

光程差倍增的纳米级精度激光干涉仪

赵美蓉 曲兴华 陆伯印

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

提要 介绍了一种新型的纳米级精度位移测量激光干涉仪。提出了耦合差动干涉的新方法。通过对光程差进行倍增,提高了干涉仪的分辨率和稳定性。该干涉仪结构简洁紧凑,光路布局对称性好,不存在死光程,容易装调,符合阿贝原则和结构变形最小原则,在 10 mm(可以扩展至 50 mm)测量范围内,获得了 $\lambda/1600$ 的分辨率和纳米级的测量精度。

关键词 纳米计量,激光干涉仪,位移测量,差动干涉,光程差倍增

1 引言

激光干涉仪在长度计量领域已被广泛采用,并且近年来的发展十分迅速。随着纳米技术的发展,对激光干涉仪的性能要求也越来越高,需要不断提高其稳定性、分辨率和测量精度。

国内外现有高精度,特别是纳米级精度激光干涉仪不同程度地存在一个共同问题,那就是对测量的环境条件要求很高,测量精度很容易受到环境温度、仪器本身的温度梯度、大气压力、湿度、大地振动、机械变形、电子和机械噪声以及不适当的仪器设计等的影响^[1],这就限制了这类干涉仪的商品化,使之不能得到推广应用。因此,在对干涉仪进行机械结构设计及光学元件布局时,必须全面考虑,尽量使影响测量精度的各种因素由干涉仪自身予以消除,以提高测量精度,这是向亚纳米级测量精度发展的有效途径。

要使干涉仪达到高精度,首先要获得高分辨率。目前,提高干涉仪分辨率的方法主要有两种:一是通过电路对干涉信号进行细分;二是对光程差进行倍增。对于高精度干涉测量来说,环境条件的变化是影响测量精度的重要因素,而对光程差进行倍增,具有直接将长度信息变成多倍光程差的优点,这有助于提高干涉仪的抗干扰能力和测量精度。

我们研制的这台新型纳米级精度激光干涉仪,在对光程差进行倍增的前提下,还提出了耦合差动干涉的新方法,使干涉仪在 10 mm(可以扩展至 50 mm)测量范围内,获得了 $\lambda/1600$ 的分辨率和纳米级的测量精度,且具有良好的稳定性。

2 新型干涉仪结构及测量原理

图 1 所示是光程差倍增的耦合差动式激光干涉仪的结构图。组成该干涉系统的光学元件,除反射镜 M_1, M_2 固定在导轨滑架两端随导轨一起移动以外,其余的均固定在横跨导轨的主支

架上,且除偏振分光镜 1 以外的光学元件被集合成为一体,结构非常紧凑。

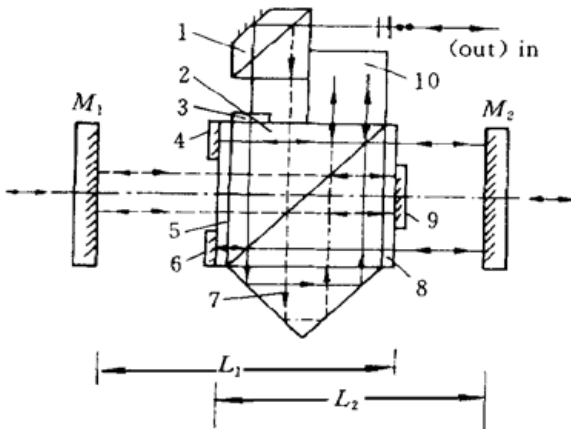


图 1 光学 16 倍频的耦合差动式激光干涉仪结构图

Fig. 1 Coupled differential interferometer with 16 multiple OPD

耦合差动干涉是一种新的干涉方法,它类似于差动干涉,但又不同于已有的差动干涉的概念,它是将两个反射镜安装在导轨滑架两端作为测量镜,它们随导轨滑架一起移动,使两路光的光程一路增大,而另一路减小,从而测量出位移量。

从图 1 可以看出,由激光器发出的光经偏振分光镜 1 被分成两部分,反射部分由偏振分光镜 2 反射,经 $\lambda/4$ 波片 5 到达固定在导轨滑架上的移动反射镜 M_1 ,经反射返回分光镜 2,由于这束光两次经过 $\lambda/4$ 波片 5,故重新返回分光镜 2 的光的偏振方向变化 90° 而透过分光镜 2,经 $\lambda/4$ 波片 8,被平面反射镜 9 反射回分光镜 2,同样道理,由于这束光两次经过 $\lambda/4$ 波片 8,其偏振方向发生变化,

到达分光镜 2 后被反射至直角棱镜 7,经反射回到分光镜 2,又被分光镜 2 反射,经 $\lambda/4$ 波片 8,由平面反射镜 9 反射,回到分光镜 2,由于偏振方向再次改变,这束光便透过分光镜 2,经 $\lambda/4$ 波片 5 再次到达移动反射镜 M_1 ,经 M_1 反射后回到分光镜 2,这次其偏振方向又发生改变,故被分光镜 2 反射至直角棱镜 10,经 10 反射后,除了在垂直纸面方向有一位移外,该束光又沿与原路平行的光路返回分光镜 1,经分光镜 1 反射,形成一路测量光束。

同样道理,由偏振分光镜 1 所分出的另一部分透射光,经分光镜 1 的反射面反射后,经过 $\lambda/2$ 波片 3,其偏振方向由水平方向变为垂直方向,其后的情况与上一束光基本相同,所不同的是该束光经偏振分光镜 2 后到达的是固定在导轨滑架另一端上的移动反射镜 M_2 。该束光所经过的路径如图 1 中细实线所示。这束光重新返回分光镜 1 后,经其反射面反射,形成另一路测量光束,与上一束光重新汇合,产生干涉。

由于每一束测量光都在移动反射镜上往返了四次,加上采用了耦合差动的方法,故实现了 $\lambda/16$ 的光学细分。光程变化 OPC 与导轨位移量 L 之间的关系可以表示为

$$\text{OPC} = 16L \quad (1)$$

对于光程差的变化可以用技术成熟的脉冲计数的方法测量,于是可以得到这台耦合差动干涉仪测长的基本公式为

$$L = N \cdot \frac{\lambda_0}{16n} \quad (2)$$

式中, n 为测量条件下的空气折射率, λ_0 为真空中的标准激光波长, N 为计数脉冲数。若对干涉信号再进行 100 倍电子细分,则有

$$L = N \cdot \frac{\lambda_0}{1600n} \quad (3)$$

故该干涉仪的分辨率可以达到 $\lambda/1600$ 。

3 干涉仪性能分析

从干涉仪的结构布局可以看出, 这台新型干涉仪具有良好的性能。

1) 这台光程差倍增的干涉仪比普通的迈克尔逊干涉仪具有更好的稳定性, 因为它具有直接将长度信息变成多倍光程差的优点。

普通的迈克尔逊干涉仪, 它可以通过相应的电路把分辨率提高 k 倍, 而光程差倍增的干涉仪是通过对光程差进行倍增, 将分辨率提高 k 倍。对于这台干涉仪来说, $k = 8$ 。

如果原始干涉信号有扰动的话, 利用电路提高分辨率将把该扰动放大 k 倍。

2) 采用耦合差动的方法, 使两个测量镜随导轨一起移动, 加之对称的光路布局, 使得干涉仪两路测量光所受扰动的影响几乎可以相互抵消。

干涉仪所受扰动的影响主要是指干涉仪所用基板的热膨胀和空气折射率的变化, 它们是长度和位移精密测量中的主要误差源。

图 2 是普通的迈克尔逊干涉仪示意图, 它通过相应的电路把分辨率提高 k 倍(这里 $k = 8$)。

将图 1, 图 2 所示的两台干涉仪都安装在同样的热容量足够大的基板上。设基板温度升高 Δt , 则在图 2 的光路中, 基板的膨胀引起的光路伸长为 $\beta L \Delta t$, 而电子计数器显示的变化为

$$k\beta L \Delta t \quad (4)$$

式中, β 为基板的线膨胀系数。

而图 1 的光路中, 基板的膨胀将使左右两路光的光程同时伸长, 这样, 两路光的光程差变化为

$$k\beta L_1 \Delta t - k\beta L_2 \Delta t = k\beta(L_1 - L_2) \Delta t \quad (5)$$

当 $L_1 = L_2$ 时, 这项影响可以为零。

空气折射率的变化 Δn 对两个干涉仪的影响也有类似的结果。

可见, 这台耦合差动式干涉仪具有良好的耐环境变化特性。

3) 干涉仪的设计符合阿贝原则和结构变形最小原则, 其结构紧凑, 主支架上的光学元件除 1 以外, 其他元件之间不存在空气间隙。另外, 干涉仪中无效行程(死光程)的长度可调整为零。这些无疑大大提高了干涉仪抗环境条件变化的能力, 使其具有很高的实用价值^[2]。该光学结构的研究对纳米干涉仪向亚纳米级的发展有着重要的意义。

4 实验结果

对于激光干涉仪应该是参照一些标准对其进行标定, 最好的方法是用太空生成的晶格作过渡基准对干涉仪进行标定^[3], 但目前不具备这个条件。也就是说, 在目前条件下既没有更高一级的标准器, 也没有其他的检测方法可以对我们研制的干涉仪的精度进行考核评定。因此, 运用传统的误差分析方法, 从理论上来确定本干涉仪的精度是可行的, 同时, 可通过与同等水平的仪器进行比对, 来对误差分析得出的干涉仪精度的可靠性加以旁证^[4]。

经过理论分析得出的干涉仪精度(以综合极限误差表示)优于 $\pm 2 \text{ nm}$ 。通过与电容测微仪

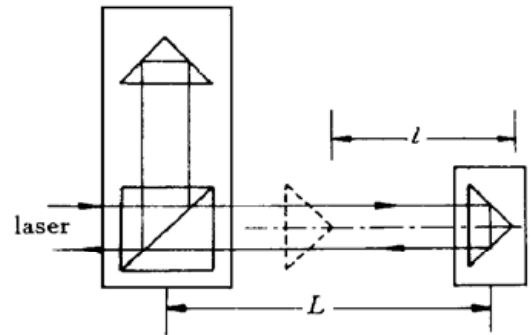


图 2 普通的迈克尔逊干涉仪示意图

Fig. 2 Common Michalson interferometer

比对,对本干涉仪进行了检测。测试结果如下:

(1) 本干涉仪的测量范围可大于 10 mm;

(2) 干涉仪计数器可以清晰地读出最后一位数,每变化一个数代表 $\lambda/1600$ 的位移,故干涉仪的分辨率为 $\lambda/1600$;

(3) 在 30 min 内观察计数器的变化,示值在 ± 0.8 nm 范围内漂移,仪器的稳定性良好;

(4) 干涉仪的实际测量精度优于 5 nm。

该测试结果是在对测试数据没有作任何修正的情况下获得的,这当中既包括系统误差的影响也包括偶然误差的影响,既有干涉仪的测量误差,又有电容测微仪的测量误差。

在上述情况下取得了优于 5 nm 的测量精度,这无疑进一步说明了这台新型纳米激光干涉仪具有良好的耐环境变化特性及超高的测量精度。耦合差动干涉的新方法是向亚纳米级测量精度发展的有效手段。在上述条件得到改善的情况下,可望获得 ± 2 nm 左右的测量精度。这与理论分析所得的结论是吻合的。

参 考 文 献

- 1 Shigeru Hosoe. Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use. *Nanotechnology*, 1993, **4**: 81~ 85
- 2 Matsumoto Hirokazu, Minoshima Kaoru. Recent research state and forecast of ultra-precision measuring technology. *The Japan Society for Precision Engineering*, 1993, **59**(1): 36~ 41
- 3 Lu Boyin, Zhu Hongxi, Qu Xinghua. Approach to molecular measuring machine with large scale displacement and nanometer accuracy. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1993, **14**(1): 107~ 112 (in Chinese)
- 4 Xu Yi, Ye Xiaoyou, Li Chengyang *et al.*. A Fabry-Perot interferometer for measuring micro-displacement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1993, **14**(2): 94~ 98 (in Chinese)

OPD Multiplied New Laser Interferometer with Nanometric Accuracy

Zhao Meirong Qu Xinghua Lu Boyin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract A new laser displacement measurement interferometer with nanometric accuracy has been developed. A new method called Coupled Differential Interferometry is proposed. The resolution and the stability of the interferometer are improved by multiplying the optical path difference (OPD). The new interferometer is simple in concept, symmetric in optical paths, without optical deadpath, easy to set up and align. A $\lambda/1600$ resolution and a few nanometer accuracy are achieved within the range of 10 mm.

Key words nanometrology, laser interferometer, displacement measurement, differential interferometry, OPD multiplied