

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0249-04

# 应用移相干涉术测量量块长度和长度变动量

葛爱明<sup>1)</sup> 陈进榜<sup>1)</sup> 陈 磊<sup>1)</sup> 朱日宏<sup>1)</sup> 严家骅<sup>2)</sup> 牛立新<sup>2)</sup> 朱振宇<sup>2)</sup> 任冬梅<sup>2)</sup>

(1), 南京理工大学电光学院, 南京 210094  
(2), 国防科工委第一计量测试研究中心, 北京 100095

摘要: 研究了应用移相干涉术测量新的一等量块的方法。对于干涉图像进行多幅图的采样, 由移相法计算量块测量面和其研合的辅助平晶表面的波面面形, 着重研究了在量块干涉图中有阶跃不连续的波面复原运算的原理与技术, 得到一幅表征它们表面的离散波差值, 并给出量块工作面长度和长度变动量的测量结果。

关键词: 量块; 长度变动量; 移相干涉术

中图分类号: TB921 文献标识码: A

## 1 引 言

干涉技术的最早应用是在长度测量上。量块是长度计量领域中使用最广泛和准确度较高的实物标准量具之一。随着科技的不断发展, 测量不确定度优于  $(0.02 + 0.2L) \mu\text{m}$  的新的 1 等量块检测技术越来越要求对非整数级条纹作精确测量。被测量块的一个测量面研合在一个辅助平晶的测量面上, 以干涉条纹小数部分重合方式, 用光谱辐射线的波长直接测量被测量块长度, 是基于光波干涉理论。被测量块的长度为

$$L = (K + \epsilon) \lambda / 2, \quad (1)$$

等效于用光的半波长(即一个光波干涉条纹)为间隔的刻度尺, 测量量块的长度。数出干涉条纹间隔的整数部分  $K$  和干涉条纹的小数部分  $\epsilon$ , 只要所用光源光谱辐射线的波长  $\lambda$  已知, 即可得到被测量块的长度  $L$ 。

用传统的干涉测量方法<sup>[1]</sup>, 只能对量块指定点长度进行测量, 不能反映被测量块测量面的平面度, 而且目视判读干涉条纹, 测量效率低。为了探索和寻求更为高效、更为完善的测量方法来解决高精度量块长度的测量问题, 给出整个量块测量面上任意一点到与该量块此面相对的另一测量面之间的垂直距离, 即量块(在测量面上任意点)的长度, 并给出量块测量面的平面度及量块长度变动量, 本文在现有干涉测量方法的基础上, 利用高精度的移相干涉术的特点, 对此进行了研究。

## 2 测量原理

### 2.1 移相干涉术的测量原理

图 1 是移相式测量量块的激光干涉仪原理框图。它是一台泰曼型干涉仪。仪器采用频率稳定的 He-Ne 激光器(波长为 633 nm)作为干涉仪的光源, 提高了干涉场的照度和相干性。用单模光学纤维将激光束经消散斑器后引入干涉仪的准直系统, 光纤的芯径是  $4 \mu\text{m}$ , 外层直径是  $50 \mu\text{m}$ , 它起到空间滤波器的作用, 有利于消除激光散斑。由准直系统扩束成一束直径为 50 mm 的平行光。这束平行光经过分光镜分成两束, 其中一束到达参考反射镜, 再返回到分光镜, 另一束平行光经量块表面和标准的辅助平面反射后, 也反射回到分光镜, 两束平行光在分光镜处相干涉, 产生光强按正弦规律分布的干涉条纹图像, 最后干涉条纹图像经成像透镜成像在 CCD 靶面, 通过图像捕获系统由计算机采集得到。

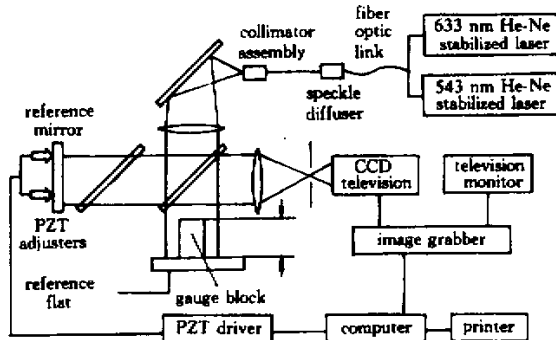


Fig. 1 The principle of measurement length using phase shift interferometer

由计算机控制压电调节器(PZT)驱动源, 调制

压电调节器等间隔地推动参考镜,可以采样得到多幅干涉图像,如图2所示,再按照一定的数学模型处理计算,从而求得被测量块和标准辅助平面表面的相位信息。

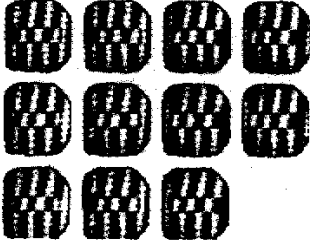


Fig. 2 Interferogram with step

干涉场的光强分布函数可以表示为:

$$I(x, y, \delta) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (2)$$

式中  $\varphi(x, y)$  为被测波面的相位分布函数,  $a(x, y)$  为干涉场的背景光强分布,  $b(x, y)$  为干涉场的干涉条纹调制光强变化的振幅分布,  $\delta_i$  为参考波前的调制相位变化。在干涉仪中,如果通过压电陶瓷堆推动参考反射镜平移,使参考波面的相位  $\delta_i$  在  $0 \sim 2\pi$  内逐次变化  $\pi/2$ , 于是求得干涉场相位主值为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[ \frac{I_4(x, y, 3\pi/2) - I_2(x, y, \pi/2)}{I_1(x, y, 0) - I_3(x, y, \pi)} \right], \quad (3)$$

$\varphi(x, y)$  反映了与干涉图相关波面的相位信息。利用(3)式计算得到的相位值均是相位主值,值域范围从  $-\pi \sim +\pi$ 。在合成的相位图中,除了被测量块测量面与辅助平晶研合面有阶跃相位外,还会有由于值域范围引起的  $2\pi$  周相跃变,如图3是波面的主值相位分布图,从而导致波面的不连续。为了正确反映所测波面信息的相位分布,获得一个表征实际波面的正确的相位分布图,必须对相位主值进行统一。

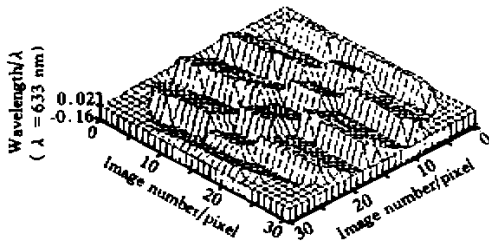


Fig. 3 Wrapped phase map

## 2.2 恢复波面

对于标称长度不大于 200 mm 的一等量块,在与表面质量和刚性都良好的辅助面研合之下,测得的平面度应不超过  $0.05 \mu\text{m}$ , 辅助平晶的平面度应

不超过  $0.03 \mu\text{m}$ 。用稳频的波长为  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光作光源,分别约相当于不超过  $1/6$  个条纹和  $1/10$  个条纹。因此条纹基本上是直条纹。通过量块中心沿  $x$  方向和  $y$  方向找出有周相  $2\pi$  跃变点(见图3),并去除跃变,然后用最小二乘法,利用已消除周相跃变的波面数据求取倾斜系数,先消除倾斜后,恢复整个波面的相位。具体方法是:

首先,以量块中心为起点,分别沿水平和垂直方向复原两条线的相位。把量块的中心作基点,分别沿  $x$  轴的正、负方向逐点找出有周相  $2\pi$  跃变的不连续点相位,加上或减去  $2\pi$  的整数倍,从而得到通过量块中心且沿  $x$  轴方向复原后的波面相位值。同样的方法,分别沿  $y$  轴的正、负方向逐点找出有周相  $2\pi$  跃变的不连续点相位,加上或减去  $2\pi$  的整数倍,得到通过量块中心且沿  $y$  轴方程复原后的波面相位值。

由于被测量块测量面和与其研合的辅助平晶研合面相对于干涉仪参考反射镜之间有相对倾斜,利用最小二乘法求出最佳平面的  $x, y$  方向倾斜系数,从实测量块测量面上相位值的数据减去这个最佳参考平面上相对应点的相位值数据,这样就消除了量块测量面倾斜的影响。可用下式表示

$$\varphi_2(x_i, y_i) = \varphi(x_i, y_i) - \varphi_1(x_i, y_i), \quad (4)$$

式中  $\varphi(x_i, y_i)$ ,  $\varphi_1(x_i, y_i)$  分别表示量块测量面上实际测量的相位值数据和最佳参考平面上的相位值数据; $\varphi_2(x_i, y_i)$  是一个用离散数据表示的曲面。然后,以前面已经复原的波面相位值为基准,分别沿着  $x, y$  的正、负方向找出整个波面上有周相  $2\pi$  跃变的不连续点相位,加上或减去  $2\pi$  的整数倍,从而得到整个波面复原后的波面相位值,如图4所示。量块测量面上复原后的离散点相位值的数据拟合得到一个曲面,该曲面代表被测量块测量面的波面,辅助平晶研合面上离散点相位值的数据也拟合得到一个曲面,该曲面代表与量块测量面相研合的辅助平晶研合面的波面。此时,代表量块测量面的波面上任意点的波差值与辅助平晶研合面上相对应点的波差值之差,即为被测量块在该点干涉条纹的小数部分  $\epsilon$ 。在量块测量面上(不包括距其四周侧面各为  $0.8 \text{ mm}$  区域)任意点长度中的最大长度  $L_M$  与该量块测量面上任意点长度中的最小长度  $L_m$  之差的绝对值,即为该量块的长度变动量。而过去在实际测量中,由于未能给出被测量块在测量面上任意点干涉条纹的小数部分  $\epsilon$ , 则用“量块测量面的中心点和距相邻两

侧面各为 1.5 mm 的四角各代表点位置的量块最大长度和最小长度之差的绝对值来表示<sup>[21]</sup>, 本文的测量更能符合量块长度变动量的定义。

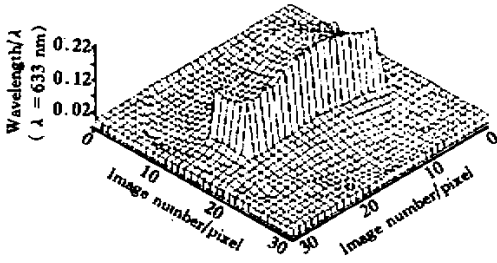


Fig.4 Unwrapping phase map

### 3 双波长干涉术量块长度的测量

在采用小数重合法干涉测量技术中, 由(1)式可知, 干涉条纹小数部分  $\epsilon$  可以经测量所得, 要得到干涉条纹整数  $K$  的量, 首先要用其他方法预测量块的长度, 而且要求精确到半个条纹以内, 即 158 nm (对于 633 nm 激光)。这样的精度, 一般来说对于较长的量块 (标称长度为 100 mm 以上) 是难以达到的。用双波长干涉术可以提高测量精度。

$$L = (K_1 + \epsilon_1) \lambda_1 / 2, \quad (5)$$

$$L = (K_2 + \epsilon_2) \lambda_2 / 2, \quad (6)$$

这里  $\lambda_1, \lambda_2$  为激光波长值,  $K_1, K_2$  为被测量块长度对应于波长  $\lambda_1, \lambda_2$  下的干涉条纹整数部分, 而  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为对应的小数部分。

由(6)式减去(5)式, 并整理得到:

$$L = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} [(K_2 - K_1) + (\epsilon_2 - \epsilon_1)]. \quad (7)$$

令  $K_{21} = K_2 - K_1$ ,  $\epsilon_{21} = \epsilon_2 - \epsilon_1$ ,  $\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ , 则有:

$$L = (K_{21} + \epsilon_{21}) \lambda_{12} / 2, \quad (8)$$

式中  $\lambda_{12}$  为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  合成波的等效波长,  $K_{12}$  为对应于等效波长  $\lambda_{12}$  的被测量块长度的干涉级次的整数部分,  $\epsilon_{21}$  为其小数部分。

由此可见, 被测量块长度  $L$  和等效波长  $\lambda_{12}$  及其干涉条纹的整数部分  $K_{12}$  及小数部分  $\epsilon_{21}$  之间的关系完全与量块测量公式(1)式相吻合。只要选择较接近的两个波长就可以使等效波长  $\lambda_{12}$  较原来的波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  大得多, 以减小对量块预测值的测量精度要求。例如, 选择波长为 633 nm、543 nm 两种 He-Ne 激光波长, 这样的等效波长为 3819.1 nm, 按

照量块预测值的初始精度要求为半个条纹, 即要求准确到  $\pm 955$  nm 以内。这样一来, 整数  $K_{12}$  比较容易得到, 由高精度的移相干涉术测量得到的小数部分  $\epsilon_{21}$  精度也是相当高的。

设由移相干涉术测量得到的分别对应于波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的相位为  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$ , 则

$$\epsilon_1 = \Phi_1 / (2\pi), \quad (9)$$

$$\epsilon_2 = \Phi_2 / (2\pi), \quad (10)$$

$$\epsilon_{21} = \epsilon_2 - \epsilon_1 = (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi), \quad (11)$$

因此,

$$L = [K_{21} + (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi)] \lambda_{12} / 2, \quad (12)$$

将(12)式代入(5)式, 可以求出对应于波长  $\lambda_1$  的量块干涉条纹的整数  $K_1$ , 即

$$K_1 = \frac{K_{21} + (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi)}{\lambda_1 / 2} - \epsilon_1 = \text{int} \left[ \frac{K_{21} + (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi)}{\lambda_1 / 2} \right], \quad (13)$$

或者, 将(12)式代入(6)式可以求出对应于波长  $\lambda_2$  的量块干涉条纹的整数  $K_2$ , 即

$$K_2 = \frac{K_{21} + (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi)}{\lambda_2 / 2} - \epsilon_2 = \text{int} \left[ \frac{K_{21} + (\Phi_2 - \Phi_1) / (2\pi)}{\lambda_2 / 2} \right], \quad (14)$$

(13)式和(14)式中  $\text{int}(\ )$  表示取不大于括号中数的整数, 利用双波长的小数重合法可以精确地求出的整数  $K_1$  和  $K_2$ , 对应于波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  量块长度分别为:

$$L_1 = [K_1 + \Phi_1 / (2\pi)] \lambda_1 / 2, \quad (15)$$

$$L_2 = [K_2 + \Phi_2 / (2\pi)] \lambda_2 / 2, \quad (16)$$

即, 量块长度的测量结果为:

$$L = (L_1 + L_2) / 2. \quad (17)$$

### 4 测量结果

实验中, 采用稳频的 He-Ne 激光器作光源, 在移相器的调制下, 在一个条纹间隔内等间隔地采样 4 幅干涉图像, 25 个条纹周期内采样得到 11 幅干涉图像 (参见图 2), 用移相术计算被测量块测量面的波面面形。应用移相式的量块激光干涉测量系统对被测量量块进行测量所得到的长度, 即为量块长度的实测值。本文实例对被测量量块所测量的中心长度的实测值与标称值 100 mm 的偏差为  $0.05 \mu\text{m}$ , 该量块测量面上 (不包括其四周侧面各为 0.8 mm 区域) 的最大波差值为  $0.06 \mu\text{m}$ , 最小波差值为

0.04  $\mu\text{m}$  ,因此 ,量块的长度变动量为 0.02  $\mu\text{m}$  ,表 1 给出量块测量面上  $21 \times 7$  个采样点上波差值的数

Table 1. The thickness difference on the surface of gauge /  $\mu\text{m}$

0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06

结论 本文研究了应用移相干涉术测量量块的长度和长度变动量的方法。通过恢复相位得到干涉条纹小数 ,由小数重合法计算量块的长度和长度变动量 ,改原来的目视判读干涉条纹小数为光电自动探测 ,提高了测量不确定度和效率。读数是客观的 ,测量过程 (包括读取小数、量块的长度和长度变动量的计算等)都是自动的 ,这在高精度量块长度和长度变动量测量技术上是一个新的突破。

量块的长度和长度变动量用光波干涉的方法直接测量时 ,空气温度(  $T$  )、大气压力(  $P$  )、水蒸气压力(  $f$  ) (即绝对温度)测量系统的测量不确定度等因素通过空气折射率影响光波波长 ,从而产生对量块长度及长度变动量测量结果的影响<sup>[3]</sup>。我们将进

一步分别应用温度、压力和湿度传感器随时读取这些参数 ,自动修正量块长度和长度变动量的测试结果 ,完成一套应用移相干涉术测量量块长度和长度变动量的完整系统。

### 参考文献

- [1] Wang Cenggang , Wang Debao , Yang Ziben *et al.* . *Modern Metrology and Measurement* (现代计量测试) 1993 ,(2) :15~22 in Chinese )
- [2] Ni Yucui. *Gauge Block* (量块). Beijing :Metrological Press ,1998 (in Chinese)
- [3] Andrew Lewis. Measurement of length , surface form and thermal expansion coefficient for length bars up to 1.5 m using multiple-wavelength phase-stepping interferometry. *Meas. Sci. Technol.* ,1994 ,(5) :694~703

## Dynamic Argument Using Shift-Phase Interferometry

Ge Aiming<sup>1)</sup> Chen Jinbang<sup>1)</sup> Chen Lei<sup>1)</sup> Zhu Rihong<sup>1)</sup>  
Yan Jiahua<sup>2)</sup> Niu Lixin<sup>2)</sup> Zhu Zhenyu<sup>2)</sup> Ren Dongmei<sup>2)</sup>

(1) , School of Electronic Engineering and Optoelectric Technology , Nanjing University of Science and Technology , Nanjing 210094  
(2) , First Institute Center of Measurement and Test State Commission of Science Technology and Industry for National Defense , Beijing 100095

( Received 31 July 2000 ; revised 12 April 2001 )

**Abstract :** The method of measuring new first-grade gauge block by phase-shift interferometry has been studied. Firstly , multi-frame interference patterns are captured by CCD , then the shape of the measured surface of the gauge and the assistant reference flat to be wrung are obtained by phase-shift arithmetic. In particular , the unwrapping wavefront principle and technology are studied when there are step and discontinuity in the gauge interference patterns. The discrete wave error is calculated , which is fitted to be a continuous and smooth surface. The measurement results of gauge block length and dynamic argument are given.

**Key words :** gauge block ; length dynamic argument ; shift-phase interferometry