

光栅尺动态测量仪

刘岩 龙科慧 王立朋 季思

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 阐述了利用激光差外干涉法, 检查光栅尺准确度的原理, 并介绍了根据这一原理而研制成的“光栅动态测量仪”的特点。该仪器在 2.2m 范围内的测量准确度为 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 并且在生产线上已经可靠地工作了三年。

关键词: 光栅尺; 激光差外干涉; 测量仪

1 概述

由于计量, 测试仪器, 特别是机床数显、数控技术迅速发展的需要, 大大地推动了光栅线位移传感器(又称光栅尺)的发展, 但由于缺少动态高精度的检测仪器, 控制其质量就成了问题, 为有效地控制光栅尺生产质量的提高满足生产的需要, 我们研制了光栅尺动态检测仪。

2 光栅尺动态检测仪器总体技术指标

1. 测量范围: $0\sim 2.2\text{m}$ 。
2. 分辨率: $0.32\mu\text{m}$ (或 $0.08\mu\text{m}$)。
3. 测长准确度: $\pm 2.2\mu\text{m}$ 。
4. 记录速度: $1\text{m}/3\text{min}$, (100 对数据/m)。
5. 键入温度、气压后, 自动修正其对被测件的影响。
6. 无论光栅尺是正弦波形还是方波形, 该仪器均能检测。
7. 仪器可连续可靠工作 8 小时。
8. 具有显示, 打印功能。

3 仪器的工作原理

对光栅尺(即光栅线位移传感器)而言, 它是光栅付形成的莫尔(Moire)条纹, 并对条纹进行可逆计数的测长组件, 因此, 莫尔条纹信号的质量, 尤其是莫尔条纹间距是否相等, 显示的长度是否准确, 就直接反映出光栅尺的质量高低, 这是其最重要的技术指标。光栅尺动态检测仪就是对这一指标进行自动检测的仪器, 该仪器是由横向塞曼(Zeeman)激光外差干涉仪、导轨、工作台、调整机构、计算机, 接口电路和传动等几部分组成的, 现把各部分工作原理介绍如

下,其组成和原理框图如图 1 所示:

3.1 光栅尺测长原理

如图 1 所示,光栅尺是由读数头、标尺光栅和数显表组成的,读数头内的指示光栅与标尺光栅一起,在光源(一般为发光二极管)的照明下,形成莫尔条纹,被接收、放大等处理,可逆计数,显示出两光栅相对移动的长度 L' 。

$$L' = a m$$

这里 a 为光栅栅距, m 为莫尔条纹数。为了提高仪器的分辨率,常把 a 细分为 k 等份,使读数头每移动 $b = \frac{a}{k}$ 就计一个数,则移动长度 L' 为:

$$L' = b m' \quad (1)$$

由于 b 为常量,所以只要计下可逆计数器的数 m' ,通过乘法运算,就可以显示出被测长度 L' 。

3.2 激光外差干涉仪的工作原理

在图 1 中,激光外差干涉仪是由横向塞曼 He—Ne 激光器、扩束器、偏振分束镜 PBS1、PBS2、大空心锥体棱镜,接收器 D_2 ,放大器 II,计数器 II,计算机、显示器、打印机和接收器 D_1 ,放大器 I,计数器 I 等组成的。

长 150mm 全内腔小功率 He—Ne 激光器,在横向磁场作用下,由塞曼(Zeeman)效应可知,波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 的激光谱线将被分裂成为含有两个不同频率,振动方向相互垂直的线偏振光。又由于模牵引效应,使两条线偏振光的频率 f_1 和 f_2 之差约为 1MHz。形成激光外差干涉仪中的横向塞曼激光器,经过热稳频后,其频率稳定度优于 10^{-8} 量级,再现性达 10^{-7} 量级。从而使激光波长的稳定度达到 10^{-7} 量级上,以适应精密测量的需要。

稳频后的激光束,经过扩束器而成为直径为 4mm 的平行光束,它投射到偏振分束器 PBS1 后,把混在一起的相互垂直的两线偏振光 f_1 和 f_2 分开。其垂直于磁场方向振动的线偏振光 f_1 又被反射到第二块偏振分束器 PBS2 上,并再次被反射;

而平行于磁场方向振动的线偏振光 f_2 ,透过 PBS1 而射到由 M_3, M_4 和 M_5 组成的大空心锥体棱镜上,之后返回到 PBS2,并透过它,又重新与 f_1 会合,经过 45° 放置的检偏器 P_2 ,而产生拍频信号(广义的干涉信号)被接收器 D_2 接收、放大等处理。若大空心锥体棱镜位置不动, D_2 接收到的拍频信号的频率为 $(f_2 - f_1)$;若大空心锥体棱镜以速度 v 移动,则 f_2 光束由多卜勒(Doppler)效应,而产生多卜勒频移 $\Delta f = f_2(\frac{2v}{c})$,于是 f_2 变成 $(f_2 \pm \Delta f)$,这时, D_2 接收到的拍频信号频率为 $[(f_2 \pm \Delta f) - f_1] = f_2 - f_1 \pm \Delta f$,经放大等处理,送入计数器 II 中。

从横向塞曼激光器的另一端,射出的另一束参考光束,经检偏器 P_1 ,由接收器 D_1 接收,它的拍频信号的频率总是 $(f_2 - f_1)$,再经放大等处理后,送入计数器 I 中。

计数器 I 和计数器 II 的计数,同时送入计算机,作减法运算,而得到 $\pm \Delta f$,假设以 Δf_m 的最小读数为单元,再乘 $0.32\mu\text{m}$ (或 $0.08\mu\text{m}$)运算,于是大空心锥体棱镜移动的距离为 l

$$L = \int_0^t v dt = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt = \frac{\lambda}{2} N \quad (2)$$

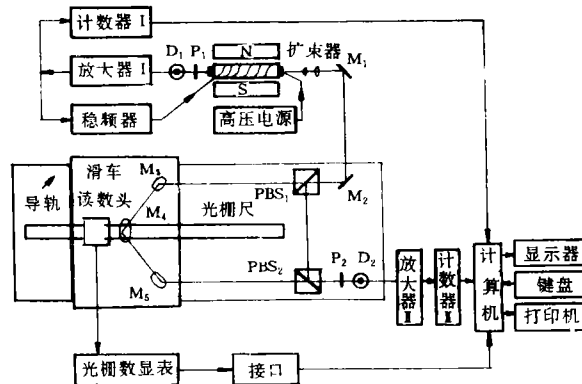


图 1 光栅尺动态检测仪框图

显然,当大空心锥体棱镜静止不动时,计算机内作减法运算后, $\pm\Delta f=0$, l 值为零或不变化;当大空心锥体棱镜以速度 v 移动时, $\pm\Delta f\neq 0$,则由(2)式可知, $l=\frac{\lambda}{2}N$,这就是激光外差干涉仪实际测得的长度 l 。

3.3 光栅尺动态检测仪工作原理

见图 1,该仪器是由长导轨、滑车(工作台)和传动系统,再通过接口电路把激光外差干涉仪和光栅尺综合起来而构成的。

以激光波长 λ 作为测量长度的基准,把光栅线位移传感器(光栅尺),固定在调整架上,并把光栅读数头与干涉仪的大空心锥体棱镜都固定在滑车上,这就保证了滑车在长导轨上移动时,读数头与大空心锥体棱镜作同步移动,在对应的取数间隔(如 10mm)处,实时地将数显光栅尺和激光外差干涉仪两者测得的实际长度值相比对,其二者差值,就是数显光栅尺在对应位置上的综合误差。若在测量前,通过按键把数显光栅尺的读数和激光外差干涉仪的读数同时清零,则滑车,也就是大空心锥体棱镜移动量为 L_i ,对应的数显光栅尺移动量读数为 L'_i ,则两者之差 ΔL_i 就是数显光栅尺在对应位置处的误差,于是有:

$$\Delta L_i = L'_i - L_i \quad (3)$$

$i=0,1,2,3,\dots,i,\dots$;若 ΔL_i 中的最大值为 ΔL_{max} ,最小值为 ΔL_{min} 的话,那么,该数显光栅尺的准确度为

$$\Delta = \pm \frac{1}{2}(\Delta L_{max} - \Delta L_{min}) \quad (4)$$

由于该仪器是在动态下进行检测和数据处理的,故称为光栅尺动态检测仪。

为方便用户,打字机(以证书格式)打印出 ΔL_i 和 L_i 并提供两份数据,一份给用户,一份存档保留备用。

4 仪器的特点

为了达到仪器总体技术指标要求,同时,又要做到经济、合理的原则,我们研制的仪器有如下特点:

4.1 结构布局新颖、合理

数显光栅尺本身就是一种计量、测试仪器,常做为工作标准使用,准确度比较高。当然了,对检测它的激光外差动态检测仪的精度要求就更高了,仪器使用时必须符合阿贝(Abbe)原则,也要经济合理,这往往是难以做到的,不过,我们还是解决了这个问题。

本仪器的测量范围为 2.2m,若按一般计量测试仪器的布局要求:把测量基准,即横向塞曼激光外差干涉仪的一个臂(测量臂)放置在被检测的光栅尺的延长线上,使其符合阿贝原则,然而,这会使仪器的导轨二倍于被测光栅尺的长度,达到 4.4m 长,这给加工、搬运、安装带来重重困难,仪器的研制费用大大增加。为解决这一矛盾,我们设计的动态检测仪的光学系统的布局成为一种新颖的形式,采用由三块小平面反射镜组成的大空心锥体棱镜,使被检测的光栅尺通过大空心锥体棱镜的“空心”和角点,这样,当光栅读数头与大空心锥体棱镜一起同步移动时,就可以做到既符合阿贝原则,又不增加导轨的长度,从而使导轨长度比一般布局缩短了一倍,几乎等于被测光栅尺的长度(2.2m)。因为符合了阿贝原则,对导轨的直线度要求也放松了,使加工、制造、搬运变得容易多了,研制费用也大为减少,做到高精度与节约的统一。

4.2 热平衡稳频技术

未经过稳频的 He—Ne 激光器,其频率稳定度约为 10^{-6} ,对应的波长准确度约为 10^{-5} 量

级,远远不能满足精密测长的要求,因此,激光外差干涉仪必须采取稳频等措施,才能满足要求。所谓稳频,就是使激光器谐振腔的谐振频率锁定在氦原子谱线的中心频率上,确保激光器单纵模、基横模运转,且使两频率的线偏振光的光强大致相等,保证频率稳定度优于 10^{-8} 量级上,频率再现性优于 10^{-7} ,从而使所用测长基准——波长的准确度达 10^{-7} 量级,达到精测的要求。

双频激光外差干涉仪的测长公式(2)为:

$$L = \frac{\lambda}{2} N$$

而

$$\lambda = \frac{c}{nf} \tag{5}$$

c 为光在真空中的速度, n 为空气的折射率,从(2)式看出,只有波长窄,才能保证测得的长度 L 准确度高。又从(5)式知道,波长 λ 是空气折射率 n 和光频率 f 的函数,只有 n 和 f 准确度高,才能使波长 λ 的准确度高。

激光谐振频率 f_2 与激光器腔长 l 有关

$$f = \frac{c}{2nl} \tag{6}$$

对(6)式微分,得

$$\frac{\Delta f}{f} = - \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right) \tag{7}$$

一般地说, $\frac{\Delta n}{n}$ 是很小的(当 l 在 $\frac{\lambda}{4}$ 内变化时),则(7)式简化为

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta l}{l} \tag{8}$$

公式(8)就是稳频所采用的基本公式,由公式可以看出,要 f 稳定,即 $\Delta f \rightarrow 0$,可以通过稳定激光器的腔长 l ,使 $\Delta l \rightarrow 0$,来达到 $\Delta f \rightarrow 0$,实现稳频 f ,进而稳定波长 λ 的目的。

我们采用热稳频方法,在 He-Ne 激光器上绕上电阻丝,控制加热电流的大小与通断,使发热量与散热量相等,达到动态热平衡,这就保证了激光器处于几乎不随时间变化的同一个温度上。温度不变,腔长 l 也不变,即 $\Delta l \rightarrow 0$,则 $\Delta f \rightarrow 0$,实现了 f 的恒定,其简化的原理示意图如图 2 所示这种热稳频方法简单,元器件便宜,直接采用市场出售的全内腔小功率 He-Ne 激光器,其腔长 $l = 150\text{mm} \sim 300\text{mm}$ 均可达到稳频的目的,其频率稳定度优于 10^{-8} 量级,再现性达 10^{-7} ,保证了波长 λ 的准确度达 10^{-7} 量级,满足了精密测试的要求。

4.3 横向塞曼激光外差干涉仪

仪器的总体技术指标中的记录速度为 $v = 1\text{m}/3\text{min} = 5.5\text{mm/s}$,这就是说,对激光外差干涉仪的大空心锥体棱镜的移动速度是很慢的,又从 $v_{\text{max}} = \frac{1}{2} \Delta f \lambda$ 公式可以计算出 $\Delta f = 16\text{kHz}$,就可以满足这一速度要求,即使留有 30 倍的余地,即 $\Delta f = 500\text{kHz}$ 时,也属于低频差范围。我

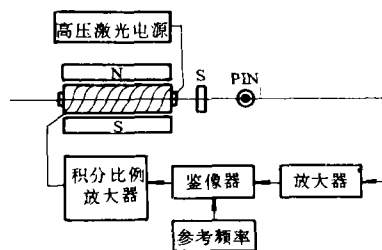


图 2 稳频器框图

们选用长寿命、腔长 $l=150\text{mm}$ 的激光器,加上横向磁场的方法来产生“外差双频”,很容易做到频差约为 500kHz 的要求,它比通常的纵向磁场的激光器的频差约为 1.5MHz 低了三倍,这使得接收的拍频信号幅值大几倍,使接收、放大等处理容易很多。

又由于加横向磁场时,容易做到磁场均匀,使激光器的光线偏振特性好,拍频信号质量高,而且直接产生振动方向相互垂直的两束线偏振光。而纵向磁场下的激光器产生的是左右旋偏振光,还需通过 $\frac{\lambda}{4}$ 波片,才能产生两线偏振光,通过试验得知,其光束质量不如横向磁场下产生的光束质量好,因此,用横向磁场下的 He-Ne 激光器的拍频信号质量高,这对提高仪器的稳定性和可靠性是非常有利的。

5 仪器的误差分析

光栅尺激光外差干涉仪,是一个由光机电计算机等组成的仪器,它的精度由激光外差干涉仪的测长精度、导轨的直线度、调整机构的刚性及光栅尺安装正确与否等因素来决定的:

1 激光外差干涉仪的测长误差

- (1)激光频率稳定度不高引起的误差 $\Delta L_1=0.1L$
- (2)激光束发散角 $\theta_1=12''$ 时,产生余弦误差 $\Delta L_2=1.7 \times 10^{-3}L$
- (3)大空心锥体棱镜误差 $\theta_2=15''$ 时 $\Delta L_3=2.6 \times 10^{-3}L$
- (4)脉冲当量为 $0.32\mu\text{m}$ 时,引起的误差 $\Delta L_4=0.32\mu\text{m}$
- (5)温度的影响 (20 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 时, $\Delta L_5=0.4L$
- (6)气压误差为 100Pa 时 $\Delta L_6=0.3L$

$$\text{于是其合成读差 } \delta_1 = \pm \sqrt{\sum \Delta L_i^2} = \pm (0.32 + 0.5L) \mu\text{m}$$

2 导轨直线度为 $\theta_3=30''$ 时, $\delta_2 = \frac{1}{2}(\theta_3^2)L = 0.01L$

3 光栅尺安装得与导轨不平行度为 $\alpha=120''$ 时 $\delta_3 = \frac{1}{2}\alpha^2L = 0.17L$

4 调整机构刚性不高产生“变形”

$\delta_4=0.5\mu\text{m}$ 于是这台仪器的总误差为

$$\delta_{\text{总}} = \pm (0.6 + 0.5L) \mu\text{m} \tag{9}$$

以上各式中 L 以米为单位,当 $L=2.2\text{m}$ 时

$$\delta_{\text{总}} = \pm 1.7 \mu\text{m}$$

5 该仪器与美国 HP 公司的 HP5528 双频激光干涉仪比对结果为,在 $L=2.2\text{m}$ 时,其比对结果为 $\pm 1.5\mu\text{m}$,即

$$\delta_{\text{测}} = \pm 1.5 \mu\text{m}$$

这与理论分析的 $\delta_{\text{总}} = \pm 1.7 \mu\text{m}$

符合得很好,达到了设计指标要求。

通过国内调研得知,对这种大量程 (2.2m) 的全自动检测仪而言,解决了光栅尺检测的急需。这台仪器交生产光栅尺工厂已使用了三年,由于记录速度快达 $1000\text{mm}/3\text{min}$,能及时发现设计、加工、工艺、调整等问题,予以有针对性的解决,把产品合格率由 66% 提高到 99.5% 以上,迅速占领了国内三分之一市场,由于质量提高,还远销东南亚、美洲和西欧。

参 考 文 献

- 〔1〕叶声华,《激光在精密计量中的应用》,机械工业出版社 1980
- 〔2〕关信安等,《双频激光干涉仪》,中国计量出版社 1987
- 〔3〕王因明,《光学计量仪器设计》(下册),机械工业出版社 1982
- 〔4〕R. H. Morris et al. ,Appl. Opt. ,14, 2808 1975
- 〔5〕N. Umeda,H. Takasaki,Appl. Opt. ,19,442 1980

Dynamic Measurement of Grating Linear Scales

Liu Yan, Long Kehui, Wang Lipeng and Ji Si

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the accuracy of grating linear scales by laser heterodyne interferometry, and introduces the characteristic of the instrument for it. The accuracy of the instrument is about $\pm 1.5\mu\text{m}$ in the range of 2.2m.

Key words: Grating linear scales, Laser heterodyne interferometry, Measurement instrument