

· 工程应用 ·

(19) 101-105

高精度长光栅动态检测的新方法

A New Method for Dynamic Measurement of High-Accuracy Linear Grating

高潮

Gao Chao

杨世雄 ✓

Yang Shixiong

顾庆祥

Gu Qingxiang

TH741.6

(国家教委光电技术及系统开放实验室, 重庆大学, 重庆, 630044)

A 摘要 根据双频激光干涉测量原理, 针对进口设备 HP5528 激光干涉仪不能进行动态检测的缺点, 提出了一种改进 HP5528 激光干涉仪并实现高精度长光栅动态检测的新方法。论述了长光栅长度误差的检测和长光栅莫尔条纹信号质量的检测。其中包括激光信息处理、信号采集、计算机接口和算法。该方法不仅可以检测光栅尺的精度, 还可以通过信号分析了解光栅尺制造过程中的误差源对光栅尺制造精度的影响, 也可以实现对磁栅、线纹尺等长度计量元件进行高精度动态测量。

关键词 双频激光; 干涉测量; 长光栅

中国图书资料分类法分类号 TH7416; TN249

动态检测, 激光干涉

ABSTRACT Based on the principle of double frequency laser interference measurement of high accuracy linear grating. This technique is discussed in detail from two aspects, total length cumulative error measurement and Morie fringe signal quality analysis of linear grating. It includes laser signal processing technique, signal sampling, computer interface circuit and related algorithm. With this method, we can not only get its accuracy parameter of a linear grating, but also analyze the error factors which would affect the accuracy of a linear grating in graving process. In addition, it can carry out dynamic measurements for other length metrological elements.

KEYWORDS double frequency laser; interference measurement; linear grating

0 引 言

长光栅作为一种新型的计量元件已广泛用于各种测量仪器、机床数显、数控技术中。长光栅的制作精度将直接影响到测试仪器(如三坐标机等)的测量精度, 以及工件的加工精度。因此, 要提高光栅尺的制作精度和长光栅应用的可靠性, 必须对光栅尺的精度指标进行检测, 分析长光栅制造过程中的误差因素。长光栅的长度误差大小、莫尔条纹信号的质量以及莫尔条纹间距的均匀性等, 既反映了所产生的光栅尺的质量, 其变化形态又反映了制作过程

· 收文日期 1994-09-02

中的误差源影响。

HP5528 双频激光干涉系统,其激光波长复现精度高于 $\pm 0.5 \times 10^{-7}$,用其波长作为基准对长光栅尺的检定提供了可靠性,使国内外很多单位都用它来进行长光栅检定。但由于 HP5528 系统存在固有缺点,只能进行静态测量,产生了很多人为因素所引起的误差,又使对激光折射率由于温度、压力、湿度等环境条件的影响而产生的变化进行修正发生困难或难以达到精度要求。笔者从测量方法和原理上改进 HP5528 双频激光干涉系统,仅利用其激光头的输出信号就实现了高精度光栅动态检测。只需操作者在测量前将被检参数(如测量点、测量间隔、长光栅尺型号、环境条件等)预置入计算机,启动后测量过程可一次性自动实现。

1 测量原理

1.1 长光栅尺长度误差测试

本文的光学部分组成如图 1 所示。

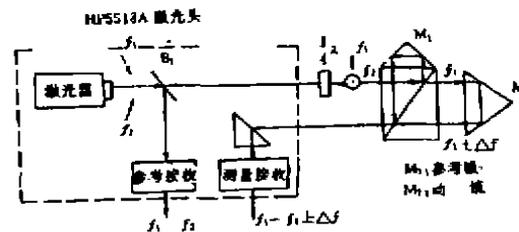


图 1 光学系统框图

被检光栅尺和动镜安装在高精度的气浮工作台上随工作台运动。根据双频激光干涉测量原理,当动镜随工作台运动时,激光头输出的两路信号频率分别为 f 和 $f \pm \Delta f$ 。其中 f 为双频激光的差频 $f_1 - f_2$, 大约为 1.5 MHz, Δf 为多卜勒频率。当动镜运动时,反射回激光头的光信号要发生频偏(即多卜勒效应):

$$f_1 = f_1 \sqrt{\frac{c \pm 2v}{c \mp 2v}} = f_1 \sqrt{\frac{1 \pm 2v/c}{1 \mp 2v/c}} \quad (1)$$

其中 f_1 —— 为激光头发出的激光频率,

v —— 工作台运动的速度,

c —— 光速。

由于 $2v/c \ll 1$, 将(1)式以级数展开并忽略高次项后可得:

$$f_1 = \left(1 \pm \frac{2v}{c}\right) f_1 \quad (2)$$

则多卜勒频率为:

$$\Delta f = \pm \frac{2v}{c} f_1 \quad (3)$$

正负号由工作台运动方向确定。当工作台向激光头运动时取正,反之取负。由(3)式可见, Δf 直接反映了位移的速度信息。如果把频率为 Δf 的电信号分离出来并处理成频率为 Δf 的脉冲信号,则在观察时间 T 内对该信号进行时间累积,可得到工作台在观察时间 T 内的位移为:

$$L = N\lambda_0 / 2 \quad (4)$$

其中 λ_0 为激光波长,在真空中 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, N 为在 T 时间内频率为 Δf 的信号的脉冲数。

为满足高精度测量,需对 Δf 进行倍频得:

$$L = N_1\lambda_0 / 2K = N_1Q \quad (5)$$

K 为倍频数, N_1 为倍频后在观察时间 T 内的脉冲数, Q 为脉冲当量($Q = \lambda_0 / 2K$)。

对于一根 1 m 长的被检光栅尺,如果要求测量间隔为 1 mm,则观察时间为($T_1, T_2, \dots, T_{1000}$)。为了保证在全长范围内只有一个测量原点,要求按以下步骤进行:在第一测量点(即 1 mm 处): $L_1 = T_1\Delta fQ = \alpha_1 \cdot Q$

在第二测量点(即 2 mm 处): $L_2 = (T_1 + T_2)\Delta fQ = \alpha_2 \cdot Q$

≡

在第一千测量点(即 1 m 处): $L_{1000} = Q\Delta f \sum_{i=1}^{1000} T_i = \alpha_{1000} \cdot Q$

其中 α_i 为在 i mm 处的计数值。这样,要求在被检光栅尺全长范围内将工作台运动时的 Δf 信号脉冲全部记下,以便当光栅尺读数头发出测量间隔信号时,计算机随时读出 Δf 对应的 Δf 信号的脉冲数,这就带来了不能象静态测量那样对激光头两路信号同时计数的问题,这是因为:设在观察时间 T 内,两路信号的脉冲数为(这里假定没有考虑倍频,同时工作台向着激光头运动),对 $f + \Delta f$ 信号: $N_1 = T(f + \Delta f)$;对 f 信号: $N_2 = Tf$ 。由于 $f \gg \Delta f$,所以 N_1 和 N_2 的值很大,在动态的过程中,不可能完成 $N = N_1 - N_2$ 的运算。但因 $N = N_1 - N_2 = T(f + \Delta f) - Tf = T\Delta f$,故本系统在将信号送入计算机计数接口单元之前,设计了一特殊的频率比较器,可参看图 3。

该频率比较电路的主要功能是利用硬件除去大频率,保留我们有用的频率为 Δf 的信号。 Δf^+ 和 Δf^- 表示工作台运动方向不同时输出的频率为 Δf 的脉冲信号。将 Δf^+ 和 Δf^- 的信号经判向电路后用锁相环路进行倍频,提高分辨率。本系统中倍频数为 32,分辨率为 $< 0.01 \mu\text{m}$ 。

由光栅读数头输出的两路相位差 90° 的莫尔条纹信号,经过信号处理电路、平均电路、电平鉴别电路后形成脉冲当量为一个栅距的脉冲信号,经过接口电路后,在微机的控制下利用这种信号形成定位信号和采样脉冲中断信号。在计算机接口电路中设置有基准信号计数器、中断信号产生器、判向信号计数器等电路。可由在开始时通过计算机任意选择测量间隔(最小测量间隔为 $0.1 \mu\text{m}$)。该接口可在不影响正常计数的情况下,随时根据中断信号读入激光基准信号计数值。

实际的测量过程是这样的,首先将被检光栅尺安装在运动工作台上,将测量中的一些参数如环境温度、气压、湿度以及采样间隔等预置入计算机,测量开始时启动工作台运动,根据

所需的测量间隔,发出采样中断信号,锁存基准信号计数器和判向信号计数器(该功能在计算机接口电路中完成),然后在不影响正常计数的情况下,将计数值读入内存,再根据环境条件测值(如温度、压力、气压),用软件进行换算,修正和数据处理后,给出误差值并打印出误差曲线,见图 2。

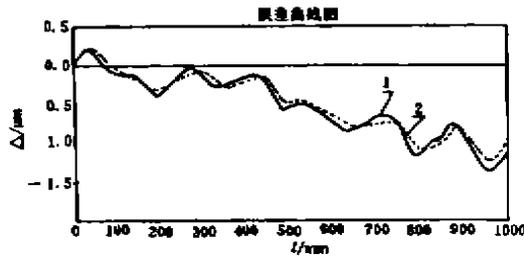


图 2 对西德一米长光栅测量结果

曲线 1 为本仪器测量的误差曲线,全长累积误差 $\pm 0.9 \mu\text{m}$

曲线 2 为原始误差曲线,全长累积误差 $\pm 0.8 \mu\text{m}$

1.2 莫尔条纹信号质量测量分析

为了更好地分析产生长度误差的原因以及了解制造长光栅过程中的误差因素,同时由于长光栅尺的应用是以光栅形成的莫尔条纹信号进行细分、判向、计数的测量过程,有必要对莫尔条纹信号质量进行分析。

测量系统框图如图 3 所示。

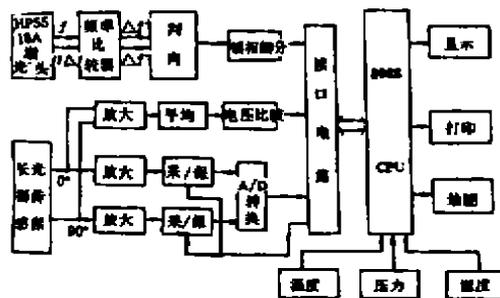


图 3 测量系统框图

光栅读数头两路相位相差 90° 的信号,经 A/D 转换后由计算机读入,采样频率由计算机根据激光基准信号控制,以适应不同的工作台速度和不同的型号的光栅尺。

根据光栅尺精度的提高和产生误差的各种因素,对光栅莫尔条纹信号质量分析包括:

1) 信号的正弦性。这项指标可用二次谐波以上的各次谐波的振幅 $A_i (i \geq 2)$ 之和与基波振幅值 A_1 之比来表示。比值越小,基波成份在信号中所占的比较越大,则光栅信号的正弦性越好。

- 2) 信号的正交性. 通过比较两路信号基波相位的差异来得到正交性指标.
- 3) 信号的等幅性. 通过比较两路信号基波幅值的差异来获得等幅性指标.
- 4) 信号的反差. 用调制度 M 表示:

$$M = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} \quad (6)$$

V_{\max} 和 V_{\min} 分别为光栅全量程范围内信号电平最大值和最小值.

- 5) 光栅全长均匀性. 对于这一指标, 可用直流电平在光栅全长上的变化程度来描述:

$$\delta V_0 = \frac{V_{0\max} - V_{0\min}}{V_{0\max} + V_{0\min}} \times \% \quad (7)$$

式中 $V_{0\max}$ 和 $V_{0\min}$ 分别为光栅全量程范围内直流电平的最大值和最小值.

- 6) 信号的稳定性. 在光栅尺全长范围内, 基波幅值的变化量 ΔA_1 与基波幅值的平均值 \bar{A}_1 之比, 可用来描述信号的稳定性.

在以上的分析中, 可采用 FFT 变换对信号进行分解而得到. 而对于这些指标的变化和信号的局部变化特性, 可用其它的信号分析方法进行分析.

2 结 论

本方法可对光栅尺全长累积误差和光栅尺莫尔条纹信号同时进行检测分析, 在软件中可进行综合分析. 应用先验知识, 可对影响光栅尺制造精度的因素进行分析, 及时发现光栅尺设计、加工、工艺、调整等方面的问题, 并进行针对性解决. 在实际应用中, 证明了本方法是非常可靠的. 最大测量速度可达 1 m/min, 对 1 m 长的长光栅尺进行全长累积误差测量, 其测量精度可达 $\pm 0.2 \mu\text{m}$. 我们已经在这种检测技术基础上完成了高精度长光栅制作过程中的误差补偿方法的研究, 并研制出了集检测、补偿、刻划一体化的长光栅制作系统. 同时本文提出的并实现了的改进 HP5528 激光测量系统方法, 对于国内很多使用该系统的单位具有重要的现实意义.

参 考 文 献

- 1 Bailey w. Grating or Laser. Precision Engineering, 1980, 2(3), 16~20
- 2 Estler W T. High accuracy displacement interferometry in air. applied Optics, 1985, 24(6), 808~815
- 3 叶声华. 激光在精密计量中的应用. 北京: 机械工业出版社, 1980. 83~109