

文章编号: 1001-3806(2011)05-0603-03

步进电机脉冲当量及回程差的微位移测量系统

刘小亮^{1,2}, 孙少华¹, 任忠国³, 丁宝卫¹, 胡碧涛^{1*}

(1. 兰州大学核科学技术学院, 兰州 730000; 2. 中国人民解放军 91991 部队, 舟山 316000; 3. 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

摘要: 为了精确测量步进电机的脉冲当量和回程差, 提出了一种基于薄膜干涉原理的激光微位移测量系统。该系统以 He-Ne 激光器为光源, 配以牛顿环仪系统、面阵电荷耦合器视频信号采集系统、计算机及数据处理软件等。采用条纹计数法实现微位移测量, 具有 $1/400$ 波长的位移分辨率。与传统测量方法相比, 其精度、灵敏度及稳定性都有较大提高, 特别适合范围在微米及微米以下的位移测量。对 TSA50-C 型商用步进电机进行了测量。结果验证了这种测量系统在普通实验室环境噪声中可以达到纳米级的位移测量精度。结果表明, 对于 $5\mu\text{m}$ 以下的脉冲当量及回程差的测量, 该测量系统的相对误差分别为 2.63% 和 0.44%。

关键词: 测量与计量; 激光技术; 脉冲当量; 回程差; 微位移; He-Ne 激光; 牛顿环仪

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.008

Micro-displacement measurement system of pulse equivalent and return difference of a stepping motor

LIU Xiao-liang^{1,2}, SUN Shao-hua¹, REN Zhong-guo³, DING Bao-wei¹, HU Bi-tao¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. 91991 Unit, People's Liberation Army, Zhoushan 316000, China; 3. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to measure the pulse equivalent and return difference of a stepping motor accurately, a laser micro-displacement measurement system was proposed based on thin film interference. The system includes He-Ne laser source, the Newton-ring device system, the planar CCD video signal gather system, the computer and data processing software. The measurement of micro-displacement was carried out by counting the fringe numbers with the resolution of $1/400$ wavelength. The precision, sensitivity and stability in this system were improved compared with traditional measurement techniques, and the system is particularly suitable for the micron, sub-micron measuring range. The measurement results for a commercial TSA50-C stepping motor show that a displacement accuracy of nanometers scale is achieved in the common laboratorial environment. The results indicate the relative error for less than $5\mu\text{m}$ displacement of pulse equivalent and return difference are 2.63% and 0.44% respectively.

Key words: measurement and metrology; laser technique; pulse equivalent; return difference; micro-displacement; He-Ne laser; Newton-ring device

引言

步进电机^[1]是一种将电脉冲信号换成角位移的机电元件。它的输入量是脉冲序列, 输出量则为相应的增量位移或步进运动。步进电机固有的脉冲驱动的特点, 使得步进电机可以和现代的数字控制技术相结合, 而被广泛地应用于现代物理实验中。而对于范围

在微米及微米以下的位移, 对步进电机实际运行状态的测量与验证就显得十分必要。这里介绍一种以基于空气薄膜干涉原理^[2]微位移测量^[3-4]监测系统, 该系统采用单色性及波长稳定性更好的 He-Ne 激光器^[5]作为光源, 以面阵 CCD^[6]代替传统的光电探测器作为条纹拾取工具, 实现了对步进电机单脉冲下微米及微米以下量级的位移量以及步进电机回程差的测量, 同时可以为步进电机运行状态的实时监测提供一种简便的可视化方案。

1 系统组成及测量原理

1.1 系统组成

步进电机脉冲当量及回程差的微位移测量系统由

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资助项目 (lzujbky-2010-k08)

作者简介: 刘小亮 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光核物理。

* 通讯联系人。E-mail: hubt@lzu.edu.cn

收稿日期: 2010-11-01; 收到修改稿日期: 2010-11-26

基于薄膜干涉原理的牛顿环仪装置^[7]、He-Ne 激光器、短焦透镜、长焦透镜、分光镜、平面高反镜、平凸透镜、步进电机、面阵 CCD 视频信号采集系统、计算机及数据处理软件等组成,如图 1 所示。

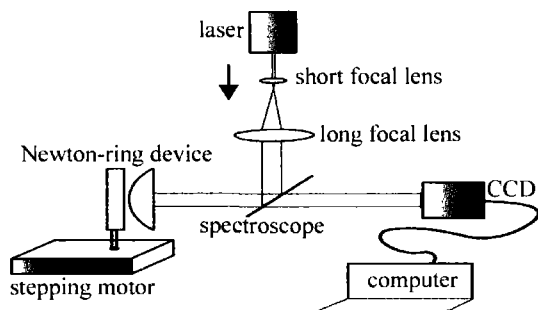


Fig. 1 Basic optic path of the system

1.2 系统测量原理

He-Ne 激光器发出波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的激光束,它经过一个由短、长焦距透镜组成的高斯光束准直系统^[8]准直之后,得到一束方向性很好的高斯光束。准直后的高斯光束经 45° 分光镜后的反射光,垂直入射到由平凸透镜和固定在步进电机上的平面高反镜组成的牛顿环仪上,从而产生薄膜干涉效应,干涉条纹经分光镜后通过 CCD 信号采集系统接收。当薄膜厚度每改变半个波长,干涉条纹就沿一定方向明暗交替变化一次,条纹移动量利用 CCD 信号采集系统和计算机系统及相关数据处理软件得出,从而获取步进电机的位移量。

牛顿环仪装置是由一块曲率半径较大的平凸透镜以其凸面放在一块光学玻璃平板上构成,如图 2 所示。

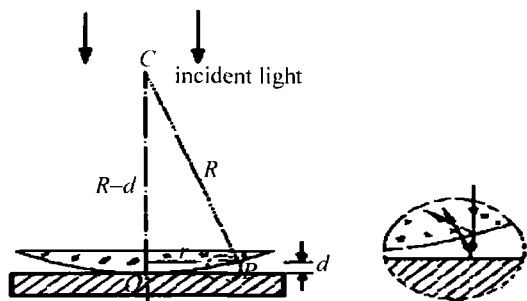


Fig. 2 System of Newton-ring device

透镜的凸面与玻璃平板之间形成一层厚度从中心到边缘逐渐增加的空气膜,若以平行单色光垂直照射到牛顿环上,则经空气层上、下表面反射的二光束满足相干光的条件,相遇后将发生干涉现象。从透镜上看到的干涉条纹是以玻璃接触点为中心的一系列明暗相间的圆环,这就是牛顿环。由于同一干涉环上各处的空气层厚度是相同的,因此它属于等厚干涉^[9]。根据光的干涉条件,考虑半波损,在空气

厚度为 d 的地方,空气层上下两个表面处反射光的光程差为:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda, & (k = 1, 2, 3, \dots, (\text{明纹})) \\ (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, & (k = 0, 1, 2, \dots, (\text{暗纹})) \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ 为平行光波长。

由(1)式可知,两相邻亮纹或相邻暗纹之间,光程差之差为一个波长,两相邻条纹之间的膜层厚度差为半个波长。即每当表面条纹移动一条或变化一次,则该处厚度改变 $\lambda/2$ 。从而可得:

$$D(t) = \lambda F(t)/2 \quad (2)$$

式中, $D(t)$ 为膜层厚度差,而 $F(t)$ 为干涉条纹移动数。

当步进电机带动平面高反镜移动一定距离的 $D(t)$,则高反镜与平凸透镜之间形成的空气膜膜厚改变 $D(t)$,从而干涉条纹相应地产生移动。利用 CCD 信号采集系统和计算机软硬件系统精确地测出干涉条纹移动的数目 $F(t)$,最后通过(2)式就可计算出步进电机的移动距离 $D(t)$ 。

2 脉冲当量的测量与回程差的测量

脉冲当量即单个脉冲所产生的位移量,也就是步进电机在一个脉冲下的位移量。在该系统中,步进电机的位移量对应于牛顿环仪的膜厚改变量 $D(t)$,通过 CCD 信号采集系统和计算机系统测得条纹移动数目 $F(t)$,由(2)式可导出脉冲当量公式为:

$$P = \lambda F(t)/2 \quad (3)$$

同时,对于回程差的测量,可以通过步进电机的往复运行体现出来,即在步进电机完成一定的正向行进脉冲数量后,逆向完成相同的脉冲数量,在两次运行的同时,分别记录下干涉条纹的移动数目 $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$,从而由(2)式可导出回程差公式为:

$$R = \frac{\lambda}{2} [F_1(t) - F_2(t)] \quad (4)$$

3 实验结果及精度分析

3.1 实验结果

实验中采用的是卓立汉光公司研究生产的 TSA50-C 型步进电机,在 64 细分下,该平台理论脉冲当量为 $0.078125\mu\text{m}$,回程差小于 $5\mu\text{m}$ 。应用该微位移测量系统对其脉冲当量以及回程差分别进行了 20 组测量,所测到的干涉条纹如图 3 所示。

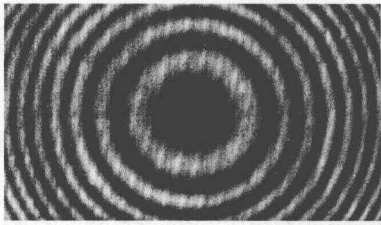


Fig. 3 Obvious interference image of Newton-ring

实测中,以2级暗环中心为参考,记录暗环的移动量。脉冲当量的最终测量结果为:

$$\begin{cases} \bar{P} = 0.00723 \pm 0.0019 (\mu\text{m}) \\ \nu_{\bar{P}} = \frac{0.0019}{0.0723} \times 100\% \approx 2.63\% \end{cases} \quad (5)$$

式中, \bar{P} 为脉冲当量的最终测量结果, $\nu_{\bar{P}}$ 为脉冲当量的相对误差。

回程差的测量结果为:

$$\begin{cases} \bar{R} = 2.5723 \pm 0.0113 (\mu\text{m}) \\ \nu_{\bar{R}} = \frac{0.0113}{2.5723} \times 100\% \approx 0.44\% \end{cases} \quad (6)$$

式中, \bar{R} 为回程差的最终测量结果, $\nu_{\bar{R}}$ 为回程差的相对误差。

3.2 精度分析

影响测量精度的因素主要有3点:(1)该型号步进电机受自身动态不稳定性^[10]的影响,脉冲当量存在一个波动因子,这是脉冲当量的测量结果与理论脉冲当量 $0.078125\mu\text{m}$ 相差 $0.005825\mu\text{m}$ 的主要因素。(2)干涉条纹的拾取。该系统采用面阵CCD为条纹拾取工具,提高了系统的测量精度并基本消除了人为的计数误差。一对明暗条纹所对应的被测物体的位移是 $\lambda/2$,但在传统的测量系统里一般以人眼通过示波器读取,而人眼通过示波器大都只能分辨10幅度值~20幅度值,故人眼只能达到 $\lambda/20 \sim \lambda/40$ 的精度^[4],而使用面阵CCD,系统可探测干涉条纹的最小移动为一个像元。在实际测量中,以2级、3级暗环为参考,两暗环间距达到200个像元。系统采用波长 $0.6328\mu\text{m}$ 的He-Ne激光器作为光源,像元尺寸为 $2.2\mu\text{m} \times 2.2\mu\text{m}$,光谱响应范围在 $0.4\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$ 之间,具有 2592×1944 个像元的面阵CCD为条纹拾取工具,其理论分辨率可达到 $0.0016\mu\text{m}$,这就提高了条纹分辨能力。

(3)空气扰动、外界振动引起条纹移动,从而对测量产生较大影响。经过多次设计调整,整个系统放在减震台上,由平面高反镜、平凸透镜、分光镜及CCD探头这4部分组成的光路分系统固定于同一导轨上,很好地解决了这一问题。

4 结论

介绍了基于薄膜干涉原理的激光微位移测量系统,采用线阵CCD同计算机相结合的方法,可以实现对步进电机脉冲当量和回程差的测量,与传统测量方法相比,具有灵敏度高、结构简单、成本低的优点,特别适合机械部件在微米及微米范围以下的位移测量。同时也为步进电机的位移量在微米、纳米量级时的运行状态,提供了一个可靠的实时监测手段。

参考文献

- [1] DING W X, YANG D A, SONG X G. The control principle and SCM control realizations of the stepping motor[J]. Coal Mine Machinery, 2005(6):127-129(in Chinese).
- [2] CHEN X L, ZHONG Sh H, HU B L. A discussion on the thin film interference[J]. Journal of Baoji College of Arts and Science, 2000, 20(1):59-61(in Chinese).
- [3] LI Zh Y, YU Y G, YE H Y. Measuring tiny displacement based on moderate optical feedback Self-mixing interferometry[J]. Laser Technology, 2008, 32(5):499-501(in Chinese).
- [4] ZHAO Y L, XU Zh L, LI K D. Laser micro-displacement measurement system based on CCD[J]. Laser Technology, 2003, 27(1):73-75(in Chinese).
- [5] HAN Y M, ZHANG Sh L, LI K L. Power tuning for 632.8nm wavelength He-Ne lasers with various frequency spacing by mode-split[J]. Laser Technology, 1997, 21(2):111-114(in Chinese).
- [6] LI G N, LIU Y Y, JIN L X. Area CCD imaging system used in moving target tracking[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3):558-564(in Chinese).
- [7] ZHONG X H. Modern fundamentals of optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2004:164-177(in Chinese).
- [8] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, et al. Laser theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:79-83(in Chinese).
- [9] ZHANG Zh M, SHEN Y H, CHEN H F. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:106-111(in Chinese).
- [10] WANG Y, WANG Z P, GU Ch L. Dynamic instability in hybrid stepping motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(2):16-20(in Chinese).