

绝对式光电编码器动态误差采集系统

于海^{1,2}, 万秋华¹, 杨守旺¹, 赵长海¹, 卢新然¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在绝对式小型光电编码器动态特性检测中, 为了对匀速变速转动下编码器的高速误差进行数据采集, 提出了编码器误差数据准确采集方法, 并设计了绝对式光电编码器动态误差采集系统。首先, 通过对被测编码器输出角度数据所表达真实角度准确时刻的分析, 提出了编码器误差数据的准确采集时刻是在编码器输出数据变化的边沿时刻。然后, 通过对误差采集时采集数据量、采集速度及传输速度的分析, 确定了以 FPGA+USB 设计制作硬件电路, 实现编码器误差数据的全分辨率采集。最后, 通过计算机软件实现对误差数据的计算、显示和打印。经过实验, 系统可以高速、准确地采集到快速转动下编码器所有角度的误差数据, 能够满足小型绝对式光电编码器动态特性检测的要求。系统具有采集数据高速、准确等优点。可以实现对 90 r/min 以下转速的 16 位编码器的数据采集。

关键词: 光电编码器; 动态检测; 误差采集; FPGA+USB

中图分类号: TP274+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1809-06

Dynamic error acquisition system of absolute optical encoder

Yu Hai^{1,2}, Wan Qiuhua¹, Yang Shouwang¹, Zhao Changhai¹, Lu Xinran¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve high-speed data acquisition for rotating photoelectric encoder in the dynamic detection, the method of encoder angle data collection was proposed and the acquisition system of dynamic errors for absolute photoelectric encoder was designed. Firstly, it was proposed that the exact time of acquisition for error data was at the edge of data by the analysis of the exact time for the output of encoder. Secondly, the circuit was designed with FPGA and USB chips by the analysis of quantity, acquisition speed and transmission speed of error data. Finally, the computer software finished the calculation, displaying and printing. By the results of experiment, the system can collect the error data of rapid rotating encoder accurately, meanwhile suited for the detection of the dynamic characteristics for small absolute optical encoder. This system can achieve the data acquisition of 16 bits photoelectric encoder below the speed of 90 r/min accurately.

Key words: photoelectric encoder; dynamic detection; data acquisition; FPGA+USB

收稿日期: 2012-11-20; 修订日期: 2012-12-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 于海(1987-), 男, 博士生, 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

导师简介: 万秋华(1962-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。

Email: wanqh@ciomp.ac.cn

0 引言

光电编码器是一种高精密的数字测角装置,其结构简单、分辨力高、精度高、易形成绝对代码,被广泛应用于雷达、机器人、光电经纬仪、数控机床等诸多领域。由于光电测控设备的跟踪、定位精度对角速度及角加速度的敏感度的增强,不仅要求编码器实时提供角度信息,同时还要求在角速度、角加速度作用下保证精度。在光电编码器的生产研制过程中,光电编码器的检测是重要环节^[1-8]。

光电编码器的检测包含静态检测与动态检测。俄罗斯、日本和德国等国家都研制出了编码器的动态特性检测装置,但是大多对环境要求非常严格,制造成本高,不适合应用在工作现场检测^[9-11]。国内还没有较好的编码器动态特性检测设备,大多只能检测静态特性,急切需要动态特性检测设备。在编码器动态检测装置中,数据采集系统是编码器动态检测设备的关键。它不仅需要快速、准确地采集到被测编码器和角度基准源的数据,而且需要将采集到的误差数据传送到计算机进行误差精度的计算、显示和打印。采集系统的准确性和高速性直接关系到动态特性检测结果的准确性。

参考文献[12]中提出用机械传动系统,配合步进电机,并以蜗轮蜗杆对步进电机的输出角位移进行细分的方法实现对编码器的检测。它的误差采集方法是每隔一定角度对编码器误差数据进行采集,采集点数越多,误差检测覆盖越广,并不能准确找到编码器角度数据输出的准确时刻,存在一定的误差。参考文献[13-14]中提出利用虚拟仪器 Labview 与 232 串口结合的方式对编码器误差数据进行误差采集。该采集方法检测点数少,数据传输慢,不能完成对编码器的全分辨率误差采集。同时上述文献中提出的方法并不能对快速旋转下的编码器误差数据进行采集,不适合编码器动态特性检测。

文中提出编码器误差数据准确采集方法,能够在编码器角度数据的准确位置锁存误差数据,减少由于编码器最小分辨率造成的误差。同时该方法能够实现编码器全分辨率角度的误差数据采集,为编码器动态特性检测提供了基础。经过实验验证,采集系统可以实现对 90 r/min 以下,位数不高于 16 位

的小型绝对式光电编码器进行准确的误差数据采集,其误差采集精度为 0.048 6",能够胜任小型绝对式光电编码器动态特性检测装置的数据采集工作。

1 编码器角度误差数据采集原理

1.1 编码器输出角度数据准确采集原理

绝对式编码器将角度信息转化为数字信息,并以二进制代码形式输出。一个 n 位光电编码器将一个圆周分成了 2^n 份,其分辨率为:

$$\delta = \frac{360^\circ}{2^n} \quad (1)$$

即编码器输出二进制信息最低位的每一次变动,就是其测量角度增加或减少 δ 度。设输出二进制信息为 ϕ 时所表示的角度值为 α (α 为 δ 的整数倍)。编码器转动时,被测角度增加,变成 $\alpha + \beta$ 。当 $\beta \geq \delta$ 时,编码器输出二进制信息发生变化。因此,编码器输出二进制信号为 ϕ 时,所在的角度范围为 α 到 $\alpha + \beta$ 。被测角度在 α 到 $\alpha + \delta$ 之间,编码器输出二进制信息不发生变化,保持为 ϕ 。所以读取编码器二进制信息,会与实际角度造成大小为 β 的角度误差, β 最大为:

$$\beta_{\max} = \delta = \frac{360^\circ}{2^n} \quad (2)$$

由上面分析可知,当 $\beta = 0$ 时,编码器输出二进制数据处于由 $\phi - 1$ 变为 ϕ 的临界点,此时编码器输出数据 ϕ 是被测角度的真实值,如图 1 所示。

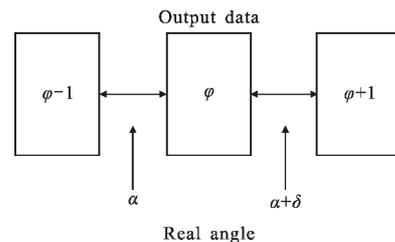


图 1 编码器输出数据原理

Fig.1 Principle of encoder output data

图 1 中,编码器转动时,由于测量角度的增加,其输出数据由 $\phi - 1$ 增加至 ϕ ; 测量角度由 α 增加至 $\alpha + \delta$ 。编码器输出角度数据的准确时刻在 α 到 $\alpha + \delta$ 的临界点。

通过对编码器输出数据进行采样,能够近似准确找到编码器二进制数据最低位变化的临界点。设当前编码器转速为 v , 那么转动下编码器输出数据的变化频率为:

$$f=2^n \cdot v \quad (3)$$

由于采集设备需要对转速不高于 90 r/min 的 16 位以下小型绝对式编码器进行数据采集, 所以当 n 取最大值 16, v 取最大值 90 r/min 时, 编码器输出数据变化频率取得最大值:

$$f_{\max}=2^{16} \times \frac{90}{60} \approx 98\,304 \approx 98.304 \text{ kHz} \quad (4)$$

奈奎斯特采用定理指出, 当采样频率大于信号中最高频率的 2 倍时, 采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息。若要完好地保留采集后数据信号中的跳变临界点, 必须使用高于信号频率多倍的采样频率。该系统为更加准确地采集到临界时刻, 采用 40 MHz 采样频率。此时, 由于采样间距所能造成的角度误差为:

$$\beta_{\text{采样}} = \frac{\Omega}{40 \text{ MHz}} \quad (5)$$

式中: Ω 为编码器角速度, $\Omega=360^\circ \cdot v/60$ (角度/s)。由公式(5)可以看出, $\beta_{\text{采样}}$ 的值, 随着角速度的增加而增加。在 v 取最大值 90 r/min 时, $\beta_{\text{采样}}$ 取得最大值:

$$\beta_{\text{采样 max}} = \frac{360 \times 90}{40\,000\,000 \times 60} = 0.000\,013\,5^\circ = 0.048\,6'' \quad (6)$$

由采集偏差产生误差的标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{采样 } i}^2}{n}} \quad (7)$$

式中: n 表示采样次数; $\beta_{\text{采样 } i}$ 表示第 i 采样时的误差。若每次采样, 都达到误差的最大值 $\beta_{\text{采样 max}}$, 那么:

$$\sigma_{\max} = 0.048\,6'' \quad (8)$$

式中: σ_{\max} 远远小于公式(1)中的 δ 。对数据采集的影响可以很小。

1.2 全分辨率误差采集原理

采集系统在每一个数据跳变临界点对被检编码器和基准编码器的数据进行锁存, 做差后得到编码器当前角度的误差。若对被测编码器所有输出数据的临界点都进行误差采集, 那么共采集 2^n 个点的数据, 就完成了编码器的全分辨率误差采集。该系统中, 全分辨率误差采集时, 对于 n 位的编码器需要采集数据量为:

$$B_n = 2^n(n+n_{\text{基准}}) \quad (9)$$

式中: $n_{\text{基准}}$ 为角度基准源的位数, 当前为 21 位。当 n 取最大 16 时:

$$B_{16} = 2^{16}(16+21) = 2.424\,832 \text{ Mb} \quad (10)$$

动态特性检测装置中, 编码器的最快转速为 90 r/min。那么, 若要实现计算机软件对被测编码器误差的实时显示, 采集电路与计算机之间的数据传输速度为:

$$V = B_n \cdot v \quad (11)$$

式中: $V_{\max} = 3.637\,248 \text{ Mb/s}$ 。这么快的传输速度采用传统的数据传输方法是不能够完成的, 所以必须采用高速传输方式。

1.3 动态误差采集系统原理

小型绝对式编码器动态特性检测装置如图 2 所示, 主要由角度基准源、被测编码器、数据采集系统、联轴节、系统支架、伺服控制系统和无刷直流电机组成, 分别如图中 1~7 所示。

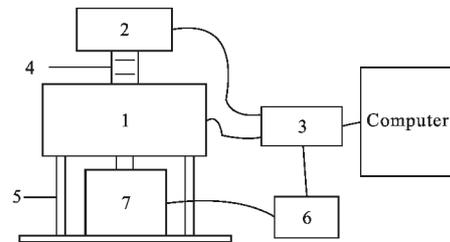


图 2 编码器动态特性检测装置

Fig.2 Detection devices of encoder's dynamic characteristics

系统采用比较法完成对被检编码器误差的评定。比较法要求基准编码器的分辨率和精度高于被检编码器 3 倍以上, 才能作为角度基准。小型绝对式编码器动态特性检测装置采用长春光机所研制的 21 位绝对式光电编码器作为角度基准, 其精度为 $4''$; 被检编码器位数不高于 16 位, 精度不超过 $40''$ 。基准编码器的分辨率高于被检编码器 10 倍以上, 可以作为角度基准。

小型绝对式编码器进行动态特性检测方法是: 使被测编码器与基准编码器在匀速、变速转动下同轴转动, 采集系统采集被测编码器与角度基准源的数据并做差, 得到被测编码器的误差数据, 进而计算出被测编码器的精度。检测装置最快转速为 90 r/min。

数据采集系统设备主要负责对被测编码器和角度基准源的数据进行采集, 并将数据传输到计算机中进行精度计算、显示、打印。数据采集系统必须具有高速的数据采集、存储和传输速度。数据采集系统原理图如图 3 所示。

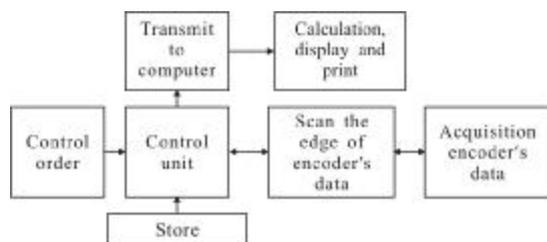


图 3 数据采集系统原理

Fig.3 Principle of data acquisition system

在采集系统中,控制指令被发送到控制单元,来决定是否开始进行数据采集。采集开始时,系统对被测编码器数据进行扫描采样。当扫描到被测编码器输出数据发生跳变时,则锁存被测编码器数据和当前角度基准数据,进行存储并向计算机传输。向计算机发送的数据中,每一组数据为一个被测编码器数据跳变临界点时的被测编码器数据和角度基准数据。计算机软件将对这组数据进行计算得到当前角度的误差,并进行显示和打印。

2 编码器数据采集系统设计

2.1 硬件设计

设计采集电路的设计,采用 Xilinx 公司生产的 FPGA 芯片 XS3C400 高速 FPGA 芯片实现对被测编码器数据跳变临界点的扫描和数据的采集。XS3C400 芯片拥有 400 K 个可编程门阵列和 4 个 DCM 模块,其最大 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。能够满足对高速变化的编码器输出数据的采集工作。

采集电路与计算机的数据传输采用 USB 芯片 CY7C68013 完成。CY7C68013 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 4KB 的 FIFO,保证数据高速传输的需要^[15]。CY7C68013 芯片拥有三种数据传输模式,即端口模式、GPIF 和 Slave FIFO^[16]。该系统采用 Slave FIFO 模式。基于这种工作模式下的传输,CPU 将不参与,大大提高了数据传输效率。编码器误差采集系统如图 4 所示。

数据输入自动识别模块用来将被测编码器输出数据转化为可以被 FPGA 芯片读入的形式。被测编

码器通常拥有两种数据输出方式,串行输出和并行输出。对于并行输出方式,可以直接利用 FPGA 对其进行读取。对于串行输出编码器,由于其采用 232 或 485 总线的传输协议不一样,采集系统利用 MAX3160E 芯片对其进行采集。

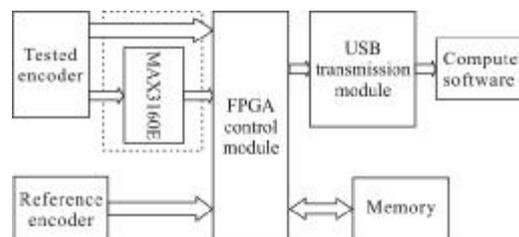


图 4 采集系统组成框图

Fig.4 Acquisition system block diagram

FPGA 控制模块是负责对指令的接收、编码器数据的采集控制、数据的存储控制及与计算机的通信。

FPGA 主要完成的工作为:(1) 读取被测编码器数据;(2) 读取基准编码器数据;(3) 判断被测编码器数据跳变临界点,锁存被测和基准编码器数据;(4) 将锁存的数据存入存储器;(5) 通过 USB 总线传输编码器当前角度信息;(6) 通过 USB 总线传输跳变临界点时刻的基准编码器数据;(7) 当有传送指令时,通过 USB 总线将存储器中的数据传送到计算机。FPGA 的各项工作是同步进行的。

2.2 计算机软件的设计

计算机软件采用 VC++ 软件进行编程,主要完成对 CY7C68013 芯片进行程序固件烧写、端口的选择、读写指令的传送、对 FPGA 控制指令的传送、对误差数据的接收显示和精度计算等。每一帧数据的传输,计算机软件将接收 128 组数据,每组 8 个 16 位数据,其格式如下:

第 0 位为被测编码器实时角度数据;第 1 位为基准编码器实时角度高 5 位数据;第 2 位为基准编码器实时角度低 16 位数据;第 3 位为标志位;第 4 位为被测编码器数据跳变临界点时角度数据;第 5 位为基准编码器在跳变临界点时角度高 5 位数据;第 6 位为基准编码器在跳变临界点时角度低 16 位数据;第 7 位为结束标志位。

软件将接收到的实时角度数据以二进制灯排的形式显示在界面上。将接收到的跳变临界点时被测编码器与基准编码器数据做差,得到被测编码器角

度误差,存储到全局变量中。角度和误差将以坐标的形式显示在软件上,软件界面如图 5 所示。

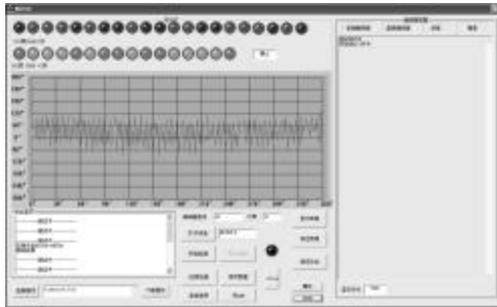


图 5 计算机软件工作截图

Fig.5 Computer software working picture

3 实验

采用长春光机所研制的 15 位小型绝对式编码器作为被测编码器,对编码器进行误差采集实验。

3.1 采集速度测试

将被测编码器与基准编码器同轴安装,利用直流电机带动被测编码器转动,使其在 90 r/min 匀速转动,计算机软件界面如图 5 所示。

图 5 中可以看出,检测到的误差曲线呈锯齿波走势。误差的曲线在 $-60''\sim 120''$ 之间,误差最大值与最小值相差 $180''$ 。

按下数据显示时,软件将显示出采集到的误差数据。由于数据量较大,图 6 只列出部分数据。



图 6 数据采集结果

Fig.6 Result of data acquisition

15 位编码器的分辨率为 $40''$,所以图中数据以 $40''$ 为步进。在计算机软件显示的数据中可以看出,在 90 r/min 转速下,采集系统可以采集到编码器的每个分辨率角度的误差数据,能够完成全分辨率数据的采集。

3.2 采集系统准确度测试

为测试采集系统对数据采集的准确程度,使被测编码器低速转动,并将采集到的被测编码器的误差数据与已有的静态误差检测装置检测数据对比,如表 1 所示。

表 1 低速采集数据对比

Tab.1 Comparison of low-speed data acquisition

Angle/(°)	Traditional system/(")	New system/(")	Angle/(°)	Traditional system/(")	New system/(")
0	0	0	195	85	80
15	60	63	210	55	40
30	45	47	225	-20	-20
45	-30	-27	240	90	090
60	60	65	255	20	18
75	40	50	270	-10	-15
90	-55	-55	285	85	95
105	60	60	300	55	50
120	25	24	315	-15	-10
135	-50	-54	330	70	72
150	80	80	345	55	55
165	45	60	360	0	0
180	-20	-38			

表中可以看出,各角度误差数据相近,采集系统可以准确地实现对被测编码器误差的采集。

3.3 采集系统与传统检测设备对比

表 2 是该系统采集的 90 r/min 转速下编码器的动态误差数据与已有的静态误差测量装置的测量结果对比。由于全分辨率检测点数较多,只列出每间隔 15° 的检测结果,如表 2 所示。

表 2 静态与动态检测结果对比

Tab.2 Comparison of static and dynamic detection

Angle/(°)	Traditional system/(")	New system/(")	Angle/(°)	Traditional system/(")	New system/(")
0	0	0	195	85	91
15	60	75	210	55	67
30	45	47	225	-20	-44
45	-30	-21	240	90	81
60	60	80	255	20	18
75	40	43	270	-10	-37
90	-55	-55	285	85	95
105	60	90	300	55	40
120	25	24	315	-15	-10
135	-50	-54	330	70	75
150	80	80	345	55	45
165	45	9	360	0	0
180	-20	-43			

静态检测结果和动态检测结果的曲线图见图 7。

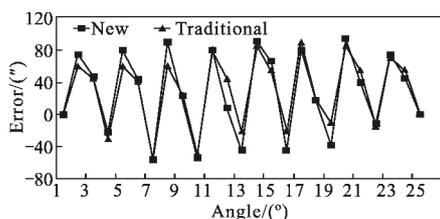


图 7 静态与动态检测结果对比曲线图

Fig.7 Comparison graph of static and dynamic detection

从表 2 和图 7 中可以看出,该采集系统采集到的误差数据与静态检测数据走势一样,采集系统采集到的误差最大和最小值相差 150",静态检测系统的最大和最小值相差 145"。利用静态检测装置检测到的误差精度为 44.08",采集系统采集到的误差精度为 50.59"。由于转动下的编码器误差精度发生变化,所以造成了精度的变大。

4 结论

提出编码器误差数据的准确采集方法,在被测编码器输出角度的准确时刻,利用高精度角度基准源与被测编码器数据进行比较,实现对编码器误差数据的采集。

采用 21 位高精度绝对式光电编码器作为角度基准源,其分辨率高出 16 位以下被检编码器 10 倍以上,能够作为角度基准源。

采用高速 FPGA 芯片能够完成对被检编码器输出数据跳变的准确扫描,准确找到被测编码器输出角度的准确时刻,极大地减少采集误差。

利用 USB 数据总线实现采集电路与计算机的数据传输,为快速实时数据采集提供了基础。

综上,编码器动态误差数据采集系统具有采集速度快、数据采集准确、软件界面清晰明了的优点。经过实验,系统能够完成对不高于 16 位、转速不高于 90r/min 的小型绝对式光电编码器动态误差数据采集。

参考文献:

[1] Dong Lili, Xiong Jingwu. Development of photoelectric tatory encoder [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)

[2] Ai Chenguang, Chu Ming, Sun Han, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11):

2079-2084. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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)

[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)

[6] Shi Fengdong, Shi Yijun, Su Huanxin, et al. Design of pulley movement information collection system in space motion simulation platform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3093-3096. (in Chinese)

[7] Yang Wei. Research of auto-detection system of hotoelectric encoder based on DSP [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010: 1-10. (in Chinese).

[8] Ye Shengxiang. Optoelectronic Displacement Precision Measurement Technology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2003. (in Chinese)

[9] Eviton D B, Kirk J, Lobsinger I. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder [C]//SPIE, 2003, 5190: 111-121.

[10] Filator Y V, Agapov M Y, Bournachev M N. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders, optical measurement system for industrial inspection III[C]//SPIE, 2003, 5144: 381-390.

[11] Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]//SPIE, 2001, 4401: 267-274.

[12] Deng F, Chen J, Chen W J, et al. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(11), 977-980. (in Chinese)

[13] Tong Licui, Li Chenyang, Zhao Zhu, et al. Virtual instrument design of encoder automatically detection process [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010, (2): 31-33. (in Chinese)

[14] Zhao Zhu, Xv Zhijun, Wang Xianjun. Anautomatic detection system of encoder error based on motion control technology [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optic, 2009, 2(2): 134-138. (in Chinese)

[15] Qian Feng. The Theory, Programming and Application of EZ-USB FX2 Singlechip [M]. Peking: Beijing Aerospace University Press, 2006: 15-32. (in Chinese)

[16] 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)