

图像式角位移测量污染检测和误码校正研究

刘继帅¹, 贾兴丹¹, 纪越^{1*}, 万秋华²¹天津工业大学控制科学与工程学院, 天津 300387;²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 为了提升光电角位移测量装置的可靠性和准确性,在码盘受污染时能够正常译码,开展了图像式角位移测量的污染检测和污染导致的误码实时校正方法研究。首先,介绍了角位移测量原理以及污染对角位移测量的影响;随后,为检测图像式角位移测量中的码盘污染并实时校正因码盘污染产生的误码,提出了检测-校正-推测(DCAF)的方法和区域像素扫描的方法,分别对粗码、精码区进行污染检测和误码实时校正,在校正过程中,设计了新的精码道编码方式;最后,对所提出的污染检测和误码实时校正方法进行实验验证。实验结果表明,该方法能够对污染进行检测并对其产生的误码进行实时校正,研究对提高角位移测量的可靠性和准确性具有重要意义。

关键词 图像式角位移测量; 可靠性; 污染检测; 误码校正

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240943

Research on Contamination Detection and Error Code Correction of Image-Based Angular Displacement Measurement

Liu Jishuai¹, Jia Xingdan¹, Ji Yue^{1*}, Wan Qiuhua²¹School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract To improve the reliability and accuracy of photoelectric angular displacement measuring device and enable proper decoding in the case of contamination, this paper investigates contamination detection and real-time correction methods for contamination-induced error codes in image-based angular displacement measurements. First, the principles of angular displacement measurement and the effects of contamination on this measurement are presented. Then, to detect the code disk contamination and correct the resulting error codes in real-time, the detection-correction-conjecture and area pixel scanning methods are proposed for the rough and precision code areas, respectively, in the course of correction, a new precise coding method is designed. Finally, the proposed contamination detection and real-time error code correction methods are experimentally validated. Results show that the proposed method can detect contamination and correct the resulting error codes in real time. This research is important for improving the reliability and accuracy of angular displacement measurements.

Key words image-based angular displacement measurement; reliability; contamination detection; error code correction

1 引言

相较于传统基于莫尔条纹的角测量技术,基于图像识别方法实现角位移测量的技术更易于提升测量分辨率和精度,因此,角位移测量成为当下的研究热点^[1-10]。但在目前的研究中,在复杂的工作环境下,图像式光电角位移测量仍会受污染影响,导致其可靠性、

准确性难以保证。

为提高角位移测量装置的抗污染性能,目前的主流做法是增加测量装置的密封性能,但是受滑动导轨的影响很难做到完全密封。研究人员相继开展关于角位移测量码盘的污染检测和误码校正方法的研究^[11-13]。如:英国雷尼绍公司的 RESOLUTE 系列绝对式光栅尺使用光学滤波系统对多个光栅周期进行平

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-04-07; 录用日期: 2024-04-18; 网络首发日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(62173245)

通信作者: *jiyue@tiangong.edu.cn

均,以滤除污染等引起的非周期性特征,能够有效减少误码的产生^[14];Miljkovic 等^[15]设计了一种多模式输出的码盘编码方式,在检测到污染造成的误码后可规避污染位置并以低分辨率模式继续输出译码结果;齐荔荔^[16]分析了由码盘上的划痕和尘埃导致的误码情况,通过计算多个相邻码道之间的差值对粗码区误码进行了检测和校正。

目前针对光电位移测量领域中码盘抗污染能力的研究较少,同时针对基于图像识别的角位移测量抗污染性能的研究更少。已有的抗污染研究主要基于先验知识,对译码后的结果进行处理,缺少实时性的污染检测和误码校正方法。且大多研究集中在对粗码区误码进行校正,缺少对精码区的污染检测和误码实时校正方法。本文基于图像探测器提出了一种污染检测和误码实时校正方法,采用检测-校正-推测(DCAF)法和区域像素扫描法分别对粗码、精码道进行污染检测,并对

污染导致的误码进行校正。同时,设计了能够实现 7 位粗码、5 位精码角位移测量的实验系统,进行了硬件实验验证。经实验分析,本文所提出的方法在码盘受污染时,可实现对粗码、精码的正常译码,能够对污染产生的误码进行实时校正。所提方法对提高角位移测量的可靠性和准确性具有重要意义。

2 图像式角位移测量原理和污染对测量的影响

图像式角位移测量装置由主轴、码盘、互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器、图像处理电路和液晶显示屏等器件组成,如图 1 所示。主轴旋转时带动码盘转动,码盘图案经光学透镜放大和摄像头内部的电路元件转换后,经图像处理电路存储、译码,最终将当前基准线所在的绝对角位置信息及码盘图案显示在液晶屏上。

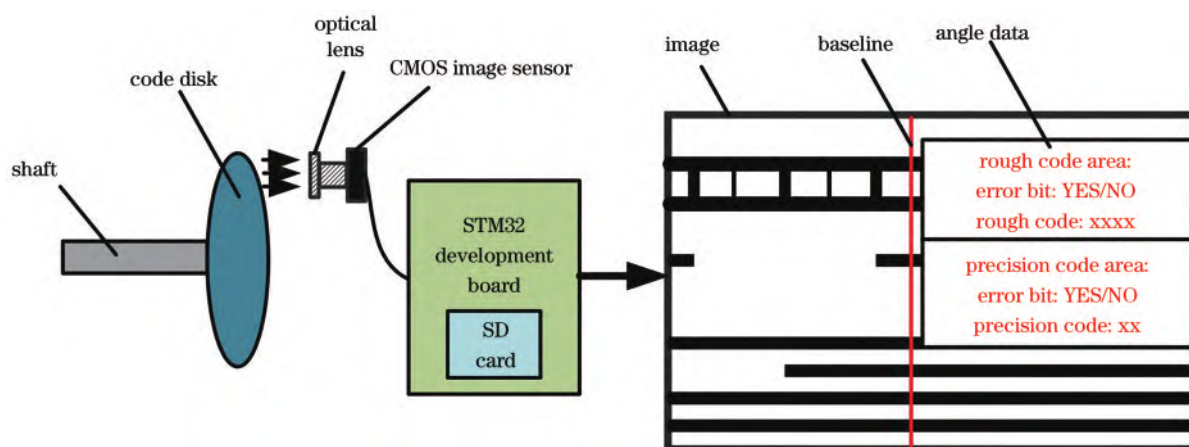


图 1 图像式角位移测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image-based angle displacement measurement system

图像式角位移测量系统所使用的码盘示意图如图 2 所示,其中粗码区为采用格雷码编码的码道,码道和码道间隔沿径向交替排列,从码盘中心到码道边缘

粗码位数逐渐降低,在粗码外围刻划一圈精码道用于细分,提升测量分辨率。在该码盘中,规定黑色码道为码值“1”,白色码道为码值“0”。在图像探测器识别到

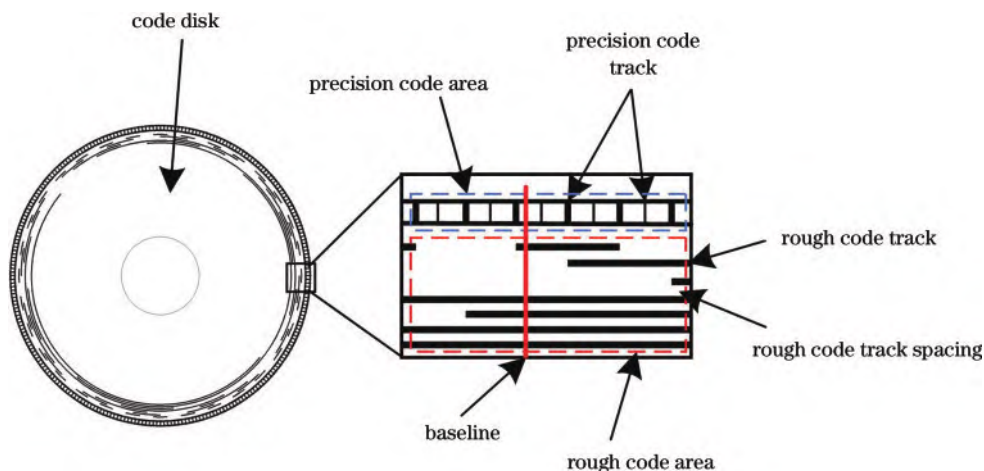


图 2 码盘和局部示意图

Fig. 2 Schematic diagram of code disk and section

的码盘图像范围内,将其分为精码区和粗码区,处理在基准线处的粗、精码道的像素,并分别进行粗码、精码译码。

在实际工作中,测量装置内部元件受到干扰或 CMOS 图像传感器获得受污染的码盘图像时,将导致

测量结果显示值与实际角位置不符,从而产生误码^[17-24]。根据误码出现的位置,可分成粗码区误码和精码区误码。参考当前污染检测与误码校正方法中对码盘污染的分析^[14,16],粗、精码区存在的不同污染情况示意图分别如图 3(a)、(b)所示,其中 G 为单个粗码值面积。

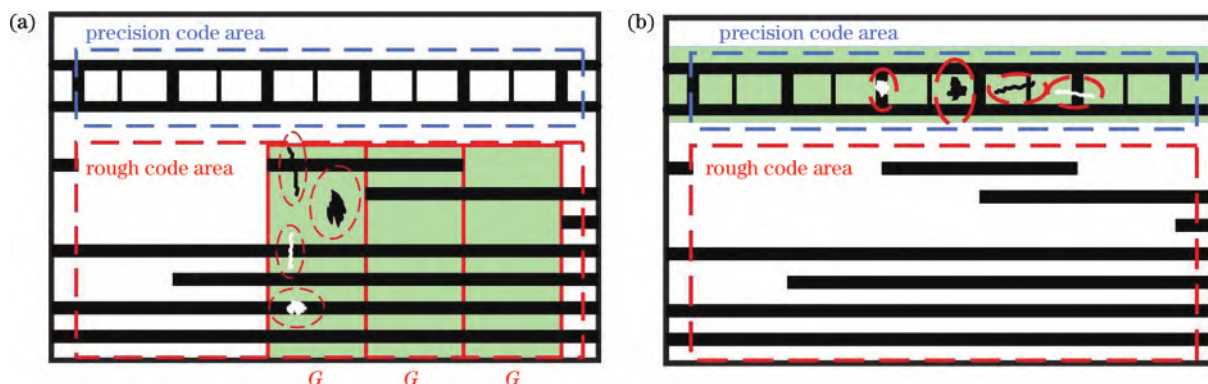


图 3 不同污染情况示意图。(a)粗码区;(b)精码区

Fig. 3 Schematic diagram of different contamination conditions. (a) Rough code area; (b) precision code area

测量中,污染遮挡住光栅刻线时将会影响码盘图像的像素分布,从而影响角位移测量。如图 3 所示,污染对码盘图像的影响主要分为两种情况:

1) 黑色码道上存在白色划痕或尘埃,使得污染处码道的像素值增大,导致在粗码译码过程中无法确定当前粗码码值,或在细分计算中识别到错误的精码道,导致误码;

2) 白色码道上存在黑色划痕或尘埃,被污染处码道的像素值降低,导致误码。

根据瑞利判据,在光线良好的情况下,距离 25 cm 左右时人眼的最小分辨率为 0.1 mm。本文样机所设计的码盘外径为 76 mm,单条粗码道径向宽度为 0.5 mm,粗码区径向长度为 26~33 mm。此时可分辨出单条粗码道中存在的污染,图 3(a)中,超过 G 范围内的污染能够通过人眼观察排除。本文的主要目标为检测码盘图像中 $2G$ 范围内的不同污染,同时校正因不同污染产生的误码。码盘受白色污染时与受黑色污染时的结果同理,

因此为了不重复说明,本文仅叙述当码盘受到黑色类型污染时,图像的变化及抗污染处理后的结果。

3 码盘污染检测和误码校正方法

3.1 基于 DCAF 法的粗码区污染检测及误码校正方法

粗码区译码的示意图如图 4 所示,其中图 4(a)为 m -bit 粗码码盘信息示意图, m 为粗码区码道数量,设基准线为 L , P 为 L 上的像素,其灰度值范围为 0~255, g , h 为夹角为 $2\pi/2^n$ 的漂移线。所设计码盘的码道宽度与码道间隔宽度(w)相等,图 4(a)中,沿 L 从下向上扫描, $P_{PW,i}$ ($i=1,3,\dots,2m-1$) 为第 i 个码道内的像素值累加之和, $P_{PW,i+1}$ ($i=1,3,\dots,2m-1$) 为第 i 个码道间隔内的像素值累加之和,令 $P_{PW}=\{P_{PW,1}, P_{PW,2}, \dots, P_{PW,i}, P_{PW,i+1}, \dots, P_{PW,2m-1}, P_{PW,2m}\}$ 。

在同一个图中, P 与 P_{PW} 数量级相差较大,因此为

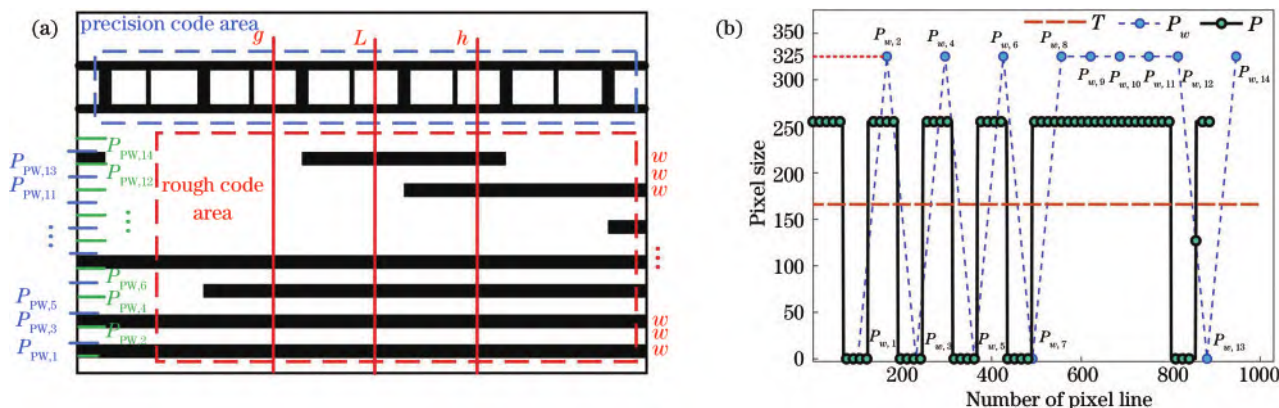


图 4 粗码区译码原理示意图。(a)码盘信息示意图;(b)基准线像素变化

Fig. 4 Schematic diagram of decoding principle for rough code area. (a) Schematic diagram of code disk information; (b) pixel changes of baseline

了便于显示, 设 z 为 P_{PW} 缩小的整数倍数, 令 $P_w = P_{PW}/z$ 。根据本文设计的码盘尺寸, $n=7$ 且 $z=51$ 。基准线上 P 和 P_w 的变化曲线如图 4(b) 所示。理想情况下, 当码盘没有被污染时, P_w 为 0 或 325。设定阈值 T , 根据 P_w 和 T 的关系即可确定基准线上第 j 条粗码道的粗码码值为

$$C_j = \begin{cases} 1, & (P_{w,i} < T) \& (P_{w,i+1} > T) \\ 0, & (P_{w,i} > T) \& (P_{w,i+1} > T) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $i=1, 3, \dots, 2m-1; j=1, 2, \dots, m$ 。

根据码道的分布情况可得, 当 $P_{w,i} < T$ 且 $P_{w,i+1} <$

T , 或当 $P_{w,i} > T$ 且 $P_{w,i+1} < T$ 时认为检测到码盘存在污染, 此时译码错误。 T 值通过大津法 (OTSU) 阈值分割法求得, 该方法不受亮度和对比度的影响, 能够将图像分为前景 (黑色像素) 和背景 (白色像素) 并使二者之间的差别最大。设对图像使用 OTSU 算法得到的计算结果为 O_{OS} , 则 $T = P_w(\max) \cdot O_{OS}$ 。根据式 (1), 图 4(a) 中 L 上的粗码码值为 $C_L = 1111001$ 。

为了在码盘粗码区被污染时依旧能够正确译码, 本文提出一种 DCAF 方法, 实现对 $2G$ 范围内受污染区域的检测和误码的校正, 并能够推测出下一个码值的结果, 其算法流程如图 5 所示。

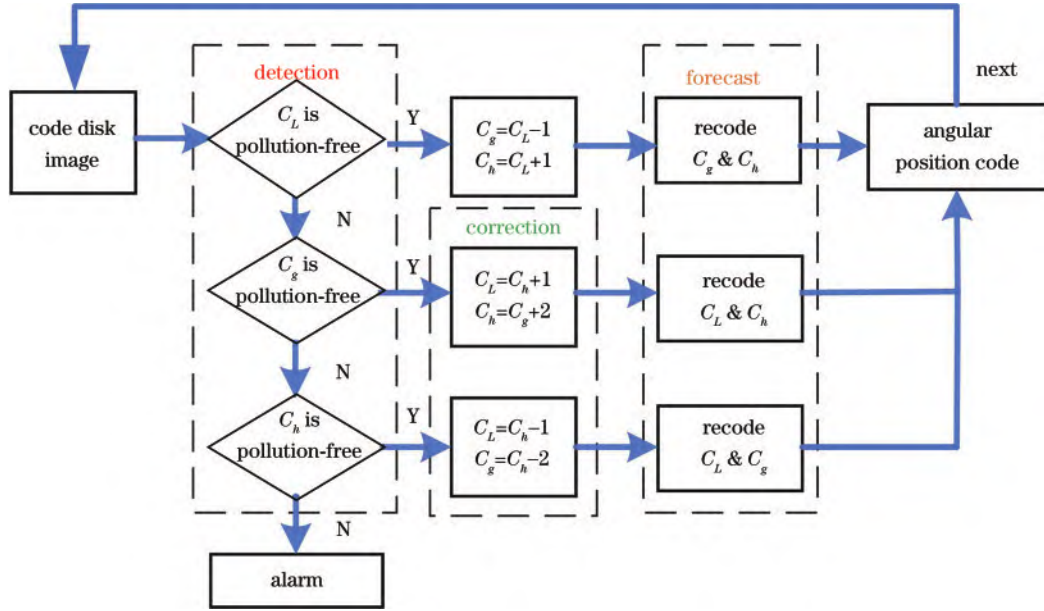


图 5 粗码区误码 DCAF 流程

Fig. 5 Flowchart for error code DCAF in rough code area

首先, 对 L 上的像素进行译码和检测, 当无污染时则直接输出 C_L , 并计算得出 C_g 和 C_h 的值。当 L 存在污染时则对 g, h 上的像素进行译码和检测, 得到码值 C_g, C_h 。利用未受污染的 g 或 h , 计算得到其他正确的码值, 替换出错的 C_L 并输出。该方法能保证在任一角位置的译码过程中都能得到 C_L, C_g 和 C_h 的值, 因此在不考虑旋转方向的情况下, 能够推测出 L 相邻两边的正确码值。当 C_L, C_g 和 C_h 全部出错时则发出警报, 代表污染范围超过 $2G$ 并提示清洁或更换码盘。

另外, 微小污染会导致像素发生变化, 但不会影响正确译码。本文对像素波动能接受的最大允许误差为 5% ^[25], 因此设定误差 E 检测译码中的像素波动, 则 $E = 5\% P_w(\max)$, 当 P_w 的波动大于 E 时提示粗码区存在微小污染。

3.2 基于区域像素扫描的精码区污染检测及误码校正方法

为进一步提高测量系统的分辨能力, 在粗码道外圈刻划了等间距、沿径向均匀分布的精码道。传统的

精码道编码方式为等间距的刻线交替排列, 但无法满足污染检测和误码实时校正的需要。本文中精码区以等间距的宽刻线和窄刻线交替排列的方式刻划。令宽精码道中心线分别为 L_1 和 L_2 , 窄精码道的中心线为 L_3 , 3 条线的径向长度均为 $3F$, 2 个宽精码道和 1 个窄精码道组成 1 个精码区, 单个精码区横向长度为 Q , 径向长度为 $3F$, 且精码道内外分别增加一圈同心圆码道, 径向长度为 F_{FF} 。通过计算 L 处于相邻两精码道中的相对位置可获得细分角度值。如图 6(a) 所示, 其细分角度值 θ 的二进制^[26]表达式为

$$\theta = \begin{cases} \frac{h_1}{h_1 + h_3} \times 2^{n-1}, & L \text{ is to the left of } L_3 \\ \left[1 - \frac{h_2}{2(h_2 + h_3)} \right] \times 2^n, & L \text{ is to the right of } L_3 \\ 2^{n-1}, & L \text{ is on the } L_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: h_1 为 L_1 与 L 之间的距离; h_2 为 L_2 与 L 之间的距离; h_3 为 L_3 与 L 之间的距离; n 为精码的细分比特数。

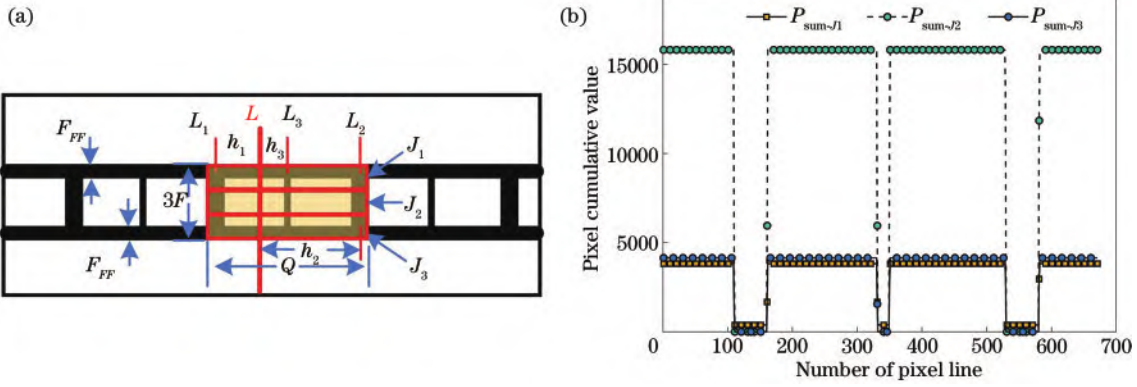


图6 精码区示意图。(a)精码区信息示意图;(b)扫描区像素变化

Fig. 6 Schematic diagram of precision code area. (a) Schematic diagram of precision code area information; (b) pixel changes in the scanning area

污染会导致精码区的像素发生变化,当污染处的像素分布与精码道类似时,将影响 h_1 、 h_2 和 h_3 的计算结果,从而影响细分计算结果导致误码。

在对精码区进行污染检测和误码校正时,首先定位横向长度为 Q 、径向长度为 $3F$ 的扫描区,将扫描区按径向分为等长的三部分 J_1 、 J_2 、 J_3 ,则每个部分的横向长度为 Q ,径向长度为 F 。分别计算 J_1 、 J_2 、 J_3 内相同横坐标下,径向像素的累加值,由横向长度内所有径向像素的累加值分别构成集合 $P_{\text{sum}-J_1}$ 、 $P_{\text{sum}-J_2}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 。其中, $P_{\text{sum}-J_1}$ 、 $P_{\text{sum}-J_2}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的变化如图6(b)所示。其中, $P_{\text{sum}-J_1}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的最大值与 F_{FF} 的选取有关, F_{FF} 越大, J_1 和 J_3 含有的黑色像素越多,那么 $P_{\text{sum}-J_1}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的值越小,反之则 $P_{\text{sum}-J_1}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的值越大。另外,因为 J_2 中的白色像素较多,所以 $P_{\text{sum}-J_2}$ 的值较大。为便于展示,令 $P_{\text{sum}-J_2} = P_{\text{sum}-J_1}/z'$,根据本文设计的码盘尺寸, $z' = 2$ 。

可以看出:当基准线位于空白区时, $P_{\text{sum}-J_1}$ 、 $P_{\text{sum}-J_2}$ 、 $P_{\text{sum}-J_3}$ 三者数值最大;当基准线位于精码道时, $P_{\text{sum}-J_1}$ 、 $P_{\text{sum}-J_2}$ 、 $P_{\text{sum}-J_3}$ 三者数值最小。由于码道的对称性, $P_{\text{sum}-J_1}$ 和 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的变化趋势基本相同,且在整个圆周期内呈周期性变化。

设定阈值 $T_{h,13}$ 、 $T_{h,2}$ 用以区分空白区和精码道:当 $P_{\text{sum}-J_1} > T_{h,13}$ 、 $P_{\text{sum}-J_3} > T_{h,13}$,且 $P_{\text{sum}-J_2} > T_{h,2}$ 时,基准线位于空白区;当 $P_{\text{sum}-J_1} < T_{h,13}$ 、 $P_{\text{sum}-J_3} < T_{h,13}$,且 $P_{\text{sum}-J_2} < T_{h,2}$ 时,基准线位于精码区;其他变化情况视为存在污染。同理, $T_{h,13}$ 、 $T_{h,2}$ 可通过OTSU阈值分割法计算得到,那么 $T_{h,13} = P_{\text{sum}-J_1}(\text{max}) \cdot O_{OS}$, $T_{h,2} = P_{\text{sum}-J_2}(\text{max}) \cdot O_{OS}$ 。

为了在码盘精码区受到污染时依然能够正确译码,本文提出了基于区域像素扫描的误码校正方法,通过扫描区的像素变化,可以检测、定位污染位置,并对污染产生的误码进行校正。精码区误码校正步骤分为3步。

1) 当检测到存在污染但不影响 h_1 、 h_2 和 h_3 的计算结果时,直接输出角位置信息,无须校正。

2) 当空白非精码道区域受到污染时,由于污染区像素分布与精码道相似,程序将在扫描区内检测到4条精码道,计算精码道之间的相对距离并与设计好的固定值相对比,可以定位并排除污染造成的精码道。之后重新选择精码道按式(2)进行细分计算即可消除污染影响,正确细分计算。

3) 当任一精码道受到污染时,检测扫描区内的3条精码道,当某一精码道宽度与设计好的固定值不同时,则该精码道受污染影响。设该精码道为 L_x :若 L_x 与 L 的距离大于 $Q/2$,则受污染的是距离 L 最远的精码道,该受污染精码道不参与细分,因此无须校正;若 L_x 与 L 的距离小于或等于 $Q/2$,则是与 L 相邻的精码道受污染,将影响 h_1 、 h_2 或 h_3 的计算结果,此时需根据 L_x 、 L 的位置推导 h_1 、 h_2 或 h_3 的正确值,并代入式(2)获得校正公式为

$$\theta = \begin{cases} \left(1 - \frac{h_3}{h_2 - h_3}\right) \times 2^{n-1}, & L_x = L_1 \\ \frac{h_1}{h_1 - h_3} \times 2^{n-1}, & L_x = L_2 \\ \frac{h_1}{h_1 + h_2} \times 2^n, & L_x = L_3 \end{cases} \quad (3)$$

当 $L_x = L_1$,说明 h_1 计算出错,此时 L 位于 L_3 左边, $h_1 = h_2 - 2h_3$;当 $L_x = L_2$,说明 h_2 计算出错,此时 L 位于 L_3 右边, $h_2 = h_1 - 2h_3$;当 $L_x = L_3$,说明 h_3 计算出错,此时根据 L 在整个扫描区的相对位置可得 $\theta = h_1 / (h_1 + h_2) \times 2^n$ 。

同理,在精码区设定最大误差值 $E_{13} = 5\% P_{\text{sum}-J_1}$ 和 $E_2 = 5\% P_{\text{sum}-J_2}$,用于检测精码区内的微小污染。当 $P_{\text{sum}-J_1}$ 或 $P_{\text{sum}-J_3}$ 的像素波动大于 E_{13} 时,或当 $P_{\text{sum}-J_2}$ 像素波动大于 E_2 时提示存在微小污染。

精码区误码校正算法流程如图7所示。

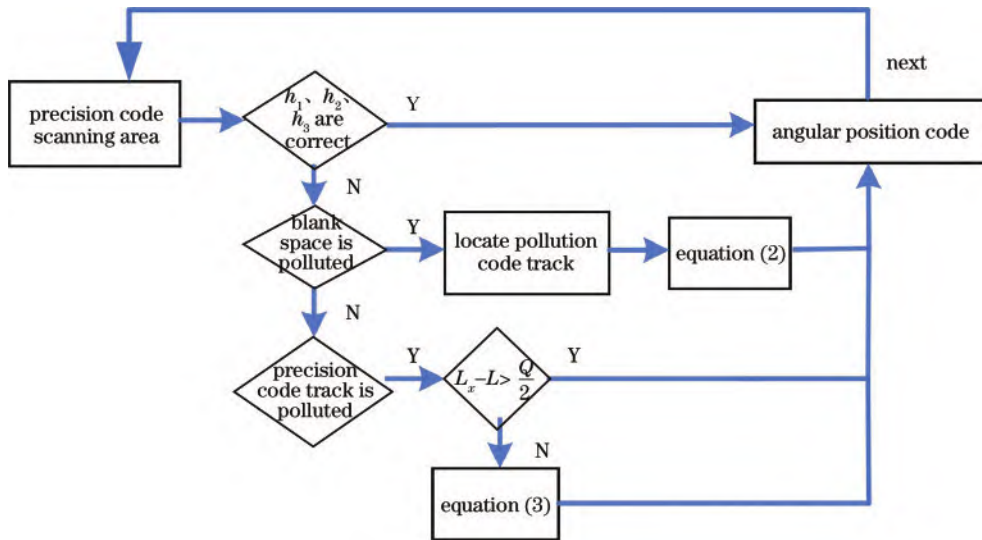


图7 精码区误码校正流程

Fig. 7 Flowchart for error code correction in precision code area

4 实验验证

为了验证所提出的污染检测和误码校正方法的有效性,设计了图像式角位移测量的实验系统,该系统可以实现7位粗码、5位精码的角位移测量。实验使用的

污染检测及误码校正系统如图8所示,该系统主要由OV5640 CMOS图像传感器、STM32F767核心芯片和液晶显示器(LCD)组成。OV5640 CMOS图像传感器获取码盘图像,图像处理电路将码盘图像译码后将结果显示在LCD中。

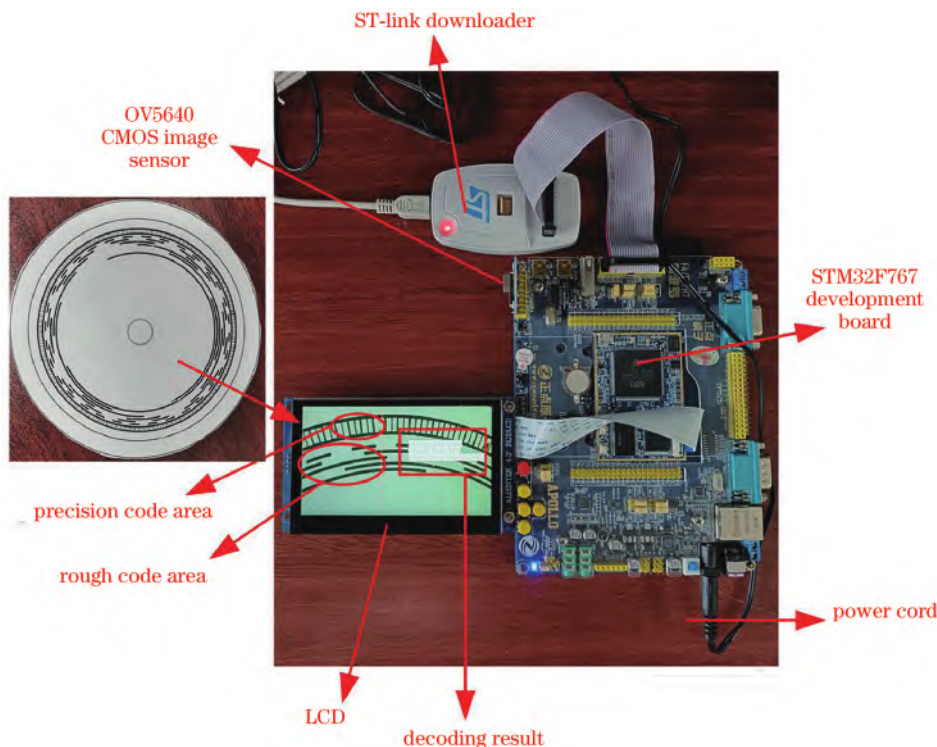


图8 误码检测和校正系统实拍图

Fig. 8 Real shot of error code detection and correction system

在实验中,为了分析码盘像素的变化情况,在进行译码的同时,提取该角位置处的码盘图像,观测受污染时粗码区与精码区的像素分布。将所提算法进行硬件移植,分别检测当粗码区、精码区受污染时,其译码情况

及像素分布情况,并在LCD上显示校正后的译码结果。

在粗码区污染检测和误码校正实验中,其校正结果及像素分布情况如图9所示。程序执行过程中,当码盘图像如图9(a)所示时, L 处像素分布如图9(b)所

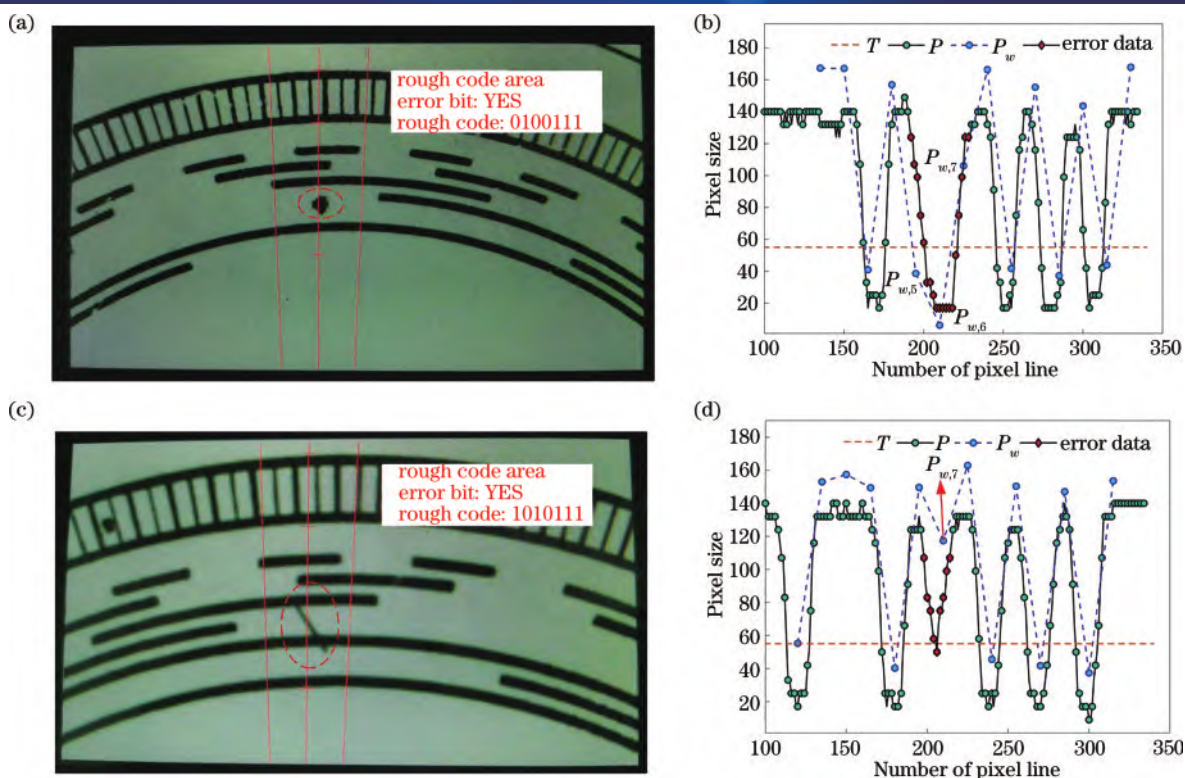


图9 粗码区污染实验。(a)黑色污染及(b)对应的像素变化;(c)黑色划痕污染及(d)对应的像素变化

Fig. 9 Experiment of contaminations in rough code area. (a) Black contamination and (b) corresponding pixel change; (c) black scratches contamination and (d) corresponding pixel change

示,此时进行OTSU计算得 $O_{OS}=0.35$,由像素变化得 P_w 的范围为 $0\sim 167$,则 $T=58, E=8$ 。从图9(a)、(b)中可以看出:污染使得 $P_{w,5}$ 降至38,小于 T ; $P_{w,6}$ 降至6,小于 T, C_3 译码出错。且 $P_{w,5}, P_{w,6}$ 幅值变化超过 E ,因此存在污染且需要校正。校正前粗码译码结果为0100111,译码正确。

当码盘受污染图像如图9(c)所示时,同理,计算得 $O_{OS}=0.34$ 。此时 L 处像素变化如图9(d)所示,可得 P_w 的范围为 $0\sim 162$,则 $T=55, E=8$ 。从图9(c)、(d)中可以看出,污染使得 $P_{w,7}$ 降至117,像素波动大于 E ,因此检测存在污染但无须校正。

在精码区污染检测和误码校正实验中,其校正结果及像素分布情况如图10所示。程序执行过程中,对如图10(a)所示的码盘污染图像进行OTSU计算,得 $O_{OS}=0.34$,由像素分布[图10(b)]得此时的 P_{sum-J_1}, P_{sum-J_2} 的范围分别为 $0\sim 1657, 0\sim 3224$,那么 $T_{h,13}=563, T_{h,2}=1096, E_{13}=83, E_2=161$ 。从图10(a)、(b)中可以看出,污染导致空白区出现新的精码道,扫描区内存在4条精码道,因此计算精码道之间的相对距离并与固定值进行对比,排除污染造成的精码道后,根据式(3)进行校正计算。

当码盘受污染图像如图10(c)所示时,同理,计算得 $O_{OS}=0.30$,由像素分布[图10(d)]得 P_{sum-J_1}, P_{sum-J_2} 的范围分别为 $0\sim 1340, 0\sim 3390$,那么 $T_{h,13}=402, T_{h,2}=1017, E_{13}=67, E_2=169$ 。从图10(c)、(d)中可以看出,

污染导致 P_{sum-J_1} 的低像素值增加,不满足精码区判定条件,存在污染且主要位于 J_1 部分。此时 F_x 与 L 的距离小于 $Q/2$,且 $F_x=F_p, h_3$ 计算出错,影响细分计算,需根据式(3)进行校正计算。

当码盘受污染图像如图10(e)所示时,同理,计算得 $O_{OS}=0.32$,由像素分布[图10(f)]得 P_{sum-J_1}, P_{sum-J_2} 的范围分别为 $0\sim 1507, 0\sim 3268$,那么 $T_{h,13}=482, T_{h,2}=1046, E_{13}=75, E_2=163$ 。从图10(e)、(f)中可以看出,污染导致 P_{sum-J_2} 降至1880左右,像素波动幅度多次大于 E_2 ,此时 P_{sum-J_1} 和 P_{sum-J_3} 正常。因此存在污染但不影响定位精码道,此时没有误码,无须校正。

当码盘受污染图像如图10(g)所示时,同理,计算得 $O_{OS}=0.35$,由像素分布[图10(h)]得 P_{sum-J_1}, P_{sum-J_2} 的范围分别为 $0\sim 1432, 0\sim 3463$,那么 $T_{h,13}=501, T_{h,2}=1212, E_{13}=72, E_2=173$ 。从图10(g)、(h)中可以看出,污染导致 P_{sum-J_2} 降至3259附近,像素值波动幅度多次大于 E_2 ,此时 P_{sum-J_1} 和 P_{sum-J_3} 正常。因此存在污染但不影响定位精码道,此时没有误码,无须校正。

从污染图像、译码结果和像素变化曲线可以看出,本文提出的方法可对粗码道、精码道中存在的不同污染进行检测并对其引起的误码进行实时校正。表1对本文所提方法与现有技术进行了比较。

目前对图像式角位移测量进行污染检测和误码校正的方法主要有两种:一是为编码器设计多个输出模

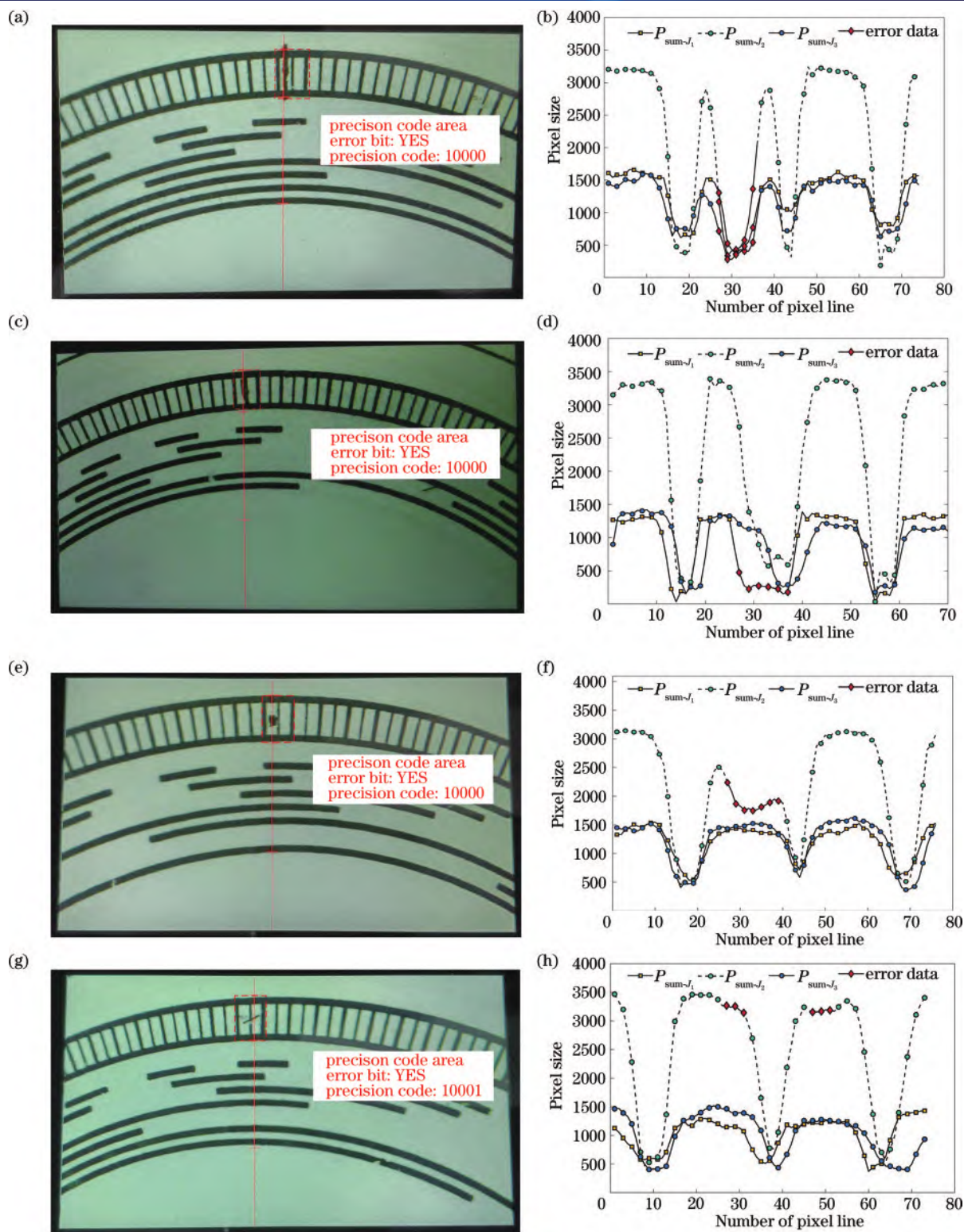


图 10 精码区污染实验。(a)空白区黑色覆盖污染及(b)对应的像素变化;(c)精码道黑色覆盖污染及(d)对应的像素变化;(e)黑色污染及(f)对应的像素变化;(g)黑色划痕污染及(h)对应的像素变化

Fig. 10 Experiment of contaminations in precision code area. (a) Black cover contamination in blank space and (b) corresponding pixel change; (c) black cover contamination in precision code track and (d) corresponding pixel change; (e) black contamination and (f) corresponding pixel change; (g) black scratches contamination and (h) corresponding pixel change

式,在对译码结果进行分析时检测到污染后,切换输出模式以规避污染码道,降低分辨率的同时避免了误码产生;二是计算多个码道之间的差值,根据码道变化规律来检测污染并对误码进行校正。本文提出 DCAF

法和区域像素扫描法,当码盘的粗码道、精码道受污染并导致误码时能够对污染进行检测,同时对其所产生的误码进行实时校正,本文的研究对提高角位移测量装置的可靠性和准确性具有重要意义。

表1 所提方法与现有方法对比

Table 1 Comparison of proposed method and existing methods

Method	Objective	Signal acquisition method	Error detection	Error correction	Limitation
Method in Ref. [15]	Increase reliability and flexibility of absolute encoder	Two optical encoder modules	Track the read bits	Multiple-mode operation	Complex algorithm, the need for initial movement
Method in Ref. [16]	Development of high-precision encoder	A surface CMOS sensor	Subtraction of code values	Subtraction of code values	No error correction for precision code area
Proposed method	Detection and correction of encoder error code in real time	A surface CMOS sensor	Radial lines and region pixel detection	Calculation and correction based on different kinds of pollution	Simple experimental prototype needs to be further developed

5 结 论

本文提出一种图像式角位移测量污染检测和误码实时校正方法;提出 DCAF 法和区域像素扫描法分别对粗码、精码区内的污染进行检测,并对其产生的误码进行实时校正;搭建角位移测量系统进行实验验证。结果表明,所提出的污染检测和误码实时校正方法在 7 位粗码、5 位精码的角位移测量系统上,能够实现对粗、精码道上污染的检测,并对其产生的误码进行实时校正。研究对提高角位移测量的可靠性和准确性具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Lin W Y, Huang C W. Absolute rotary encoder system based on optical sensor for angular measurement[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(8): 8355-8373.

[2] 左洋, 龙科慧, 周磊, 等. 航天级双读数多圈绝对式光电编码器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 022801.

Zuo Y, Long K H, Zhou L, et al. Design for spaceborne multi-turn photoelectric encoder of dual numerical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 022801.

[3] Yang X, Mai J T, Zhang Y, et al. High accuracy image-based rotary encoder with polar transformation of DIG[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 27087-27095.

[4] 余毅, 刘震宇, 孙志远, 等. 靶场光电测量设备发展现状 & 展望[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0600002.

Yu Y, Liu Z Y, Sun Z Y, et al. Development status and prospect of photoelectric measurement equipment in range [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0600002.

[5] Zhang Q, He Z H, Xie Z W, et al. Diffractive optical elements 75 years on: from micro-optics to metasurfaces [J]. Photonics Insights, 2023, 2(4): R09.

[6] 袁伟, 朱煜, 张鸣, 等. 二维计量型平面光栅的设计[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1905001.

Yuan W, Zhu Y, Zhang M, et al. Design of two-dimensional metrological planar grating[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 1905001.

[7] 郭程祥, 张钦泉, 吉佳瑞, 等. 液晶显示中莫尔条纹仿真模拟[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 2012004.

Guo C X, Zhang Q Q, Ji J R, et al. Moire fringes simulation in liquid crystal display[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 2012004.

[8] 贾兴丹, 万秋华, 于海, 等. 图像式角位移测量技术研究进展 & 展望[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 650-657.

Jia X D, Wan Q H, Yu H, et al. The progress and prospect of angular displacement measurement technology [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 650-657.

[9] 汪雨冰, 王睿, 于永江, 等. 小型高分辨率金属码盘光电编码器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180401.

Wang Y B, Wang R, Yu Y J, et al. Small metal code disk based photoelectric encoder with high resolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180401.

[10] Jiang J Q, Dai J H, Yang S, et al. A 22-bit image encoder with optoelectronic integrated chip[J]. Optics Communications, 2022, 512: 128022.

[11] 任曦, 杜升平, 陈科, 等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171205.

Ren X, Du S P, Chen K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement of circular grating encoder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171205.

[12] Cai N, Xie W, Peng H X, et al. A novel error compensation method for an absolute optical encoder based on empirical mode decomposition[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 81-88.

[13] Cheng F, Zhou D F, Yu Q, et al. A new image grating sensor for linear displacement measurement and its error analysis[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4361.

[14] Renishaw. RESOLUTE™ absolute optical encoder system[EB/OL]. (2023-06) [2024-03-17]. <https://www.renishaw.com.cn/zh/resolute-absolute-encoder-downloads--37856>.

[15] Miljkovic G S, Denic D B. Redundant and flexible pseudorandom optical rotary encoder[J]. Elektronika Ir Elektrotehnika, 2020, 26(6): 10-16.

[16] 齐荔荔. 小型高分辨率力图像式光电编码器原理研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.

Qi L L. The principle research on small optical pattern rotary encoder with high resolution[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and

- Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [17] Feng Z P, Gao A R, Li K Q, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via rotary encoder signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107325.
- [18] Shokry B, Daoud R M, Amer H H. Fault-tolerant rotary gray encoder for industrial applications[C]//2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), June 6-10, 2023, Budva, Montenegro. New York: IEEE Press, 2023.
- [19] Ning Z, Cai N, Zhao J B, et al. Error compensation for optical encoder based on variational mode decomposition with a coarse-to-fine selection scheme[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1001510.
- [20] 董静, 万秋华, 赵长海, 等. 光电编码器故障诊断技术研究现状与展望[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 755-767.
Dong J, Wan Q H, Zhao C H, et al. Current situation and prospect of fault diagnosis for photoelectric encoder [J]. Chinese Optics, 2015, 8(5): 755-767.
- [21] Zhang D D, Zhao S J, Zheng Q S, et al. Absolute capacitive grating displacement measuring system with both high-precision and long-range[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 11-22.
- [22] 王迈. 编码器在工厂的使用及常见故障处理[J]. 南方金属, 2020(1): 51-54.
- Wang M. Application of encoders and trouble shooting of common faults[J]. Southern Metals, 2020(1): 51-54.
- [23] 王雷飞, 童立信, 薛一刚, 等. 光栅尺和编码器检测在数控设备维护中的应用研究[J]. 设备管理与维修, 2023 (23): 80-82.
- Wang L F, Tong L X, Xue Y G, et al. Research on the application of grating ruler and encoder detection in the maintenance of CNC equipment[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(23): 80-82.
- [24] 蔡新良, 陈志敏. 医疗设备光电编码器故障维修三例 [J]. 医疗装备, 2023, 36(19): 93-94.
Cai X L, Chen Z M. Three cases of fault maintenance of photoelectric encoder of medical equipment[J]. Medical Equipment, 2023, 36(19): 93-94.
- [25] 全国统计专业技术资格考试用书编写组. 统计业务知识 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Statistical Professional and Technical Qualification Examination Book Writing Group. Knowledge of statistical operations[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [26] 贾兴丹. 亚像素级角位移细分及误差补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
Jia X D. Research on sub-pixel level angle displacement subdivision and error compensation method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.