DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413228

基于误差分析与改进 CORDIC 算法的反射式光栅位移测量方法*

李润泽[1],王 涛[2],牛群峰[1],王 莉[1],林树翔[1]
(1. 河南工业大学电气工程学院 郑州 450000; 2. 三门峡中原量仪股份有限公司 三门峡 472000)

摘 要:针对现有反射式光栅和读数头在小体积时无法设置更多的栅线对数进一步提升稳定性,导致精度无法得到提升等问题,提出了一种提高反射式光栅位移测量精度的方法。该方法通过对影响光栅莫尔信号的直流、幅值、正交性偏差 3 个主要因素进行误差分析来实时误差修正光栅莫尔信号质量,并且采用反正切细分法对修正后的光栅莫尔信号进行插值细分得出测量结果,同时改进了正交性误差修正和反正切细分中用到的 CORDIC 算法。实验结果表明,细分误差由修正前的 45″减小到了经过修正后的 6″,验证了系统的可重复性,正、反向位移的一致性和滞回性,在相同的栅线对数情况下,测量精度达到了±1 μm,显著优于商用光栅位移传感器。

关键词: 反射式光栅;实时误差修正;莫尔信号;CORDIC 算法
中图分类号: TH711 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.99

A reflective grating displacement measurement method based on error analysis and the improved CORDIC algorithm

Li Runze[1], Wang Tao[2], Niu Qunfeng[1], Wang Li[1], Lin Shuxiang[1]
(*1. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China*;
2. Sanmenxia Zhongyuan Measuring Instrument Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China)

Abstract: To address the problem that the existing reflective grating and reading head cannot set more grid lines to further improve the stability and accuracy when the volume is small, a method for improving the displacement measurement accuracy of the reflective grating is proposed. The method corrects the grating Moire signal quality by analyzing the error of three main factors that affect the grating Moire signal, including DC, amplitude, and orthogonality deviation. The arctangent subdivision method is used to interpolate and subdivide the corrected grating Moire signal to obtain the measurement result. Meanwhile, it improves the CORDIC algorithm used in the orthogonality error correction and arctangent subdivision. Experimental results show that the subdivision error is reduced from 45″ before correction to 6″ after correction, which verifies the repeatability of the system, the consistency and hysteresis of the forward and reverse displacement. The measurement accuracy reaches ±1 μm under the same grid logarithm, which is significantly better than that of the commercial grating displacement sensor.

Keywords: reflective grating; real-time error correction; Moire signal; CORDIC algorithm

0 引 言

精密位移测量是半导体、精密测量和计量领域的关键问题。在现代制造系统和测量仪器中,精密测量的水平决定了制造仪器的精度,因此高精度位移测量系统对于现代设备制造具有重要意义[1]。近年来,以光栅的栅距为测量基准的光栅位移测量技术成为超精密位移测量领域的研究热点[2-7]。

研究人员对编码器的光学和机械结构、编码方法、信号处理等方面进行了研究,以进一步的提高其精度[8-9]。梁应选等[10]针对高速、高精度数据采集的实际需求,开

收稿日期:2024-09-01 Received Date: 2024-09-01
*基金项目:河南省科技攻关项目(242102220094)资助

发了基于主、从单片机及个人计算机(personal computer, PC)上位机组成的线性位移测量系统,但很难在后期进行修改或升级,并且双单片机结构也增加了硬件成本。任雪玉等[11]提出一种新型的莫尔信号数字锁相细分方法具有良好的应用价值,但应用于空间有限、小体积的反射式光栅位移测量系统需要对锁相电路进行集成处理。Wang 等[12]提出采用反正切直接求取法,对两路采集信号进行对比,对比值进行反正切计算,求得相位值。但反正切值的计算精度不高且计算周期略长。

魏艳平等[13]采用卷积神经网络对光电编码器的误差进行补偿,补偿光电编码器误差后使得编码器精度比原精度高出 3 倍,但训练需要大量样本数据,对 GPU(graphics processing unit)、CPU(central processing unit)要求较高,不适合大规模生产。此外,也有不少采用了双迭代 CORDIC(coordinate rotation digital computer)算法在三角函数和反三角函数相位计算上进行了改进的研究[14-16],用以提高光栅编码器细分精度,但采用双迭代的方式增加了运算的复杂度。

在光栅测量系统中,测量精度一方面取决于系统中各部分的误差组成以及后续相应的误差补偿算法,另一方面取决于采用合适的细分算法以实现高分辨率动态和快速测量[17]。针对低成本、高精度的微米级测量实际需求,提出一种提高反射式光栅位移测量精度的方法,并对制约测量精度的光栅莫尔信号进行了误差分析和误差修正,改进了 CORDIC 算法的计算精度和计算速度,分析了 CORDIC 算法的误差与迭代次数、位宽的关系,构建了微米级测量精度的反射式光栅位移测量实验平台。

1 反射式光栅测量原理

反射式光栅测量系统的基本光路如图 1 所示。光源发出的光束经过准直透镜后,转变为平面光。随后,该平面光经过指示光栅照射到测量光栅上。基于光栅衍射干涉原理,具有相同栅距的测量光栅与指示光栅之间的相互作用会产生莫尔条纹效应。最终,光电池组将光信号转换为近似正余弦的电信号。当测量光栅与指示光栅相对移动一个栅距时,莫尔条纹也会随之移动一个周期,经过光电接收后转换为一个周期的正余弦信号。

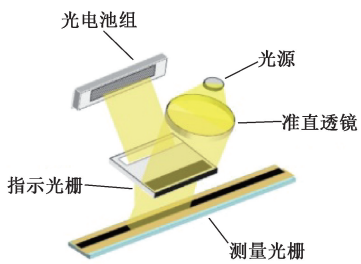


图 1 反射式光栅测量原理

Fig. 1 Reflective grating measurement principle

2 CORDIC 算法

2.1 CORDIC 算法的原理

CORDIC 算法在对数、三角函数及其反函数的计算中具有广泛的应用。该算法的角度求解过程实际上是通过反复迭代逐步逼近真实值。CORDIC 算法在圆周坐标系中的基本迭代方程为:

$$\begin{aligned} x_i &= x_i + d_i \times y_i \times 2^{-i} \\ y_i &= y_i - d_i \times x_i \times 2^{-i} \\ z_i &= z_i - d \times \arctan 2^{-i} \end{aligned} \tag{1}$$

以反正弦函数为例,依据设定的具体迭代初始条件、迭代次数以及旋转因子的判定,可以运用式(2)来计算正弦函数的反正弦值。

$$\begin{aligned} K_i &= \sqrt{1 + 2^{-2i}} \\ x_1 &= 1/\prod_{i=1}^{n} K_i,\ y_1 = 0, z_1 = 0 \\ d_i &= \begin{cases} -1, & y_i < A \\ 1, & y_i > A \\ 0, & y_i = A \end{cases} \\ x_{i+1} &= x_i + d_i y_i 2^{-i} \\ y_{i+1} &= y_i - d_i x_i 2^{-i} \\ z_{i+1} &= z_i - d_i \arctan(2^{-i}) \end{aligned} \tag{2}$$

式中:K_i 代表收缩因子;d_i 为旋转方向,根据 y_i 与已知正弦值 A 的大小关系来判断。在每次迭代计算中,z_i 都会被更新,经过一定次数的迭代后,最终得到的 z_{i+1} 值即为求解的反正弦相位值。

反正弦求解误差曲线如图 2 所示,当迭代次数设置为 $n=16$ 次时,在 Python 环境下对 0°~90°的正弦信号进行反正弦求解,可以得到反正弦函数计算误差曲线。

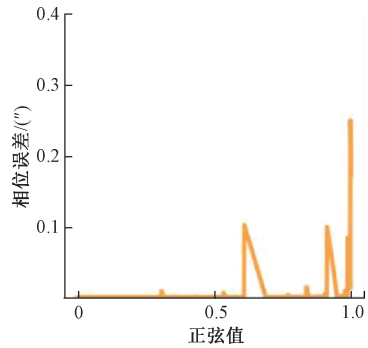


图 2 传统 CORIDC 求解误差曲线

Fig. 2 Traditional CORIDC solves the error curve

2.2　CORDIC 算法的改进

传统的 CORDIC 算法在收敛速度和精度两个方面存在一定的局限性。为了提高计算精度,需要进行大量的迭代运算,这在资源有限的嵌入式系统中不利于高效实现。此外,传统 CORDIC 算法在反三角函数的计算上尚不够成熟,而反正弦、反余弦函数的计算精度直接影响光栅莫尔信号正交性误差的修正效果,反正切函数的计算精度则会影响细分后的准确性。因此本文提出了一种改进的 CORDIC 算法。该算法通过优化迭代步骤,缩短了收敛时间,同时也提升了计算精度。针对反三角函数的计算,该算法采用了更为高效的数值逼近方法,大幅改善了结果的准确性。

传统的 CORDIC 算法在近似值的获取上存在一定的局限性,由于在旋转迭代过程中未考虑待求解矢量 $\boldsymbol{V}(x_i, y_i)$ 的旋转增益。在每次迭代中,矢量 $\boldsymbol{V}$ 的模 A 会有所变化,而旋转方向 d_i 的确定则是基于 x_i、y_i 和 A 的比较,可能导致在迭代过程中对旋转方向 d_i 的误判。旋转迭代过程中,A 的增益公式为:

$$A_{i+1} = A_i \times \sqrt{1 + 2^{-2i}} \tag{3}$$

考虑到待求解矢量 $\boldsymbol{V}$ 的旋转增益,式(3)涉及的复杂根号运算在单片机上的计算速度较慢,这对系统的实时性造成了负面影响。因此,本文提出了一种查找表的方法,将固定不变的根号运算、幂次方运算等计算结果预先存储于查找表中。针对根号运算,本文采用高阶近似的方法,将每次迭代后的增益值存储在查找表中,并依据高阶泰勒展开式(4)的前 3 项进行近似计算。

$$\begin{cases} \sqrt{1+x} = 1+\dfrac{x}{1!}+\dfrac{x^2}{2!}+\dfrac{x^3}{3!}+\cdots, & -\infty < x < +\infty \\ x = 2^{-2i}, & 0 \leqslant i \leqslant n \end{cases} \tag{4}$$

结合式(3)、(4)得出 A 的增益公式为:

$$A_{i+1} = A_i \times (1 + 2^{-2i-1} - 2^{-4i-3} + 2^{-6i-4}) \tag{5}$$

以求解反正弦函数为例,改进之后的算法迭代过程为:

$$\begin{aligned} & x_1 = B,\ y_1 = 0,\ z_1 = 0,\ A_1 = B\sin\theta \\ & d_i = \begin{cases} -1, & y_i < A_i \\ 1, & y_i > A_i \mid z_i > \dfrac{\pi}{2} \\ 0, & y_i = A_i \end{cases} \\ & x_{i+1} = x_i + d_i x_i 2^{-i} \\ & y_i + 1 = y_i - d_i x_i 2^{-i} \\ & z_{i+1} = z_i + d_i \arctan(2^{-i}) \\ & A_{i+1} = A_i \cdot K[i] \end{aligned} \tag{6}$$

式中:B 代表待求解的正弦函数的峰值;A_{i+1} 表示每次迭代后旋转增益的模长。由于在反正弦值域的临界点,CORDIC 算法的计算误差较为显著,因此为了避免此类误差的影响,当 z_i 超出值域范围时,直接将旋转因子 d_i 定义为 1,以确保反三角函数计算的准确性。

改进 CORDIC 算法的反正弦求解误差曲线如图 3 所示,在设定迭代次数为 $n=16$ 的情况下,本文在 Python 环境中对 0°~90°的正弦信号进行了反正弦求解。反正弦函数的计算误差曲线。

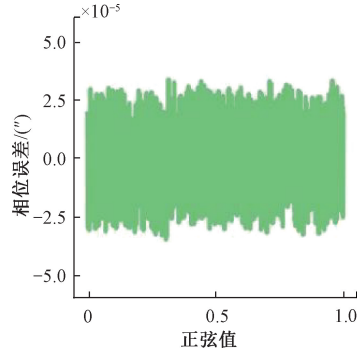


图 3　改进 CORIDC 求解误差曲线

Fig. 3　Improved CORIDC solve the error curve

本文所提出的改进 CORDIC 算法与传统 CORDIC 算法及叶升进[18]提出的双迭代 CORDIC 算法在计算精度、资源占用和计算速度 3 个方面进行了比较,具体结果如表 1 所示,改进 CORDIC 算法针对反三角函数的计算速度达到了 3 μs,相较于传统 CORDIC 算法提高了 482 倍,计算速度提升约 14 倍;而与双迭代 CORDIC 算法相比,计算精度提高了 3.9 倍,计算速度提升了 1.9 倍,并且减少了资源的消耗。

表 1　CORDIC 算法性能对比

Table 1　Performance comparison of CORDIC algorithm

算法类型	平均绝对误差/($\times10^{-5}$ rad)	资源消耗/ZI-data	计算速度/($\times10^{-6}$ s)
传统 CORDIC	752.58	28	41.74
双迭代 CORDIC	6.07	570	5.90
改进 CORDIC	1.56	212	3.00

2.3　CORDIC 算法的计算误差分析

CORDIC 算法最终被应用于数字电路中,其精度主要受到迭代次数和有限寄存器的位宽限制。这两种限制导致 CORDIC 算法产生如下两类计算误差:1)由于计算过程中的有限次旋转所引起的结果近似,这种误差被称为近似误差;2)由于实际数字电路中寄存器的位宽限制而产生的舍入误差。为合理选择迭代次数和寄存器的位宽,本文将对 CORDIC 算法的近似误差和舍入误差进行深入分析。

在 CORDIC 算法迭代过程中，单次迭代角度 θ_i 可以表示为：

$$\theta_i = \arctan(2^{-i}) \tag{7}$$

经过 n 次迭代后，初始向量 A 的真实角度为 α，经过累积得到角度 z_n，θ_1 为初始角度，设此时的近似误差为 ξ，则 ξ 可以表示为：

$$\xi = \alpha - \theta_1 - z_n \tag{8}$$

平均近似误差与迭代次数的关系如图 4 所示。由图 4 可知，相比于传统的 CORDIC 算法和双迭代 CORDIC 算法，改进的 CORDIC 算法，随着迭代次数的增加，近似误差收敛速度更快，计算精度更高，每增加一次迭代过程，平均近似误差约缩减 50%，可选择合适的迭代次数来满足精度需求。

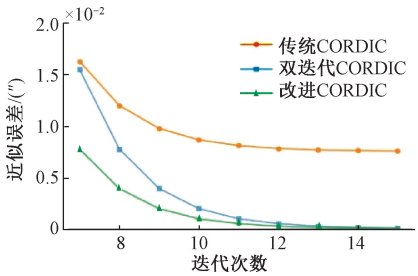


图 4 近似误差曲线

Fig. 4 Approximation error curves

本文将探讨在不同迭代次数下，变量 x_i、y_i、z_i、A_i 的舍入误差与位宽之间的关系。由于在迭代过程中，变量 z_i 和 A_i 涉及复杂的运算，如平方根等，这可能会对嵌入式系统的运行速度和实时性产生影响。因此，z_i 和 A_i 的舍入误差主要取决于所选固定公式的精度，针对特定的精度需求，可以构建相应的查找表。因此，本文将重点分析在不同迭代次数下，变量 x_i 和 y_i 的舍入误差与位宽的关系。

假设 $\boldsymbol{E}(i)$ 为第 i 次迭代产生的舍入误差向量：

$$\boldsymbol{E}(i) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_x(i) \\ \boldsymbol{e}_y(i) \end{bmatrix} (\boldsymbol{e}_x(i) \leqslant \varepsilon, \boldsymbol{e}_y(i) \leqslant \varepsilon) \tag{9}$$

式中：ε 为舍入误差，舍入误差 ε 的大小取决于硬件计算时内部寄存器的位宽 b 大小，在定点数计算情况下，最大舍入误差 ε 可表示为：

$$\varepsilon = 2^{-b-1} \tag{10}$$

第 i 次旋转迭代过程中，模长变化矩阵为：

$$\boldsymbol{P}(i) = K_i \times \cos\theta_{i-1} \begin{bmatrix} 1 & d_i 2^{-i} \\ -d_i 2^{-i} & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

舍入误差由当前迭代的舍入误差和当前迭代之前的累积误差组成，设 $\boldsymbol{V}_1(i)$ 为第 i 次迭代舍入前的迭代向量，$\boldsymbol{V}(i)$ 为舍入后迭代向量，定义误差累积传播公式 $\boldsymbol{Q}[*]$，则第 i 次迭代后的舍入误差可以表示为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{V}_1(i) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_x(i) \\ \boldsymbol{v}_y(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_x(i) \\ \boldsymbol{e}_y(i) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Q}[\boldsymbol{V}_1(i+1)] = \boldsymbol{P}(i)\boldsymbol{Q}[\boldsymbol{V}_1(i)] + \boldsymbol{E}(i+1) \end{cases} \tag{12}$$

则 n 次迭代后 $\boldsymbol{V}(n+1)$ 总的舍入误差为：

$$\boldsymbol{F}(n) = \boldsymbol{Q}[\boldsymbol{V}_1(n+1)] - \boldsymbol{V}(n+1) \tag{13}$$

角度值为 θ，以求解反正弦角度值来评估 x_n、y_n 的最大绝对舍入误差 ε_α 与 b 的关系：

$$\begin{cases} \varepsilon_\alpha = |\arcsin(\sin\theta - \varepsilon y) - \theta| \\ \varepsilon_y = |\boldsymbol{F}(n)| \end{cases} \tag{14}$$

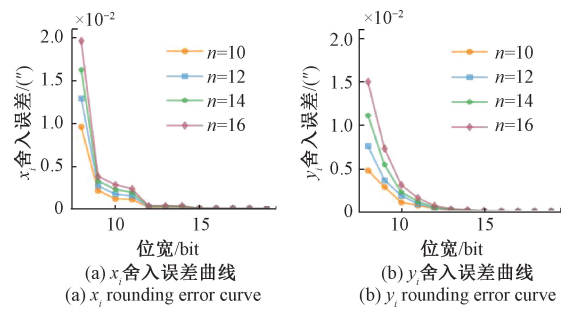
由式(10)、(14)可知，舍入误差 ε_α 取决于 n 和 b 值，取 $n=10\sim16$、$b=8\sim20$，得到绝对舍入误差分布规律如图 5 所示，在细分倍数为 200 倍的情况下，本文 CORDIC 算法在三角函数应用上的计算精度不能超过细分分辨率的 5%，因此计算的最大允许误差为：

$$\delta_{er} = \frac{2\pi}{M} \times 5\% \approx 1.58 \times 10^{-3} \tag{15}$$

针对硬件系统的实现，需要对 CORDIC 算法的迭代次数 n、位宽 bits 进行合理的分配，改进的 CORDIC 算法 n 阶单旋转迭代误差为：

$$\delta_1 \leqslant \arctan(2^{-n}) \tag{16}$$

由式(15)、(16)和图 5 所知，当 $n=10$ 时，$bit=12$ 即可达到目标误差。此外，CORDIC 算法也可在现场可编程门阵列(FPGA)中实现[19-20]，FPGA 适合处理具有高度并行性的算法，可以显著提高执行速度；但 FPGA 开发通常需要专门的硬件描述语言，并且在 FPGA 上调试比在软件环境中更为复杂。



(a) x_i舍入误差曲线 (a) x_i rounding error curve

(b) y_i舍入误差曲线 (b) y_i rounding error curve

图 5 ε_α 与 n 位宽的关系

Fig. 5 Relation of ε_α to n, bits

3 光栅莫尔信号误差分析及修正

3.1 光栅莫尔信号误差分析

采用反正切细分方法，对光栅莫尔条纹电信号进行了幅值、相位和波形的精细插值。实际的光栅莫尔信号质量误差主要涵盖直流漂移、等幅值偏差和正交

性偏差等因素。只有对高质量的光栅莫尔条纹信号进行精细插值,才能满足精度需求。本节将探讨影响光栅莫尔信号质量的 3 个主要因素所导致的插值误差。含 3 项误差的光栅莫尔条纹信号可以表示为:

$$\begin{cases} U_1 = A_1\sin(\theta + b_1) + c_1 \\ U_2 = A_1\cos(\theta + b_2) + c_2 \end{cases} \tag{17}$$

式中:A_1 和 A_2 分别代表正余弦信号的振幅;b_1 和 b_2 表示相位值;c_1 和 c_2 为直流偏差。若 U_1 和 U_2 不同且存在偏差,则可运用式(1)求得反正切相位值。设 θ_1 为所求的相位值,则实际的反正切相位值与理论的反正切相位值之间的误差为:

$$\theta_{er} = \theta_1 - \theta \tag{18}$$

假设一个正弦信号的振幅 $A_1 = 1$ V,而余弦信号的振幅 $A_2 = 0.9$ V,它们之间的振幅差异比为 10%。同时假设直流分量 $c_1 = 0$,$c_2 = 0.02$ V,直流偏置百分比约为 2%。另外,相位角 $b_1 = 0°$,$b_2 = 1°$,相位差约为 1°。将这些参数代入式(18)得到细分误差曲线,如图 6 所示,综合误差导致的最大细分误差超过了 0.05″。因此,如果直接进行细分,则会严重影响测量精度的稳定性。

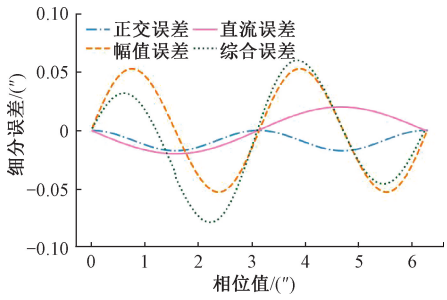


图 6　波形偏差引起的细分误差

Fig. 6　Subdivision error due to waveform

3.2　光栅莫尔信号误差修正

本文采用经过信号电路处理后的正弦和余弦信号进行 ADC(analog to digital converter)采样,以纠正光栅莫尔数字信号对细分误差的严重影响,并对 ADC 采样后得到的直流、幅值和相位偏差进行误差修正。这种方法不仅能节省硬件资源并降低成本,而且更容易适应小体积系统的变化。

当单片机的 ADC 转换精度为 12 bits 时,ADC 转换值的范围为 0~4 096。首先对经过 ADC 转换的 $t-1$ 周期的正余弦信号 $U'_1(i)_{t-1}$ 和 $U'_2(i)_{t-1}$ 进行峰值比较检测,提取经过峰值比较后的最大采样值 u_{max} 和最小采样值 u_{min},根据式(19)计算得出采样后的光栅信号中包含的直流偏差(dc deviation, Dc)和幅值偏差(amplitude deviation, Amp)。

$$\begin{cases} Dc = \dfrac{|u_{max} - 2\,048| - |u_{min} - 2\,048|}{2} \\ Amp = \dfrac{|u_{max} - 2\,048| + |u_{min} - 2\,048|}{2} \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} U'_1(i)_t = U_1(i)_t - Dc \\ U'_2(i)_t = \dfrac{(U_2(i)_t - Dc) \times Amp_1}{Amp_2} \end{cases} \tag{20}$$

直流幅值偏差补偿流程如图 7 所示,根据式(20)把第 t 周期的直流偏差、幅值偏差补偿到 $t+1$ 周期的正余弦信号中,得到直流和幅值修正后的正余弦信号 $U'_1(i)_t$、$U'_2(i)_t$。

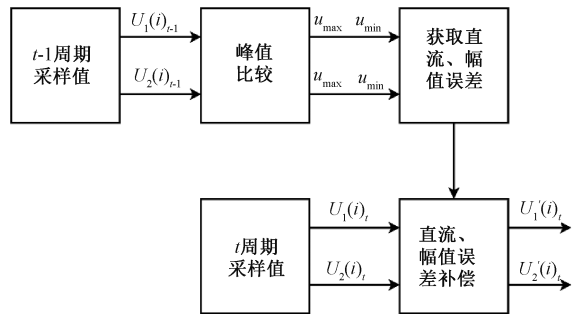


图 7　直流和幅值偏差补偿流程

Fig. 7　Dc and amplitude deviation compensation

正交补偿流程如图 8 所示。首先,对经过直流和幅值误差补偿后的正余弦信号 $U'_1(i)_t$ 和 $U'_2(i)_t$ 进行绝对值处理,并对绝对值化后的 $U''_1(i)_t$ 进行暂存。接下来,采用改进的 CORDIC 算法计算 $U'_1(i)_t$ 的反正弦值 θ 和 $U'_2(i)_t$ 的反余弦值 $\theta+\Delta$。经过补偿后,$U'_2(i)_t$ 的反余弦值即为 θ。最后,将反余弦信号还原为余弦信号 $U''_2(i)_t$。

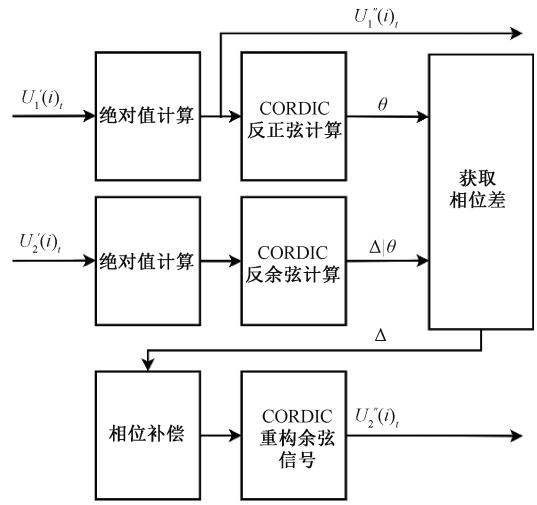


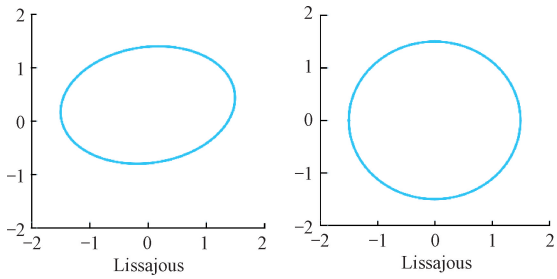
图 8　正交误差补偿流程

Fig. 8　Orthogonal error compensation process

为了验证 3 项误差补偿中最复杂的正交误差补偿方法的可行性,使用 python 软件构造两路原始正弦输入信号,两路正弦信号表达式为:

$$\begin{cases} U_1 = 1.5\sin\theta \\ U_2 = 1.1\cos(\theta + 7°) + 0.3 \end{cases} \tag{21}$$

分别对补偿前两路正弦信号和补偿后两路正弦信号的运动轨迹绘制莉萨如(Lissajous)图,如图 9 所示。



(a) 补偿前 (b) 补偿后
(a) Before compensation (b) After compensation

图 9 补偿前后莉萨如图

Fig. 9 Figure of Lisa before and after compensation

4 实验及结果分析

4.1 实验环境搭建

实验平台如图 10 所示,该实验采用自行研制的 20 μm 栅距的反射式光栅和 Mercy 1200 读数头作为信号源提供的正余弦光栅信号,采用 Agilent-E3649A 直流电源发生器为 STM32F446RET6 核心处理器和信号处理电路提供稳定的 3.3 V 电源,采用德国 SmarAct 公司的 SLC-2490 系列的高精密线性位移台并且搭配 SCU(simple control unit)控制器作为运动校准平台,线性位移台采用了先进的位移传感和闭环控制技术,能够实现亚纳米级的位移分辨率以及稳定的运动控制,SCU 控制器提供精准、稳定和高效的运动控制。该平台适用与正常大气压和高压环境,可进行固定位移量和固定速度平稳运行,分辨率达 4 nm,测量精度可达 ±40 nm。

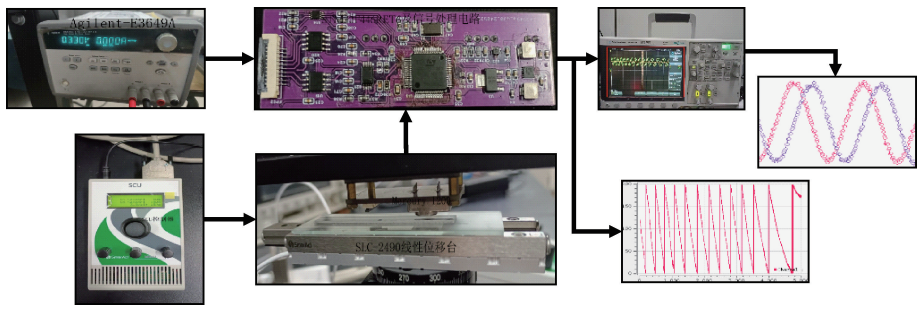


图 10 光栅测量实验平台

Fig. 10 Experimental platform for grating measurement

将光栅固定在线性位移台的表面,其方向与线性位移台的运动方向保持平行,读数头与机械滑块固定连接,读数头与光栅表面保持平行,读数头光源发射点与光栅反射面中心保持 2.4±0.1 mm 的距离。同样借助搭载信号处理电路和单片机的硬件电路实现实时误差补偿和位移测量的算法,最后通过串口通信实现上位机的功能以及测量结果的显示。

4.2 结果分析对比

1)补偿前后细分误差对比

在相同安装条件和同样的环境下,使工作台每次移动 2 个光栅的栅距(20 μm),就可以得到两个周期的细分误差,为了避免细分误差检测的不稳定性,进行多次重复实验,实验结果如图 11 所示,补偿前的细分误差最大范围达到了 45″,补偿后,细分误差最大范围从 45″减小到 6″,细分误差最大范围减小了 9 倍。

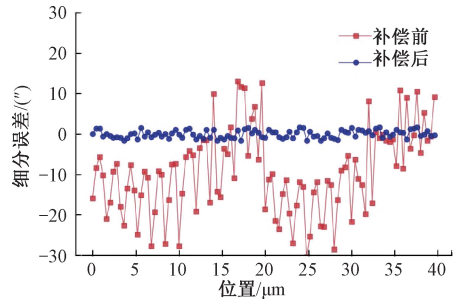


图 11 补偿前后细分误差对比

Fig. 11 Comparison of subdivision errors before and after compensation

2)测量结果分析对比

搭载 SCU 控制器的 SLC-2490 型线性位移台能够通过调节频率和振幅,实现对固定位移 Δx 的触发功能。该平台适用于高精度测量,并可用于光栅测量系统的精度标定,以确保标定结果的可靠性。以 SLC-2490 线性位移

台作为测量基准,使用 SCU 控制器控制线性位移台移动固定位移 x_1,因此固定在线性位移台上且与其表面平行的光栅相对于读数头也会随之发生位移 x_1。假设光栅测量系统的初始值为 x_0 为 0,当发生 x_1 位移时,本文所述的光栅测量实验平台的测量结果为 x_2。在进行误差标定实验时,以线性位移台作为测量基准,本文提出的光栅测量实验平台的测量误差为 x_2-x_1。

基于光栅的栅距为 20 μm 的条件,本文所述的光栅测量系统实现了 200 倍的细分倍数,测量分辨率达到 0.1 μm。通过上述标定模式对测量系统进行误差测试,并对每次测量的数据进行绘制,最终得到误差曲线如图 12 所示,图 12(a)和(b)分别表示在 5 次重复测量中正向与反向的短行程测量误差曲线,图 12(c)和(d)分别表示在 5 次重复测量中正向与反向的长行程测量误差曲线。从图 12 可以观察到,短行程测量(5~30 μm)和长行程测量(1 000~3 500 μm)的测量精度均为±1 μm。

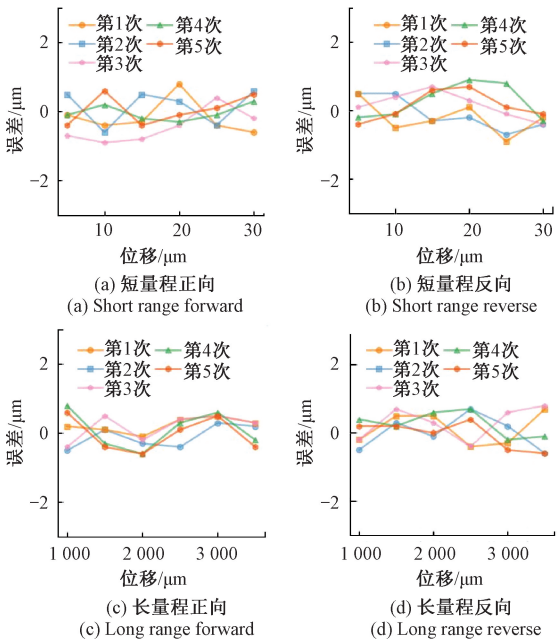


图 12　测量误差曲线

Fig. 12　Measurement error curves

传感器性能测试结果如表 2 所示,根据图 12 的重复 5 次不同量程正反方向的测量结果计算了光栅位移测量系统的重复性的标准差、正反向位移的一致性、滞回性的标准差。

表 2　传感器的性能测试

Table 2　Performance test of sensors　(μm)

性能指标	短量程(5~30)	长量程(1 000~3 500)
重复性	0.470	0.421
一致性	0.468	0.425
滞回性	0.704	0.584

本文采用的光栅为增量反射式光栅,由于机械和光学特性,可能出现滞回性,可以通过设置清零按钮来消除累积误差。

根据测试结果,本文提出的光栅位移测量系统实现了低成本和高精度位移测量,如表 3 所示,本文的光栅位移测量系统(EZ)与德普 EA5、日本三丰 LG100 系列、美国捷克 SM50、德国海德汉 ST3088 等传感器的部分参数对比。

表 3　传感器的部分性能对比

Table 3　Partial performance comparison of the sensors

参数	EZ	EA5	LG100	SM50	ST3088
测量范围/mm	55	50	25	50.5	30
分辨率/μm	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
栅距/μm	20	20	20	20	20
测量精度/μm	±1	±5	±1.8	±1	±1

经测试,本文系统测量精度和海德汉的 ST3088、捷克的 SM50 测量精度持平,主要受制于光栅线制造精度、精度测试中的测量误差、以及读数头与光栅的装配时产生的人工误差等因素有关。研究团队正在搭建更稳定的测试环境以达到更高的测试精度。

5　结　　论

针对现有反射式光栅和读数头在小体积时无法设置更多的栅线对数以提升稳定性的问题,提出了一种提高反射式光栅位移测量精度的方法。首先本文改进了误差修正需要使用的 CORDIC 算法,相比于其他 CORDIC 算法,计算精度和计算速度得到了显著提升。接着对影响光栅莫尔信号的直流、幅值、正交性偏差 3 个主要因素进行误差分析,提出了光栅莫尔信号误差修正流程。实验结果表明,细分误差由修正前的 45″减小到修正后的 6″。在相同的栅线对数情况下,实验测量精度达到了±1 μm,显著优于商用光栅位移传感器,可广泛应用到需要低成本、高精度测量的工业领域。

参考文献

[1] 王国超,颜树华,高雷,等. 光栅干涉位移测量技术发展综述[J]. 激光技术,2010,34(5):661-664,716.
WANG G CH, YAN SH H, GAO L, et al. Survey on the development of grating interferometric displacement measurement technology[J]. Laser Technology, 2010, 34(5):661-664,716.

[2] WANG SH T, LIAO B Q, SHI N N, et al. A compact

and high-precision three-degree-of-freedom grating encoder based on a quadrangular frustum pyramid prism[J]. Sensors, 2023, 23 (8):4022.

[3] HOSSEIN M K G, JENG W J. High-precision miniaturized low-cost reflective grating laser encoder with nanometric accuracy[J]. Applied Optics, 2020, 59 (19): 5764-5771.

[4] 刘小康,陈自然,王先全,等. 空间精密位移信号软细分方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(3):540-545.
LIU X K, CHEN Z R, WANG X Q, et al. Research on soft subdivision method of space precision displacement signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(3):540-545.

[5] 任曦,杜升平,陈科,等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(17):171-178.
REN X, DU SH P, CHEN K, et al. Angle measurement error source and spectrum analysis of circular grating encoder[J]. Advances in Lasers and Electronics, 2020, 57(17):171-178.

[6] CHEN G. Improving the angle measurement accuracy of circular grating[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91 (6): 065108.

[7] 何章宏. 双光栅干涉位移传感器及其电路系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
HE ZH H. Research on dual grating interference displacement sensor and its circuit system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2011.

[8] MU Y, HOU N J, WANG CH, et al. An optoelectronic detector with high precision for compact grating encoder application [J]. Electronics, 2022, 11 (21): 3486-3486.

[9] 吕强,李文昊,巴音贺希格,等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10 (1): 39-50.
LYU Q, LI W H, BAYIN H X G, et al. An interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 39-50.

[10] 梁应选,王楠,张昌明. 基于光栅传感器位移测量系统设计[J]. 机械研究与应用, 2022, 35 (1): 85-88.
LIANG Y X, WANG N, ZHANG CH M. Design of grating sensor displacement measurement system [J]. Mechanical Research and Application, 2022, 35 (1): 85-88.

[11] 任雪玉,黄垚,薛梓,等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(3):25-34.
REN X Y, HUANG Y, XUE Z, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating Moiré signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(3): 25-34.

[12] WANG L, LI P, QIAO Y, et al. Study on high precision magnetic encoder based on the arctangent cross-intervals tabulation method [J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2016, 13 (3): 167-173.

[13] 魏艳平,肖海柳. 卷积神经网络的光电编码器误差补偿[J]. 激光杂志, 2022, 43 (8): 174-179.
WEI Y P, XIAO H L. Error compensation of photoelectric encoder based on convolutional neural network[J]. Journal of Laser, 2022, 43 (8): 174-179.

[14] 叶树亮,张潜,朱维斌. 光栅莫尔信号正交误差实时补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (1): 57-64.
YE SH L, ZHANG Q, ZHU W B. Research on real-time compensation of quadrature error of grating Moire signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (1): 57-64.

[15] ZHU W B, YE SH J, HUANG Y, et al. An improved CORDIC for digital subdivision of Moire signal [J]. Metrology and Measurement Systems, 2020, 27 (1): 51-64.

[16] ZHU W B, YE SH J, HUANG Y, et al. Design of a precise subdivision system for gratings using a modified CORDIC algorithm[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2019, 13 (8): 1284-1291.

[17] 刘红忠,史永胜,尹磊,等. 平面反射式二维光栅测量系统研究[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(3):290-298.
LIU H ZH, SHI Y SH, YI L, et al. Research on planar reflection two-dimensional grating measurement system[J]. Advances in Laser & Optoelectronics, 2023, 60 (3): 290-298.

[18] 叶升进. 基于反正切法的光栅莫尔信号数字式细分研究[D]. 杭州:中国计量大学,2020.
YE SH J. Research on digital subdivision of grating mohr signal based on arc-tangent method [D]. Hangzhou:

China Jiliang University,2020.

[19] 邓威,刘桂雄,汤少敏. 机器人减速器负载的 CORDIC 计算算法与 FPGA 实现[J]. 电子测量术, 2021, 44(16):74-78.
DENG W, LIU G X, TANG SH M. CORDIC calculation algorithm and FPGA realization of robot reducer load[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 74-78.

[20] 赵创,张为. 基于 HCORDIC 的浮点运算协处理器的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(11):58-65.
ZHAO CH, ZHANG W. Design of floating poin-tarithmetic coprocessor based on HCORDIC[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11):58-65.

作者简介

李润泽,2023 年于河南工业大学获得学士学位,现为河南工业大学硕士研究生,主要研究方向为光栅传感检测技术。
E-mail:1410933624@qq.com

Li Runze received his B. Sc. degree from Henan University of Technology in 2023. He is currently a graduate student in the School of Electrical Engineering at Henan University of Technology. His main research interest is grating sensing detection technology.

牛群峰(通信作者),1995 年于郑州工学院获得学士学位,1999 年于南京理工大学获得硕士学位,2007 年于南京理工大学获得博士学位,现为河南工业大学副教授、博士生导师,主要研究方向为微纳尺度精密测量与控制。
E-mail:niuqunfeng@163.com

Niu Qunfeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhengzhou Institute of Technology in 1995, M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1999, and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2007. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Henan University of Technology. His main research interests inc.