

# 振动对面形测量误差的影响分析

王汝冬 田 伟 王 平 王立朋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 振动会使高精度面形测量产生误差。建立了振动对干涉测量面形的误差模型,应用 13 步移相算法分析了在振幅为 63 nm 时的误差情况。分析结果表明,当面形测量误差的敏感频率为 12 Hz 时,振动引起的面形均方根(RMS)误差约为 12 nm。通过实验进行了验证,仿真分析结果和实验结果基本相同。实验分析了在 12 Hz 时,振幅为 5~63 nm 时,对应的测量面形 RMS 误差为 1~7.1 nm,振幅和 RMS 误差线性增大。为不同振动频率和振幅引起的面形 RMS 的误差分析和高精度面形测量的振动环境控制提供了一定的参考。

**关键词** 测量;干涉测量;误差分析;振动;面形误差

**中图分类号** TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1112001

## Analysis of Vibration Effect to Surface Figure Measurement

Wang Rudong Tian Wei Wang Ping Wang Lipeng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** Vibration introduces error to high accuracy surface figure measurement. The vibration error model of the surface figure measurement is established by interferometry. When the vibration amplitude is 63 nm, the sensitive vibration frequency of the surface figure measurement is 12 Hz, and the surface figure root mean square (RMS) error is about 12 nm caused by vibration through using the thirteen-step algorithm. The simulation result and the experimental result are almost the same. According to the experimental analyses, the RMS error of surface figure varies from 1 nm to 7.1 nm, when the vibration frequency is 12 Hz and the amplitude varies from 5 nm to 63 nm, and the surface figure RMS error increases linearly with the vibration amplitude. It can provide a certain reference for the environment control of vibration when measuring high accuracy surface figure through analyzing the surface figure error at different vibration frequencies and amplitudes.

**Key words** measurement; interferometry; error analysis; vibration; surface figure error

**OCIS codes** 120.3180; 120.4630; 120.7280

## 1 引 言

采用移相干涉技术测量元件面形时,为使测量精度达到纳米量级,需要控制与精度有关的各种误差。高精度的面形测量的误差来自于测量仪器系统误差和外界的环境扰动。外界环境的扰动主要有压强、湿度、温度、气流扰动和环境振动等,其中压强和湿度引起的测量误差比较容易控制,温度变化和气流扰动引起的测量误差可以通过减小干涉腔长、温

控等措施控制;环境振动引起的测量误差可以通过隔振措施控制,通过算法也能消除部分振动对测量精度的影响<sup>[1~5]</sup>。但是对于一定频率范围内一定幅度的振动,隔振系统不能完全把振动隔离,振动抑制算法也不能完全消除振动对测量精度的影响。环境振动引起的误差通常对干涉测量精度影响最大,是进一步提高测量精度的一大障碍<sup>[6~9]</sup>。

本文通过研究不同振动频率下引起的面形测量

收稿日期: 2012-05-11; 收到修改稿日期: 2012-05-23

基金项目: 国家重大专项(2009ZX02205)资助课题。

作者简介: 王汝冬(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机设计方面的研究。E-mail: rudong1415@163.com

精度的误差,找出了振动对高精度面形测量的敏感区域,为高精度的面形测量的振动环境控制、仪器结构设计等提供了一定的参考。

## 2 振动对面形测量误差的分析

使用移相干涉仪测量面形时,环境振动使被测面和参考面干涉腔产生的距离变化,会造成测量面形干涉图中产生“波纹”,产生测量误差<sup>[10~12]</sup>。在干涉测量中,干涉图上某一点的光强可以表示为

$$g(\theta, t) = G\{1 + V\cos[\Phi(t) + \theta]\}, \quad (1)$$

式中  $G$  为背景光强,  $V$  为对比度,  $\Phi(t)$  为相位移,  $\theta$  为  $(-\pi < \theta < \pi)$  真实相位。一般外界环境振动可以描述为

$$r(t) = r_0 \cos(2\pi ft + \alpha), \quad (2)$$

式中  $r_0$  为振幅,  $f$  为振动频率,  $\alpha$  为  $(-\pi < \alpha < \pi)$  振动初始相位。当干涉测量的干涉图中包含外界振动误差时,干涉图上的某点光强可表示为

$$g(\theta, t) = G\{1 + V\cos[\Phi(t) + \theta + r(t)]\}. \quad (3)$$

设移相干涉仪电荷耦合器件(CCD)采样频率为  $f_0$ , 每步移相为  $\pi/2$  则,每步移相时间

$$\tau = \frac{\pi/2}{2\pi f_0}, \quad (4)$$

干涉仪一般采取多步移相减少误差,设移相步数  $m = 0, \dots, M$ , 则每步移相时间  $\tau$  内,在 CCD 上的光强积分可用离散函数表示为

$$\bar{g}_m(\theta, \alpha) = \sum_{n=0}^{N-1} g(\theta, \alpha, t_m + t_n), \quad (5)$$

式中  $t_n = \left(n - \frac{N-1}{2}\right) \frac{\tau}{N}$ 。被测相位可以表示为

$$\varphi(\theta, \alpha) = \arctan[T(\theta, \alpha)] + C, \quad (6)$$

$$T(\theta, \alpha) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} s_m \bar{g}_m(\theta, \alpha)}{\sum_{m=0}^{M-1} c_m \bar{g}_m(\theta, \alpha)}, \quad (7)$$

式中  $C$  为常数项,  $s_m, c_m$  为移相算法的特征系数。如果干涉测量面形包含振动误差,则由振动引起的相位误差为

$$\Delta\varphi(\theta, \alpha) = \varphi(\theta, \alpha) - \theta. \quad (8)$$

考虑在  $[-\pi, \pi]$  内真实相位  $\theta$  和振动初始相位  $\alpha$  对面形测量精度的影响,可推导出振动引起的面形测量均方根(RMS)误差为

$$L = \frac{\lambda}{4\pi R} \left\{ \frac{1}{P} \frac{1}{Q} \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} [\Delta\varphi(\theta_p, \alpha_q) - \overline{\Delta\varphi}(\alpha_q)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

$$\overline{\Delta\varphi}(\alpha_q) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \Delta\varphi(\theta_p, \alpha_q), \quad (10)$$

式中  $\lambda$  为干涉光波长( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),  $R$  为干涉腔折射,  $P, Q$  为 RMS 中的样本数。

## 3 振动对干涉测量精度的仿真分析和实验

应用 Matlab 软件编程,分析振动对面形测量精度的影响。设被测面为一平面,干扰振动的振幅为  $63 \text{ nm}(\lambda/10)$ , 频率范围为  $0 \sim 60 \text{ Hz}$ ,  $R = 1, N = P = Q = 20$ , CCD 采样频率为  $24 \text{ Hz}$ , 应用 Hariharan 13 步算法<sup>[13,14]</sup>, 可获得移相算法特征系数  $s_m, c_m$  如表 1 所示。

表 1 13 步移项算法特征系数

Table 1 Characteristic coefficients of thirteen-step algorithm

Characteristic coefficient	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$s_m$	3	4	-12	-21	0	-16	0	16	21	12	0	-4	-3
$c_m$	0	4	12	12	0	-16	-24	-16	0	12	12	4	0

仿真分析可得当振动幅值一定时( $63 \text{ nm}$ ), 振动对平面面形测量精度的影响,如图 1 所示。在  $12 \text{ Hz}$  附近(CCD 采样频率的一半)振动对面形测量精度影响最大, RMS 误差约  $12 \text{ nm}$ 。

应用 Zygo 干涉仪测量  $4 \text{ inch}(1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm})$  平面, CCD 采样频率为  $24 \text{ Hz}$ , 干涉腔长约为  $40 \text{ mm}$ , 被测平面安装在带移相器的两维调整架上。移相器可以通过驱动软件控制移相器的振动频率和振动幅度,通过移相器的振动使被测面和参考面之间形成沿光轴方向相对振动,搭建光路如图 2 所示, TF 为透射参考平面, RF 为反射参考平面, PSI 为移相干涉技

术, PI 为德国制造纳米位移产品公司名称。

不加振动测量被测平面,采用 32 次位相平均,测量 5 次。测得干涉仪简单重复性达到  $0.04 \text{ nm}$ , 把测量的被测平面结果作为真值。利用压电陶瓷(PZT)推动被测面振动,振幅恒定为  $63 \text{ nm}$ , 振动频率为  $1 \sim 36 \text{ Hz}$ , 同样采用 32 次位相平均,测量 5 次,把测得不同振动频率下的面形值分别减去真值,得到 5 个振动引起的 RMS 误差,5 个 RMS 误差的平均值作为振动引起的面形测量误差,得到振动引起的测量面形误差随频率的变化关系,如图 3 所示。被测面真值和不同振动频率下被测面的面形如图 4 所示。

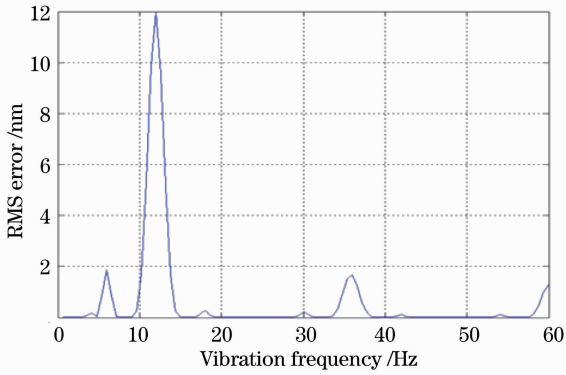


图 1 振动对面形测量精度影响的仿真结果  
Fig.1 Simulation result of vibration effect on surface figure measurement

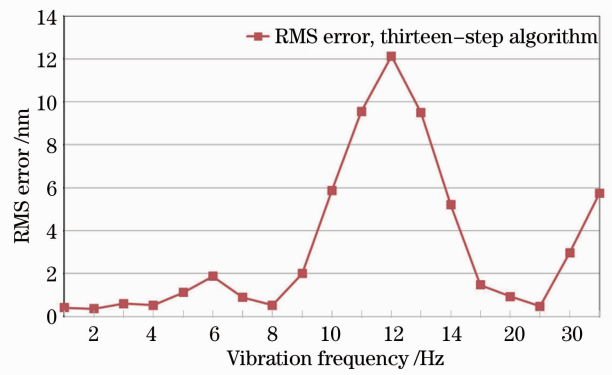


图 3 振动引起面形测量误差随频率变化  
Fig.3 Surface figure error versus vibration frequency

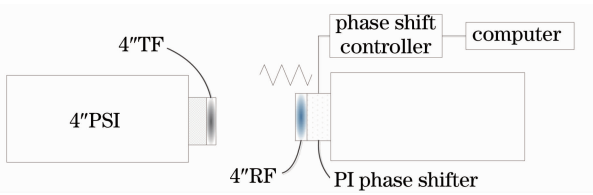


图 2 振动对面形测量精度影响光路图  
Fig.2 Light path of vibration effect to surface figure measurement

通过对恒定振幅,不同频率下振动对面形测量影响的仿真分析和实验对比可知,仿真分析和实验的结果在低频段(24 Hz 以下)基本相同,在 12 Hz 处,振动对面形测量影响最大,振幅为 63 nm,RMS 误差为 12.1 nm,为明显的正弦波影响,如图 4 所示。在 24 Hz 以上,仿真分析和实验的峰值频率均为 36 Hz,峰值不同,因为仿真算法采用的是线性算法,实际上高频时会出现非线性特性,所以造成仿真和实验峰值频率相同,峰值相差较大。

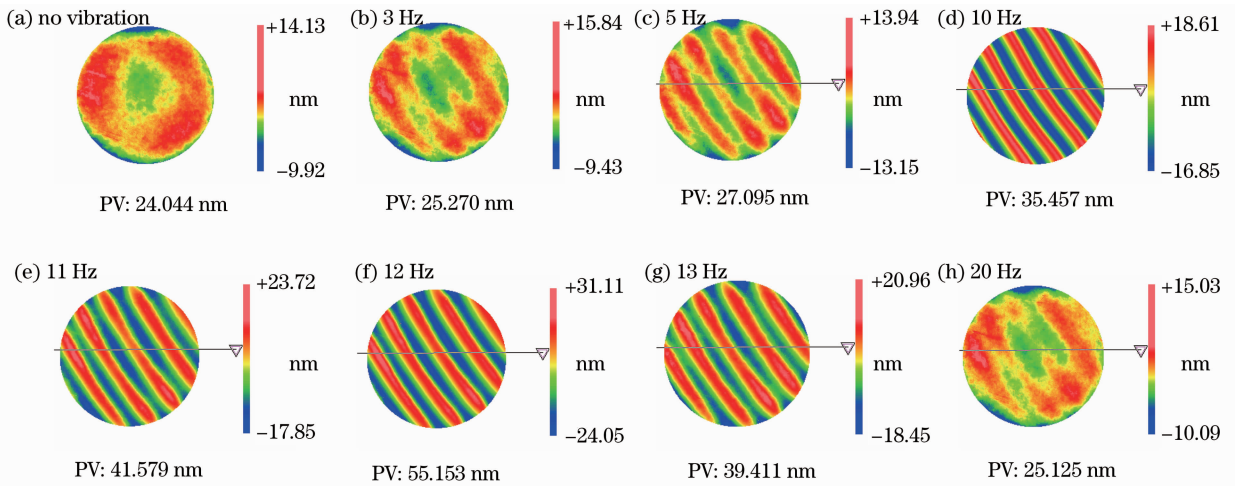


图 4 不同振动频率下被测面面形  
Fig.4 Surface figure error with different vibration frequencies

振动频率为 12 Hz 时,不同振幅对平面面形测量误差影响的实测曲线图如图 5 所示。由图可知,在振动敏感频率为 12 Hz 的条件下,振动振幅为 5 nm 时,面形 RMS 误差约为 1 nm;振幅 40 nm 时,面形 RMS 误差约为 7.1 nm;振幅 63 nm 时,面形 RMS 误差约为 12.1 nm,即随着振幅的增加面形 RMS 误差

增大,基本呈线性变化。

## 4 结 论

通过算法仿真和实验分析了在 63 nm 固定振幅下,面形测量对振动敏感频率约为 12 Hz(CCD 采样频率一半)时引起的 RMS 误差约为 12 nm,低频

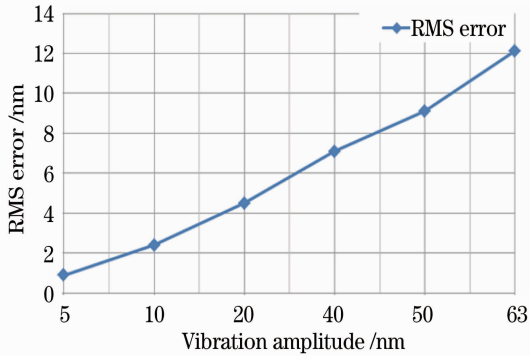


图 5 12 Hz 时,不同振幅对面形测量误差影响

Fig. 5 Surface figure error changed with 12 Hz vibration

时(24 Hz 以下)算法仿真结果和实验结果几乎相同。在固定敏感频率 12 Hz 下,面形测量 RMS 误差随振动振幅的增加而增大,且呈线性变化。在高精度的面形测量时,需要根据测量精度的需要,采取适当方法降低振动引起的面形测量误差。

### 参 考 文 献

- Miao Erlong, Gu Yongqiang, Zhang Jian *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034  
苗二龙, 谷勇强, 张 健 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yun *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202

- 魏豪明, 邢廷文, 李 云 等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041202
- D. Malacara. *Phase Shifting Interferometry*, in *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley, 2007. 589~621
- Miao Erlong, Gu Yongqiang. Temperature influence on Fizeau interferometer repeatability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1212008  
苗二龙, 谷勇强. 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1212008
- Wang Ping, Wang Rudong, Tian Wei *et al.*. Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **19**(9): 2100~2107  
王 平, 王汝冬, 田 伟 等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2100~2107
- Wang Ming, Hao Qun, Zhu Qiudong *et al.*. Anti-disturbance phase-shifting interferometry method time-and-frequency-domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 2984~2988  
王 明, 郝 群, 朱秋东 等. 时频域双重分析法抗干扰移相干涉术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 2984~2988
- X. Jia, T. W. Xing. Vibration errors in phase-shifting interferometer with absolute testing [C]. *SPIE*, 2011, **8321**: 283~292
- H. M. Wei, T. W. Xing. Vibration errors in phase-shifting interferometer [C]. *SPIE*, 2009, **7511**: 100~108
- H. J. Wang, J. F. Cao, A. L. Tian *et al.*. Vibration influence and error compensation of aspherical surface interferometer [C]. *SPIE*, 2008, **7155**: 1605~1612
- P. de Groot. Vibration in phase shifting interferometry [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 354~365
- L. L. Deck. Suppressing vibration errors in phase-shifting interferometry [C]. *SPIE*, 2007, **6704**: 402~408
- R. Doloca, R. Tutsch. Vibration induced phase-shift interferometer [C]. *SPIE*, 2006, **6292**: 304~314
- C. Farrell, M. Player. Phase step measurement and variable step algorithms in phase shifting interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**(10): 953~958
- P. de Groot, L. Deck. New algorithms and error analysis for sinusoidal phase shifting interferometry [C]. *SPIE*, 2008, **7063**: 402~408

栏目编辑: 何卓铭