

文章编号 1004-924X(2018)12-3079-08

单圈绝对式电子经纬仪测角信号处理

袁鹏飞^{1,2}, 黄大庆^{3*}, 雷仲魁^{3*}, 徐 诚³, 张 景¹

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016;

2. 南京晓庄学院 电子工程学院, 南京 211171;

3. 南京航空航天大学 中小型无人机先进技术工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘要:为实现快速、高精度角位移测量,提出了一种单圈绝对式电子经纬仪测角信号处理算法。只需刻画脉冲左右边沿在阈值附近各 2 个采样点就可以快速估计出脉冲宽度和脉冲中心坐标;对现有文献细分方法进行改进,给出了基于多组刻画脉冲中心求解高分辨率细分角的公式;并对算法时间复杂度和抗噪声性能分别进行了分析与仿真。实验结果表明,本方法在水平方向上测角误差标准差仅为 2.5",平均每秒钟可测角输出 25 次,具有实现简单、只需较少计算量就可以获得较高测量精度的优点。研究结果可以为单圈绝对式电子经纬仪、全站仪提供一种新的测角信号处理实用方法。

关键词:精密测量;单码道绝对编码器;信号处理;电子经纬仪

中图分类号:O438;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.3079

Signal processing algorithm of a single-track absolute encoder for photoelectrical theodolite

YUAN Peng-fei^{1,2}, HUANG Da-qing^{3*}, LEI Zhong-kui^{3*}, XU Cheng³, ZHANG Jing¹

(1. *Department of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, Nanjing 210016, China;*

2. *Department of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;*

3. *Ministry of Industry and Information Technology Key laboratory of Advanced Technology for Medium and Small UAV, Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, Nanjing 210016, China)*

** Corresponding author, E-mail: radiouav@sina.com; lzk@sumec.com.cn*

Abstract: To realize a fast and high-precision angular measurement method, this study focused on the signal processing algorithm of a single-track absolute encoder, which can be easily applied to photoelectrical theodolites. Using this algorithm, the grating line center and pulse width could be quickly estimated with only two sampling points of the rising and falling edges, by setting a threshold for the observed grating data. To improve the existing subdivision method, a high-resolution subdivision algorithm for angular measurement was provided by calculating multiple grating line centers. We also analyzed the algorithm's time complexity and anti-noise ability by simulation. Experiments were performed to evaluate the measurement precision, output stability, and running speed. The results

收稿日期:2018-04-16;修订日期:2018-06-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61601222);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20160789)

showed that the standard deviation of error was within 2.5 seconds, and the rate of angular output was 25 times per second. This algorithm is easy to implement and has merits of both limited computation and high-precision. Thus, a new angular measurement signal-processing algorithm, which can be applied to a single-track absolute encoder for a photoelectrical theodolite or total station instrument in the future, can be developed with the results of this research.

Key words: precision measurement; single-track absolute encoder; signal processing; photoelectrical theodolite

1 引言

电子经纬仪是集光、机、电、算为一体的自动化、高精度的光学仪器,采用现代信号处理技术实现测量读数的智能化^[1],在航空、航天、汽车、水利、测绘等工业领域得到广泛应用^[2]。电子经纬仪的测角方式可分为增量式和绝对编码式两种。增量式测角系统^[3]采用主光栅和指示光栅相对位移形成的莫尔条纹进行测量,常用的增量式光栅采用 16200 线刻划,这些决定了光栅增量测角系统的光学和机械装调工艺很复杂^[4]。绝对编码又分为单码道编码和多码道编码^[5-6]两种,其中单码道绝对编码方法是国际上出现的新技术,是目前国内外研究的热门课题。其优点有:①智能化,具有记忆功能,数据稳定可靠;②结构简单,便于小型化,应用范围广;③成本低廉、节省资源。

近年来,国内外对单码道绝对编码方式进行了一系列的研究。如美国 NASA 研制出刻划有基准线和二进制码元的码盘,采用 CCD 图像探测器接收码盘的图案,并识别二进制码元作为粗码^[7-8]。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码盘^[9]。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^[10]。国内对单码道绝对编码方法的研究始于 2002 年,中科院光电技术研究所苏海冰等首先介绍了单圈绝对编码的基本原理^[11]。同年,郁有文等设计了具有格雷码的没有粗差和 M 系列绝对码的单码道特点的绝对码筒码^[12]。2006 年,北京交通大学机械与电子控制工程学院邱成等^[13]和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所陈赞等^[14]也分别提出了新的单码道绝对编码方法。2009 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所熊金旺等将图像处理技术应用到绝对编码器的研

究中用以提高解码精度^[15]。2012 年王显军对细分误差进行了专题研究^[16]。2016 年杜颖财等通过分析码盘刻线与分辨力之间的关系,提出了基于线性图像探测器的高分辨力绝对式编码方式^[17]。张洪波、王涛等对小型光电编码器误差进行了分析^[18-19]。2016 年于海等研究了编码器动态误差及精度性能^[20-21],2017 年又提出了一种具有一定适应能力的细分算法^[22]。

已公开的单码道绝对编码信号处理方法存在的问题有:第一,定位粗码位置和细分估计有各自独立的算法,没有做到两者统一在同一个处理算法中;第二,已知算法复杂度偏大:如质心法需要处理刻画脉冲里的所有采样点以求取脉冲中心位置,这个过程包含了很多需要处理的冗余信息,由于需要处理更多采样输入点,这些算法对处理器的处理能力有一定的要求,不利于降低成本。

本文旨在提出一种基于线阵 CCD 传感器的单圈绝对式电子经纬仪新的信号处理方法,在一个信号处理算法里同时实现粗码定位和细分估计,测角输出稳定,运算量小且精度较高。

2 原理及算法

2.1 原理

电子经纬仪单圈绝对编码器的主要部件由转动轴系、光源、编码盘、线阵 CCD 和信号处理电路以及算法软件等构成,如图 1 所示。随着轴系的转动,入射光线透过编码度盘将含有角度信息的编码亮暗条纹照射到线阵 CCD 感光面上,再由信号处理电路板产生 CCD 时序信号驱动其工作,同时采集投射到传感器感光面上的码盘明暗条纹信息并通过运行在信号处理电路板上的识别软件处理得到测角信息。

2.2 算法内容

设 CCD 输出像元数据为 $y(n)$,在该 CCD 中

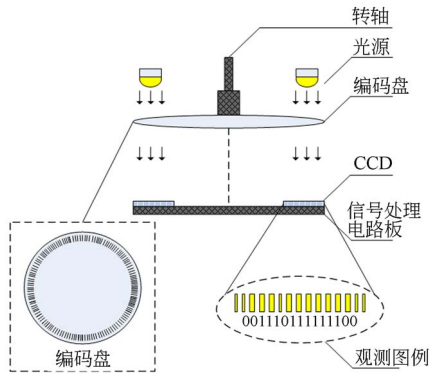


图 1 电子经纬仪测角结构图

Fig. 1 Structural diagram of photoelectrical theodolite

心位置附近设置一条固定检测线 x_c , 以该检测线位置为参考原点建立直角坐标系, 其中坐标系的横轴为像素索引与 x_c 的差值, 纵轴为像元数据 $y(n)$ 。找出输入像元 $\{y(n)\}$ 中的最大值记为 v_{Max} , 将 v_{Max} 乘以常数 k 得到一条固定阈值线, 如图 2 所示。

$$v_{Top} = k \times v_{Max}, k \in (0, 1). \quad (1)$$

图 2 中 CCD 视野范围内第 n 个刻画脉冲左右边沿在阈值线 v_{Top} 附近的 4 个采样点分别记为: 左下点 A_1 , 左上点 A_2 , 右上点 A_3 , 右下点 A_4 ; 其中, A_1 和 A_4 为第 n 个刻画脉冲左右边沿在阈值线 v_{Top} 下方的 2 个采样点, A_2 和 A_3 为第 n 个刻画脉冲左右边沿在阈值线 v_{Top} 上方的 2 个采样点, A_1 与 A_2 所确定的直线与 v_{Top} 线的交点, 记为 B , A_3 与 A_4 所确定的直线与 v_{Top} 线的交点, 记为 C , 分别求解 B 、 C 的横坐标 x_{nL} 和 x_{nR} ;

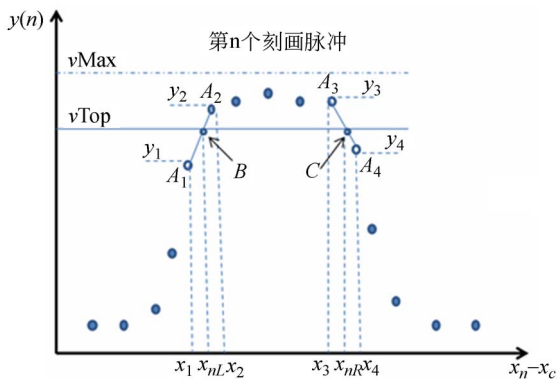


图 2 “交点法”原理图

Fig. 2 Principle diagram of cross point method

x_{nL} 和 x_{nR} 的坐标可由直线交点方程求出:

$$\begin{cases} x_{nL} = (v_{Top} - y_1)(x_2 - x_1)/(y_2 - y_1) + x_1 \\ x_{nR} = (v_{Top} - y_3)(x_4 - x_3)/(y_4 - y_3) + x_3 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: x_1 为点 A_1 对应的像素位置, y_1 为 A_1 对应的像素值; x_2 为点 A_2 对应的像素位置, y_2 为 A_2 对应的像素值; x_3 为点 A_3 对应的像素位置, y_3 为 A_3 对应的像素值; x_4 为点 A_4 对应的像素位置, y_4 为 A_4 对应的像素值。

计算第 n 个刻画脉冲的脉宽 $D(n)$:

$$D(n) = |x_{nR} - x_{nL}|. \quad (3)$$

编码盘有两种不同宽度的刻画分别表示数字量“0”和“1”, 通过设置阈值 T 对 $D(n)$ 作二值化判决可得到该脉冲编码:

$$\begin{cases} \text{IF } D(n) > T, \text{ 判为“1”} \\ \text{ELSE, 判为“0”} \end{cases} \quad (4)$$

设码盘有 M 道刻画线将其圆周 M 等分, 以检测线 x_c 为中心, 选取其右侧最靠近的 N 个刻画编码组成粗码 (N 大于码盘编码位宽), 将此粗码在码表中搜索并获取其在码表中的位置 m , 得到粗测结果:

$$Ph_0 = 360^\circ \times m/M. \quad (5)$$

对第 n 个刻画脉冲的 x_{nL} 和 x_{nR} 求平均, 可估计出该刻画中心 $E(n)$:

$$E(n) = (x_{nL} + x_{nR})/2. \quad (6)$$

文献[22]给出了一种适应性强的分辨率细分算法, 该文先基于“质心”法算得检测线左右 2 条刻线中心位置, 接着由左右 2 条刻线中心间距及右刻线与检测线间距给出细分角 (参见文献 [22] 式(4))。该法具有简单易实现且不受装调精度影响的优点, 然而直接使用 2 条刻线中心的测量值求取细分角易受刻线观测图样信号噪声、干扰影响, 细分精度难以得到保证。为了提高精度, 本文利用检测线附近多条刻线位置信息对文献 [22] 所直接使用的 2 条刻线中心坐标测量值进行预测修正, 并由该文献求解细分角的原理得出基于多条刻线的细分公式。若线阵 CCD 在视野范围内共观测了 k_{total} 个刻画线, 以检测线 x_c 为中心往两侧共选取 p 个刻画脉冲组成待处理刻画组, 选择的刻画组里第一个刻画编号为 k_{start} , 最后一个刻画编号为 $k_{start} + p - 1$ 则有: $1 \leq k_{start} < k_{start} + p - 1 \leq k_{total}$; 当 M 够大且 $p \ll M$ 时, 所选刻画组内刻线中心坐标可看成线性关系。将该刻画组里的刻画编号设为横坐标, 刻画中心设为纵坐标, 由

p 个坐标点数据组成细分数据集: $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_p, y_p)\}$, 将此数据做最小二乘直线拟

$$\begin{cases} a = [\sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p y_i - p \sum_{i=1}^p (x_i y_i)] / [\sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p x_i - p \sum_{i=1}^p x_i^2] \\ b = [\sum_{i=1}^p (x_i y_i) \sum_{i=1}^p x_i - \sum_{i=1}^p y_i \sum_{i=1}^p x_i^2] / [\sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p x_i - p \sum_{i=1}^p x_i^2] \end{cases} \quad (7)$$

将检测线左右两侧刻线编号分别代入由式(7)给出的直线方程可预测出其中心位置的坐标, 再将此坐标代入式(4)可得改进后的细分角公式:

$$Ph_1 = (360^\circ / M) \times (Pos / a), \quad (8)$$

其中:

$$Pos = a \times L + b, \quad (9)$$

L 为检测线 x_c 右侧最相邻的刻画脉冲编号。

式(7)中斜率 a 的物理意义是基于多条刻线算得的左右刻线中心间距预测值, 式(9) Pos 为右刻线中心与检测线间距的预测值。由于最小二乘方法具有较好的噪声抑制能力, 由式(7)、(8)和(9)给出的细分角具有较好的抗噪能力。

得到该 CCD 读头一次测角输出 $Degree$ 为:

$$Degree = Ph_0 + Ph_1. \quad (10)$$

2.3 算法时间复杂度分析

假设算法待处理的脉冲数为 p 且每个脉冲有 q 个像元, 共 $q \times p$ 个像元待处理。为求脉冲中心坐标式(2)、(6)需 $5p$ 次乘除法, $9p$ 次加减法; 求细分式(7)、(8)和(9)需 $5p+14$ 次乘除法, $13p+5$ 次加减法, 合计 $10p+14$ 次乘除法和 $22p+5$ 次加减法。而处理同样多脉冲数据时质心法共需 $q \times p+1$ 次乘除法以及 $2q \times p$ 次加减法。

以本文所采用的 CCD 和码盘为例 $q \approx 16.5$, 不难看出当两种方法处理同样多刻线数据且 $p \geq 2$ 时, 本方法的时间复杂度小于质心法。

2.4 细分算法抗噪性能分析

为了模拟 CCD 输出的实际编码光栅信号, 首先构建 20 个等间距宽窄脉冲来模拟编码盘光栅理想信号 $u(n)$: 每个脉冲有 16 个像元共 320 个像元数; 宽脉冲高电平像元数为 10, 占空比为 62.5%; 窄脉冲高电平像元数为 6, 占空比为 37.5%; 检测线位于图像中心位置 $x_c = 160.5$ 。可计算出理想情况下检测线左、右刻线中心坐标分别为 152.5 和 168.5, 由文献[22]求得理想细分角为 $(360^\circ / M) \times 0.5$ 。再将其经过一数字低通滤波器处理, 得到 CCD 输出的模拟脉冲信号如

合, 得到拟合直线 $y = ax + b$, 拟合直线斜率 a 和截距 b 的计算公式如公式(7):

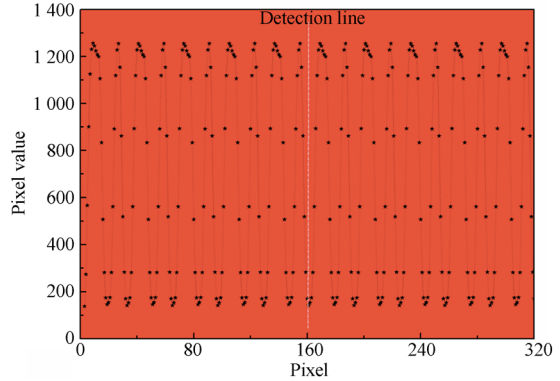


图 3 序列仿真图

Fig. 3 Simulation chart of $x(n)$

图 3 所示。

对 $x(n)$ 叠加高斯白噪声 (30 dBW) 得到加噪后的 CCD 模拟信号 $y(n)$ 并采用本文所述算法和文献[22]之方法分别解算细分角, 重复此过程 5 次得到仿真结果如下表所示。(表 1 中为方便比较略去了常数项: $360^\circ / M$)

表 1 抗噪声细分结果对比表

Tab. 1 Comparison table of subdivision anti-noise performance

序号	本文方法	文献[22]方法
1	0.499 6	0.501 3
2	0.498 5	0.510 1
3	0.499 9	0.499 5
4	0.502	0.502 6
5	0.501 9	0.496 3

将表 1 中两种方法细分结果与理想结果作差求出绝对误差并统计其标准差: 本方法误差的标准差为 $(360^\circ / M) \times 0.001 5$ 小于文献[22]中只采用 2 条刻线的结果 $(360^\circ / M) \times 0.004$ 。

3 实验

为了验证本算法的可行性, 本文基于国产某

型号电子经纬仪设计了一款测角信号处理电路板,如图 4 所示,该电路板采用意法半导体公司生产的 Coretex-M4 嵌入式微处理器 STM32F405 作为主控芯片,具有驱动 4 路线阵 CCD 的能力,CCD 像元尺寸为 $14 \times 14 \mu\text{m}$;直径为 79 mm 的编码盘上面有 1 080 道刻线。

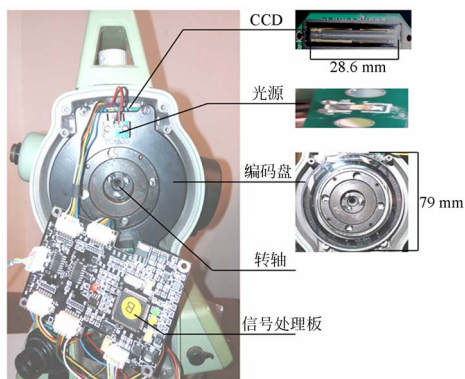


图 4 电子经纬仪信号处理实物图

Fig. 4 Picture of signal processing for photoelectrical theodolite

3.1 测角速度实验

在 STM32F405 信号处理板上分别连续执行算法 1 000 次以及连续测角 1 000 次(每次测角含数据采集 1 次和算法执行 1 次),所需时间见表 2。

表 2 算法时间开销及测角时间开销表
Tab.2 Time consumption of algorithms (s)

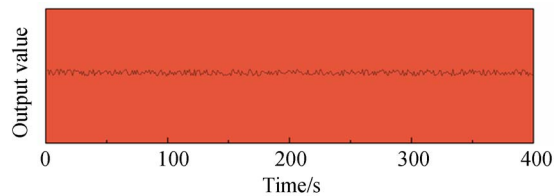
序号	运行内容	本方法时间开销	质心法时间开销
1	算法执行 1 000 次时间开销	25	31
2	测角 1 000 次时间开销	40	46

不考虑数据采集的时间消耗,由于本算法只需处理刻线 4 个采样点数据从而降低了运算量,在 STM32F405 处理器上运行 1 次的平均时间仅为 25 ms,而质心法为 31 ms,实验结果与前文时间复杂度分析结果大体一致,可见本算法时间消耗是很小的。从算法实现的角度来看,较小的时间消耗意味着可以在较低成本处理器上运行,有利于降低生产成本。

3.2 稳定性实验

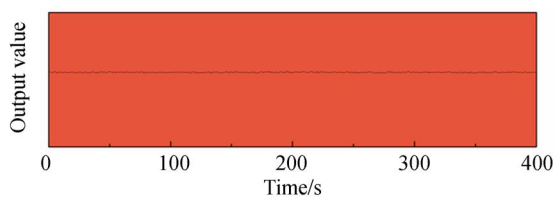
将经纬仪水平轴锁紧,在相同时间间隔内对

同一个水平角位置分别运行质心法和本文算法并记录测角输出摆幅,结果如图 5 所示。



(a) 质心法输出

(a) Angle output of centroid algorithm



(b) 本文方法输出

(b) Angle output of proposed algorithm

图 5 输出稳定性实验

Fig. 5 Output stability test

由图 5 可以看出,受测量噪声影响两种方法输出都有小幅振动,但由于本算法基于多条刻线做最小二乘线性拟合求细分,其输出振幅相对较小。可见,本算法具有较好的抗噪能力,能够实现高分辨力稳定的输出。此结果与细分算法抗噪性能分析一致,说明算法除了有计算量小的优势外还具备较好的抗噪能力。

3.3 精度实验

为了测试算法的精度性能,本文采用电子经纬仪专用检定平台(水平轴检定误差不大于 0.3 s)对经纬仪测量误差标定,在水平轴 $0 \sim 360^\circ$ 转角内等间距选取 23 个测试点,分别记录下每个测试点位置算法测角输出及检定平台输出,将两者作差得到测角误差曲线。

单读头输出实验:

如图 6 所示,受偏心误差影响,单头输出的绝对误差呈现正弦函数分布特征。本方法峰峰值为 $-12 \sim 13 \text{ s}$,其误差标准差为 6.2 s;质心法的峰峰值为 $-13 \sim 14 \text{ s}$,标准差为 6.7 s。

双读头融合输出实验:

设径向对称位置 2 个 CCD 读头的输出分别为 d_1 和 d_2 ,则融合结果 d 为:

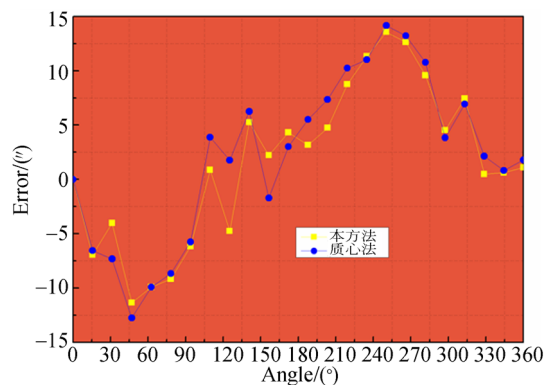


图 6 测角误差曲线图

Fig. 6 Angle measurement error curves

$$\begin{aligned} & \text{IF } d_1 < d_2, d = (d_1 + d_2) / 2 \\ & \text{ELSE, } d = (d_1 + d_2 + 360^\circ) / 2 \end{aligned} \quad (11)$$

23 控制点融合误差如表 3 所示;经式(11)融合输出的 23 控制点误差标准差仅为 2.5 s,而质心法约为 3 s。

表 3 23 控制点融合测角输出误差表

Tab. 3 Result of measurement error from twenty-three testing points (s)

控制点 序号	本文方法 测角误差	质心法测 角误差
1	0	0
2	-5.30	-4.87
3	-0.07	1.35
4	-3.90	-5.78
5	-0.96	1.28
6	0.84	0.15
7	0.79	-0.95
8	5.44	4.73
9	-1.32	2.17
10	5.03	5.91

参考文献:

- [1] 陈毛安. 基于虚拟仪器的智能高度测试系统[D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2002.
CHEN M A. *Intelligent Height Testing System Based on Virtual Instrument*[D]. Nanjing: Nanjing University Of Science And Technology, 2002. (in

续表 3

控制点 序号	本文方法 测角误差	质心法测 角误差
11	-0.88	0.58
12	1.85	-1.33
13	0.73	1.76
14	0.21	-2.23
15	-0.85	-0.75
16	-0.81	2.27
17	1.12	-1.79
18	2.58	3.65
19	1.26	0.43
20	-0.5	-3.69
21	5.17	-5.21
22	0.10	0.41
23	0.80	2.72
24	1.79	-1.65
STDEV	2.48	3.01

5 结 论

本文提出一种单圈绝对式电子经纬仪测角信号处理方法:采用“交点法”提取脉冲宽度和脉冲中心坐标,对脉宽采用二值化的方法提取粗码;对脉冲中心坐标采用最小二乘直线拟合的方法快速估计出细分角;将两者组合得到 1 路 CCD 测角输出。这种方法有以下优点:(1)在 1 种信号处理算法里实现了粗码提取和细分估计;粗码和细分可以同时,也可以先做细分再提取粗码;(2)算法的运算量小,每秒可测角 25 次;且精度较高,水平轴测角精度为 2.5",是一种适用于电子经纬仪、全站仪等测绘仪器的测角信号处理方法。本文方法在精度、速度等主要性能指标上优于目前主流方法,可作为主流算法的一个补充,为今后该领域其他方法的提出提供依据。

(Chinese)

- [2] 杨国光,沈涵芬. 光学经纬仪[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
YANG G G, SHEN H F. *Optic Theodolite*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1990. (in Chinese)
[3] 杜颖财,王希军,王树洁,等. 增量式编码器自动检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26

- (11): 993-998.
- DU Y C, WANG X J, WANG SH J, *et al.*. Auto-detection system of incremental encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(11): 993-998. (in Chinese)
- [4] 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, 27(1): 91-95.
- TANG T J, CAO X Q, LIN B. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 91-95. (in Chinese)
- [5] 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 shaft encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)
- [6] 赵勇, 苏显渝, 张启灿. 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 143-147.
- ZHAO Y, SU X Y, ZHANG Q C. Phase subdivision of absolute coding grating and application in displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 143-147. (in Chinese)
- [7] LEVITON D B, FREY B. Ultra-high resolution, absolute position sensors for cryostatic applications [J]. *IR Space Telescopes and Instruments*, 2003. DOI: 10.1117/12.461799.
- [8] LEVITON D B, Garza M S. advances and applications of NASA's new ultrahigh-sensitivity absolute optical pattern recognition encoders[J]. *Imaging Technology and Telescopes*, 2000. DOI: 10.1117/12.405797.
- [9] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA H, *et al.*. A 3.2 kHz, 14-Bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(8):1430-1436.
- [10] 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.
- [11] 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, 10(1): 74-78.
- SU H B, LIU E H. Development of single loop absolute encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 74-78. (in Chinese)
- [12] 郁有文, 常健. 绝对码编码器中一种新型的编码方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 541-544.
- YU Y W, CHANG J. A new coding method in absolute code encoder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 541-544. (in Chinese)
- [13] 邱成, 朱衡君. 绝对式光学编码器串行编码方法的研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(5): 723-728.
- QIU CH, ZHU H J. Research on serial encoding method of absolute optical encoder [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 723-728. (in Chinese)
- [14] 陈赞, 孙承浦, 何惠阳. 单圈绝对式码盘编码方法的研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(3): 460-463.
- CHEN Y, SUN CH P, HE H Y. Study on the coding method of single loop absolute code disk [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 460-463. (in Chinese)
- [15] 熊金旺, 贾平, 刘晶红. 利用图像传感器的光电轴角编码器编码研究[J]. *测控技术*, 2009, 28(12): 6-9.
- XIONG J W, JIA P, LIU J H. Research on encoding of photoelectric shaft encoder based on image sensor[J]. *Measurement and control technology*, 2009, 28(12): 6-9. (in Chinese)
- [16] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 379-386.
- WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
- [17] 杜颖财, 宋路, 万秋华, 等. 基于线阵图像传感器的高分辨率单圈绝对式编码方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 104-110.
- DU Y C, SONG L, WAN Q H, *et al.*. High resolution absolute code disk based on linear array image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 104-110. (in Chinese)
- [18] 张洪波, 万秋华, 王树洁, 等. 小型编码器动态精度检测的安装误差控制[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7):1655-1660.
- ZHANG H B, WAN Q H, WANG SH J, *et al.*. Installation error control of dynamic measurement for small photoelectric encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1655-1660. (in Chinese)
- [19] 王涛, 赵建科, 田留德, 等. 光电编码器与棱体轴线平行度对转角误差的影响[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 225-232.
- WANG T, ZHAO J K, TIAN L D, *et al.*. Influence of parallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one on the rotation angle error[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,

47(2): 225-232. (in Chinese)

- [20] 于海, 万秋华, 梁立辉, 等. 光电编码器的动态误差检测系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 156-161.

YU H, WAN Q H, LIANG L H, *et al.*. Dynamic code error detection system of photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 156-161. (in Chinese)

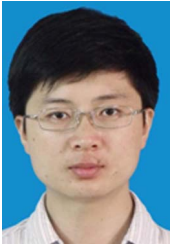
- [21] 于海, 万秋华, 卢新然, 等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2699-2704.

YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.*. Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2699-2704. (in Chinese)

- [22] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 198-207.

YU H, WAN Q H, ZHAO CH H, *et al.*. A high-resolution subdivision algorithm for photographic encoders and its error analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 198-207. (in Chinese)

作者简介:



袁鹏飞(1983—),男,江苏泰州人,工程师、实验师,2005年、2008年于南京航空航天大学分别获得学士学位、硕士学位,主要从事精密测量、信息系统与信号处理及嵌入式系统等方面的研究工作。E-mail: ypfnuaa0401@126.com



黄大庆(1959—),男,浙江余姚人,研究员,博士生导师,1982年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事无人机遥控遥测、侦察图像处理、电磁兼容等方面的研究。E-mail: radiouav@sina.com



雷仲魁(1964—),男,湖南长沙人,研究员,1984年于北京航空航天大学获得学士学位,1989年于南京航空航天大学获得硕士学位,现工作于南京航空航天大学无人机院,主要从事无人机飞控、无人机目标测量等方面的研究。E-mail: lzk@sumec.com.cn