

小型便携式高分辨率转角误差标定装置

王凯旋¹, 吕英俊¹, 王亚洲², 李合意¹, 于海³

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院 山东济南 250000; 2. 长光卫星技术有限公司测试与通信技术研究室, 吉林长春 130000; 3. 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: 为提高测试效率,设计了一种便携式高分辨率转台。首先,采用对比法搭建了误差标定平台,并采用图像角位移识别技术,设计了高精度角度基准。然后,采用直流电机带动被测编码器与角度基准同轴连接,搭建了光电编码器误差测试系统。最后,将各功能的实现代码分布在多个任务函数中,并基于 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 操作系统对任务函数进行调度,实现合理的误差测试、显示及人机交互。实验表明:所设计的误差测试系统能够精确实现对编码器产品的误差标定,具有操作方便、便携、可靠等优点。

关键词: 嵌入式操作系统; 光电编码器; 误差测试; 角度基准

中图分类号: TP216 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2020)08-0031-04

Small Size High Resolution Angle Error Calibration Device

WANG Kai-xuan¹, LYU Ying-jun¹, WANG Ya-zhou², LI He-yi¹, YU Hai³

(1. College of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Jinan 250000, China; 2. Laboratory of Test and Communication Technology, Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the test efficiency, a portable high resolution turntable was designed. Firstly, the error calibration platform was built by contrast method and the high precision angle datum was designed by using image angular displacement recognition technology. Then, a photoelectric encoder error measurement system was built by using DC motor to drive the measured encoder to be coaxially connected with the angle reference. Finally, the implementation codes of each function were distributed in multiple task functions, and task functions were scheduled based on the operating system of $\mu\text{C}/\text{OS}$ to achieve reasonable error testing, display and human-computer interaction. Experiments show that the designed error testing system can accurately calibrate the error of encoder products. It has the advantages of easy operation, portability and reliability.

Keywords: embedded operating system; photoelectric encoder; error testing; angle benchmark

0 引言

光电编码器作为一种能够将转角位移转换为数字化角度信息的测量装置,以其高精度、高分辨力、高可靠性而被广泛应用^[1-3]。在出厂前对编码器产品的测试,是测试产品性能的重要环节。

目前对于光电编码器的误差测试方法主要包括:角度基准标定法和多面棱体标定法^[4-6]。其中,多面棱体标定法采用多面棱体与被测光电编码器主轴同轴连接,并由激光自准直仪对其转角进行标定。这种方法适用于对高精度和高分辨率的被测编码器误差标定。角度基准标定法是采用高精度的角度基准实现对被测光电编码器的误差标定,这种方法适用于分辨率不高的被测产品。由于小型光电编码器的分辨率一般不高于16位,传统方法对于小型产品的误差标

定多采用角度基准标定法。将被测光电编码器与角度基准同轴连接,通过手动转动主轴实现对多个采样点的误差采集。采用手动转动方法,完成被测光电编码器的误差标定非常耗时耗力;人工记录误差数据存在一定的读数误差;高精度的角度基准一般体积庞大且笨重,不适合携带和移动。

文献[7-10]在光电编码器误差标定上做出了研究。但是这些检测方法大多只适合在实验室条件下进行检测,无法应用在工作现场。急需开展简单易行、精确可靠、便携的光电编码器误差标定技术研究。

为提高误差标定效率,本文研制了一种高分辨便携转台。首先,采用图像角位移识别技术,设计了高精度、高分辨率的角度基准,实现小体积的角度基准设计;然后,采用直流电机带动被测编码器与角度基准同轴连接,搭建了光电编码器误差标定系统。最后,根据系统功能设计各任务函数,并基于嵌入式操

收稿日期: 2019-06-15

作系统 $\mu\text{c/os}$ 对任务函数进行调度,实现电机定位、误差标定、显示及人机交互。经过测试,本文所设计转台的分辨率为 $0.15''$ (23 位),不确定度为 $4.63''$ 。转台能够对分辨率不高于 16 位的小型光电编码器产品进行误差标定。所设计的转台具有便携、易操作、分辨率高等优点,满足批量生产时对光电编码器的快速误差标定需求。

1 设计原理

1.1 转台的搭建

设计的转台是面向小型绝对式光电编码器产品的误差标定环节的。小型被测编码器的分辨率一般不高于 16 位,精度不低于 $60''$ 。综合考虑,角度基准标定法非常适用于对本文中测光电编码器的误差标定。采用角度基准标定法设计的转台原理如图 1 所示。

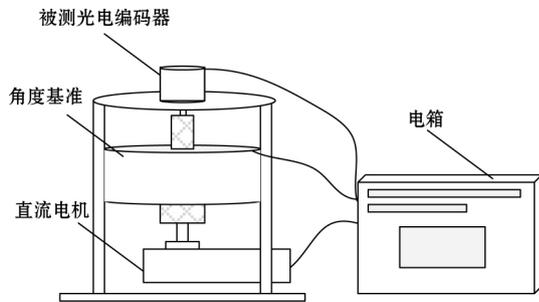


图 1 转台原理图

工作时,直流电机通过联轴节与角度基准连接,用以控制转动。被测编码器通过弹性联轴节与角度基准同轴连接。当电机控制角度基准转动时,被测编码器与角度基准同轴转动。控制电箱输出 PWM 方波控制电机的转速,同时采集被测编码器和角度基准的数据,做差后得到误差数据,并将其显示在液晶屏幕上。

1.2 角度基准设计

在传统的误差标定方法中,采用高精度光电编码器作为角度基准。但是传统的高精度编码器具有较大的体积,并不适用于便携装置。图像角位移识别技术是一种角度测量技术,它采用图像传感器实现对标定光栅上标线的识别,进而实现“译码”和“细分”的运算。由于采用密集的像素信息代替传统的光电接收元件,进而采用数字化图像处理算法代替了传统的“莫尔条纹细分”技术,在计算角度位移时更容易实现高分辨率和高精度。角度基准原理如图 2 所示。

图像传感器与标定光栅的纵向距离小于 1 mm ,使平行光源照射标定光栅时将光栅上的图案投影到图像传感器上。处理电路通过对图像传感器接收到的像素数据的处理计算,实现“译码”和“细分”。

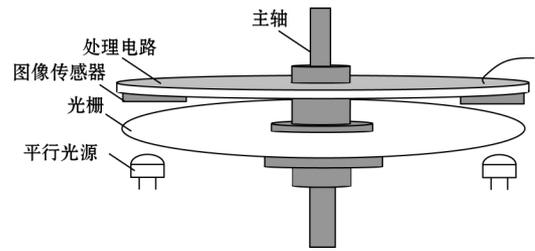


图 2 角度基准原理图

1.2.1 标定光栅设计

图 3 为标定光栅标线图案的原理图,标定光栅圆周内包含有 $2^9 = 512$ 条基准标线。为实现编码,光栅标线分为“宽基准标线”和“窄基准标线”,分别代表编码元“0”和“1”。所有的编码元按照 M 序列伪随机码的编码方式,即每一个编码元都是由前 9 个编码元之间的异或计算得到。设第 i 个码元为 m_i ,那么 m_i 可以通过式(1)进行计算。

$$m_i = m_{i-4} \oplus m_{i-9} \quad (1)$$

式中 \oplus 表示异或运算。

设初始值 $\{m_1, m_2, \dots, m_9\} = \{0, 0, \dots, 0, 1\}$,通过式(1)的计算,共得到 2^9 个编码元。每相邻的 9 个码元 $\{m_i, m_{i+1}, \dots, m_{i+8}\}$ 为一组编码值,其对应的译码值就是 i 。将这些编码元对应的“宽、窄标线”按照等间隔等半径位置刻划到圆光栅上,形成了 9 位标定光栅(图 3 中所指示的编码为“111011100”)。

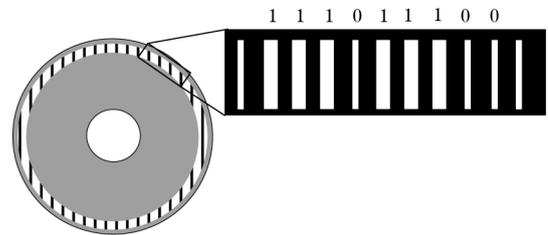


图 3 标定光栅标线图案原理图

1.2.2 细分算法

为了进一步在相邻的标线之间实现“细分”计算。处理电路将根据图像传感器的图像信息计算相邻标线之间的位移。图 4 为标定光栅细分区域的示意图。

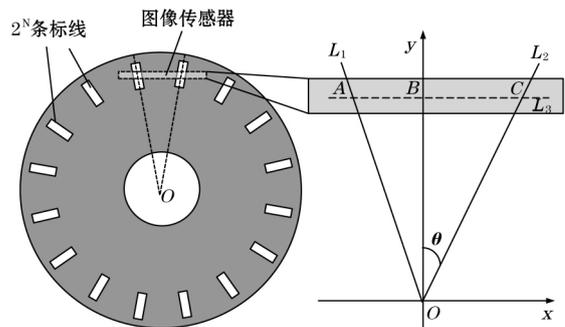


图 4 细分原理

图 4 中 O 为光栅圆心, L_1 和 L_2 分别为光栅上相邻的两条标线, A 和 C 分别是 L_1 和 L_2 刻线的质心。根据小角度近似, 图中角度 θ 与两基准标线夹角的比值可以计算为^[11]

$$\theta = 2^m \cdot \frac{BC}{AC} \quad (2)$$

A 、 C 两点的位置可以通过“质心算法”计算得出。 2^m 的取值越大, 所实现的细分分辨率越高。文中取 $2^m = 2^{14}$ 。那么角度基准所实现的分辨率为 $9 + 14 = 23$ 位, 即 $0.15''$ 。

2 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 的控制原理

$\mu\text{C}/\text{OS}$ 操作系统, 具有可读性好、实时性能强、可裁剪和可移植性强等优点^[12-13]。用户通过设置不同优先级的任务函数, 可以通过调度内核实现对各优先级函数的调度。

为实现转台对被测光电编码器的误差标定, 处理电路的工作主要分为: 接收角度基准数据、接收被测光电编码器数据、控制电机实现定位、显示数据、接收按键信息、识别指令信息和发送指令信息。采用 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 操作系统对这些工作进行调度时, 需要设定好任务函数。根据需要, 本系统的任务函数主要如下:

- (Task1) 初始化配置任务, 优先级 1;
- (Task2) 被测数据接收任务, 优先级 4;
- (Task3) 角度基准数据接收任务, 优先级 4;
- (Task4) 按键识别和指令发送任务, 优先级 2;
- (Task5) 液晶显示任务, 优先级 5;
- (Task6) 电机驱动任务, 优先级 3。

以上 6 个任务的优先级数字越低, 代表调度内核越优先执行该任务。为实现数据的同步接收, 被测数据和基准数据的接收优先级相同。 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 内核对各个任务的调度原理如图 5 所示。

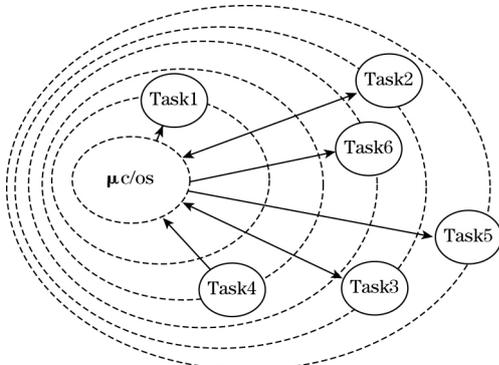


图 5 各任务函数调度原理

图 5 中, 任务越靠外圈, 其优先级越低。在上电工作时, 操作系统内核首先调度任务 1 进行工作, 对系统

进行初始化设置, 包括: 液晶的初始显示、电机的驱动初始化等工作。完成初始化后, 操作系统将调用删除指令“删除”任务 1, 即不再执行任务 1。其他任务将按照各自优先级依次运行, 每个任务的执行间隔设置为 1 ms 。

3 电机驱动原理

在对被测光电编码器进行误差标定时, 需要采用电机带动角度基准旋转到指定的角度值, 实现对当前位置的测角误差标定。因此, 本文采用 PID 闭环控制模型对电机的定位进行控制。其原理如图 6 所示。

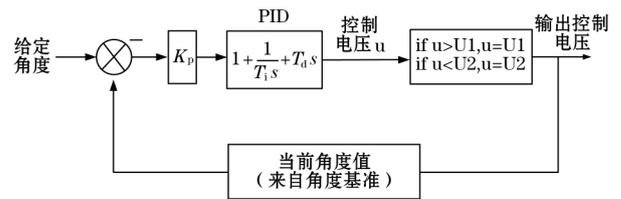


图 6 电机控制模型

控制模型将以角度基准的数值作为反馈, 通过比较“给定角度值”与“角度基准”的差值, 以 PID 控制模型进行计算, 得出控制电压 (PWM 占空比), 实现对直流电机的控制。此外, 在电压输出端加入了“电压限制”, 并设置最高电压 U_1 和最低电压 U_2 防止电机失控。

4 转台性能测试

所设计转台的高度为 110 mm , 直径为 90 mm 。所设计的角度基准的直径为 80 mm , 分辨率为 $0.15''$ (23 位)。驱动电机为安装有蜗轮蜗杆的直流有刷电机, 其最低转速可以达到 $5^\circ/\text{s}$ 。所有的控制电路全部封装在系统电箱中。所设计转台的实物图如图 7 所示。

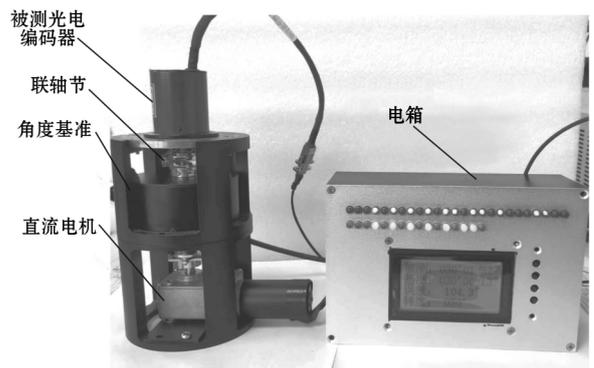


图 7 转台实物图

在电箱面板上包括: 二进制数值显示灯、液晶屏和按键。其中, 二进制数值显示灯负责实现对被测光电编码器和角度基准输出数值的实时显示, 液晶屏上显示当前设定的转角位置和误差数值。4 个按键分别为: 正转、反转、角度基准清零和速度控制。

4.1 角度基准性能测试

为验证所设计角度基准的性能,采用24多面体和激光自准直仪对所设计的角度基准进行误差测试。所测试的误差如图8所示。

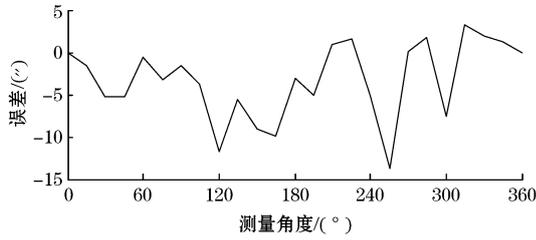


图8 角度基准的误差

对图8中的误差数据进行标准差运算后,得到所设计的角度基准的精度评估指标为4.62"。该指标满足设计需求。

4.2 定位测试

为测试转台系统的定位性能,通过电箱上的按钮控制电机转动,分别每隔30°实现一次定位,并记录下完成定位时角度基准的数据与给定角度的差值,如表1所示。

表1 定位测试结果

给定角度 /(°)	测试值1 /(")	测试值2 /(")	测试值3 /(")
0	0	0	0
30	0.15	0.30	0.15
60	0.30	0.45	0.15
90	-0.15	0.15	0.45
120	0.45	0.30	0.15
150	-0.30	0.15	-0.15
180	-0.15	0.45	0.30
210	0.60	0.15	-0.15
240	0.15	0.30	-0.45
270	-0.15	0.15	0.15
300	-0.45	0.45	-0.15
330	0.15	-0.15	-0.30
360	0.15	0.15	0.15

表1中差值数据的标准差为0.26",该数值较小,满足使用要求。

4.3 不确定度分析

影响误差标定准确度的因素主要包括:角度基准误差、定位误差以及机械安装误差。机械安装带来的误差主要是被测光电编码器与角度基准的同轴度。在安装时,转台的同轴度在±0.1 mm以内。同轴度的影响很小,可以忽略。因此,所设计的转台的不确定度为

$$\alpha = \sqrt{4.62^2 + 0.26^2} \approx 4.63'' \quad (3)$$

5 实验

5.1 对比实验

实验采用的被测编码器为小型绝对式光电编码器,其外径为40 mm,设计指标为16位分辨率,精度优于60"。采用转台对该编码器进行误差标定,并与采用传统误差检测装置的标定数据进行对比,结果如图9所示。

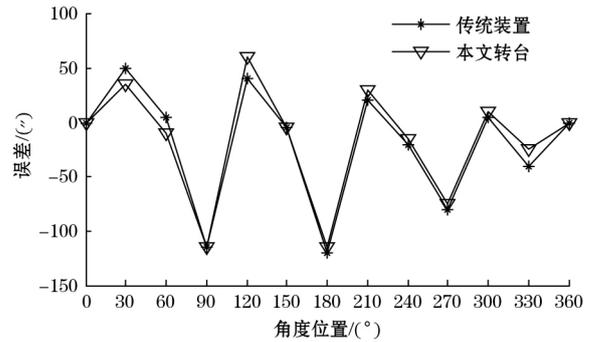


图9 数据对比结果

图9中,采用转台的误差标准差为54.31",传统装置标定的误差标准差为53.99"。同时,通过误差曲线对比可以发现,两者的误差变化趋势相同,这表明本文所设计转台的误差标定结果可信。

5.2 重复性实验

采用转台对被测光电编码器进行3次误差标定,所测得的误差数值如表2所示。误差的标准差分别为53.34"、55.21"、56.39"。可以看出,3次的标定结果相近,设计的转台重复性良好。

表2 重复性实验结果

角度位置 /(°)	测试值1 /(")	测试值2 /(")	测试值3 /(")
0	0	0	0
30	43	54	48
60	15	26	36
90	-121	-115	-119
120	41	43	45
150	-7	-10	-9
180	-112	-120	-116
210	15	10	20
240	-14	-14	-13
270	-78	-76	-76
300	7	9	11
330	-36	-36	-45
360	0	0	0

(下转第39页)



图 6 仪器实物图

的方式测量 ZigBee 点到点的通信质量。仪器可同时测量往返路径的通信质量,使测量效率提升 1 倍,且采用多参数对通信质量进行联合表征,避免了单一参数的局限性。仪器具有测量快速、准确,操作简单,成本低,体积小等特点,适合在 ZigBee 网络设计、安装、调试与优化等场合使用。也可扩展为多个节点同时测量,提升测量效率。

参考文献:

- [1] 刘吉. ZigBee 网络的路由优化算法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [2] 王华强, 陶兴桥. 基于 ZigBee 和云平台的 PU 反应釜温度监控设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(6): 91-94.

(上接第 34 页)

6 结论

为实现批量生产时,对小型光电编码器产品的误差标定,设计了一种高分辨率的误差标定转台。首先,采用对比法搭建了光电编码器误差标定系统;然后,采用图像式角位移识别技术设计了高精度的角度基准;最后,基于 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 操作系统调度内核,设计了转台控制电路。实验表明,本文所设计的误差标定转台能够准确实现对被测光电编码器的误差标定。

参考文献:

- [1] 董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000(2): 198-202.
- [2] 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; 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 2003.
- [3] 熊经武,万秋华. 23 位光电轴角编码器[J]. 光学机械, 1990(2): 52-56.
- [4] 赵柱,续志军,王显军. 基于运动控制技术的编码器自动检测系统[J]. 中国光学与应用光学, 2009(2): 134-138.
- [5] 邓方,陈杰,陈文颖,等. 高精度的光电编码器检测方法及其装置[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(11): 977-980.
- [6] 佟丽翠,李晨阳,赵柱,等. 编码器自动检测过程的虚拟仪

- [3] 李晨曦. 基于嵌入式 Linux 与 ZigBee 技术的智能家居系统设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [4] 郭宏福,白丽娜,郭志华. 2.4GHz ZigBee 数传模块传输距离的估算方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 691-695.
- [5] 朱尚聪,吕红芳,吉书瑶. 基于能量均衡的 ZigBee 路由优化算法[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(4): 141-148.
- [6] 陈焕,汪正祥,傅忠云. 基于发射功率自适应调节的无线通信网抗扰研究[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 71-74.
- [7] 田军,刘爽,朱伟华. 基于改进 ZigBee 路由算法的高压开关柜温度在线监测系统[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(10): 82-87.
- [8] 王飞,董敏明,白琪,等. 基于 RSSI 的 ZigBee 动态加权质心四点定位算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(9): 2663-2665.
- [9] 马赛飞,马尚昌,刘钧. 基于 CC2530F256 的智能变送器模块的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2016(8): 32-35.
- [10] 李康康,崔永俊,杨卫鹏. 基于 ZigBee 和 TDC-GP2 的分布式密度检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(11): 72-75.

作者简介: 徐智博(1986—), 工程师, 硕士, 主要研究方向为物联网技术及其低功耗系统设计. E-mail: xzb1@jlu.edu.cn
王铭海(1986—), 工程师, 主要研究方向为互联网网络技术及无线传感器网络技术.
E-mail: wangminghai@jlu.edu.cn

器化设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(2): 31-33.

- [7] FILATOV Y V, AGAPOV M Y, BOURNACHEV M N, et al. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders[J]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2003, 5144: 381-380.
 - [8] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, et al. Automatic high-precision calibration system for angle encoder[J]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2001, 4401: 267-274.
 - [9] 于海,万秋华,王树洁,等. 光电轴角编码器误差检测技术的发展动态[J]. 光电子技术, 2013, 33(3): 145-150.
 - [10] 马程浩. 光电轴角编码器的检测方法分析及研究[J]. 电子测试, 2018(16): 89-90.
 - [11] 于海,万秋华,赵长海,等. 图像式光电编码器高分辨率细分算法及误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0312001.
 - [12] 何世添,谢海昌. 基于 STM32 和 uCOS-III 的智能家居控制系统设计[J]. 轻工科技, 2018, 34(8): 100-102.
 - [13] 李长录,刘高展. 基于 STM32 与 UC/OS-II 的信号转换器设计[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(2): 56-58; 63.
- 作者简介: 王凯旋(1997—), 学士, 主要研究方向为直流无刷电机控制. E-mail: wangkaixuansdkjdx@163.com