

激光干涉仪数字测角的新方法及其应用

王贵甫, 陈桂林, 陈雨良

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:介绍了一种基于迈克耳孙干涉仪的精密角度测量系统,该系统利用迈克耳孙干涉仪在几何量测量中的干涉测量技术,通过转换将角位移转换为可以反映干涉光路中光程差变化的线位移,并通过相应电路对干涉条纹进行处理,从而实现了大转角的精密测量。与以往类似系统相比,该系统具有结构简单、误差恒定、测量精度高、测角范围大、易于数字化等特点。同时,文章还对系统的构成原理、设计注意事项和精度等作了有关的理论分析。

关键词:迈克耳孙干涉仪;激光;角度;测量

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

1 引言

在科研和生产过程中,经常遇到要对物体的转动角度进行精密测量的情况。传统上,物体转动角度的测量方法主要有:利用光栅莫尔条纹现象的光栅角度传感器、码盘测角;利用电磁原理工作电磁传感器如电容式角度和角位移传感器、感应同步器、磁栅式传感器测角等,这些测量方法各有特点,有些方法目前仍在被广泛地使用。但是,在有些情况下,大角度或角位移进行高精度测量对一些传统的测量方法和技术不能很好地满足要求,因而,设计一种能够解决上述问题的测量仪器就显得非常必要。众所周知,干涉技术在精密测量中已获得了非常广泛的应用,特别是激光出现及激光技术的发展,使这项技术在精密测量中的应用突破了以往由于缺乏亮度高、单色性好的光源的局限性,大大地促进了干涉仪在测量中的应用,从而使利用光波干涉技术进行测量逐渐成为科研与生产中精密测量的主要手段之一。目前,人们利用各种干涉仪可以进行长度、角度、粗糙度等物理量的测量,在这些物理量的测量中,利用干涉技术测角是干涉技术在几何量测量中的最早和最重要的应用。本文提出了一种基于激光干涉测角技术的测角系统,并对系统的构成、工作原理及精度进行相应的分析。

2 系统介绍

利用激光干涉技术测量角度的系统很多,其中大多数的应用是基于迈克耳孙干涉仪技术的干涉测角系统。一般地,此类系统主要由激光器、稳频器、激光电源、干涉仪、光电探测器及信号处理电路和显示打印系统组成,图1是此类系统的组成原理框图。

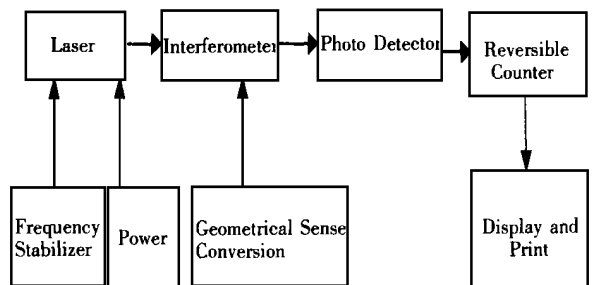


Fig. 1 Functional block diagram of measurement system

3 系统工作原理

本系统物体转动角度的主要测量装置基于迈克耳孙干涉测长仪。与其它类似系统不同的是本系统将被测物体转动的角位移通过一个转台转换成迈克耳孙测长仪能够方便、精确测量的线位移。图(2)为测量系统的原理图。

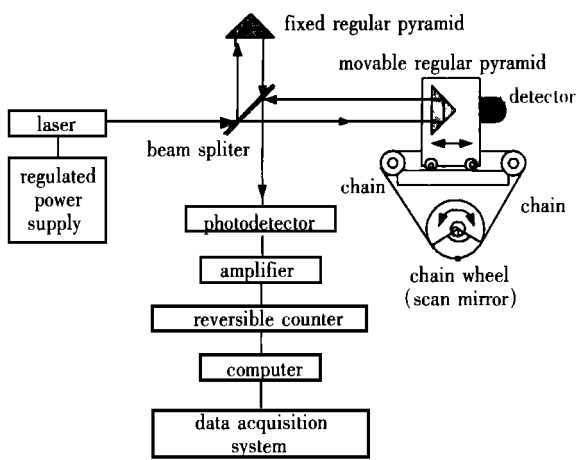


Fig. 2 Principle figure of angle measurement

图中激光器发射的相干光经分束器分束后分别传播到可动角锥棱镜(三面直角棱镜)和固定的角锥棱镜,经反射后到达光电探测器。可动角锥棱镜是迈克耳孙干涉仪的动反射镜,它安装在滑车上并由直线导轨控制以保证其作直线运动。物体转动的角度通过与转台轮紧密结合的钢带传动系统转换为可动角锥棱镜的线位移,由此导致干涉系统两路光程差的变化而产生干涉条纹的移动。

光电探测器将接收条纹的移动并通过后级电路将转换为电脉冲,通过可逆计数系统对脉冲计数以达到计量角度的目的。

系统通过可逆计数器对角度脉冲进行计数,目的在于使测量能够克服外界震动及干涉仪的机械传动不平稳等因素的影响。因为,由于上述因素的影响,使测量角锥棱镜在正向移动过程中,可能产生随机的反向运动。尽管这种运动有时非常小,但足以影响干涉仪的测量精度。可逆计数器的方向判别电路可把计数脉冲分成加、减脉冲两种情况。这样就可做到可动角锥棱镜正向移动时引起加脉冲,反向移动时引起减脉冲,使测量结果能够准确反映测量镜的实际移动距离。对于本系统而言就是能够准确反映转台转动的角位移。

4 信号处理

系统的信号处理过程如图 3 所示。光电探测器产生的正弦信号经前置放大器放大得到具有一定电压幅度的信号,后可经电压比较器等整形电路转换处理成矩形电脉冲输入下级电路。

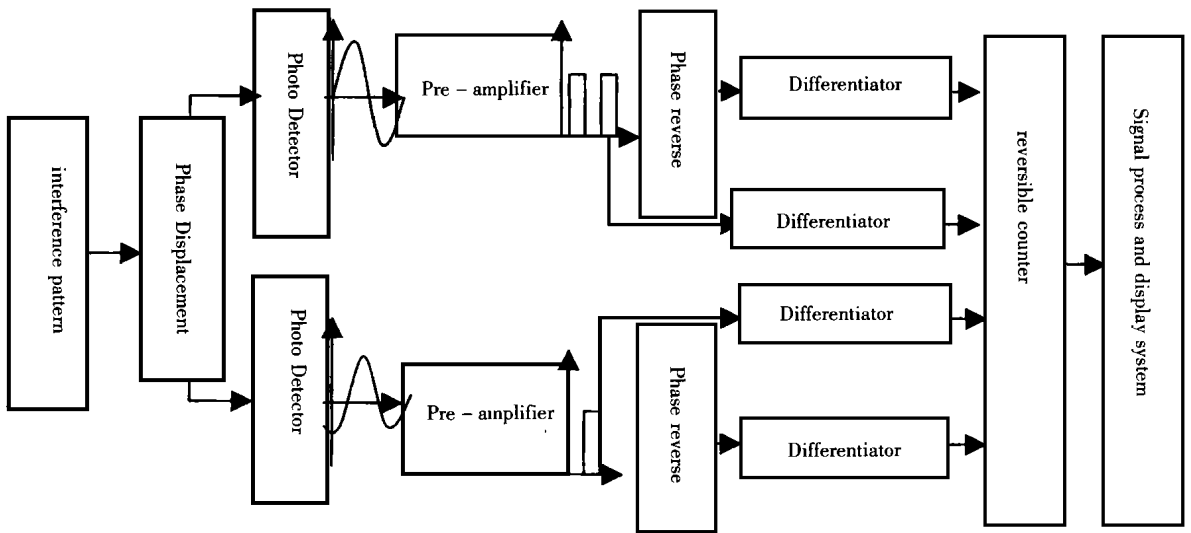


Fig. 3 Principle of reversible counter

为了实现可逆计数,干涉系统必须对干涉条纹进行移相。移相就是将干涉条纹分成位相彼此相对移动 $\pi/2$ 的两部分,分别送到两光电探测器上。于是光电探测器便可输出两路位相差为 $\pi/2$ 的电信号,经整形放大及倒相,变成四个矩形波脉冲信号,再经微分后,得到四个位相依次相差 $\pi/2$ 的脉冲。若将脉冲按滑车正向移动位相次序排列为 1, 2, 3, 4; 反向移动位相次序为 1, 4, 3, 2, 就可在逻辑线路上,根据脉冲 1 的后面是 2 或 4 来判

断是正向脉冲还是反向脉冲,将此脉冲分别送入加脉冲的“门”中或减脉冲的“门”中去,即可达到辨向目的。这种条纹判向的逻辑电路不仅能判别测量镜的移动方向,而且在判别的同时完成四倍频,此时一个计数脉冲实际代表测量镜移动 $\lambda/8$ 距离,因此,用这种条纹四倍频计数测量方法可使灵敏度提高四倍。理论上,在光电探测器响应速度足够快的情况下,系统通过选择不同的转台半径,可以得到不同的角分辨率,但为了减小仪器的体

积,可以在仪器体积相同的条件下通过对电路进行简单的细分处理达到所希望的不同角分辨率,而信号的电子线路细分技术难度并不大,其方法主要有振幅细分、位相细分等,笔者通过相位细分技术曾完成了对输出信号的 20 细分电路的设计与制作。

5 系统的角分辨率

系统的角分辨率分析如下:

在图 2 中,设:转台轮的半径为 R ,其转角为 θ ,滑车移动的距离 L ,此时移过探测器的干涉条纹的条纹数为 N ,空气折射率为 n ,激光波长为 λ ,电路细分数 k :

则有:

$$L = \theta R = N \lambda / 2nk \quad (1)$$

故转台转过的角度可表示为:

$$\theta = N \lambda / 2Rnk \quad (2)$$

由公式(2)可知:在激光波长一定的条件下,测角系统单位脉冲数所代表的转角大小只与转台轮半径有关,转台轮半径越大,角分辨率越高。如 $R = 4\text{cm}$, $\lambda = 632.8\text{nm}$, $N = 1$, $n = 1$, $k = 20$,则系统的分辨率约为 $8.2 \times 10^{-2}\text{s}$,这样的分辨率比通常的测角系统要高出三个以上的数量级。

6 精度分析

我们根据(2)式来分析系统的精度,由(2)式可以看到,测量系统存在三个基本的误差。这些误差与测量方法无关,是各种干涉仪都有的误差。它们是:

- (1) 激光波长 λ 的测定误差;
- (2) 电路细分数 k 的测定误差;
- (3) 空气折射率 n 的测定误差;

除此之外,对于本系统而言,影响系统精度的因素还包括:

- (4) 转台本身引起的误差;

此误差包括:加工过程中由于加工工艺不良造成的误差、工作过程中由于环境温度的改变而造成转台的热胀冷缩及装配过程中存在的装配误差等。

设上述因素所造成的转台半径的总的变化量为 ΔR ,则由此而造成的干涉条纹的额外移动量 ΔN 可由下式表示:

$$\theta \Delta R = \Delta N \lambda / 2nk \quad (3)$$

- (5) 直线导轨本身的平直度造成的误差;

若考虑动角锥棱镜在移动过程中由于导轨平直度而造成动角锥棱镜的转动,在棱镜绕其光心转动的角度不大(可达几度)的情况下,光线在棱镜中的光程可保持不变,这对于实际应用中直线导轨的平直度的要求大为降低,而且这个优点在大角度测量行程中更为突出。但当导轨平直度很低而导致棱镜转角过大时,将引起阿贝误差,当测线与视准轴间的距离为 H 、滑车的转角为 φ 时,此误差由式(4)表示。

$$\Delta L = H \sin \varphi \quad (4)$$

由式(3)、(4)可以看到:由于转台、导轨制造加工过程中不可避免地存在着误差,工作环境的变化也将造成误差,当误差较大时,这些因素将引起干涉条纹的变化,从而对测量结果造成影响。因此,设计加工过程中应充分考虑这些影响因素,在测量过程中应尽量设法减小或补偿此误差。

在考虑了上述(4)、(5)两个因素时,(1)式应改为:

$$L = \theta(R + \Delta R) + H \sin \varphi = N \lambda / 2nk \quad (5)$$

此时系统的相对误差可表示为:

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi}{\varphi}\right)^2} \quad (6)$$

实用的激光干涉仪中的激光频率稳定性一般可达 2×10^{-8} 以上,故(6)式中的 $\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ 项在一般的测量中可忽略不计,脉冲式数字量测量仪器都有一个脉冲的计数误差 ($\Delta m = 1$),提高细分数 k 可以减少它对测量结果的影响。

空气折射率的影响是任何测量系统都不可避免的,因此需要精确地测定环境空气的折射率,减少对周围空气的扰动以减少湍流的产生,尽量避免由此而成的干涉条纹的抖动而造成的计量误差。

7 系统测量范围

系统的测角范围理论上仅由光的相干长度和转台的半径决定。此值大小可简单地表示为:

$$\omega = \frac{s}{R} \quad (7)$$

式中, ω 为测量的角度大小, s 为所用激光的相干长度。

实际上,由于激光功率、长距离高精度直线导轨制造等的限制,系统的测角范围很难达到上述

极限。即便如此,与类似系统相比,本系统的测角范围在现有的条件下仍可做到很大。如转台半径取 $R = 4\text{cm}$, 直线导轨长度 $l = 50\text{cm}$, 则系统的 ω 为:

$$\omega = \frac{l}{R} = \frac{50}{4} = 12.5(\text{rad})$$

这是类似系统($\pi/2$)的近 8 倍。而且,在不考虑环境因素影响的情况下,系统的误差在整个测量过程中不随测量角度的变化而变,即与测量角度大小无关。

8 设计要点

(1) 选择干涉仪的光路时应充分考虑系统的调整和使用方便、稳定性及光学、机械加工的难易程度,合理选择动反射镜的类型,降低制作难度,提高系统的可靠性和实用性。

(2) 电路系统应保证干涉条纹转换成电信号后的信号波形好,无明显的失真;信号幅度在整个

参考文献:

- [1] 吴嘉祥. 几何量传感器及其应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [2] 张善盛. 计量光栅技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1985.
- [3] Gerstntner Klaus, Tschudi Theo. New diode laser light source for absolute ranging two-wavelength interferometry[J]. Opt. Eng., 33(7), 1994: 2692- 2696.

A new digital angle measurement technology by using Malchlsn interferometer and its application

WANG Gui-fu, CHEN Gui-jin, CHEN Yu-liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai 200083, China)

Abstract: A precise angle measurement system was presented based on Malchlsn interferometer technology. This system took advantage of the Malchlsn interferometer measurement technology used in the geometrical sense measurement and realized the exact measurement towards the big angle by changing the angle displacement to line displacement and using special circuits to subdivide and measure the interference pattern. This system has several merits such as high measurement precision, wide angle range and high digitalization compared with the other similar systems. The principle of the system and the matters should be paid attention to when design this system were presented, also, precision analysis about the system was given.

Key words: Malchlsn interferometer; laser; angle; measurement

作者简介: 王贵甫(1968-), 男, 江苏徐州人, 工学硕士, 现为中国科学院上海技术物理研究所物理电子学专业三年级博士研究生。主要从事航天遥感技术的研究工作, 已在国内核心期刊上发表论文数篇。

陈桂林, 中国科学院上海技术物理研究所研究员、博士生导师, 风云二号气象卫星副总设计师。

频响范围内均满足系统要求; 系统信号直流成分稳定; 光电接收器相邻两路位相差接近 90° , 且信号稳定; 信噪比高。因此, 选择器件时, 对光电探测器等元件应认真挑选, 尽量使其性能一致, 且应使其最佳灵敏波长与激光器输出光波长匹配。线路选用并联接法, 使调整互不影响。同时, 为了便于对信号进行控制、计数和增强系统的抗干扰能力, 还须对波形进行整形。

9 结 论

由于光的波长非常小, 在简单的辨向和细分的情况下, 系统就可以达到很高的角分辨率, 与其他采用干涉法对角度进行测量的系统相比, 理论分析与实验结果表明, 本系统具有测量角度范围大、误差小、精度高等特点, 特别适合于为要求摆角大、角度测量精度高的系统提供有关运动参数, 同时也可应用于高精密度角度计量等领域。