# 国产 FPGA 增量式光栅尺信号采集系统的设计

张 晰 差 元 差润强 韩庆阳 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033)

摘要:针对光学调焦平台的增量式光栅尺信号采集系统,提出了基于国产 FPGA 芯片 AG10K 的设 计,实现增量式光栅尺的倍频鉴向、脉冲计数、串口数据传输等功能,通过串口通信实现上位机的通信 交互,完成对光学调焦平台的精确位置采集显示。设计了滤波算法对假零位信号进行滤波处理,并对 分频计数逻辑进行正反双脉冲处理,有效降低噪声对零位和计数模块的干扰,保证了采集算法的准确 性。实验表明:该系统能够实现高精度、高灵敏度的位移量检测和调节功能。该系统具有响应速度快、 精度高、稳定可靠等优点,采用国产化芯片使该采集系统具有广泛适用性。 关键词:国产化;FPGA;增量式光栅尺;数据采集 中图分类号:TN929.5 文献标识码:A 文章编号:1002-1841(2023)08-0075-04

Design of Domestic Incremental Grating Ruler Signal Acquisition System Based on FPGA

ZHANG Xi JIANG Yuan JIANG Runqiang HAN Qingyang

( Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Science ,Changchun 130033 ,China)

Abstract: Aiming at the incremental grating ruler signal acquisition system of optical focusing platform ,a design based on the domestic FPGA chip AG10K was proposed to realize the functions of frequency doubling directional discrimination ,pulse counting serial data transmission and so on. The communication interaction of host computer was realized through serial communi– cation and the accurate position acquisition and display of optical focusing platform was completed. The filter algorithm was de– signed to filter the false zero signal and the positive and negative double pulse processing was carried out on the frequency divi– sion counting logic which can effectively reduce the interference of noise to the zero and counting module ,and ensure the accura– cy of the acquisition algorithm. Experiments show that the system can detect and adjust the displacement with high precision and sensitivity. The system has the advantages of fast response speed high precision stability and reliability. The adoption of domestic chip makes the acquisition system have wide applicability.

Keywords: localization; FPGA; incremental grating ruler; DAQ

## 0 引言

近年来 随着光电测控技术的不断发展,光学调 焦平台作为高精度成像设备之一,在精密制造、医学 影像、光电测控等领域得到了广泛应用。光学调焦平 台的准确定位和稳定性对成像质量有重要影响,而精 确定位需要高分辨率的测量技术<sup>[1-6]</sup>。因此,光栅尺 作为高分辨率非接触式测量的专用传感器,成为光学 调焦平台位置控制和测量的重要工具。

传统的增量式光栅尺信号的采集一般采用产品 化的数据采集卡或进口的 FPGA 或 DSP 芯片开发数 据采集和解码 ,数据采集卡尺寸较大 ,输出方式单一, 不满足定制需要。进口器件的对外依存度较高且质 量等级较低。因此,本文提出了一种基于国产化 FPGA 芯片 AG10K 的增量式光栅尺信号采集系统。 该系统主要由时钟模块、信号处理模块、编码通信模 块等组成,与传统的增量式采集板相比,具有一定的 可定制性,能够大幅削减成本;同时能够满足硬件国 产化的要求,保证了电路可移植性及广泛性。此外, 该系统兼顾传统 FPGA 信号处理的高速性和稳定性, 能够较好地适应工业等领域的控制需求。综上所述, 基于国产化 FPGA 芯片 AG10K 的增量式光栅尺信号 采集系统,能为国产化和定制系统提供了新的选择, 具有较好的适应性。

## 1 系统结构和原理

增量式光栅尺是测量一定范围内位置、位移等物 理量的常用光电传感器。常见的增量式光栅尺主要 测量原理基于莫尔条纹的衍射现象。其主要结构由

基金项目:国家自然科学基金(62075216) 收稿日期:2023-04-19

光源、光栅和光电接收管组成<sup>[7-10]</sup>。光栅尺工作时, 光源通过透射或反射的方式经过直线光栅,转化为光 透过的莫尔条纹:  $W = \omega/\theta$  由于倾斜角  $\theta$  非常小 因此 莫尔条纹信号强度 W 远大于光栅栅距值 ω 即将物理 位移进行了放大。再由光电传感器将接收到的莫尔 条纹光信号转换成相位差 90°的模拟电信号 cos 和 sin 模拟信号通过鉴相电路 将其转换为相位差 90°的 脉冲信号 cos\_p 和 sin\_p。根据其脉冲的计数和相位 关系通过采集算法得到位移和速度信息。直线式光 栅尺通常提供的原始信号为了适应远距离传输特性 和较好消除共模噪声的影响 通常采用差分信号的方 式进行输出。信号采集系统的主要功能是通过 cos\_p 和 sin\_p 的实时逻辑关系判断光栅尺位移前进或后退 方向并计数判断相对位置 通过零位信号 Z\_p 确定绝 对零位位置 结合计数确定测量值的绝对位置。相比 绝对式光栅尺 增量式光栅具有体积小、成本低、前端 处理电路简洁的优点。增量式光栅尺的工作原理如 图1所示。



图1 增量式光栅尺的工作原理图

2 增量式光栅尺信号采集系统的设计

## 2.1 FPGA 选择

增量式光栅尺信号采集系统的 FPGA 选型需要考 虑以下4点:首先是能够兼顾多种电平标准的输入,保 证差分输入信号能够正确进行采集;其次是具有灵活 的时钟管理模块,能够兼顾满足较高频率的采集模块 和稳定的输出通信模块;然后需要足够的逻辑和存储 单元,满足采集系统的采集和存储功能逻辑的实现; 最后,最好具有较高的集成度和通用的封装,以满足 设计的集成化和便利化。

因此 选用了国产 FPGA 芯片 AG10K。该芯片具 备以下特点: 高密度架构,拥有 10K 的逻辑单元 (LE)。嵌入式内存块 M9K,支持最大 414 Kbit 的 RAM 空间,能够满足设计的功能和存储逻辑要求。内 部集成 2 个 PLL 模块,能够提供设计逻辑的复杂时 钟。提供时钟乘法和多种类型相移高速差分 I/O 标 准支持,包括 LVDS、RSDS、mini-LVDS、LVPECL,以及 单端 I/O 标准支持,包括 3.3、2.5、1.8、1.5 V 以及 LVC- MOS 和 LVTTL,满足输入和输出的信号要求。封装类 型为 LQFP-144,易于布局。支持灵活的设备配置,可 以通过 JTAG 和 SPI 接口进行,不需要改变传统的烧 写习惯。支持远程更新,通过"双重启动"等方式实 现。综合以上特点,AG10K 芯片是本系统设计的理想 选择。

2.2 总体设计

增量式光栅尺信号采集系统总体设计框图如图 2 所示。



图 2 增量式光栅尺信号采集系统总体设计框图

以国产化的 FPGA 芯片为平台,主要包括鉴向分 频模块、双向脉冲计数模块、数据处理存储模块和串 口数据传输模块。光栅尺平台采用 ATOM4T0-020345Q67型直线光栅尺,输出信号采用差分形式输 出,并具有自动报警功能。光栅尺信号采集系统采用 外置差分芯片将差分信号转换成单端信号。利用专 用差分芯片对信号进行转换,能够有效降低信号产生 的噪声,提高噪声容限。然后将零位信号 Z\_p 以及相 差 90°的原始脉冲信号送入 FPGA 内,经过鉴向模块 处理后,再经双向脉冲计数模块对其进行计数存储, 并进行数据处理,最后将数据锁存通过串口模块进行 编译发送给主控系统以及上位机。

#### 2.3 时钟管理 DCM 模块

直线式光栅尺数据采集系统时钟主要包括系统 时钟和通信时钟2部分,国产化FPGA内部集成有锁 相环为核心的DCM时钟管理单元,能够较准确地为 整个系统提供满足系统要求频率和相位的时钟信号。 通过锁相环产生系统所需的系统时钟和通信时钟,相 比采用分频方式对外部时钟进行设置,具有时钟脉冲 稳定性好、相位准确的优点。因此调用IP核能够较好 节约片上资源和完成设计,本设计中外部输入时钟晶 振为50 MHz,输出时钟为40 MHz和230 kHz,经过锁 相环处理的时钟信号,其信号质量较好,稳定性强。 其中40 MHz时钟作为采集逻辑的功能时钟,频率较 高,能够保证对输入信号的上升下降沿的准确判断, 具有较高的采样频率和较强的数字逻辑处理能力,满 足采集和信号处理要求;230 kHz 为串口通信提供分 频时钟,较便捷地满足串口 230 400 波特率的指标 要求。

#### 2.4 鉴向分频模块

增量式光栅尺输入信号为经过整形处理后的差 分信号 cos\_p、sin\_p 和 Z\_p ,Z\_p 为零位信号 ,用来标 记光栅尺测量的绝对零位。光栅尺前进时 ,信号 sin\_p 滞后于信号 cos\_p 相位 90°,后退时 ,信号 cos\_p 滞后 于 sin\_p 信号相位 90°,以此特点来设计采样算法逻辑 针对光栅尺位移方向进行判别。在判断位移方向的 同时 ,对 2 路信号的上升下降沿需要分别采样 ,以此逻 辑设计算法来完成四倍频的双向计数任务。

### 2.5 滤波模块

在实际的工程环境中,存在各种噪声和干扰,因此针对采集系统需要设计滤波算法保证采集信号的可靠性,滤波模块主要考虑2种情况:一种是尖刺脉冲 会影响 Z\_p 出现假零位的情况(如图3所示),影响对 绝对位置的测量;另一种是高频毛刺或负载平台的振 动会对 cos\_p 和 sin\_p 产生往复的脉冲(如图4所 示)影响正反转方向的计数功能。



图 4 计数信号正反方向干扰

针对零位信号的干扰信号特点,干扰信号通常为 脉冲幅值高、持续时间短的尖刺脉冲,因此对其进行 采样时,设置了一个保持时间阈值,滤除高电平持续 时间较短的干扰信号,保证了真正的零位信号的判 别。针对正反计数信号噪声干扰的滤波,首先通过D 触发器对采集输入信号进行异步转同步处理,这样可 以有效消除信号的亚稳态,滤除部分噪声毛刺干扰, 然后针对采集状态进行正反双向计数,逻辑设计考虑 到晃动时,对计数进行增减分别处理,这样可以避免 晃动累计计数造成误差。

采集逻辑采用状态机对 2 路输入信号进行判别, 并对其上升下降沿分别采样,并采用 2 个标志脉冲 ppluse 和 npluse 分别区分光栅尺前进和后退产生的信 号沿,此种方式能够有效滤除信号发生抖动时所造成 的假计数,从而避免影响采集数据的真实性。其具体 逻辑功能由 Moore 型状态机完成,其状态结构如图 5 所示。



图 5 分频计数模块状态机

通过该状态机实现对原始信号的辨向及四倍频 和鉴向功能,可以准确判断光栅尺位移方向,并可以 快速对信号的逻辑状态改变进行鉴别,逻辑完备具有 较好的鲁棒性和抗噪性。

## 2.6 计数模块

根据调光系统对光栅尺长度输出的要求,需要采 用 24 位的双向可逆脉冲计数器,对光栅尺输出信号的 绝对位置锁存,当光栅尺正向移动时,ppluse 计数加 1,方向标志位 DIR 表示为1,计数器进行递增计数;当 光栅尺反向移动时,npluse 计数加1,方向标志位 DIR 表示为0,计数器进行递减计数。当光栅尺经过零位 时,计数器会进行清零校正,清零后的下一个脉冲根 据其移动的正反方向进行增减计数,负值用补码的形 式进行计数锁存。

## 2.7 数据处理和通信模块

增量式光栅尺采集计数锁存为 24 位的补码数据, 由最高位的符号位和 23 位的数据位构成。为了配合 采集系统的 RS485 通信接口,在 FPGA 内设计串口模 块用来实现适合系统的串口通信协议,串口通信模块 采用 8 位字长,1 位起始位,1 位停止位,无奇偶校验位 的数据格式。通过串口协议将 24 位数据分为 3 组,由 高到低依次发送,并在每包数据加帧头和帧尾,保证 数据传输的可靠性。

## 3 试验验证

## 3.1 仿真验证

功能仿真采用 modelsim 进行仿真验证 模拟输入 零位信号 Z\_p 以及相位差 90°的输入信号 cos\_p 和 sin\_p ,并依次按照模拟零位、模拟正转和反转调整时 序输入波形 ,仿真波形如图 6 所示。当系统采集到零 位信号 Z\_p 时,输出寄存器输出为 0,当 sin\_p 信号超前 cos\_p 信号 90°时,计数器正向计数;当 cos\_p 信号

超前 sin\_p 信号 90°时,计数器反向计数。通过功能仿 真,可以验证增量式光栅尺数据采集系统功能正确。

Name	Val		1,200 ns	1,400 ns	1,600 ns	1,800 ns	2,000 ns	2,200 ns	2,400 ns
1∎ sys_clk	1								
1∎ sys_rst	1								
1 <mark>∎</mark> sin_p	0								
1 <sup>™</sup> cos_p	1								
l∎ Z_p	0								
Acode_p_o[23:0]	-4	0	(1)(2)(3)	1)5)6(7)	3)(9)(10)(11)(1	2) 13 / 12	(13)(12)(	1)10)9)(8)(	1)(6)(5)
15 ppluse	0					_1	1		
in npluse	0								

图 6 功能仿真波形

#### 3.2 工程验证

工程验证包括板级调试和现场验证 2 部分: 板级 调试采用 QuartusII 的 Signal Tap 工具,利用直线式光 栅尺平台作为输入,通过对采集逻辑内部各信号进行 观测,其信号输出结果如图 7 所示,与仿真结果符合, 能够准确完成采集功能。 现场测试采用平台,增量式光栅尺通过接口直接 连接到增量式光栅尺采集系统板,通过增量式光栅尺 采集系统板对光栅尺的位置信息进行采集、编码,采 集板通过485串口将实时位置上传给调光调焦控制系统,并将实时位置转发给上位机主控软件,图8为实验 室采集系统搭建实物,图9为上位机软件部分截图。





图 8 增量式光栅尺采集系统硬件平台

可见电视	
调焦 自动 6	-20000=0=29000
小倍 - 382/329	94/-30310 + - 1 -

#### 图 9 调焦系统上位机软件部分截图

针对采集的准确性,通过多次重复对采集测量的 准确性进行验证,直线式光栅尺最大分辨率为1μm, 即光栅尺经过采集系统倍频细分后的每个码值所代 表的长度。测量通过杠杆千分表和上位机读取的绝 对位置进行重复测量,对比其位移测量是否准确,表1 为测量结果。

表1 采集系统位移测量结果

序号	起始码值	终止码值	位移	千分表测量值	误差	
		- ( )	码值	/mm	/ μm	
1	-31 992	-31 825	167	0.168	1	
2	23 628	23 498	130	0.132	2	
3	67	-58	125	0.126	1	
4	24 901	25 076	175	0.172	3	
5	-33 219	-33 370	151	0.150	1	

#### 4 结束语

本文设计了一种基于国产化 FPGA 的光学调焦平 台增量式光栅尺信号采集系统,并对国产化选型进行 了详细介绍,该系统可用于光学调焦平台的精确测量 和控制。通过实验验证,该系统具有较高的精度和稳 定性,可满足光学调焦平台的实际需求。该系统具有 响应速度快、精度高、稳定可靠等优点,采用国产化芯 片使该采集系统具有广泛适用性,能够满足后续其他 工程项目的应用,具有较好的可移植性。

#### 参考文献:

- [1] 叶盛祥.光电位移精密测量技术 [M].成都: 四川科学技 术出版社 2003.
- [2] 陈兴林,刘扬,吕恒毅.一种新型光电周角编码器译码方 法研究[J].传感器与微系统 2010 29(2):19-25.

(下转第87页)

Sobel Roberts ,Canny and Prewitt detector [J].Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis 2021 ,72(4): 278–282.

- [5] CHEN Y M, LI Y Z, ZHAO Y K. Sub-pixel detection algorithm based on cubic B-spline curve and multi-scale adaptive wavelet transform [J].Optik 2016, 127(1):11-14.
- [6] 段振云 王宁 赵文珍 等.基于高斯积分曲面拟合的亚像素 边缘定位算法[J].仪器仪表学报 2017 38(1):219-225.
- [7] LI Y H ,HUO J ,YANG M ,et al. Algorithm of locating the sphere center imaging point based on novel edge model and Zernike moments for vision measurement [J].Journal of Modern Optics 2018 ,66(2): 218-227.
- [8] 郭伟,邢德强,牛占文,等.齿轮倒角特征族的集成加工支持系统[J].天津大学学报 2008 41(12):1395-1400.
- [9] BARBATO G ,CHIABERT P ,D'ANTONIO G et al.Method for automatic alignment recovery of a spur gear [J].International Journal of Production Research 2016 54(15): 4475-4486.
- [10] ALI M H ,KUROKAWA S ,UESUGI K. Application of machine vision in improving safety and reliability for gear profile measurement [J]. Machine Vision and Applications , 2014 25( 6) : 1549-1559.
- [11] SEONTAEK O ,YOU J H ,KIM Y K.FPGA acceleration of gear inspection algorithm for high speed embedded machine vision [J].Journal of Institute of Control ,Robotics and Systems 2019 25(8):665-670.

(上接第78页)

- [3] 罗瑜.基于光栅尺的位移测量系统设计[J].电子测量技术 2020 43(7):18-22.
- [4] 王慧 郭成虎.极端环境下光电编码器误差补偿方法[J].传感器与微系统 2019 38(6):23-26;30.
- [5] 涂骁 周云飞 周柔刚 等.基于 FPGA 的增量式光栅信号 采集系统设计 [J].计算机工程与设计 ,2014 ,35(11): 3820-3825; 3836.
- [6] 徐全坤 阚侃 黄振宇 等.光栅尺动态误差检测与补偿技术研究[J].装备制造技术 2023(1):50-53.
- [7] 汪伟,王炳友 杨月月.基于 FPGA 的增量式编码器信号 采集系统设计[J].云南化工,2021,48(3):133-135.

- [12] 周泽恒.小模数齿轮视觉测量中亚像素边缘检测技术研 究[D].杭州:中国计量大学 2017.
- [13] HUANG Y B ,GU J J ,WANG S J ,et al. Vision based embedded tiny spur gear inspection and measurement system [C]// IEEE International Conference on Mechatronics & Automation.IEEE ,2016.
- [14] 汤洁,刘小兵,李睿.未知参数小模数齿轮齿距和齿廓偏差视觉测量[J].光学精密工程 2021 29(1):100-109.
- [15] 饶艳桃.基于机器视觉的标准直齿圆柱齿轮参数的测量 [D].重庆:重庆大学 2015.
- [16] 薛旭升 涨旭辉,毛清华,等.基于双目视觉的掘进机器 人定位定向方法研究[J].西安科技大学学报,2020,40 (5):781-789.
- [17] 甘小红.芯片安装槽的双目立体视觉定位设计与实现 [D].上海:东华大学 2022.
- [18] KAEHLER A ,BRADSKI G. Learning OpenCV3 computer vision in C + + with the OpenCV library [M]. Boston: OREILLY 2018.
- [19] GHOSAL S ,MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J].Pattern Recognition ,1993 , 26: 295–306.
- 作者简介: 李帅康(1996—),硕士研究生,主要研究方向为机 器视觉及机器人。E-mail: arles1985@163.com 洪荣晶(1963—),教授,博士,主要研究方向为数字 化制造和智能制造。E-mail: seuhrj@qq.com
- [8] 梅荣军, 骆敏舟, 陈晓丹. 基于 FPGA 的增量式编码器信 号采集系统[J].测控技术 2014 33(7): 54-56; 60.
- [9] 刘小树 万秋华 杨守旺 等.基于 FPGA 的增量式编码器误 差自动检测系统[J].仪表技术与传感器 2017(2):62-65.
- 作者简介: 张晰(1990—),硕士研究生,助理研究员,主要研究 方向为光电检测与自动控制等。

E-mail: zhangxi2009@126.com

通信作者:姜润强(1977—),硕士研究生,副研究员,主要研究 方向为光电仪器设备研发和高精度伺服控制。 E-mail: jiang\_runqiang@ sina.com

第8期