

doi: 10.3788/gzxb20164507.0712001

波长调谐干涉测量的相移标定方法

田爱玲¹, 马迪¹, 王大森², 刘剑¹, 刘丙才¹, 朱学亮¹

(1 西安工业大学 陕西省薄膜与检测技术重点实验室, 西安 710021)

(2 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘要: 基于菲索干涉的变频相移技术, 提出一种分步相移标定方法. 生成 n 组 t 步相移干涉图, 每步相移为 $\pi/2$; 将每步的 n 组干涉图分别与初始干涉图做相乘和傅里叶变换运算, 在此基础上构建每步相移的误差函数; 通过求取误差函数极值点来实现对每步相移值的准确标定. 结果表明, 该标定方法的标定准确度优于传统标定方法, 且标定准确度提高了 2~3 个数量级. 该方法不仅避免了传统相移标定中存在的随机误差, 也彻底消除了累积误差.

关键词: 干涉测量; 变频相移; 相移标定; 菲索干涉; 傅里叶变换

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0712001-5

Phase-shifting Calibration Method of Wavelength-shifting Interference Measurement

TIAN Ai-ling¹, MA Di¹, WANG Da-sen², LIU Jian¹, LIU Bing-cai¹, ZHU Xue-liang¹

(1 Key Laboratory of Membrane and Testing Technology of Shaanxi Province, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Ningbo Branch Court of Academy of Chinese Weapon Science, Ningbo, Zhejiang 315103, China)

Abstract: Based on the wavelength tuning phase-shifting technology in Fizeau interferometer, a phase-shifting calibration method with step by step was presented. First, the n groups interferograms with t step were generated, the step is $\pi/2$. Then, the error function for each step was built through the origin interferogram multiplied by n group of each step separately and making Fourier transform. Finally, the precision calibration was realized by calculating the extreme point of error function curve. The experiment results show that, the calibrating precision is better than the traditional ones and the calibration accuracy is up to 2 or 3 orders to compare with the traditional method. This new method not only avoids the random error, but also eliminates the accumulated error completely.

Key words: Interferometry; Wavelength tuning phase-shifting; Phase-shifting calibration; Fizeau interferometry; Fourier transform

OCIS Codes: 120.5050; 120.5060; 050.5080; 070.2575; 070.2615

0 引言

相移干涉测量技术是光学表面面型检测的重要方法之一. 按照不同的相移实现方式, 可将相移干涉方法分为传统相移干涉和变频相移干涉两类. 传统相移干涉一般采用推动压电陶瓷、旋转偏振器件、移动衍射光

栅或倾斜平板等手段来实现相位调制^[1-3]; 变频相移干涉则是通过光源频率改变来实现相位调制, 其光源采用波长可调谐激光器^[4-7]. 由于该方法仅需在光源内部通过电压变化改变波长, 干涉系统不存在机械运动部件, 因此, 测量装置简单, 测量准确度高.

影响相移干涉测量准确度的关键因素之一是相移

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (No. 2015DFA10360)、兵器预研支撑基金 (No. 9140A18020114BQ03251) 和陕西省科技厅项目 (No. 2014KW05) 资助

第一作者: 田爱玲 (1964—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学检测. Email: tian21964@sohu.com

通讯作者: 马迪 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电测量与光学检测. Email: 382063149@qq.com

收稿日期: 2016-01-14; **录用日期:** 2016-04-12

<http://www.photon.ac.cn>

准确度. 在相移干涉中, 相移准确度直接影响相位测量准确度, 因此, 必须对干涉仪的相移值进行准确度标定. 标定得到相移标定曲线, 通过标定曲线就可以改变输入得到想要的任何相移量, 而且该相移量最接近理想相移量.

传统变频相移标定是通过相移干涉图上某单一采样点进行数据分析实现的^[8-9], 其存在不足为: 1) 采样过程仅对单个采样点处理, 因此存在随机误差; 2) 由于是采用傅里叶变换方法进行标定, 因此存在累积误差, 其标定准确度不高. 近几年也出现了一些新方法, 例如基于 Lissajous 图技术的相位标定^[10], 这种方法可用于任意步进的相移量求解, 不足之处是对干涉图的对比度要求较高, 而且要求被计算的两点相位差不能是 π 的整数倍. 文献^[11]提出了一种对相移量进行分步标定的方式, 但对每一步相移的标定是以前一步标定结果为基准, 因此存在累积误差. 本文提出了一种分步标定技术, 对每一步的标定是以初始点的相位为基准, 而且是对整幅干涉图进行分析, 因此不仅避免了随机误差, 而且彻底消除了标定累计误差.

1 基本原理

1.1 变频相移干涉原理

移相干涉测量技术是在两相干光束之间引入等间隔相位差, 当参考相位变化时, 干涉条纹位置也作相应移动, 用 CCD 相机采集干涉图光强信息, 经数字化后存入并按照一定的算法计算, 获得所测的元件面形等信息^[12-13]. 在变频相移干涉测量中, 将可调谐激光器作为移相器, 通过改变加载在激光器上的电压, 改变激光器输出波长, 波长变化引起相位变化, 从而实现变频移相. 若光源的中心波长为 λ_0 , $\Delta\lambda$ 为波长步进量, 测试波长变化为 $\lambda_t = \lambda_0 + t\Delta\lambda$, 其中, $t = 1, 2, 3, \dots$, 则干涉场中某点的光强值可以写为

$$I_t(x, y) = 1 + \gamma(x, y) \cos \left[\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_t} \right] \quad (1)$$

式中, $\gamma(x, y)$ 为调制强度, $h(x, y)$ 为干涉腔长即参考面与测试表面之间的距离. 由式(1)可知, 干涉图的相位变化不仅与波长有关, 而且干涉腔长 h 对其也有影响. 激光器出厂时给定的输出波长与电压呈线性变化, 但在实际工程应用中, 由于外界环境的影响, 波长与电压可能呈非线性变化, 为此必须对相移量进行标定.

1.2 相位标定基本原理

为了便于说明本文的标定原理, 将式(1)近似为

$$I_t(x, y) \approx 1 + \gamma(x, y) \cos \left[\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} - \frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} t\Delta\lambda \right] \quad (2)$$

本文针对重复四步相移进行标定^[14-15], 令 $-\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} t\Delta\lambda = t\pi/2$, 则式(2)可以简化为

$$I_t(x, y) = 1 + \gamma(x, y) \cos \left[\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} + t \frac{\pi}{2} \right] \quad (3)$$

在进行标定时, 首先定义中心波长 λ_0 对应的干涉图为初始干涉图, 其表达式为

$$I_0 = 1 + \gamma(x, y) \cos \left[\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} \right] \quad (4)$$

随后以初始相位为基准, 生成 t 步 n 组相移干涉图, $t = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, 3, \dots$ 假设第 t 步第 n 组相移的误差值为 ϵ_n , 实际相移值为 $(\pi t/2 + \epsilon_n)$, 则第 t 步第 n 组的相移干涉图可以表示为

$$I_n(x, y) = 1 + \gamma(x, y) \cos \left[\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} + t \frac{\pi}{2} + \epsilon_n \right] \quad (5)$$

在对第 t 步相移进行相位标定时, 首先将第 t 步的 n 个相移干涉图与原始干涉图(即测试波长为 λ_0 时的干涉图)分别去背景后相乘, 则

$$I_0 I_n = \frac{\gamma^2}{2} \cos \left(4\omega_0 h(x, y) + \frac{\pi}{2} t + \epsilon_n \right) + \frac{\gamma^2}{2} \cos \left(\frac{\pi}{2} t + \epsilon_n \right) \quad (6)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为其空间角频率, 对式(6)进行傅里叶变换, 得到

$$\text{FFT}[I_0 I_n] = A(\omega_n) + C(\omega_n - 4\omega_0) + C^*(\omega_n + 4\omega_0) \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} C_n(\omega - 4\omega_0) &= \frac{\pi\gamma^2}{2} \exp \left[i \left(t \frac{\pi}{2} + \epsilon_n \right) \right] \delta(\omega - 4\omega_0) \\ C^*(\omega_n + 4\omega_0) &= \frac{\pi\gamma^2}{2} \exp \left[-i \left(t \frac{\pi}{2} + \epsilon_n \right) \right] \cdot \\ &\delta(\omega_n + 4\omega_0) \\ A(\omega_n) &= \frac{\pi\gamma^2}{2} \cos \left(t \frac{\pi}{2} + \epsilon_n \right) \delta(\omega_n) \end{aligned}$$

为了便于文字说明, 用一维傅里叶变换进行计算. 由式(7)可知, 经傅里叶变换后的傅里叶频谱中只包含零频和基频两种频谱成分, 且 $C(\omega_n - 4\omega_0)$ 、 $C^*(\omega_n + 4\omega_0)$ 、 $A(\omega_n)$ 均受到相移误差 ϵ_n 的调制.

为简单起见, 仅考虑式(7)中相移误差对零频成分的影响, 通过选择合适的低通滤波器, 对上述频谱进行滤波处理, 保留零频成分并进行分析. 定义 $E(\epsilon_n)$ 为标定误差函数, 且 $\epsilon_n \in (0, \pi/2)$, 其值等于第 t 步的 n 幅零频的强度之和, 表达式为

$$E(\epsilon_n) = \sum_n |A[\omega_n]| = \sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \cos \left(t \frac{\pi}{2} + \epsilon_n \right) \delta(\omega_n) \right| \quad (8)$$

对式(8)分析可知

- 1) 当 $\epsilon_n = 0$ 时, $E(\epsilon_n) = \sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \cos \left(\frac{\pi}{2} t \right) \right|$
- ①若 t 为奇数, $E(\epsilon_n) = 0$;
- ②若 t 为偶数, $E(\epsilon_n) = \sum_n |\pi\gamma^2/2|$;

2) 当 $\epsilon_m \neq 0$ 时, $E(\epsilon_m) = \sum_n |\pi\gamma^2/2| \cdot$

$$\left| \cos\left(\frac{\pi}{2}t + \epsilon_m\right) \right|$$

①若 t 为奇数, 则

$$E(\epsilon_m) = \sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \right| \cdot \left| -\sin\left(t \frac{\pi}{2}\right) \sin \epsilon_m \right| =$$

$$\sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \right| \cdot |\sin \epsilon_m|, \text{ 存在极大值};$$

②若 t 为偶数, 则

$$E(\epsilon_m) = \sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \right| \cdot \left| \cos\left(t \frac{\pi}{2}\right) \cos \epsilon_m \right| =$$

$$\sum_n \left| \frac{\pi\gamma^2}{2} \right| \cdot |\cos \epsilon_m|, \text{ 存在极小值}.$$

分析可知, 在构建的第 t 步误差函数 $E(\epsilon_m)$ 中必定有一个极值. 设该极值点对应第 t 步相移的理想相移值为 φ_t . 则当腔长一定时, 其相移量 φ_t 与变频波长 λ , 存在关系为

$$\varphi_t = -\frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0^2} (\lambda_t - \lambda_0) \quad (9)$$

通过式(9), 即可实现相位与变频波长的精确标定. 而波长变化是由电压变化引起的, 由此可得出 $U - \varphi_t$ 的精确标定. 标定的算法流程如图 1.

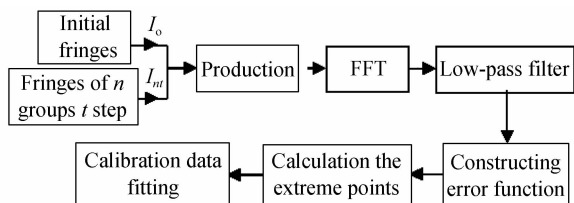
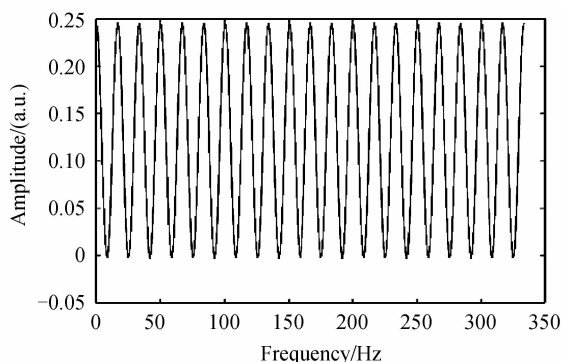
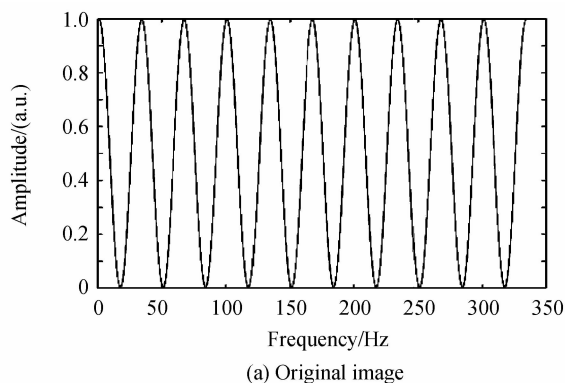


图 1 算法流程图
Fig. 1 Simulation flow chart

2 仿真实验与分析

以仿真实验中采集的一维相移干涉图为例, 如图 2. 图 2(a) 波长为 λ_0 时的初始干涉条纹图, 图 2(b) 为初



仿真条纹图 2
Fig. 2 Interference fringes

始干涉图与第 t 步第 n 个有相移误差 ϵ_m 的相移干涉图的去背景乘积.

对图 2(b) 进行傅里叶变换, 当相移步数 t 为奇数且相移误差不同时, 获得的频谱如图 3. 由图 3 可知, 相移误差 ϵ_m 越小, 频谱中零频越小. 当频谱中零频最小时, 误差函数 $E(\epsilon_m)$ 必是一个极小值点, 此时该点对应第 t 步的最佳相移量, 如图 4 为第 t 步的误差函数 $E(\epsilon_m)$ 曲线.

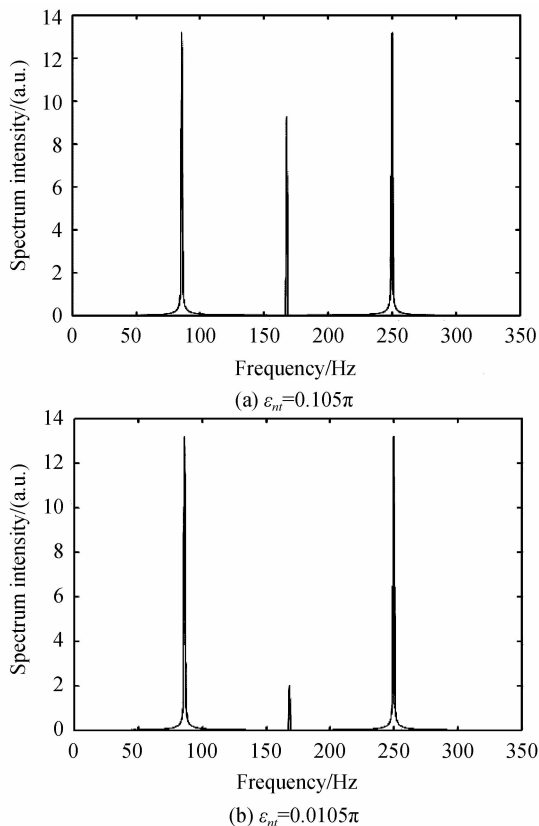


图 3 t 为奇数时傅里叶频谱
Fig. 3 Fourier spectrum distribution

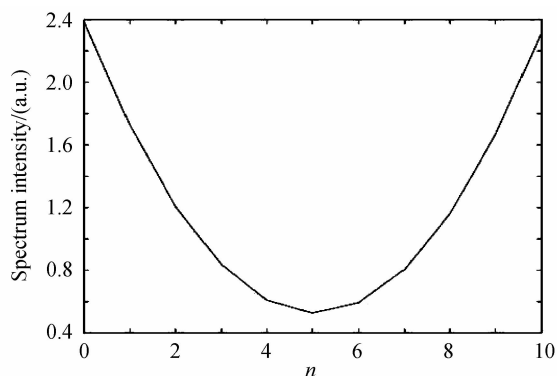
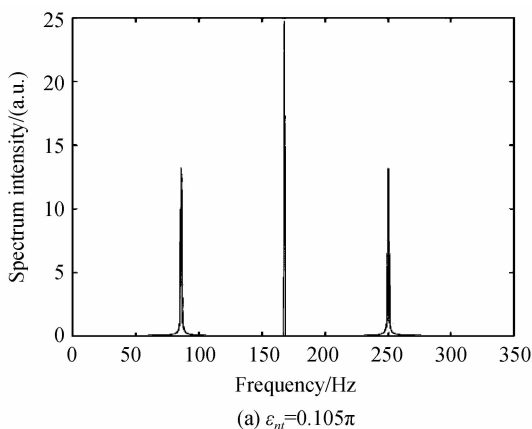


图4 第 t 步的相移误差函数曲线
Fig. 4 The error curve of phase-shift

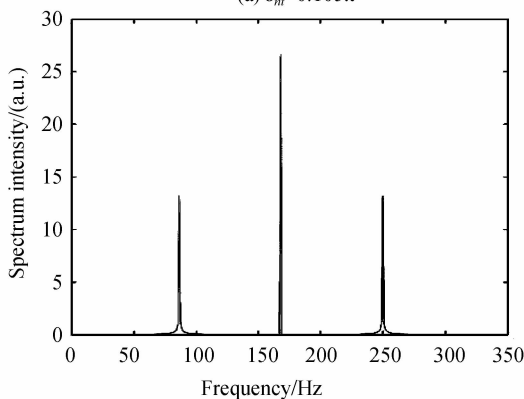
图5为 t 是偶数时,不同相移误差时的干涉条纹频谱图.由图5可知,相移误差越小时,频谱中零频越大.当频谱中零频最大时,对应的误差函数 $E(\epsilon_n)$ 必是一个极大值点,此点对应的就是标定需要的第 t 步的最佳相移值,如图6.

通过上述分析,通过构建第 t 步相移的误差函数,可以获取 t 个最佳的相移值.对这些相移值拟合,可以得到相移-波长标定曲线,完成相移标定.

为了比较本文方法与传统方法、参考文献[11]中方法的标定准确度,这里给出了表1的对比结果.



(a) $\epsilon_n=0.105\pi$



(b) $\epsilon_n=0.0105\pi$

图5 t 为偶数时傅里叶频谱
Fig. 5 Fourier spectrum distribution

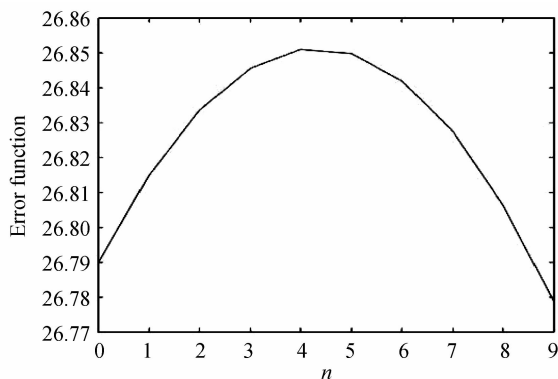


图6 相移误差函数曲线
Fig. 6 The error curve of phase-shift

表1 标定方法的对比

Step	1	2	3
Idea phase-shift/ (πrad)	0.5	1	1.5
The traditional method/ (πrad)	0.498196	0.996392	1.494588
The method of Ref. [11]/ (πrad)	0.500203	0.999671	1.500708
The method of this paper/ (πrad)	0.500203	1.000125	1.500101

表1中只给出了四步相移的标定数据,其中第一行为理想的相移值,第二行是用传统的标定方法获得的标定数据,第三行是用参考文献[11]获得的标定数据,最后一行是用本文方法得到的标定数据.从标定数据看出,参考文献[11]中的方法和本文方法的标定数据与理想的相移值差距都不大,但本文方法更好.图7为重复四步相移的实验验证.从实验结果明显可以看出,随着步数的增加,参考文献[11]的方法与标准值的偏差逐步增大,存在累积误差.而本文方法的拟合直线与标准直线基本重合,标定效果最佳.

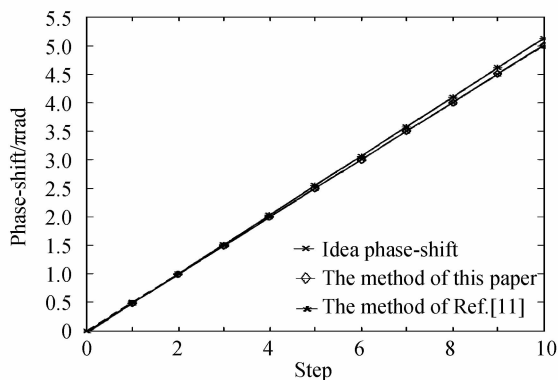


图7 相移量标定曲线对比图
Fig. 7 The comparison of 3 results

3 结论

本文针对变频相移干涉技术,提出了通过构建相

移误差函数的分步相位标定方法,其特点是每一步相移的标定都是基于相同的初始相位,而且相移误差函数的极值位置对应最佳的相移值.由于该方法是对相移干涉图的所有点进行分析处理,所以避免了随机误差对标定的影响;同时,由于每一步相移的标定都是基于同一个初始相位进行计算,所以也彻底消除了累积误差.仿真实验结果表明,该标定方法具有很高的标定准确度,相位标定准确度可达 $10^{-4} \pi \text{rad}$.

参考文献

- [1] XU Jian-cheng. Information-theoretic analysis of phase-measurement Interferometry[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009.
徐建程. 相移干涉测量的信息理论分析[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
- [2] ZHU Ri-hong, CHEN Lei, WANG Qing, et al. Phase-shift interferometry and its application[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2): 85-88.
朱日宏, 陈磊, 王青, 等. 移相干涉测量术及其应用. *应用光学*, 2006, **27**(2): 85-88.
- [3] WU Xu-hua. Study on key techniques of $\Phi 300\text{mm}$ phase-shifting Interferometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
吴旭华. $\Phi 300$ 移相干涉仪的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] TAN Zhong-qi. The research of wavelength-tuned phase-shifting interferometry [D]. Hunan: Graduate school of National University of Defense Technology, 2003.
谭中奇. 波长调谐相移干涉测量技术的研究[D]. 湖南: 国防科技大学研究生院, 2003.
- [5] HAO Jing-jing. Reasearch of wavelength phase-shifting interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
郝晶晶. 波长移相干涉测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [6] YANG Mu. The research on the wavelength-tuned phase-shifting interferometry with long cavity[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
杨牧. 大腔长波长调谐干涉测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [7] NIKOLAY V. Alignment of phase-shifting interferograms in the two-beam point diffraction interferometer [C]. SPIE, 2012, **8550**: 85500R.
- [8] YU Jie-ying, ZHANG Ben-hao, JIAO Yun-fang. Algorithm of phase-shifting by wavelength tuning based on temporal DFT [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(4): 310-313.
于瀛杰, 张本好, 焦云芳. 基于时域傅里叶变换的波长移相算法[J]. *计量学报*, 2004, **25**(4): 310-313.
- [9] HUANG Wen-yu, GONG Jian-wei, LU Ji-lian. Phase-measuring profilometry based on phase-shift measurement using FFT[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(6): 715-719.
黄文字, 龚建伟, 陆际联. 基于傅里叶变换移相测量的相位测量轮廓术[J]. *北京理工大学学报*, 2000, **20**(6): 715-719.
- [10] GUO Ren-hui, LI Jian-xin, ZHU Ri-hong, et al. Wavelength-tuned phase-shifting calibration based on the Lissajous figures technique[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(2): 200-204.
郭仁惠, 李建欣, 朱日宏, 等. 基于 Lissajous 图技术的波长移相标定方法[J]. *光学技术*, 2010, **36**(2): 200-204.
- [11] LIU Jian. Research on surface testing algorithm based on wavelength-shifting interferometry [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.
刘剑. 基于变频相移干涉的面形检测算法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [12] LI Xi-shan, LIANG Jing-fang, WANG De-lin, et al. $\Phi 60\text{mm}$ laser plane interferometer[J]. *Optical Instruments*, 2000, **22**(2): 28-33.
李锡善, 梁景芳, 王德林, 等. $\Phi 360\text{mm}$ 激光斐索干涉仪[J]. *光学仪器*, 2000, **22**(2): 28-33.
- [13] LI Wen-zhe. Phase calibration method of wavelength-shifting interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
李文喆. 波长移相干涉的标定方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [14] YUAN Qun, GAO Zhi-shan, LI Jian-xin, et al. The multiple beam interference phase extraction algorithm based on the average $\pi/4$ phase shift[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112004.
袁群, 高志山, 李建欣, 等. 基于 $\pi/4$ 相移平均的多光束干涉相位标定提取算法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 111204.
- [15] GAO Fen, JIANG Zhuang-de, LI Bing, et al. Multi-step phase-shifting algorithm based on extended averaging technique and its error suppression characteristics comparison [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0426001.
高芬, 蒋庄德, 李兵, 等. 基于扩展平均的多步相移算法及误差抑制特性比较[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0426001.