

高精度高测速双纵模热稳频激光干涉仪研究

周秀云^{1,2}, 张涛², 程玉华¹

(1. 电子科技大学自动化学院 成都 610054; 2. 四川大学激光应用技术研究所 成都 610065)

【摘要】现代机械工业的发展使得数控机床和三坐标测量机等的运行速度已经达到1 000 mm/s, 而目前商用外差干涉仪的测量速度不能满足这一要求。为此该文采用长度为206 mm、频差约728 MHz的普通全内腔He-Ne热稳频激光器为光源, 外加带有高频振荡器形成的交流信号进行脉冲计数的信号处理电路, 构成高精度高速双纵模热稳频激光干涉仪。通过实验对干涉仪的测量速度和精度进行了验证, 其精度达到0.1 $\mu\text{m}/800\text{ mm}$ 。实验证明, 该干涉仪可以对速度为1 000 mm/s的运动物体进行位移和速度测量。

关键词 双频激光干涉仪; 频差; 高精度高测速; 热稳频激光器

中图分类号 TH744.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.032

Study of High Precision and High Measurement Speed Dual-Longitudinal Thermal Frequency Stabilization Laser Interferometer

ZHOU Xiu-yun^{1,2}, ZHANG Tao², and CHENG Yu-hua¹

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Institute of Applied Laser, Sichuan University Chengdu 610065)

Abstract The moving speed of the numerical control machine tool and the three-COMERO has reached 1 000 mm/s. However, the present measurement speed of the commercial heterodyne interferometer can not meet the requirement of measuring the moving speed. A High precision and high measurement speed dual-longitudinal thermal frequency stabilization laser interferometer is presented. This interferometer uses a laser of 206 mm-long and beat-frequency 728 MHz and a high frequency oscillator of high stability to get AC counter pluses. Experiments are set up to testify the measurement speed and precision of the interferometer. The system's precision is 0.1 $\mu\text{m}/800\text{ mm}$. Results show that this kind of interferometer can be used to measure the displacement of an object whose velocity is 1 000 mm/s.

Key words dual-frequency laser interferometer; frequency difference; high precision and high measurement speed; thermal frequency stabilization laser

双频激光干涉仪具有特有的测量范围大、分辨率高、测量精度高和抗干扰性能强等优点, 它不仅能测量线位移、线速度, 还能测量小角度及各种形位误差等几何量, 因此在超精密加工、光刻机以及三坐标测量机的标定等领域有着广泛的应用前景^[1-5]。国内外均有成熟产品, 这些产品多采用塞曼效应产生双频, 频差1.5~2 MHz, 测量速度可达300~400 mm/s, 测量精度不低于 10^{-7} , 在精密和超精密测长领域获得了广泛的应用^[6]。但现代机械工业的发展使得数控机床、三坐标测量机等的运行速度有了更大的提高, 如加工中心工作台运行速度已

达1 000 mm/s^[7-8], 美国B-S公司Scirocco三坐标测量机运行速度达到866 mm/s, 这就要求外差激光光源频差要高于4 MHz。因此, 提高激光光源的频差, 研制仍必须保持有高精度特点的高速双频激光干涉仪是机械工业发展的必然要求。

1 工作原理

如图1所示是高精度高测速双纵模热稳频激光干涉仪的工作原理示意图^[9]。图中, 1为双纵模热稳频激光器; 2为分光器; 3为光扩展器; 4为偏振分光镜; 5为参考角锥镜; 6为测量角锥镜; 7为透镜; 8为

收稿日期: 2008-11-05; 修回日期: 2009-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(50275101); 四川省科技攻关项目(03SG1230)

作者简介: 周秀云(1974-), 女, 博士, 主要从事光电测试方面的研究。

偏振片；9为雪崩管。由长度为206 mm的全内腔He-Ne激光管发出一对互相垂直的双纵模线偏振光，其频率分别为 ν_1 、 ν_2 ，模间隔为 $\Delta\nu = c/2nL$ ，其中， c 为光速； L 为谐振腔长； n 为空气折射率，其值约728 MHz)，经布儒斯特窗取出稳频信号，进行热稳频。其余光束再经析光镜反射及透射，反射的一对正交线偏振光作为双频激光干涉仪的参考信号，经透镜、偏振器产生拍频信号，为光电接收器接收，其接收的光强信号的频率为 $\nu_1 - \nu_2$ 。

透射光经光扩展器准直扩束后，为偏振分光镜分光，水平分量(频率为 ν_1)射向测量角锥镜，垂直分量(频率为 ν_2)射向固定角锥镜，两路光返回后经透镜、偏振器产生拍频。当测量镜在时间 t 内以速度 V 移动一距离时，因多普勒效应而引起频差变化 Δf ，这样被测长度信息载于返回光束中，并为光电接收器接收，其接收的光强信号的频率为 $(\nu_1 - \nu_2) \pm \Delta f$ ，其中 \pm 表示测量镜运动方向，作为双频激光干涉仪的测量信号。

光电管接收到的拍频信号频率高(728 MHz)、幅度小，把参考信号和测量信号分别经送入高频放大、功率分配、延迟线移相和混频处理，得到两路相差为 90° 、频率为多普勒频移 Δf 的信号：

$$\begin{cases} y_1 = A \sin(2\pi \cdot \Delta f \cdot t) \\ y_2 = A \cos(2\pi \cdot \Delta f \cdot t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Delta f = 2V \cdot \nu_1 / c$ ， V 为靶镜移动的速度， c 为光速， ν_1 为激光频率。再把这两路信号送入可逆计数器，进行计数，最后可得到动镜的移动长度为：

$$L = \int_0^t \frac{\lambda_1}{2} \Delta f dt = \frac{\lambda_1}{2} N \quad (2)$$

由式(2)可知，对测量镜运动过程中测量信号与参考信号的相位差变化的周期数进行测量，即可获得所需测量长度。而且从上面的分析可知，在原理上，测量速度($V = \lambda_1 \Delta f / 2 = 230 \text{ m/s}$)不受限制，只受电子器件速度的限制，高速动态性能极佳。

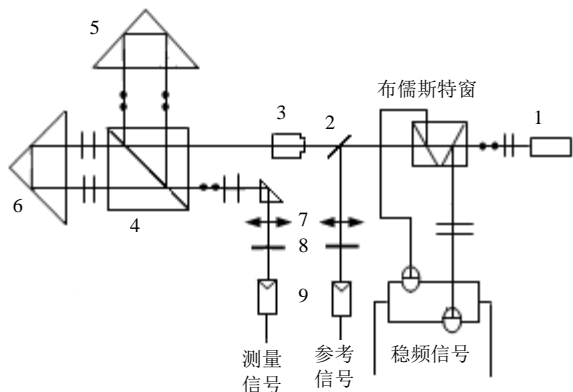


图1 双纵模热稳频激光干涉仪的工作原理示意图

2 干涉仪光路结构

光路系统由三部分组成：稳频装置与激光头、外置干涉头及测量角锥镜。激光头包括激光管、布儒斯特窗、析光镜、光扩展器及接收参考信号及测量信号的透镜、偏振器、光电接收元件等。外置干涉头由偏振分光镜及固定角锥镜组成。

2.1 双纵模热稳频激光源

本文的高精度高测速双频激光干涉仪，采用长度为206 mm的普通He-Ne内腔式激光器，不加任何特殊附件，通过最直接的控制毛细管放电电流的方式调整谐振腔长度，得到频差为728 MHz、频率与频差有同样稳定度(室外 10^{-7} ，室内 10^{-9})的双纵模稳频激光源^[10-11]，其稳频原理及系统组成如图2所示。

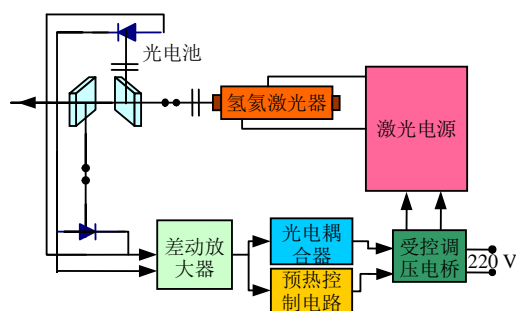


图2 稳频系统

对于一定长度的激光谐振腔，可能出现几个纵模，模间隔(频率)为 $f=c/2L$ 。模之间是相互竞争的，在不加控制情况下只能一个模占主要地位，但不久又被相邻的模取代。如果能精确控制谐振腔长度，使腔长变化总是倾向于有利于在模竞争中已处于劣势的那一个模变强，则使两个纵模同时并存是完全办得到的。采用最直接，也是最简单的控制方法，即控制放电电流来改变激光谐振腔长度，达到稳频目的。

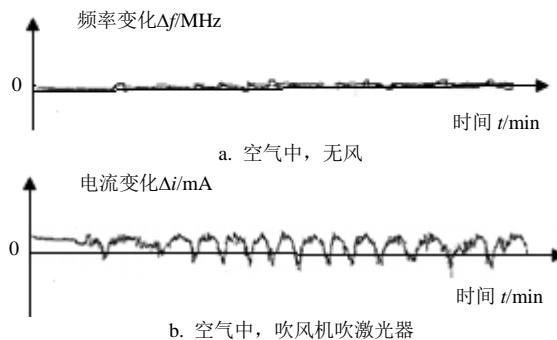


图3 He-Ne激光器频率稳定性实验曲线图

图3为在室外环境下的稳频实验曲线，图3a中的曲线为频率变化；图3b中的曲线为相应的受控放电电流变化，测量时有风吹的影响，所以放电电流变

化剧烈,仍可以看出,频率(频差)稳定度仍保持不低于 10^{-7} 级。

2.2 角锥镜光路系统

根据外差干涉仪的空间条件,要获得高精度的信号,信号光和本征光的夹角 θ 必须满足:

$$\theta_{\max} = \lambda_L / a$$

式中 a 为光电探测器的混频孔径; λ_L 为本振光波长。仪器中, $\lambda_L=0.632\ 8\ \mu\text{m}$, $a=3\ \text{mm}$, 故有:

$\theta_{\max}=0.211\ \text{mrad}=43.5''$, 测量镜运动过程中始终保证这样精度的角准直,系统采用了能保证出射光与入射光平行的角锥镜作测量镜及参考镜。但只有在角锥镜的三个直角无偏差时,出射光与入射光才完全平行。当实际加工的角锥镜三个直角偏差分别为 $\delta\theta_1$ 、 $\delta\theta_2$ 、 $\delta\theta_3$ 时,出射光与入射光对的夹角 φ 为:

$$\varphi = n\sqrt{\frac{8}{3}(\delta\theta_1^2 + \delta\theta_2^2 + \delta\theta_3^2 + \delta\theta_1\delta\theta_2 + \delta\theta_2\delta\theta_3 + \delta\theta_1\delta\theta_3)}$$

现有: $\varphi = \theta_{\max}=43.5''$, 假定 $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = \delta\theta_3 = \delta\theta$, $n=1.5$, 可得: $\delta\theta = 7.27''$ 。即对角锥镜的加工要求为:三个直角偏差均不得大于 $7.27''$,这在光学器件加工中是能够达到的。

3 干涉仪信号处理系统

3.1 高频振荡器和幅值运算电路

图4所示是高精度高测速双频激光干涉仪的信号处理框图,高稳定度的高频振荡器(输出频率为 ν)输出的信号经 0° 功分器后分成两路,它们分别与测量信号和参考信号进行混频,得到测量镜运动调制的测量信号 $|\nu - \Delta\nu| \pm \Delta f$ 和参考信号形成的信号 $|\nu - \Delta\nu|$ 。根据幅值运算电路,可以得到测量信号的强弱,从而判断出光路调整的好坏。然后分别将混频后的测量和参考两路信号进行自增益控制放大和整形,最终得到计数器可直接计数的方波脉冲信号。

系统测量速度要求不低于 $1\ 000\ \text{mm/s}$,取 $|\nu - \Delta\nu|=5\ \text{MHz}$,则振荡器频率可取 $723\ \text{MHz}$ 或 $733\ \text{MHz}$ 。此时,计数器最大允许计数频率 f_0 应不低于 $8.16\ \text{MHz}$,选JE0723型介质振荡器。

3.2 延迟线移相系统

处理系统中采用移相延迟线技术来获得相位差为 90° 的两路信号,选用syv型聚乙烯介质同轴电缆,其 $u_r=1, \varepsilon_r=2.2$ 。若信号频率为 $728\ \text{MHz}$,根据

$$\alpha = \omega\sqrt{LC} = \omega\sqrt{\mu_0\mu_r \cdot \varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}$$

其中, α 为单位长度的相移常数; ε_r 为相对介质系数; μ_r 为相对导磁系数。求得移相 $90^\circ(\pi/2)$ 所需电缆线长度为

$80\ \text{mm}$ 。即要获得约 90° 的移相,仅需要 $80\ \text{mm}$ 长的syv型同轴电缆线。

4 实验验证

4.1 实验装置

为了测试干涉仪在运行速度为 $1\ 000\ \text{mm/s}$ 时是否能够正确测量,制作了如图5所示的实验装置。图中,1为双纵模热稳频He-Ne激光器;2为参考角锥镜;3为测量角锥镜;4为小车;5为光栅测头;6为 $4\ \text{m}$ 长导轨。将测量角锥镜固定在一个小车上,小车可由力矩电机通过钢带拖动沿导轨运动,也可由手快速推拉。在距离干涉头约 $2\ \text{m}$ 处放一光栅测头,用于确定基准位置,其型号为SKY-10,测量范围为 $10\ \text{mm}$,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。该光栅测头固定在导轨上,其测量线位于与测量镜入射光与反射光中间位置以减小阿贝误差。

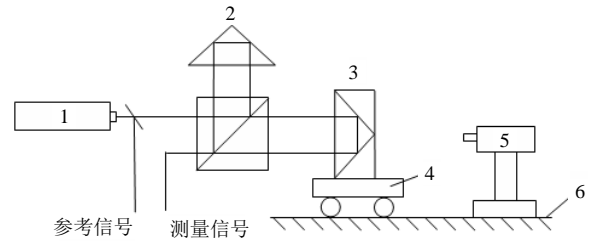


图4 高速测量实验装置

4.2 实验数据及结果分析

$\Delta\nu + \Delta f$ 和 $\Delta\nu - \Delta f$ 分别考核高频段和低频段的计数,因此需要在两个方向上验证激光干涉仪的测量速度。表1和表2分别为小车远离光栅测头方向(频率增加)和接近光栅测头方向(频率减小)上的实验数据。

表1 频率增加方向($\Delta\nu + \Delta f$)上的数据

次数	干涉仪 读数/ μm	光栅测头 读数/ μm	差值/ μm	最大测量速度 $V_{\max}/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
1	2.3	2.3	0	126
2	16.4	16.2	0.2	322
3	-7.5	-7.4	-0.1	403
4	22.4	22.0	0.4	352
5	37.1	37.1	0	670
6	-3.6	-3.5	-0.1	844
7	-0.8	-0.1	-0.7	1 081
8	-26.9	-26.3	-0.6	1 185
9	11.3	11.8	-0.5	947
10	14.3	14.2	0.1	899

由表1和表2得出:当测量镜的运动速度不高于 $1\ 000\ \text{mm/s}$ 时,干涉仪读数与光栅测头读数的差值不大于 $\pm 0.7\ \mu\text{m}$ 。可以认为干涉仪在测量速度为 $1\ 000\ \text{mm/s}$ 时正确计数,达到研究目标的要求。

表2 频率减小方向($\Delta\nu-\Delta f$)上的数据

次数	干涉仪 读数/ μm	光栅测头 读数/ μm	差值/ μm	最大测量速度 $V_{\text{max}}/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
1	33.3	33.4	-0.1	94
2	-4.4	-4.4	0	287
3	12.9	12.9	0	369
4	0.8	0.5	0.3	512
5	-31.2	-31.1	-0.1	688
6	17.2	16.6	0.6	930
7	22.2	22.7	-0.5	942
8	6.7	6.3	0.4	1 074
9	16.5	16.1	0.4	1 003
10	14.3	14.5	-0.2	1 167

实际测定结果为:在800 mm内(受标准仪器行程限制)偏差 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

(1) 采用长度为206 mm的普通全内腔He-Ne激光管构成双纵模热稳频光源,其模间隔为 $\Delta\nu = c/2nL$,原理上对测量速度几乎无限制。

(2) 以石英晶体提供频率高达723 MHz的振荡源作为基准信号,可得到 $5 \text{ MHz} \pm \Delta f$ 的信号,进入可逆计数器,使系统具有交流系统的优点,既无直流漂移的问题,又解决了现有其他双频激光干涉仪频率小或结构复杂的问题,频率稳定性好,测量速度可高达1 000 mm/s以上,并具有足够的抗干扰能力。

(3) 以CPLD实现高集成度的可逆计数器系统,简化了电路系统,提高了系统的可靠性,而且器件工作频率可达44 MHz,能应用于各种高速脉冲可逆计数场合。

参 考 文 献

- [1] NORMAN B. Recent advance in displacement measuring interferometry[J]. Meas Sci Technology, 1993, 21(4): 907-926.
- [2] OKA K, TSUKADA M, OHTSUKA Y. Real-time phase de-modulator for optical heterodyne detection processes[J]. Meas Sci Technology, 1992, 22(2): 106-110.

- [3] POPOV E G, POPOV G M. Small pellicle laser interferometers for the space optics testing[J]. Advanced Optoelectronics and Lasers, 2005, 2(3): 306-309.
- [4] NORDIN D, HYYPPA K. Single-stage photodiode opamp solution suited for a self-mixing FMCW system[J]. Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1820-1824.
- [5] NORGIA M, DONATI S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry[J]. Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1765-1770.
- [6] 沈福金, 谭汝谋. 从CIMT'99看我国机床工业的进步和差距[J]. 制造技术与机床, 2002, 11(12): 5-6.
- SHEN Fu-jin, TAN Ru-mou. Focusing on advancement and gap of machine tool industry of China from CIMT'99[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1999, 11(12): 5-6.
- [7] 步海光. 激光多普勒干涉仪在机床测量方面的应用[J]. 制造技术与机床, 2003, 12(3): 73-74.
- BU Hai-guang. Application of laser Doppler interferometer in measurement for machine tool[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2003, 12(3): 73-74.
- [8] 高 赛, 殷纯永. 高测速双频激光干涉仪[J]. 光学技术, 2001, 27(3): 238-239.
- GAO Sai, YIN Chun-yong. High measurement speed dual-frequency laser interferometer[J]. Optical Technique, 2001, 27(3): 238-239.
- [9] 闫晓茹. 高速双纵模双频激光干涉仪的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- YAN Xiao-ru. Study of high measuring speed dual-frequency laser interferometer system with two longitudinal modes[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [10] 尹伯彪, 杨春生, 张 涛, 等. 双纵模热稳频模糊控制方法的研究[J]. 中国测试技术, 2003, (3): 15-16.
- YIN Bo-biao, YANG Chun-sheng, ZHANG Tao, et al. The studying on the fuzzy controlling method of the frequency stabilization of dual-wave length laser[J]. China Measurement Technology, 2003, (3): 15-16.
- [11] SHU Lan. Properties and stability of max-product fuzzy bi-directional associative memory[J]. Journal of Electronics Science Technology of China, 2005, 3(2): 175-177.

编辑 漆 蓉