

# 时栅位移传感器智能化实现方法研究<sup>\*</sup>

刘小康<sup>1</sup>, 费业泰<sup>1</sup>, 彭东林<sup>2</sup>, 张兴红<sup>2</sup>

(1 合肥工业大学仪器科学与技术博士后流动站 合肥 230009;

2 重庆工学院机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400050)

**摘要:** 时栅是一种利用时间测量空间位移的新型位移传感器。研究智能化技术可以充分利用软件来提高时栅的精度、改善时栅的性能。提出一种基于数字闭环控制技术的时栅自补偿方法, 消除了工作条件、电路参数变化等因素的影响。提出一种实现时栅自校零与自校准的方法, 无需外部高精度基准信号, 消除了时栅零点漂移和增益漂移。并提出一种实现时栅误差自校正的方法。实践证明, 采用自补偿、自校零与自校准技术实现了时栅的高稳定度, 采用自校正技术实现了时栅的高精度。

**关键词:** 时栅; 智能化; 自补偿; 自校准; 自校正

**中图分类号:** TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460 4030

## Research on intelligentization method for time grating displacement sensor

Liu Xiaokang<sup>1</sup>, Fei Yetai<sup>1</sup>, Peng Donglin<sup>2</sup>, Zhang Xinghong<sup>2</sup>

(1 Instrumentation Science & Technology Postdoctoral Station, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2 Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education,

Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** Time grating is a novel type of displacement sensor based on measuring space with time. To improve the precision of time grating displacement sensor and enhance its performance by software, three intelligentization methods are studied. A self-compensation method is proposed based on digital closed-loop control technology that eliminates the influences of the factors such as working conditions, circuitry parameters and so on. A self-calibration method for time grating is presented that eliminates zero drift and gain drift without external high-precision reference signals. Then an error self-correction method is proposed. Experiment results conform that high stability is obtained by using self-compensation and self-calibration technology, and high accuracy is achieved by using self-correction technology.

**Key words:** time grating; intelligentization; self-compensation; self-calibration; self-correction

## 1 引 言

传统传感器技术通过追求传感器本身的完善, 对传感器的各个环节进行精心设计与调试、进行“手工艺品”式的精雕细琢来获得高性能。随着传感器技术的发展, 传感器与微处理器相结合, 导致了传感器的智能化。实现传感器各项智能化的功能, 是克服传感器自身不足, 获

得高稳定性、高可靠性、高精度、高自适应能力的必由之路<sup>[1]</sup>。目前, 各种智能传感器都是在最少硬件条件基础上通过发挥微处理器的强大软件优势来实现智能化功能的<sup>[1-4]</sup>。作者近十年来一直从事一种新型的栅式位移传感器——时栅的研究, 以时间测量空间位移, 利用低成本实现了高精度, 研制出系列化的时栅产品。高性能时栅的研制成功与采用各种传感器智能化的实现方法是分不开的。在研究过程中, 除采用数字滤波、统计平均处理等

收稿日期: 2007-03 Received Date: 2007-03

<sup>\*</sup>基金项目: 国家自然科学基金(50575235)、中国博士后科学基金(20060400717)资助项目

通用数据处理技术来消除偶然误差,排除内部和外部引入的干扰外,还根据理论分析结果,针对性地采取了一些智能化处理方法,这些方法在确保时栅性能方面起到了至关重要的作用。

## 2 自补偿

根据前期提出的时空坐标转换理论<sup>[5]</sup>,对于以任意速度  $v$ 运动的质点  $P$ 在静止坐标系  $S$ 上的位移  $x$ (见图 1),可以通过另一以恒速  $V$ 运动的坐标系  $S'$ 上观察到的时间之差反映出来:

$$x = V T \tag{1}$$

式中:  $T$ 为  $S'$ 扫描  $D$ 点和参考点  $O$ 的时间之差。实现这一测量思想的关键是要构建一个以恒速  $v$ 运动的坐标系。从式(1)可以看出: $v$ 的稳定性直接决定测量精度。在空间对称的三相交流绕组中通以按时间  $120^\circ$ 均分的三相交流电流,采用在三相绕组周围产生的旋转磁场  $M$ 来获取高稳定度的  $v$ ,从而研制了时栅位移传感器。这时,三相交流电流相位差是决定运动坐标系  $S'$ 的运动速度  $v$ 稳定的关键参数,采用数字闭环控制技术来对相位差进行自动补偿,以保证三相交流电流相位差的恒定,从而获得恒速  $v$ 。实际上这种自补偿技术的实现,理论上能消除温度、电子元器件和其他一些不易界定的因素的影响,进而能提高时栅的性能。

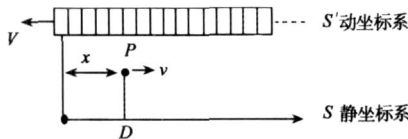


图 1 时栅测量模型

Fig 1 Measurement model of time grating

自补偿方法工作原理如图 2所示<sup>[6]</sup>。采用直接数字频率合成技术(DDS)来产生 3路正弦信号,经功率放大后得到三相驱动电流  $i_A$ 、 $i_B$ 和  $i_C$ ,输入到三相交流绕组后,就产生一个以速度  $v$ 运动的旋转磁场  $M$ 。相位检测与比较单元用于检测三路驱动电流之间的相位差,并计算其与理想值  $120^\circ$ 之间的偏差。偏差的表达式为:

$$A = \psi_{AB} - 120^\circ = \psi_A - \psi_B - 120^\circ \tag{2}$$

$$C = \psi_{BC} - 120^\circ = \psi_B - \psi_C - 120^\circ \tag{3}$$

式中:  $\psi_{AB}$ 为  $i_A$ 和  $i_B$ 之间的相位差,  $\psi_{BC}$ 为  $i_B$ 和  $i_C$ 之间的相位差,  $\psi_A$ 、 $\psi_B$ 和  $\psi_C$ 分别为三相交流电流  $i_A$ 、 $i_B$ 和  $i_C$ 的相位。计算得到的偏差值  $A$ 和  $C$ 作为反馈量引入到 DDS中,分别对驱动电流  $i_A$ 和  $i_C$ 进行相位调制,通过这种方式很容易就构成了一个闭环系统,控制  $\psi_{AB}$ 和  $\psi_{BC}$ 保持几乎不变,从而确保  $v$ 的稳定度。

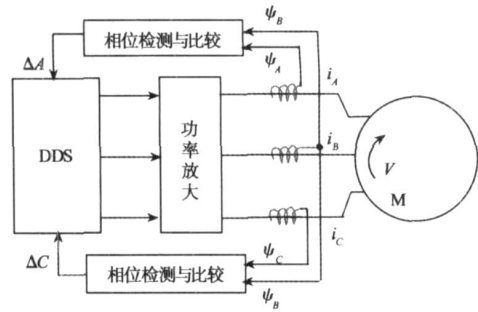


图 2 自补偿原理图

Fig 2 Principle of self-compensation method

## 3 自校零和自校准

自校零与自校准功能原理如图 3所示。微处理器通过控制开关  $K_1$ ,将时栅测头信号  $u_m$ 分两路接入比相电路进行处理,理论上经微处理器运算得到的相位差值应为零,但由于两路信号处理电路参数之间略有差异,实际上,测量得到的结果不为零,存在一个零位误差。这一误差若为一个固定值,则很容易消除。实际上,由于电路内在和电压波动、环境温度变化等外在因素的影响,零位值会发生缓慢漂移。因此,在测量过程中,微处理器周期性地控制开关  $K_1$ 动作,实时测量出当前零位值,然后通过软件加以消除,从而实现时栅测量的自校零功能。

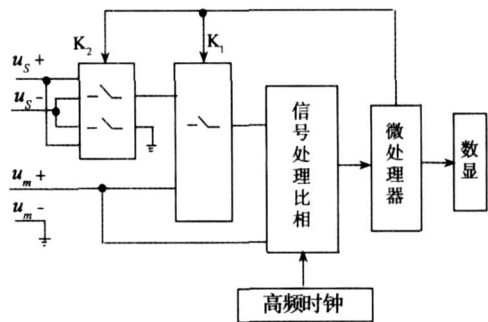


图 3 自校零与自校准原理框图

Fig 3 Principle of self-zero correction and self-calibration method

如图 3所示,微处理器通过控制开关  $K_2$ 和  $K_1$ ,接通动、定测头信号进行比相,定测头信号可表示为:

$$u_{s1} = U_m \sin(\omega t - \psi_s) \tag{4}$$

式中:  $U_m$ 为信号幅值,  $\omega$ 为三相交流电源频率,  $\psi_s$ 为与定测头所处位置相对应的初始相位值。此时,测得动、定测头之间的角位移值为  $\theta_1$ 。然后微处理器控制开关  $K_2$ 动作,将定测头信号正负极交换,则定测头信号变为:

$$u_{s2} = U_m \sin(\omega t - \psi_s - 180^\circ) \tag{5}$$

此时,测得动、定测头之间的角位移值为  $\theta_2$ 。从式(4)、(5)可以看出:理论上时栅两次测量值  $\theta_1$ 和  $\theta_2$ 之间的差值应为  $180^\circ$ 。但由于多种因素的影响,传感器的增

益会发生漂移,因此要进行校准。根据上述两次测量结果,可得到一个校准系数:

$$k = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{180^\circ} \quad (6)$$

工作过程中,测量软件应对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的值进行判断,当  $\alpha_1 > \alpha_2$  时,式(6)中  $\alpha_2 = 360^\circ + \alpha_2$ ,并且  $k$  值不应与 1 偏差过大,否则为故障现象,应通过显示终端进行提示。最后根据测量的  $k$  值大小,对当前测量的角位移值进行自动校准。即:

$$c = \frac{m}{k} = \frac{180^\circ}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (7)$$

式中:  $c$  为校准后显示值,  $m$  为实际测量值。

因此,微处理器周期性地控制开关  $K_1$  和  $K_2$  动作,实时测量增益漂移,由软件对测量结果进行实时校正,从而实现时栅测量的自校准功能。

#### 4 自校正

误差分离和修正技术是提高测量精度的重要方法和措施之一,这种方法不仅可以有效的提高测量精度,而且可以大幅度地降低测量装置的制造成本<sup>[7]</sup>。因此,受到广泛重视和普及应用,并成为提高精度的优先采用方案。只要主要组成误差项具有确定性,然后通过软件技术进行修正,进而能提高测量精度<sup>[1,8]</sup>。

研究过程中首先采用多位置测头误差分离技术对时栅传感器测量误差进行分离,然后采用傅氏级数谐波修正技术对非线性误差进行修正。多位置测头法原理如图 4 所示。以  $O$  点为中心均布  $m$  个测头,以这  $m$  个测头测量值的平均值作为输出值。任一位置测头的测量误差  $e_n$  ( $n=1, 2, \dots, m$ ) 是周期性的,满足狄里赫利条件。因此可利用傅里叶三角级数将其分解为各次谐波误差之和:

$$e_n = \sum_{i=1}^{\infty} e_i \sin(i \alpha_n + \phi_i) \quad (8)$$

式中:  $i$  为谐波的阶次,  $e_i$  为第  $i$  阶谐波的幅值,  $\alpha_n$  为  $n$  位置测头相对于零位的转角,  $\phi_i$  为第  $i$  阶谐波的初相。

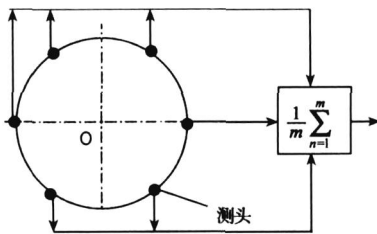


图 4 多位置测头法

Fig 4 Principle of multi-position probe method

利用式(8)可以推导出  $m$  个测头的测量误差为:

$$e_{km} = \sum_{k=1}^m e_{km} \sin(i \alpha_{km} + \phi_{km}) \quad (9)$$

从式(9)可以看出:采用多位置测头技术分离出了  $km$  次谐波误差,其他阶次谐波误差已被消除。

由于测量误差的频率成分已知,因此可利用计算机拟合出一条由  $p$  次主要谐波成分组成的误差曲线。根据最小二乘法 LSM 原理,拟合值和测量值的均方差应当最小。该最小值是  $p$  次主要谐波幅值和初相的函数,即:

$$\sum_{j=1}^N [f_j - m_j]^2 = F(e_{m_1}, \dots, e_{m_p}, \phi_{m_1}, \dots, \phi_{m_p}) = M \text{ in } \text{in } \text{in } \text{in } \quad (10)$$

式中:  $N$  为标定点的个数,  $f_j$  为拟合的误差值,  $m_j$  为实测的误差值,  $\phi_i$  为第  $i$  阶谐波的初相。通过计算,就可以确定  $p$  次主要谐波的幅值和初相。因此拟合的误差曲线的表达式为:

$$f = \sum_{k=1}^p e_{km} \sin(km \alpha + \phi_{km}) \quad (11)$$

利用该表达式就可以通过软件对非线性误差进行校正。

#### 5 实验结果

为了验证前面提出的几种智能化实现方法的效果,作者开展了大量实验研究,实验装置如图 5 所示。时栅固定在数控转台下方,数控转台由伺服电机驱动,接收数控系统编程指令进行自动转位。首先调整数控转台转动至时栅输出为 0 附近,然后保持数控转台无转动,对时栅进行 72 小时连续开机实验,在此过程中制造各种环境温度的扰动影响。计算机定时采样时栅数据,采样频率为 1 次/分钟,软件自动绘制采样值波动曲线。这样一个简单的实验实际上就可以测试出时栅的长期稳定性和零点漂移情况。大量实验发现时栅测量值只在 0.5 范围内偶有跳动。

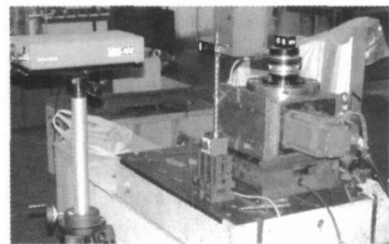


图 5 时栅实验装置

Fig 5 Experiment setup

实验过程中采用精度为  $\pm 1$  的 Renishaw 激光干涉角度测量系统对时栅的测量误差和精度进行检测。数控系统驱动转台按固定角度间距自动转位,每次转动到位后作短暂停留,然后由计算机自动采集时栅和激光干涉系统测量值,整个实验过程无需人工干预,全部自动完成。以激光干涉系统测量值作为标准值,得到一条时栅的测量误差曲线,然后采用前述方法对误差曲线进行拟合,最后通过软件进行自校正。

研制出的时栅传感器产品样机送重庆市计量院,采用光电自准直仪和多面棱体进行精度检测,结果为:任意位置清零,示值误差峰峰值为 2。图 6 为一条实际检测的误差曲线。

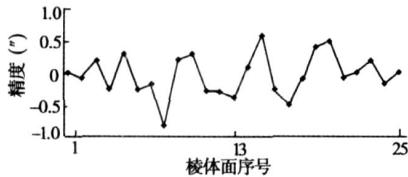


图 6 精度检测曲线

Fig 6 Tested accuracy curve

## 6 结 论

智能化技术的关键就是充分利用软件来提高传感器的精度、改善传感器的性能。本文提出了一种利用数字闭环控制技术对时栅三相交流电源相位差进行自动补偿的方法。并根据对时栅测量特点的分析,提出了一种无需外部高精度基准信号就可实现时栅零点漂移和增益漂移进行校准的方法。上述两种方法的成功应用,将时栅测量示值跳动控制在 0.5 范围内。本文提出了采用多位置测头误差分离技术对时栅测量误差进行分离,然后采用傅氏级数谐波修正技术对非线性误差进行修正的方法。测试结果为:任意位置清零,时栅示值误差峰峰值为 2。上述 3 种智能化方法的实现在确保时栅性能方面起到了至关重要的作用。本文针对时栅提出的 3 种智能化实现方法,对其他智能传感器的研究具有重要的参考价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.  
 LU J H. Smart sensor systems[M]. Xi an: Xidian University Press, 2004.
- [ 2 ] SACHENKO A, KOCHAN V, TURCHENKO V, et al Features of intelligent distributed sensor network higher level development [C]. Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000, 1: 335-340.
- [ 3 ] POSTOLACHE O, PEREIRA M, GIRA O P. Laser based smart displacement sensor [C]. Proceedings of the First ISA / IEEE Conference Sensor for Industry, 2001: 149-154.
- [ 4 ] TIAN G Y, ZHAO Z X, BANES R W. A fieldbus-based intelligent sensor [J]. Mechatronics, 2000 (10): 835-849.
- [ 5 ] 彭东林, 刘成康, 谭为民, 等. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21 (4): 338-342.
- PENG D L, LU CH K, TAN W M, et al Time-space coordinate transformation and time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21 (4): 338-342.
- [ 6 ] 刘小康, 彭东林, 张兴红, 等. 自补偿技术在时栅位移传感器中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (1): 65 ~ 67, 74.
- LU X K, PENG D L, ZHANG X H, et al An application of self-compensation technology for time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (1): 65-67, 74.
- [ 7 ] 费业泰, 卢荣胜. 动态测量误差修正原理与技术 [M]. 北京:中国计量出版社, 2001.
- FEI Y T, LU R S Principle and technology of dynamic measurement error compensation [M]. Beijing: Metrology Press China, 2001.
- [ 8 ] SACHENKO A, KOCHAN V. Error compensation in an intelligent sensing instrumentation system [C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001: 869-874.

## 作者简介



刘小康, 1999、2002和 2005年在重庆大学分别获得工学学士、硕士和博士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与技术博士后、副教授, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: lxx@cqit.edu.cn

**Lu Xiaokang** received B. S., M. S. and PhD degrees all from Chongqing University, China, in 1999, 2002 and 2005, respectively. Currently he is a postdoctor in Instrumentation Science & Technology Postdoctoral Station, Hefei University of Technology, China. His research interests mainly include intelligent instruments and sensors.

E-mail: lxx@cqit.edu.cn



费业泰, 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为现代精度理论及其应用。

E-mail: ytf@hfut.edu.cn

**Fei Yetai** is currently a professor and supervisor for PhD students in School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, China. His research interests mainly include modern precision theory and its applications.

E-mail: ytf@hfut.edu.cn