

文章编号 1004-924X(2010)12-2603-07

# 纳米三坐标测量机接触式测头触发控制

程方, 费业泰

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为高灵敏度纳米三坐标测量机(nano-CMM)接触式测头提出了一种高精度高效率的触发控制策略。该策略使用了一种自行研制的4-DVD接触式测头,工件接触测头产生的微小变形会导致测头产生灵敏度极高的触发信号。系统使用超声波马达整合不同驱动模式,实现了高速逼近和低速触发的有效结合。触发过程使用了二次触发策略,即第一次触发获得接触位置的范围,第二次触发用极低的速度,详细记录触发点附近的触发信号,并通过线性拟合的方式求得信号曲线转折点,即为触发位置。该方法解决了驱动分辨率和行程大小的矛盾。实验结果显示:该方法可以有效地避免测头系统的塑性形变,触发位置的重复性可在10 nm以内。结果表明,本文提出的 nano-CMM 接触式测头触发控制策略在保证精度和稳定性的前提下,表现出了良好的控制效率。

**关键词:** 纳米三坐标测量机;接触式测头;超声波马达;二次触发

**中图分类号:** TP216; TH72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2603

## Trigger control of touch probe for nano-CMM

CHENG Fang, FEI Ye-tai

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A high precision and high efficiency trigger control scheme for the touch probe in a high-sensitive nano Coordinate Measurement Machine(nano-CMM) is developed, and a self-developed 4-DVD touch probe is used in the proposed scheme. When the probe touches the workpiece, the tiny deformation of the probing system will generate a high-sensitive trigger signal. By integrating different driving modes of an ultrasonic motor, the trigger control scheme realizes the combination of high-speed approaching and low-speed touching. Furthermore, a double-trigger method is used in the touching process. The first trigger is to determine the rough range of the trigger point and the second trigger is to record the trigger signal in detail by a very low speed and to work out the turning point of the trigger signal curve by a linear fitting i. e. the trigger position. This method solves the paradox between traveling range and driving resolution. Experimental results show that the proposed method will avoid the permanent deformation during touching process and the repeatability of the trigger point is within 10 nm. It concludes that this trigger control method for a nano-CMM touch trigger probe not only offers the higher precision and reliability, but also shows the acceptable control efficiency.

**Key words:** nano Coordinate Measurement Machine(nano-CMM); touch probe; ultrasonic motor; double-trigger method

收稿日期:2010-01-04;修订日期:2010-03-01.

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作资助项目(No. 50420120134)

## 1 引言

随着纳米三维测量技术的发展,人们相继开发了多种高精度接触式测头<sup>[1-4]</sup>。相对于传统测头,新式接触式测头表现出更高的灵敏度,同时也对控制策略提出更高要求。纳米三维坐标机(nano Coordinate Measurement Machine, nano-CMM)的测头是坐标测量系统的重要部件,为 nano-CMM 测头建立完备的触发控制系统至少需要 3 个必要条件:大行程高分辨率驱动,大量程高精度的位移测量,以及可靠的控制策略。目前,应用于 nano-CMM 的接触式测头多采用各种高灵敏度的传感器作为测头系统的敏感元件,文献[2-4]分别采用 DVD 读取头和压阻式应变片作为测头系统的敏感元件,并结合一定的弹性机构实现高灵敏触发。这些敏感元件往往只在很小的响应范围内输出灵敏度很高的信号,因此这种设计需要足够慢的接触速度以获取准确的触发位置,但是低速驱动与控制效率存在矛盾。如何实现高速逼近,低速接触成为触发控制的一项关键技术。传统的伺服马达无法避免空回的问题,不适用于高精度驱动场合,而基于压电陶瓷和柔性机构的精密定位平台往往只用于微位移驱动<sup>[6-7]</sup>。一种改善途径是使用伺服马达加压电陶瓷的组合结构<sup>[8]</sup>,但这种组合结构的机械结构和驱动系统很复杂,使安装调整成为另一难题,并且系统体积较大。近年来,很多基于多个压电陶瓷元件的组合式驱动方式被提出并产品化,超声波马达就是其中一种。这种方式通过切换不同的驱动模式可以实现不同的驱动行程和速度,且体积小,安装简便<sup>[9]</sup>,但是超声波马达的速度与驱动电压的对应关系复杂,完全没有控制模型,需要建立可靠的闭环控制系统<sup>[10-12]</sup>。另外, nano-CMM 测头触发控制还需要一高精度位移反馈系统。激光干涉仪以其大量程高精度被广泛应用于高精度位移测量,但是其读数往往易受温度和气流等环境因素的影响。此外,目前商品化的激光干涉仪均是直接提供数字量输出,因此很难和测头的模拟信号进行同步采样。最近,有人提出高精度、大量程,且有模拟量输出<sup>[13-14]</sup>的信号光栅干涉仪(Linear Diffraction Grating Interferometer, LDGI),其可以和测头信号一起通过同一数据采集设备进行采

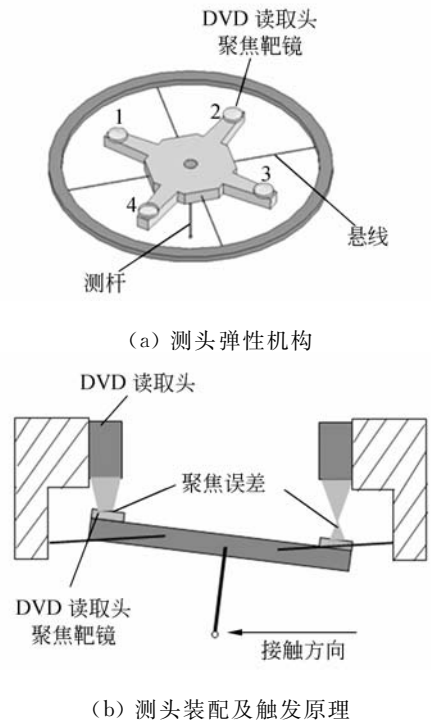
集,非常适合作为测头触发控制系统的位移反馈。因此设计合理的控制方案对马达不同驱动模式进行整合,对测头信号和传感器信号进行同步采样,并建立完备的触发控制系统,具有重要的研究意义。

本文提出了一种用于 nano-CMM 接触式测头的触发控制策略。该策略基于一种自行研制的 4-DVD 接触式测头产生高灵敏度触发信号,并使用超声马达整合不同的驱动模式,从而实现了高速逼近和低速触发的结合,解决了驱动分辨率和行程大小的矛盾。

## 2 测头触发原理

### 2.1 nano-CMM 接触式测头的结构

本研究所采用的测头结构如图 1 所示<sup>[15]</sup>。当测头未接触工件时,调整反射镜面处于 DVD 读取头焦点位置,当测头接触工件时,钨丝发生形变,带动靶镜产生上下位移, DVD 读取头随之产生聚焦误差信号,通过光电耦合器件输出电压信号。文献[1-4]也提出了多种类似的弹性元件结合高灵敏度传感器的结构。



(b) Assembling and trigger principle of probe

图 1 4-DVD 测头结构

Fig. 1 Structure of 4-DVD probe

### 2.2 测头信号分析

研究的测头采用 4 只 DVD 读取头结构。在测头接触工件后,4 只 DVD 读取头各自输出聚焦误差信号,设为  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 。

令测头触发信号  $S$  为:

$$S = |S_1| + |S_2| + |S_3| + |S_4| \quad (1)$$

不同于传统三坐标测量机的阶跃式触发信号,该测头在驱动分辨率足够高时候,输出的  $S$  为一渐变信号,该信号与水平信号的交点所对应的时刻即为触发时刻。具体方法是,先确定触发位置的范围,此范围以外的两段分别用最小二乘拟合,交点即为触发位置,如图 2 所示。

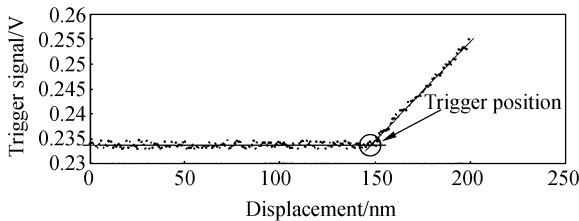


图 2 测头信号分析  
Fig. 2 Probe signal analysis

### 2.3 位移信号同步采样

本研究采用了一种新型位移传感器,线性衍射光栅干涉仪(LDGI)<sup>[13-14]</sup>。类似于常规线性编码器,LDGI 可以输出正交弦波信号,通过四细分辨向计数和相位细分法<sup>[16-17]</sup>计算出位移,分辨率达 1 nm,15 mm 内具有 10 nm 的测量重复性。设  $u_i$  和  $v_i$  分别为两路信号第  $i$  个采样点的值,某段位移共采得  $n$  个位移信号值。两路弦波信号相除可获得正切值,则可求得起始点和停止点的相位  $\theta_0$  和  $\theta_n$ :

$$\theta_0 = \begin{cases} \arctan \frac{v_0}{u_0} & \frac{v_0}{u_0} \geq 0 \\ \arctan \frac{v_0}{u_0} + \frac{\pi}{2} & \frac{v_0}{u_0} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\theta_n = \begin{cases} \arctan \frac{v_n}{u_n} & \frac{v_n}{u_n} \geq 0 \\ \arctan \frac{v_n}{u_n} + \frac{\pi}{2} & \frac{v_n}{u_n} < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

设四细分辨向计数结果为  $N$ ,每周期信号对应位移  $d$ ,则位移  $s$  为:

$$s = \left[ N + \frac{(\theta_n - \theta_0)}{\pi/2} \right] \cdot \frac{d}{4}. \quad (4)$$

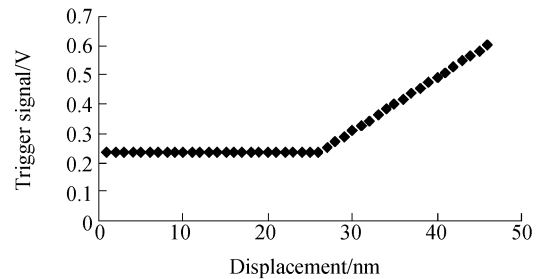
与常规光栅编码器相比,LDGI 使用 1200

1/nm 的全息光栅,因此可获得更高的分辨率和精度,通过与激光干涉仪对比验证,LDGI 在 15 mm 内可获得小于 10 nm 的测量重复性。与激光干涉仪相比,由于 LDGI 使用光栅线距作为位移基准,LDGI 读数更加稳定。对于高精度测头触发控制而言,LDGI 更为突出的优点是可以直接输出模拟电压信号,使用同一个信号采集系统可以与测头信号实现同步采样。因此,即使是在触发完成后确定了测头存在一定过冲行程,亦可通过历史数据查询的方法计算出触发时刻的位移。图(2)中的信号-位移曲线即是通过测头信号各点与响应的 LDGI 位移测量结果综合建立的。

## 3 二次触发策略

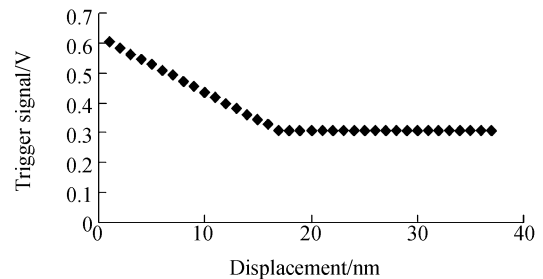
### 3.1 速度对精度的影响

当工件以 1 mm/s 的速度接触测头时,程序中每个循环时间为 1 ms(测头信号采样速度可以很高,每毫秒一次查询可以通过求平均的办法大大减小随机噪声的影响),因此在接触测头后,工件最大可能发生的最大过冲为 1  $\mu$ m,该过冲可能导致测头无法精确回到初始位置。如图 3 所示,



(a)接触工件前的测头信号

(a)Probe signals before touching



(b)接触工件后的测头信号

(b)Probe signals after touching

图 3 高速接触导致的塑性变形

Fig. 3 Permanent deformation caused by high-speed touching

接触工件前后的测头信号无法保持同一水平,说明测头没有回到初始位置。此外,速度过快会导致测头信号曲线的细节缺失,影响计算精度。因此触发速度必须足够小。然而,当测头距工件较远时,低速逼近将大大降低测量效率。因此,本文提出了一种高速逼近,低速触发的控制策略。

### 3.2 超声波马达的工作原理

本研究采用以色列 nanomotion 公司的超声波马达 HR4。该马达有 3 种驱动模式。AC 模式下,压电陶瓷元件产生高频椭圆运动,利用摩擦力驱动平台产生连续直线运动;GATE 模式下,压电陶瓷元件的动作频率由用户设定,每步最小可产生 15~20 nm 位移;DC 模式下,HR4 类似于普通压电陶瓷马达,可实现高分辨率低速驱动,最小位移可达 1 nm。

### 3.3 二次触发控制策略

使用上述 3 种驱动模式整合的逼近控制方法,可以兼顾控制的准确性和效率。

先使用 AC 模式让工件运动到距离测头 0.5 mm 范围内,为了确保机械系统的稳定性,使用 BP 神经网络结合 PID 控制获得 1 mm/s 的匀速运动<sup>[10]</sup>。在 0.5 mm 范围内使用 GATE 模式,获得步距为 20 nm, 250 step/s 的发生速率,即 5  $\mu\text{m/s}$  的速度,直至第一次触发发生。判断触发的依据是,100 nm 内测头信号的变化量  $\delta$  大于某一阈值  $\delta_0$ , 认为已经触发, 停止运动。此处 100 nm 的设定是基于多次实验,若考察测头信号变化率的位移设定过小,则可能把随机信号噪声误当作触发;若设定过大,则会引起较大的过冲行程,可能带来不可恢复的变形。

使用 GATE 模式驱动,触发控制的分辨率受限于最小步距,约为 15~20 nm。为了更精确地确定触发位置,须使用第二次触发。即在 GATE 模式触发之后,控制工件向后退出 200 nm,再改用 DC 模式驱动,以 10 nm/s 的速度向前驱动 200 nm,记录测头触发信号。由于 DC 模式驱动分辨率很高,可以通过 1.2 节的方法计算出精确的触发位置,图 2 所显示的触发信号即为 DC 模式低速驱动时取得的。

上述二次触发控制策略,可由图 4 中的算法流程来描述。

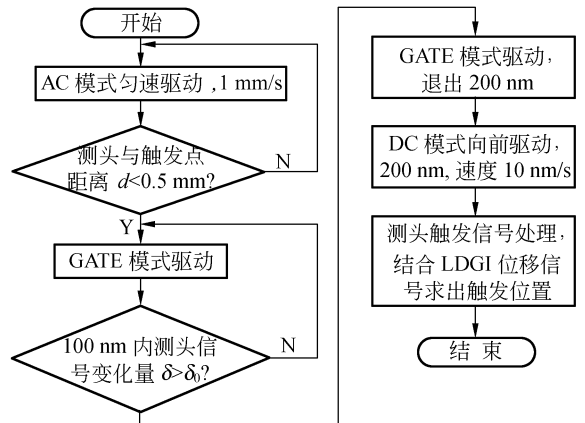


图 4 二次触发控制策略算法流程图

Fig. 4 Flow chart of double-trigger method

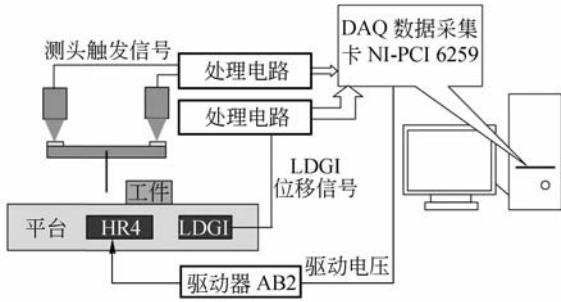
值得一提的是,并非每次触发都需经历上述完整过程,只在第一次接触工件时,由于工件和测头的距离为未知,需要较长时间进行寻找,在此过程中为避免撞坏测头,留有较大余量,因此需要较多时间。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 实验系统架设

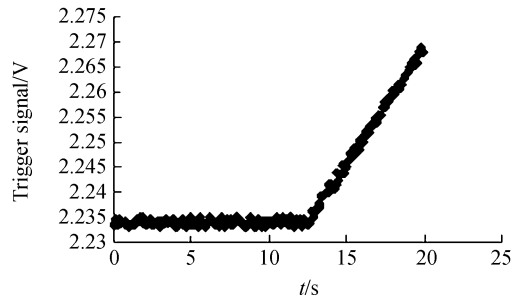
验证触发位置计算精度的实验系统如图 5 所示。测头触发信号和位移传感器 LDGI 信号经由预处理电路放大和滤波,并对典型的信号失真进行修正,再经数据采集卡 NI-PCI6259 读入计算机进行分析处理。图 4 所示的高速逼近低速触发以及二次触发策略均写成软件,实时计算所需控制电压的大小和持续时间,由 NI-PCI6259 输出已定脉宽的控制电压,通过驱动器 AB2 实现对超声波马达 HR4 的控制。在工作过程中,LDGI 产生的位移信号和测头信号由同一数据采集卡进行采集,通道间延时可忽略,可视为同步采样。

输入通道之间的采样延时为纳秒级别,可以忽略不计,因此可以认为测头触发信号和 LDGI 位移信号为同步采样。对测头触发信号进行分析可获得触发的时刻,从该时刻截取 LDGI 波形信号即可计算出触发时刻。



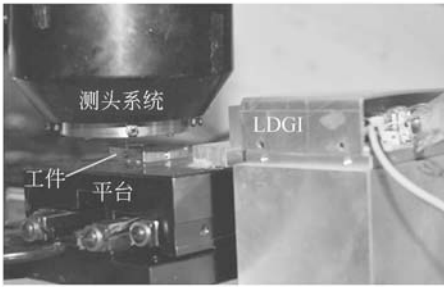
(a) 实验系统示意图

(a) Sketch graph of experimental system



(b) 实验 2

(b) Experiment 2

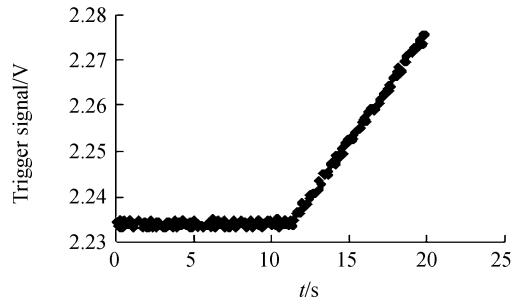


(b) 实物图

(b) Actual photo

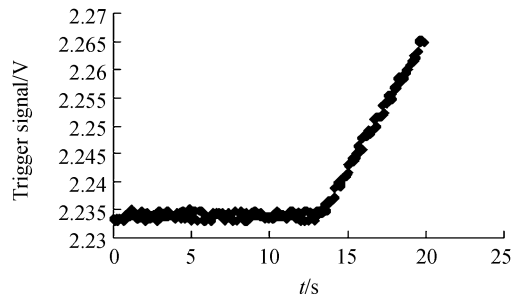
图 5 触发控制实验系统

Fig. 5 Experimental system of trigger control



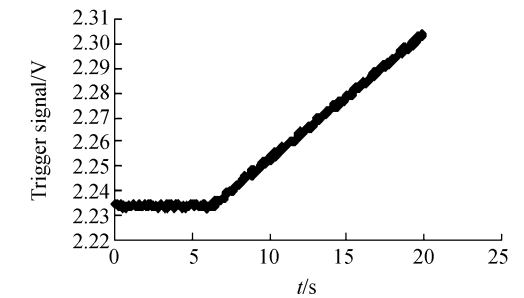
(c) 实验 3

(c) Experiment 3



(d) 实验 4

(d) Experiment 4



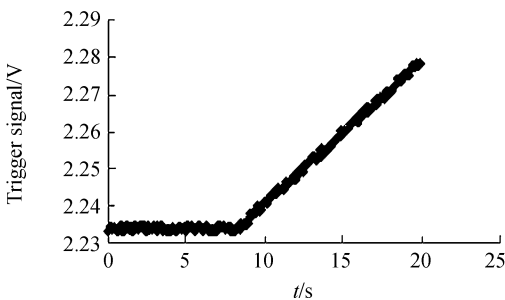
(e) 实验 5

(e) Experiment 5

### 4.2 实验数据

以上述二次触发控制策略控制工件并完成 5 次对测头的触发,5 次触发的测头信号如图 6 所示。测头信号没有明显的单向漂移趋势,说明测头系统未发生不可恢复的形变。

分别从不同方向触发测头,数据记录如表 1 所示。可见,GATE 模式驱动的触发位置计算结果存在显著的分散性,在使用二次触发以后,5 次触发位置的标准差在 10 nm 以内。



(a) 实验 1

(a) Experiment 1

图 6 5 次实验的测头触发信号

Fig. 6 Trigger signals of 5 experiments

表 1 不同方向触发实验数据

Tab. 1 Experimental data of different touching directions

触发方向	触发位置/mm		标准差/nm	
	GATE 模式 驱动	二次 触发	GATE 模式	二次 触发
0°	1.200 723	1.200 743		
	1.200 798	1.200 752		
	1.200 688	1.200 729	49	8
	1.200 672	1.200 739		
	1.200 737	1.200 740		
	1.675 347	1.675 235		
45°	1.675 211	1.675 221		
	1.675 302	1.675 240	58	8
	1.675 292	1.675 239		
	1.675 358	1.675 227		
	1.527 665	1.527 677		
	1.527 562	1.527 673		
90°	1.527 711	1.527 664	65	7
	1.527 728	1.527 675		
	1.527 662	1.527 660		

## 参考文献:

- [1] 石照耀, 韦志会. 精密测头的演变与发展趋势[J]. 工具技术, 2007, 41(2):3-8.  
SHI Z Y, WEI Z H. Evolution and some trends in precision probe technology[J]. *Tool Engineering*, 2007, 41(2):3-8. (in Chinese)
- [2] CHU C L. Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads [J]. *Meas. Sci. Technol.* 2007 (18):1831-1842.
- [3] 李源, 邹子英, 傅云霞, 等. 基于 MEMS 微触觉测头和纳米测量机的特征尺寸测量[J]. 传感技术学报, 2008, 21(12):2097-2100.  
LI Y, ZOU Z Y, FU Y X, *et al.*. Dimension measurement based on MEMS micro tactile probe and nanomeasuring machine [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(12):2097-2100. (in Chinese)
- [4] 李源, 栗大超, 胡小唐, 等. 应用于纳米测量机的 MEMS 微接触式测头的结构设计和优化[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5):1512-1515.  
LI Y, LI D C, HU X T, *et al.*. Structure design and optimization of MEMS micro tactile probe for NMM [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5):1512-1515. (in Chinese)

## 5 结 论

本文为高灵敏度 nano-CMM 接触式探头提出了一种高效触发控制策略。该策略整合了 3 种不同速度和分辨率的驱动方式, 兼顾了控制效率和计算精度。在 20 mm 范围内, 可在小于 2 min 的时间内完成一次触发控制, 触发位置计算精度可达 10 nm。使用测头信号和位移信号的同步采样技术, 无须任何补偿, 可准确地获得触发时刻的位移。该控制算法的开发基于一种常用的纳米三坐标测量机接触式测头的结构, 因此具有一定的通用性。本文提出的触发控制方案可以可靠地求得触发位置, 结合测头形状和预行程的补偿, 可以求得定位位置。

- [5] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.  
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 马力, 荣伟彬, 孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6):1017-1024.  
MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nanopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1017-1024. (in Chinese)
- [7] 孙立宁, 马力, 荣伟彬, 等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3):406-411.  
SUN L N, MA L, RONG W B, *et al.*. Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):406-411.
- [8] KRAMAR J A. Nanometre resolution metrology with the molecular measuring machine [J]. *Meas. Sci. Technol.* 2005, 16(11):2121-2129.
- [9] CHU C L, FAN K C, CHEN Y J. Design of a digital controller for long-stroke submicron positioning stage [C]. *Proceedings of the 1st International Conference of Positioning Technology, Act-city, Hamamatsu, Japan, June 9-11, 2004*:176-181.

- [10] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
TAO Y H. *New PID Control and Its Application* [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [11] CHENG F, FAN K C, FEI Y T. A robust control scheme of nan positioning driven by ultrasonic motor[J]. *SPIE*, 2008,7130:71301O-71301O-6.
- [12] FAN K C, CHENG F, CHEN Y J. Nanopositioning control on a commercial linear stage by software error correction [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006,4(1):1-9.
- [13] FAN K C, LIU Y S, CHEN Y J, *et al.*. A linear diffraction grating interferometer with high accuracy [J]. *SPIE*, 2006, 6280: 628008.
- [14] FAN K C, LI B K, LIU C H. A diffraction grating scale for long range and nanometer resolution [J]. *SPIE*,2009(7133): 71334J-1.
- [15] WANG W L, FAN K C, CHEN Y H, *et al.*. Development of a Touch Trigger Probe for Micro/nano CMM [J]. *SPIE*, 2008,7130:71300K.
- [16] BIRCH K P. Optical fringe subdivision with nanometric accuracy [J]. *Precision Engineering*, 1990,12(4):195-198.
- [17] 刘天文,费业泰. 高精度的光栅信号细分算法[J]. 应用科学学报,1999,17(1):70-74.  
LIU W W, FEI Y T. A high-accuracy algorithm for the interpolated displacement of grating signal [J]. *Journal of Applied Sciences*, 1999,17(1): 70-74. (in Chinese)

## 作者简介:



程 方(1981—),男,安徽芜湖人,博士研究生,2006 年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事纳米三坐标测量机控制技术的研究。E-mail: chf19chf19@163.com



费业泰(1934—),男,安徽肥西人,教授,博士生导师,1955 年毕业于合肥工业大学,主要研究方向为现代测试技术及仪器、测量误差与仪器精度理论及应用等。E-mail: ytfai@hfut.edu.cn

## ● 下期预告

## 基于多元性能退化量的光纤陀螺贮存可靠性评估

晁代宏,马 静,陈淑英

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

诸多“长期贮存,一次使用”的军事应用需求决定了光纤陀螺的贮存寿命指标非常关键,为此,采用基于多元性能退化量的可靠性评估方法对光纤陀螺贮存可靠性进行研究。首先通过分析协方差矩阵量化多元性能退化量相关性,利用联合概率密度函数表征产品失效概率密度,基于此给出了基于多元性能退化量的产品可靠性评估的一般方法。接着在对光纤陀螺进行特性分析的基础上选取零偏、零偏稳定性和标度因数作为性能退化参数,对光纤陀螺开展贮存试验获取其贮存条件下的性能退化数据。最后采用基于多元性能退化量的可靠性评估方法对光纤陀螺进行可靠性评估,得到了光纤陀螺贮存可靠性指标。60℃贮存条件下,考虑参数相关性时,光纤陀螺贮存寿命为 32 800 h;假设性能退化参数间相互独立时,贮存寿命为 13 200 h。结果表明,当产品具有多个性能退化参量时,基于多元性能退化量的评估方法得到的可靠性指标更加合理。