

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.01.07

基于MSP430单片机的高精度转台角速率校准系统设计

林晓钢¹, 杨锦杰^{2*}, 高潮¹

(1.重庆大学 光电技术及教育部重点实验室,重庆 400030; 2.国防科技工业 5012 二级计量站,重庆 401120)

摘要: 为了对转台进行现场校准,设计了一套基于 MSP430 单片机的高精度转台角速率校准系统,实现了对速率转台的高准确度角速率测量校准,并给出了测试实例。该系统采用定时测角法,用高准确度恒温温补晶振作为时间基准时钟,用单片机控制正交解码芯片 HCTL-2032,对圆光栅传感器输出的正交信号进行解码计数,同时设计了硬件周期同步电路,保证了系统的等精度测量,最后由上位机应用软件处理数据。校准结果表明:在超低转速标准装置上进行角速率(0.001~600°/s)校准,在定角间隔为 360°时,角速率误差最小为 -1.9×10^{-7} 。

关键词: 角速率校准; 转台校准; 周期同步; 解码计数; MSP430

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)01-0045-06

Design of high-precision angular rate calibration system of turntable based on MSP430

LIN Xiaogang¹, YANG Jinjie^{2*}, GAO Chao¹

(1.Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education of China, Chongqing University, Chongqing, 400030; 2.China National Defense Science and Technology Industry 5012 Second Level Metrology Station, Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to calibrate turntables on site, a high-precision angular rate calibration system based on MSP430 was designed to achieve high-precision angular rate measurement, and test examples were presented. The system adopts the timing angle measurement method, sets thermostat TCXO clock as time reference, and uses MCU controlled HCTL-2032 to decode and count the orthogonal signal output by the circular grating sensor. In the meantime, the hardware periodic synchronization circuit was designed to ensure the equal precision measurement of the system. Finally, the data was processed by the application software of the upper computer. The calibration results show that when calibrating the angular rate ranged from 0.001~600°/s on the ultra-low speed standard device, the lowest angular rate error is -1.9×10^{-7} at 360° interval.

Key words: angular rate calibration; turntable calibration; periodic synchronization; decoding count; MSP430

0 引言

转台作为航空、航天等领域中仿真和测试的关键设备,在惯性设备研制过程中发挥其重要的

作用。转台性能的优劣直接关系到仿真和测试实验的可靠性和置信度,是保证航空、航天产品和武器系统的精度和性能的基础^[1]。在转台的性能指标中,角速率是一个很重要的指标,因此转台

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-10-26

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1522900)

引用格式: 林晓钢, 杨锦杰, 高潮. 基于 MSP430 单片机的高精度转台角速率校准系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 45-50.

Citation: LIN X G, YANG J J, GAO C. Design of high-precision angular rate calibration system of turntable based on MSP430[J]. Metrology & measurement technology, 2022, 42(1): 45-50.



角速率的准确测量和标定对于转台校准具有重要的实际意义。

GJB 1801-1993《惯性技术测试设备主要性能测试方法》中规定,角速率的测量主要分为定时测角法和定角测时法^[2]。定时测角和定角测时均按不同速率分档,定角的角度信号由角位置测量系统给出,由于角位置测量系统自身存在测量误差,难以保证角速率的准确测量和校准。定时测角法是在定时间间隔内对编码器脉冲信号计数,这种方法存在 ± 1 个计数误差,在低速的情况下误差较大。因此针对转台现场校准,根据定时测角法设计了一种基于MSP430单片机的便携式高精度转台角速率校准系统,利用改进的定时测角法对转台进行校准,以期实现对转台角速率的高准确度自动化测量。

1 转台角速率校准系统组成及工作原理

本转台角速率校准系统由圆光栅传感器、正交解码计数模块、周期同步电路模块、高稳定度晶振模块、电源模块、通讯模块、MSP430F149处理器和上位机组成,如图1所示。

校准系统按照GJB 1801-1993《惯性技术测试

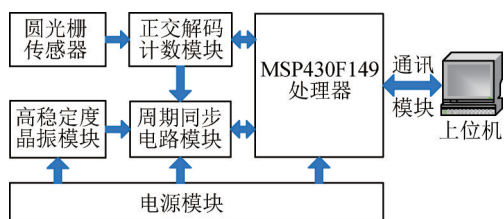


图1 转台角速率校准系统组成

Fig.1 Composition of turntable angular rate calibration system

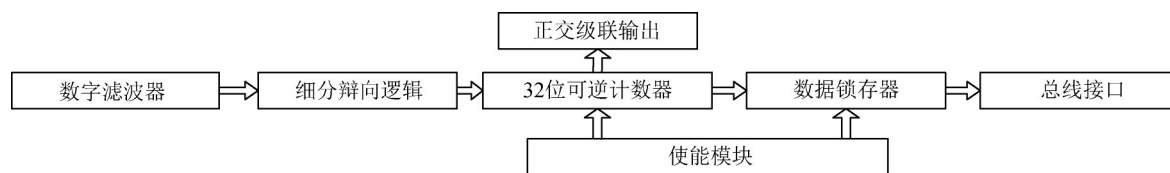


图2 HCTL-2032内部结构图

Fig.2 HCTL-2032 internal structure diagram

HCTL-2032具有独特的滤波抗干扰设计^[5],光栅编码器输出的两路正交信号通过门限比较和4个D触发器之后,才进入可逆计数器,消除了噪声干扰,极大地减小了编码器信号的计数误差,同时允许倍频后的计数频率最高可达11 MHz,解决

设备主要性能测试方法》中的转台校准方法对转台角速率进行测量,采用自制高准确度芯轴固定圆光栅传感器,并将芯轴与转台连接,将转台的运动通过芯轴传递给圆光栅传感器^[3]。MSP430F149处理器接收上位机设定的不同速率档的测量时间间隔和测量次数信息,对晶振输出脉冲精确计数,同时启动正交解码计数模块和周期同步电路模块,对圆光栅编码器输出正交信号计数,在设定时间间隔内读取计数值,通过串口通讯模块传回上位机进行数据处理、存储、显示和报表打印。

2 系统的硬件设计

系统的硬件设计包括正交解码计数模块、周期同步电路模块、高稳定度晶振模块、主控制器及外围电路模块和通信模块等。

2.1 正交解码计数模块

系统角速率检测传感器选用海德汉圆光栅编码器,光刻数为36000,系统误差为 $\pm 1''$,其输出信号包括两路相位差为 90° 的方波脉冲A、B和零位脉冲信号Z。正向运动时,A相脉冲超前B相脉冲 90° ;反向运动时,B相脉冲超前A相脉冲 90° ^[4]。正交脉冲送入正交解码计数模块采用HCTL-2032,不仅简化了电路设计过程,还提高了测量准确度和数据处理速度。

HCTL-2032是由Agilent公司生产的CMOS专用集成电路,由数字滤波电路、细分辨向逻辑电路、可逆计数电路、32位数据锁存和总线接口组成,并且增加了接收基准信号,时钟频率高达33 MHz。模块内部结构如图2所示。

了单片机系统对高频信号无法准确计数的问题。

2.2 周期同步电路模块

针对定时测角法在低转速情况下误差大的问题,设计系统周期同步电路如图3所示,经HCTL-2032正交解码后的编码器信号接入触发器的CLK

时钟端，微控制器同步控制端 P1.0 连接 D 端，触发器输出端 Q 接入 P1.1，与高稳晶振输出端一起接入与非门，P2.1 连接与非门输出端。OE 为 HCTL-2032 数据锁存使能端，单片机 P5 口读取锁存数据。

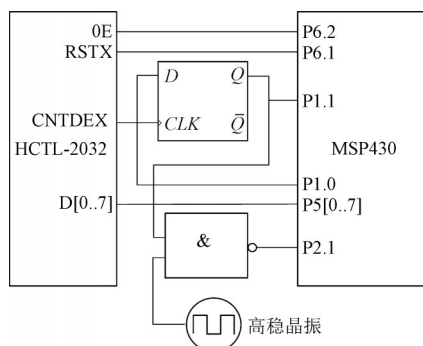


图3 周期同步电路

Fig.3 Periodic synchronization circuit

周期同步电路的原理如图4所示，当开始测量时，单片机收到上位机的参数信息，启动测量信号，输出一个参考闸门起始信号（P1.0=1），此时触发器输出端状态保持不变（Q=0），定时计数器保持不变，当编码器信号上升沿到来时，触发器输出端状态翻转（Q=1），即实际闸门起始信号，定时计数器开始计数。当定时时间到，单片机控制输出一个参考闸门结束信号（P1.0=0），此时计数器和定时器并没有停止，而是待编码器信号的下一个上升沿到来即停止计数器和定时器，从而完成一次测量过程。

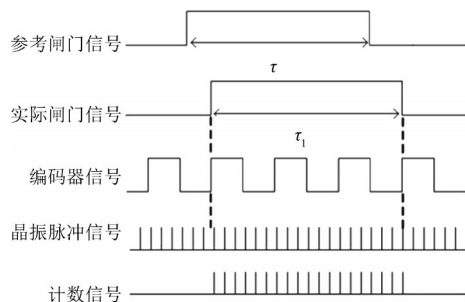


图4 周期同步原理图

Fig.4 Schematic diagram of periodic synchronization

由图4可以看出实际闸门时间 τ_1 和参考闸门时间 τ 不是完全相等，但最大不超过编码器信号的一个周期，这样就保证了系统定时闸门时间与编码器输出信号周期同步^[6-7]，消除了 ± 1 个计数误差。

设编码器一个脉冲代表的角度值为 s ，编码器输出信号频率为 f_1 ，其闸门时间 τ 内计数值为 $n_1 = \tau \cdot f_1$ ，高稳晶振频率为 f_2 ，则闸门时间内计数值为 $n_2 = \tau \cdot f_2$ ，则角速率为

$$v = s \cdot \frac{n_1}{\tau} = s \cdot f_2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (1)$$

计数器启动和停止与编码器输出信号完全同步，故不存在 ± 1 个计数误差，且选用的晶振稳定度为5 ppb，忽略其不确定度影响，对式（1）微分得

$$\Delta v = s \cdot f_2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \cdot \Delta n_2 \quad (2)$$

$$\Delta n_2 = \pm 1 \quad (3)$$

则测量准确度为

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{n_2} = \frac{1}{\tau} \cdot f_2 \quad (4)$$

由式（4）可知，角速率测量准确度只取决于高稳晶振频率 f_2 和定时时间闸门 τ 的大小，与编码器传感器输出信号无关，实现了角速率测量系统对不同速率档的等精度测量。

2.3 高稳定度晶振模块

由于系统准确度取决于晶振频率和定时闸门时间，定时闸门时间根据校准规范由上位机给出，则晶振的稳定性直接影响系统的测量准确度。系统选用10 MHz XTAL恒温温补晶振，外围电路如图5所示。VR端输出参考低噪声电压通过精密电位器接回VC端，起温漂补偿作用。同时为了保证晶振的低相位噪声，温补晶振对供电电源要求低噪、低杂散性，在电源输入端加入R-C滤波。

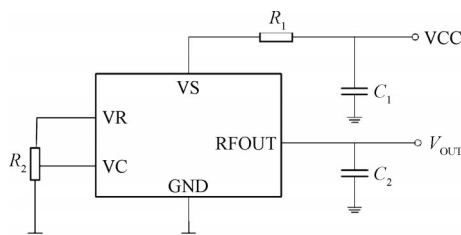


图5 晶振外围电路

Fig.5 Crystal oscillator peripheral circuit

2.4 主控制器及外围电路模块

系统主控制器采用德州仪器（TI）公司的MSP430F149低功耗混合信号处理器，其高效率精简16位RISC结构可以保证任务的快速执行，多数指令可以在一个时钟周期完成，内部集成硬件乘

法器,提高了运算速度,内部DCO唤醒低功耗模式只需 $6\ \mu\text{s}$ 。MSP430F149片内资源丰富,具有60 KB的FLASHROM和2 KB的RAM^[8]、48个I/O接口、一个基本定时器/计数器、两个16位定时器/计数器、模拟电压比较器、12位ADC、2个UART通信接口等,可以满足系统应用的需求。

主控制器外围电路主要包括电源供电电路、复位电路、晶振、JTAG接口、电压转换电路等^[9]。其中MSP430F149供电电压为1.8~3.6 V,其他模拟器件工作电压为5 V,为了给系统提供稳定的电压,采用了稳压芯片MC7805和LM1117-3.3来输出稳定的5 V和3.3 V电压。由于MSP430工作电平属于CMOS电平,不能直接读取TTL电平数据,故采用电平转换芯片SN74LVC4245将5 V和3.3 V电压相互转换,使系统CMOS电平和TTL电平匹配。

2.5 通信模块

通信模块通过串口P3.1, P3.2与上位机通讯,采用串口芯片MAX232AEWE将电平转换为RS-232电平,通信格式采用1位起始位、8位数据位、1位停止位,波特率为115 200 b/s。为了区分测量时间和测量次数,在发送数据之前先发送“a”,结束后再发送一个“b”。

3 系统的软件设计

角速率校准系统的软件设计主要分为下位机角速率测量程序和上位机应用程序。

角速率测量程序主要包括主程序和中断服务程序,主程序首先进行系统的初始化,包括变量、端口定义、系统时钟设置、UART通信设置等,进入查询标志位,然后进入低功耗模式。中断服务程序包括UART中断和定时器/计数器中断。系统测量时串口中断响应获取测量时间和测量次数信息,置位标志位flag1,唤醒CPU,主程序查询到标志位,启动定时器/计数器,并使能HCTL-2032数据锁存,当达到测量时间,中断读取数据暂存,置位标志位flag2,主程序查询到标志位向上位机发送数据,主程序流程如图6所示,中断服务程序流程如图7所示。

上位机应用程序是基于VC 6.0进行设计,最终界面如图8所示。

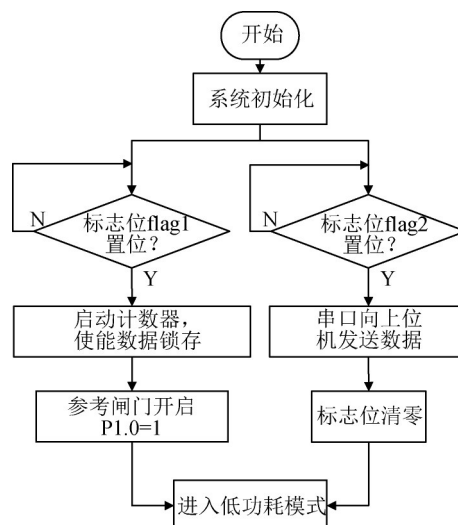


图6 主程序流程图

Fig.6 Main program flow chart

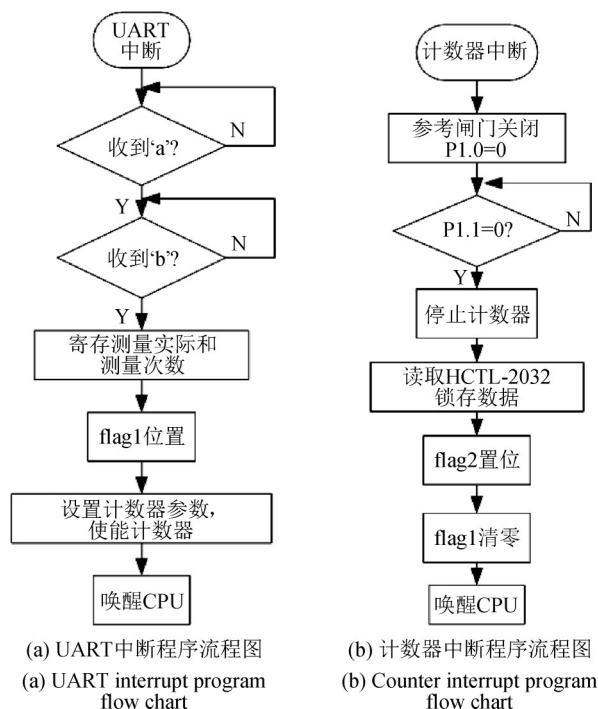
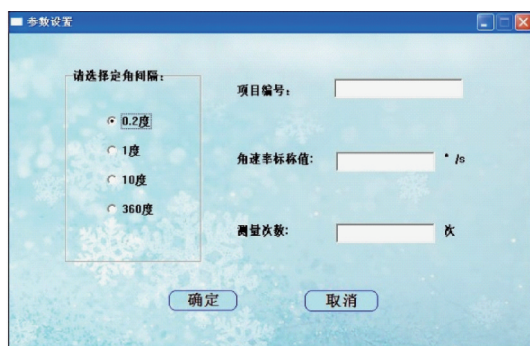


图7 中断服务程序流程图

Fig.7 Interrupt service program flow chart

4 测试结果

该角速率校准系统设计完成后,按照JJF 1210-2008《低速转台校准规范》^[10]要求,在北京长城计量测试技术研究所超低速转速标准装置上进行了校准。因应用被测对象“带高低温试验箱的转台”角速率范围为 $0.001\sim 600^\circ/\text{s}$,所以只对该范围内各角速率档位进行了校准,校



(a) 应用程序参数设置界面

(a) Parameter setting interface of the application program



(b) 应用程序数据显示界面

(b) Data display interface of the application program

图8 上位机应用程序界面

Fig.8 Upper computer application program interface

准结果如表1所示。角速率误差和角速率平稳性均符合转台校准规范的要求。

表1 校准结果

Tab.1 Calibration results

定角 间隔/(°)	标称角速率/ (°)·s ⁻¹	实测角速率/ (°)·s ⁻¹	角速率 误差	角速率 平稳性
0.2	0.001	0.00099967	3.3×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻⁴
1.0	0.01	0.01000030	-3.0×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁴
1.0	0.1	0.09999930	7.0×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻⁴
10	1	1.0000050	-5.0×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁵
360	10	9.9999908	9.2×10 ⁻⁷	4.7×10 ⁻⁷
360	100	99.999939	6.1×10 ⁻⁷	3.4×10 ⁻⁷
360	200	199.999883	5.8×10 ⁻⁷	3.6×10 ⁻⁷
360	300	299.999883	3.9×10 ⁻⁷	3.0×10 ⁻⁷
360	400	400.000122	-3.1×10 ⁻⁷	1.6×10 ⁻⁷
360	500	500.000222	-4.4×10 ⁻⁷	2.7×10 ⁻⁷
360	600	600.000117	-1.9×10 ⁻⁷	3.2×10 ⁻⁷

5 结论

转台角速率校准系统经多次测试和验证,实

现了转台角速率在0.001~600°/s范围的自动化校准。实验结果证明,本系统采用周期同步计数方法很好的消除了±1个角位置脉冲误差,达到了较宽范围的高准确度测量,其性能稳定,而且系统体积小,便于携带,适用于现场校准。

参考文献

- [1] 彭军,郭立忠. 速率转台的角速率不确定度评定方法[J]. 计测技术,1998,18(2):20-21.
PENG J, GUO L Z. Evaluation method of angular rate uncertainty of rate turntable [J]. Metrology & measurement technology, 1998, 18 (2): 20-21. (in Chinese)
- [2] 国防科学技术工业委员会. 惯性技术测试设备主要性能测试方法: GJB 1801-1993[S]. 北京, 1993.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Testing methods of major performance for test equipments of inertial technology: GJB 1801-1993 [S]. Beijing, 1993. (in Chinese)
- [3] 毕鹏,闫道广,岳明桥. 双轴转台角速率检定装置设计[J]. 计测技术, 2017, 37(3): 62-65.
BI P, YAN D G, YUE M Q. Design of dual axis turret angular rate verification device [J]. Metrology & measurement technology, 2017, 37(3): 62-65. (in Chinese)
- [4] 殷庆纵. 一种简单实用的正交解码脉冲接口电路[J]. 电子技术, 2014, (3): 19, 65-66.
YIN Q Z. A simple and practical orthogonal decoding pulse interface circuit [J]. Electronic technology, 2014, (3): 19, 65-66. (in Chinese)
- [5] 马艳, 刘海岷. HCTL-2032 解码器及其在数控系统中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2010, 17(1): 45-47.
MA Y, LIU H M. HCTL-2032 decoder and its application in CNC system [J]. Instrument users, 2010, 17(1): 45-47. (in Chinese)
- [6] 赏星耀, 项新建. 基于同步周期扩展的宽范围等精度快速频率测量方法的研究[C]//全国信息获取与处理学术会议. 2004.
SHANG X Y, XIANG X J. Research on wide range equal precision fast frequency measurement method based on synchronous period expansion [C]//China National Academic Conference on information acquisition and processing. 2004. (in Chinese)
- [7] 王利革, 吴永红, 魏小平. 速率转台低角速率校准方法探讨[J]. 计测技术, 2008, 28(6): 30-32.
WANG L G, WU Y H, WEI X P. Discussion on low angular rate calibration method of rate turntable [J]. Metrology & measurement technology, 2008, 28 (6): 30-32. (in Chinese)

- [8] 李小龙,赵丽娟. 用MSP430F149单片机实现的直流无刷电机控制器[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2008,22(10):144-147.

LI X L, ZHAO L J. Brushless DC motor controller realized by MSP430F149 single chip microcomputer [J]. Journal of Chongqing university of technology (Natural Science Edition), 2008,22(10):144-147. (in Chinese)

- [9] 任海燕,金挺,董青华. 单轴测试转台控制系统设计[J]. 计测技术,2019,39(2):30-34.

REN H Y, JIN T, DONG Q H. Control system design of single axis test turntable [J]. Metrology & measurement technology, 2019,39(2):30-34. (in Chinese)

- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 低速转台校准规范: JJF1210-2008[S]. 北京:中国计量出版社,2008.

State Administration for Market Regulation. Calibration

specification for rate table: JJF 1210-2008[S]. Beijing: China Metrology Press, 2008. (in Chinese)

(本文编辑:郑燕)



第一作者:林晓钢(1975-),男,重庆荣昌人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为信号获取及处理、光电测控技术及智能仪器。