

寄生式时栅角位移传感器的新型动态解算系统*

王伟¹, 彭东林², 石照耀¹, 赵勇图²

(1. 北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100024;

2. 重庆理工大学 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400050)

摘要:为了将时栅角位移传感器应用于运动控制场合,设计了一套新型的测角解算系统。相比传统测角解算系统,该系统不仅实现了时栅角位移传感器的动态测量,而且降低了系统成本,有利于传感器高集成度、低成本设计。首先利用优化的坐标旋转数字计算方法(CORDIC)进行角度粗解算,然后利用三角函数在0附近微区间内呈现线性特性实现了高分辨率的误差线性补偿,完成角度的精解算。减少迭代次数的同时达到了较高的输出精度,实时性高。最后讨论算法本身带来的测量误差,同时,对整个系统的误差进行了溯源。以寄生式时栅角位移传感器为载体,通过调整了传感器的激励输入和利用高速AD的过采样技术,实现了基于寄生式时栅角位移传感器的整个解算系统的设计,同时搭建了测试实验平台,实验结果表明,在传感器输出信号较理想情况下,且允许的速度范围内,系统测量误差小于10",可以满足动态测量场合下时栅角位移传感器的应用。

关键词: CORDIC 算法;寄生式时栅角位移传感器;动态测量

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Novle angular measured system based on parasitic time grating angular sensor

Wang Wei¹, Peng Donglin², Shi Zhaoyao¹, Zhao Yongtu²

(1. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instrument, Beijing University of Technology,

Beijing 100024, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology Chongqing

University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to apply Time-Grating sensors to the high speed fields, a novel angle measurement system is designed. This system can achieve dynamic measurement and reduce costs compared with the conventional measuring system. Firstly, optimized coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is utilized for rough angle calculation. Then, a high accuracy compensation algorithm is proposed to realize precise angle calculation, considering linear relationship when the angle is close to zero. This method not only reduces the number of iterations, but also achieves higher output accuracy and high real-time performance. Finally, the measurement error caused by the algorithm is discussed, and the error of the whole system is traced. With the parasitic time grating angular displacement sensor as the carrier, by adjusting the sensor input and using the oversampling of high-speed Analog Digital (AD), the whole solution system is implemented and a testing platform is built. Experimental results indicate that the measured precision of the system is below 10" when the signal of sensor has been calibrated, and can satisfy the dynamic measurement requirements.

Keywords: coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm; parasitic time-grating sensor; dynamic measure

0 引言

角位移传感器按信号输出方式可以分为调制式和非调制式。调制式位移传感器包括了旋转变压器、感应同

步器、时栅位移传感器。旋转变压器目前在电机、电动汽车领域的应用非常广泛^[1-6],由于其本身具有耐油、抗污等特性,同时其采用鉴幅方式求解角度,使得其很容易应用到高速场合。

时栅位移传感器,是一种新型的位移传感器。其运

用时空转换原理^[7],实现对空间的高精度测量,减少了对机械刻线的依赖,是位移传感器发展的一个新的分支。刘小康等人^[8]设计的基于电场式的位移传感器精度达到0.2",在静态量仪领域取得重大突破。而时栅在动态高速测量应用领域一直是科研难点,国内关于时栅传感器动态测量的研究主要集中在模型的建立与误差的分析中,很少有研究解算方法对时栅动态测量的影响。孙世政等人^[9]提出了对随机误差和系统误差分别进行建模和组合补偿的思想来提高时栅传感器的动态测量精度,虽然有效地减少了动态测量误差,但是当被测件速度变高后,精度明显变差,无法应用于高速运动场合。陈自然等人^[10]将支持向量机引入时栅位移传感器动态测量中,采用时间序列理论分析采样数据的相关性,建立了用于支持向量机回归(support vector regression, SVR)回归预测模型,实时修正消除误差,但训练需要花费大量时间,实时性并不好^[11]。针对调制式角位移传感器的解算方法的研究,国外主要集中在商业芯片和基于DSP的数字变换器(resolver-to-digital conversion, RDC)。商业芯片可以将算法集成到芯片中,方便使用,但价格昂贵,无法进行自适应修正。现有的大部分文献对RDC方法进行阐述和设计,其中Benamar M等人^[12]提出了一种角度转换器,无需处理器和查表法(look-up table, LUT),只需要对信号进行适当运算产生线性角度信号。但该方法属于开环控制,无法应用于高精度应用场合。

针对时栅位移传感器动态测量的现状,本文提出了

一种新型的角度跟随方法,并以寄生式角位移传感器为载体,阐述了其整个设计思路与实验。利用本文提及的坐标旋转数字计算方法(coordinate rotation digital computer, CORDIC)求出角度评估值,通过三角函数的线性关系对误差进行算法补偿,从而使测量精度达到设计范围,该算法避免了查表法带来的细分误差,以及多次迭代带来的输出延时,硬件消耗等问题。本文对时栅位移传感器的传统解算方法进行分析,指出其在高速运动下存在分辨率下降的原理性缺陷和抗噪性能下降的问题。提出了新的跟随算法,并对算法进行了误差分析与优化,完成了基于该算法的解算系统设计;对系统进行了验证实验,对误差进行了分项分析。

1 动态解算分析与测量模型研究

1.1 寄生式时栅原理及其测量模型

图1所示为寄生式时栅测量的基本框图,左侧为寄生式时栅的基本结构:大齿轮、外置测头;其中齿轮为被测量件,测头由感应线圈与双层激励线圈组成,感应线圈在空间上相距 $\pi/2$ 。测头与齿轮之间形成空气气隙,其磁导率呈现周期性变化。若合理安排测量绕线的位置,由法拉第电磁感应定律可以在感应线圈中拾取含有角度信息的调制信号。右侧为时栅的信号处理单元:驻波信号叠加模块、低通滤波器、方波波形变换模块、FPGA解算模块。

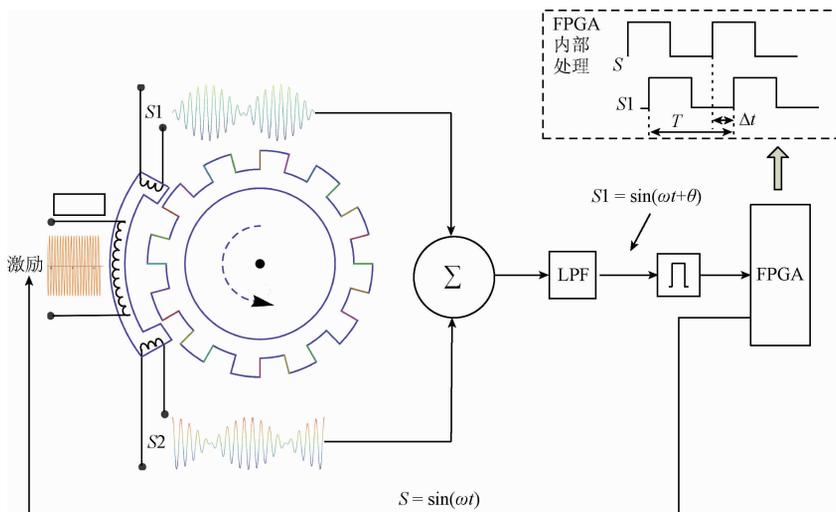


图1 寄生式时栅传感器传统测量系统

Fig. 1 Conventional measurement system of parasitic Time-Grating sensor

图1中的激励线圈为两层设计,假设分别通入时间相位相差 $\pi/2$,角频率为 ω 的三角信号,则齿圈的旋转角度 θ 被调制为寄生式时栅角位移传感器的输出信号,分别为 S_1 和 S_2 ,可以表示为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & 0 \\ 0 & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} + \frac{\omega_m}{\omega} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ω_m 为待测件运动角频率, $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)^T$ 为动生电动势,式(1)中 S_1 与 S_2 为感生电动势与动生电动势叠加产

生,当物体的转速远小于励磁频率时,第2项可以忽略不计,将S1与S2叠加后进行信号处理(低通滤波、放大过零比较)后送入现场可编程阵列(FPGA),与同频参考信号S进行鉴相处理^[11],如图1所示,即可求出角位移:

$$\theta = \frac{\Delta t}{T} \cdot W \quad (2)$$

式中:W为两感应线圈的空间位置。

假设时栅角位移传感器的励磁频率为 $\omega = 400 \text{ Hz}$,如果物体转速达到 $1\,200 \text{ r/min}$,即 $\omega_m = 20 \text{ Hz}$,其动生电动势不能忽略,为了解决这个问题,一般会将励磁频率提高至 $4\,000 \text{ Hz}$ 或更高的 40 kHz 。由式(2)可知随着T变小,传统解算模块的角度分辨率将降低。所以对于高速测量,时栅的测量原理有自身的原理性缺陷,致使励磁频率提高也不能解决测量问题。为了解决高速动生电动势对测量的影响,可采用鉴幅的解算方式进行角度求解。将激励信号通入同频率、同相位的正弦信号,则式(1)可以表示为:

$$\begin{bmatrix} S1 \\ S2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & 0 \\ 0 & \sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} + \frac{\omega_m}{\omega} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

此时提高激励信号频率,因为 $\omega_m \ll \omega$,第2项忽略不计,把(S1,S2)^T通过高速AD采样,则:

$$\begin{cases} g(\theta) = (\cos\theta, \sin\theta) \\ \theta = g^{-1}(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

然后利用文中设计的算法对式(4)进行角度求解。同时,外界噪声对测量的影响,导致测量的随机误差偏大,低速情况下,可以通过统计学原理对噪声进行剔除,当速度增加后,解算模块无法利用多次测量求平均的方法进行噪声抑制,时栅测量的稳定性变差。

1.2 基于旋转坐标系的角度评估方法

CORDIC算法^[14-18]是由Vloder J. E.等人^[14]于1959年首次提出的一种数值逼近方法,通过一系列的固定角度偏转不断地逼近待测角度,实现角度测量的目的。但由于时栅位移传感器的实际应用场合比较苛刻,实时性要求很高,但该方法输出角度限制在第一象限内和算法的执行效率的不足,导致有限时间内输出角度的精度无法满足高精度测量,需要对算法进行适当的改进以适应特殊需要。

如图2所示,假设待测角度 θ 在笛卡尔坐标系下表示为向量 $A(x_0, y_0)$,旋转固定角度得到向量 $A_1(x_1, y_1)$,则可以表示为:

$$\begin{cases} x_1 = (x_0 - y_0 \tan\theta) \cos\theta \\ y_1 = (y_0 + x_0 \tan\theta) \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\cos\theta$ 为坐标系的缩放因子,故可以不考虑其影响,那么将向量A旋转N次后,得到 $A_n(x_n, y_n)$ 。

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{i=0}^{N-1} \begin{bmatrix} 1 & -d_i \tan\theta_i \\ d_i \tan\theta_i & 1 \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: d_i 表示第i次旋转方向,取值 $\{-1, 1\}$; -1代表反向,1代表正向; θ_i 为第i次旋转角度。

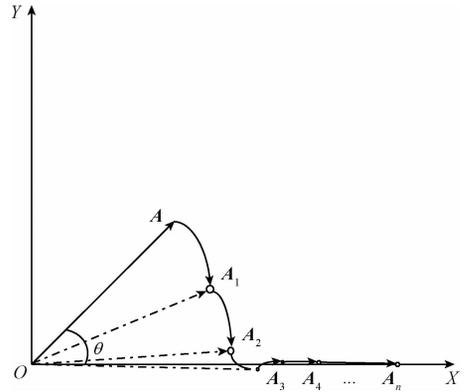


图2 旋转角度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotated angle

从图2可以看出将A经过多次旋转后, $A_n(x_n, 0)$ 为X轴上一点,此时旋转角度的总和为待测角度 θ ,可表示为:

$$\theta = \sum_{i=0}^{N-1} (d_i \cdot \theta_i) \quad (7)$$

为了提高算法执行效率,将乘法变为移位运算,令 $\tan\theta_i = 2^{-i}$,设计旋转幅度表格如表1所示,当迭代次数为10次时即在式(7)中,N取10, $\tan(\theta_i)$ 取值范围 $\{1, 2^{-1}, 2^{-2}, \dots, 2^{-9}\}$,则式(7)可以重新写为:

$$\theta = \sum_{i=0}^9 (d_i \cdot \arctan(2^{-i})) \quad (8)$$

表1 旋转角度

Table 1 Amplitude and rotated angle

i	旋转角度 θ_i (°)	旋转幅度
1	45.0	1
2	26.565 0511	2^{-1}
3	14.036 243 4	2^{-2}
⋮	⋮	⋮
10	0.111 905 67	2^{-9}

显然N趋于无穷大时, $\theta \in [-99.23^\circ, 99.23^\circ]$,无法完全覆盖整个圆周,根据三角函数的对称性可知,任意象限的角度都可以映射到第一象限。映射规则如表2所示。

表2 象限映射关系

Table 2 Mapping relationship of quadrant

象限	范围	映射规则
第1象限	$[0, 90^\circ]$	$\sin\theta > 0, \cos\theta > 0$
第2象限	$[90^\circ, 180^\circ]$	$\sin\theta < 0, \cos\theta > 0$
第3象限	$[180^\circ, 270^\circ]$	$\sin\theta < 0, \cos\theta < 0$
第4象限	$[270^\circ, 360^\circ]$	$\sin\theta > 0, \cos\theta < 0$

1.3 CORDIC 算法误差分析与算法调整

CORDIC 算法的误差主要来源于^[16]:1) AD 采样截断误差;2) 旋转角度近似误差。以 N -bit AD 芯片为例子分析,一个周期内可以表示的最大分辨力为 $\frac{\pi}{2} \cdot 2^{-N}$ bit, 则其截断误差 $\varepsilon_1 = 2^{-N}$ bit; 将旋转角度误差, 可以通过选择合适的迭代次数, 使 $|\varepsilon_2| < |\varepsilon_1|$, 系统总误差 $\varepsilon = |\varepsilon_1|$, 通过上述分析, 由于随着迭代次数的增加, 式(6)的收敛性会变得不稳定且收敛速度缓慢, 影响整体系统测量。为了解决这个问题, 将迭代次数固定为有限次, 优化后的 CORDIC 算法的解算误差不仅受到 AD 采样截断误差影响, 而且含有旋转角度近似误差, 即总的误差 $\varepsilon = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|$ 。虽然算法效率很高, 但是此时的解算精度并不能满足应用要求。为了解决效率与精度的矛盾问题, 设计了一种利用三角函数在 0 附近区间线性特性的补偿机制。

由泰勒 (Taylor) 公式可知:

$$\sin(\theta) = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots +$$

$$(-1)^{m-1} \frac{\theta^{2m+1}}{(2m-1)!} + R_{2m} \quad (9)$$

式(9)描述了 $\{\theta, \sin\theta, \sin\theta - \theta\}$ 之间的关系, 当 θ

取 0.01 rad 时, $\theta - \sin\theta < \frac{0.01^3}{3!}$, 角度 θ 趋近于 0 时, 由

式(9)可知 $\sin\theta \approx \theta$; $\theta \in (-0.1^\circ, 0.1^\circ)$ 时, $\sin\theta - \theta$ 取值范围为 $\pm 2 \times 10^{-7}$; 理论角度 θ 经过旋转坐标系 CORDIC 算法后, 测量出角度值 $f(\theta)$, 则角度误差 $\delta(\theta)$ 可以表示为:

$$\delta(\theta) = \theta - f(\theta) \quad (10)$$

式中: $\delta(\theta)$ 的区间为 $[-0.1^\circ, 0.1^\circ]$; 为了获得更高的精度, 需要对结果进行误差修正。对于正弦信号, 当角度非常小时, 可以认为 $\sin\theta \approx \theta$ 。则式(10)可以重新写为:

$$\delta(\theta) = \sin\theta \cos(f(\theta)) - \cos\theta \sin(f(\theta)) \quad (11)$$

所以, 基于此可以实时计算出当前位置:

$$\theta = f(\theta) + \delta(\theta) \quad (12)$$

1.4 系统设计

当被测物体高速旋转时, 待测角度容易被时间项污染, 动态角度测量系统首先解包络, 剥离出时间项, 利用 CORDIC 算法估计出的角度值, 其分辨力为 0.1° , 显然测出的角度无法应用于高速测量, 利用角度线性补偿算法, 将误差范围缩小到 $\pm 10''$ 以内, 满足实际需要。

测量系统的工作分为如下 4 步:

1) 系统初始化, 在励磁信号作用下, 输出端产生两路驻波, 解调电路从驻波中解包络, 提出角度的正弦值与余弦值;

2) 根据角度映射法则, 判断角度的象限位置, 将角度

转化为第 1 象限;

3) 利用 CORDIC 算法计算出第一象限角度的评估值 (分辨力 0.1°);

4) 通过补偿算法, 将角度值进行重新计算, 补偿误差, 最终误差范围控制在 $\pm 10''$ 内;

高速测量系统整体结构如图 3 所示, 系统采用一块现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 芯片为主控芯片, 该芯片内部实现 CORDIC 算法、补偿算法和输出角度等功能。高速多通道的 AD7606 作为采样芯片, 通过过采样技术对两路驻波信号进行提取, 然后判断极值提取角度信息。

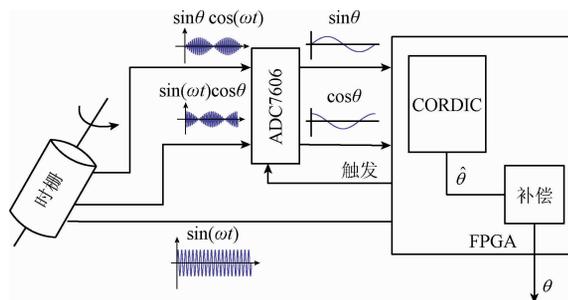


图 3 系统结构

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

2 实验分析与实际应用

2.1 实验台设计

进一步, 为了验证系统的准确性与可行性, 搭建了图 4 所示的测试实验台装置, 图中包含了大理石实验台、直驱电机、磁场式圆时栅、高精度圆光栅, NI 数据采集设备、数据解算模块。该实验台通过直驱电机控制轴系旋转运动, 同时将 HEIDENHAIN RON886 圆光栅 (精度 $\pm 1''$) 同轴安装在时栅传感器上方作为基准传感器。时栅位移传感器与光栅传感器同步测量, 并将光栅传感器作为测量基准。

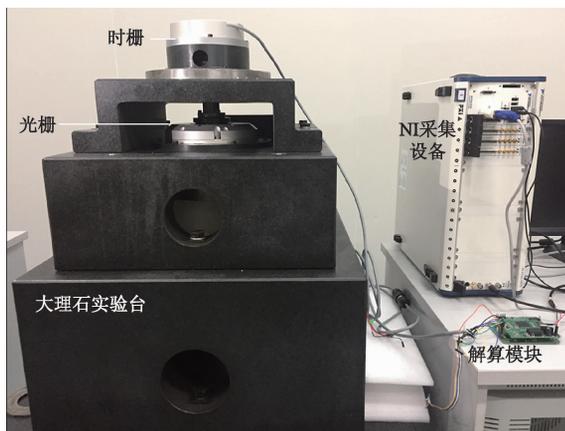


图 4 实验平台

Fig. 4 Experiment platform

将实验步骤分为两步,具体如下:

1) 将实验台安装好后,不对传感器进行任何自修正技术进行补偿。固定转台转速 0.1 r/min,励磁频率为 10 kHz,转台旋转 1 周,每 0.1°记录一次测角系统位置与光栅位置,获取传感器的原始误差曲线。

2) 将传感器通过静态自修正技术^[17]消除系统误差,排除传感器本体误差的干扰,固定励磁频率为 10 kHz,转台旋转 1 周,转速分别为 1、10、100 r/min;记录测角系统位置与光栅位置,获得测角系统误差。

实验中,控制箱控制直驱电机运转,解算单元将解算系统输出的角度送至上位机保存和显示,同时记录光栅的测量值,将两个值进行比较,得到解算系统的测量误差。以整个测量过程中的一对极内的角度为横坐标,500 组数据为纵坐标,比较测量结果如图 5 所示。

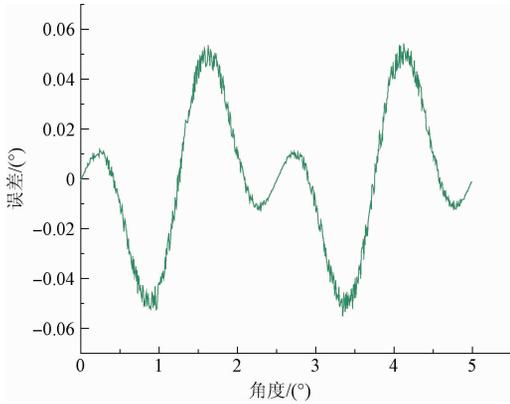


图5 原始误差曲线
Fig. 5 Origin deviation of angle

图 5 描述了系统的原始误差,该误差曲线在系统低速运行时获得,其值范围大约 ±0.05°,从图 5 中可以看出一对极内(5°)的误差曲线包含了多种谐波成分。也同时验证了寄生式时栅必须依赖于修正技术才能实现较好的测量效果。

2.2 误差分析

从图 5 中可以看出误差曲线与文献[13]中分析基本一致,对误差曲线进行快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT),得到如图 6 所示的误差频谱图,主要包含了 3 种误差成分:电气误差、系统周期误差、安装偏心误差及其他随机因素影响^[10]。

1) 电气误差

主要是由于激励信号输出不能完全一致,导致输出信号存在相位误差与幅度误差^[1-2]。电气误差由 ε_1 表示,则:

$$\varepsilon_1 = \left\{ \frac{\alpha}{2} \sin(2\theta) + \frac{\beta}{2} [1 - \cos(2\theta)] \right\} \quad (13)$$

式中: α 表示幅度偏差, β 表示相位偏差, θ 为旋转角度。显然电气误差带来了 2 次的周期误差

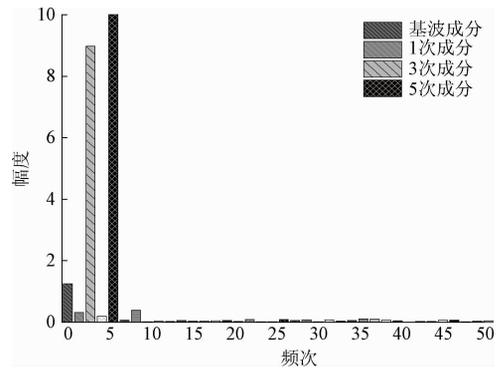


图6 误差频谱

Fig. 6 Frequency spectrum of the angle error

2) 系统周期误差

系统周期误差主要呈现长周期误差特性,主要由于传感器结构所决定,用 ε_2 表示。主要包括了传感器内部的绕线形式、定子、转子开槽引入的分度误差、传感器的加工误差。由寄生式时栅原理可知,通过测头与被测件间磁阻变化,形成周期磁场,电磁感应后产生的电压包含了基波倍次谐波成分通过后期谐波修正技术压制误差。

$$\varepsilon_2 = \sum_{n=1, \text{奇数}}^{\infty} \sin(n \cdot \theta) \quad (14)$$

3) 安装偏心误差

实验台最大的安装误差是偏心误差,用 ε_3 表示,包括了时栅传感器的安装偏心误差和光栅的偏心误差。

$$\varepsilon_3 = \frac{e}{r} \sin(\theta) \quad (15)$$

式中: e 表示偏心度, r 表示半径。

4) 其他因素的影响,用 ε_4 温度等环境问题的影响。

综上所述,实验台的误差表示为 ε ,则:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \quad (16)$$

为了使系统的总误差最小,可以采用信号补偿法对 ε_1 进行补偿,谐波修正法与多测头消除多次谐波,达到减少 ε_2 的效果,多测头法降低 ε_3 。

2.3 新方法与传统方法对比分析

为了评估新方法的效果,将传感器输出信号送入新动态解算系统与传统解算系统,计算出两种条件下的测量误差,绘制出图 7 所示的新方法与传统方法对比。横坐标为对极内的角度,纵坐标为误差值。可以看出,传统方法的误差较大,主要表现为随机误差,新方法的误差较小,与本文误差分析一致。

为了验证新方法解算角度的稳定性,设置电机转速在 1~40 r/min,在位置 1°处重复进行实验。得到如图 8 所示的方差图。

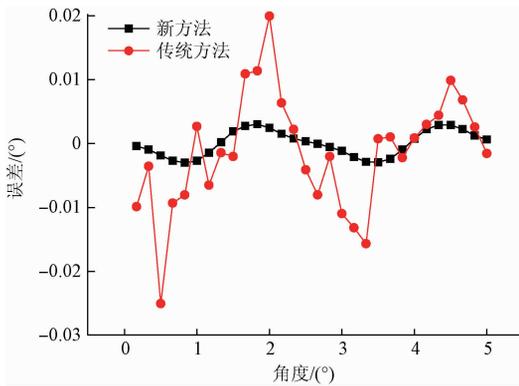


图7 误差对比

Fig. 7 Error comparison in different resolver systems

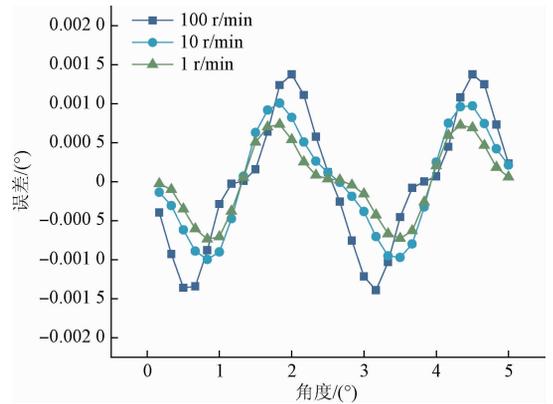


图9 系统校正后的误差曲线

Fig. 9 Deviation of angle after calibration

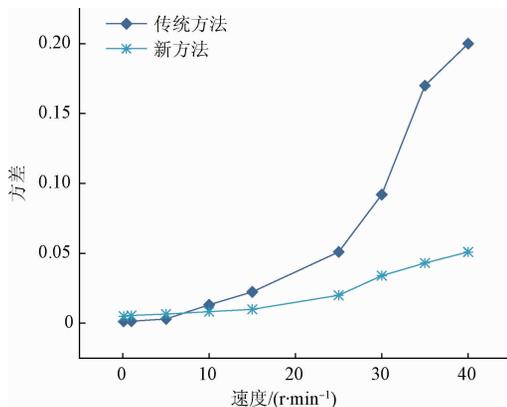


图8 角度均方差

Fig. 8 Mean square deviation of angle

由图8可知,低速时,传统方法的均方差低于新方法,但随着转速增大,均方差呈现逐渐增大趋势,传统方法增大速率明显大于新方法。说明新方法在此速度范围内具备明显优势。

2.4 工程应用

某军工厂将寄生式时栅应用于某军工炮台系统中,而在炮台快速换向的情况下,寄生式时栅的稳定性与精度并不能满足要求。将本文提出的方法应用于炮台系统中,取得了不错的效果。并根据实测数据绘制出图9所示的误差曲线。

观测图9中的误差曲线可知,原始误差中的3次谐波和5次谐波被压制后,误差中仅含有2次成分和随机误差,当转速为1和10 r/min时,误差曲线一致。说明速度对测角系统的影响可以忽略,当转速为100 r/min时,误差同样,误差被控制在 0.0015° ($\sim 10''$)范围内。

3 结论

本文针对时栅角位移传感器动态测量时,传统测量方法对速度敏感而导致测量分辨率下降问题^[19-20],提出了一种鉴幅解算角度的方法,该方法基于线性补偿的CORDIC算法求解角度,不仅解决了CORDIC算法多次迭代效率低下的问题,而且避免了查表法带来的计算误差。该系统无需复杂的硬件电路,节省空间,节约成本。

介绍了整个系统的结构与工作原理,并仿真分析了整个系统误差和完成了整个系统的设计,最后进行了误差分析实验,对比实验结果表明,高速下,新方法优于传统方法。工程应用表明,当速度变化时,该系统的测量误差为 0.0015° 内,优于传统测量系统,具有明显优势,对时栅动态测量研究具有重要价值。

参考文献

- [1] HANSELMAN D C. Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 37 (6): 556-561.
- [2] HANSELMAN D C. Techniques for improving resolver-to-digital conversion accuracy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 38 (6): 501-504.
- [3] CARUSO M, TOMMASO A O D, GENDUSO F, et al. A DSP-based resolver-to-digital converter for high-performance electrical drive applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (7): 4042-4051.
- [4] 徐洋洋, 高文政, 徐大林. 基于DSP的旋转变压器解算系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 54-58. XU Y Y, GAO W ZH, XU D L. Design of digital demodulation method for reslover based on DSP [J].

- Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (1): 54-58.
- [5] 葛川,李朋志,徐立松,等. 电阻应变式位移传感器电路设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6): 58-61.
GE CH, LI P ZH, XU L S, et al. Design and implement of resistance strain displacement sensor circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(6):58-61.
- [6] 石明江, 罗仁泽, 付元华. 小波和能量特征提取的旋转机械故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(8):1114-1120.
SHI M J, LUO R Z, FU Y H. Fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet and energy feature extraction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(8): 1114-1120.
- [7] 彭东林,刘小康,张兴红,等. 时栅位移传感器原理与发展历程[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010, 24 (10): 40-45.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al. The principle and development process of Time Grating Sensor [J]. Journal of Chongqing University of Technology; Natural Science, 2010, 24(10): 40-45.
- [8] 刘小康,彭凯,王先全,等. 纳米时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1136-1142.
LIU X L, PENG K, WANG X Q, et al. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1136-1142.
- [9] 孙世政,陈锡侯,彭东林,等. 嵌入式时栅传感器的动态自标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22 (10): 2757-2764.
SUN SH ZH, CHEN X H, PENG D L, et al. Dynamic self-calibration for embedded time grating sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22 (10): 2757-2764.
- [10] 陈自然,彭东林,刘小康,等. 基于支持向量机时栅数控转台时序预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1793-1799.
CHEN Z R, PENG D L, LIU X K, et al. Research on forecast method for time grating CNC rotary table based on SVR and time series [J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(8): 1793-1799.
- [11] 彭东林,练俊君,陈锡侯,等. 基于时间序列的时栅转台误差修正研究[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2015, 29(1): 96-100.
PENG D L, LIAN J J, CHEN X H, et al. The principle and development process of Time Grating Sensor [J]. Journal of Chongqing University of technology : Natural Science, 2015,29(1):96-100.
- [12] BENAMMAR M, BEN-BRAHIM L, ALHAMADI M A. A novel resolver-to-360° linearized converter [J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4 (1): 96-101.
- [13] 鲁进,陈锡侯,武亮,等. 基于平面线圈的高分辨率时栅角位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 172-181.
LU J, CHEN X H, WU L, et al. High resolution time grating angular displacement sensor based on planar coils [J]. Optics and Precision Engineering 2017, 25(1):172-181.
- [14] AGGARWAL S, MEHER P K, KHARE K. Concept, Design, and implementation of reconfigurable CORDIC[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2016, 24 (4): 1588-1592.
- [15] VOLDER J E. The CORDIC Trigonometric computing technique[J]. IRE Transactions on Electronic Computers, 2009, EC-8(3):330-334.
- [16] PARFIENIUK M, SANG Y P. Sparse-iteration 4D CORDIC algorithms for multiplying quaternions [J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65 (9): 2859-2871.
- [17] 姚亚峰,冯中秀,陈朝. 直接旋转CORDIC算法及其高效实现[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2016, 44(10): 113-118.
YAO Y F, FENG ZH X, CHEN ZH. Direct rotation CORDIC algorithm and its effective implementation [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology : Natural Science Edition, 2016, 44(10):113-118.
- [18] 冯英翘,万秋华,宋超,等. 基于坐标旋转数字计算算法的小型光电编码器细分[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 26-31.
FENG Q Y, WAN Q H, SONG CH, et al. Interpolation of small photoelectric encoder based on coordinate rotation digital computer algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 26-31.
- [19] KIM K C, HWANG S J, SUNG K Y, et al. A study on the fault diagnosis analysis of variable reluctance resolver for electric vehicle [J]. IEEE Sensors, 2010, 53(24): 290-295.

- [20] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, et al. On-axis self-calibration of angle encoders[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 529-534.

作者简介



王伟, 分别在 2010 年和 2013 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: Dr. wangwei@ emails. bjut. edu. cn

Wang Wei received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Chongqing University of technology in 2010 and 2013, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Beijing University of technology. His main research interests include precision

measurement technology and instrument.



彭东林(通讯作者), 1992 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授、重庆大学、合肥工业大学博士生导师, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: pdl@cqut.edu.cn

Peng Donglin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 1992. Now he is a professor in Chongqing University of Technology, and a doctoral supervisor in Chongqing University and Heifei University of Technology. His main research interest is precision measurement technology and instrument.