

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210576

# 基于相位拟合的绝对式光电精密测角方法\*

张寅<sup>1,2</sup>, 顾恩臣<sup>1,2</sup>, 闫钧华<sup>1,2</sup>, 谢巍<sup>3</sup>, 邹弘扬<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室 南京 211106; 2. 南京航空航天大学航天学院 南京 211106; 3. 北京博新精仪科技发展有限公司 北京 102200)

**摘要:**单码道绝对式轴角编码器具有分辨力高、结构简单、可靠性强等优点。为实现角度高精度快速识别和细分测量,提出一种基于相位拟合的绝对式编码器角度细分方法。该方法利用最长线性反馈移位寄存器序列(m序列)进行单码道绝对式编码,首先对 CCD 采样电平信号进行计数,判断码值组合后得到粗码译码数据;接着利用牛顿迭代法实现三角函数拟合从而获取相位信息,并提出基于相位信息的角度细分算法获得细分角度;最后结合粗码数据与细分角度得到角度信息。实验结果表明,提出的新型测角方法测角标准偏差达到 4.57",最小分度误差仅为 0.23",该方法大大提高了分辨力和精度,并且从原理上避免了码盘粗大误差对测角的影响。

**关键词:**精密测角;曲线拟合;编码设计;光电编码器;线阵 CCD

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Absolute photoelectric precision angle measurement method based on phase fitting

Zhang Yin<sup>1,2</sup>, Gu Enchen<sup>1,2</sup>, Yan Junhua<sup>1,2</sup>, Xie Wei<sup>3</sup>, Zou Hongyang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. China BPIC Surveying Instruments AG, Beijing 102200, China)

**Abstract:** The single-channel absolute shaft encoder has advantages of high resolution, simple structure and strong reliability. To achieve high-precision and rapid angle identification and subdivision, this article proposes a phase-fitting-based absolute encoder angle subdivision method, which uses m-sequences to perform single-channel absolute encoding. First, the CCD sampling level signal is counted, and the combination of code values is judged to obtain the coarse code decoding data. Then, the Newton iteration method is used to implement trigonometric function fitting to obtain phase information, and a phase-based angle subdivision algorithm is proposed to obtain the subdivision angle. Finally, the angle information is obtained by combining the coarse code data and the subdivision angle. Experimental results show that the angle measurement standard deviation of the new proposed angle measurement method reaches 4.57", and the minimum graduation error is only 0.23". This method greatly improves the resolution and accuracy, and avoids the influence of the coarse error of the code disc on the angle measurement in principle.

**Keywords:** precision angle measurement; curve fitting; code design; photoelectric encoder; linear CCD

## 0 引言

光电轴角编码器,又称光电角位移传感器,是集光学技术、机械技术和电子信息技术于一体的精密测角装置。将刻划了角度信息的圆光栅作为检测元件,通过光电传

感器采集透过圆光栅的光强信息,利用译码算法和角度细分算法进行高精度角度的识别输出。光电轴角编码器具有结构简单、分辨力高、可靠性强、抗干扰能力强等优点,被广泛应用于航空航天、船舶航海、精密测绘、机器人、数控机床等领域<sup>[1-4]</sup>。

收稿日期:2022-10-16 Received Date: 2022-10-16

\* 基金项目:中央高校基本科研业务费项目(NJ2022025)资助

现有的光电轴角编码器可以分为增量式和绝对式。增量式编码器通过在码盘上刻划相同间隔和宽度的光栅进行测角,其结构简单、成本低、响应速度快,但由于测量时需要莫尔条纹进行计数,因此测量结果存在累积误差,并且掉电后测角信息就会丢失。增量式编码器的测量精度与其码盘的光栅密度也有很大关系。绝对式编码器通过组合不同宽度的条码测量绝对角度,每个位置有对应的独立角度信息,因此绝对式编码器在上电后可以直接测量角度,无需归零操作,不存在累积误差<sup>[2]</sup>。因此,绝对式编码器更适合精密角度测量。

在获得更高分辨力的角度信息过程中,角度细分算法起到关键性的作用,相关研究主要开始于图像传感器在光电轴角编码器中的应用。20世纪90年代,国内外先后开始了图像式光电轴角编码器的研究。2000年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)研制出刻划有基准线和二进制码元的码盘,采用电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)图像探测器接受码盘的图案<sup>[5-6]</sup>。2008年,日本Hamamatsu公司设计了基于面阵探测器的二进制绝对式编码盘<sup>[7]</sup>。2015年,韩国Standards and Science研究所提出了一种使用移相编码码盘的绝对式角度测量方法<sup>[8]</sup>。2002年,苏海冰等<sup>[9]</sup>设计了一种分码区的单码道绝对式编码器编码方法,但其精度只能达到52.6"。2011年,梁立涛等<sup>[10]</sup>在利用区标记分区编码的基础上设计了一种分级编码方法,将精度提高到了2"。2012年,王媛媛<sup>[11]</sup>将单圈格雷码应用于码盘编码,在现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的信号处理和采集系统下分辨率为5.27"。将图像处理技术应用于光电轴角编码器是提高小尺寸码盘测角精度的有效方法,但目前国内外研究成果较少,且缺乏对角度细分算法的详细理论分析。

本文提出了一种基于相位拟合的绝对式光电轴角细分方法。在伪随机序列的原理基础上设计了一种绝对编码方法并实现译码;通过对图像传感器采集到的光强信号进行线性回归分析,提取拟合曲线的相位信息用于表征条码的绝对位置信息,从而实现绝对式光电轴角编码器的角度细分。

## 1 单圈绝对式光电轴角编码原理

为了提高测角的分辨力和精度,需要增加绝对式编码器的编码位数。传统的绝对式编码方法一般通过在码盘上增加码道数和条码数来提高编码位数,不可避免地造成了码盘的尺寸过大、译码复杂等问题,并且导致码盘透光率不足,影响角度的细分精度。因此,在减小光电轴

角编码器尺寸的同时提高测角的分辨力和精度是目前的研究重点。

本文采用了单码道绝对式编码方法,利用两种宽度的条码表示二进制编码中的“0”和“1”;利用伪随机序列中最长线性反馈移位寄存器序列(m序列)的生成原理进行单码道绝对式码盘编码<sup>[12]</sup>。

m序列是通过带线性反馈的移位寄存器产生最大长度的随机序列。如图1所示,一个n级的二进制移位寄存器,能够产生 $2^n$ 种不同状态,去除全0状态,还剩下 $2^n-1$ 种状态,因此,其能产生最大周期长度为 $2^n-1$ 位的码序列,其生成多项式为:

$$X_i = k_1 X_{i-1} + k_2 X_{i-2} + \dots + k_{n-1} X_{i-n+1} + k_n X_{i-n} \quad (1)$$

式中: $X_i$ 为第*i*位编码值(0或1); $k$ 为移位寄存器系数(0或1), $k_n$ 取值为1。

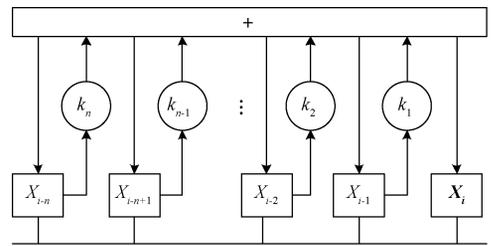


图1 m序列编码原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of m-sequence coding principle

本文在码盘上进行刻蚀的条码宽度不同,但其中心线的间隔相等。为了使每个条码在码盘上所占角度为整数,便于后续角度计算,本文确定码盘编码的位数为1 080 bit,每个条码所占角度为1 200"。利用m序列实现1 080 bit单码道绝对式编码的前提是生成周期长度大于1 080 bit的m序列,因此,移位寄存器的级数至少要达到11级。

考虑到本文使用的图像式传感器有效像素数为1 800个,一次采集的有效条码数约为30条,其中受噪声干扰较小的条码为靠近传感器中心位置处的18~20个条码。因此,本文确定了编码位数为18位的1 080 bit单码道绝对式编码形式,移位寄存器的级数应为18级。

一个线性反馈移位寄存器能够生成m序列的充要条件是线性反馈移位寄存器的特征多项式为本原多项式。18级线性反馈移位寄存器序列的本原特征多项式为:

$$X_i = X_{i-7} + X_{i-18} \quad (2)$$

在生成一串1 080 bit的m序列后,需将其首尾相连形成一圈绝对式编码,在首尾相连处会生成17组新的编码,这17组编码为1 080 bit序列的开头和结尾位置处序列组合而成。要满足码盘编码的绝对特性,需要使新生成的17组编码在整圈编码中不存在重复,这通过选择特殊的初始序列实现。经绝对性验证后确定了以式(3)作

为初始序列生成的  $m$  序列在首尾相连后满足码盘的绝对性要求。

$$X = 1 + x^9 + x^{10} + x^{12} + x^{13} + x^{14} + x^{15} + x^{16} + x^{17} \quad (3)$$

式(3)表示生成 1 080 bit 序列时的开头 18 位码值,又称为码多项式,其  $x$  仅为码元位置的标记,并不关心  $x$  的具体取值。例如,式(3)表示的序列为“100000000110111111”。

将式(3)所示初始序列的各码元值作为各移位寄存器状态代入式(2)即可生成下一位码值。

最终生成的 1 080 bit 编码如表 1 所示。

表 1 1 080 bit 码盘编码  
Table 1 Code of 1 080-bit code disc

序号	编码
第 1~36 bit	1000000001101111110101001100001010
第 37~72 bit	00001000011110011110100011100000101
第 73~108 bit	010110111101011111001100001001010011
第 109~144 bit	11110101011111011100001100001011100
第 145~180 bit	100010110011100011001011101001111000
第 181~216 bit	110000110011011001100100111111000110
第 217~252 bit	101011100001111110011100011111111110
第 253~288 bit	111010100110111001101000000100110011
第 289~324 bit	000111101100000010001010000111101000
第 325~360 bit	11000111111100100111100001010001000
第 361~396 bit	010110011101010110001011011111001100
第 397~432 bit	101110111000110101010010100011010000
第 433~468 bit	011101100110001111000001000011111111
第 469~504 bit	010111101001101110110111011000001011
第 505~540 bit	101110111101010100101000010111110010
第 541~576 bit	111101000010101111111100100000110111
第 577~612 bit	000000111101111111010110111011100001
第 613~648 bit	100000101110010000111101101111001000
第 649~684 bit	010111011100101100111000101011111101
第 685~720 bit	110101010100110100111011010001011110
第 721~756 bit	000010010000010101100111110101111100
第 757~792 bit	011011101101110010011100010111001011
第 793~828 bit	011110110111100110000100111000000100
第 829~864 bit	011001101011001111000110100001110000
第 865~900 bit	000100100010101100100100100000110101
第 901~936 bit	011110010001011111000011101010100110
第 937~972 bit	0100110001001001111101111101100011011
第 973~1 008 bit	101110011001010100101000101101000000
第 1 009~1 044 bit	110010111011001000011101110111100100
第 1 045~1 080 bit	001001100001000000001110010000000000

根据上述编码制成的码盘实物如图 2 所示。可以看出部分条码的码值为 00001101001010100001101001010。

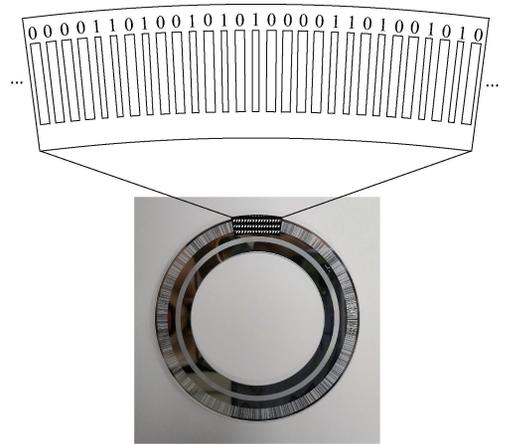


图 2 码盘整体和局部示意图

Fig. 2 Overall and partial diagram of the code disc

## 2 译码和角度细分算法

### 2.1 译码

为实现对码盘编码图案的识别,本文采用线阵 CCD 作为图像传感器对码盘图像数据进行采集,并利用译码算法对图像数据进行译码识别。实验使用的线阵 CCD 型号为东芝 1256。

条码刻划区域为不透光区域,无条码刻划区域为透光区域,编码信息呈现在光强信号低处。为便于后续角度细分算法的处理,对 CCD 数据进行翻转处理:

$$Value_f = 250 - Value_{true} \quad (4)$$

翻转后的部分灰度值数据如图 3~5 所示。图 3 为将一维 CCD 数据沿像素分布方向的垂直方向拓展后生成的条码仿真图像,图 4 为各像素的灰度值,图 5 为灰度分布直方图。可以看出,条码刻划处的灰度值大约分布在 160~180,无条码刻划处的灰度值大约分布在 80~120;宽条码约为 25 pixel,窄条码约为 9 pixel。



图 3 条码仿真图案

Fig. 3 Barcode simulation pattern

设置亮度阈值为 150,提取亮度幅值大于 150 pixel 灰度值信息;再设置宽度阈值为 3 000,辨别宽窄条码对应码值(宽条纹为“0”,窄条纹为“1”),生成对应的译码序列。如图 4 所示,序列为 111000110101010010(去除开

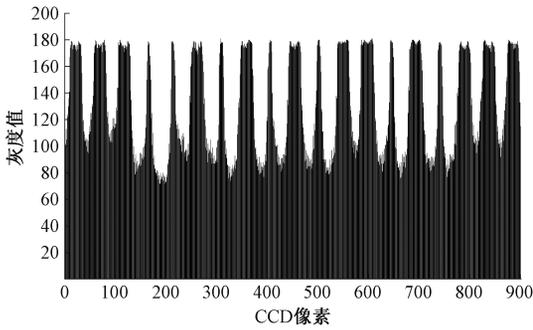


图4 条码像素灰度图

Fig. 4 Barcode pixel grayscale diagram

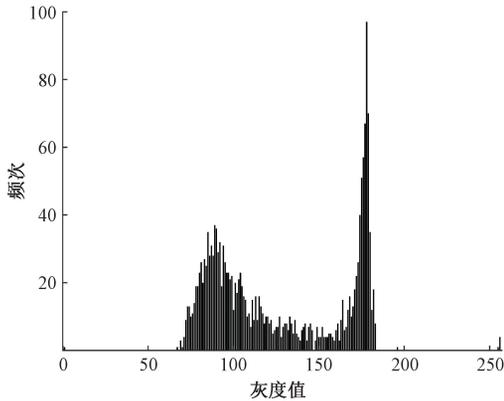


图5 条码灰度直方图

Fig. 5 Barcode grayscale histogram

头不完整条码),最后采用克努特-莫里斯-普拉特(Knuth-Morris-Pratt, KMP)算法对码值进行匹配,找到该译码值对应的粗值角度信息。

## 2.2 基于相位拟合的角度细分算法

现有的细分算法主要可以分为边缘细分算法和像点定位算法两种类型。其中,边缘细分算法通过使用边缘检测算子进行边缘的定位细分,再利用定位的边缘位置信息进行角度的细分运算。常用的边缘检测算子有 Rebert 算子、Sobel 算子、Canny 算子和二阶微分拉普拉斯算子等。像点定位算法通过利用如二值化法、重心法、灰度质心法、形心法、阶梯法、高斯拟合法和插值法等亚像素细分方法,计算条码图案的位置信息,从而实现角度细分<sup>[13-14]</sup>。

研究表明,在图像传感器对透过码盘的光强信号进行采集时,由于传感器到码盘之间存在一定距离,采集到的图像可以看作理想条码图像与点扩散函数卷积的结果,这会造成条码图像边缘模糊不清,并且由于条码之间间距很小,不同条码边缘会相互叠加而造成边缘偏移的现象<sup>[15]</sup>。因此在利用边缘检测法对条码位置进行检测时精度较差。另外,在码盘出现震动、尘污、磨损和老化时还会产生测角的粗大误差。

本文提出了一种基于相位拟合的绝对式光电精密测角方法,对数据整体进行三角函数拟合,通过对拟合得到的相位信息进行计算得到精确的细分角度,从根本上避免了测角粗大误差。

### 1) 曲线拟合

根据码盘刻划原理,码盘上的每个条码之间间隔相同,在与点扩散函数卷积后的图像与三角函数有很高的吻合度,因此可以用三角函数拟合 CCD 一维数据,如图6和式(5)所示。利用拟合三角函数的相位参数表示条码位置<sup>[16]</sup>,并通过数学计算得到细分角度。

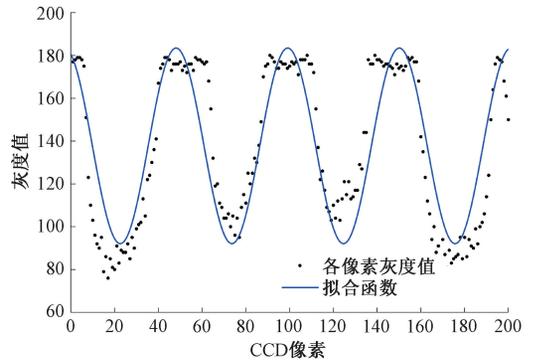


图6 拟合示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fitting

$$F(x) = A \sin(\omega x + \varphi) + n \quad (5)$$

式中: $A$ 为幅值; $\omega$ 为拟合角频率; $\varphi$ 为初始相位; $n$ 为直流分量以及噪声分量。其中初始相位 $\varphi$ 是计算角度的关键。

本文提出的角度细分算法利用最小二乘法进行三角函数拟合,并用牛顿迭代法解决了非线性方程组求解问题,在每次迭代后计算当前迭代解向量与前一次迭代解向量之间差向量的 L2 范数,并与拟合精度阈值 $\varepsilon$ 进行比较:

$$\| \mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k-1} \| \leq \varepsilon \quad (6)$$

式中: $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ ;  $\mathbf{x}^k$ 为当前解向量; $\mathbf{x}^{k-1}$ 为前一个解向量; $k$ 为迭代次数。

当 L2 范数 $\leq 1 \times 10^{-6}$ 时,认为近似解向量足够接近真实解,终止迭代。当 $\varepsilon$ 值设置过大时,近似解与真实解之间的误差较大,拟合优度明显下降,此时拟合结果无法用于细分角度计算;当 $\varepsilon$ 值设置过小时,迭代次数会大大增加,但拟合优度的提升不明显。

由于牛顿迭代法的局部收敛特性,在迭代过程中对于初始点的选择要求较高。当初始点的选择不在拟合需要的零点收敛范围内时,牛顿迭代法的迭代结果可能会转向其他零点,此时,三角函数的拟合结果与原始数据偏差较大,拟合优度较低。因此,在迭代结果符合 L2 范数

的拟合精度要求后,还需考察该迭代结果下的函数拟合优度,即确定系数 *R-square*。当 L2 范数小于  $\varepsilon$  且拟合优度大于 0.6 时,迭代结果才为有效的曲线拟合结果。部分拟合结果如图 7 所示。

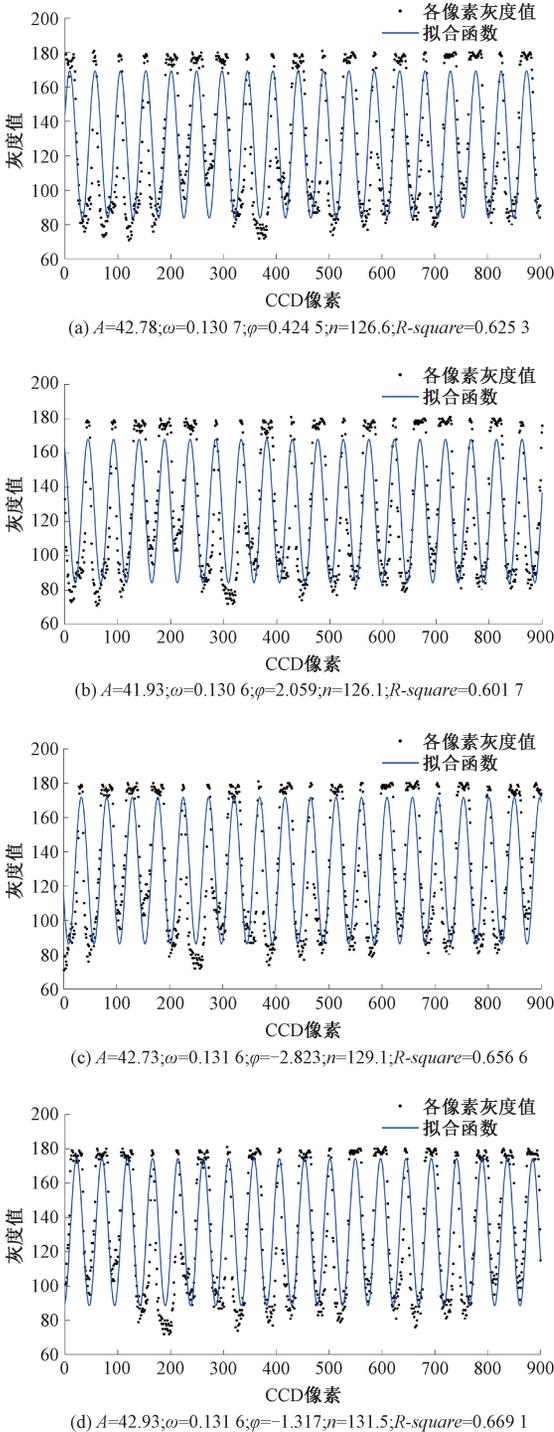


图 7 部分拟合结果  
Fig.7 Partial fitting results

在三角函数拟合时的拟合优度评价指标为确定系数 *R-square*,公式如下:

$$R - square = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  个点对应的原始数据;  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个点对应的拟合数据;  $\bar{y}$  为原始数据的均值。

本文提出的基于相位拟合的绝对式光电精密测角方法,其关键在于利用拟合函数的相位信息表现条码的位置信息。由于条码图像的中心点间隔相等,在对整体数据进行三角函数拟合时,其周期长度应与条码中心间隔长度高度吻合,拟合结果如图 7 所示。此时,三角函数的每个极大值点与每个条码的中心位置一一对应,拟合优度分布在 0.6~0.7,三角函数周期与条码间隔的误差在 0.005 pixel 内,该情况视为有效拟合。由于线阵 CCD 采集到的条码图像数据近似为理想方波信号与点扩散函数卷积后的结果,而非严格按照三角函数图像的趋势进行分布,因此在对条码图像数据进行拟合时,其有效拟合的拟合优度分布在 0.7 以下,但周期长度与条码间隔长度的吻合程度仍然较高。综上所述,当正弦函数拟合优度达到 0.6 以上时,拟合结果可以用作条码的精确位置计算。

2) 细分角度输出

最终输出的角度为粗值信息和细分角度信息求和的结果如下:

$$Angle = Angle_{rough} + Angle_{delicate} \quad (8)$$

其中,粗值信息  $Angle_{rough}$  的计算公式如下:

$$Angle_{rough} = \frac{1\ 296\ 000''}{1\ 080} \times (p_2 - p_1) \quad (9)$$

式中:  $p_1$  为第 1 次测量所得粗值信息;  $p_2$  为第 2 次测量所得粗值信息。

细分角度  $Angle_{delicate}$  计算公式如下:

$$Angle_{delicate} = \frac{1\ 296\ 000''}{1\ 080} \times \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \right) \quad (10)$$

式中:  $\varphi_1$  为第 1 次测量的拟合相位;  $\varphi_2$  为第 2 次测量的拟合相位。

联立式(8)~(10)后化简得:

$$Angle = 1\ 200 \times \left[ (p_2 - p_1) + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \right] \quad (11)$$

由于细分前的函数拟合是在整个 CCD 采集区域内进行的,因此该方法比传统算法中基于一个条码进行的细分精度更高,并且避免了粗大误差的影响。

实际上,在不同情况下,粗值信息与细分角度不能简单直接地进行求和运算。在进行粗值信息译码的过程中,CCD 像素采集数据的开头部分可能有不完整条码,如图 8 所示。在进行数据预处理的过程中需要删除数据开

头部分的不完整条码,这就导致了粗值信息与后续拟合数据之间不吻合的情况发生。因此在将两者结合时需要对该情况进行判别并对拟合相位进行一个周期的增减。



图8 不完整条码示意图

Fig. 8 Diagram of incomplete barcode

相位修正如图9所示,灰色矩形为条码图案,其中,拟合的初始相位值对应带虚线边框的条码,初始相位的拟合结果取值范围为 $[-\pi, \pi]$ 。以原点为 CCD 数据的边界,图9(a)为初始相位为0的情况,图9(b)~(f)为图9(a)右移或左移后的结果。当初始相位值在 $[-\pi, 0]$ 时,对应的条码为有效条码,初始相位值有效,如图9(a)~(c)所示;当初始相位值在 $[0, \pi]$ 时,对应的条码为 CCD 数据采集范围外的条码或需删除的条码,因此初始相位值有误,如图9(d)和(e)所示。其中,当拟合结果出现图9(f)所示情况时,虽然初始相位值在 $[0, \pi]$ ,但对应条码也为有效条码。

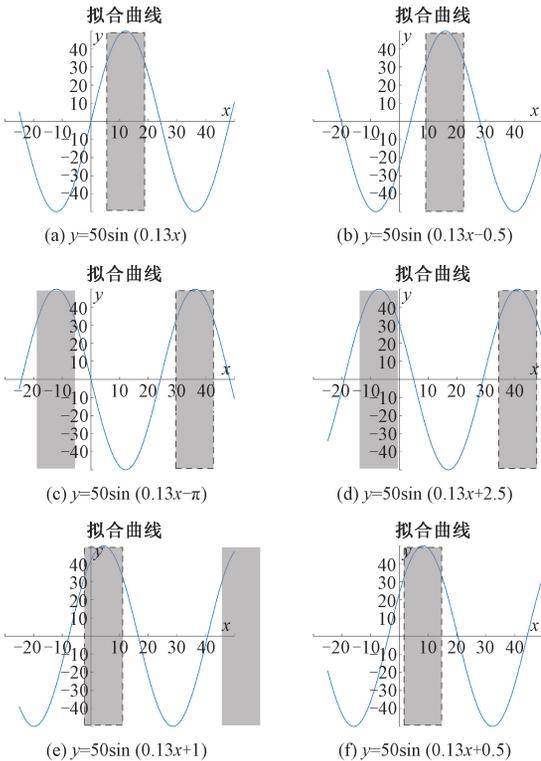


图9 相位修正示意图

Fig. 9 Diagram of phase correction

基于此,在利用拟合相位求取细分角度时,不仅需要判别初始相位的符号,还需对有效条码的位置情况进行

判别,判别方式如下:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{correct}} = \varphi, & \varphi \leq 0 \\ \varphi_{\text{correct}} = \varphi, & \varphi > 0 \text{ 且 } l < \frac{T}{3} \\ \varphi_{\text{correct}} = \varphi - 2\pi, & \varphi > 0 \text{ 且 } l \geq \frac{T}{3} \\ \varphi_{\text{correct}} = \varphi, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\varphi_{\text{correct}}$ 为修正后的初始相位; $l$ 为有效条码的起始像素值; $T$ 为一个拟合周期所占像素值。

$$T = \frac{2\pi}{(\omega_1 + \omega_2)/2} \quad (13)$$

式中: $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别是第1次测量和第2次测量后的拟合角频率。利用平均角频率进行计算可以减少随机误差对计算结果造成的影响。

### 3 实验结果

实验使用的码盘如图10所示,其为直径79 mm的18位单码道绝对式码盘,编码位数为1 080 bit,其中,条码“0”的刻划宽度为0.149 mm,条码“1”的刻划宽度为0.075 mm。该码盘的编码方法为上述基于m序列的绝对式码盘编码方法。

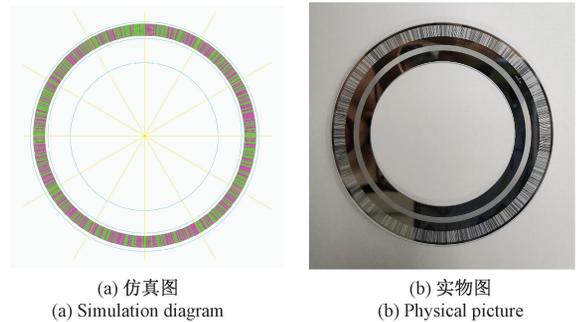


图10 单码道绝对式码盘

Fig. 10 Single-channel absolute code disc

实验使用东芝1254线阵CCD进行数据采集,使用MATLAB进行数学模型的调试及角度细分算法实现。精度检测仪器为23面体多齿分度台<sup>[4]</sup>,最大分度误差为0.2",测量结果如表2所示。根据国家计量检定规程JJG 100-2003中的多齿分度台检定方法对细分精度进行检测,计算细分数据分度误差、方向误差和标准偏差,如式(14)~(16)所示。

$$\psi_i = \alpha_i - \alpha_{ist} \quad (14)$$

$$\varphi_i = \psi_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (15)$$

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i^2}{n-1}} \quad (16)$$

表 2 精密测角结果

Table 2 Precision angle measurement results

标准角度	测量角度	分度误差
0°	0°0'0.64"	0.64"
15°39'7.8"	15°39'00.53"	-7.27"
31°18'15.7"	31°18'8.11"	-7.59"
46°57'23.5"	46°57'29.78"	6.28"
62°36'31.3"	62°36'35.18"	3.88"
78°15'39.1"	78°15'39.77"	0.67"
93°54'47.0"	93°54'46.73"	-0.27"
109°33'54.8"	109°33'48.39"	-6.41"
125°13'2.6"	125°13'08.91"	6.31"
140°52'10.4"	140°52'18.11"	7.71"
156°31'18.2"	156°31'19.96"	1.76"
172°10'26"	172°10'29.92"	3.92"
187°49'33.9"	187°49'40.70"	6.8"
203°28'41.7"	203°28'45.45"	3.75"
219°07'49.5"	219°7'49.73"	0.23"
234°46'57.3"	234°47'0.01"	2.71"
250°26'5.2"	250°26'04.86"	-0.34"
266°5'13"	266°5'08.11"	-4.89"
281°44'20.8"	281°44'19.02"	-1.78"
297°23'28.6"	297°23'35.99"	7.39"
313°02'36.5"	313°2'36.07"	-0.43"
328°41'44.3"	328°41'42.74"	-1.56"
344°20'52.2"	344°20'55.19"	2.99"

式中:  $\psi_i$  为第  $i$  组分度误差值;  $\alpha_i$  为第  $i$  组测量角度值;  $\alpha_{ist}$  为第  $i$  组标准角度值;  $\varphi_i$  为第  $i$  组方向误差;  $u$  为标准偏差值。

计算可得,测量数据的标准偏差为 4.57",最小分度误差为 0.23",最大分度误差为 7.71",根据国家计量检定规程 JJG 100-2003 可认定仪器的准确度等级为等级 III,本文提出的算法具有较高的分辨力和精度。

在实际使用情况中,码盘会由于震动、尘污、磨损以及设备的老化发生条码图案偏移甚至错误,本文提出的算法通过对整体采集数据进行拟合,从而确定最终的角度细分值,因此在出现上述粗大误差时具有很高的可靠性。

为验证本文设计的角度细分算法在精度和可靠性上的优势,将本文算法与传统的质心法<sup>[17]</sup>和抛物线拟合法进行了对比实验。在可靠性实验中,第 5、10 和 15 次测角时引入了条码图案出现偏移错误情况。实验结果如图 11 和 12 所示。

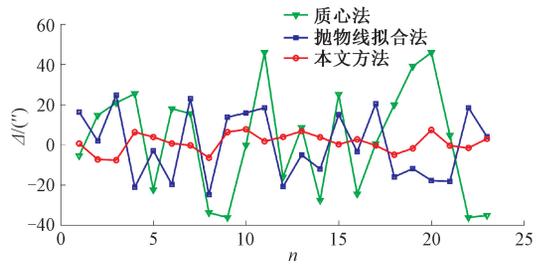


图 11 测角精度对比结果

Fig. 11 Comparison results of angle measurement accuracy

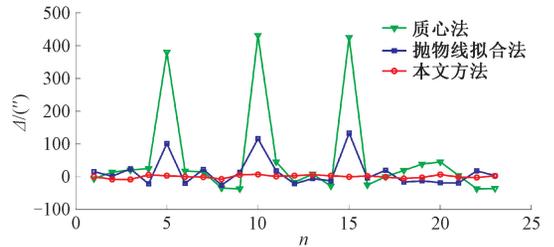


图 12 粗大误差对比实验

Fig. 12 Coarse error comparison experiment

实验结果表明,质心法测量角度的标准偏差为 26.77",抛物线拟合法测量角度的标准偏差 16.93",本文算法的标准偏差为 4.57"。在出现条码偏移和错误时,质心法和抛物线拟合法均出现了较大的测角误差,其中抛物线拟合算法中由于存在直线拟合的步骤,测角误差较质心法更小,而本文算法的测角数据几乎不受影响。

## 4 结 论

本文提出了一种基于相位拟合的绝对式光电精密测角方法。通过利用  $m$  序列的生成原理生成单码道绝对式编码并制成码盘,使用线阵 CCD 进行光电转换采集码盘图像,利用本文提出的角度细分算法进行高精度的角度输出,最后根据国家计量检定规程 JJG 100-2003 对该方法进行了准确度等级判定。本文提出的新型角度细分方法从整体上进行数据拟合,在输出高精度角度的同时增强了算法的可靠性,避免了测角粗大误差出现,对提高测角产品的准确度和可靠性的有着重要意义。

### 参考文献

[ 1 ] 汤天瑾,曹向群,林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005(1): 90-96.  
TANG T J, CAO X Q, LIN B. Analysis and prospect of the development of photoelectric shaft angle encoder[J]. Optical Instruments, 2005(1): 90-96.  
[ 2 ] 陈赞,张红胜. 光电轴角编码器的编码方式及其发

- 展趋势[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 126-133.
- CHEN Y, ZHANG H SH. Coding method and development trend of photoelectric shaft angle encoder [J]. China Optics and Applied Optics, 2009, 2(2): 126-133.
- [3] 张建辉, 陈震林, 张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动. 测试与诊断, 2021, 41(1): 1-12.
- ZHANG J H, CHEN ZH L, ZHANG F. Research progress on coding theory of absolute photoelectric encoder[J]. Vibration. Testing and Diagnosis, 2021, 41(1): 1-12.
- [4] 苏小刚, 胡晓东, 肖茂森, 等. 单圈绝对式光电轴编码器译码技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 199-204.
- SU X G, HU X D, XIAO M S, et al. Decoding technology of single-turn absolute photoelectric shaft encoder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 199-204.
- [5] LEVITON D B, FREY B. Ultra-high resolution, absolute position sensors for cryostatic applications [J]. NASA Goddard Space Flight Ctr. (United States), 2003, 4850:776-787.
- [6] LEVITON D B, GARZA M S, BILBRO J W, et al. Recent advances and applications of NASA's new ultrahigh-sensitivity absolute optical pattern recognition encoders [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000, 4091: 375-384.
- [7] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA H, et al. A 3.2 kHz, 14 Bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. Sensors Journal, IEEE, 2008, 8(8): 1430-1436.
- [8] KIM J A, KIM J W, KANG C S, et al. Absolute angle measurement using a phase-encoded binary graduated disk[J]. Measurement, 2016, 80:288-293.
- [9] 苏海冰, 刘恩海. 单圈绝对式编码器的研制[J]. 光学精密工程, 2002(1): 74-78.
- SU H B, LIU EN H. Development of single-turn absolute encoder[J]. Optical Precision Engineering, 2002(1): 74-78.
- [10] 梁立涛, 居耀成, 周荣华, 等. 高精度单码道绝对式编码器的编码和解码研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 25-27.
- LIANG L T, JU Y CH, ZHOU R H, et al. Research on encoding and decoding of high-precision single-channel absolute encoder[J]. Surveying and Mapping Science, 2011, 36(6): 25-27.
- [11] 王媛媛. 小型单圈绝对式光电编码器关键技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- WANG Y Y. Research on key technologies of small single-turn absolute photoelectric encoder [D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2012.
- [12] 罗世魁, 王国强, 王继新, 等. 伪随机码在绝对式光电轴角编码器中的应用[J]. 光学精密工程, 2003(6): 596-601.
- LUO SH K, WANG G Q, WANG J X, et al. Application of pseudo-random code in absolute photoelectric shaft encoder[J]. Optical Precision Engineering, 2003(6): 596-601.
- [13] 占伟伟, 卢海燕, 王秀, 等. 基于灰度加权重心法的线阵 CCD 亚像素细分定位实验研究[J]. 光学技术, 2018, 44(4): 476-479.
- ZHAN W W, LU H Y, WANG X, et al. Experimental research on sub-pixel subdivision positioning of linear CCD based on gray-scale weighted center of gravity method [J]. Optical Technology, 2018, 44(4): 476-479.
- [14] 付婷. 单码道绝对编码信号处理建模与仿真[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- FU T. Modeling and simulation of signal processing for single-channel absolute coding [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [15] JOSEPH E, PAVLIDIS T. Deblurring of bilevel waveforms[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1993, 2(2):223-235.
- [16] 李强, 杨德华, 费飞, 等. 基于最大长度序列的绝对位移精密检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(8): 32-35.
- LI Q, YANG D H, FEI F, et al. Precise detection

method of absolute displacement based on maximum length sequence [J]. *Computer Measurement and Control*, 2017, 25(8): 32-35.

- [17] 齐荔荔, 万秋华. 高分辨力面阵图像式光电编码器的测角技术[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(1): 234-240.
- QI L L, WAN Q H. Angle measurement technology of high resolution planar array image photoelectric encoder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(1): 234-240.

## 作者简介



**张寅**, 2009年于吉林大学获得学士学位, 2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2016年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为光电探测信息仿真与处理。

E-mail: zhangyin1986@nuaa.edu.cn

**Zhang Yin** received his B. Sc. degree from Jilin University in 2009, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Harbin Institute of Technology in 2011 and 2016. He is currently an associate professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include simulation and processing of photoelectric detection information.



**顾恩臣**, 2019年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为光电探测信息处理。

E-mail: 15950522922@163.com

**Gu Enchen** received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest is processing of photoelectric detection information.



**闫钧华**(通信作者), 1993年于南京航空航天大学获得学士学位, 2001年于南京航空航天大学获得硕士学位, 2004年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 主要研究方向为目标检测、跟踪与识别, 图像质量评价, 多源信息融合。

E-mail: yjh9758@126.com

**Yan Junhua** (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1993, 2001, and 2004, respectively. She is currently a professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include target detection, tracking and recognition, image quality assessment, and multi-source information fusion.



**谢巍**, 1994年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 现从事长度计量测试及测绘仪器科研工作, 主要研究方向为光学仪器及光电电子技术。

E-mail: bpic\_xiewei@126.com

**Xie Wei** received his B. Sc. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping in 1994. He is currently engaged in length measurement testing and surveying instruments research. His main research interests include optical instruments and optoelectronic technology.



**邹弘扬**, 2018年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为北京博新精仪科技发展有限公司助理工程师, 主要研究方向为自动控制系统。

E-mail: bpic\_zouhongyang@126.com

**Zou Hongyang** received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2018. He is currently an assistant engineer at China BPIC Surveying Instruments AG. His main research interest is automatic control system.