

## 光电编码器的动态误码检测系统

于海, 万秋华, 梁立辉, 王树洁

(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:** 为了实现对光电编码器在动态状态下的误码检测, 提高批量生产时对光电编码器的误码检测速度, 设计了光电编码器动态误码检测系统。首先, 对光电编码器误码产生原因进行了分析, 并对光电编码器误码进行特征识别。其次, 针对光电编码器误码的特征, 采用微分方法对光电编码器进行动态误码检测。然后, 搭建了光电编码器动态误码检测系统, 设计了软硬件电路。最后, 对所设计光电编码器动态误码检测系统进行实验验证。实验表明: 所设计的动态误码检测系统能够实现对 0~8 r/s 转速下光电编码器的误码检测, 检测结果直观、准确。检测系统极大的提高了批量生产光电编码器时的检验速度。

**关键词:** 光电编码器; 误码; 动态检测; USB 传输

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0917002

## Dynamic code error detection system of photoelectric encoder

Yu Hai, Wan Qiuhua, Liang Lihui, Wang Shujie

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

**Abstract:** A photoelectric encoder measurement system was designed to achieve dynamic encoder measurement and improve the efficiency of the measurement in mass production. Firstly, error sources of photoelectric encoders were analyzed, and their features were recognized. Secondly, based on the feature, encoder measurement was accomplished by adopting differential method, and the detection system was designed by software and hardware. Lastly, experiments were conducted to verify the system. The results showed that the system is capable to detect encoder errors at speeds ranging 0–8 r/s, and the results are straightforward, accurate, and swift, which highly improve the efficiency of encoder measurement.

**Key words:** photoelectric encoder; code error; dynamic detection; USB transmission

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 于海(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电位移精密测量及光电编码器的检测等方面的研究。

Email: yuhai5158@163.com

## 0 引言

光电编码器是一种集光、机、电于一体的高精度角度传感器,其以高精度计量圆光栅为测量元件,采用光电接收管接收光学信号,将输入的角度位置信号转换成相应的二进制数字代码,可直接与处理电路连接,实现高精度数字测量及精密控制<sup>[1-3]</sup>。与其他同类用途的传感器相比,光电编码器具有精度高、测量范围广、体积小、重量轻、使用可靠、易于维护等优点,因此已普遍应用在雷达、光电经纬仪、地面指挥仪、机器人、数控机床和高精度闭环调速系统等诸多领域,是自动化设备理想的角度传感器<sup>[4-7]</sup>。

随着现代科学技术的飞速发展以及航空航天技术的进步,各个研究单位对光电编码器的精度要求越来越高。不仅要求光电编码器能够实时输出角度位置信息,同时还要求光电编码器在高、低速度下都能保证正确的角度输出。因此迫切需要研究光电编码器动态误码检测方法。

对于绝对式光电编码器,粗码码道与精码码道之间设计有专门的矫正码道,用来对精粗码之间的偏差进行矫正<sup>[8]</sup>。在静态状态下,受码盘偏心、码盘刻划原因等使粗码与精码道之间的偏差大于理论允许的范围,就会使编码器输出角度值偏离实际角度值,形成误码;在动态状态下,光电编码器信号频率响应的影响,编码器信号会偏离理想的工作状态,造成误码。在光电编码器出厂之前需要对光电编码器进行检测,确保编码器在高、低速下都能保证正确的码值输出。

在传统的编码器生产过程中,对光电编码器的误码检测是依靠人眼对二进制灯排对编码器的角度值进行观察<sup>[9-10]</sup>。该方法要求光电编码器在慢速下转动,对光电编码器误码的检测较为困难,并且难以找出误码位置。往往完成对一台光电编码器的误码检测,需要花费大量的时间。在检测对高速性能具有要求的编码器进行检测时,人眼观测灯排检测法不能实现高速转动下光电编码器的误码检测。

为了克服传统人眼观测灯排法对光电编码器误码检测的不足,同时开展对光电编码器动态误差检测的研究,文中设计了光电编码器动态误码检测系统。系统采用无刷直流电机带动光电编码器进行转

动;依靠FPGA+USB为核心,在快速对光电编码器输出角度进行采集的基础上,检测角度数据进行误码判断;通过USB总线传输到上位机进行显示。为实现对某型号小型绝对式光电编码器的动态误码率检测,系统工作转速设定为该光电编码器的工作速度范围0~8 r/s。经过实验,误差检测装置极大的提高了批量生产光电编码器时的误码检测效率。

## 1 动态误码检测方法

### 1.1 光电编码器动态误码原因分析

光电编码器误码的产生原因包括以下几点:

- (1) 由于码盘污损或刻划错误,造成光电编码器数据进位不正确导致的误码;
- (2) 由于光电编码器精码信号严重偏离设计指标,造成光电编码器精码进位不正确导致的误码;
- (3) 由于光电编码器电路故障造成的误码;
- (4) 由于光电编码器粗码信号偏差超过精码的矫正范围所造成的误码。

一般情况下,光电编码器在出厂之前会对编码器进行严格的调试。误码产生原因(1)~(3)都可以在调试过程中发现并修复。误码产生原因(4)往往需要认真的检查,也是最常见的误码产生原因之一。

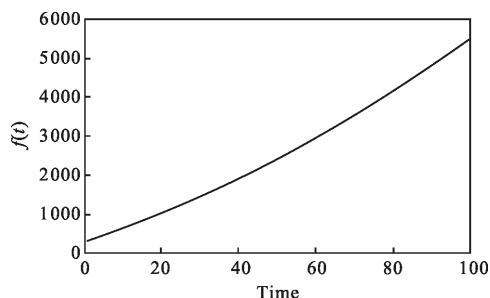
光电编码器码盘码道在刻划的时候,允许粗码道存在较低的精度,并利用精码对其进行校正。但是一旦粗码道某一些端面位置偏离了理论位置,就会超出精码校正范围,从而使编码器错码。

当光电编码器达到一定的转速时,受光电接收元件、放大器等电子元件以及轴系晃动等影响,光电信号会偏离理想的状态,造成动态误码。这就是为什么有的编码器在低转速下检测不误码,而在高转速下误码的原因。为此,在光电编码器出厂之前不光要检测低速下的输出,同时要检测光电编码器在高转速下的误码。

### 1.2 动态误码检测原理

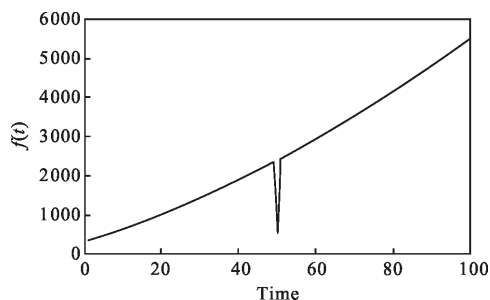
#### 1.2.1 编码器误码特征识别

光电编码器在正常工作时,其角度输出是逐码递增或递减的。对光电编码器的误码检测,就是检测角度数据是否存在不正常的跳变。设某16位光电编码器角度输出数据为函数 $f(t)$ , $t$ 为连续变化的时间。某次编码器工作时 $f(t)$ 的曲线图如图1(a)所示。



(a) 正常工作时  $f(t)$  曲线图

(a) Curve of  $f(t)$  when normal work



(b) 出现误码时  $f(t)$  曲线图

(b) Curve of  $f(t)$  when coder error

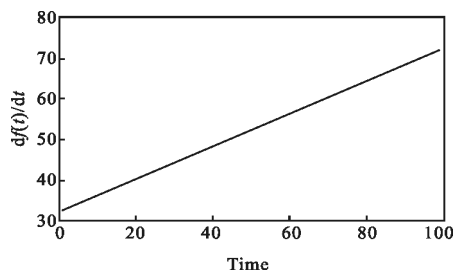
图 1 光电编码器输出数据曲线图

Fig.1 Curve of encoder output

可以看出, 正常工作时该光电编码器的输出角度数值是连续变化的。当出现错码时,  $f(t)$  的曲线图如图 1(b) 所示。图 1(b) 中, 光电编码器的输出角度在  $t=50$  位置出现了跳变。

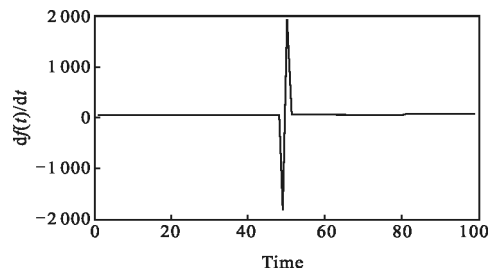
为了对误码位置进行特征识别, 对  $f(t)$  进行微分计算。对图 1 中的曲线微分后得到结果如图 2 所示。

图 2 中可以看出当光电编码器正常工作时,  $f(t)$  的微分曲线是一条均匀的曲线, 如图 2(a) 所示。当存在误码时,  $f(t)$  的微分曲线出现一个高低的跳变, 如图 2(b) 所示。这个跳变并不受转速变化的影响。通过判断这个高低的跳变, 可以轻易的判断出是否存在误码。



(a) 正常工作时  $df(t)/dt$  曲线图

(a) Curve of  $df(t)/dt$  when normal work



(b) 出现误码时  $df(t)/dt$  曲线图

(b) Curve of  $df(t)/dt$  when coder error

图 2 光电编码器输出数据微分曲线图

Fig.2 Differential data curve of encoder

### 1.2.2 编码器误码检测方法

光电编码器角度输出值代表当前编码器主轴所旋转的角度信息, 一般情况下角度信息是以二进制代码形式输出的。设在单位时间  $t$  内, 光电编码器角度值的增量为:

$$g(t)=y(t)-y(t-1) \quad (1)$$

式中:  $y(t)$  与  $y(t-1)$  分别代表当前时刻与前一时刻光电编码器测得角度值。那么在单位时间增量里,  $g(t)$  的变化率可以表示为:

$$\frac{dg(t)}{dt}=g(t)-g(t-1) \quad (2)$$

当编码器角度数据逐次递增或递减时,  $dg(t)/dt$  是平稳变化的; 当编码器出现故障, 输出的角度数据出现跳变, 那么  $dg(t)/dt$  将出现突变。通过判断  $dg(t)/dt$  是否出现突变, 即可判断编码器是否误码。

不同的光电编码器, 其动态使用范围不尽相同。根据以往的经验, 小型绝对式光电编码器的使用环境都在  $8\text{ r/s}$  转速以内。因此, 在对编码器进行动态误差检测时, 最高工作转速定为  $8\text{ r/s}$ 。

## 2 动态误码检测系统设计

### 2.1 误码检测系统原理

光电编码器动态误码检测系统主要由系统支架、驱动电机、采集电路和计算机组成, 如图 3 所示。

驱动电机带动被测编码器在转速范围为  $0\sim 8\text{ r/s}$  内实现被测编码器的动态转动; 采集电路采集被测编码器输出角度数据进行误码分析, 并通过 USB 总线将数据传输到计算机中; 在计算中采用 VC++ 软件编写显示软件, 将公式(2)中的微分变化率曲线显示出来。

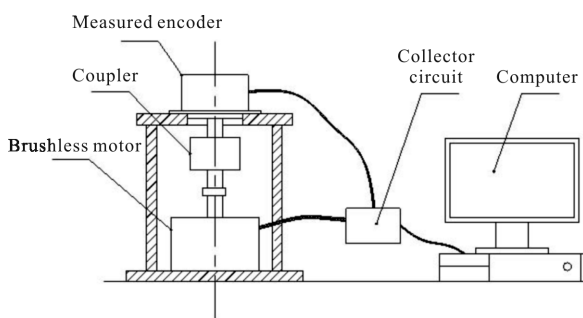


图 3 动态误码检测系统原理图

Fig.3 Principle of coder error detection system

### 2.2 硬件电路设计

误码检测系统的硬件电路是由 FPGA+USB 芯片设计完成的。FPGA 芯片采用 Xilinx 公司生产的 FPGA 芯片 XS3C400。其拥有 400 K 个可编程门阵列和 4 个 DCM 模块,最大 I/O 口数量为 264 个,每个 I/O 最高数据传输速度达到 622+Mb/s, 可以胜任误码检测过程中对角度数据的采集工作。USB 传输协议全部由 CY7C68013 芯片完成,该芯片内部集成了一个增强型的 51 内核,其指令集与标准的 8051 兼容。芯片提供了一个串行接口引擎,能够完成大部分 USB2.0 协议的处理工作,从而大大减轻了 USB 协议处理的工作量,并且提供了 4 KB 的 FIFO,保证数据高速传输的需要<sup>[11-12]</sup>。文中为了提高 USB 芯片的传输速率,采用芯片的 Slave FIFO 传输模式。在这种模式工作下,芯片的内核将不参与传输,极大的提高了传输的速率。硬件电路原理图如图 4 所示。

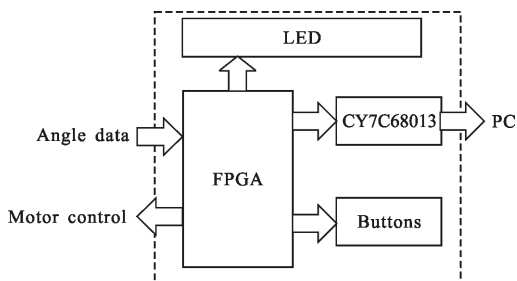


图 4 硬件电路原理

Fig.4 Principle of hardware

采集电路依靠 FPGA 芯片对光电编码器输出数据进行采集,同时传输电机速度控制信号控制驱动电机在相应的转速下转动。然后 FPGA 对编码器数据进行误码分析计算,并通过 USB 总线传输到计算机中。

采集电路工作时,首先,FPGA 芯片根据光电编

码器数据发送协议读入编码器输出的数据,并存储为  $y(t-1)$ ;然后在 FPGA 内部产生延迟计数,该设计中延迟时间为  $t=5\text{ms}$ ;延迟结束后,再一次读入光电编码器数据并存储为  $y(t)$ ;最后,将两次数据做差,得到编码器数据的微分值并传输到 CY7C68013 芯片的 FIFO 中,以供 USB 总线的传输。

### 2.3 计算机软件设计

为了实现对误码检测的直观显示,在计算机中编写 VC++ 软件。计算机软件接收 FPGA 发送来的微分数据并将数据以曲线的形式显示在计算机软件中。计算机软件主要完成以下几方面工作:

- (1) 完成对 CY7C68013A 芯片的固件烧写;
- (2) 实现与采集电路的数据通讯;
- (3) 以二进制灯排形式实时显示光电编码器角度信息;
- (4) 实时显示光电编码器角度数据微分信息,以供检测人员观测误码。

软件界面如图 5 所示。

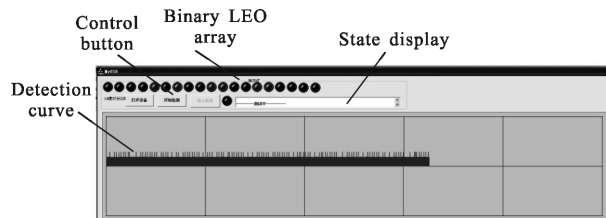


图 5 计算机软件界面

Fig.5 PC software

计算机软件界面包括:二进制显示灯排、控制按钮、状态显示模块和误码检测曲线图等。

在设计采集电路与计算机的通讯协议时,文中将 8 个 16 位数据合并为一帧数据,并在每帧数据的传输中加入了奇偶校验。8 个数据分别为:传输字头、编码器实时位置、指令数据、电机转速数据、编码器微分数据、校验数据和两个空数据。这样保证的数据传输的准确度,同时 8 个数据为一组方便了计算机软件对数据的接收和处理。

计算机软件接收采集电路传输的角度微分数据,并以曲线形式显示到软件界面上。操作人员通过观测不同转速下的曲线,来判断被检编码器是否存在误码。

## 3 误码检测实验

采用文中所设计的光电编码器动态误码检测系



统对某 15 位小型光电编码器进行误码检测。该编码器外径尺寸为 40,分辨率为 40",精度优于 60"。实验所用编码器的粗码为 8 位,精码 7 位,共同合成 15 位光电编码器。该型号光电编码器的工作转速范围为 0~8 r/s。检测装置实物图如图 6 所示。

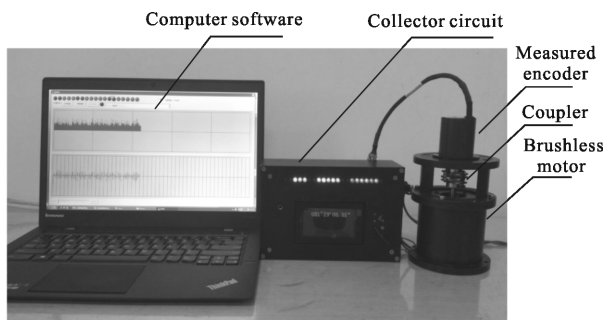


图 6 误码检测系统。

Fig.6 Dynamic code error detection system

分别在 0.5 r/s 和 8 r/s 下对该编码器进行检测,正常工作时,误码检测软件截图如图 7 所示。



(a) 转速 0.5 r/s

(a) Speed=0.5 r/s



(b) 转速 8 r/s

(b) Speed=8 r/s

图 7 工作正常的光电编码器误码检测

Fig.7 Code error for normal encoder

图 7 中可以看到在 0.5 r/s 和 8 r/s 时,光电编码器的误码检测曲线都呈现平稳变化的趋势,说明此时该光电编码工作正常没有误码。

当光电编码器出现误码时,误码检测软件界面如图 8 和图 9 所示。

图 8 和图 9 分别是光电编码器在转速 0.5 r/s 和转速 8 r/s 时出现误码的软件截图。可以看出,在编

码器转速稳定时出现误码,其误码检测微分曲线会出现突变,曲线将会出现负值的凸起(如图中的“出现误码”位置)。通过观测误码曲线可以轻易的判断出光电编码器在各转速下是否存在误码。

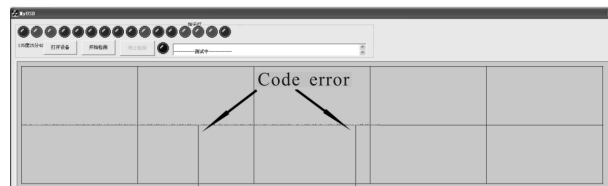


图 8 转速 0.5 r/s 光电编码器误码检测

Fig.8 Code error detection in speed of 0.5 r/s

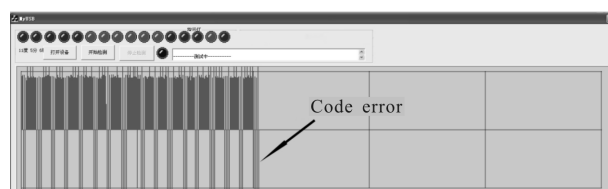


图 9 转速 8 r/s 光电编码器误码检测

Fig.9 Code error detection in speed of 8 r/s

## 4 结 论

光电编码器动态误码检测系统采用无刷直流电机带动被检编码器转动,并以微分算法实现对光电编码器的误码检测。系统以 FPGA+USB 为设计核心,能够在 0~8 r/s 转速下的动态误码检测。同时,误码检测系统采用 VC++编写计算机软件,能够直观的显示出当前转速下光电编码器是否存在误码。

光电编码器动态误码检测系统能够在批量生产光电编码器时,对编码器产品的动态误码检测。系统具有低成本、便捷化、快速化、全自动程序化等优点,极大地提高了批量生产光电编码器时的检验效率。

## 参考文献:

[1] Dong Lili, Xiong Jingwu. Development of photoelectric tetary encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)  
董莉莉,熊经武. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2):198-202.

[2] Zhu Yifeng, Mu Yining, Yu Lintao. Method of grating angle detection using slit light battery [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3396-3400. (in Chinese)

- 朱一峰, 母一宁, 于林韬. 狭缝光电轴的光栅角度检测方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3396-3400.
- [3] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 849-853. (in Chinese)  
王帅, 王建立, 陈涛, 等. 非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 849-853.
- [4] Gao Xu, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Real-time compensation of orthogonality deviation for Moiré fringe photoelectric signal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 213-219. (in Chinese)  
高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.
- [5] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)  
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.
- [6] Huang Long, Pan Nian, Ma Wengli, et al. Error analysis and experimentation of scale tape encoder [J]. *Chinese Optics*, 2015, 6(8): 465-469. (in Chinese)  
黄龙, 潘年, 马文礼, 等. 拼接式光电编码器测角误差及实验[J]. 中国光学, 2015, 6(8): 465-469.
- [7] Kao Chingfen, Huang Hunglin, Lu Shenghua. Optical encoder based on Fractional-Talbot effect using two-dimensional phase grating [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(9): 1950-1955.
- [8] Ye Shengxiang. Optoelectronic Displacement Precision Measurement Technology [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2003. (in Chinese)  
叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 2003.
- [9] Dong Jing, Wan Qiuhua, Zhao Changhai. Current situation and prospect of fault diagnosis for photoelectric encoder[J]. *Chinese Optics*, 2015, 10(8): 757-765. (in Chinese)  
董静, 万秋华, 赵长海. 光电编码器故障诊断技术研究与发展[J]. 中国光学, 2015, 10(8): 757-765.
- [10] Sun Shuhong, Zhao Chaohai, Wan Qiuhua, et al. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 8(6): 601-605. (in Chinese)  
孙树红, 赵长海, 万秋华, 等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. 中国光学, 2013, 8(6): 601-605.
- [11] Qian Feng. The Principle, Program and Application of EZ-USB FX2 [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 15-32. (in Chinese)  
钱峰. EZ-USB FX2 单片机原理、编程及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 15-32.
- [12] Dai Xiaojun, Yang Xuguang, Ding Tiefu, et al. High-speed data communication interface implementation based on USB2.0 [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(4): 1320-1324. (in Chinese)  
戴小俊, 杨绪光, 丁铁夫, 等. 基于 USB2.0 的高速数据通信接口设计[J]. 电子器件, 2006, 29(4): 1320-1324.