

一种新型高精度绝对式光电编码器研制

熊文凯

深圳市英科达光电技术有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2022年7月26日; 录用日期: 2022年8月26日; 发布日期: 2022年9月2日

摘要

介绍了多读数头消除角位移误差的原理。提出一种新的多读数头全量程数字量相加的处理方法, 所构建的编码器, 省去了传统的高精度绝对式光电编码器中设置的粗读数头, 无精 - 粗校正范围的严格要求, 提高了可靠性。使用游标编码, 仅用三条码道构成了完整的绝对式代码系统, 大大降低了编码器的径向尺寸。利用空间滤波技术, 提高了光电信号的波形质量, 实现了高插补系数细分。采用空间滤波、游标编码和多读数头全量程数字量相加所构建的绝对式光电编码器取得了高精度、高可靠性和小型化效果。给出了三种23位绝对式光电编码器的精度测试结果。已形成产品, 并在相关领域获得较为广泛的应用。

关键词

绝对式编码器, 光电式编码器, 游标编码

Research and Development of a New High Accuracy Absolute Photoelectric Encoder

Wenkai Xiong

Shenzhen ENCODER Optics-Electronics Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Jul. 26th, 2022; accepted: Aug. 26th, 2022; published: Sep. 2nd, 2022

Abstract

The principle of the eliminating angulate position deviation was introduced. A new handling method of adding digital quantities of multi-head reading in the total measurement range was proposed to construct a new absolute photoelectric encoder, coarse reading head of the conventional encoder was left out and the harsh requirements for "fine-coarse" correction range were moved and the encoders reliability had been improved. A complete absolute code system of the encoder with three nonius code tracks was constituted and the radial dimension of the encodes was dra-

matically decreased. The spatial filtering technology was used to improve the photoelectricity signal waveform quality and the high interpolation factor subdivision was realized. The spatial filtering, the nonius encoding and the adding digital quantities of multi-head reading in total measurement range were used to construct a new absolute photoelectric encoder, which had the advantages of high accuracy, high reliability and miniaturization. The testing accuracy of three kinds of 23 bit absolute photoelectronic encoders was given. The products have already been extensively used in relevant fields.

Keywords

Absolute Encoder, Photoelectric Encoder, Nonius Encoding

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光电编码器也称光电轴角编码器，是一种用于测量设备的轴角变化的光电传感器。按形成角度代码的方法不同光电编码器又分为绝对式光电编码器和增量式光电编码器。全量程范围内任意位置，光电编码器输出的角度代码值与所对应转角为单值函数称为绝对式，而增量式编码器是将位移转换成周期性的电信号，再把这个电信号转变成计数脉冲，用脉冲的个数表示角位移的大小。绝对式编码器启动或掉电后再上电，不用经过光栅零位就可以立即输出角度值，抗干扰能力强、使用方便，在自动化领域尤其是军用仪器中获得广泛应用。当前高精度高可靠性小型化的绝对式光电编码器是角度传感器的重要发展方向[1]。

绝对式光电编码器为了形成绝对角度代码，采用码盘存储角度信息。传统的码盘编码一般采用自然二进制或循环二进制(格雷)编码原理，精度和分辨率越高码道数量越多。20 位左右的编码器的码道数量也接近 20 多条，不仅码盘径向尺寸大且各码道之间的位置关系也有严格要求。为了提高编码的精度，通常采用多读数头结构。多头读数有模拟量和数字量相加两种方法，模拟量相加由于各读数头相位对齐要求极其严格，对轴系要求高，可靠性较差，一般很少使用。数字量多头相加，常采用设置精码道、中精码道和粗码道三组码道，并经过多次精对精，精对粗的“接力”校正，以及繁杂的逻辑处理来实现局域的多头数字量相加处理。但各层次码道校正都有较严格的码道间的精度要求，被校正码道误差超过规定值就要错码，出现“粗大”误差，编码器无法正常工作[2] [3] [4] [5]。

本文介绍的采用空间滤波技术，游标编码原理和多读数头全量程数字量相加的绝对式光电编码器，则较好解决了以上问题，取得了高精度、高可靠性和小型化效果。

2. 工作原理

2.1. 多读数头消差原理[6] [7]

作为角度传感器的光电编码器，角度测量的准确程度是作为编码器的使用者最为关心的参数之一。编码器的系统误差的主要误差源有码盘安装偏心误差、刻划误差和轴系晃动等。通过多读数头的平均读数的方式，可有效地抑制编码器以上主要误差源的影响，显著提高光电编码器测量精度。

多读数头消差的方法是在光栅周围均匀布置 n 个读数头，由于光栅的测量误差是以 2π 为周期的周期

函数, 因此可由各阶谐波误差合成读数头的读数误差, 即:

$$\Delta\theta_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m \frac{e_k}{R} \sin k\theta \quad (1)$$

其中: k 是谐波阶次, $\frac{e_k}{R}$ 是谐波幅值。所以, 令读数数值取 n 个读数头读数的平均值时, 读数误差为:

$$\Delta\theta_{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta + \sin k\left(\theta + \frac{2\pi}{n}\right) + \sin k\left(\theta + 2\frac{2\pi}{n}\right) + \cdots + \sin k\left(\theta + (n-1)\frac{2\pi}{n}\right) \right\} \quad (2)$$

对于 k 阶谐波来说, 式(2)可以表示为:

$$\Delta\theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta + \sin k\left(\theta + \frac{2\pi}{n}\right) + \sin k\left(\theta + 2\frac{2\pi}{n}\right) + \cdots + \sin k\left(\theta + (n-1)\frac{2\pi}{n}\right) \right\} \quad (3)$$

将式(3)展开可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta \left[1 + \cos k \cdot \frac{2\pi}{n} + \cos k \cdot 2\frac{2\pi}{n} + \cdots + \cos k \cdot (n-1)\frac{2\pi}{n} \right] \right. \\ \left. + \cos k\theta \left[\sin k \cdot \frac{2\pi}{n} + \sin k \cdot 2\frac{2\pi}{n} + \cdots + \cos k \cdot (n-1)\frac{2\pi}{n} \right] \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

由三角函数之间的变换关系可知:

$$1 + \cos k \cdot \frac{2\pi}{n} + \cos k \cdot 2\frac{2\pi}{n} + \cdots + \cos k \cdot (n-1)\frac{2\pi}{n} = \frac{\cos \left[\frac{n-1}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \sin \left[\frac{n}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}{\sin \left[k \cdot \frac{n}{2} \right]} \quad (5)$$

$$\sin k \cdot \frac{2\pi}{n} + \sin k \cdot 2\frac{2\pi}{n} + \cdots + \cos k \cdot (n-1)\frac{2\pi}{n} = \frac{\sin \left[\frac{n-1}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \sin \left[\frac{n}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}{\sin \left[k \cdot \frac{n}{2} \right]} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入公式(4)可以得到:

$$\Delta\theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta \cdot \frac{\cos \left[k\pi - (k/n)\pi \cdot \sin k\pi \right]}{\sin(k/n)\pi} + \cos k\theta \cdot \frac{\sin \left[k\pi - (k/n)\pi \right] \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right\} \quad (7)$$

因为谐波的阶次 k 为整数, 所以式(7)右边的第二项为零, 则式(7)可以写成:

$$\Delta\theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ (-1)^k \sin kn \cdot \frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right\} \quad (8)$$

当 $k = cn$ 时(c 为正整数), 式(8)中:

$$\left| \frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right| = n \quad (9)$$

因此可以得到:

$$|\Delta\theta_k|_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \cdot n = \frac{e_k}{R} \quad (10)$$

当 $k \neq cn$ 时, 式(8)中:

$$\frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} = 0 \quad (11)$$

因此, $\Delta\theta_k = 0$ 。

由以上分析可以得出如下结论: 假如在光栅周围均匀分布 n 个读数头, 计算这 n 个头读数的平均读数, 并将其作为最终的读数值时, 则能够去除 $k = cn$ 以外的所有谐波对读数精度的影响。由此可知, 在圆光栅周围均匀分布两个读数头时, 并取其读数的平均值作为读数值时, 能够去除全部奇次谐波误差的影响。

采用四头均布读数时, 能够抑制除四的整数倍以外的所有谐波对读数精度的影响。采用更多的读数头可进一步对其误差进行补偿。然而, 在码盘大小确定的情况下, 受码盘直径与读数头尺寸的限制, 不能无限地增加读数头的数量, 否则将导致测角系统成本增加, 结构复杂。

2.2. 编码器组成[8]

本编码器采用两个读数头对径全量程数字量相加, 构成全新的绝对式光电编码器如图 1 所示。与传统编码器的不同主要是: 码盘编码原理、读数头构成和多读数头全量程数字量相加。

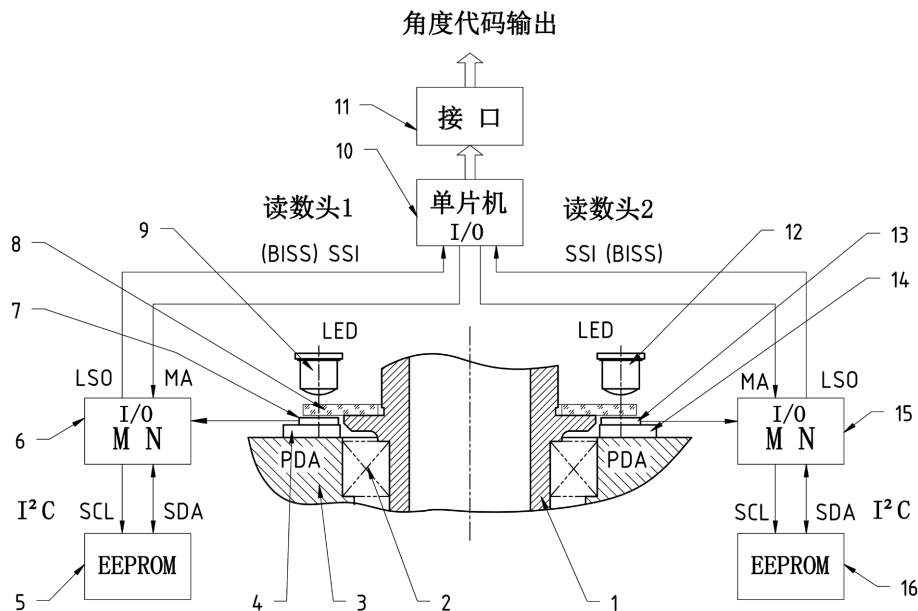


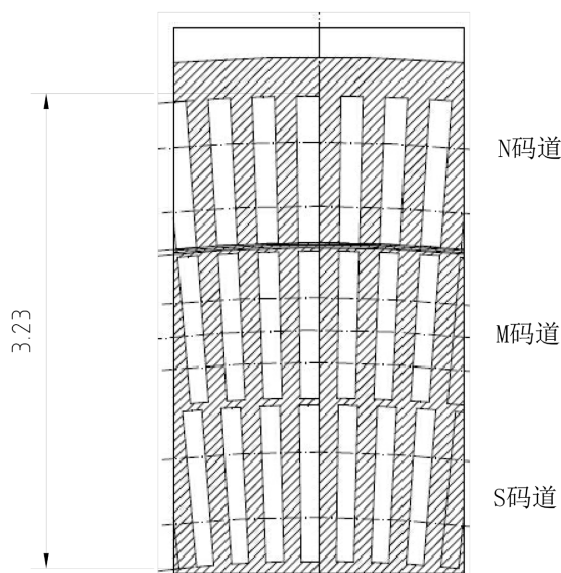
Figure 1. Schematic diagram of the new encoder structure
图 1. 新编码器结构示意图

2.3. 码盘

码盘是编码器的核心元件。图 1 中的码盘(8)局部扇形展开如图 2 所示, 用 M、S、N 三条码道构建绝对式角度代码。这三条码道基于游标编码原理: M 称为主码道, S 为区段码道, N 为游标码道。M、S、N 三条码道相互配合, 经处理电路形成编码器角度的绝对代码输出。根据游标编码规则[7], M、S、N 的每圈光栅线对数应满足表 1 的要求。

Table 1. Three-channel cursor coding rules**表 1.** 三码道游标编码规则

码道	要求的周期数
M	$2^{\text{UBL}(S)+\text{UBL}(N)} = 2^{\text{UBL}(M)}$
S	$2^{\text{UBL}(S)+\text{UBL}(N)} - 2^{\text{UBL}(N)} = 2^{\text{UBL}(M)} - 2^{\text{UBL}(N)}$
N	$2^{\text{UBL}(S)+\text{UBL}(N)} - 1 = 2^{\text{UBL}(M)} - 1$

**Figure 2.** A schematic diagram of the partial expansion of the code wheel**图 2.** 码盘局部展开示意图

UBL(M), UBL(S), UBL(N)分别为码道 M、S、N 的码道实用位长。本例设置 UBL(M) = 10, UBL(S) = 5, UBL(N) = 5, 则: M 码道 CPR = 1024, S 码道 CPR = 992, N 码道 CPR = 1023。M、S、N 三条码道径向尺寸仅 3.24 mm, 对编码器小型化十分有利。

2.4. 读数头

读数头用于采集编码器中所对应位置的码道图案的光电信息, 经过后续电路处理, 生成对应码盘现位置的角度值(代码)输出, 其光电信号的质量决定了编码器精度和可靠性, 是编码器重要的组成部分。本例的两读数头构成完全相同, 分别安置在码盘的对径位置上。图 1 中读数头 1 由 LED 发光二极管(9)、光敏阵列 PDA(7)、垫块(4), 游标编码器专用处理芯片 MN(6)和 E²PROM(5)组成。

读数头中, LED 经准直镜, 发射平行光照射码盘, 经码盘图案调制后, 透过码盘的光垂直入射光敏阵列(PDA), 光敏阵列接收面(或另加分划板)按空间滤波要求刻制相应图案, 使码盘上 M、S、N 码道透射的光经由光敏元件接收面(或分划板图案)进入光敏元件转换成光电信号。光电信号因经空间滤波, 分别被调谐成与 M、S、N 码道相对应的三个特定的空间频率, 抑制了光电信号中高次谐波分量, 为后续电路实现高精度、大插补系数细分奠定基础[8] [9] [10]。

垫块经修配可获得光敏阵列 PDA 与码盘之间的最佳空隙, 改善光电信号质量。

光敏阵列 PDA 对应 M、S、N 三条码道各产生 Psin、Pcos、Nsin、Ncos 四相共 12 路光电信号输出, 直接送入游标编码器处理芯片 MN。MN 的主要功能[11]:

2.4.1. 同步采集光电信号并实时调理

同步采集 M、S、N 码道共 12 路正余弦及其反相光电信号，并对其偏移量、幅度、相位进行误差值计算，应补偿值存入 I²C E²PROM 中，工作时调出对光电信号实时调理。

2.4.2. 细分生成 ϕ_m 、 $\phi_m - \phi_s$ 、 $\phi_m - \phi_n$ 代码

对 M、S、N 分别进行细分处理，经计算得出：

- 1) ϕ_m : M 码道细分后的相角值；
- 2) $(\phi_m - \phi_s)$: M、S 码道光电信号经细分后的相角差；
- 3) $(\phi_m - \phi_n)$: M、N 码道光电信号细分后的相角差。

2.4.3. 同步校正，形成全量程绝对式角度代码。

本例 ϕ_m 角度代码为 10 位($2^9, 2^8, \dots, 2^0$)， $(\phi_m - \phi_s)$ 为 8 位($2^{14}, 2^{13}, \dots, 2^7$)， $(\phi_m - \phi_n)$ 也为 8 位($2^{19}, 2^{18}, \dots, 2^{12}$)，如图 3 所示。 $(\phi_m - \phi_s)(\phi_m - \phi_n)$ 的高 5 位是数据位，低 3 位是同步位，用于同步和校正。

若 ϕ 表示单读数头输出的绝对式角度代码； ϕ_{ms} 、 ϕ_{sn} 分别表示 ϕ_m 对 $(\phi_m - \phi_s)$ 和 $(\phi_n - \phi_s)$ 对 $(\phi_m - \phi_n)$ 的修正值，则：

$$\phi = (\phi_m - \phi_n) \text{ 数据位} + (\phi_m - \phi_s) \text{ 数据位} + \phi_m + \phi_{ms} + \phi_{sn} \tag{12}$$

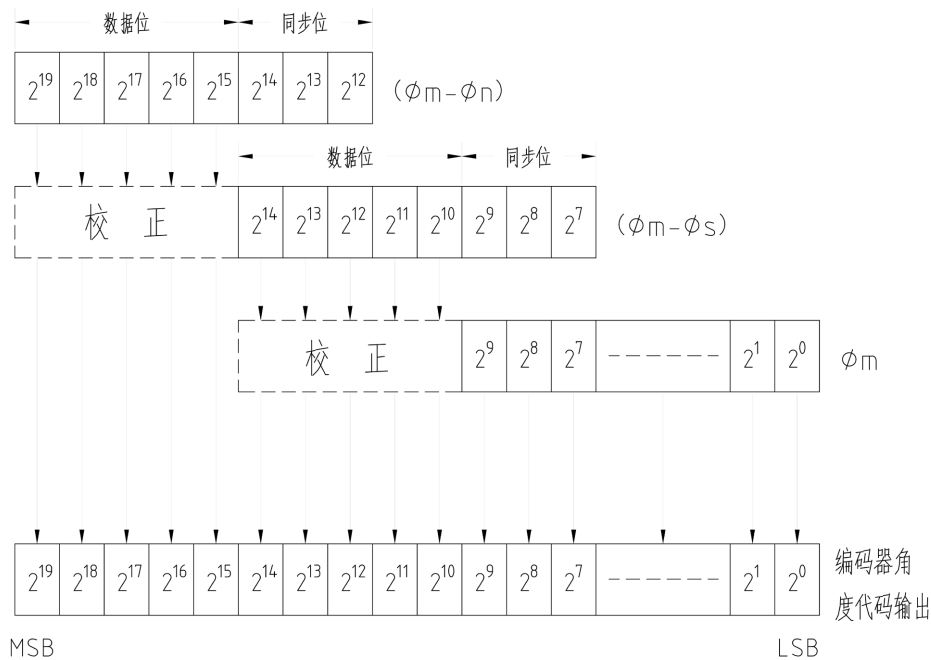


Figure 3. Schematic diagram of code synchronization correction for a single readhead
图 3. 单读数头代码同步校正示意图

2.4.4. 多读数头全量程数字量相加[12]

传统的多读数头大多数采用局域数字量相加，以文献[2]为例，达到高精度，码盘刻制了粗码道精码道共 23 条。设置 3 个读数头，其中两个完全相同的精读数头对径安置，读取码盘中精码道的光电信息，一个粗读数头读取码盘中粗码道的光电信息。每个精读数头因结构的限制只能读取码道的有限空间，形成局域角度代码。两个精读数头的局域代码相加后，形成了精确的局域角度代码。粗读数头是单头读数，获取的角度代码误差很大，在精、粗代码组合成全量程绝对式代码时，需精、粗校正消除粗代码错误，

且粗码误差在一个可校正的范围内才能正确工作, 这个误差范围称为校正范围。此例中, 校正范围仅 $\pm 160''$ 机, 不仅给装调工作带来了困难, 在恶劣环境下使用常常超出校正范围, 影响编码器的可靠性。

3. 实验结果

在本例新编码器结构示意图图 1 中, 单片机(10)以 SSI (或 Biss)同步串行通讯协议, 同时采集两读数头独立形成的, 由 MN 输出的全量程($0^\circ \sim 360^\circ$ 机)的角度代码, 经过对径相加等处理, 由接口(11)输出, 这是全量程($0^\circ \sim 360^\circ$ 机)的精确角度代码, 已消除诸如码盘偏心和奇次谐波的影响。码盘中只用三条码道, 即无粗码道, 更无粗读数头, 也无读数头间对准和校正范围的苛刻要求, 较大地简化了结构, 显著提高了编码器的可靠性。

按图 1 方框图选三种结构相近, 体积较小(外径 100 mm, 内孔 50 mm, 厚度 43 mm), 码盘相同, 且加工和轴承采购上仅按一般商品化要求, 分别组装了“单头”、“双头”、“四头”三台绝对式编码器, 并增加细分份数达到 23 位的分辨率。精度检测结果如表 2 所示。其中双头读数精度提高显著, 结构相对简单, 应用较多。

Table 2. Number of readheads and goniometric accuracy

表 2. 读数头数量与测角精度

读数头形式	最大示值负误差	最大示值正误差	精度
单头(秒)	-16	+39	± 27.5
双头(秒)	-2.1	+8.8	± 5.45
四头(秒)	-3.3	+3.6	± 3.45

4. 结束语

本文采用的空间滤波技术, 将三个码道的光电信号分别调谐在与其相对应的空间频率上, 较好地清除了高次谐波的影响, 获得了高插补系数细分的角分辨率; 游标编码器, 仅用了三条码道, 经过特殊的游标运算和同步校正处理, 实现了传统编码需要二十几条码道才能完成的高精度编码器的绝对式角度编码系统, 极大地压缩了编码器的径向尺寸, 有利于编码器小型化; 多读数头, 全量程数字量相加方法, 在提高测角精度时, 不用粗读数头, 无“精-粗”校正范围的严格要求, 简化了结构, 便于装调, 较大地提高了可靠性。所构建的一种全新的绝对式编码器, 具有高精度、高可靠性和小型化效果。已形成产品并在相关领域获得较为广泛的应用, 是今后的发展方向之一。

发明专利

一种游标多读数头全代码相加的高精度绝对式光电编码器发明专利 ZL201810485832.5。

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, 8(2): 198-202.
- [2] 熊经武, 万秋华. 二十三位绝对式光电轴角编码器[J]. 光电机械, 1990(2): 52-60.
- [3] 刘丰文, 邓文和. 25 位绝对式编码器[J]. 光电工程, 2000, 27(6): 66-68.
- [4] 叶成祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [5] 熊文硕, 熊文凯, 卢动, 熊经武. 一种大空心轴窄圆环超薄型高精度多圈绝对式光电编码器[P]. 中国, ZL201520479866.5. 2015-12-02.
- [6] Orton, P.A., Poliakoff, J.F., Hatiris, E. and Thomas, P.D. (2001) Automatic Self-Calibration of an Incremental Motion

- Encoder. *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Re-discovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No. 01CH 37188)*, Budapest, 21-23 May 2001, 1614-1618.
- [7] 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 多读数头混合布局测角误差抑制方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2339-2346.
- [8] ic-PN Series PHASED ARRAY NONIUS ENCODERS Copyright©2008, 2021 ic-Haus. https://www.ichaus.de/upload/pdf/PN-Series_datasheet_F2en.pdf
- [9] 邓文和. 高质量莫尔条纹信号的提取[J]. 光电工程, 1990(3): 8-19, 28.
- [10] 罗钢, 熊文卓. 光电轴角编码器光电信号正交偏差的补偿方法[J]. 传感器技术学报, 2008, 21(11): 1853-1857.
- [11] ic-MN 25-BIT NONIUS ENCODER WITH 3-CH. SAMPLING 13-BIT Sin/D INTERPOLATION, Copyright©2007, 2019 ic-Haus. https://www.ichaus.de/upload/pdf/MN_datasheet_F3en.pdf
- [12] 熊文凯. 一种游标多读数头全代码相加的高精度绝对式光电编码器[P]. 中国, ZL201810485832.5. 2018-09-28.