

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412755

多通道光栅莫尔信号实时细分与等分平均技术研究*

李强^{1,2}, 刘宏伟^{1,2}, 何韬^{1,2}, 杜坤^{1,2}, 夏仰球^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900; 2. 国家机床产品质量检验检测中心(四川) 成都 610200)

摘要:圆光栅受刻线误差、安装偏心等多种因素的共同影响,其定位精度无法直接满足高精度测角系统的需求。多读数头等分平均方法可以实现圆光栅精度的自校准,是提高测角系统精度的有效方法。然而,商业伺服控制系统通常不支持多路读数头信号实时接入同一路伺服轴,这造成了等分平均方法的在线应用存在困难。本文针对多通道光栅莫尔信号的采样、误差补偿、实时细分和等分平均进行研究,基于FPGA平台实现了多读数头实时处理系统的研制,并在测角转台开展了应用验证。设计了细分值稳定性、控制分辨率、角定位精度和细分误差实验,验证了多读数头实时处理系统的性能。所设计的多读数头处理系统,在测角转台上可以满足0.005"的控制分辨率需求,取得了0.58"定位精度和0.06"重复定位精度等测试结果。

关键词:光栅莫尔信号;多读数头;等分平均方法;误差补偿;FPGA;转台

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

Study on real-time subdivision and equal division averaging technology for multi-channel grating moiré signals

Li Qiang^{1,2}, Liu Hongwei^{1,2}, He Tao^{1,2}, Du Kun^{1,2}, Xia Yangqiu^{1,2}

(1. Institute of Machinery Manufacturing Technology CAEP, Mianyang 621900, China; 2. National Machine Tool Production Quality Supervision Testing Center (Sichuan), Chengdu 610200, China)

Abstract: Circular gratings are susceptible to factors such as engraving errors and installation eccentricity, preventing them from directly meeting the positioning accuracy requirements of high-precision angle measurement systems. Averaging data from multiple read heads can effectively self-calibrate the accuracy of circular gratings, thereby enhancing the precision of angle measurement systems. However, commercial servo control systems typically do not support real-time access to multi-read head signals on the same servo axis, making the online application of the equal division averaging method challenging. This paper explores the sampling, error compensation, real-time subdivision, and equal division averaging of multi-channel grating moiré signals. A real-time processing system for multiple read heads was developed using an FPGA platform and applied to an angle measurement turntable. Experiments were designed to evaluate the stability of subdivision values, control resolution, angular positioning accuracy, and subdivision error, verifying the performance of the real-time multi-read head processing system. The system successfully enabled the online application of the equal division averaging method for multiple read heads, meeting the control resolution requirement of 0.005" on a rotating test bench for angle measurement, achieving a positioning accuracy of 0.58", and obtaining a repeatability of 0.06" in positioning accuracy.

Keywords: grating moiré signal; multi-read head; equal division averaging method; error compensation; FPGA; turntable

0 引言

高精度测角系统是国防装备、航天航空、测试计量和精密仪器等领域的关键功能部件,在军民两用和国民经济

建设中具有重要应用。在计量转台、天文望远镜和激光跟踪仪等应用场合,要求测角系统精度达到亚角秒级,甚至优于0.1"的精度。

测角系统的角位置精度主要受到编码器、机械轴系和驱控系统等因素的共同影响。其中圆光栅编码器的精

收稿日期:2024-04-19 Received Date: 2024-04-19

* 基金项目:国防科工局技术基础项目(J0133-2224-FJC)资助

度与安装误差、回转误差、刻线误差与电子细分误差等因素有关^[1]。雷尼绍在“圆光栅的精度”白皮书中指出,圆光栅编码器的误差主要为12阶以内的静态低阶误差,其中受安装偏心引起的一阶误差为最大分量。光栅直接安装到回转轴系后,其精度难以满足亚角秒级的使用需求。因此需要对圆光栅编码器误差进行补偿,提高其测量精度。

提高测角系统精度的有效方法之一是增加读数头的数量,并利用等分平均方法(equal division averaging, EDA)实现误差补偿,这是一种可以不依赖高精度外部参考基准、可以适应现场环境的自校准方法^[2]。针对1阶误差,通过2个对径安装的读数头即可实现补偿,如海德汉的ERP880双读数头圆光栅和雷尼绍的RESM双读数头圆光栅。目前,国内在多读数头的应用方面有较多研究,并获得了较好的圆光栅误差补偿结果。艾晨光等^[3]采用双读数头方式,建立了圆光栅偏心测角误差补偿模型,对圆光栅安装偏心所产生的测量误差进行修正,但是此方式主要补偿静态一阶误差,对测角系统精度提高有限。苏东风等^[4]通过对测角系统进行谐波分析,采用数字量相加的四均布读数头的方法,降低了4次以内及除4次倍数外的谐波分量影响,进一步提高了圆光栅测角精度。黄龙等^[5]将四均布读数头方法应用于望远镜测角系统,消除了偏心误差,轴系误差以及其装置存在的部分圆度误差,实现亚角秒级测角的应用。张文颖等^[6]对6个读数头的布局方式进行了优化,提出一种采用奇数头和偶数头相结合的读数头混合布局方式,有效降低了12阶整数倍之外的静态谐波误差。刘红忠团队^[7-9]长期从事国产高精度圆光栅的研制,并最高通过12个读数头等分平均提高圆光栅精度。

然而,读数头数量的增加使得测角系统更加复杂,也给光栅信号的采集与处理增加了难度。EDA方法在实际应用过程中存在1个明显问题:商业伺服控制系统几乎都不直接支持多路读数头信号实时接入同一伺服轴,这使得EDA方法只能离线应用,不能用于高分辨率高精度的在线角度控制。

为了解决这一问题,雷尼绍公司设计了双读数头接口,可将两路读数头信号组合成一路输出至控制系统,但该接口不能实现更多读数头的处理。欧姆龙可编程多轴运动控制器可以通过移位操作,实现2ⁿ个读数头的实时平均,缺点是不能实现任意数量读数头的实时等分平均,且该方案成本较高。目前,缺乏可以实现任意读数头实时等分平均的有效方法,EDA方法的应用受到限制。

针对这一问题,本文将研究多通道光栅莫尔信号实时细分及等分平均技术,并研制多读数头实时处理系统,以实现多读数头信号的实时等分平均,并将等分平均值实时反馈至伺服控制系统。本研究可以降低系统复杂

度,实现EDA方法的在线应用,提高测角系统的角度生成精度。

1 光栅莫尔信号实时细分原理

多读数头处理系统需要实现角度数据的实时处理,以满足伺服控制系统对反馈的需求。系统主要由5个模块串联组成:信号采集、误差补偿、光栅细分、角度平均和脉冲输出,如图1所示。系统的输入信号是多个读数头的正余弦莫尔信号与零位信号,输出信号是增量式正交脉冲信号。多读数头系统通过模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)实现光栅莫尔信号的模数转换,并基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现信号的同步采集与实时处理。光栅的零位脉冲信号通过FPGA直接输出。

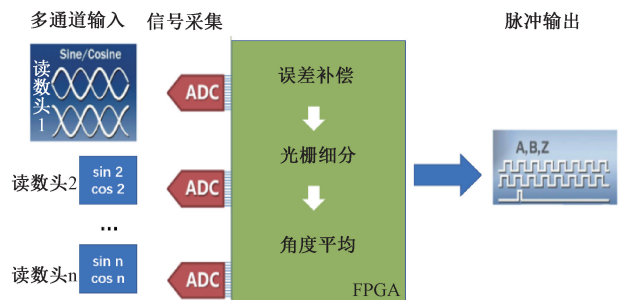


图1 系统架构

Fig. 1 System architecture

1.1 信号采集

光栅每移动1个栅距,会输出1个周期的正余弦电压信号,通过ADC对所有信号进行同步采集,并将正余弦电压信号转换为数字信号。

钟玉龙等^[10]提出一种高速采样方案,通过数百MHz采样速率的ADC,确保每个细分值都被采样。此方案受正余弦信号的输入频率及细分倍数约束,圆光栅转动越快、细分倍数越高,所需要的ADC采样速率越高,这造成采样方案的成本过高。

本文提出了一种低速采样方案,仅需通过几MHz速率的ADC采样,即可不丢细分值,大幅降低了成本。低速采样方案对输入信号进行双线程处理,线程1只计算当前正余弦信号的周期数 C ,线程2只计算在当前周期内的细分值 S ,通过式(1)计算当前角度。这样只需要确保采样不丢信号周期,无需将每个细分值都采样到:

$$\theta = CF + S \quad (1)$$

式中: θ 为当前角度; F 为每个栅距对应的角度。

1.2 误差补偿

受到光栅刻线质量、读数头安装等因素影响,光栅莫

尔信号存在误差,主要分为3类:直流偏置、不等幅误差和正交偏差^[11-13],需要对各类误差完成补偿。补偿算法需要考虑到FPGA的计算效率,避免因为计算造成的相位滞后。

1) 直流偏置

只带有直流偏置误差的莫尔信号可以表示为:

$$\begin{aligned} U_s &= A \sin \theta + C_s \\ U_c &= A \cos \theta + C_c \end{aligned} \quad (2)$$

式中: U_s 与 U_c 为两路光栅莫尔信号采样电压值; A 为信号幅值; C_s 与 C_c 为两路信号的直流误差。

通过下式计算直流偏置误差:

$$\begin{aligned} C_s &= (U_{smax} + U_{smin})/2 \\ C_c &= (U_{cmax} + U_{cmin})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: U_{smax} 、 U_{smin} 、 U_{cmax} 、 U_{cmin} 分别为莫尔信号在1个完整周期内正余弦信号的最大值与最小值。

2) 不等幅误差

只带有幅值误差的莫尔信号可以表示为:

$$\begin{aligned} U_s &= A \sin \theta \\ U_c &= A(1+r) \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

式中: r 为不等幅系数。

通过下式计算不等幅误差:

$$\begin{aligned} A_s &= U_{smax} - U_{smin} \\ A_c &= U_{cmax} - U_{cmin} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: A_s 与 A_c 分别为正弦信号和余弦信号的幅值。

为消除由于幅值不等引起的误差,减小计算量,通过以下公式使得两路信号的幅值相等,并消除直流偏置误差:

$$\begin{aligned} U_{s1} &= (U_s - C_s)A_c \\ U_{c1} &= (U_c - C_c)A_s \end{aligned} \quad (6)$$

式中: U_{s1} 与 U_{c1} 分别为幅值相等、无直流偏置误差的正余弦信号值。

3) 正交误差

只带有正交误差的莫尔信号可以表示为:

$$\begin{aligned} U_s &= A \sin \theta \\ U_c &= A \cos(\theta + \delta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: δ 为两路莫尔信号的正交误差。

为补偿正交误差,刑前进^[14]通过坐标旋转数字计算机算法(coordinate rotation digital computer,CORDIC)将 U_s 与 U_c 对应的角度分别求解出来,再计算差值得到相位偏差。这种方法计算量较大,并且算法延时较为严重。

本文提出的正交误差补偿方法,首先将两路信号交叉相加减:

$$\begin{aligned} U_{s2} &= U_s + U_c \\ U_{c2} &= U_c - U_s \end{aligned} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)整理得:

$$\begin{aligned} U_{s2} &= 2 \cos\left(45^\circ + \frac{\delta}{2}\right) A \sin\left(\theta + \frac{\delta}{2} + 45^\circ\right) \\ U_{c2} &= 2 \cos\left(45^\circ - \frac{\delta}{2}\right) A \cos\left(\theta + \frac{\delta}{2} + 45^\circ\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: U_{s2} 与 U_{c2} 为转化后的只带有幅值误差的莫尔信号。可见,通过交叉运算后,正交误差转化为了等幅误差。再次使用等幅误差的补偿方法,即通过式(4)、(5)可消除等幅误差,从而获得无误差的正余弦信号。本文正交误差补偿算法无需使用除法,仅需几步运算即可完成补偿,大幅提高了计算效率。

1.3 光栅细分

由于正余弦信号在不同位置对应的幅值变化率不同,因此直接对正余弦信号进行幅值细分会产生较大误差,尤其是在信号缓慢变化的峰值点附近。因此需要构造线性度较好的函数提高细分精度。

通常需要对两路莫尔信号进行正余切函数构造,通过对构造函数的幅值角度进行解算,实现光栅莫尔信号的细分,如下:

$$u(\theta) = \begin{cases} \frac{U_{SH}}{U_{CH}}, & |U_{SH}| < |U_{CH}| \\ \frac{U_{CH}}{U_{SH}}, & |U_{CH}| \leq |U_{SH}| \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{SH} 与 U_{CH} 为经过补偿后的光栅莫尔信号采样电压值。构造的正切函数具有较好的线性度,目前在较多研究中得到使用^[15]。

完成正余切函数构造后,接下来进行幅值细分。幅值细分算法分为八区间划分与高倍细分两部分。先根据其正负极性和幅值大小信息实现莫尔信号单个周期内8区间划分,每个区间45°,划分方法如表1所示。

表1 8区间划分

Table 1 Eight-interval division

sin 极性	cos 极性	sin 、 cos 大小	区间划分
+	+	sin < cos	1
+	+	sin > cos	2
+	-	sin > cos	3
+	-	sin < cos	4
-	-	sin < cos	5
-	-	sin > cos	6
-	+	sin > cos	7
-	+	sin < cos	8

对于高精度系统,8个区间的细分通常难以满足测量分辨率的要求,需要进行高倍细分。高倍细分的方法

如表2所示,其中 T_n 为区间所对应的细分数, N 为每个周期的细分数。

表2 高倍细分计算公式

Table 2 High multiplier subdivision calculation formula

区间号	细分值计算公式
1	$T_n = \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
2	$T_n = \frac{N}{4} - \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
3	$T_n = \frac{N}{4} + \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
4	$T_n = \frac{N}{2} - \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
5	$T_n = \frac{N}{2} + \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
6	$T_n = \frac{3N}{4} - \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
7	$T_n = \frac{3N}{4} + \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$
8	$T_n = N - \frac{N \arctan \frac{ \operatorname{Asin} \theta }{ \operatorname{Acos} \theta }}{2\pi}$

在FPGA系统中,除法运算的效率与精度较低,因此在实际应用中,反正切的相位解算通常采用CORDIC算法^[16]或者改进的CORDIC算法来高效实现^[17]。CORDIC算法通过二分法的原理,直接从正余弦函数值出发求解反正切。此算法仅靠少量加法和移位运算实现,而不再需要做除法,大大降低了运算量。

2 多通道光栅莫尔信号实时等分平均技术

2.1 角度平均

角度平均需考虑圆周闭合造成的相位卷绕问题。当圆光栅刚好转到 360° 时,同一时刻不同读数头的数据存在由 $360^\circ \sim 0^\circ$ 的突变,不能直接平均。

解卷绕算法通过将圆周转动映射为数轴上的线性运动,处理后的角度值在数轴上连续变化,消除了周期性角度突变造成的相位卷绕。但受到FPGA资源限制,不能进行无限的线性运动。本文采用了1种改良的解卷绕算

法,在FPGA中,圆周角度被离散化并映射到 $0 \sim 2^n - 1$ 的数值范围内,其中 n 为数据位宽。以63 000线的光栅为例,细分4 096倍,即每圈258 048 000脉冲,由于其与 2^{28} 接近,故 n 取28。改良的解卷绕算法在28位的角度值左侧附加4位表示圈数。若圈数增加至4时,自动归零。通过将多个带圈数的角度值求平均,所得结果低28位即为角度平均值,在多圈范围内,解决了卷绕问题。

在完成卷绕问题解决后,直接通过FPGA的除法ip核获取角度的平均值。

2.2 脉冲输出

多读数头信号平均之后,需将细分增量值通过脉冲信号输出至伺服控制系统。由于采用低速ADC采样方案,存在2个采样点的细分值相差大于1的情况,而在每个采样周期内,需要将细分增量值均匀输出,否则会引起伺服控制系统抖动。

在 T 个FPGA时钟周期内均匀地输出 S 个脉冲,首先计算累加速率 v ,计算公式如下:

$$v = \frac{2^8 S}{T} \quad (11)$$

设计的脉冲均匀算法如算法1所示。

算法1 脉冲均匀算法

$$M(k) = M(k-1) + v$$

$$\text{out}(k) = M(k) > 8$$

if out(k) > out(k-1) then

$$TTL(k) = !TTL(k-1)$$

end if

式中: M 为累加器; k 为时钟周期数; out 为需比较的值; TTL 为要输出的电平。初始化条件 $M(0) = 0, \text{out}(0) = 0, TTL(0) = 0, k \geq 1$ 。在每个时钟周期,累加器按照累加速率 v 递增, out 的值每次发生变化时,就改变1次输出电平,实现脉冲输出。

3 实验验证

本文ADC选用采样频率3 MHz、采样位数16 bit的ADS9224R芯片进行光栅莫尔信号的采集,选用型号为EP4CE15F17C8N的FPGA进行实时计算,所设计的多读数头处理系统硬件实物如图2所示。

为了灵活扩展读数头的数量,将ADC芯片单独设计在插卡式的采集板上,通过金手指卡槽将读数头插在以FPGA为核心的实时处理板上。多读数头处理系统的脉冲信号输出最大频率为10 MHz,与伺服控制系统的脉冲信号接收能力保持一致。实验平台使用安装有海德汉

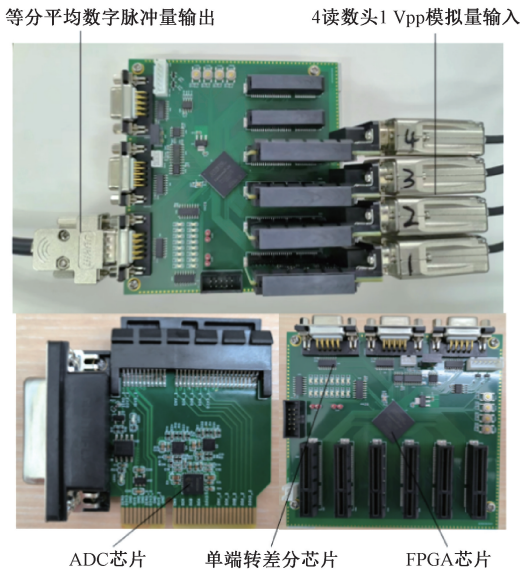


图 2 多读数头处理系统硬件实物

Fig. 2 Hardware of multi-reading head processing system

ERP1000 圆光栅的测角转台,该光栅整圆周共 63 000 线。圆光栅均布 4 个读数头,实验装置如图 3 所示。在 FPGA 内每个读数头细分 1 024 倍,在通过脉冲输出后,因为两路信号的正交特性会实现 4 倍频计数,实际细分倍数为 4 096 倍,每个细分值对应约 0.005"。

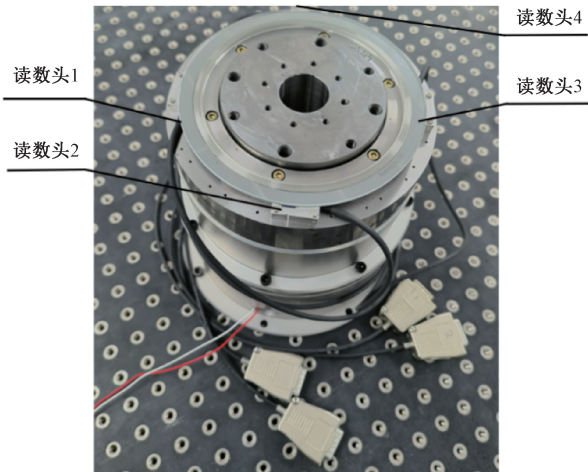


图 3 4 读数头测角转台

Fig. 3 Turntable with four reading heads

在完成系统连接后,首先缓慢转动测角转台,产生数百个正余弦信号至多读数头处理系统,FPGA 内部自动根据式(2)~(9)完成误差补偿,补偿完成后相关参数会写入内存,实现断电记忆,随后可开始实验验证。

本文设计了细分值稳定性实验、控制分辨率实验、细分误差实验和角定位精度实验,在实际应用中验证多读

数头处理系统的性能。实验在隔振等级满足 VC-D 的环境下进行,控制环境温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$,湿度 $50\% \pm 10\%$,减少明显气流扰动,通过稳定的测试环境保证实验结果。实验中用到的测量仪器和设备参数如表 3 所示。

表 3 实验所用仪器的技术参数

Table 3 Technical parameters of the instrument used in the experiment

仪器	技术参数
24 面棱体	二等精度
自准直仪	分辨率:0.01"
	X 轴示值误差: $\pm 10''$ 范围内 $\leq \pm 0.05''$
	$\pm 300''$ 范围内 $\leq \pm 0.1''$
	测量重复性:0.04"
激光陀螺测角仪	角度静态测量误差 $\pm 0.19''$
测角转台	回转精度: $\leq 800 \text{ nm}@ 10 \text{ rpm}$

3.1 角度平均细分值稳定试验

当转台静止时,多读数头处理系统输出的细分值应稳定,若存在较大抖动,则说明系统的分辨率不足,细分倍数应降低;反之则说明当前细分倍数可保证细分稳定。实验过程无任何控制输入,转台台面通过螺钉完成固定,仅对反馈的角度进行监测。数据采集软件设置采样频率为 1 kHz,采样时间 2 s,采样结果如图 4 所示。细分值仅在相邻 2 个数值间小范围跳动,证明本系统在 0.005"分辨率下具备足够高的信噪比,可以将细分值稳定输出。

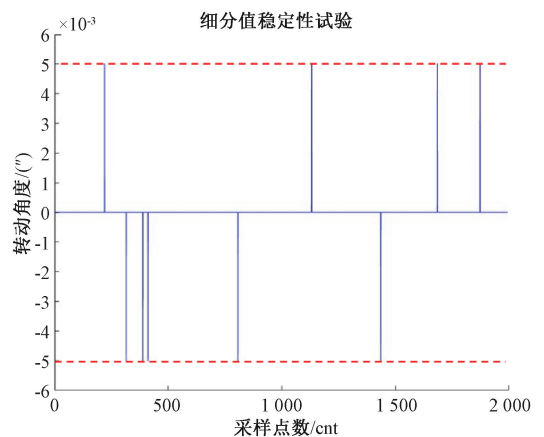


图 4 细分值稳定性测试结果

Fig. 4 Results of stability tests for subdivision values

3.2 控制分辨率试验

本实验将多读数处理系统输出的平均值接入转台控制系统,以验证所设计的系统可以满足转台控制系统的反馈需求。实验设置目标位置每次步进 1 个细分值

($0.005''$),共步进10个细分值,经过试验验证,转台的控制误差均稳定在 ± 1 个细分值,控制误差如图5所示。多读数头处理系统可以满足转台控制系统对 $0.005''$ 控制分辨率的反馈需求。

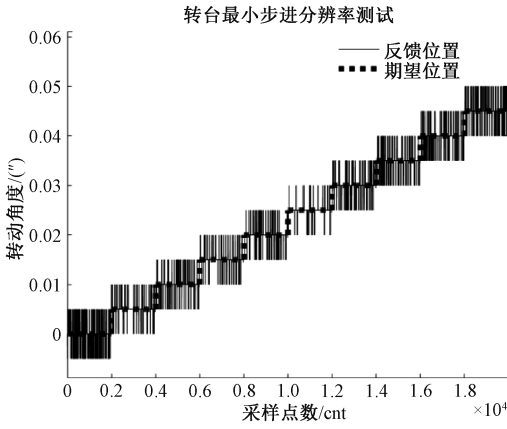


图5 转台控制分辨率测试结果

Fig. 5 Test results of turntable control resolution

3.3 细分误差试验

实验采用24面棱体和自准直仪进行测试。鉴于自准直仪的分辨率为 $0.01''$,实验进行步进2个细分值的测试,这使得自准直仪能够在每个测试步骤中可以显示 $0.01''$ 的角度变化。测试范围为 $-0.64'' \sim +0.64''$,共计步进256个细分值。将自准直仪读数与多读数头系统的输出增量值做直接比较,结果如图6所示。多读数头平均细分值与自准直仪读数偏差维持在 $0.03''$ 以内,具有较高的细分精度。

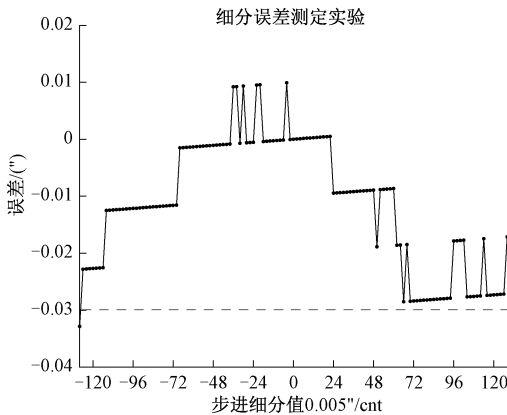


图6 细分误差的测试实验结果

Fig. 6 Results of accuracy tests for subdivision values

3.4 角定位精度试验

多读数头处理系统通过EDA方法实现圆光栅的在

线自校准,可有效提高转台定位精度。通过对转台角定位精度进行检测,可评价多读数头处理系统对误差的补偿能力。角定位精度的测试方法参照JB/T 9942—2012和JJF1210—2008规范,可使用排列互比法或直接比较法进行测试。排列互比法通过多面棱体与自准直仪进行定位精度测量,但该方法对安装与环境的要求较高。本文采用了直接比较法,使用精度为 $\pm 0.19''$ 的激光陀螺测角仪对转台的角定位精度进行测量,每 6° 测量一次,共测量36个点,实验装置如图7所示。

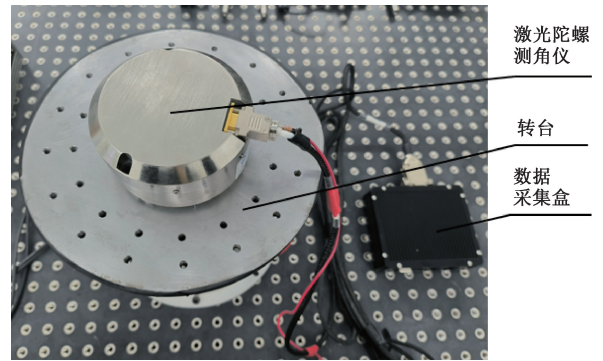


图7 角定位精度实验

Fig. 7 Diagram of the angular positioning accuracy experiment

4路光栅莫尔信号经多读数头处理系统实时等分平均后接入转台伺服控制系统。定位精度测试结果如图8所示,整圆周内定位精度 $0.58''$ (峰谷值)。残留误差的频谱分析结果如图9所示,4读数头等分平均方法有效降低4阶以内的误差,残留误差中4阶误差最大,其次是1阶、8阶与12阶误差。重复定位精度如图10所示,重复定位精度为 $0.06''$ (3Sigma)。

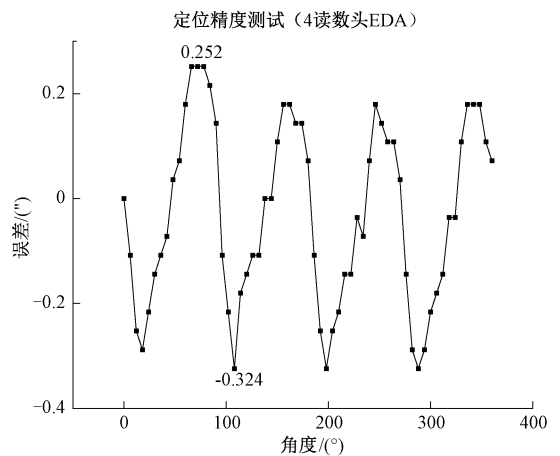


图8 角定位精度测试结果

Fig. 8 Results of the angular positioning accuracy test

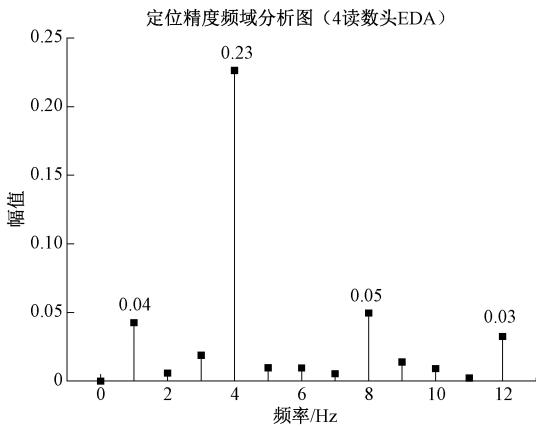


图9 定位精度频谱分析

Fig. 9 Spectrum analysis of angular positioning accuracy

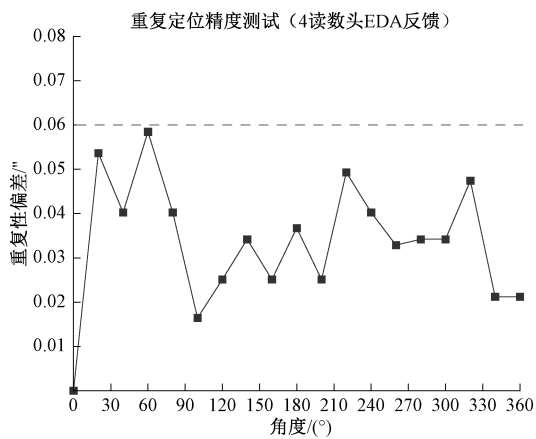


图10 重复定位精度测试结果

Fig. 10 Results of repeated angular positioning accuracy tests

4 结 论

针对多读数头等分平均方法难以在商业伺服控制系统在线实时应用的问题,本文开展了多通道光栅莫尔信号实时细分及等分平均技术研究,在FPGA平台完成了多读数头实时处理系统的研制,完成细分值稳定性、控制分辨率、细分误差和定位精度实验,验证了多读数头实时处理系统的性能,实现了多读数头等分平均方法的在线实时应用。研究结果如下:

1) 通过低速采样方案,只需确保不丢光栅刻线周期即可实现细分值的采样,降低了硬件成本。

2) 提出了1种正交误差补偿算法,有效提高了光栅莫尔信号正交误差的补偿效率。

3) 所设计的多读数头处理系统,在测角转台上可以满足0.005"的控制分辨率需求,实现了0.58"定位精度和

0.06"的重复定位精度测试结果。

多读数头实时等分平均方法将面向集成化的方向发展,将多读数头处理系统与圆光栅盘设计为同轴一体安装,减少光栅的外部出线数量,提升光栅系统的集成水平。此外,研究多读数头的安装布局方式,实现更少数量的读数头消除更多的圆光栅误差,将是发展趋势。

参考文献

- [1] 周彬彬. 高精度圆光栅测角系统误差补偿技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
ZHOU B B. Research on error compensation technology for high accuracy circle gratings angel measuring system[D]. Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] 李尔丽, 薛梓, 黄焱, 等. 全圆连续角度标准装置的系统误差分离与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2023, 42(3): 1-9.
LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. System error separation and compensation of the continuous full circle angle standard device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 42(3): 1-9.
- [3] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2479-2484.
AI CH G, CHU M, SUN H X, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2479-2484.
- [4] 苏东风, 续志军, 贾继强, 等. 提高圆光栅测角系统精度的读数头设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 653-657.
SU D F, XU ZH J, JIA J Q, et al. Read-head design for improving the precision of circular grating angular measuring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(7): 653-657.
- [5] 黄龙, 潘年, 马文礼, 等. 拼接式编码器测角误差分析及试验[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 464-470.
HUANG L, PAN N, MA W L, et al. Error analysis and experimentation of scale tape encoder[J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 464-470.
- [6] 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 多读数头混合布局测角误差抑制方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2339-2346.
ZHANG W Y, LAO D B, ZHOU W H, et al. Suppression method for angle measurement error of mixing-layout multiple reading head[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9): 2339-2346.
- [7] 赵国博, 叶国永, 史永胜, 等. 基于比值线性化的高适应性光栅细分方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(7):

- 781-788.
- ZHAO G B, YE G Y, SHI Y SH, et al. Research on ratiometric linearization based high adaptive grating signal subdivision method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(7):781-788.
- [8] 冯龙,蒋维涛,刘红忠,等. 步进式旋转光刻制备柱面微结构光栅模具[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(5): 316-321.
- FENG L, JIANG W T, LIU H ZH, et al. Fabrication of the grating mold with micro-patterns on the cylindrical surface by step rotating lithography [J]. Micro-nanoelectronic Technology, 2013, 50(5):316-321.
- [9] 蔡崇文,叶国永,刘红忠. 基于 Vold-Kalman 滤波的光栅谐波动态抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3):17-24.
- CAI CH W, YE G Y, LIU H ZH. Dynamic suppression of harmonic distortion for optical encoders via Vold-Kalman filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3):17-24.
- [10] 钟玉龙. 基于幅值采样的光栅莫尔信号数字细分技术[D]. 中国计量学院, 2016.
- ZHONG Y L. Digital subdivision technology of grating morie signal based on amplitude sampling [D]. China Jiliang University, 2016.
- [11] 刘新正,邱德锋,李予全,等. 正余弦编码器细分算法误差分析及补偿[J]. 微电机, 2010, 43(11):42-47.
- LIU X ZH, QIU D F, LI Y Q, et al. Analysis and compensation on segmenting subdivision error of sin/cos encoder[J]. Micromotors, 2010, 43(11):42-47.
- [12] 许莹琨. 非正交光栅莫尔信号细分算法研究[D]. 中国计量大学, 2018.
- XU Y K. The research of an algorithm about non-orthogonal grating moire signal subdivision [D]. China Jiliang University, 2018.
- [13] 沈思博. 高精度编码器等幅性及正交性偏差补偿方法研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- SHEN S B. Research on compensation method of amplitude and phase deviation for high precision encoder[D]. Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2018.
- [14] 邢前进. 光栅莫尔信号采集与细分技术研究[D]. 中国计量大学, 2018.
- XIN Q J. Research on grating moiré signal acquisition and subdivision technology [D]. China Jiliang University, 2018.
- [15] 唐小琦,刘世峰,王平江,等. 正切法莫尔条纹信号幅值分割细分的误差分析[J]. 计量学报, 2007(3):220-223.
- TANG X Q, LIU SH F, WANG P J, et al. Error analysis for amplitude segmenting subdivision of moiré fringe[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007(3):220-223.
- [16] 叶升进. 基于反正切法的光栅莫尔信号数字式细分研究[D]. 中国计量大学, 2020.
- YE SH J. Research on digital subdivision of grating moiré signal based on anti-tangent method [D]. China Jiliang University, 2020.
- [17] ZHU W B, YE SH J, HUANG Y, et al. An improved cordic for digital subdivision of Moiré signal [J]. Metrology and Measurement Systems, 2020, 27 (1): 51-64.

作者简介



李强 (通信作者), 2019 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所工程师, 主要研究方向为超精密检测仪器、高精度转台等。

E-mail: lllq21@qq.com

Li Qiang (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2019 from Harbin Institute of Technology. Now he is an engineer at the Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research interests are ultra-precision testing instruments and high-precision turntables.



刘宏伟, 2018 年于东南大学获得学士学位, 现为上海交通大学与国家机床产品质量检验检测中心(四川)联合培养研究生, 主要研究方向为超精密检测仪器、高精度转台等。

E-mail: 2337707035@qq.com

Liu Hongwei received his B. Sc. degree in 2018 from Southeast University. Now he is a graduate student jointly trained by Shanghai Jiao Tong University and the National Machine Tool Production Quality Supervision Testing Center (Sichuan). His main research interests are ultra-precision testing instruments and high-precision turntables.