

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0194

星载准绝对式光电编码器抗污方法

韩庆阳*, 沈宏海, 马天翔, 梁超, 王志冲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 为提高星载准绝对式光电编码器的抗油污能力, 提出多参考点绝对角位移识别和多读数头数据融合方法。介绍星载准绝对式光电编码器的组成和处理电路设计; 提出多参考点绝对角位移的识别方法, 防止因油污造成的绝对角位移误识别, 并采用多读数头数据融合的方法, 判断并消除错误的读数头测量数据; 通过角位移曲线和角速度曲线对比实验, 验证所提方法的有效性, 并使用自准直平行光管和 23 面体检测精度。实验结果表明: 所提方法能够有效的解决圆光栅被污染带引起的角位移错误问题, 确保角位移正确可靠; 经检验角位移误差最大值为 4.6", 最小值为 -0.6", 峰峰值为 5.2", 均方差为 4.3"。满足星载准绝对式光电编码器抗污能力和精度要求, 并已成功在工程中应用, 效果良好。所提方法对提高星载准绝对式光电编码器抗油污能力, 有实用价值。

关 键 词: 星载; 准绝对式光电编码器; 抗污能力; 多参考点; 多读书头

中图分类号: V221⁺.3; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)06-2014-08

随着星载激光通信技术的发展, 对激光通信终端二维转台的技术要求日益提高^[1-2]。光电编码器为转台提供高精度角位移, 进而完成终端设备的捕获、跟踪和通信功能^[3], 因此, 对光电编码器的要求随之提高。光电编码器是一种集光、机、电于一体的数字化精密角位移测量装置^[4-5]。具有精度高、分辨力高、环境适应力强和易于集成等优点, 常用于工业和其他科技领域的实时测量控制系统中^[6-8]。从编码方式上分, 其可分为增量式、准绝对式和绝对式^[9]。准绝对式即多参考点光电编码器, 相对单参考点增量式光电编码器, 准绝对式光电编码器绝对角位移识别效率高^[10]。同时又兼具单参考点增量式光电编码器编码方式简单、结构简单、反应速度快和工作稳定等优点^[11], 故在星载激光通信终端有广泛应用。但由于准绝对式光电编码器的核心部件, 即圆光栅在使用过程中容易被污染, 导致测量的角位移错误, 这对星载准绝对式光电编码器的影响是灾难性的。因此, 亟需提高星载准绝

对式光电编码器的抗污能力, 保证角位移的正确。

导致星载准绝对式光电编码器因圆光栅污染造成角位移测量错误的主要原因是使用时对圆光栅的污染引起的虚假参考点和莫尔条纹信号跳动。通常的做法是将圆光栅密封和读数头备份。由于不可能完全密封, 且即使完全密封, 也存在因使用等原因造成的密封泄露。一旦密封泄露, 使用时环境中的污渍极易污染圆光栅, 导致测量得到的角位移错误。读数头备份是星载设备的常用手段, 但难点在于判断主备测量的角位移是否正常。于海等^[12]提出基于图像补偿的抗污方法, 有效的提高了图像式光电编码器的抗污能力, 这种方法并不适用于准绝对式光电编码器。文献^[13-15]提出多读数头圆光栅自校准方法, 有效的提高了圆光栅的测量精度, 但无法解决圆光栅的污染问题。

星载准绝对式光电编码器圆光栅的污染通常有且只有一处。当该污染出现在圆光栅的参考点编码环或光栅环时, 会导致测量的角位移错误。因

收稿日期: 2024-04-07; 录用日期: 2024-07-30; 网络出版时间: 2024-08-02 10:14

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240801.1544.001

基金项目: 国家自然科学基金 (52075520)

*通信作者. E-mail: lanbohesky@126.com

引用格式: 韩庆阳, 沈宏海, 马天翔, 等. 星载准绝对式光电编码器抗污方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (6): 2014-2021.

HAN Q Y, SHEN H H, MA T X, et al. Anti-stain method of satellite-borne absolute-to-be optical encoder [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (6): 2014-2021 (in Chinese).

此,本文提出从绝对角位移识别方法及多读数头测量融合两方面,提高星载准绝对式光电编码器的抗污能力,保证角位移正确可靠。首先,介绍星载准绝对式光电编码器的组成和信号处理电路;其次,设计准绝对式光电编码器的圆光栅图案,提出多参考点绝对位置识别法和3组测量读数头数据融合方法,消除油污对圆光栅污染的影响;最后,设计开发了圆光栅直径为112 mm,光栅刻线数为16384的准绝对式角位移测量装置,进行抗油污实验和精度检测。结果表明:本文方法有效的消除油污污染对角度测量的影响,经检测误差最大值为4.6",最小值为-0.6",峰峰值为5.2",均方差为4.3";满足系统对星载准绝对式光电编码器角位移测量的可靠性和精度要求。这对提高星载准绝对式光电编码器抗油污能力,具有实用价值,并已成功应用。

1 星载准绝对式光电编码器的组成

星载准绝对式光电编码器是基于圆光栅和指示光栅干涉产生的莫尔条纹实现角位移精密测量的。其由圆光栅、指示光栅、机械轴系和处理电路等部分组成。当轴系转动时圆光栅随之转动,圆光栅和指示光栅发生相对运动。此时光源发出的光经过圆光栅和指示光栅后产生莫尔条纹,光电接收管接收莫尔条纹并将其转化成电流信号,送给后续处理电路进行处理,即可得到轴系转动的角位移。其组成如图1所示。

后续处理电路完成星载准绝对式光电编码器的信号处理和角位移解算,主要由:整形电路、放大电路、模数转换(analog-to-digital converter, AD)采集电路、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和通信电路构成;其电路原理框如图2所示。

星载准绝对式光电编码器的处理电路元器

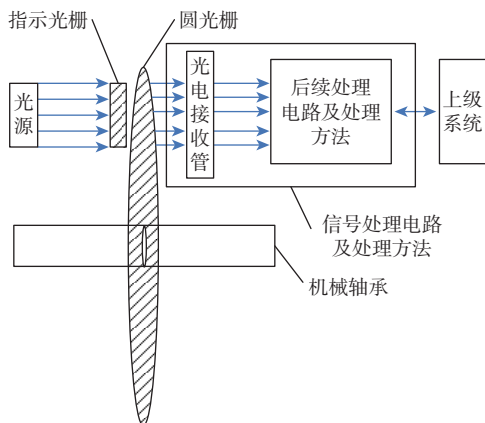


图1 星载准绝对式光电编码器的组成

Fig. 1 Composition of satellite-borne absolute-to-be optical encoder

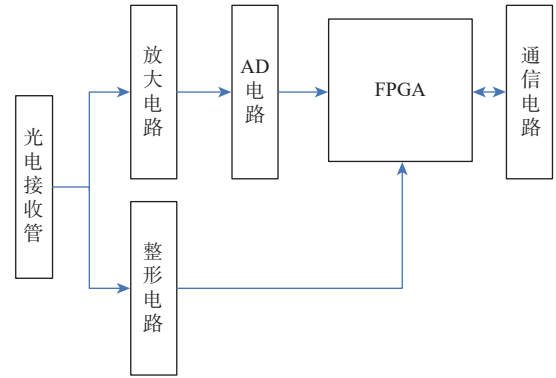


图2 星载准绝对式光电编码器处理电路原理框

Fig. 2 Block of satellite-borne absolute-to-be optical encoder

件选用要充分考虑航天环境使用要求。因此,核心器件需满足宇航级器件要求,保证电路稳定可靠。

2 抗污方法

星载准绝对式光电编码器的圆光栅按照一定的规律在一圈设置多个参考点。转过一个小角位移,保证经过2个参考点即可确定绝对角位移。但这种识别方法易受使用环境污染影响产生虚假参考点,一旦产生虚假参考点,则按照两参考点识别得到的绝对角位移是错误的。因此,提出多参考点绝对角位移识别方法消除虚假参考点。而光栅环的污染,则通过设置3个测量读数头的方式,采用多读数头数据融合和跳码识别的方法,剔除角位移测量不正确的读数头数据,保证编码器正常工作。

2.1 参考点抗污方法

2.1.1 多参考点圆光栅设计

多参考点准绝对式光电编码器的圆光栅在单参考点的基础上按照规律插入多个参考点,只需要旋转小角位移,就能确定绝对角位移。因此,其绝对角位移识别效率比单参考点高。如图3所示,是一种常见的编码方式。首先,将圆光栅按照均分刻线数 m 插入参考点,其个数为 n ,每2个参考点之间的刻线数为 m/n ;其次,在每2个参考点之间插入 n 个参考点,插入的方法如下:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{m}{2n} - 1 \\ N_2 = \frac{m}{2n} + 1 \\ N_3 = \frac{m}{2n} - 2 \\ N_4 = \frac{m}{2n} + 2 \\ \vdots \\ N_{2n-1} = \frac{m}{2n} - n \\ N_{2n} = \frac{m}{2n} + n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N_1 \sim N_{2n}$ 从绝对角位移的零点逆时针依次排布, 得到的圆光栅图案。其设计图和实物图如图 3 所示。

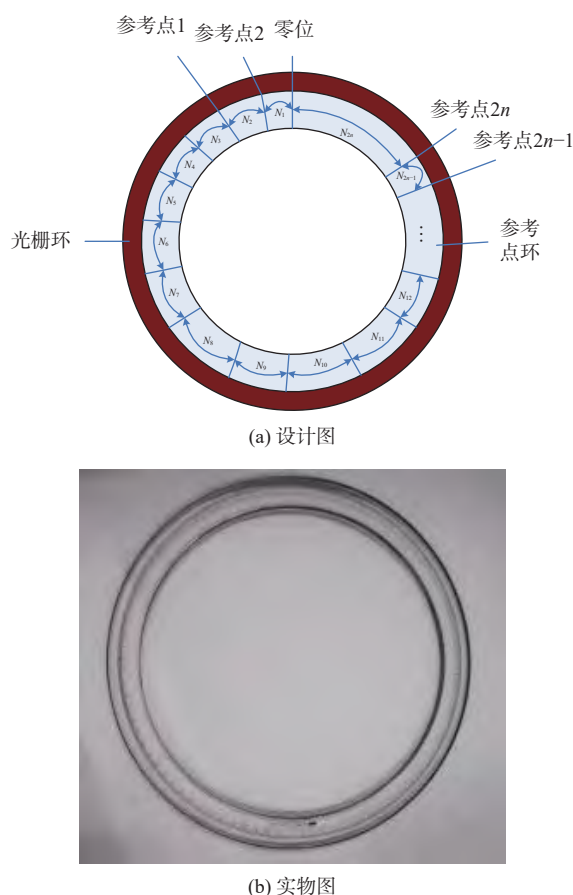


图 3 星载准绝对式光电编码器圆光栅设计

Fig. 3 Design of satellite-borne absolute-to-be optical encoder's circle grating

2.1.2 多参考点绝对位置识别方法

由于多参考点一圈设置了多个参考点, 因此, 采用过 3 次或 4 次参考点决定一个绝对位置的方法。本文方法的流程如图 4 所示。

利用相邻 2 个不同参考点之间的线条数预判下一个参考点之间的线条数, 进而确定绝对角位移。若 $N_{2n} \geq N_i + N_{i+1}$, 其中, $i=2, 3, \dots, 2n-1$; 当虚假参考点出现在 $N_1 \sim N_{2n}$ 任一区域, 或任意几个区域时, 只要剩余连续 3 个区域 (即 4 个参考点) 未被污染, 即可得到绝对角位移 n_5 。若 $N_{2n} < N_i + N_{i+1}$, 其中, $i=2, 3, \dots, 2n-1$, 则只需经 3 个参考点即可得到绝对角位移, 即如图 4 中遇到第 3 个参考点得到的绝对角位移 n_4 , 无需第 4 参考点。

2.2 光栅环抗污染方法

采用三读数头测量数据融合的方法, 克服光栅环的污染问题。具体如下: 设 3 个测量读数头测量得到的角位移分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 , 第 2 测量读数头

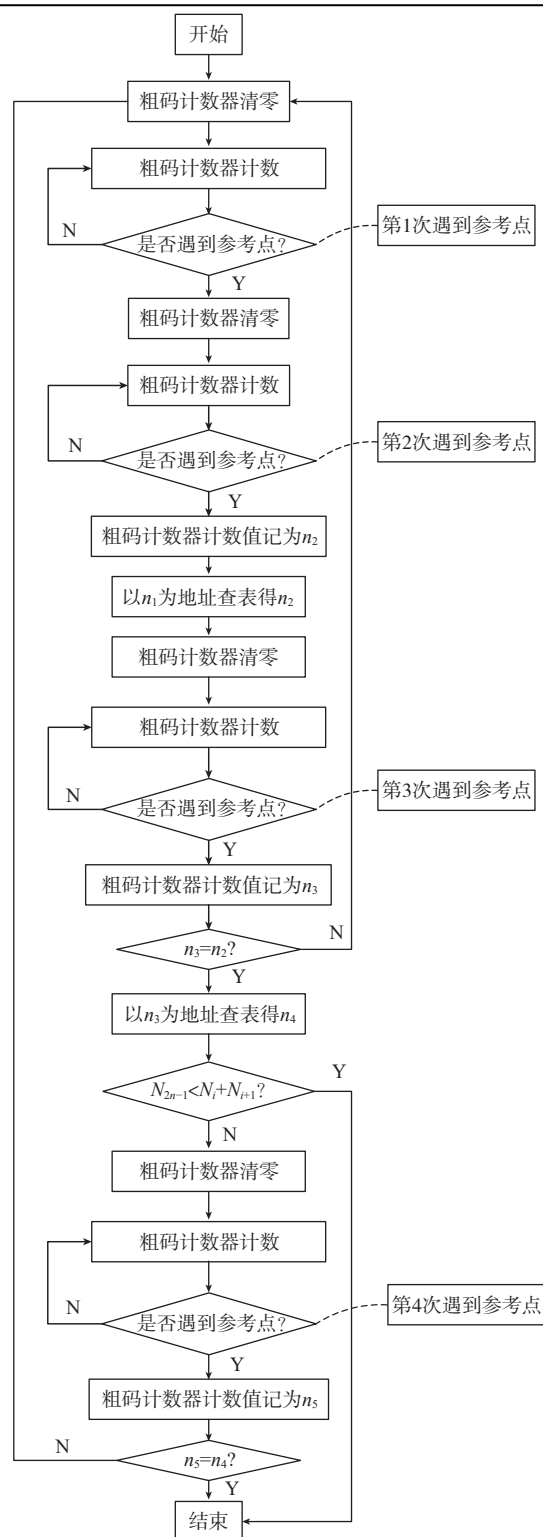


图 4 星载准绝对式光电编码器绝对角位移识别方法流程

Fig. 4 Flow of the method for identify absolute angular displacements of on-board quasi-absolute photoelectric encoders

逆时针方向与第 1 测量读数头相差 α , 第 3 测量读数头逆时针方向与第 1 测量读数头相差 β 。融合后的角位移值 A 表达式为

$$A = \begin{cases} \frac{\{\gamma_1 A_1 + \gamma_2 [360^\circ - (\alpha - A_2)] + \gamma_3 [360^\circ - (\beta - A_3)]\}}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} & A_2 < \alpha, A_3 < \beta \\ \frac{\{\gamma_1 A_1 + \gamma_2 (A_2 - \alpha) + \gamma_3 [360^\circ - (\beta - A_3)]\}}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} & A_2 > \alpha, A_3 < \beta \\ \frac{\{\gamma_1 A_1 + \gamma_2 [360^\circ - (\alpha - A_2)] + \gamma_3 (A_3 - \beta)\}}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} & A_2 < \alpha, A_3 > \beta \\ \frac{[\gamma_1 A_1 + \gamma_2 (A_2 - \alpha) + \gamma_3 (A_3 - \beta)]}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} & A_2 > \alpha, A_3 > \beta \\ 0^\circ & A_2 = \alpha, A_3 = \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$; γ_1 、 γ_2 和 γ_3 至多有一个为 0, 当第 i ($1 \leq i \leq 3$, 且为整数) 个测量读数头经过被污染圆光栅区时, $\gamma_i = 0$, 反之 $\gamma_i = 1$ 。

本文方法将 3 个测量读数头均布在圆光栅上, 即在圆光栅上相隔 120° 位置分别放置一个测量读数头, 即第 2 测量读数头逆时针方向与第 1 测量读数头相差 240° , 第 3 测量读数头逆时针方向与第 1 测量读数头相差 120° , 如图 5 所示。

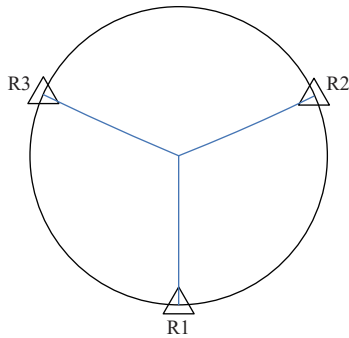


图 5 星载准绝对式光电编码器测量读数头分布

Fig. 5 Distribution of measurement readheads for on-board quasi-absolute optical encoders

若 3 个测量读数头均未经过被污染的圆光栅区最终的角位移 A 的计算式为

$$A = \begin{cases} \frac{\{A_1 + [360^\circ - (240^\circ - A_2)] + [360^\circ - (120^\circ - A_3)]\}}{3} & A_2 < 240^\circ, A_3 < 120^\circ \\ \frac{\{A_1 + [360^\circ - (240^\circ - A_2)] + (A_3 - 120^\circ)\}}{3} & A_2 < 240^\circ, A_3 > 120^\circ \\ \frac{\{A_1 + (A_2 - 240^\circ) + [360^\circ - (120^\circ - A_3)]\}}{3} & A_2 > 240^\circ, A_3 < 120^\circ \\ \frac{[A_1 + (A_2 - 240^\circ) + (A_3 - 120^\circ)]}{3} & A_2 > 240^\circ, A_3 > 120^\circ \\ 0^\circ & A_2 = 240^\circ, A_3 = 120^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_2 、 A_3 经过旋转到 A_1 , 再取 3 个角位移的平均值作为光电编码器的最终结果 A 。

设第 i 个读数头经过被污染圆光栅区域的判据如下: 连续 2 次角位移的角增量小于刻线数的最小

分辨率, 则认为是正常的, 因为圆光栅被污染会引起莫尔条纹整形或细分错误, 角位移表现为粗码跳动一个分辨率:

$$\begin{cases} \Delta A_i = |A_{it_2} - A_{it_1}| < 360^\circ/l & A_i \text{ 正常} \\ \Delta A_i = |A_{it_2} - A_{it_1}| \geq 360^\circ/l & A_i \text{ 异常} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i 为 1、2 或 3; t_1 和 t_2 为连续 2 个采样时刻; l 为圆光栅光栅环的刻线数, $360^\circ/l$ 为星载准绝对式光电编码器的粗码分辨率。如果 A_i 异常, 则该读数头测量得到的连续 2 个采样周期测量角位移差 ΔA_i 就会超出粗码分辨率, 需要舍弃。此时, 使用另外 2 个正常工作的测量读数头测量得到的角位移, 取二者的平均值作为 A 。如假设 $i=3$ 即第 3 测量读数头经过圆光栅污染区, 则 A_3 需要被舍弃。所以 A 为第 1 测量读数头和第 2 测量读数头的角位移融合:

$$A = \begin{cases} \{A_1 + [360^\circ - (240^\circ - A_2)]\}/2 & A_2 < 240^\circ \\ \{A_1 + (A_2 - 240^\circ)\}/2 & A_2 > 240^\circ \\ 0^\circ & A_2 = 240^\circ \end{cases} \quad (5)$$

当 ΔA_i 取值恢复正常, 则读数头 i 需重新按照图 4 所示方法确定绝对角位移, 无误后在与其他两头按照式 (3) 合成最终的角位移 A 。

3 实验

3.1 抗污实验

为验证本文方法的有效性, 设计了准绝对式角位移测量装置, 其中, 圆光栅直径为 112 mm, 光栅刻线数为 16 384, 然后, 先均匀插入 64 个参考点, 再按照式 (1) 插入 64 个参考点。在圆光栅每相隔 120° 均布 3 个读数头, 经 1 024 细分后, 实现 24 bit 角位移测量。分别采用不透明的航天用润滑油和透明的酒精作为污渍, 滴在准绝对式角位移测量装置的圆光栅上。

1) 航天用润滑油。在圆光栅上, 放置一处航天用润滑油作为油污, 该油污覆盖圆光栅的部分光栅线条和参考点。具体如下: 用滴管取一滴 (约 0.05 mL) 的宇航用润滑油, 滴在圆光栅上, 圆光栅的编码环和光栅环同时被油污污染, 直径尺寸约为 8.0 mm 如图 6 所示。

测量得到的莫尔条纹信号与无污渍的对比如图 7 所示。

由图 7 可知, 被污染的圆光栅产生的莫尔条纹信号有明显的漂移, 这种漂移导致角位移的测量出现跳数, 对星载准绝对式光电编码器的影响是灾难性的。

未经过本文方法的角位移曲线和经过本文方

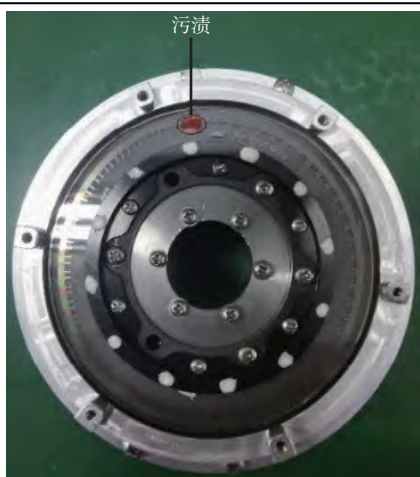
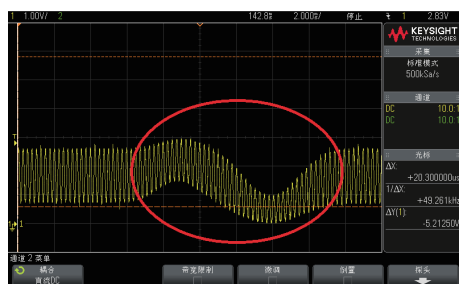
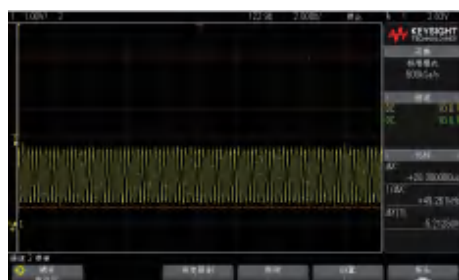


图 6 圆光栅被航天用润滑油污染

Fig. 6 Circle grating with aerospace lube stain



(a) 被航天用润滑油污染的莫尔条纹信号



(b) 未被航天用润滑油污染的莫尔条纹信号

图 7 莫尔条纹信号对比

Fig. 7 Comparison of Moore's stripe signals

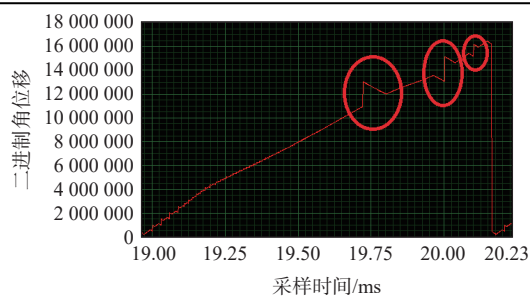
法的角位移曲线对比如图 8 所示。

由图 8 可知, 未经本文方法角位移有明显的错误, 而经过本文方法后角位移曲线正常。为进一步验证本文方法的有效性, 将角速度曲线也测量出来, 即: 连续 2 个采样时刻的角位移差与采样时间间隔的比, 此值应小于粗码的分辨率与采样时间的比:

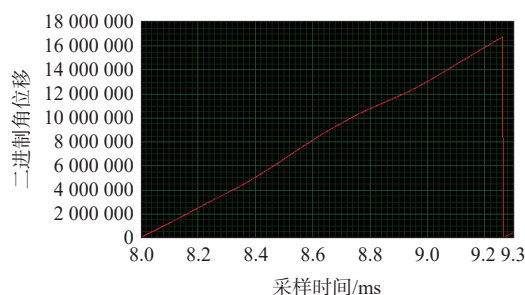
$$\omega < \frac{360^\circ}{l t_{\text{sample}}} \quad (6)$$

式中: ω 为角速度; t_{sample} 为采样时间间隔; l 为圆光栅光栅环的刻线数。未经过本文方法的角速度曲线和经过本文方法的角速度曲线对比如图 9 所示。

由图 9 可知, 未经本文方法的角速度曲线明显有跳动大于粗码分辨率, 这种跳动是错误的。而经



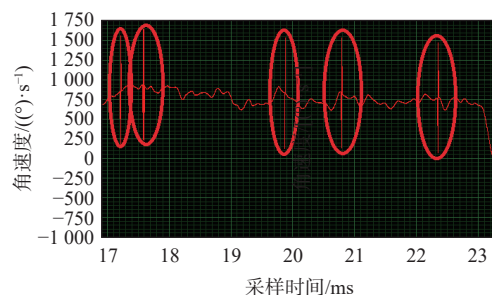
(a) 未采用本文方法的角位移曲线



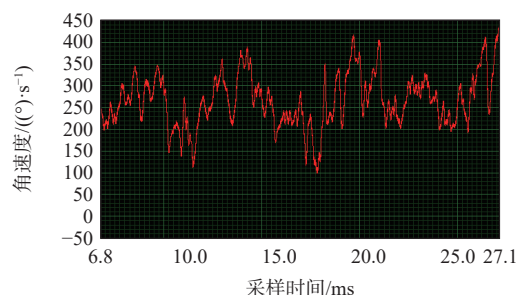
(b) 采用本文方法的角位移曲线

图 8 角位移结果对比

Fig. 8 Comparison of angle shift curve



(a) 未采用本方法的角速度曲线



(b) 采用本方法的角速度曲线

图 9 角速度结果对比

Fig. 9 Comparison of angular velocity curve

过本文方法后, 角速度曲线恢复正常。因此, 本文方法可有效的克服圆光栅污染对角位移测量引起的的影响。

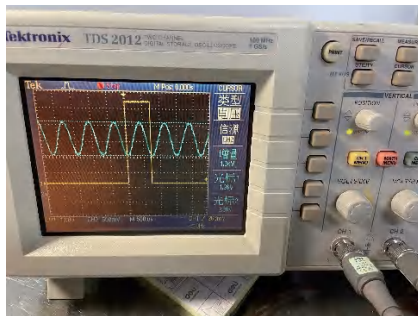
2) 酒精。为对比油污透明度的影响, 用滴管在圆光栅上滴入一滴酒精, 该滴酒精尺寸约为 10 mm, 其位置同时覆盖圆光栅的编码环和光栅环如图 10 所示。

分别测量未被酒精污染和被酒精污染的莫尔条纹信号, 如图 11 所示。

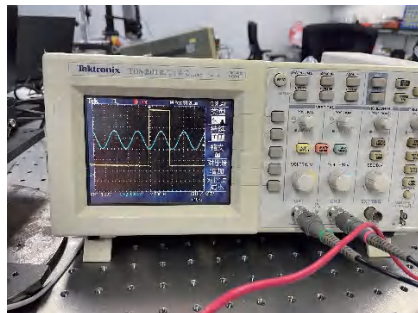


图10 圆光栅被酒精油污染

Fig. 10 Circle grating with alcohol stain



(a) 未被酒精污染的莫尔条纹信号



(b) 被酒精污染的莫尔条纹信号

图11 莫尔条纹对比

Fig. 11 Comparison of Moore's Stripes

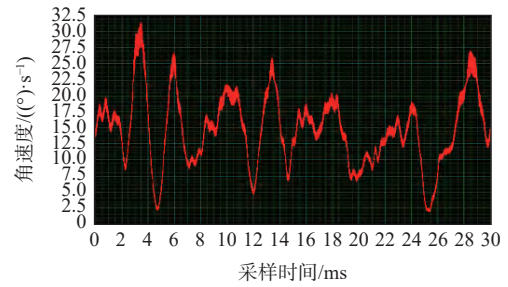
由图11可知,蓝色的莫尔条纹未发生漂移,黄色的参考环信号正常,未消失。可见酒精由于透明,未对准绝对式光电编码器的信号产生影响。

分别测量2种情况的角速度曲线,如图12所示。

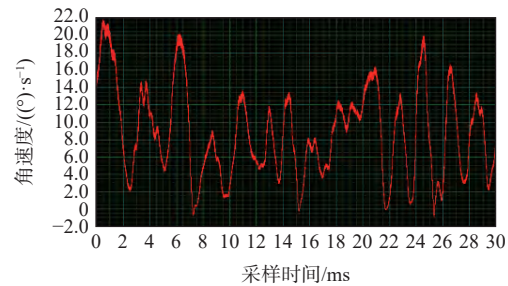
由图12可知,被酒精污染相对未被酒精污染得到的角速度曲线无明显跳动,由于酒精是透明的,因此,其污染圆光栅不会对测量的结果产生灾难性的误码影响。

3.2 精度检测

采用自准直平行光管结合23面体检测准绝对式光电编码器精度,23面体与星载准绝对式光电编码器的轴系通过检验工装连接,准绝对式光电编码器和自准直平行光管的测量结果通过PC显示,如图13所示。



(a) 被酒精污染的角速度曲线



(b) 被酒精污染的角速度曲线

图12 角速度结果对比曲线

Fig. 12 Comparison of angular velocity curves

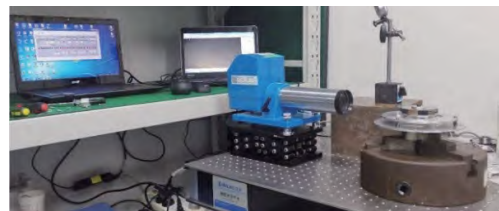


图13 精度检测系统

Fig. 13 Accuracy detection system

23面体相邻2个面与分别自准直平行光管垂直时编码器转过的角度为 $360^\circ/23$ 。首先,调整编码器识别绝对角位移,并使绝对角位移显示为0,此时再调整自准直平行直光管的光轴与23面体的第一面垂直,即自准直平行光管的读数为0,当与第 i ($1 \leq i \leq 23$)面垂直时,理论上转过的角度为

$$\theta = (i-1) \times (360^\circ/23) \quad (7)$$

此时准绝对式光电编码器显示的读数 θ' 与 θ 之差即为此位置处的误差。在实际测量中,编码器的转动比较好操作,故将编码器转到 $(i-1) \times (360^\circ/23)$ 位置处,此时自准直平行光管的误差即为编码器在此处的误差,由于精度比较高,故计算时只需将理论角度的角秒计算进去即可。最后,最终误差还要将编码器的分辨率误差和23面体的修正误差考虑进去。检验结果如表1所示。

由表1可知,星载准绝对式编码器:角位移误差最大值为 $4.6''$,最小值为 $-0.6''$,峰峰值为 $5.2''$,均方差为 $4.3''$ 。满足系统对角位移测量的精度要求。

表 1 星载准绝对式光电编码器精度检测结果

Table 1 Accuracy test results of satellite-borne absolute-to-be optical encoder's

测量位置	$\theta-\theta/(")$	理论值/(")	修正值/(")	最终精度/(")
1	0	0	0	0
2	10.5	7.8	-0.5	3.2
3	18.0	15.7	-0.3	2.6
4	22.6	23.5	-0.3	-0.6
5	32.5	31.3	-0.2	1.4
6	40.0	39.1	-0.5	1.4
7	48.8	47.0	0.2	1.7
8	57.5	54.8	0.7	2.0
9	4.2	2.6	0.4	1.2
10	11.7	10.4	0.4	0.8
11	18.9	18.3	-0.2	0.8
12	24.6	26.1	-0.7	-0.8
13	35.3	33.9	-0.3	1.6
14	44.6	41.7	0.1	2.7
15	51.7	49.6	-0.9	3.1
16	61.0	57.4	-0.2	3.8
17	7.6	5.2	-0.8	3.2
18	14.9	13.0	-0.4	2.3
19	22.8	20.9	-0.7	2.7
20	32.2	28.7	-1.1	4.6
21	39.1	36.5	0.1	2.4
22	47.0	44.3	-0.2	2.9
23	52.3	52.2	0.3	-0.2

4 结 论

本文方法解决了因圆光栅被污染造成角位移错误。

1) 通过角位移曲线和角速度曲线实验结果表明: 当圆光栅被污染, 莫尔条纹信号输出异常, 角位移测量依旧正确。

2) 经检验星载准绝对式光电编码器的误差最大值为 4.6", 最小值为-0.6", 峰峰值为 5.2", 均方差为 4.3"。本文方法已在实际工程中应用, 效果良好。

3) 本文方法对提高星载准绝对式光电编码器的抗油污能力, 防止油污造成灾难性的影响, 保证测量的角位移正确可靠, 有实用价值。

参考文献 (References)

[1] 董全睿, 陈涛, 高世杰, 等. 星载激光通信技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1260-1270.
DONG Q R, CHEN T, GAO S J, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology[J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1260-1270(in Chinese).

[2] 秦涛, 郭骏立, 张美丽, 等. 星载二维转台结构设计及刚度分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 300-308.

QIN T, GUO J L, ZHANG M L, et al. Structure design and stiffness analysis of spaceborne two-dimensional turntable[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 300-308(in Chinese).

[3] 韩旭东, 徐新行, 刘长顺, 等. 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2424-2431.
HAN X D, XU X H, LIU C S, et al. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2424-2431(in Chinese).

[4] 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. Precise photoelectric displacement measurement technology [M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003 (in Chinese).

[5] 刘长顺, 王显军, 韩旭东, 等. 八矩阵超小型绝对式光电编码器[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 326-333.
LIU C S, WANG X J, HAN X D, et al. Ultra miniature absolute optical encoders based on eight-matrix coding[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 326-333(in Chinese).

[6] 王亚洲, 于海, 易进, 等. 图像式角位移测量的光栅偏心率监测系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1038-1045.
WANG Y Z, YU H, YI J, et al. Grating eccentricity monitoring system for image-based angular displacement measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1038-1045(in Chinese).

[7] YU H, WAN Q H, ZHAO C H, et al. Error compensation for low-density circular gratings based on linear image-type angular displacement measurements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13736-13743.

[8] 刘永坤, 丁红昌, 向阳, 等. 利用反射式圆光栅的振摆转角测量[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 643-651.
LIU Y K, DING H C, XIANG Y, et al. Rotational angle measurement of galvanometer using reflective circular grating[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 643-651(in Chinese).

[9] 韩庆阳, 陈赞, 张红胜, 等. 耐高温增量式光电编码器的研制[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1458-1464.
HAN Q Y, CHEN Y, ZHANG H S, et al. Development of high-temperature resistant incremental encoder[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1458-1464(in Chinese).

[10] 裴祖荣, 周磊, 薛浩, 等. 精密减速器检验仪测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2662-2631.
QIU Z R, ZHOU L, XUE H, et al. Angle error compensation of precision reducer tester[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2662-2631(in Chinese).

[11] 于连栋, 鲍文慧, 赵会宁, 等. 新型圆光栅测角误差补偿方法及其应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1719-1726.
YU L D, BAO W H, ZHAO H N, et al. Application and novel angle measurement error compensation method of circular gratings[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1719-1726(in Chinese).

[12] YU H, WAN Q H, ZHAO C H, et al. Anti-stain algorithm of angular displacement based on a single image sensor[J]. Applied Optics, 2020, 59(7): 1985-1990.

[13] 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812001.
ZHANG W Y, LAO D B, ZHOU W H, et al. Self-calibration meth-

- od based on multi-head reading layout[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812001(in Chinese).
- [14] 杨雪, 梁煜, 张为, 等. 应用于反射式编码器的光电集成芯片设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(8): 1136-1149.
- YANG X, LIANG Y, ZHANG W, et al. Design of an optoelectronic integrated chip for reflective encoder application[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(8): 1136-1149(in Chinese).
- [15] 殷景志, 余芝帅, 彭火山, 等. 小型伪随机绝对式光电编码器芯片[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 169-174.
- YIN J Z, YU Z S, PENG H S, et al. Applied of pseudo-random code in miniature absolute encoder chip[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 169-174(in Chinese).

Anti-stain method of satellite-borne absolute-to-be optical encoder

HAN Qingyang*, SHEN Honghai, MA Tianxiang, LIANG Chao, WANG Zhichong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the pollutant resistance of satellite-borne absolute-to-be optical encoder, a method based on multiple references and probes is proposed. First, the composition and circuit design of the satellite-borne absolute-to-be optical encoder was introduced. Second, the data from several probes was combined and references were utilized to differentiate absolute angle shift. This solved the problem which is caused by contaminated circle grating. At last, angular curve and velocity were employed to prove this. The accuracy is tested using autocollimation and a 23-surface polyhedron. The outcome demonstrates its effectiveness. The biggest error is 4.6", the smallest error is -0.6", the pink is 5.2", and the RSME is 4.3". This method could meet the requirements and has been successfully applied in engineering. The proposed method has practical value for improving the oil pollution resistance of spaceborne quasi-absolute optical encoders.

Keywords: satellite-borne; absolute-to-be optical encoder; pollutant-resistance; multiple reference; multiple probes

Received: 2024-04-07; Accepted: 2024-07-30; Published Online: 2024-08-02 10:14

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240801.1544.001

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075520)

* Corresponding author. E-mail: lanbohesky@126.com