

文章编号: 0258-7025(2001)06-0537-04

## 量块中心长度的自动激光干涉测量

葛爱明<sup>1</sup> 陈进榜<sup>1</sup> 陈磊<sup>1</sup> 蒋秀兰<sup>2</sup> 傅云霞<sup>2</sup> 苏俊宏<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094  
<sup>2</sup>上海市计量测试技术研究院 上海 200040, <sup>3</sup>西安工业学院成人教育学院 西安 710032)

**提要** 介绍利用激光干涉与数字图像处理技术以及 FFT 方法,分析并解决量块中心长度的自动测量和对测量结果的环境参数修正。

**关键词** 量块 激光干涉 环境参数

中图分类号 TN 247 ;TN 249 文献标识码 A

## Automatic Laser Interference Measurement of Center Length of Gauge Block

GE Ai-ming<sup>1</sup> CHEN Jin-bang<sup>1</sup> CHEN Lei<sup>1</sup> JIANG Xiu-lan<sup>2</sup> FU Yun-xia<sup>2</sup> SU Jun-hong<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>School of Electronic Engineering & Optoelectric Technology, Nanjing University  
of Science & Technology, Nanjing 210094  
<sup>2</sup>Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 200040  
<sup>3</sup>Adult Institute of Education, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032)

**Abstract** Based on laser interference and processing digital image technology and the FFT method, this paper has discussed the questions about analyzing and solving automatic measurement of gauge block central length, and correcting the measurement result by ambient parameters.

**Key words** gauge block, laser interference, ambient parameters

随着稳频激光和现代干涉仪的发展,用干涉法测量几何长度精度有了很大提高。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。柯氏光波干涉仪是较高精度的测量量块长度的仪器<sup>[1,2]</sup>,被测量块研合在一个被抛光了的钢辅助平晶参考平面上,并且放在干涉仪中,产生一组横过量块和平晶的干涉条纹。在量块上条纹位移相对于平晶上条纹位移是干涉条纹的小数部分,通过人眼依次对多种波长的每一种波长目测估计其干涉条纹的实测小数部分。如果较准确地预测量块的实际长度( $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 以内),预测长度除以光谱波长的一半所得到的的小数部分是对应于该光谱线的理论小数部分。用小数重合法求取被测量块在测量条件下对其标称长度的偏差值<sup>[3]</sup>。尽管现有的干涉仪测量系统有极好的性能,它还是依赖于有经验的操作技术人员,而且非常消耗时间。最重要的问题之一是操作

人员从由发射灯提供的低亮度的干涉图像中估读干涉条纹位移(条纹小数)。特别是对于长量块测量,光源短的时间相干性引起被观察的干涉条纹的可见度下降。此外操作人员利用玻璃水银温度计,无液气压表,通风式的湿度计,人工地测量空气温度、大气压力和水蒸气压力(绝对湿度)等环境。在测量一组量块的过程中,仅仅能读取有限的几组环境参数,而且人工操作会引起环境条件变化,由此产生的不确定度将被带入测量量块中心长度的结果中去。

本文介绍的柯氏干涉仪改用两稳频的 He-Ne 激光器(波长为  $\lambda_r = 0.633 \mu\text{m}$  和  $\lambda_g = 0.543 \mu\text{m}$ )提供测量波长,大大改善了干涉条纹的亮度和对比度,而且高对比度的正弦波干涉条纹能更好地适合计算机分析处理,利用数字图像处理技术和 FFT 方法分析处理并自动读取量块中心长度的干涉条纹小数,自动小数重合法计算量块的中心长度,并实时地读取环境参数(空气温度、大气压力、水蒸气压力即绝对湿度)以及量块温度,对由干涉仪直接测量得到的测

量结果,经修正计算后,最后得到被测量块的中心长度,干涉仪测量系统完成一个自动的测量量块中心长度的过程。

## 2 量块长度激光干涉测量

### 2.1 测量原理

量块是典型的端面长度标准,其长度由两个经过精细抛光的平行平面之间的距离确定,基本的测量原理是设法使被测长度和干涉仪的光程差相联系,再设法测出干涉仪光程差的变化量,从而得到被测长度<sup>[2]</sup>。其光学系统产生的等厚干涉条纹光强分布服从正弦规律,测量长度计算的基本方程为

$$L = (N + \epsilon)\lambda/2 + C \quad (1)$$

$L$  为测量长度,  $N$  为干涉条纹整数部分,  $\epsilon$  为干涉条纹小数部分,  $\lambda$  为测量用波长,  $C$  为修正值之和。

图 1 为用干涉仪测量长度的基本原理,光源采用稳频 He-Ne 激光器,对于  $\lambda_r = 0.633 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器,在 10 s 取样时间内频率稳定度优于  $4.4 \times 10^{-11}$ ,对于  $\lambda_g = 0.543 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器,在 10 s 取样时间内频率稳定度优于  $7.0 \times 10^{-10}$ ,这两种激光的亮度和光谱纯度允许测量几米长的量块,而条纹的对比度不会下降。被测量块被研合在一块称为平晶的量块辅助体工作面上,并置于干涉仪的测试光路中。当用单色光照射时,在干涉仪视场中能看到两组干涉条纹。一组产生于量块工作表面,另一组产生于量块四周的辅助体平晶工作面上。由于投射到平晶上的光线所经过的光程要大于投射到量块表面上的光程,待测量块的长度  $L$  不一定是  $\lambda/2$  的整数倍,因此两组条纹间有一相对位移,它对应于两部分光线的光程之差,即被测长度  $L$  的两倍。从干涉

仪视场中无法直接得到两组条纹位移的整数部分  $N$ ,但可以测出位移的小数部分  $\epsilon$ 。

### 2.2 干涉条纹小数部分 $\epsilon$ 的测量

干涉条纹小数部分  $\epsilon$  的测量就是读取干涉系统中参考面分别与量块工作面和量块辅助体工作面产生的两组等厚干涉条纹相对位置的差与干涉条纹间隔距离之比,如图 2(a) 中的  $a/b$ 。用 256 个灰度等级表示的干涉图像轮廓与相应的光强分布一样服从正弦函数分布规律。但是,由于系统和外界环境的干扰,在获得的实际干涉条纹光强分布中,叠加了一些高频噪声。为此,我们用一维 FFT 方法,对数据图像进行逐行 FFT 运算,在频域空间选择适当的低通滤波器将高频随机噪声滤去,即一般的一维光强表达式可写为

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] + n(x, y) \quad (2)$$

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,  $f_0$  是由干涉仪中被测量块工作面和量块辅助体工作面分别与参考面相对倾斜而引入的空间载频。根据欧拉公式 (2) 式可以写为

$$i(x, y) = a(x, y) + \frac{1}{2} b(x, y) [e^{j2\pi f_0 x} e^{j\varphi(x, y)} + e^{-j2\pi f_0 x} e^{-j\varphi(x, y)}] + n(x, y) \quad (3)$$

$$\text{令 } c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{j\varphi(x, y)}$$

$$c^*(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{-j\varphi(x, y)} \quad (4)$$

$$\text{则 } i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) e^{j2\pi f_0 x} + c^*(x, y) e^{-j2\pi f_0 x} + n(x, y) \quad (5)$$

对于式 (5) 相对于  $x$  方向进行一维 FFT 运算,得

$$I(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) + N(f, y) \quad (6)$$

这里,  $I(f, y)$ ,  $A(f, y)$ ,  $N(f, y)$  分别为  $i(x, y)$ ,  $a(x, y)$ ,  $n(x, y)$  的 FFT 变换,  $C(f - f_0, y)$  和  $C^*(f + f_0, y)$  是调制载频的正负频谱,选用一低通滤波器滤除高频噪声,取出低频信息,再作逆 FFT 运算,这时,干涉图像在垂直于条纹方向的光强分布呈平滑的正弦曲线分布。根据极值点处一阶导数为零找出黑条纹的极值点,并将干涉条纹细化,如图 2(b),与量块长边平行并过量块中心采样线  $CC$  与量块测量面上中心条纹交点为  $O$ ,用二次多项式的最小二乘法拟合曲线 ① 和 ② 并与中心采样线  $CC$  的交点为  $A, B$ , 则干

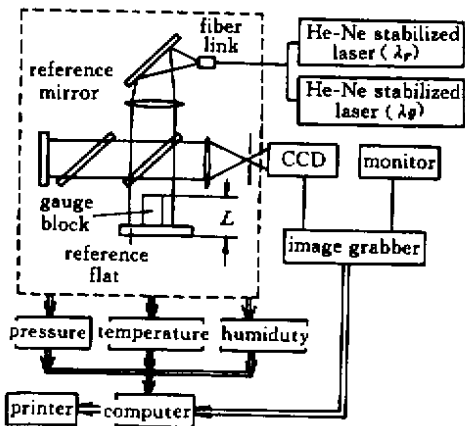


图 1 用干涉仪测量量块长度的原理

Fig.1 Principle of length measurement using laser interferometer

涉条纹的小数为  $\epsilon = |OA|/|BA|$ 。

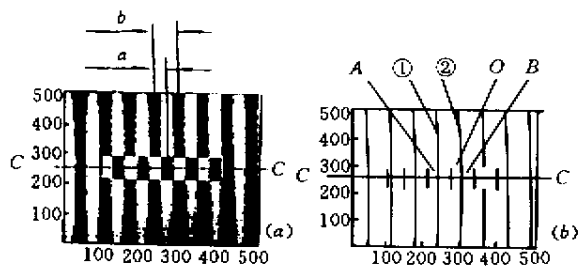


图2 干涉图处理

(a)干涉条纹图 (b)细化后的干涉条纹

Fig.2 Processing interferogram

(a) typical set of fringes ;(b) thinning fringes

### 2.3 干涉条纹整数部分 $N$ 的确定

干涉条纹整数部分  $N$  采用重复性较好的小数重合法的方式来设计。小数重合法是利用一组由多个波长  $\lambda_i (i = 1, 2, 3, \dots)$  实际测量所得的干涉条纹小数  $\epsilon_i$  根据它们之间的相互关系,准确地推算出干涉条纹的整数  $N_i$  进而利用测量长度计算的基本方程式(1)求出被测长度  $L$ 。具体的求解过程为

1) 首先预测量块的长度。由于量块的实际尺寸和其标称长度的偏差一般不超过几微米,因此通常就直接用量块的标称长度作为预测值。用多个波长分别进行测量时,可以得到分别对应于已知波长  $\lambda_i$  的小数  $\epsilon_i$ 。并可得到下列方程组

$$L = (N_i + \epsilon_i)\lambda_i/2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

在这个方程组中,  $m$  个方程有  $n+1$  个未知数  $L$  和  $N_i$ , 在数学上应有无穷多组解。预测的作用一方面确定方程组无穷多组解中  $N_i$  值中哪一个是正确的;另一方面预测可以大大缩短计算时间,预测精度越高,计算就越简单。

2) 选定一种波长,例如  $\lambda_1$  为基本波长,将长度的预测值和波长  $\lambda_1$  代入方程组(7)中,求出干涉级次  $N_1$  的近似值。预测的长度值越准确,所得的  $N_1$  近似值就越接近于准确值。

3) 根据  $N_1$  的近似值,基本波长  $\lambda_1$  和测得的  $\epsilon_1$ , 代入方程组(7)中的对应于  $N_1$  值的方程式求出量块的长度  $L$ 。

4) 根据所得到的量块长度  $L$  和已知波长  $\lambda_i (i = 2, 3, \dots, m)$ , 由方程组(7)中的其他方程求出一组小数  $\epsilon_i'$ 。

5) 如果计算得到的一组小数  $\epsilon_i'$  和实际测得的小数  $\epsilon_i$  在测量不确定范围内相符合,则说明当初选定的  $N_1$  近似值是正确的。否则,就在原先  $N_1$  近似值

的基础上  $\pm 1, \pm 2, \dots$  再逐个按上述步骤重新计算,直到求出正确的干涉级次  $N_1$  和被测长度  $L$ 。

这就是一般的小数重合法的求解过程,小数重合法的计算过程利用计算机来完成。

### 2.4 测量结果的修正

空气变化对应用多波长干涉术测量量块技术的影响是很敏感的,因为干涉仪中测量波长是随空气折射率变化而变化的。例如如果大气压力改变 37 Pa 或者空气温度改变 0.1 K,或者相对湿度改变 10%,则测量波长会改变  $1 \times 10^{-7}$ 。因此测量过程要求不断地监视干涉仪内部的环境条件(空气温度、大气压力和空气湿度)。将这些环境参数输入到计算机,由实验的 Edlen 公式计算修正空气折射率系数。具体来说,由自动判读干涉条纹小数及利用小数重合法计算得到的被测量块长度还必须加上长度测量时环境空气温度、大气压力和空气湿度偏离标准状态所应引入的修正量  $C_1$ ,被测量块温度偏离标准温度 20°C 时所引入的修正量  $C_2$ ,以及由于与被测量块相研合辅助面的材料和表面质量与量块不同而应引入的修正量  $C_3$ ,如果采用与量块材料相同的钢平晶研合,修正量  $C_3$  可以忽略不计。 $C_1$  修正量与测量状态对标准状态的偏离量有关,当被测量块的长度以  $m$  为单位时, $C_1$  修正量的表达式为

$$C_1 = [k_1(t_a - 20) - k_2(p - 101.325) + k_3(f - 1.333)] \times L (\mu\text{m}) \quad (8)$$

式中  $t_a, p, f$  分别为实测空气温度、大气压力和空气湿度,  $k_1, k_2, k_3$  分别为对应于空气温度、大气压力和空气湿度的系数。干涉仪采用稳频的 He-Ne 红激光(波长为 632.991418 nm)和绿激光(波长为 543.515912 nm),式中  $k_1 = 0.9325 (\mu\text{m}/^\circ\text{C})$ ,  $k_2 = 2.691 (\mu\text{m}/\text{kPa})$ ,  $k_3 = 0.3615 (\mu\text{m}/\text{kPa})$  与所有的长度测量相同,若测量时量块温度为  $t_g$ ,量块的线膨胀系数为  $\alpha$ ,被测量块温度偏离标准温度 20°C 时所引入的修正量  $C_2$  为

$$C_2 = \alpha(20 - t_g)L \quad (9)$$

式中  $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ ,式(8)(9)中,  $L$  均为被测量块的长度,以  $m$  为单位。

## 3 实验测试与结论

### 3.1 实验测试结果

实验中,在短时间内对干涉条纹进行采样计算,同时监视环境条件的变化,并记录空气温度、大气压力、空气湿度以及量块温度的参数值,表1表示测量

量块中心长度时的环境参数及修正量  $C_1$  和  $C_2$  的计算结果。表 2 表示分别对量块名义尺寸为 1 mm, 1.41 mm 50 mm 的量块中心长度的测量结果。

### 3.2 不确定度分析

表 3 为 5 次独立测量名义尺寸为 1 mm 的量块中心长度的结果,用 A 类不确定度中贝塞尔法评定

单次测量标准不确定度  $s(L_{ik})$  为

$$s(L_{ik}) = \{ [\sum_k (L_{ik} - L_i)^2] / (n_i - 1) \}^{1/2} \quad (10)$$

式中  $L_{ik}$  表示在等精度测量下作  $n_i$  次独立测量第  $k$  次测得的结果,  $L_i$  为  $n_i$  次独立测量结果的平均值。被测量的单次测量标准不确定度  $s(L_{ik})$  列于表 3。

表 1 测量量块时的环境条件

Table 1 Ambient parameters for measurement gauge blocks

Nominal gauge block length/mm	Temperature of gauge block/°C	Temperature of air/°C	Atmospheric pressure/kPa	Humidity of air/kPa	Correctional value $C_1$ /nm	Correctional value $C_2$ /nm
1 (dimension of section 30 mm × 9 mm)	20.70	20.67	101.28	1.73	1	0
1.41 (dimension of section 30 mm × 9 mm)	20.56	20.54	101.66	2.00	0	0
50 (dimension of section 35 mm × 9 mm)	20.26	20.25	101.83	1.84	-47	0

表 2 量块中心长度的实测结果

Table 2 Results of measurement gauge block central length

Nominal gauge block length/nm	Measured fraction with red laser $\epsilon_1$	Measured length of the central gauge block with red laser $L_r$ /nm	Measured fraction with green laser $\epsilon_2$	Measured length of the central gauge block with green laser $L_g$ /nm	Average $(L_r + L_g)/2$ /nm	Correctional value with ambient parameters $C_1 + C_2$ /nm	Corrected length of the central gauge block $L$ /nm	Difference between the measured length and the nominal length/ $\mu\text{m}$
1000000	0.788	1000059	0.022	1000075	1000067	1	1000068	+ 0.07
1410000	0.848	1409940	0.180	1409929	1409935	0	1409935	- 0.07
50000000	0.822	50000252	0.115	50000234	50000243	-47	50000196	+ 0.20

表 3 单次测量量块中心长度  $L_i$  及单次测量标准不确定度  $s(L_{ik})$

Table 3 Testing results of  $L_i$  and individual standard uncertainty  $s(L_{ik})$

$L_1$ /nm	$L_2$ /nm	$L_3$ /nm	$L_4$ /nm	$L_5$ /nm	$s(L_{ik})$ /nm
1000068	1000059	1000075	1000060	1000090	12.740

## 4 结 论

本文论述的量块中心长度自动激光干涉测量系统采用了稳频的 He-Ne 激光器,大大改善了视场中干涉条纹对比度,通过 CCD 摄像机接收到的干涉条纹灰度级别变化不仅服从正弦规律,光强分布最大与最小处相对应的灰度差别最小达到 6 bit 以上,这有利于分析干涉条纹、确定干涉条纹的中心坐标。另一方面,测量  $\epsilon$  时,为了减小测量光轴与被测量块中心长度轴线的夹角,一般要求视场中量块工作面上干涉条纹数应控制在 3 至 5 条之间,即相邻两条干涉条纹之间间隔内有 64 个以上的像素,这又有利

于细化干涉条纹,提高读数分辨率。

总之,量块长度自动激光干涉测量系统基本上满足并解决了二等量块检测时对量块中心长度自动激光干涉测量的要求。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Chenggang, Bian Caichang. Gauge Block Measurement Technique. Measurement Publishing Company of China, 1998. 4 (in Chinese)
- 2 Ni Yucai. Gauge Block. Measurement Publishing Company of China, 1998. 6 (in Chinese)
- 3 D. J. Pugh, K. Jackson. Automatic gauge block measurement using multiple wavelength interferometry. SPIE, 1986, 656: 244 ~ 250