

迈克耳逊激光干涉仪的数字测角技术*

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: 介绍了一种利用迈克耳逊干涉仪进行精密角度测量的角度测量系统, 该系统利用迈克耳逊干涉仪的干涉技术, 通过转换将角位移转换为干涉仪可以利用的线位移, 并通过专用电路对干涉条纹进行细分、计量, 从而实现了大转角的精密测量。与以往类似系统相比, 该系统克服了测量误差随测量角度增大而增大、测量范围小等不足, 具有测量精度高、测角范围大、数字化程度高等特点。同时, 给出了系统的构成原理、设计注意事项和有关的精度分析。

关键词: 迈克耳逊干涉仪 激光 角度 测量

A digital angle measurement technique based on Michelson interferometer

Wang Guifu, Chen Guilin, Chen Yuliang

(Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083)

Abstract: A digital angle measurement technique based on Michelson interferometer is introduced in the paper. Through changing the angular displacement into linear displacement, using special circuits to subdivide and measure the interference pattern, exact measurement for a big angle is realized. Compared with other similar measuring system, this system can be applied to wider-angle measurement with high accuracy. The principle of the system, some special notes and error analysis have been introduced.

Key words: Michelson interferometer laser angle measurement

引 言

干涉测长是激光在几何量测量中最重要的应用。光波干涉法作为精密测量长度和位移的有力手段问世已久, 在历史上当推迈克耳逊的著名干涉实验, 其测量精度很高, 这在当时以及以后很长一段时间内, 一直是一种世所公认的精度最高的检测手段, 也是最早为公众所认识的光测技术^[1]。但在激光问世之前, 由于缺乏亮度高、单色性好及干涉能力强的光源, 干涉方法的应用有着许多局限性, 近代, 由于激光及激光技术的出现与发展给干涉测长提供了极好的相干光源, 因而使干涉方法的应用突破了光源方面的种种局限性, 使利用光波干涉技术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, 利用干涉方法可以对长度、角度、粗糙度等物理量进行精密测量。在这些测量中, 对大角度或角位移进行高精度测量的要求常常使得传统上的一些角度的测量方法诸如利用光栅莫尔条纹现象工作的光电传感器如光栅角度传感器、码盘, 利用电磁原理工作的电磁传感器如电容式角度和角位移传感器、感应同步器、磁栅式传感器等遇到一些难以克服的问题, 尽管这些传感器目前仍在广泛地被使用。我们提出了一种以激光作为干涉光源的迈克耳逊干涉仪测角系统, 对构成原理及精度进行了论证分析。

* 中国科学院创新工程经费资助项目。

1 系统的组成及工作原理分析

激光干涉测量系统一般主要由激光器、激光稳频器、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 是激光干涉测量角度系统的原理图。系统转动角度的主要测量装置是基于迈克耳逊干涉测长系统。其基本思路是利用转台将转动角位移转换成可以反映为迈克耳逊测长系统中干涉光路的光程变化(光程差)的线位移。由干涉原理可知,干涉级次与光程差有关。因此,当波长一定时,知道干涉级次就可得到光程差,通过换算即可知道要测量角度的大小。

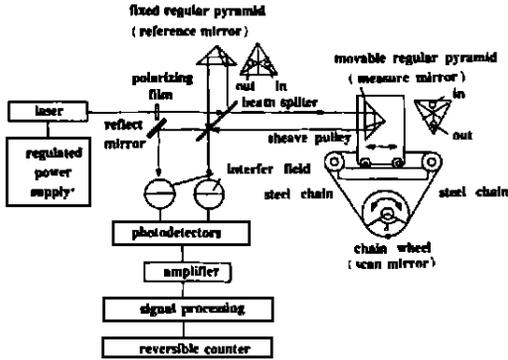


Fig. 1 Principle of angle measurement

图 1 的系统是一种四象限接收的激光干涉测角光路及部分信号处理系统。其中,动角锥棱镜(三面直角棱镜)是迈克耳逊干涉仪的动反射镜(测量镜),它安装在滑车上并由直线导轨控制以保证其作直线运动。被测物体的转动角位移是通过转台轮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,进而反映出角度的变化。

系统的工作过程为:激光器发射的相干光经偏振片、分束器分束后分别传输到可动角锥棱镜和固定的角锥棱镜(参考镜),经反射后再次到达分光镜汇合并在此产生干涉,干涉后的激光又分为两路,通过分光镜和反射镜最后可以得到左右两个干涉场。每个干涉场包含被中央棱线分开的上下两个不同的干涉图。旋转偏振片可使激光在两个角锥棱镜中全反射时产生不同的相位跃变,加上分光镜的作用,最后能得到相位差依次为 $\pi/2$ 的 4 个干涉图,它们对应于 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 四个象限,这些干涉图分别用 4 个光电探测器接收。光电探测器将接收条纹的移动并通过后级电路将其转换为电脉冲,通过可逆计数系统对脉冲计数以达到计量角度的目的。

系统采用角锥棱镜作为参考镜和测量镜的目的是因为角锥棱镜具有一些特殊的光学特性:(1)当入射光满足全反射的条件时,逆向出射光线的方向与入射光平行,这时,如果棱镜向任意方向摆动,出射光线方向保持不变;(2)当棱镜绕其光心转动且转动的角度不太大时(几度),光线在棱镜中的光程可保持不变。棱镜的这些特性使得其作为测量镜运动时对直线导轨的平直度的要求大为降低。这种优点在长距离(大角度)的测量时尤为突出。对于本系统而言,由于采用角锥棱镜作为反射镜后,干涉图样的形状完全与角锥棱镜的位置无关,故可使干涉仪的调整和使用更为简单,稳定性也大为提高。因此,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。系统中偏振片的作用是调节入射激光的偏振方位。

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。这样做到测量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。

由以上分析可以看到,由于系统采用了四象限接收的激光干涉仪,使系统具有了不需要附加任何光学元件就可获得四象限干涉图;当将 0 与 π , $\pi/2$ 与 $3\pi/2$ 两对信号分别输入减法放大器相减时,信号的直流成分自动抵消,从而提高了系统的共模抑制比;系统信号的幅值提高了近1倍,系统工作的稳定性和可靠性也有相应提高等优点。但要指出的是,用4个光电探测器将干涉图转换成按正弦、余弦、负正弦、负余弦规律变化的4路电信号时,要求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。

2 系统的信号处理

系统的信号处理主要是为了实现对角度的最终测量和增强系统的抗干扰能力。本系统的信号处理流程如图2所示。图中,相位差依次为 $\pi/2$ ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)的干涉条纹经光电探测器产生的4路信号经减法放大器^[2]运算放大得到具有一定电压幅度相位差为 $\pi/2$ 的正、余弦信号,此信号经移相电路作移相处理后可得到 M 个依次具有相同相位差的信号,这样便实现了干涉条纹的 M 倍电子细分,后可经电压比较器转换处理成矩形脉冲输入下级电路作进一步 N 倍细分和辨向,至此,系统完成了条纹的 $M \times N$ 倍电子细分与辨向工作。

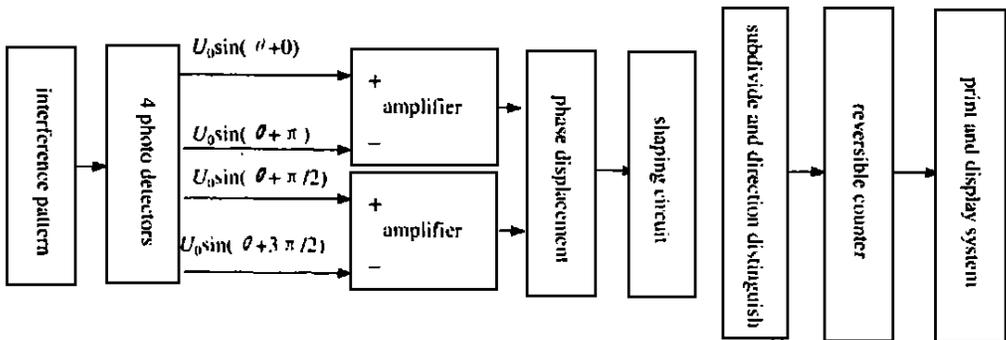


Fig. 2 Flow diagram of signal processing

为了实现角度的测量和结果显示,要把经过上述处理的脉冲信号送入可逆计数器中进行计数,然后将计数结果译码后经显示电路管显示结果或将结果通过计算机处理后由打印机输出。理论上,在光电探测器响应速度足够快的情况下,系统通过选择转台轮的不同半径,可以得到不同的角分辨率。为了减小仪器的体积,可以在相同的仪器体积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,按照上述方法笔者已完成对信号的20细分电路的设计与制作。

3 系统的角分辨率与测量范围

系统装置的角分辨率可作如下推导。如不考虑外界环境因素影响,设转台轮的半径为 R ,转过的角度为 θ ,与此对应的滑车移动的距离为 L ,在此过程中移过探测器的干涉条纹的条纹数为 ΔK ,如此时空气折射率为 n ,激光波长为 λ ,则有: $L = \theta R = \Delta K \lambda / 2n$ (1)

如设系统细分系数 N , 在转台从 0 转到 θ 的过程中计数器接收的脉冲数为 m , 脉冲的角度当量为 q , 则转台转过的角度可表示为:

$$\theta = \Delta K \lambda / 2Rn = mq = \Delta KNq \quad (2)$$

$$\theta = m \lambda / 2NnR \quad (3)$$

$$q = \lambda / 2NnR \quad (4)$$

由(4)式可知:在激光波长和空气折射率一定的条件下,测角系统单位脉冲所代表的转角大小只与转台半径和条纹细分倍数有关,转台半径和细分倍数越大,脉冲当量越小,角分辨率越高。

系统的理论测量范围可由(1)式算出,而系统实际的测量范围则由(3)式决定。一般而言,系统的实际测量范围总是小于理论测量范围。

4 系统精度影响因素分析

理论上,(4)式决定了系统的精度,而由(3)式可知,系统实际精度受转台加工及安装误差、空气折射率 n 的测定误差、激光波长及计数误差等因素所共同影响。除此之外,影响系统精度的因素还有:直线导轨的加工及装配误差、测量环境的改变等。

对于直线导轨本身的平直度造成的误差,由于系统采用了我们所述的光学系统后,使得对导轨的平直度的要求大为降低乃至不再要求,因此,此误差可忽略。而环境因素的影响主要涉及空气折射率的变化、转台直径及驱动滑车运动的钢带长度的变化等。

空气折射率的影响是任何干涉测量系统都不可避免的,故空气折射率 n 的相对精度也是精密干涉测量角度误差的重要因素之一,在测量精度要求甚严的情况下,需要精确地测定环境空气的折射率。目前的空气折射率测量误差不大于 $10^{-7}[3]$,故在一般的测量中可以不予考虑,但必须减少对周围空气的扰动以减少湍流的产生,尽量避免由此而造成的干涉条纹的抖动而造成的计量误差。

由于环境温度变化引起的钢带长度的变化对系统测量精度的影响,主要是环境温度升高所致。因为在这种情况下,如果钢带的热膨胀系数很大,而温度上升很高,将出现由于钢带变长而使测量结果偏小的现象。为了减小由此造成的误差,针对造成误差的原因,可以采用几种方法:(1)改善系统工作环境,尽量减小环境温度的变化范围;(2)尽量选用热膨胀系数小、弹性模量大的材料做滑车的传动带;(3)根据环境温度变化的最大范围,计算出此范围内传动带的最大膨胀长度,再根据传动带的弹性模量算出此长度变化量对应的张力,将此张力预加在传动带上,由此抵消由于温度升高对测量结果造成的影响。需要注意的是,为了不使传动带的张力对滑车造成形变,传动带应作为一个整体与滑车铆接或压接。通过上述处理,系统可以消除传动带长度变化对测量结果的影响。

通过上述分析并由(3)式,系统的相对误差就可表示为:

$$\Delta\theta/\theta = \pm \sqrt{(\Delta\lambda/\lambda)^2 + (\Delta m/m)^2 + (\Delta R/R)^2 + (\Delta n/n)^2} \quad (5)$$

式中, $\Delta R/R$ 项是由转台本身引起的误差,这个误差主要是由于加工工艺不良及工作过程中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原因造成的。就目前精密加工技术而言, ΔR 的值可以控制在微米量级以内,当 R 为厘米量级时, $\Delta R/R$ 为 10^{-3} 量级(对精密测量来说已很大), R 增大, $\Delta R/R$ 的影响将减小。故为了提高测量精度,必须提高转台的加工及装配精度,转台应尽量选用热膨胀系数小的材料来做,同时合理增大转台尺寸。

从(5)式可以看到,如果不考虑其它因素的影响,系统的相对误差与所用的激光波长测量

的相对误差的关系为:
$$\Delta\theta/\theta \propto \Delta N \lambda \quad (6)$$

因此,若光频变化,便将引起波长的变化,故要求激光器频率要有较高的稳定性。实用激光干涉仪中的激光频率稳定性一般可达 2×10^{-8} 以上^[3,4],故(5)式中的 $\Delta N \lambda$ 项在一般的测量中可忽略不计。但由于频率起伏的随机性,故在测量激光波长时应取多次测量的平均值,如果要进行更为精密的测量,则还要保证激光有好的波长再现性。

(5)式中 $\Delta m/m$ 为计数系统对测量系统误差的影响。一般而言,脉冲式数字测量仪器都有一个脉冲的计数误差($\Delta m=1$),由(4)式可知,系统的脉冲当量与条纹的细分数和转台半径的积成反比,提高细分系数 N (增加单位角度的计数脉冲数)可以减少它对测量结果的影响。

由以上分析可以看到,影响测量系统精度的因素是多方面的,它们对测量结果的影响程度不一,在有些情况下某些影响因素可以忽略,但在测量精度要求甚严的情况下,系统必须根据环境温度、湿度、气压的变化不断地对激光波长、空气折射率等影响因素进行修正,运用计算机技术直接得出测量结果。

5 设计讨论

除了以上分析中提到的有关设计时应注意的事项外,在实际设计过程中还应考虑探测器的响应速度与被测物体转动速度之间的关系。设计时,为了满足系统对高速转动物体的转角测量,对光电探测器的要求是响应时间小、光电转换效率高、输出信号(电压或电流)大、线性好、暗电流小、温度漂移低和时间稳定性好。其中探测器的响应时间决定了被测物体的最大转动角速度,干涉条纹明暗变化一次,滑车进退 $1/2$ 个激光波长($n \approx 1$),如果滑车移动 $1/2$ 个激光波长的时间为 t ,则探测器的响应时间 τ 必须远小于时间 t 才能及时跟踪滑车的运动。滑车运动(转台转动)速度越快,移过一个 $1/2$ 激光波长的时间越短。所以,系统允许的最大转动角速度 $|\dot{\theta}|$ 应满足:

$$|\dot{\theta}| = t \gg \tau \quad (7)$$

$$\text{将 } L = \lambda/2, \Delta K = 1, n = 1 \text{ 代入(1)式可得: } \theta = \lambda/2R \quad (8)$$

$$\text{将(8)式代入(7)式得: } |\dot{\theta}| \ll \lambda/2R\tau \quad (9)$$

由(9)式可知,转台半径及探测器响应时间越大,系统允许的被测物体转动的角速度越小。为了进一步实现细分,要求探测器的响应速度还要高得多。此外,在设计中,考虑到探测器参数的分散性,还必须留有余地。故在选择探测器时应首先考虑响应速度快的光电元件如光电三极管或光电二极管等。

6 结果与结论

理论分析与实验结果表明,我们介绍的激光干涉测角系统在导轨长度为 $L=25\text{cm}$ 、激光波长 $\lambda=632.8\text{nm}$ 、空气折射率 $n=1.0003$ 、细分系数 $N=20$ 、转台半径为 $R=5\text{cm}$,忽略环境因素的影响时,系统的角分辨率为 $3.164 \times 10^{-7}\text{rad}$,理论测角范围为 5rad ,实际达到的测量范围有 4.9985rad ,整个测量范围内误差不超过 $4.082 \times 10^{-7}\text{rad}$,相对误差不超过 8.166×10^{-8} 。可见,由于光的波长非常小,系统通过简单的电子细分技术就可以达到很高的角分辨率,与其它采用干涉法对角度进行测量的系统相比,本系统具有测量角度范围大、误差小、精度高,特别适合于测量大摆角的精密测角要求,这一技术可以应用于遥感扫描成像系统扫描镜转动角度的测量、精密角度计量等领域。

钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi(Ti)-TiC 涂层

孙荣禄 郭立新 董尚利 杨德庄

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨, 150001)

摘要: 在 TC4 合金表面进行了激光熔覆 NiCrBSi+TiC, Ti+TiC 金属陶瓷复合涂层的试验, 对涂层的组织和显微硬度进行了分析和测试。结果表明, NiCrBSi+TiC 涂层的组织是在初晶 γ -Ni 和 γ -Ni, Ni₃B, M₂₃(CB)₆, CrB 多元共晶的基底上均匀地分布着 TiC 颗粒, 在激光熔覆过程中 TiC 颗粒只是边缘发生了溶解或熔化; 在 Ti+TiC 涂层中, TiC 颗粒全部溶解或熔化, 冷却时以枝晶形式重新析出。NiCrBSi+TiC 涂层的显微硬度(HV900~ 1100)明显高于 Ti+TiC 的涂层的显微硬度(HV500~ 700)。

关键词: 钛合金 激光熔覆 金属陶瓷复合涂层 组织 显微硬度

Study on laser cladding of NiCrBSi (Ti)-TiC metal-ceramic composite coatings on titanium alloy

Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli, Yang Dezhuang

(School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: NiCrBSi+TiC and Ti+TiC metal-ceramic composite coatings have been respectively cladded on the surface of TC4 alloys by laser. The microstructure and microhardness of coating has been analyzed. The results show that the NiCrBSi+TiC coating is consisted of γ -Ni primary dendrites, γ -Ni and Ni₃B, M₂₃(CB)₆, CrB eutectics and TiC particles uniformly distributing in the substrate. Partial dissolution or melting appearing on the edges of TiC particles in the cladding process is observed. While in the Ti+TiC coating, total dissolution melting of TiC particles and their regrowth in the form of dendrites during cooling are found. The microhardness of NiCrBSi+TiC coating (HV900~ 1200) is distinctly higher than that of Ti+TiC coating (HV600~ 700).

Key words: titanium alloy laser cladding metal-ceramic composite coating microstructure microhardness

引 言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性能好等优点, 是航天、航空和石油化工等工业领域广泛使用

参 考 文 献

- 1 朱伯申, 张 炬. 数字式传感器. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 242~ 271
- 2 许开君, 李忠波. 模拟电子技术. 北京: 机械工业出版社, 1994: 110~ 112
- 3 刘毓兰, 赵瑞生. 长度计量技术. 北京: 机械工业出版社, 1988: 187~ 189
- 4 吴嘉祥. 几何量传感器及其应用. 北京: 中国计量出版社, 1991: 110~ 116

* * *

作者简介: 王贵甫, 男, 1968 年出生。工学硕士, 博士研究生。主要从事航天遥感技术的研究工作。