

·光电器件与材料·

## 基于FPGA的容栅传感器转速校定装置的设计

陆真<sup>1,2</sup>,裴东兴<sup>1,2</sup>,白茹<sup>1,2</sup>,刘莉<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:**针对旋转轴功率测试中容栅传感器的输出信号易受驱动轴瞬时转速影响的问题,提出一种基于FPGA的转速校定装置。该装置在高精度光电码盘的基础上,将触发器和4~16译码器HCC4515B结合起来滤除光电码盘输出尖峰毛刺,并给出了以FPGA为主控单元的具体电路实现方案。测试结果表明,该转速校定装置能够很好地达到预期效果。

**关键词:**容栅传感器;光电编码器;转速校定

中图分类号:TM932

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-05-0038-04

## Design of Rotating Speed Calibrating Device of Capacitive Grating Sensor Based on FPGA

LU Zhen<sup>1,2</sup>, PEI Dong-xing<sup>1,2</sup>, BAI Ru<sup>1,2</sup>, LIU Li<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In view of the output signal from the capacitive grating sensor easy to be influenced by the instantaneous speed of the drive shaft during rotating shaft power test, a rotating speed calibrating device based on field programmable gate array (FPGA) is proposed. Based on the high precision photoelectrical encoder, the D-flip flop is combined with the 4~16 decoder of HCC4515B to filter peak burr output from the photoelectrical encoder. And the detailed circuit implementation scheme taking FPGA as the main control unit is given. Test results show that the rotating speed calibration device can achieve the desired effect.

**Key words:** capacitive grating sensor; photoelectric encoder; rotating speed calibration

在工程项目中,各种场合都需要转速测量,如弹体自旋转、机车轮速、数控机床等。测量的内容主要包括平均转速和瞬时转速。转速的测量方法有多种,针对自旋转弹丸的速度可采用陀螺、PSD阵列、遥测和线圈式地磁传感器<sup>[1-9]</sup>。针对电机类转速的测量,常见的测试可采用光电式、霍尔式和磁电式。但在高速旋转机械的设计研制中,为了准确获取传动轴的功率,优化机械动力性能,文献[4]和文献[5]提出了新型容栅传感技术,其具有稳定性好、结构简单、适应性强、功耗低的优点,并且具有平均效应。对此设备的计量校定必不可少,因此急需研发一种

针对此传感器的校定装置,实现转盘转速和时间的测量。并通过软件转为标准转速技术,完成对新型容栅传感的校定。

### 1 系统整体框架

该设计采用FPGA作为系统的控制单元,并设计驱动轴来模拟转速。通过数字电位器来控制555输出PWM波,信号经过大功率MOS管驱动电机,通过按键控制电机的状态行,光电编码器测得的电机速度脉冲一方面在LCD1602上实时显示;另一方面

通过USB传至上位机。上位机采用LabView软件做进一步处理,系统环境采用Quartus II 11.0,使用Verilog HDL语言编程。系统由硬件和软件两部分组成。系统的整体框架如图1所示。该系统具有智能性好、精度高、可靠性高等优点。

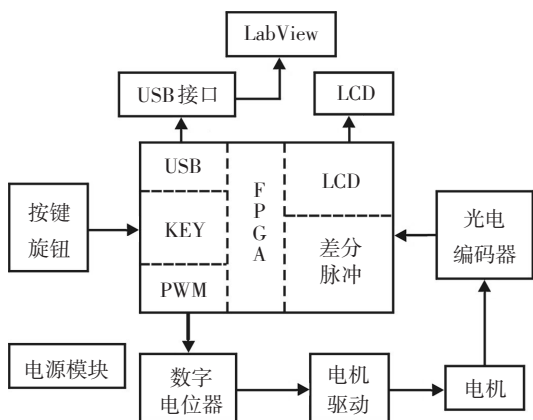


图1 系统的整体设计框图

## 2 系统的硬件设计

硬件共分为七个模块:电源模块、键盘控制模块、光电编码模块、电机驱动模块、LCD显示模块、USB模块、FPGA主控模块及机械传动部分的设计。①电源模块主要由12V直流转换为直流5V和3.3V,转换芯片分别为AMS1117-5.0和AMS1117-3.3。三种电压分给电机驱动模块、主控芯片外围芯片和主控芯片供电。②键盘控制模块包括加速、减速、启停和速度锁存按键,从而实现对电机状态的控制。③测速光电码盘模块输出的差分脉冲通过信号调理电路输入到主控芯片的I/O管脚上。④电机驱动模块由控制器控制555模块中的占空比阻值,从而输出PWM波,再通过大功率MOS管来控制电机的状态。⑤显示部分通过控制器解算差分脉冲在显示器上瞬时转速。⑥USB模块采用USB-RS232作为接口转换器,并用FPGA芯片EP2C5T14418作为控制核心。下面主要介绍USB接口电路、光电编码器信号调理电路和电机驱动电路。

### 2.1 USB接口电路

传统的通信方式通常采用RS-232来实现,传输速度慢,通用串行总线USB与RS-232通信相比,有

更多的优势。PL2303是Prolific公司推出的USB-RS232接口转换器,内置USB控制器、收发器、振荡器和带有解调信号的UART,只需很少的元器件即可实现USB-RS232的转换<sup>[10]</sup>。

文中选用PL2303HX芯片设计USB接口电路。该芯片工作电压为3.3V,外连一个12MHz的晶振。TXD与RXD分别与FPGA的I/O相连,DM、DP分别通过一定的上拉电阻与USB接口D-和D+相连。

### 2.2 光电编码信号调理电路

光电编码器是一个中心有轴的光电编码盘,在圆盘上有规则地刻有透光和不透光的线条,在圆盘两侧,安放发光元件和光敏元件。当圆盘旋转时,光敏元件接收的光通量随透光线条同步变化,光敏元件输出波形经过整形后变成脉冲。码盘每转过一个角度单位,光电码盘就会发出一个周期的完整的方波A和B,通过对A和B信号的全部上升沿和下降沿进行计数<sup>[11]</sup>,即可实现四细分,本设计采用码盘为方波光栅,输出有A相、B相和Z相三相电信号,AB两个信号周期相同,相位差为90°,Z信号可作为校准信号以消除累积误差。

由于多路信号在传递时间上的滞后,导致了其在沿与处理时会产生尖峰脉冲,不仅对主控芯片不利,而且还导致误码现象<sup>[12]</sup>。该装置结合触发器和4~16译码器HCC4515B设计了光电编码器输出信号调理电路如图2所示。

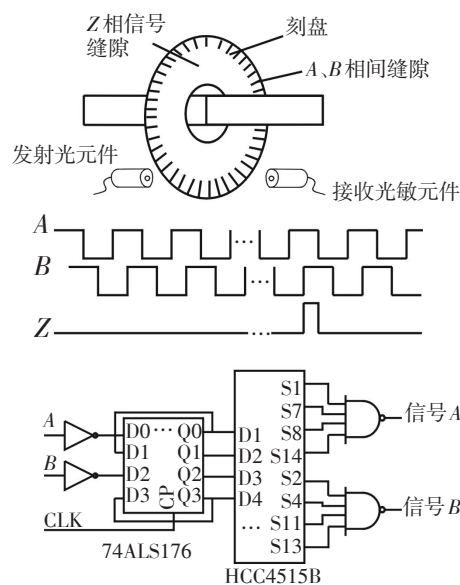


图2 光电编码器及信号调理电路

## 2.3 电机驱动电路

电机状态的控制实质就是驱动能力比较强的PWM波。设计中的PWM波主要通过555定时器和大功率MOS管产生。利用555定时器制作占空比可调的多谐振荡器<sup>[13]</sup>。通过调节555定时器中的滑动变阻器比值来实现PWM波输出。为了实现占空比的数字化可控,此设计将滑动变阻器用X9C103替代。它是100阶10 k $\Omega$ 阻值的数字电位器,其中包含99个电阻单元的电阻阵列,输出电阻可通过访问存放在非易失性存储器中的抽头点。为了增加PWM的驱动能力,再加上一个大功率MOS管IR744,最大电流为6 A。

## 3 系统的软件设计

### 3.1 系统程序设计

系统整体流程图如图3所示。

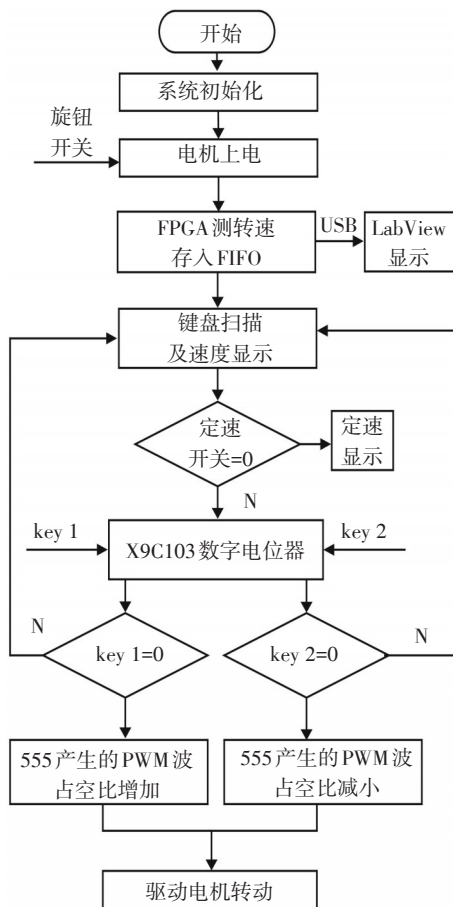


图3 系统整体程序流程图

系统的软件部分需要同时完成以下五部分:键

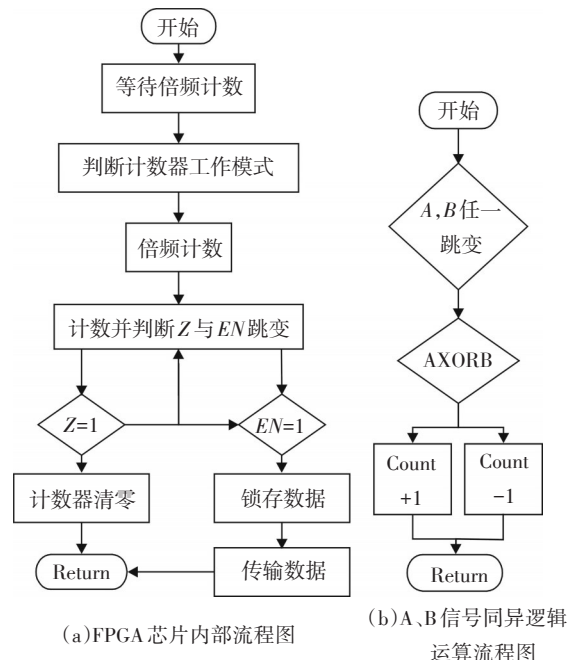
盘检测、控制电机状态、脉冲测量、动态显示和实时传输。当系统上电后,整个系统完成初始化操作,旋钮开关打开后电机通电,FPGA开始测量码盘脉冲信号,根据A、B和Z三路电信号变化情况进行四细分、辨向和计数。FPGA一方面将24位计数器分段锁存至FIFO中,通过USB协议传输至上位机显示;另一方面通过LCD动态显示转速。之后随着FPGA对键盘的扫描状态,输出不同占空比的PWM波,以驱动电机转动。

### 3.2 LabView串口驱动

该设计采用NI-VISA软件设计USB驱动程序。VISA总线I/O软件是一个综合软件包,不受平台、总线和环境的限制,可以实现对USB、GPIB、串口、VXI、PXI和以太网进行配置、编程和调试<sup>[14]</sup>。设计采用NI-VISA软件的驱动程序开发向导,先从Hardware Bus中选用USB接口,之后在基本设备信息对话框填写USB厂商的ID和产品ID,最后将新建的“.inf”文件安装到电脑C盘的INF文件夹中,连接USB设备即可驱动设备。

### 3.3 编码器信号处理程序流程图

编码器信号处理程序流程图如图4所示。



(a)FPGA芯片内部流程图

(b)A、B信号同异逻辑运算流程图

图4 编码器信号处理程序流程图

图4a中计数部分是根据差分信号A、B进行同异逻辑运算,来判断计数器的加减。根据Z相信号和使能信号对计数器的数据进行相关的操作<sup>[15]</sup>。

## 4 系统调试及检测结果分析

### 4.1 系统调试

用Verilog HDL语言在Quartus II 11.0软件环境下,将各个功能模块编写出相应的子程序,通过

“Create Symbol Files for Current File”命令生成顶层模块可识别的“.bsf”文件,FPGA的系统程序设计采用Top-Down模式,将子模块放置在顶层“.bdf”文件后,通过编写测试脚本testbench在ModelSim6.1f仿真环境下仿真,进行逻辑验证,系统的顶层文件如图5所示。最终将生成的“.pof”文件通过AS方式下载到外置程序存储器EPCS4中。打开上位机软件,通过按键设定电机的转速,上位机通过USB口测得电机的转速并存储显示。

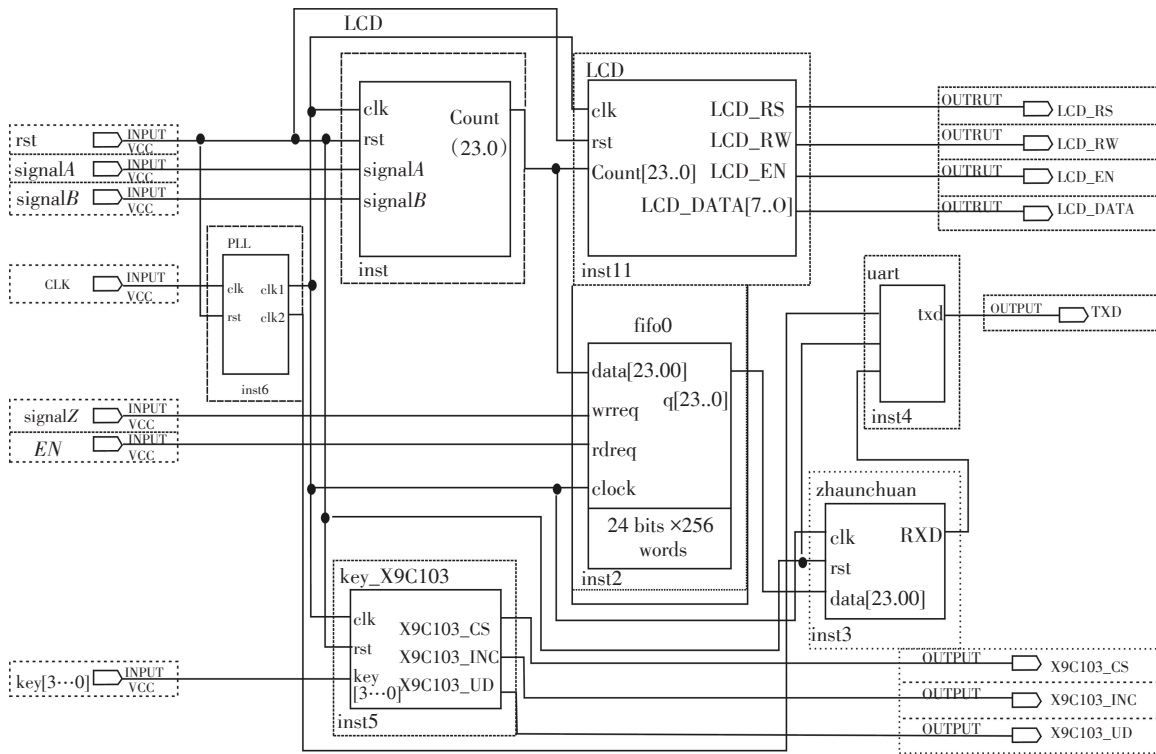


图5 基于Top-Down的系统顶层文件

当光电编码器有数据输入时,FPGA中的锁存器锁存数据传至FIFO,通过串口将数据送入上位机。当上位机接收完数据后,锁存器清零,同时锁存当前计数器的值并送至FIFO,通过串口发送数据到上位机,如此循环传输,系统实物图脱机运行样机如图6所示。

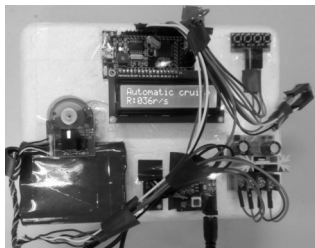


图6 样机实物图

### 4.2 系统检测结果分析

系统上电后,通过复位键使计数器清零并开始计数,当光电编码器经过零位置的时候,计数器停止计数。通过旋转过程中零位数据的变化可得数据采集丢失的情况。系统采集的数据如表1所示。

表1 实验所测数据表

设定转速 $v/r/min$	容栅测 得转速 $v_1/r/min$	光栅测 得转速 $v_2/r/min$	绝对误差 $\epsilon/\epsilon_1/r/min$
100	99.84	99.986	0.16/0.014
500	498.55	499.643	1.45/0.357
1 000	1 004.36	999.568	4.36/0.432
1 500	1 504.96	1 499.382	4.96/0.618
2 000	2 005.88	1 998.848	5.88/1.152

(下转第70页)



- [2] WU Yi T, HUANG Xu G, SU Hui. A quasi-distributed fiber optic sensor for solute concentration measurement based on Fresnel reflection[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(13):1101.
- [3] 姜德生,魏仁选. 基于光纤F-P干涉波长的溶液浓度测量系统研究[J]. 中国激光, 2004, 9(9):1127-1131.
- [4] 张志伟, 武志芳. 一种测量溶液浓度的光纤传感器[J]. 中北大学学报, 2005, 26(3): 216-218.
- [5] 曾捷, 梁大开. 基于SPR光谱分析的液体折射率测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 723-727.
- [6] 张季熊, 张梅. 利用临界角附近光能量的变化测量溶液浓度[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4):386-389.
- [7] 王正彦, 于正河, 范延滨. 液体浓度测量 FFP 传感系统的设计与应用[J]. 青岛大学学报, 1998, 13(1):24-26.
- [8] 黄振健, 黄旭光, 陈基焕, 等. 基于光纤折射率传感原理的溶液密度测定方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 409-413.
- [9] HUI Su Author Vitae, XU Guang-huang, Author Vitae. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2007, 126(2):579-582.
- [10] 白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. 延安大学学报, 2004, 3(23): 33-34.
- [11] 张志伟, 尹卫峰, 温廷敦, 等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究[J]. 中北大学学报, 2009, 33(3): 281-285.

(上接第41页)

实验需要校定的嵌入式容栅精度为0.01%。本校定装置的精度为0.001%。从表1实测数据可以看出,容栅传感器虽然分辨率较高,但其利用容栅的电容周期性变化测转速,当转速较大时,容易被电路的噪声所干扰,文中校定装置采用光栅经过信号调理,经FPGA在50 MHz系统频率下将光栅信号转化为脉冲并计数,分辨率较高,故能对光栅进行很好的校定。

## 5 结 论

虽然容栅传感器借助电容的周期性变化以及差动电容的相位差来加载转速信息和扭矩信息,但是在转速较大的情况下,容栅电信号容易受到电路噪声的干扰。文中主要针对嵌入式容栅传感器,设计了一款容栅转速校定装置,本装置的精度高于容栅传感器,可以对容栅传感器测得的速度进行校定。在后续的扭矩信号处理中,经过校定的容栅传感器可更精确地测得转动转置的扭矩。

## 参考文献

- [1] 翁睿, 张海峰, 刘晓为. 悬浮转子式微陀螺的反电动势转速检测[J]. 光学精密工程, 2013, (10):2566-2573.
- [2] 吴鸿, 陈冲, 李超, 等. 一种基于PSD的转速测量新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, (9):1033-1039.
- [3] 曾祥楷, 陈阳, 朱志雄, 等. 空间滤波转速遥测中旋转方向的辨识方法[J]. 光学学报, 2015, (6):120-128.
- [4] 张慧, 曹咏弘, 马铁华, 等. 基于线圈式地磁传感器的高速旋转弹转速测试[J]. 战术导弹技术, 2009, (4):64-67.
- [5] 谢锐, 马铁华, 武耀艳, 等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, (4):844-849.
- [6] 裴东兴, 王文武, 崔春生. 利用转速测试弹丸炮口速度的方法研究[J]. 兵工学报, 2013, (1):125-128.
- [7] 刘双红, 靳鸿, 张海龙, 等. 分离式差分结构容栅传感器转速扭矩测试系统[J]. 探测与控制学报, 2013, (5):49-52.
- [8] 岳晗, 裴东兴, 张瑜, 等. 弹丸转速-炮口速度无线弹载测试系统设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, (1):71-74.
- [9] 郑谭. 高速旋转轴的动态扭矩测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [10] 胡家华, 徐鹏, 郑昌雨, 等. PL2303单片机串口转USB口实现串行通信[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2013, (4):76-77+81.
- [11] 于海. 小型绝对式光电编码器动态误差检测系统及方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [12] 李曼, 许宏. 激光栅栏探测技术[J]. 光电技术应用, 2015, 30, (3):11-13.
- [13] 杨鹏, 范迪, 曹茂永. 基于单片机的智能压控PWM发生器设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, (1):65-67.
- [14] 曹李莉, 王有春, 周雷. 通用化数据采集处理系统的LabVIEW实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, (4):1375-1377+1384.
- [15] 李锋, 祝玉芳, 程坤. 基于FPGA的电容式编码器数据采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, (1): 195-197.