

一种实现高精度稳定 Zeeman 激光频差的方法*

成相印 郭继华* 殷纯永

(清华大学精仪系, 现代应用物理系, *北京, 100084)

摘要: 为了使双频激光干涉仪的高精度和可靠性能能够在当前急需解决的大尺寸高精度同轴度、直线度测量方面有效的发挥出来, 有必要在双频激光干涉仪的信号处理方面采用比相技术, 为此, 需要稳定 Zeeman 激光的频差。本文提出一种基于 8098 单片机系统的智能化稳频差方案, 不但保证了频差的稳定性, 而且每次开机还能自动搜寻频差极值, 从而保证了光频的复现性。系统经过实验验证, 频差变化小于 5kHz/5h, 工作稳定可靠, 可以满足比相的要求。

关键词: Zeeman 激光 频差 稳频

Beat frequency stabilization of a longitudinal zeeman laser

Cheng Xiangyin, Guo Jihua, Yin Chunyong

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University)

Abstract: The double frequency laser interferometer has been widely used in precision measurement. When it is used to measure straightness, the Wollaston prism can not be moved out of the laser beam. So it can not be utilized to measure axiality. In this paper a new method of stabilizing the beat frequency of a He-Ne longitudinal Zeeman laser, in which 8098 system is used, has been developed. It can also seek the maximum of frequency difference automatically, so this guarantees the frequency reproducibility. The maximum of frequency difference is about 600kHz. The change of the beat frequency is no more than 5kHz during 5 hours. This stability makes it possible to measure the phase between reference signal and measuring signal. Therefore, the interferometer using this beat frequency stabilized He-Ne laser can be used to measure straightness and axiality conveniently.

Key words: Zeeman laser beat frequency-stabilizing

一、稳频差的必要性

利用纵向塞曼效应, 用 633nm 稳频氦氖激光器制成的双频激光干涉仪, 由于其卓越的性能, 在许多精密测量中已经得到广泛的应用。特别是在一些大尺寸精密测量中, 双频激光干涉仪更显示出自己不可替代的作用。从目前的文献检索来看, 在大尺寸高精度直线度测量方面, 双频激光干涉仪的稳定性和测量精度更是首屈一指。其测量直线度光路如图 1 所示。

设被测直线长度为 L , δ_1, δ_2 分别为 f_1, f_2 经渥拉斯顿棱镜的附加光程差, $f = f_1 - f_2$ 是塞曼分裂的拍频值。则光束返回后, 测量信号与参考信号的相位差 Δp 近似为:

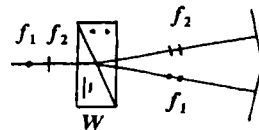


Fig. 1 Schematic diagram of straightness measurement

* 国家自然科学基金资助。

$$\Delta p = \left(\frac{2L + 2\delta_1}{\lambda_1} - \frac{2L + 2\delta_2}{\lambda_2} \right) \times 360^\circ$$

$$= [2fL + 2(\delta_1 f_1 - \delta_2 f_2)] \times 360^\circ \tag{1}$$

其中第二项与被测量成正比，第一项是与频差 f 及测量长度 L 有关的误差项。在电路中，相应的测量信号的检测采用的是锁相倍频、计数技术，这就决定了双频激光干涉仪测直线度的局限性，即渥拉斯顿棱镜是不能离开光路的，显然更不能进行同轴度的测量。而大长工件同轴度的高精度测量是个一直没有得到很好解决的问题。为了利用双频激光干涉仪测量同轴度以及更方便的测量直线度，就有必要采用比相技术。由于采用比相方法，就要求拍频 f 具有较高的稳定性。同时 f 的变化通过(1)式的第一项还会带来测量误差(虽然该项误差在理论上是可以进行修正的，但在实际测量中是很不方便的)，例如，当 L 取 30m，令该项误差不大于 0.3° ，则有

$$2fL * 360/c < 0.3$$

因而

$$f < 5\text{kHz}$$

可见拍频值的变化应小于 5kHz，同时拍频值的不断抖动还会给比相电路带来很大的麻烦，降低比相精度。

一般的双频激光干涉仪采用的是左右旋圆偏振光光强相等的等光强稳频方案，以确保光频的稳定，对频差的稳定性不作特别的要求。我们对惠普公司生产的 HP5528A 双频激光干涉仪的频差进行了实际测量，发现其拍频值在不断变化，振荡周期约为 4min，变化范围约为 6kHz。同时频差的峰值还在慢慢变小，这显然不能满足比相精度的要求。因此，有必要研究一种专门高精度稳定频差的系统。

本文提出一种基于 8098 单片机系统的智能稳频方案，不但保证了频差的稳定性，而且每次开机还能自动搜寻频差极值，从而保证了光频的复现性^[1]。实验结果达到了令人满意的效果。

二、稳频差方案的建模及分析

我们所用的稳频差的方案原理如图 2。

激光器置于一密闭腔中，外加一轴向磁场，在磁场的作用下，激光分裂成频差为 f 的两束光，用光电探测器测的 f 信号，由 8098 系统测频，通过单片机内部程序算法处理，再由 D/A 输出伺服电压，经功率驱动后，通过缠绕在激光管外壳上的电阻丝对激光管加热，这样就可以控制加热量的大小来获得稳定的频差，其控制原理框图如图 3。

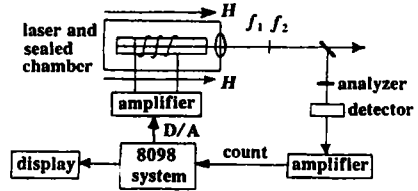


Fig.2 Scheme of beat frequency stabilization

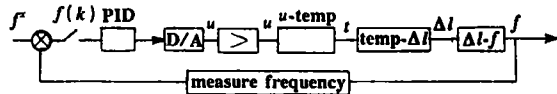


Fig.3 Scheme of control system

下面我们分析各个环节的传递函数。

(1)对数字 PID，根据本系统的特点，取比例和微分两部分，即为 PD 调节，其传递函数为

$$G_D(Z) = K_P + K_D(1 - Z^{-1}) \tag{2}$$

(2)D/A 是一阶保持器，其传递函数为

$$G_{DA}(S) = \frac{1 - e^{-TS}}{S} \tag{3}$$

(3) 功率放大是一比例环节, 设为 K_1 。

(4) U -温度变换, 即电压-温度变换。当在电阻丝上加一电压 U 时, 激光管及密封腔的温度都要上升, 密封腔的热容量比较大。依测量得此环节属于带有迟滞的一阶惯性环节, 其传递函数为

$$G_H(S) = \frac{ma}{S(S+a)} e^{-ST_i} \quad (4)$$

式中, m, a, T_i 与系统的热容量、导热系数等传热过程有关, 这基本上由系统的结构设计完全决定, 是稳定频差中最重要的一环。这里结构和热的设计是要十分仔细的。为了简化模型我们假设 $T_i = nT, T$ 为系统采样周期。

(5) 温度- Δl 变换, 即由于温度变化引起的腔长变化 Δl 之间的变换属于比例环节, 设其传递函数为 K_2 。

(6) Δl -频差 f 的变换, 即激光器腔长变化引起的频差变化, 二者之间的关系曲线可以有上凸、上凹等多种形态, 与磁通密度、激光管的充气条件等多个参数有关, 文献[1]对此进行了详细的研究。我们调整磁通密度大小, 使 Δl - f 曲线如图 4 所示(一个周期)。其最高频差约为 600kHz, 选择 600kHz 的原因主要是为了后面处理电路测相方便, 同时也能满足测量的需要。此曲线具有非线性, 可见稳频是一个非线性控制过程。但是, 我们稳频差总是将稳定点选在最高频差附近的一个小的单调区间上, 因而可近似地看成线性过程, 设其比例因子为 K_3 。

综上所述, 系统控制框图可化为如图 5。

则可得出其传递函数为:

$$G(Z) = AZ^{-n} \frac{(BZ + C)[K_P Z + K_D(Z - 1)]}{Z(Z - 1)(Z - e^{-aT}) + AZ^{-n}(BZ + C)[K_P Z + K_D(Z - 1)]} \quad (5)$$

式中: $A = mK_1K_2K_3/a^2$
 $B = aT - 1 + e^{-aT}$
 $C = 1 - e^{-aT} - aTe^{-aT}$

在实验中, 我们选用北京科学仪器厂生产的双频激光器, 腔长约为 14cm, 功率为 1.0mW。在现有的机械和热的结构下, 取采样时间 $T = 0.1s$ 。通过实验测得 a 比较大, 约 300s, 此时可认为 $B = C$ 。而迟滞时间 T_i 较小, 为了简化模块取 $T_i = 0, K_F + K_D = 1$ 。则上式简化为:

$$G(Z) = [AB(Z + 1)(Z - K_D)] / [Z(Z - 1)^2 + AB(Z + 1)(Z - K_D)] \quad (6)$$

为了使系统稳定, AB, K_D 的取值必须使 $G(Z)$ 的特征方程的根落在单位圆内。通过实际调节, 最后在程序中取 $K_D = 0.8, AB = 0.3$ 。相对应的特征方程的根为: $Z(1) = 0.5999, Z(2, 3) = 0.5499 \pm 0.3122i$ 均在单位圆中, 求得对应的单位阶跃响应如图 6。

三、稳频差实验及结果

按照上面的分析及相应参数取值。我们按如图 7 所示程序框图编制了 8098 程序, 取得

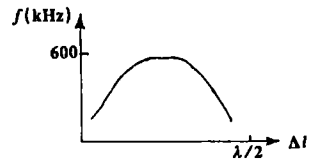


Fig. 4 Experimental curve of beat frequency

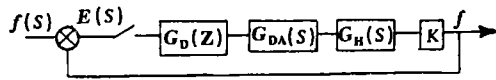


Fig. 5 Block diagram of system

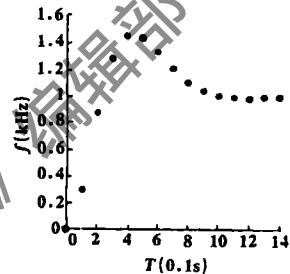


Fig. 6 Theoretical response curve of the system

了令人满意的效果。图8给出了实验结果。该结果是开机经25min后预热测得,每分钟采1个数,共采样5h。采数过程全部由IBM286通过频率计自动采集,图用GRAFTOOL3.0绘制。

从图8可看出,预热20min左右后,连续开机5h。整个过程中,频差变化总量小于5kHz,上下波动小于0.5kHz/min,并且时间越长稳定性越好,如在开机3h以后,频差的变化量小于0.2kHz/h。

同时,由于采用了8098单片机系统,仪器的智能化,自动化水平等大大提高。主要表现在:

- a. 预热时间可自动随环境改变、对环境有自适应能力。
- b. 可自动搜寻最大频差。每次锁定的都是当次开机的最大频差,因而由于温度、激光管的老化等引起的最大频差变化并不影响稳频精度,同时可使光频具有高的复现性。
- c. 增强了仪器的抗干扰能力。由于内部程序完善的处理能力和8098 watchdog的使用,使稳频系统在任何情况下也不可能出现“死机”状态。
- d. 增强了仪器的整体自动化水平。8098单片机的使用,使得许多原来实现起来相当复杂的功能变得简单易行,如频差稳定程度的判定及指示,开机自检等。
- e. 8098系统的采用,使电路更加简化,易于调试,适于批量生产。相对于模拟电路稳频系统,由于激光管之间特性的不对称,磁场强度的不均匀、元器件的离散性等,对每台仪器的稳频,都要在硬件上反复调整优化,费时费力。本文介绍的方法只需在计算机上对软件稍微调整一下就可完成这些工作,省去了硬件调试的工作。

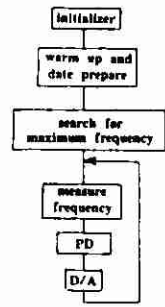


Fig. 7 Programme block

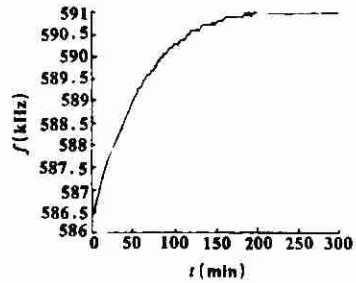


Fig. 8 Experimental curve of beat frequency stabilization

四、结 论

用本文所提出的方法进行稳频差,经过几个月的实验记录,每次开机频差都稳定在最高频差附近,并且频差总的变化量每次都小于5kHz/5h,抖动小于0.5kHz/min。可以满足比相的要求。并且系统经过实验验证,工作稳定可靠。

参 考 文 献

- 1 Shao X, Yin Ch. A new development in frequency stabilization of a longitudinal Zeeman laser, SPIE Proc, 1990;1230: 400
- 2 Baer T, Kowalski F V, Hall J L. Appl Opt, 1985;24(13):1902~1904



作者简介:成相印(附照片),男,1969年7月出生。博士生。主要从事激光应用及精密测量测试工作。

郭继华,男,1945年出生。副教授。主要从事激光器、激光应用及精密测量研究。

殷纯水,男,1937年3月出生。教授,博士生导师,SPIE会员,计量仪器专业委员会副主任委员。1984~1985年在英国国家物理实验室(NPL)作访问学者,1992~1993年在加拿大多伦多大学和女皇大学作高级访问学者。一直从事光电精密仪器的科研和教学,当前研究方向有透阿贝结构误差准实时修正方法和器件,集成传感器和系统,仪器系统的仿真设计等。