

# 一种机械扫描式精密相移测长方法

罗志勇 顾英姿 陈朝晖

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要** 以相移干涉测长为应用背景,提出了一种基于“机械扫描”的相移测长方法。利用超高弹性石英材料研制出了干涉测长所需的单体 3 路相移装置,并利用该相移装置建成了相移测长装置,成功地将位移传感器的量值在线溯源到光学频率标准,从而实现了 3 路相移的准确测量。介绍了一种引入步长控制误差的“新五幅相移”实现相位解算方法,算法准确度达到 0.01%。对不确定度的定量分析结果表明,基于该机械扫描式相移技术构建的绝对长度测量系统准确度可达 0.5 nm。

**关键词** 测量;相移干涉法;长度测量方法;光学设计;压电传感器;标准具

**中图分类号** TH774.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1112004

## A Precision Length Measurement Route by Phase-Shifting Interferometry with Mechanical Scanning

Luo Zhiyong Gu Yingzi Chen Zhaohui

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract** Based on the application background of length measurement, a novel phase-shifting interferometry is presented. A precise phase-shifting device for length measurement by pressure variation is developed. This device based on single-quartz component is made to carry out the generation of triple phase-shifting, and an essential technique to make online calibration of the capacitor sensor is also realized. The original phase is solved by the developed five-interferogram algorithm with the uncertainty of 0.01% phase periods. The experimental results show that the phase-shifting obtained by this device is up to 1  $\mu\text{m}$  and the variation for length measurement is 0.5 nm.

**Key words** measurement; phase-shifting interferometry; length measurement method; optical design; piezoelectric transducer; etalon

**OCIS codes** 120.3180; 140.3425; 080.3620; 230.4040

### 1 引言

相移干涉技术即通过相位移动提取干涉相位信息<sup>[1,2]</sup>,是几何测量中最精确的方法。相移作为定量获取干涉相位的手段已被广泛应用于精密形貌和长度测量<sup>[3~11]</sup>。由于形貌分析是相对位置测量,提取的干涉图像依赖于相同的相位移动,因此具有极高的分辨率,可以采用机械移动或激光变频方法实现,并不需要严格的校准,如商业上已十分成熟的各种轮廓仪、表面粗糙度仪、单层或多层形貌分析仪等<sup>[12,13]</sup>。

相移干涉技术的另一项应用是进行长度绝对测量。图 1 为相移测长基本原理,图中核心为标准具,

中心为待测物体。通过标准具标准板间相对移动测量标准板间距  $L$ ;通过待测物体表面与一侧标准板相对移动测量  $L_1$ 、 $L_2$ ,则待测物体长度为  $L - (L_1 + L_2)$ 。必须说明的是用相移干涉法测量  $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  包括测量干涉级次整数部分和小数部分。整数部分测量常用“小数重合法”,属于常规技术,限于文章篇幅在此不做介绍。本文主要介绍干涉级次小数的精确测量。

与形貌测量不同,长度绝对测量要求准确的相移步长并进行准确的相位解算。因此,相移准确测量或相移测量溯源是至关重要的。相移的实现包括两种最常用方法:基于压电陶瓷传感器(PZT)或磁力驱动的精密切移器的相移方法和基于激光频率

收稿日期: 2012-04-11; 收到修改稿日期: 2012-06-08

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAF06B06)资助课题。

作者简介: 罗志勇(1964—),男,研究员,主要从事精密干涉测量方面的研究。E-mail: luozhy@nim.ac.cn

扫描的变频相移方法。相移器存在难以克服的稳定性和重复性较差的特点,难以进行纳米或亚纳米级校准。德国科学家发明了一种基于3组PZT推动的相移器,用于几何长度测量,可实现几纳米到数十纳米的测量准确度。Fujii等<sup>[14]</sup>提出“机械移动”与Saunders<sup>[15]</sup>的干涉环直径测量即“Haidinger”法相结合测量单晶硅球直径,准确度可达8.6 nm。此外德国技术物理研究院(PTB)在2000年前都采用介质折射率调节方法控制激光波长,从而实现相移,并可实现纳米级的长度测量准确度。随着科学技术的发展,商业激光器已可实现150 GHz连续稳定的变频,用于形貌测量是十分理想的。但是长度绝对测量要求准确的相移测量,即必须实现对频率变化量到频率标准的量值溯源。由于频率调制技术的限制,宽频段频率溯源有较大的技术难度。PTB和日本计量院(NMIJ)研制的偏频锁定系统可将激光频率锁定到光学频率标准——碘稳频激光器,实现27 GHz频率调制宽度<sup>[11,14]</sup>,这对于 $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 的测量,相当于实现了1个周期的相移测量。激光变频法是目前进行长度绝对测量的主要方法。但是由于频率调制宽度不足,限制了相位解算准确度;另外该方法必须进行 $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 的初测(预先测量初始距离)才能进行准确步长定位,难以进入常规应用。

本文研制了一种基于机械扫描原理以PZT为动力源的单体相移装置,实现了大范围、可溯源的相位移动,不仅测长准确度高,且不需要初测 $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ ,具有良好的推广应用前景。

## 2 机械扫描相移的实现

如图1所示的相移测长必须同时测量 $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ ,因此必须实现并准确测量3路相移。为此设计了包含腔长可变式法-珀标准具和微位移平台于一体的单体3路石英相移装置。标准具如图2所示,两标准板之间距离即标准具腔长 $L$ ,随标准具两侧压力(由安装在分离承力支座上对应于图2中“P”

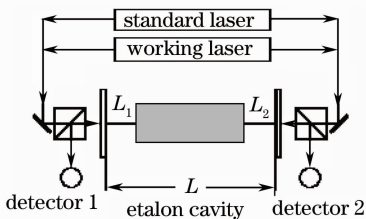


图1 相移测长方法原理

Fig. 1 Principle of length measurement by phase-shifting interferometry

点的PZT产生)而伸长,产生1路相移以测量腔长 $L$ ;标准具与其下层平台通过前端D点一体成型。当置于D点前方的PZT推动通过3组铰链与底座连接的平台时,标准具相对待测样品实现了位移量完全相同、方向相反的2路相移,分别用于测量 $L_1$ 、 $L_2$ 。

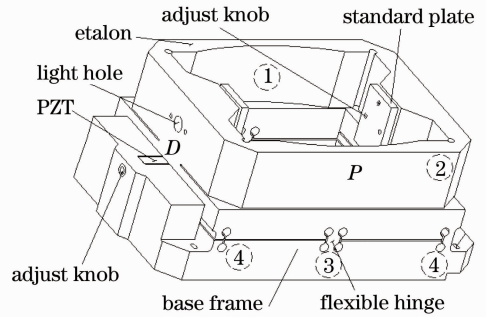


图2 单体相移装置整体示意图

Fig. 2 Schematic of single phase-shifting device

单体3路相移装置最重要的技术特征之一是如果位于P点的PZT压力消失,则标准具腔长可准确复原,这是由于石英的机械品质因数高达 $2.4 \times 10^{-6}$ 。计算表明,在去掉压力后腔长 $L$ 几乎完全复原(误差小于0.01 nm),这是本方案的技术基础。图3为石英标准具的零点恢复特性的实验结果。实验中增加P点压力使右侧标准板移动 $1 \mu\text{m}$ 以上,等待10 min再去掉外力,重复12次并纪录腔长零点恢复结果。

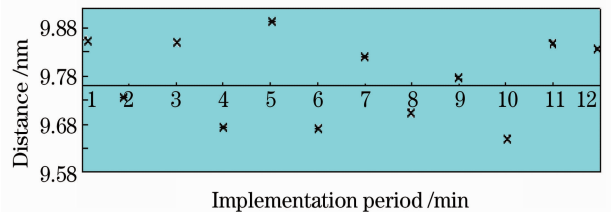


图3 石英标准具的零点恢复特性

Fig. 3 Repeatability of cavity original distance

1) 由图3可知,显示腔长 $L$ 的零点标准偏差优于0.1 nm(极差为0.2 nm),是一个必须考虑并可以接受的误差分量;对于 $L_1$ 、 $L_2$ 的测量,由于二者具有如图4所示严格的“此消彼涨”关系,因此无论平台恢复特性如何, $L_1$ 与 $L_2$ 之和始终恒定不变。

2)  $L_1 + L_2$  恒定不变是判断干涉系统状态、确保校准准确度的天然判据,因为任何干涉光路对准误差、光学系统膨胀和蠕变变形等均会导致 $L_1 + L_2$ 的变化,这对确保系统的测量可靠性至关重要,这一特征为基于“机械扫描”的相移干涉测长方法所独有。

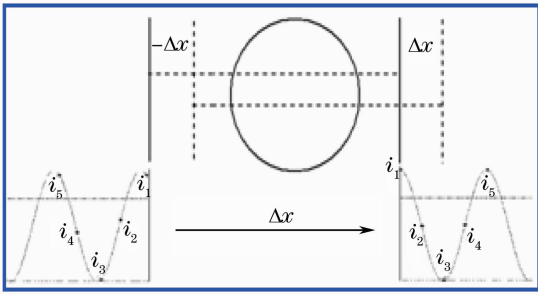


图 4  $L_1$ 、 $L_2$ “此消彼涨”示意图

Fig. 4 Schematic of compensation between  $L_1$  and  $L_2$

3) 由于 3 路相移在单体装置上实现,完全消除了相对移动、不均匀蠕变、膨胀和受力变形等因素导致的相移测量误差,因此利用置于基座的一只精密位移传感器测量在标准板的位移即可实现 3 路相移的测量。

4) 标准板微调技术。相位误差依赖于干涉初

相位,对标准板进行微调可避开初相位等于或接近  $\pi/2$  或  $3\pi/2$  等值的“坏点”<sup>[8]</sup>,从而提高相位解算准确度;另外,微调解决了两标准板的高平行度 ( $10^{-6}$  rad) 难题,大大降低了相移装置的加工难度。

### 3 相移测量

相移的精确测量是相移测长技术中的难点和关键。传统的相移器几乎无法实现高准确度的相移测量。激光变频技术中相移的测量是通过激光频率溯源来实现的。由于频率调制范围不足以致相移量受到限制,从而影响相位解算准确度。利用上述特殊设计的相移装置实现了对相移的高准确度测量。

#### 3.1 系统硬件

基于上述相移装置的测长系统框图如图 5 所示。将该装置置于内外两级精密恒温的真空腔内,位

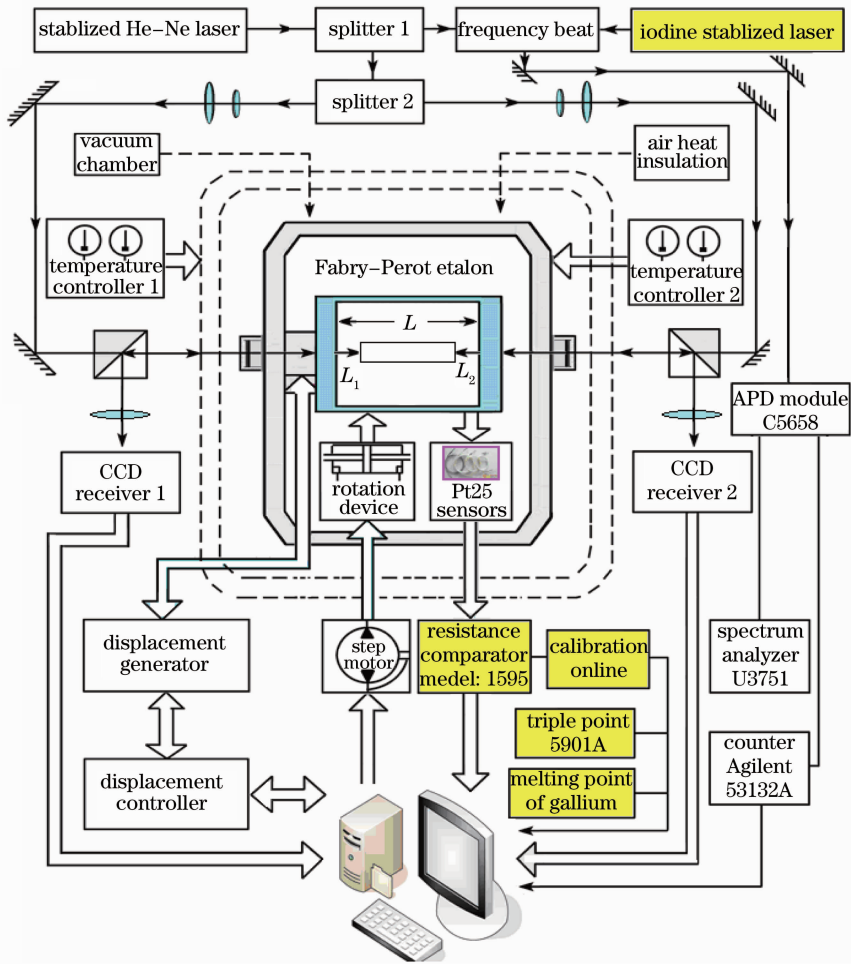


图 5 测长系统框图

Fig. 5 Diagram of length measurement system

于标准具正中的待测样品经真空密封连接至腔体外的步进电机以控制待测物体的测量位置。光学干涉系统工作过程包括:从稳频氦氛激光器出射的激光经与碘稳频激光器拍频后实现将激光频率溯源至光频基准,通过频率计数器等进行频率校准。

激光经光学分光镜分为两束,分别入射到真空腔两侧的通光窗口,再经标准具及同侧样件表面反射形成干涉图像,图像信号由 CCD 采集,获得标准具腔长、待测样件端面与标准板间隙的干涉级次,求得待测样件长度。样件温度测量对长度测量准确度至关重要,因此需要对温度传感器进行校准,其中,利用水三相点基准和镓熔点插值进行温度传感器校准是传统的方法。利用 4 只标准铂电阻 Pt25 测量真空腔温度场分布,当腔内温度处于平衡状态时,4 只温度计测量结果的平均值即为待测样件的温度。

相移测长系统所用位移传感器(型号为 PI-D-015,德国 PI 公司生产)的分辨率为 0.01 nm,线性度为 0.001%,量程大于 5 μm;精密 PZT(型号为 P-888)量程为 10 μm,最大推力为 300 N,对该相移装置可实

现 3 路相移均大于 1 μm;CCD 传感器灰度等级应大于 12 bit,响应速度大于 30 frame/s,如 NUIQ1830、NUIQ900 相机等。

### 3.2 相位解算

进行相移移动的目的是为了求解初始干涉图像的相位,如图 6 所示。

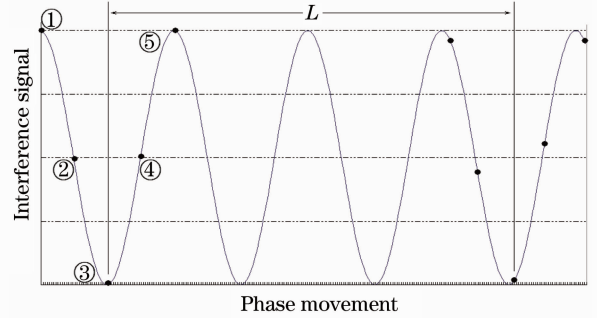


图 6 相位解算与传感器校准

Fig. 6 Phase unwrapping and sensor calibration

采用“新五幅算法”首先实现对相点“③”的精确解算。“新五幅算法”是导出的相位解算方法<sup>[16]</sup>,利用与待求解相点相邻点的干涉信息求解相位,即

$$\tan \varphi = \frac{\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} + \frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1}(\cos k_1 + \cos k_4) + \sin k_2 - \sin k_3}{\cos k_2 + \cos k_3 + \frac{I_2 - I_1}{2I_3 - I_5 - I_1}(\sin k_4 - \sin k_1)}, \quad (1)$$

式中  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  分别为 CCD 传感器测量的一个周期内相位为  $\phi - 2\varepsilon - k_1, \phi - \varepsilon - k_2, \phi, \phi + \varepsilon + k_3, \phi + 2\varepsilon + k_4$  的光强,分别对应图 6 中相点“①”,“②”,“③”,“④”,“⑤”。其中  $\varepsilon = \pi/2$ <sup>[13]</sup>,  $k_1, k_2$  分别为相点“①”,“②”相对于相点“③”的控制偏差,  $k_3, k_4$  分别为相点“④”,“⑤”相对于相点“③”的控制偏差。由于引入了控制偏差,“新五幅算法”将传统算法中技术上难以实现的准确步长控制转换成相移测量,不仅提高了测量准确度,而且大幅降低了算法应用难度。理论和实验结果表明,具有相点对称性的“新五幅算法”一个重要的特性是极大地提高了相位解算准确度,例如当位移传感器的测量误差为 5 nm 时,(1)式的相位求解误差仍优于 0.02% 相位周期,对 633 nm 波长而言相当于位置误差为 0.07 nm。

### 3.3 位移测量溯源

对位移传感器的校准直接决定相移的准确度。利用“新五幅算法”对相点“③”高准确度的特点,可确定相移过程中任意 2 个第“③”点间的相位差,如图 6 所示。再根据被校准激光波长准确计算 2 点之

间实际位移,从而将位移传感器的准确度直接溯源到光频基准。校准过程包括:

- 1) 通过置于 P 点的 PZT 以每步约 2 nm 步长连续改变  $L_1, L_2$  的长度至全程,以 CCD 同步记录对应的干涉图像;
  - 2) 在全量程范围内,对第一个和最后一个相位周期分别以“新五幅算法”确定相应周期内第 3 步相移的准确相位;
  - 3) 通过 2 个第 3 步相点相位差及激光波长求得准确位移,与位移传感器示值比对进行量值校准。
- 校准位移传感器的目的是要通过相点“③”准确求得初始位置“①”的相位。

需要注意的是,对于平台相移的测量,当起推动作用的 PZT 产生推力时,将直接传递至底座。为了排除底座受力所致微变形对位移传感器的影响,可用以前述方法校准的位移传感器测量铰链平台位移,再与“新五幅算法”结果比较,如误差小于 0.2 nm 则底座微变形可忽略,否则应在设计加工时增加底座厚度以减小或消除推力对位移传感器的影响。

## 4 误差来源及其评估

高精度测长系统必须置于精密控温的真空腔内以消除空气折射率对激光波长的影响。该系统最主要的误差来源于对待测物体温度的测量误差、多次

测量分散性、光强信号测量误差、干涉光路对准误差、相位解算算法和激光波长误差等。以本文的硬件系统进行定量误差评估,则各分项对长度测量最优不确定度分量评估如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 长度测量误差分量

Table 1 Uncertainty budget for length measurement

No.	Error sources	Sub-standard uncertainty	Uncertainty in length /nm
1	Standard deviation	less than 0.1%	0.32
2	Intensity error	0.2%	0.1
3	Alignment of light beam	$2 \times 10^{-5}$ rad	0.14
4	Developed algorithm	0.01%	0.03
5	Laser wavelength	$5 \times 10^{-10}$	0.05
6	Temperature	1.5 mK	0.4
Compound uncertainty			0.5

表 1 中误差分量略去了待测样件体胀系数测量误差导致的不确定度分量,对于体胀系数较低的样件如单晶硅、石英等的测量不会增加误差分量。由表 1 可知,机械扫描式精密相移测长方法可实现 0.5 nm 的测量准确度,比常规精密测长方法好 1~2 个数量级。

## 5 结 论

相移的实现和准确的测量是相移干涉长度绝对测量的核心技术。相比于国际上常用的“激光变频”相移方法,机械扫描式相移方法实现了更大的相移范围,实现了位移测量到光学频率标准的在线、实时校准。该方法成功突破了“激光变频”法进行相移时频率调制宽度不足的技术局限,实现了 0.5 nm 的测长准确度。此外由于该方法不需要初测  $L_1, L_2$  就能准确地控制相移,在精密长度测量中具有重要的推广价值。相移发生装置的研制成功为精密几何长度特别是国际热点研究——以阿伏伽德罗常数研究为应用背景的单晶硅球直径的精密测量——提供了一种具有技术潜力的新方法。

### 参 考 文 献

- 1 G. M. Lai, T. Yatagai. Generalized phase-shifting interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(5): 822~827
- 2 Y. Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1): 51~54
- 3 Liu Ke, Li Yanqiu. A new calibration method of systematic errors in phase shifting point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2923~2927  
刘 克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2923~2927
- 4 Liu Ke, Li Yanqiu. High precision alignment of phase shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1845~1849  
刘 克, 李艳秋. 相移点衍射干涉仪的高精度对准[J]. *中国激*

- 光, 2010, **37**(7): 1845~1849
- 5 Xu Wei, Chen Xiaobo, Xi Juntong. A method of phase error compensation for structural light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312008  
许 伟, 陈晓波, 习俊通. 结构光测量相位波动误差补偿方法研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312008
- 6 Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Zhu Baohui *et al.*. Polarization measurement using polarization interference imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7565~7570  
简小华, 张淳民, 祝宝辉等. 利用偏振干涉成像光谱仪进行偏振探测的新方法[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12): 7565~7570
- 7 Meng Xiangfeng, Cai Lüzhong, Wang Yurong *et al.*. Optimized two-step phase-shifting algorithm applied to image encryption[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **58**(3): 1668~1674  
孟祥锋, 蔡履中, 王玉荣等. 优化的两步相移算法在图像加密中的应用研究[J]. *物理学报*, 2005, **58**(3): 1668~1674
- 8 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Phase-shift algorithm research based on multiple-beam interference principle [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3051~3057  
罗志勇, 杨丽峰, 陈允昌. 基于多光束干涉的相移算法研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3051~3057
- 9 Zhang Jitao, Li Yan, Luo Zhiyong. A traceable calibration method for spectroscopic ellipsometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 186~191  
张继涛, 李 岩, 罗志勇. 一种可溯源的光谱椭圆仪标定方法 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(1): 186~191
- 10 N. Kuramoto, K. Fujii. Volume determination of a silicon sphere using an improved interferometer optical frequency tuning [J]. *IEEE Trans. Instrumentation & Measurement*, 2005, **54**(2): 868~871
- 11 R. A. Nicolaus. Absolute volume determination of a silicon sphere with the spherical interferometer of PTB[J]. *Metrologia*, 2005, **42**(1): 25~31
- 12 Peter de Groot. Diffractive grazing-incidence interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(16): 2658~2663
- 13 Peter de Groot. Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(35): 6788~6796
- 14 K. Fujii, M. Tanaka, Y. Nezu *et al.*. Present state of the solid and liquid density standards[J]. *Metrologia*, 2004, **41**(2): 1~15
- 15 J. B. Saunders. Ball and cylinder interferometer[J]. *J. Res. Nat. Bur. Stand. Sec. C: Engng. Inst.*, 1972, **76C**(1-2): 11
- 16 Z. Luo, L. Yang, Y. Gu *et al.*. A study on solid density primary standard[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(21): 2881~2886