

## 24位绝对式编码器处理电路的改进设计与实现

杨顺平

(中国人民解放军91351部队,辽宁葫芦岛 125006)

**摘要:** 鉴于外场环境和专项试验对绝对式编码器的稳定性要求越来越高,对传统的绝对式编码器处理电路进行了技术改进。该处理电路全部采用A/D转换器采集放大与整形之后的模拟信号,通过软件完成光电信号的比较、细分、译码、校正、平均和参数整定等功能,实现了把轴角实际转动的角度值转换成自然二进制数字代码。经实际项目论证,该编码器运行稳定。

**关键词:** 光电轴角编码器; DSP; 码道; 编码器分辨率; 光强补偿

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0100-05

## Design and Implementation of an Improved 24-Bit Rotary Encoder Processing Circuit

YANG Shun-ping

(No.91351 Unit of PLA, Huludao 125006, China)

**Abstract:** To satisfy the requirement of field test and special test to high stability of the absolute encoder, technological improvements were made to the traditional absolute encoder processing circuit. In the processing circuitry, A/D converters are used for collecting the amplified and shaped analog signals. The processing to photoelectric signal was implemented through software, including comparison, subdividing, decoding, correcting, averaging, and parameter tuning etc. The actual rotation angle of the shaft angle was converted into natural binary digital code. The practical demonstration projects proved that the encoder system is stable.

**Key words:** photoelectric rotary encoder; DSP; code channel; encoder resolution; luminous intensity compensation

### 0 引言

24位绝对式编码器是集光、机、电于一体的数字式测角装置。具有分辨率高、码盘上每个位置的角度确定不变、抗干扰能力强、断电后再工作不需要重新标定等优点<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用于光电经纬仪,完成仪器的测角和测速功能。2000年以来,研制的24位绝对式编码器的数据处理系统是通过电阻采样的方法采集编码器光学系统的光电信号,把轴的转角转换成二进制代码,以光电信号形式表示,经逻辑电路进行放大、比较、存储、信频、译码、校正和组合等处理,变成自然二进制代码输出。但是,在实际使用过程中由于工作环境恶劣,温度差异大,光源衰减等因素的影响,轴角编码器输出的光电流信号幅值易发生变化,需要定期进行人

工调试。调试方法是以一个固定的比较电平为基准来调整各路信号,忽略了信号之间的光电流强度的差异,不具备实用性。在调试各码道输出信号的幅值时,采用螺丝刀手动调节各路电位计和观察示波器波形变化来实现所需各路信号的占空比,不仅工作效率低,而且输入的信号幅值误差大,将导致后续的译码误差增大。因此,传统的数据处理系统无法适应绝对式码盘信号强度随环境温差改变和照明光源老化等产生的变化,导致电路使用寿命降低。

本文提出对绝对式编码器的处理电路、译码方法和对外接口等部分进行技术改进,改进后的电路设计合理,实现了绝对式编码器系统的广泛通用性、环境适应性和可靠性,满足光电经纬仪长期参试要求。

### 1 处理电路的改进设计

#### 1.1 码盘的编码方式

编码器分为绝对式和增量式两种。码盘是轴角编

码器测角的主要元件,圆周 360°角度由码道分开,绝对式码盘有多条码道,如图 1 所示。每条码道依靠透光(图中白色)和不透光(图中黑色)把圆周分成若干等分,并采用格雷码、阶梯码和通圈形式刻划。该编码方式的特点为:1)第 1 圈粗码  $A_1$  和第 2 圈粗码  $A_2$  均刻一条线,弧长为半圈,相位错开 90°;2)第 3 圈  $A_3$  起,每圈刻线数为  $2^{n-2}$ ;3)第  $n$  圈码道的亮区中心位于第  $n+1$  圈码道的暗区中心;4)码道刻划从里向外为粗码、通圈、中精码和精码;5)该码盘为直径 254 mm,厚度 12 mm 的环形玻璃圆盘。

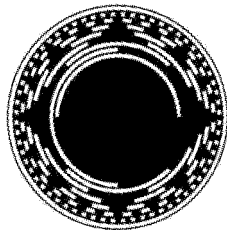


图 1 绝对式码盘

Fig. 1 Absolute encoder

该编码方式的优点是分辨率高、读数误差小、有绝对零点;缺点是不能直接进行运算处理,需要转换成自然二进制代码。目前我国的大型光电经纬仪多数采用此种编码方式。

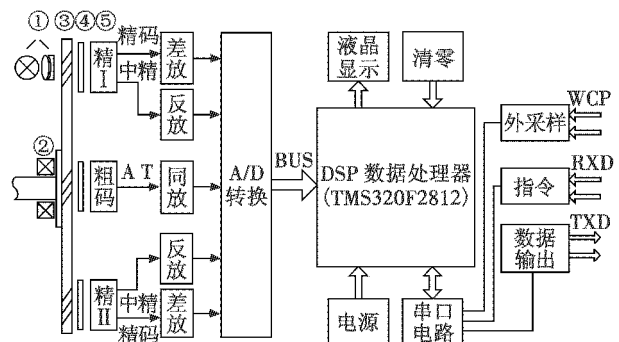
### 1.2 改进设计的思路

码盘输出的码道信号有粗码(A 码),中精码(G5 码、J 码和 F 码),精码(G 码)和通圈(T)信号,它们的波形依次为方波、梯形波、似正弦波、正弦波和高电平<sup>[1-2]</sup>,传统的处理方法是通过对硬件电路进行鉴幅。粗码与固定电平做比较,将方波和梯形波放大并整形为占空比为 1:1 的方波;中精码与通圈做比较,将梯形波和似正弦波放大并整形为占空比为 1:1 的方波;精码采用差分放大器、A/D 转换器和软件细分,得到绝对式编码器低 10 位的二进制角度代码(即  $2^9 \dots 2^0$ ),三者组合成 24 位绝对式编码器的二进制角度总代码,最小分辨率 0.077"。选择的比较电平易受环境变化和使用期限等因素的影响,导致各码道的转换点改变而出现乱码、错码、抖动、飞车和不转动等故障现象,经常影响光电经纬仪的正常使用。传统的处理电路中,模拟器件使用数量较多,超过了整体译码电路的 85%,使处理电路的运行速度、抗干扰能力、调试过程、通用性以及成本等受到了挑战。鉴于传统编码器处理电路存在以上弊端,本文提出了改进方法,即采用软件形式替代编码器数据处理电路中的模拟电路,并为数据处理系统增设参数整定和正常工作两种模式。改进后的绝对式编码器经 HXC01 项目论证,一方面成功地消除了传统数据处理电路中模拟电路造成的调试复杂、抗

干扰能力差等问题,另一方面实现了新数据处理电路关键参数的自动获取,有效地避免了手动调试过程中引入的误差,保证了译码精度,并提高了译码电路的可靠性。

### 1.3 硬件电路设计

方位编码器和高低编码器分别安装在垂直轴和水平轴上。基于中央处理器(DSP)的应用,其数据处理系统设计在一块电路板上,由光电信号整理电路、A/D 模拟转换电路、DSP 数据处理电路、接口电路、控制软件和电源等组成。改进后的处理电路原理如图 2 所示。



方位、高低编码器数据采集系统 方位、高低编码器数据处理系统

①照明系统 ②轴系及固定机构 ③码盘 ④读取狭缝 ⑤光敏元件

图 2 改进的处理电路原理框图

Fig. 2 Block diagram of the improved processing circuit

#### 1.3.1 数据采集装置

数据采集装置包括照明系统、码盘、狭缝、读数头、轴系及固定机构等。其中,光源采用白炽灯照明方式。白炽灯为特制的 6 V, 15 W, 要求用直流稳压电源供电,亮度能手动调节;光学系统由非球面镜、柱面镜、转角棱镜、直角棱镜和固定件组成;码盘是一个环形玻璃圆盘,共刻印了 22 圈同心圆码道。从外向里分成精码道、中精码道和粗码道 3 个部分;狭缝分为精狭缝和粗狭缝,精狭缝拾取精码信号和中精码信号,粗狭缝拾取粗码信号;读数头采用硅光电二极管,具有防潮、防腐和稳定等特点;轴系采用密珠轴系,具有较高的回转精度<sup>[2-6]</sup>。

#### 1.3.2 数据处理装置

该编码器光源采用 6 V、15 W 白炽灯,白炽灯发出的恒光经光学系统变为平行光后,分三路照射到粗码照明区和两个精码照明区;采用对径读取精码、中精码信号,软件上进行数字量相加取平均,消除码盘的工艺误差、安装的偏心误差和轴系晃动误差;精码采用差分放大和 12 位 A/D 转换器,以减小细分误差和量化误差。

1) 光电信号整理电路:精码差分放大电路和中精码放大电路完成编码器原始信号的放大,同时对信号

中的直流成分和噪音进行共模处理,进一步提高信号质量<sup>[7]</sup>。

2) A/D 模数转换电路:整理后的精码和中精码信号均为  $\pm 5\text{ V}$  的交流信号,经过 A/D 转换电路进行模数转换,为了保证测角精度和测速反馈的要求,设计中选用 8 通道 12 位 A/D 转换电路,8 个通道转换时间为  $1.98\ \mu\text{s}$ 。高低、方位共 40 路光电信号,编码器数据采集和 A/D 转换时间小于  $10\ \mu\text{s}$ 。

3) DSP 数据处理电路: DSP 数据处理电路是编码器的核心元件,完成编码器指令接收,进行角度信息处理,实现与系统的数据通讯的控制功能,电路设计选用 TMS320F2812 中央处理器作为核心处理电路。

4) 同步采样信号接收及整理电路:为了实现角度信息与光电经纬仪时间的一致性,电路还设计了系统同步采样信号接收及整理电路,对系统发送来的采样信号进行整理处理,处理后的同步采样信号脉冲为负脉冲信号,信号宽度  $6\ \mu\text{s}$ 。

5) 电子调零电路:可以在方位角  $0^\circ \sim 360^\circ$ 、高低角  $-5^\circ \sim 185^\circ$  范围内,根据系统指令,能够设置仪器的绝对零点,数据永久保存在 E2ROM,直到重新设置。

6) 任意点清零功能:光电经纬仪可在任意位置完成手动清零。

7) 角度显示:采集的角度数据送至平显控制电路,实时显示光电经纬仪的高低角和方位角,自检时可显示编码器系统工作状态和故障。

8) 供电电源:包含  $5\text{ V}$ 、 $\pm 12\text{ V}$  3 个电源等级,电源采用满足国军标要求的标准电源产品。

## 2 改进电路的技术特点

24 位绝对式编码器处理电路随码盘形式、码道刻划、细分方式的不同而各异,但其作用相同,即放大光电信号、细分,将其转换成自然二进制的角度信息。

### 2.1 中央处理器的选择

本设计采用 TMS320F2812 中央处理器作为核心处理电路,具有处理速度快、在线自检功能和可并行处理各种事件等优点<sup>[8]</sup>。

### 2.2 减少调整环节

以往在调整各码道信号的输出幅值时采用电位计手动调整,信号通过比较鉴幅器后输出 1:1 的方波信号。而本改进电路去掉了传统的粗码电位计调整环节和中精码、粗码信号的比较鉴幅电路,绝对式编码器输入的所有码道信号全部通过 A/D 模拟转换器转换,与传统的处理电路相比,减少了电路的体积,系统的稳定性和集成度也得到了提高。

### 2.3 可靠性增加

由于大幅度减少了调整环节和相应的放大器、比较器,在程序中增加了角度信号的调整和自动补偿,并且可以在线自检,提高了编码器工作的可靠性。

## 3 关键技术的实现

### 3.1 信号参数的自动计算与调整

传统的处理电路是通过硬件电路进行比较鉴幅,比较电平是固定的,导致占空比的变化不能准确反映出轴角的位置。本改进设计根据 A/D 转换器采集的码道信号是连续变换的数字值, DSP 处理器利用公式计算出各码道信号的参数后找出比较电平,再进行调整。以粗码  $A_5$  为例,比较电平计算见式(1)。当  $A_5$  输出的码道信号幅值发生改变时,比较电平也相应改变,输出的数字信号占空比始终为 1:1,准确反映出轴角的位置,提高了 24 位绝对式编码器的准确率和可靠性。

$$V_s = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{3} + V_{\min} \quad (1)$$

通常,比较电平应设定为各路中精码和粗码信号峰值的 1/3,如图 3 所示。经过与相应的比较电平比较后,形成的各路数字信号的占空比为 1:1。

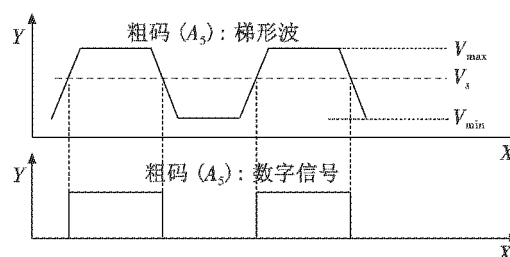


图 3 粗码鉴幅后的方波图

Fig. 3 Square wave of coarse code after amplitude discriminating

### 3.2 码道自动检查

主控计算机按照通讯协议要求,将各码道信号的检查指令通过数据通讯分系统转发给编码器分系统,在线自检方位和高低编码器分系统的码道工作状态,如果发现故障,能及时报警,并定位故障位置,实现编码器分系统码道故障的远程诊断。

1) 中精码、粗码码道的检查。通过改进电路的 A/D 转换器采集各路中精码、粗码的码道信号,检测其波形是否有高低电平的交替变化。有变化,表明该条码道工作正常;没有变化,表明该条码道有故障。

2) 精码码道的检查。通过改进电路的 A/D 转换器采集各路精码信号,检测其波形是否满足幅值和正交性要求。满足要求,表明该对精码道工作正常;未满足要求,表明该对精码道有故障。精码信号参数如图 4 所示。

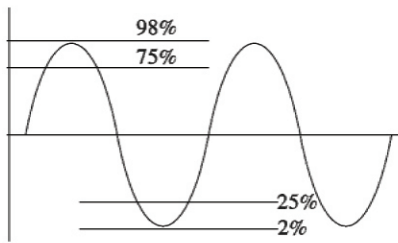


图 4 编码器精码信号参数

Fig. 4 Encoder fine code signal parameters

### 3.3 编码连续性的实时检查

编码器在运行过程中,根据外推功能实时检测方位、高低编码器分系统的进位情况,如果出现跳变现象,能及时报警,并通知主控计算机分系统<sup>[9]</sup>。

检测依据是误差外推公式,即编码器分系统工作在 800 Hz 的采样频率下,通过前 3 个采样时刻编码器分系统输出的角度信息,根据式(2)计算出下一时刻编码器分系统输出的理论角度值  $S_0$ ,用理论值  $S_0$  减去编码器分系统实际输出的角度值,“差值”大于  $60''$  表明编码器分系统出现进位故障,应及时报警。理论值计算式为

$$S_0 = 2(S_1 - S_2) + \frac{S_1 + S_3}{2} \quad (2)$$

判断依据为理论值减去当前值大于  $60''$ 。

参数  $60''$  即编码器分系统以  $1(^{\circ})/s$  的角速度转动,以 800 Hz 频率采样,在一个采样周期内,编码器角度变化为  $4.5''$  (即 58 个分辨率)。误差外推公式如图 5 所示。

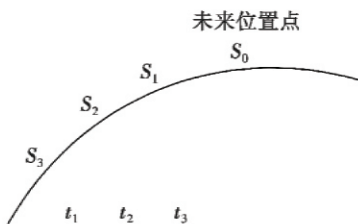


图 5 误差外推公式示意图

Fig. 5 Schematic of extrapolation formula

## 4 新旧处理电路的比较

### 4.1 旧处理电路的不足

绝对式编码器传统的处理电路由于硬件设计的固有原因,存在着如下不足<sup>[10-11]</sup>:

- 1) 粗码、中精码和精码在数据处理系统内含有大量的电阻、运算放大器和可调电位计,在选配精确的电阻型号时工作繁琐、任务量大,且电路调试过程过于复杂;
- 2) 调试各精码信号的幅值、对称性和差分放大器零点漂移需要依赖手动调节电位计和观察示波器的波形,自动化程度很低,而且引入的信号幅值误差导致后

续译码中的细分误差量偏大;

3) 硬件电路的设计无法适应光电码盘信号强度随环境条件改变和自身老化产生的变化,导致数据处理电路寿命短,不具有实用性;

4) 粗码比较鉴幅电路的输入电平在恶劣环境下极易被高频噪声干扰,噪声信号很容易穿越比较电平,导致源码信号产生跳变。

### 4.2 新处理电路的优势

绝对式编码器改进型处理电路存在着明显优势:

1) 利用软件替代和实现了传统处理电路中的比较鉴幅电路和精码差分放大电路的功能,简化了硬件结构,电路调试简单,有效地避免了模拟器件容差等因素带来的误差;

2) 为数据处理电路增设了工作模式,即参数整定模式和正常工作模式,该设计可根据气候的变化或在轻微故障时,整定参数后可参加试验任务;

3) 精码道信号的幅值放大采用软件形式,精码  $\sin \theta, \cos \theta, \sin \theta', \cos \theta'$  放大后消除了偶次谐波和共模量,信号质量好,提高了精码译码的准确性。

新旧型数据处理电路性能比较如表 1 所示。

表 1 新旧型数据处理电路性能比较

Table 1 Performance contrast of new and old processing circuit

处理电路	调试难易度	通用性	使用寿命	误码率	成本
传统电路	很高	较差	较短	较高	较高
改进电路	很低	很好	较长	很低	很低

## 5 结束语

相对于传统译码电路的弊端,改进的处理电路存在着明显优势。本改进设计去除了中精码和粗码的比较鉴幅器,输入的码道信号全部通过 A/D 转换器采集,采用软件替代比较鉴幅环节并通过软件进行参数整定和译码工作;采用软件进行重要参数整定与计算,可根据环境和光源变化采集每路光电信号的电流强度,计算出不同的比较电平,实时调整数字信号的占空比,提高了编码器分系统数据处理电路的通用性和参数调整的精度;减少了编码器的错码率。本编码器在多台 HCX01 光电经纬仪上的应用未出现过任何故障或隐患,经受了野外恶劣环境的考验,并得到推广。

### 参考文献

- [1] 赵学颜,李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京:装备技术指挥学院出版社,2000. (ZHAO X Y, LI Y C. Optical measurement range [M]. Beijing: Equipment Technology Command College Press, 2000.)
- [2] 曹振夫. 260M 光电轴角编码器结构及原理[J]. 光学

- 精密工程, 1995, 3(5):126-130. (CAO Z F. 260M photoelectrical angel encoder's structure and principle [J]. Optics and Precision Engineering, 1995, 3(5):126-130.)
- [3] 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, 2003. (YE S X. Optical precision displacement measurement technology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.)
- [4] KRESS B, MEYRUEIS P L. Motion and position sensors for the automotive industry [C]//Proceedings of SPIE, Photonic Applications for Aerospace, Transportation and Harsh Environments, 2006. doi:10.1117/12.685145.
- [5] 姜志宏, 姜晓梅, 张宇, 等. 24 位光电轴角编码器处理电路硬件设计 [J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2006, 38(3):21-25. (JIANG Z H, JIANG X M, ZHANG Y, et al. The design for the processing circuit of 24-bit photoelectric shaft encoder [J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2006, 38(3):21-25.)
- [6] 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, 8(2):198-202. (DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2):198-202.)
- [7] 陈兴林, 刘杨, 吕恒毅. 一种新型光电轴角编码器译码方法研究 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(2):19-21, 25. (CHEN X L, LIU Y, LÜ H Y. Research on new decode method of photoelectrical encoder [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(2):19-21, 25.)
- [8] Texas Instruments Incorporated. TMS320C28x 系列 DSP 的 CPU 与外设 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Texas Instruments Incorporated. TMS320C28x series DSP CPU and peripherals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [9] 孔智勇, 赵红颖, 熊文卓, 等. 采用衍射、干涉技术提高光电轴角编码器的测角精度和分辨率 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(3):261-266. (KONG Z Y, ZHAO H Y, XIONG W Z, et al. Improving angle-measuring precision and resolution of photoelectric rotary encoders using diffraction interference technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3):261-266.)
- [10] 肖作江. 24 位绝对式光电轴角编码器的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2004. (XIAO Z J. Research 24 absolute photoelectric angle encoder [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2004.)
- [11] 张世轶, 艾华, 韩旭东. 新型光电轴角编码器的发展与应用 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2005, 28(4):43-46. (ZHANG S Y, AI H, HAN X D. The development and application of new type photoelectric rotary encoders [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 28(4):43-46.)
- (上接第 76 页)
- [8] LAMBREGTS A A. Generalized automatic and augmented manual flight control [DB/OL]. [2014-03-20]. [http://www.fmra.tu-berlin.de/fileadmin/fg162/Dokumente/Downloads/Automatic\\_and\\_Augmented\\_Manual\\_FC.pdf](http://www.fmra.tu-berlin.de/fileadmin/fg162/Dokumente/Downloads/Automatic_and_Augmented_Manual_FC.pdf). Berlin Technical University Colloquium, 2006.
- [9] LOOYE G, LOOS H D. Design of autoland controller functions with multi-objective optimization [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2002. doi:10.2514/6.2002-4666.
- [10] LOOYE G, LOOS H D, WILLEMSSEN D. Application of an optimization-based design process for robust autoland control laws [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2001. doi:10.2514/6.2001-4206.
- [11] LOOYE C, WILLEMSSEN D, BAUSCHAT J M. Flight testing robust autoland control laws [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2001. doi:10.2514/6.2001-4208.
- [12] 张庆振, 安锦文. 一种基于飞机总能量控制飞行速度/航迹的解耦控制系统设计新方法 [J]. 航空学报, 2004, 25(4):389-392. (ZHANG Q Z, AN J W. A new method for designing decoupling controller of flight speed/flight path based on total energy control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4):389-392.)
- [13] 刘燕斌, 陆宇平, 何真. 高超音速飞机总能量控制系统的设计和应用 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(1):128-135. (LIU Y B, LU Y P, HE Z. Design and application of total energy control system for hypersonic vehicle [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(1):128-135.)
- [14] 李冀鑫, 侯志强. 基于粒子群算法的总能量飞控系统优化设计 [J]. 电光与控制, 2010, 17(9):51-55. (LI J X, HOU Z Q. Optimized design of total energy flight control system based on PSO [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(9):51-55.)
- [15] AMELINK M H J. Total energy-based perspective flight path display for aircraft guidance along complex approach trajectories [Z]. Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology, 2003.
- [16] LACOSTE J P, BOUBAL J J. Method and system for managing the energy variation of an aircraft; France, 131070, 402 [P]. 2013-03-09.
- [17] LAMBREGTS A A, TADEMA J, RADEMAKER R M, et al. Defining maximum safe maneuvering authority in 3d space required for autonomous integrated conflict resolution [C]//The 28th Digital Avionics Systems Conference, 2009. doi:10.1109/DASC.2009.5347465.