

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210801

增量式光学编码器 IAS 信号误差建模及补偿*

尹兴起, 郭瑜, 樊家伟, 邹翔, 陈鑫
(昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500)

摘要: 增量式光学编码器在制造与安装的过程中不可避免会出现刻线误差和细分误差, 这些误差会降低角度测量的精度并导致瞬时角速度 (IAS) 信号波动, 研究刻线与细分误差的补偿途径有重要意义, 但现有方法存在误差补偿效率低, 不易现场应用等局限。针对上述问题, 本文首先对增量式光学编码器的刻线误差与细分误差进行分析并建立误差模型, 揭示了刻线误差、细分误差与 IAS 信号波动之间的联系。在此基础上提出了一种使用 IAS 信号对增量式光学编码器刻线与细分误差进行补偿的方法, 该方法具有效率高、无需对编码器进行改装等优点。通过仿真分析对本文所建立的误差模型的正确性与误差估计方法的可行性进行了验证, 并在 RV 传动实验台上对伺服电机末端的增量式光学编码器进行刻线与细分误差补偿, 最后使用光学旋转平台对增量式光学编码器误差进行测量, 通过对比分析验证了本文所提方法的有效性。

关键词: 增量式光学编码器; IAS 信号; 刻线误差; 细分误差; 误差补偿

中图分类号: TU311.3 TH165+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Error modeling and compensation of IAS signal for incremental optical encoders

Yin Xingchao, Guo Yu, Fan Jiawei, Zou Xiang, Chen Xin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Incremental optical encoders have grating line errors and subdivision errors inevitably during the manufacturing and installation. These errors reduce the accuracy of the angle measurement of encoders and cause instantaneous angular speed (IAS) signal fluctuations. Research on the compensation method for grating line error and subdivision error has great significance. However, the existing methods have limitations, such as low efficiency of error compensation and difficulty in field deployment. To solve the above problems, this article first analyzes the grating line error and the subdivision error of the incremental optical encoder and establishes the error model to reveal the relationship among the grating line error, the subdivision error and the IAS signal fluctuation. Consequently, a method to compensate for the grating line error and the subdivision error of incremental optical encoders using the IAS signal is proposed. The method has advantages of high efficiency and no need to modify the encoder. The correctness of the error model established in this article and the feasibility of the error estimation method are evaluated by simulation analysis. The grating line error and the subdivision error of the incremental optical encoder at the end of the servo motor are compensated on the RV transmission test rig. Finally, the error of the incremental optical encoder is measured by the optical rotating platform. The effectiveness of the proposed method is evaluated by comparative analysis.

Keywords: incremental optical encoder; IAS signal; grating line error; subdivision error; error compensation

0 引言

增量式光学编码器被广泛运用于数控机床、工业机器人等领域, 但在其制造与安装的过程中不可避免会

产生刻线、细分、安装等误差。这些误差会导致伺服系统的定位精度下降, 因此增量式光学编码器的刻线与细分误差补偿方法受到了国内外许多学者的关注。直接使用精密仪器对增量式光学编码器进行逐个标定, 存在着周期长, 高成本, 操作繁琐等问题, 现阶段广泛采用误差补

收稿日期: 2022-11-29 Received Date: 2022-11-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(52165067)、云南省重点领域科技计划项目(202002AC080001)资助

偿法来消除刻线与细分误差所产生的影响。其中李晓天^[1]对刻线误差产生的原因进行了分析, Tan 等^[2]和 Zhang 等^[3]对细分误差的成因进行了分析^[2-3], 但由于光栅测量系统的特点难以建立误差模型^[4], 所以目前误差补偿法主要采用神经网络补偿^[4]、曲线拟合^[5]、多读数头修正^[6-7]等方法。

值得注意的是现有方法仍存在误差补偿效率低, 不易现场部署等局限, 如曲线拟合无法很好的适应转速急剧变化的工况; 具有多读数头结构的编码器在实际工业运用中并不常见; 使用神经网络对编码器误差进行修正需要大量数据训练网络模型, 且迁移性较差。另一方面, 研究中发现刻线与细分误差会导致瞬时角速度 (instantaneous angular speed, IAS) 信号产生波动。为探究 IAS 信号波动与增量式编码器误差之间的联系, 本文建立了增量式光学编码器刻线与细分误差模型, 并推导了使用 IAS 信号对增量式光学编码器刻线与细分误差补偿的方法。通过对仿真分析, 验证了误差模型的正确性与误差补偿方法的有效性, 随后在 RV 减速器实验台上对伺服电机末端编码器进行刻线与细分误差补偿, 最后在光学旋转平台上对本文所提方法的误差补偿方法的效果进行验证。

1 增量式光学编码器测量原理与误差来源

1.1 增量式光学编码器的测量原理

增量式光学编码器结构如图 1(a) 所示, 主要由 LED、光栅盘、光敏芯片等组成。当被测轴带动圆光栅盘旋转时, 光敏芯片将透过光栅的光信号转化为 A、B、Z 三个相位的电信号如图 1(b) 所示, 其中 A、B 相为正交编码信号, 含有角度与方向信息; Z 为零相位信号。

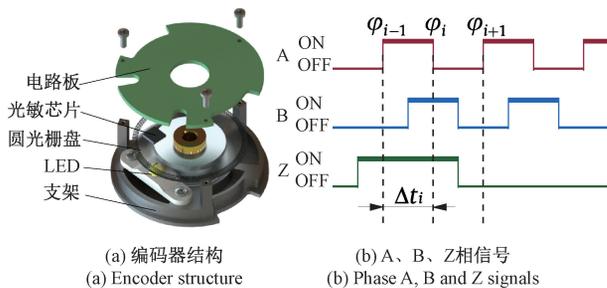


图1 光栅编码器测量原理

Fig. 1 Principle of grating encoder measurement

1.2 误差来源

增量式光学编码器误差根据其产生的类型可分为刻线误差、细分误差、安装误差。

1) 刻线误差

光栅盘在制造过程中刻线误差分为刻线位置误差与刻线宽度误差。刻线位置误差是指在刻线的过程中, 设备受测量、控制系统误差的影响与外部环境的干扰, 导致实际刻线位置与理论位置产生的偏差^[1]。刻线宽度误差是由于在光栅刻线的过程中刻线宽度不等于理论刻线宽度。

2) 细分误差

细分误差包括电子细分误差与正交误差, 在光信号转换为电信号的过程中, 通过识别透过光栅的光强将角度信号进行细分从而达到增加分辨率的目的, 由于光强判断的偏差从而导致了电子细分误差^[2-3], 另一方面在光敏芯片中 A、B 相位的感光元器件位置偏离理论正交位置会导致在 4 倍细分时存在非正交误差^[8-9]。

3) 安装误差

安装误差主要包括偏心误差、倾斜误差与瞄准误差。偏心误差是指在光栅盘在制造或者安装的过程中光栅盘的分度圆与旋转中心不重合导致的误差。倾斜误差是在安装的过程中光栅盘发生倾斜导致的。瞄准误差是由于在编码器安装的过程中编码器零点与被测对象零点未对齐导致。

以上误差的存在会在一定程度上对编码器的测量带来误差, 安装误差的补偿方法已较为成熟^[10-11], 本文主要研究刻线误差与细分误差的补偿方法。

2 刻线误差与细分误差模型的建立

根据上述刻线误差与细分误差的成因, 建立如图 2 所示的增量式光学编码器误差模型。将刻线位置误差记作 ε ; 光栅宽度误差和电子细分误差导致 A、B 相的信号宽度误差记作 ζ ; A、B 相的非正交误差记作 p 。在光栅刻划的过程中, 光栅盘的光栅由于加工工况相同, 其光栅宽度相近, 因此信号宽度误差 ζ 可视作常数, 而刻线位置误差受到测量误差、控制系统误差、外部环境的干扰, 导致每个光栅都存在相应的刻线位置误差。从误差模型中可以看出刻线位置误差与信号宽度误差会在 2、4 倍细分时导致 IAS 信号产生波动, 而非正交误差会在 4 倍细分时导致 IAS 信号产生波动, 所以首先应在 2 倍细分下对刻线位置误差与信号宽度误差进行估计, 随后在 4 倍细分下对非正交误差进行估计, 最后对被测角度信号进行补偿。假设光栅盘上刻有 M 条光栅, 在 2 倍细分下 (读取上升与下降沿, 使其分辨率 $\times 2$), A 相位的测量角度可表示为:

$$\theta_{A(\times 2)}(i) = \varphi_{A(\times 2)}(i) + \varepsilon_A(i) + \zeta_A \times \text{mod}(i + 1, 2) \quad (1)$$

式中: $\theta_{A(\times 2)}$ 为在 2 倍细分下测量得到的角度; $\varphi_{A(\times 2)}$ 为被

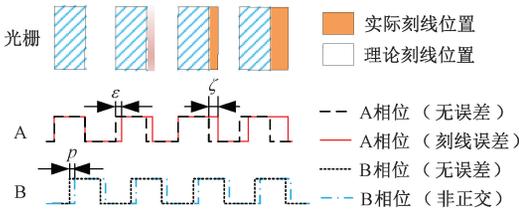


图2 编码器误差模型

Fig.2 Encoder error model

测转轴实际角度; ε_A 为 A 相位刻线位置误差; ξ_A 为 A 相位信号宽度误差; $\text{mod}(\cdot)$ 表示求余数。一般使用 T 法^[12-13]对 IAS 信号进行采集, T 法为等角度采集时间间隔, T 法测速时具有如下角度关系:

$$\Delta\theta = \theta_{A(\times 2)}(i+1) - \theta_{A(\times 2)}(i) = \frac{\pi}{M} \quad (2)$$

式中: $\Delta\theta$ 为角度间隔。用向前差分法^[14-15]计算:

$$\omega_{A(\times 2)}(i) = \frac{\theta_{A(\times 2)}(i+1) - \theta_{A(\times 2)}(i)}{\Delta t(i)} \quad (3)$$

式中: $\omega_{A(\times 2)}$ 为含有误差 IAS 信号; Δt 为时间间隔。被测转轴实际 IAS 信号 ω_0 可表示为:

$$\omega_0(i) = \frac{\varphi_{A(\times 2)}(i+1) - \varphi_{A(\times 2)}(i)}{\Delta t(i)} \quad (4)$$

将式(1)、(2)、(4)代入式(3), 得到含有刻线与细分误差的 IAS 信号:

$$\omega_{A(\times 2)}(i) = \omega_0(i) A_{A(\times 2)}(i) \quad (5)$$

从式(5)中可以看出含有误差的 IAS 信号 $\omega_{A(\times 2)}$ 实际是原 IAS 信号 ω_0 受刻线误差与细分误差的影响, 发生了幅值调制, 其幅值调制函数 $A_{A(\times 2)}$ 为:

$$A_{A(\times 2)}(i) = \frac{\pi}{\pi - M \times (\Delta\varepsilon_A(i) + (-1)^{i+1} \times \xi_A)} \quad (6)$$

式中: $\Delta\varepsilon_A(i) = \varepsilon_A(i+1) - \varepsilon_A(i)$ 。其中幅值调制函数 $A_{A(\times 2)}$ 可由下式进行估计:

$$\tilde{A}_{A(\times 2)}(i) = \frac{\omega_{A(\times 2)}(i)}{S - G(\omega_{A(\times 2)}(i))} \quad (7)$$

式中: $\tilde{A}_{A(\times 2)}$ 为估计得到的幅值调制函数; $S-G(\cdot)$ 为使用 S-G 滤波^[16]对信号进行误差抑制, 当 S-G 滤波器长度为 N 时, 被截取信号可用 $K(K < N)$ 阶多项式表示为:

$$\omega_{A(\times 2)} = e_K + \sum_{k=0}^{K-1} a_k \theta_{A(\times 2)}^k \quad (8)$$

式中: a_0, \dots, a_{K-1} 为多项式系数; e_K 为残差。多项式用矩阵可表示为:

$$\mathbf{W}_{A(\times 2)} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{E} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{W}_{A(\times 2)}$ 为编码器测量得到的 IAS 信号; \mathbf{A} 为多项式系数; \mathbf{C} 为测量角度; \mathbf{E} 为残差。多项式系数 \mathbf{A} 的最小二乘解为:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C})^{-1} \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{W}_{A(\times 2)} \quad (10)$$

经过 S-G 滤波器抑制误差后的 IAS 信号为:

$$\mathbf{W}'_{A(\times 2)} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{W}'_{A(\times 2)}$ 为 S-G 滤波后信号 $\omega'_{A(\times 2)}$ 的矩阵形式。式(6)经变换得到 A 相位的信号宽度误差估计方法:

$$\tilde{\xi}_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([\Delta\theta \times (\tilde{A}_{A(\times 2)}^{-1}(i) - 1) + \Delta\varepsilon_A(i)] \times (-1)^i) \quad (12)$$

式中: $\tilde{\xi}_A$ 为估计得到的信号宽度误差; N 为信号长度。在伺服系统中使用的增量式光学编码器的光栅数一般大于 2000 线, 且由于刻线位置误差的误差分布为随机分布^[1], 故可将式(12)简化为:

$$\tilde{\xi}_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([\Delta\theta \times (\tilde{A}_{A(\times 2)}^{-1}(i) - 1)] \times (-1)^i) \quad (13)$$

令 $\tilde{\varepsilon}_A(1)$ 为参考点, 即 $\tilde{\varepsilon}_A(1) = 0$, 由式(6)可推导出刻线位置误差的估计方法如下:

$$\tilde{\varepsilon}_A(i) = \sum_{k=2}^M [\Delta\theta \times (1 - \tilde{A}_A^{-1}(i)) + (-1)^i \times \tilde{\xi}_A], \quad k = 2, 3, \dots, 2M \quad (14)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}_A$ 为估计得到的刻线误差。由式(1)可对 A 相位的刻线位置误差与信号宽度误差进行补偿:

$$\tilde{\varphi}_{A(\times 2)}(i) = \theta_{A(\times 2)}(i) - \tilde{\varepsilon}_A(i) - \tilde{\xi}_A \times \text{mod}(i+1, 2) \quad (15)$$

式中: $\tilde{\varphi}_{A(\times 2)}$ 为补偿了刻线位置与信号宽度误差后的角度; 同理对 B 相的刻线误差与信号宽度误差补偿得到 $\tilde{\varphi}_{B(\times 2)}$ 。在 4 倍细分下(对 A、B 相位的上升与下降沿进行记录, 使其分辨率 $\times 4$)采集得到 IAS 信号 $\theta_{(\times 4)}$, 并对刻线位置与信号宽度进行补偿, 补偿后的角度 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 与被测转轴实际角度 $\varphi_{(\times 4)}$ 有如下关系:

$$\tilde{\varphi}_{(\times 4)}(i) = \varphi_{(\times 4)} + p \times \text{mod}(i+1, 2) \quad (16)$$

式中: $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 为补偿了刻线位置与信号宽度误差后的角度; $\varphi_{(\times 4)}$ 为被测转轴实际角度; p 为非正交误差。使用 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 计算 IAS 信号 $\omega'_{(\times 4)}$ 其与被测转轴 IAS 信号 $\omega_{(\times 4)}$ 的幅值调制函数为:

$$A_{(\times 4)}(i) = \frac{\pi}{\pi + (-1)^i \times 2Mp} \quad (17)$$

式中: $A_{(\times 4)}$ 为幅值调制函数。由式(17)可得到非正交误差 p 的估计公式:

$$\tilde{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta\theta}{2} \times (\tilde{A}_{(\times 4)}^{-1}(i) - 1) \times (-1)^i \right) \quad (18)$$

式中: $\tilde{A}_{(\times 4)}$ 为估计得到的幅值调制函数, 其估计方法与式(7)相同; \tilde{p} 为估计得到的非正交误差。对刻线误差、

细分误差补偿后的角度 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 为:

$$\tilde{\varphi}_{(\times 4)}(i) = \begin{cases} \theta_{(\times 4)}(i) - \tilde{\varepsilon}_A(i), & \text{mod}(i,4) = 1 \\ \theta_{(\times 4)}(i) - \tilde{\varepsilon}_B(i) - \tilde{p}, & \text{mod}(i,4) = 2 \\ \theta_{(\times 4)}(i) - \tilde{\varepsilon}_A(i) - \tilde{\xi}_A, & \text{mod}(i,4) = 3 \\ \theta_{(\times 4)}(i) - \tilde{\varepsilon}_B(i) - \tilde{\xi}_B - \tilde{p}, & \text{mod}(i,4) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

3 刻线误差与细分误差的补偿

通过对刻线误差与细分误差的建模与分析,得到刻线误差与细分误差补偿方法的流程如图 3 所示,详细步骤如下:

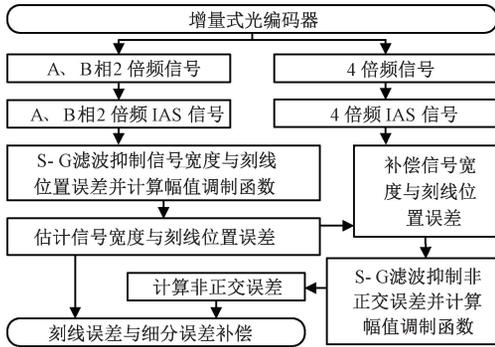


图 3 误差补偿流程

Fig. 3 Error compensation process

1) 在 2 倍细分下对增量式光学编码器的 A、B 相位信号进行采集,得到角度信号 $\theta_A(\times 2)$ 与 $\theta_B(\times 2)$,使用向前差分求 IAS 信号 $\omega_A(\times 2)$ 与 $\omega_B(\times 2)$;

2) 用 S-G 滤波对信号中的误差分量进行抑制,并带入式(7)得到幅值调制函数 $\tilde{A}_{A(\times 2)}$ 和 $\tilde{A}_{B(\times 2)}$;

3) 将 A、B 相幅值调制函数带入式(13)对信号宽度误差 $\tilde{\xi}_A$ 和 $\tilde{\xi}_B$ 进行估计;

4) 将幅值调制函数和信号宽度误差带入式(14)对刻线位置误差 $\tilde{\varepsilon}_A$ 和 $\tilde{\varepsilon}_B$ 进行估计;

5) 在 4 倍细分下对增量式光学编码器进行采集,得到角度信号 $\theta_{(\times 4)}$,利用式(15)对 A、B 相位的刻线位置误差与信号宽度误差进行补偿得到 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$;

6) 使用向前差分求 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 的 IAS 信号,使用 S-G 滤波对信号中的非正交误差进行抑制,并求其幅值调制函数 $\tilde{A}_{(\times 4)}$;

7) 将幅值调制函数 $\tilde{A}_{(\times 4)}$ 带入式(18) 对非正交误差进行估计得到 \tilde{p} ;

8) 用式(19)对刻线与细分误差进行补偿。

4 仿真分析

4.1 仿真信号

在电机运行过程中,电机轴 IAS 信号中会出现与电机磁极对数相对应的频率分量^[17]。令电机磁极对数为 5 (考虑前 3 阶谐波),在 2 倍细分下被测轴 IAS 信号 ω_0 如图 4(a)所示。在 $6.2832 \times 10^{-5} \sim 6.2832 \times 10^{-5}$ rad 范围内生成随机数仿真刻线位置误差如图 4(b)所示,令信号宽度误差 $\xi_A = 1.2566 \times 10^{-4}$ rad, $\xi_B = 1.1310 \times 10^{-4}$ rad,令 A、B 相位的非正交误差 $p = 1.2566 \times 10^{-4}$ rad。将误差参数代入式(1)得 A 相 IAS 信号 $\omega_{A(\times 2)}$ 如图 4(c)所示。

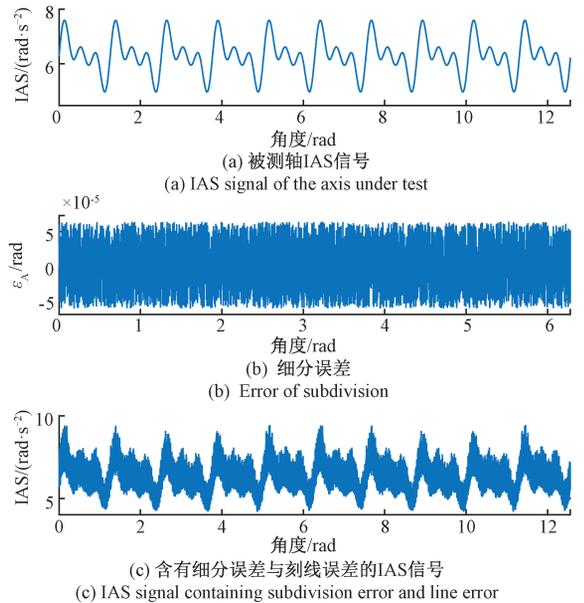


图 4 仿真信号

Fig. 4 Simulation signal

4.2 误差估计与补偿

1) 使用 S-G 滤波进行误差抑制

计算幅值调制函数的过程中,需要对 $\omega_{A(\times 2)}$ 中误差引起的速度波动进行抑制。在使用 S-G 滤波对 IAS 信号进行误差抑制时,一般设置 S-G 滤波器的阶数为 5^[16],当构建一个 S-G 滤波器时,滤波器的长度选取过短会导致误差抑制效果不明显,长度选取过长则会消除信号中急剧变化的分量,在进行了多次实验后,发现将滤波器长度设置为 31 可以较好的对编码器误差进行抑制并保留原始信号的成分。经过 S-G 滤波后得到 $\omega'_{A(\times 2)}$ 如图 5 所示,从图 5 中可以看出使用 S-G 滤波可有效的对刻线与细分误差进行抑制,随后利用式(7)对幅值调制函数 $\tilde{A}_{A(\times 2)}$ 进行估计如图 6 所示。

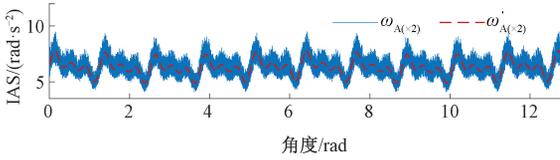


图5 S-G滤波进行误差抑制

Fig. 5 S-G filtering for error suppression

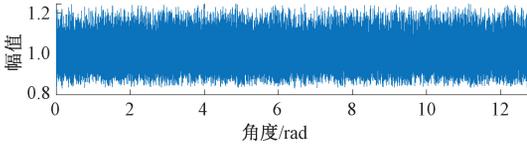


图6 幅值调制函数

Fig. 6 Amplitude modulation function

2) 刻线位置误差与信号宽度误差估计

刻线位置误差是一个周期为 2π 的周期信号,使用角域同步平均(rotation domain averaging, RDA)^[18]可有效提高其信噪,其算法可表示为:

$$\tilde{A}_R(i) = \frac{1}{q} \sum_{r=0}^{q-1} \tilde{A}_{A(\times 2)}(i + 2rM) \quad (20)$$

式中: \tilde{A}_R 为进行 RDA 之后得到的幅值调制函数; q 为平均段数。角域同步平均后的幅值调制如图 7 所示。

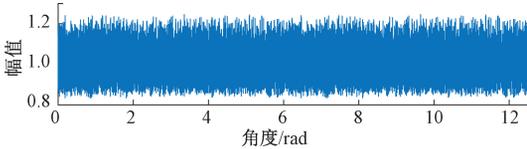


图7 进行 RDA 后的幅值调制函数

Fig. 7 Amplitude modulation function after RDA

将 \tilde{A}_R 带入式 (13) 估计得到信号宽度误差 $\tilde{\xi}_A$ 为 1.2368×10^{-4} rad、 $\tilde{\xi}_B$ 为 1.1281×10^{-4} rad,按式 (14) 对 A 相刻线位置误差 $\tilde{\varepsilon}_A$ 进行估计如图 8(a) 所示,同理对 B 相位进行刻线误差 $\tilde{\varepsilon}_B$ 估计如图 8(b) 所示。4 倍细分下含有刻线与细分误差的 IAS 信号为 $\omega_{(\times 4)}$,进行刻线位置误差与信号宽度误差补偿后得到 $\omega'_{(\times 4)}$ 如图 9(a) 所示,使用式 (18) 对非正交误差进行估计得到 $\tilde{p} = 1.3750 \times 10^{-4}$ rad,对 $\omega'_{(\times 4)}$ 的非正交误差进行补偿后如图 9(d) 所示。

经过上述步骤对增量式光学编码器的刻线与细分误差进行了估计,估计结果如表 1 所示(刻线位置误差如图 9 所示)。

从表 1 与图 9 中可以看出本文所提方法可以精确地对误差模型中的参数进行估计,从而对刻线与细分误差进行较好补偿,提高了编码器的测量精度。

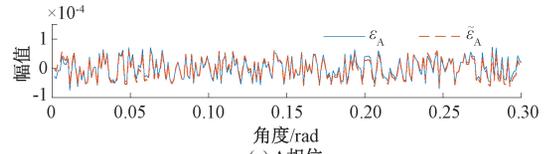
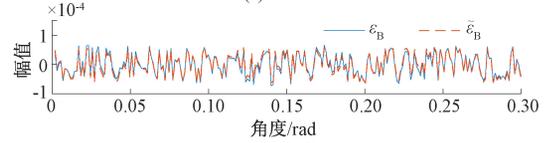
(a) A 相位
(a) Phase A(b) B 相位
(b) Phase B

图8 刻线位置误差

Fig. 8 Marking position error

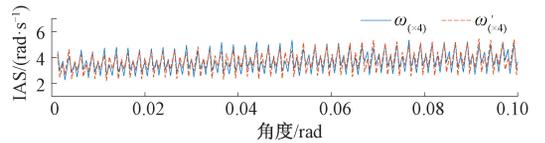
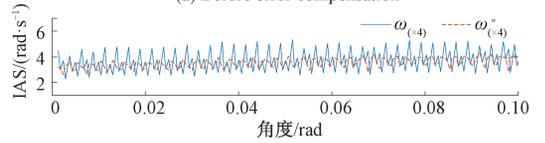
(a) 误差补偿前
(a) Before error compensation(b) 误差补偿后
(b) After error compensation

图9 非正交误差补偿

Fig. 9 Non-orthogonal error compensation

表1 刻线与细分误差参数估计表

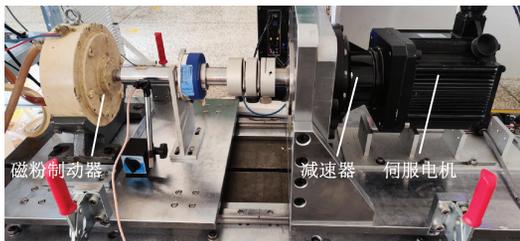
Table 1 Parameter estimation table of line carving and subdivision error

参数	仿真设定值/rad	估计值/rad
A 相信号宽度误差	1.2566×10^{-4}	1.2368×10^{-4}
B 相信号宽度误差	1.1310×10^{-4}	1.1281×10^{-4}
非正交误差	1.2566×10^{-4}	1.3750×10^{-4}

5 实验验证

为验证本文所提方法的有效性,首先在 RV 减速器实验台进行误差估计,随后使用光学旋转平台进行验证, RV 减速器实验台如图 10(a) 所示,由伺服电机、RV 减速器、磁粉制动器、增量式光学编码器(型号为 VIA48T9;光栅数 $M = 2500$ 线;最小角分辨率为 $3.6 \times 10^{-2}^\circ$)、IAS 信号采集卡等组成。增量式光学编码器被安装于伺服电机末端如图 10(b) 所示,IAS 采集卡如图 10(c) 所示。控制伺服电机在约 15 r/min 的转速下运行,并使用 IAS 信号采集卡对伺服电机的增量式编码器信号进行采集(IAS

采集卡输出的数据结构如图 11 所示)。在 2 倍细分下对 A、B 相时间差与角度进行采集,随后带入式(3)计算 IAS 信号 $\omega_{A(\times 2)}$ 与 $\omega_{B(\times 2)}$, 其中 A 相位 IAS 信号如图 12 所示。随后使用 S-G 滤波(滤波长度为 31、阶数为 5)对 A、B 相 IAS 信号的误差进行抑制得到 $\omega'_{A(\times 2)}$ 和 $\omega'_{B(\times 2)}$ 如图 13(a)、(b)所示。值得注意的是,由于 S-G 滤波特性, IAS 信号中的一些急剧变化的成分也会被滤除^[19-20], 从而导致对原信号的逼近存在误差,因此在误差参数估计时,应控制电机在低速(低于 120 r/min)平稳工况下运行避免速度突变的产生,以减小估计误差。将 S-G 滤波后的 IAS 信号与原信号带入式(7)得到 A、B 相幅值调制函数,为进一步提高信噪比,对幅值调制函数进行角域同步平均如图 14(a)、(b)所示。将幅值调制函数带入式(13)对信号宽度误差进行估计得到 $\xi_A = -1.388 5 \times 10^{-5}$ rad、 $\xi_B = 2.124 8 \times 10^{-5}$ rad。将 A、B 相幅值调制函数、信号宽度误差带入式(14)对刻线位置误差进行估计,其结果如图 15(a)、(b)所示,对角度 $\theta_{A(\times 2)}$ 、 $\theta_{B(\times 2)}$ 进行刻线位置误差与信号宽度误差补偿后计算其 IAS 信号 $\omega''_{A(\times 2)}$ 和 $\omega''_{B(\times 2)}$, 如图 16(a)、(b)所示。从图 16 中可以看出使用估计的刻线位置误差与信号宽度误差可以有效补偿 IAS 信号中误差引起的速度波动。使用 IAS 信号采集卡在 4 倍细分下对编码器采集得到角度 $\theta_{(\times 4)}$, 利用在 2 倍细分下估计得到的刻线位置误差与细分误差对角度 $\theta_{(\times 4)}$ 进行补偿得到 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$, 将 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$ 带入式(3)得到 IAS 信号 $\omega'_{(\times 4)}$, 用 S-G 滤波对非正交误差进行抑制得到 IAS 信号 $\omega''_{(\times 4)}$, 利用 IAS 信号 $\omega'_{(\times 4)}$ 与 $\omega''_{(\times 4)}$ 计算幅值调制函数 $\bar{A}_{(\times 4)}$, 将 $\bar{A}_{(\times 4)}$ 带入式(18)估计得到非正交误差 $\tilde{p} = 1.006 8 \times 10^{-5}$ rad。将估计的刻线与细分误差带入式(19)对 4 倍细分下的角度信号进行补偿得到 $\tilde{\varphi}_{(\times 4)}$, 其 IAS 信号如图 17 所示。



(a) 机器人关节传动试验台
(a) Robot joint transmission test bed



(b) 增量式光编码器
(b) Incremental optical encoder



(c) IAS信号采集卡
(c) IAS signal acquisition card

图 10 RV 减速器实验台
Fig. 10 RV reducer test rig

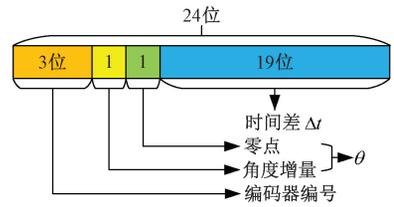


图 11 IAS 信号采集卡数据结构

Fig. 11 Data structure of IAS signal acquisition card

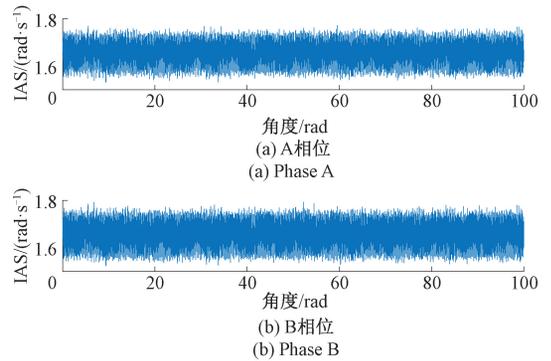


图 12 IAS 信号

Fig. 12 IAS signal

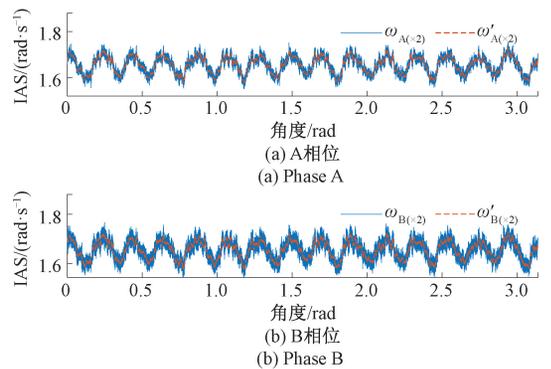


图 13 S-G 滤波抑制编码器误差

Fig. 13 S-G filter to suppress encoder error

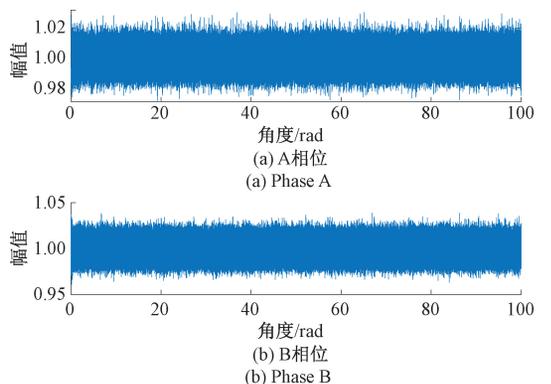


图 14 幅值调制函数

Fig. 14 Amplitude modulation function

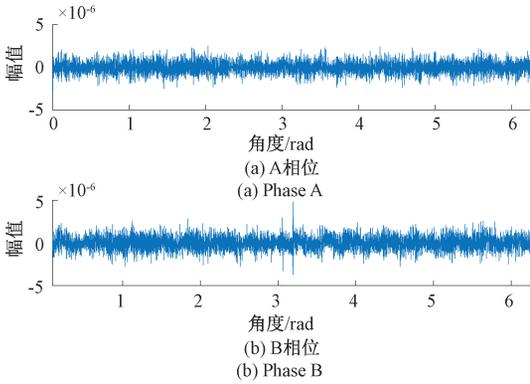


图 15 刻线位置误差

Fig. 15 Line position error

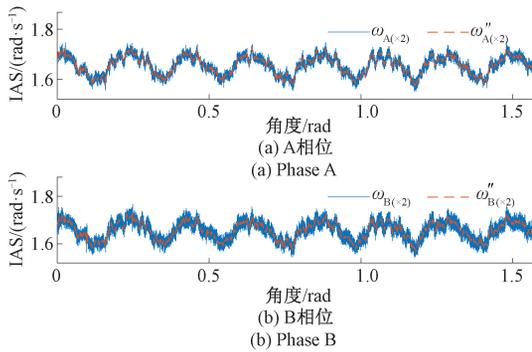


图 16 补偿刻线位置与信号宽度误差后的 IAS 信号

Fig. 16 The IAS signal after compensating the error between the position of the line and the signal width

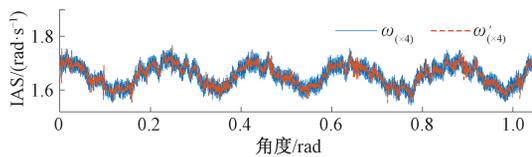


图 17 补偿刻线与细分误差后的 IAS 信号

Fig. 17 IAS signal after compensating for line cutting and subdivision errors

为验证本文所提误差补偿方法,使用光学旋转平台(最小角分辨率为 $8 \times 10^{-6} \circ$,绝对定位精度为 $8 \times 10^{-5} \circ$,重复定位精度为 $1.6 \times 10^{-4} \circ$)对增量式光学编码器进行测量,光学旋转平台如图 18 所示,主要由伺服电机、减速器(减速比为 1:25)、光学旋转平台(减速比为 1:180)、被测编码器、编码器支架等组成。实验时驱动伺服电机使光学旋转平台旋转,并同时读取伺服电机编码器角度 θ_1 与被标定编码器角度 θ_2 ,被标定编码器的角度误差 e 可表示为:

$$e = \theta_2 - \frac{\theta_1}{r} \quad (21)$$

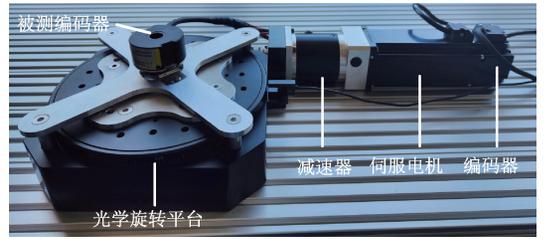


图 18 光学旋转平台

Fig. 18 Optical rotating platform

式中: e 为被标定编码器角度误差; θ_2 为被标定编码器角度; θ_1 为电机端编码器角度; r 为光学旋转平台传动比,本文所用旋转平台传动比为 4 500(25×180)。使用光学旋转平台对编码器进行标定,并利用式(21)对编码器误差进行计算,随后使用估计得到的刻线与细分误差对编码器进行补偿,补偿前后的角度误差如图 19 所示。使用均方根误差(root mean square error, RMSE)对补偿前后的编码器误差进行评价,误差补偿前的均方根误差为 1.8925×10^{-5} rad,补偿后的均方根误差为 0.7085×10^{-5} rad,使用本文所提误差补偿方法补偿了近 62.56%的编码器误差,补偿前后 RMSE 如图 19 所示。均方根误差公式如下:

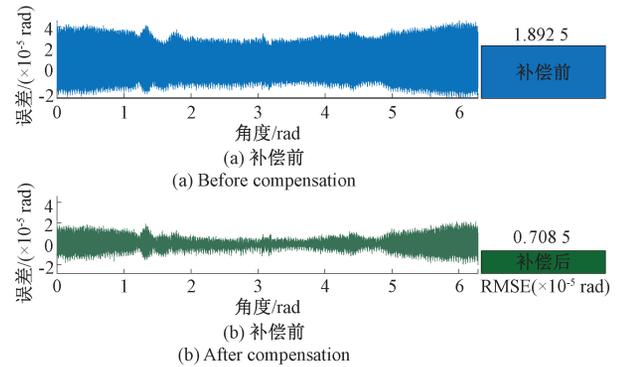


图 19 误差检测

Fig. 19 Error detection

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2} \quad (22)$$

式中: $RMSE$ 为均方根误差; N 为数据长度。从图 19 中可以看出,本文所提误差补偿方法可以有效的对增量式光学编码器的刻线与细分误差进行补偿,提高编码器角度测量精度。

6 结 论

本文建立了增量式光学编码器的刻线与细分误差模型,推导了使用 IAS 信号对增量式光学编码器刻线与细分误差的补偿方法。通过仿真与实验相结合对误差模

型的正确性与误差补偿方法的有效性进行了验证。相比现有方法,本文所提误差估计与补偿方法相比传统误差补偿方法具有无需拆装、效率高、可实时补偿、通用性强等特点。但由于的 S-G 滤波器特性,本文所提误差补偿方法需要设备在低速平稳的状态下进行误差估计,这导致其使用范围受到了限制,后续将针对刻线与细分误差对 IAS 信号波动的影响设计专用的滤波器或拟合方法,开展复杂工况下增量式光学编码器的误差补偿方法研究。

参考文献

- [1] 李晓天. 机械刻划光栅刻线误差及其修正方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2013.
LI X T. Machine-ruling grating's line error and its correction method [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [2] TAN K K, ZHOU H X, TONG H L. New interpolation method for quadrature encoder signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5):1073-1079.
- [3] ZHANG Z Y, SHI S D, REN Y J, et al. Signal processing method for measurement of sub-period speed fluctuation[J]. Measurement, 2021, 183: 109835.
- [4] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 598-604.
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4):598-604.
- [5] 齐永岳, 赵美蓉, 林玉池. 提高激光干涉测量系统精度的方法与途径[J]. 天津大学学报, 2006, 39(8): 989-993.
QI Y Y, ZHAO M R, LING Y CH. Methods of improving accuracy of laser interferometry system [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(8):989-993.
- [6] WATANABE T, FUJIMOTO H, MASUDA T. Self-calibratable rotary encoder [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2016, 82(9): 792-796.
- [7] JUST A, KRAUSE M, PROBST R, et al. Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder[J]. Precision Engineering and Nanotechnology, 2009, 33(4): 530-533.
- [8] 熊文卓, 孔智勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1745-1748.
- [9] 李尢丽, 薛梓, 黄焱, 等. 圆光栅测角系统示值误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5):59-65.
LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5):59-65.
- [10] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2479-2484.
AI CH G, CHU M, SUN H X, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2479-2484.
- [11] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2459-2464.
FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11):2459-2464.
- [12] 张玉皓, 顾煜炯, 马晓腾, 等. 广义增量编码器瞬时角速度计算的扭振在线测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 187-195.
ZHANG Y H, GU Y J, MA X T, et al. On line torsional vibration measurement based on generalized incremental encoder instantaneous angular speed calculation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 187-195.
- [13] RALLO G, FORMENTIN S, SAVARESI S M. On-line model-based wheel speed filtering for geometrical error compensation[J]. Mechatronics, 2018, 50: 189-195.
- [14] WANG B, DING C. Transient feature identification from internal encoder signal for fault detection of planetary gearboxes under variable speed conditions-Science direct [J]. Measurement, 2020, 171: 108761.

- [15] SAVARESI D, CENTURIONI M, FORMENTIN S, et al. On speed estimation from incremental encoders with tunable error bounds [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(14): 179-184.
- [16] ZHAO M, JIA X D, LIN J, et al. Instantaneous speed jitter detection via encoder signal and its application for the diagnosis of planetary gearbox [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2018, 98(1): 16-31.
- [17] 方瑞明, 郑力新, 马宏忠, 等. 基于 MCSA 和 SVM 的异步电机转子故障诊断 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 252-257.
- FANG R M, ZHENG L X, MA H ZH, et al. Fault diagnosis for rotor of induction machine based on MCSA and SVM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 252-257.
- [18] GUO Y, ZHAO L, WU X, et al. Vibration separation technique based localized tooth fault detection of planetary gear sets: A tutorial [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129(15): 130-147.
- [19] JARDIM R, MORGADO D F. Savitzky Golay filtering as image noise reduction with sharp color reset [J]. Microprocessors and Microsystems, 2020, 74: 10300.
- [20] SCHAFFER R W. On the frequency-domain properties of Savitzky-Golay filters [C]. International Conference on Digital Signal Processing, IEEE Digital Signal Processing and Signal Processing Education, 2011: 54-59.

作者简介



E-mail: 1925417080@qq.com

Yin Xingchao received his B.Sc. degree from Yansan University in 2019 and received his M.Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include high-precision IAS signal acquisition and its application in joint fault diagnosis of industrial robots.



E-mail: kmgary@163.com

Guo Yu (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 1993, received his M.Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 1996, and received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2003. He is currently a professor at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include mechanical dynamic testing technology, vibration analysis and other fields.

尹兴超, 2019 年于燕山大学获得学士学位, 2022 年于昆明理工大学获得硕士学位, 现为昆明理工大学机电工程学院博士生, 主要研究方向为高精度 IAS 信号获取及其在工业机器人关节故障诊断中的运用。

郭瑜 (通信作者), 1993 年于昆明理工大学获得学士学位, 1996 年于昆明理工大学获得硕士学位, 2003 年于重庆大学获得博士学位, 现为昆明理工大学机电工程学院教授, 主要研究方向为机械动态测试技术、振动分析等领域。