制, 激光双频干涉仪的可测量速度有一定的上限值, 因此在实验中, 测量角锥棱镜的速度 $v = g \cdot t \cdot \sin\theta$ 也有一定限制, 当超过某一数值后激光干涉仪无法进行测量。所以当加速度较大时, 本实验系统的运动累积时间受到一定限制。

实验时, 首先让测量角锥棱镜在水平面上作非常缓慢的匀速运动, 并记下系统的误差 Δl_0 (此时因速度很慢, 故可忽略二阶多普勒频移所导致的误差), 此时的误差 Δl_0 是其他所有误差的总和 (包括空气阻力与摩擦力所导致的误差)。然后让滑块在倾斜导轨上滑动, 每隔 0.05 s 系统自动测量一次, 干涉仪的显示屏可自动显示测量角锥棱镜的位移以及误差 Δl_1 。为了消除其他误差的影响, 将该误差 Δl_1 与之前所测的误差 Δl_0 取差值: $\Delta l_m = \Delta l_1 - \Delta l_0$, Δl_m 即是变速运动时加速度所导致的误差。改变角度 θ 重复实验, 可得出不同加速度对干涉仪测量误差的影响。

在干涉仪分辨率一定的情况下, 为了尽量减少干涉仪系统的死程误差和环境误差, 将激光器、偏振分束器、参考角锥棱镜以及光电探测器组装在一个盒子里, 如图 4 虚线所示, 盒子固定在斜面上。将主要部件组装在一个盒子里的另一个目的是让误差 Δl_0 比较稳定, 以利于判断“ Δl_m 随加速度的变化趋势”。为了得到更精确的结果, 对应每个角度 θ 重复 5 次实验, 取其平均误差, 如图 5 所示。图 5 中曲线 A 所示为系统其他误差总和 Δl_0 ; 曲线 B 为初速度为 0, 加速度为 $0.1g$ 时所测的平均误差 Δl_1 ; 曲线 C 为初速度为 0, 加速度为 $0.2g$ 时所测的平均误差; 曲线 D 为初速度为 0, 加速度为 $0.6g$ 时所测的平均误差 Δl_1 。将 Δl_1 减去 Δl_0 , 即为加速度所导致的累积误差, 其数值以及变化趋势均与图 3 的模拟结果很接近。因为加速度达 $0.8g$ 以及 $1.0g$ 时, 受最大可测量速度限制, 所测量数据太少, 因此没显示在图中。

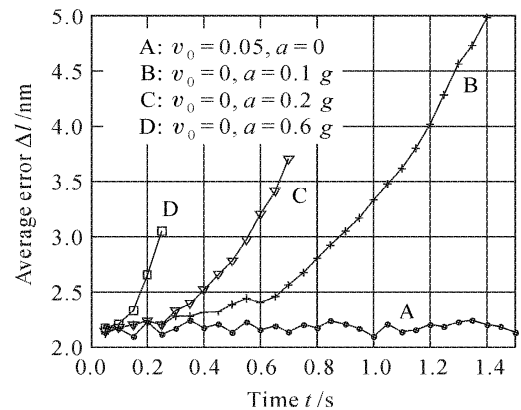


图5 加速度所导致的累积误差实验数据

Fig. 5 Experimental results of error induced by accelerations

5 结 论

目前商业用的激光双频干涉仪只考虑了一阶多普勒频移, 而所忽略的二阶多普勒频移对干涉仪会造成原理性测量误差, 尤其是在高速和变速情况下比较明显。本文研究了加速度对干涉仪测量精度的影响, 提出了理论模型, 并进行模拟仿真, 最后设计了实验方案进行验证。理论仿真表明, 在 0.4 s 时间内 $0.6g$ 加速度所引起的误差可达 2.5 nm , 这对于纳米精度的测量是不应忽视的。而且, 初速度为零时, 误差与 a^2 和 t^3 成正比; 初速度不为零时加速运动会引起更大的误差, 而减速运动所引起的误差则相对小。实验结果验证了测量误差随加速度的变化趋势, 与仿真结果比较吻合。研究结果及误差模型可为干涉仪高速或变速测量误差补偿提供参考依据。

参 考 文 献

- 1 Benyong Chen, Xiaohui Cheng, Dacheng Li. Dual-wavelength interferometric technique with subnanometric resolution [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(28):5933~5937
- 2 Zhaogu Cheng, Haijun Gao, Xiongliang Chai *et al.*. Study on high accuracy displacement interferometer for lithography application [C]. *SPIE*, 2004, **5662**:395~399
- 3 Chunyong Yin, Guoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(8):1361~1365
- 4 Norman Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**:907~926
- 5 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong *et al.*. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11):987~992
戴高良,晁志霞,殷纯永等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11):987~992
- 6 Frank C. Demarest. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**:1024~1030
- 7 Zhong Zhi, Tan Jiubin, Ma Hongwen *et al.*. Study on fast ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):791~794
钟志,谭久彬,马洪文等. 激光外差干涉快速超精密测量模型研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):791~794
- 8 Gao Sai, Yin Chunyong. High measurement speed dual frequency laser interferometer [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3):238~239
高赛,殷纯永. 高测速双频激光干涉仪[J]. *光学技术*, 2001, **27**(3):238~239
- 9 Zhaogu Cheng, Haijun Gao, Zhiping Zhang *et al.*. Study of a dual-frequency laser interferometer with unique optical subdivision techniques [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10):2246~2250
- 10 Agilent 5529A Dynamic Calibrator Data Sheet. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5964-9307E.pdf>
- 11 Suo Rui, Fan Zhijun, Li Yan *et al.*. Dual-frequency laser interferometer present state and development. [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(4):251~253
所睿,范志军,李岩等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(4):251~253
- 12 Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Maximum achievable velocity measuring of laser interferometers [P]. *Chinese Patent*, CN1587949A, 2005
程兆谷,高海军. 双频激光干涉仪测量速度的自由落体测量装置[P]. 中国专利, CN1587949A, 2005