

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.047

煤炭采样机械臂 CAN 控制中信号传输畸变补偿技术

丁会成¹, 陈红卫¹, 高小普²

(1. 国能宁东第二发电有限公司, 宁夏 灵武 750411 ;

2. 南京国电环保科技有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要:针对煤炭采样机械臂在 CAN 协议下驱动信号变量与关节信号变量之间的正、逆向求解模型复杂, 各信号之间在运动学耦合干扰, 使得信号传输畸变严重的问题, 提出一种煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术。引入分形分析(DFA)方法, 对 EEMD 分解后的 IMF 分量展开分解, 并在分解过程中加入 DFA 方法。根据 DFA 方法确定二级分量, 利用 DFA 方法对本次分解后的 IMF 分量展开处理, 获得尺度指数可以分辨出有用分量和畸变分量信号; 通过修正畸变信号的幅值和相位, 消除信号传输过程中的失真和延迟, 实现对信号传输畸变的补偿。实验结果表明: 该方法的信号处理效果好、信号补偿精度高。

关键词:机械臂; CAN; 信号补偿; 集合经验模态分解; Lissajou 图

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0243-05

Compensation Technology for Distortion of CAN Control Signal Transmission in Coal Sampling Robot Arm

DING Huicheng¹, CHEN Hongwei¹, GAO Xiaopu²

(1. Guoneng Ningdong No.2 Power Generation Co., Ltd., Lingwu 750411, China;

2. Nanjing Guodian Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: To solve the problem of the serious transmission distortion of the transmission signal of CAN protocol coal sampling robotic arm due to complexity of forward and reverse solution models between the driving signal variables and the joint signal variables and kinematic coupling interference between each signal, a coal sampling robotic arm CAN control signal transmission distortion compensation technology is proposed. The fractal analysis (DFA) method is introduced to decompose the IMF components after EEMD decomposition, and the DFA method is added during the decomposition process to determine the secondary components. The DFA method is applied to process the IMF components after the decomposition, a scale index capable of distinguishing useful and distorted component signals is obtained. The amplitude and phase of distorted signals are corrected to eliminate distortion and delay in signal transmission and achieve the compensation for signal transmission distortion. The experimental results show that the proposed method has good signal processing effect and high signal compensation accuracy.

Keywords: mechanical arm; CAN; signal compensation; set empirical mode decomposition; Lissajou diagram

0 引言

采样机械臂作为煤炭采样过程中的关键工具, 其内部信号传输的畸变问题直接影响到煤炭采样的准确性和效率^[1]。因此, 对煤炭采样机械臂信号传输畸变进行研究十分重要。

卢俊等^[2]通过同步信号确定目标回波信号时延, 从中选出单频信号段, 并基于多普勒因子展开信号补偿, 该方法对信号幅值偏差的补偿效果较差, 且降低了信号的整体补偿效果。徐珂等^[3]首先对信号背景展开去噪处理来补偿信号平坦度,

进而确定积分次数以去除噪声并获得补偿后信号, 该方法对信号的降噪效果较差, 影响了后续的信号补偿效果。陈广森等^[4]根据同轴电缆的输出信号以及 S 参数对输入信号展开重构, 通过维纳滤波法对其中 3 种不同的信号展开传输畸变补偿, 该方法对信号补偿的误差较大, 补偿精度较低。

煤炭采样机械臂在 CAN 协议下的驱动信号数量大于总自由度时, 机械臂控制信号从驱动空间到关节空间的运动学存在非线性、非一致性映射, 导致驱动信号变量与关节信号变量之间的

第一作者简介: 丁会成(1979—), 男, 回族, 宁夏青铜峡人, 工程师, 本科, 研究方向为燃料智能化建设及系统优化, 1783146750@qq.com。

正、逆向求解模型复杂,各信号之间存在运动学耦合干扰,使得煤炭采样机械臂的传输信号传输畸变严重。为了解决上述方法中存在的问题,本文提出煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术。

1 煤炭机械臂信号降噪及传输畸变补偿方法

1.1 机械臂控制畸变信号的提纯

利用集合经验模态分解对第一次经过 EEMD 分解后噪声较多的 IMF 分量展开分解,并在分解过程中加入 DFA 方法,根据 DFA 方法确定二级分量,利用 DFA 方法对本次分解后的 IMF 分量 $o_{2i}(n)$ 展开处理,获得尺度指数并将其标记为 β_{2i} 。设置 l_{μ}^* 为 IMF 序数值,可以分辨出有用分量畸变机械臂控制信号和噪声分量,具体描述如下:

$$\begin{cases} l_{\mu}^* = \max \{ l_{\mu} | \beta_{2i, \mu} < \rho_{\mu} \} \\ \rho_{\mu} = 0.56 - 0.2\beta_{2i} \end{cases} \quad (1)$$

式中 μ 表示首次分解过程中去除的分量对应的序号,且 $\mu \in [1, w]$, w 是首次分解过程中分辨有用分量以及噪声分量的 IMF 序号。

为了确定经 EEMD 算法展开第一次和第二次分解中的尺度分量关系,利用第一次经 EEMD 处理后的 IMF 分量对应的尺度指数 β_{2i} 定义 ρ_{μ} 。经第二次 EEMD 算法处理,在获得有用信号较多的分量之后,分别对两次分解获取的有用分量展开重构,得到信号 $u'(n)$ 定义如下:

$$\begin{cases} u'(n) = d(n) + \sum_{i=w}^{Q_1-1} o_{1i}(n) + t_{Q_1}(n) \\ d(n) = \sum_{i=L_1}^{Q_2^1-1} o_{2i}(n) + t_{Q_2^1}(n) + \dots + \sum_{i=L_{\mu}^*}^{Q_2^{\mu}-1} o_{2i}(n) + \\ t_{Q_2^{\mu}}(n) + \dots + \sum_{i=L_{w-1}}^{Q_2^{w-1}-1} o_{2i}(n) + t_{Q_2^{w-1}}(n) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_{Q_1}(n)$ 和 Q_1 分别为第一次经 EEMD 分解得到的余量和分量数量; $t_{Q_2}(n)$ 和 Q_2 分别为第二次经 EEMD 分解得到的余量和分量数量; Q_2 的上标 $1, \mu$ 和 $w-1$ 为分量的数量。

以上方法能够自动找出第二次 EEMD 分解中的有用分量,对机械臂系统中的控制畸变信号展开提纯重构,完成机械臂系统畸变控制信号的提纯^[5-7],从而提高其控制效果。

EEMD-M 信号提纯方法的具体设计思路

如下:

1) 利用 EEMD 算法对原始信号 $u(n) = c(n) + \iota(n)$ 展开首次分解,获得 IMF 分量,式中的 $c(n)$ 为纯净信号, $\iota(n)$ 为噪声信号;

2) 基于相关系数原理,筛选上述得到的分解结果,确定首次 EEMD 分解中噪声较多的 IMF 分量 $o_{1i}(n)$, 完成机械臂系统信号的初次降噪;

3) 针对首次分解后的信号中噪声较多的分量展开第二次 EEMD 分解,得到 IMF 分量 $o_{2i}(n)$;

4) 在 $o_{2i}(n)$ 中引入 DFA 方法,获得各个信号分量的尺度分量,将其用 β 表示,根据式(1)确定二次 EEMD 分解过程中有用信号较多的 IMF 分量;

5) 根据式(2)对信号展开重构,得到最终去除噪声的纯净信号 $u'(n)$, 提高信号质量和准确性。

1.2 提纯处理后信号传输畸变补偿算法

煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术,通过对经过二次噪声抑制处理后信号的幅值和相位两个方面展开补偿,完成信号传输畸变补偿。

1) 幅值补偿

为了提高机械臂的煤炭采样效率,机械臂系统中的信号可利用细分处理方法来提高其测角分辨力。细分方法以正弦信号和余弦信号为基础,设定 p 表示正弦信号和余弦信号对应的幅值,则正弦信号 p_s 和余弦信号 p_q 的定义如下:

$$\begin{cases} p_s = p \sin \vartheta \\ p_q = p \sin(\vartheta + 90^\circ) = p \cos \vartheta \end{cases} \quad (3)$$

式中 ϑ 表示相角,且 $\vartheta = \arctan(p_s/p_q)$ 。

因为机械臂系统中的信号参数(相位、幅值等)和处理电路参数之间的匹配度较低,导致两路信号中含有一些误差和噪声,产生非理想化的两路信号 p_s 和 p_q , p_s 和 p_q 的定义如下:

$$\begin{cases} p_s = p_{s_0} + p_{s_1} \sin \vartheta \\ p_q = p_{q_0} + p_{q_1} \sin(\vartheta + \varphi_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ_q 表示相关角。因为计算法插值计算细分是以相角 ϑ 的公式为基础,所以式(4)中的计算结果会存在细分误差。编码器误差形成的关键就在于细分误差。细分误差包括谐波分量、直流分量、噪声、信号幅值、相位以及量化中误差类型。

对机械臂系统中信号的幅值展开补偿能够有效降低信号幅值和直流分量因素造成的误差,但由于读数头的输出信号缺少调整,导致各路正弦

信号在经过放大后其直流电平以及幅值发生变化而不再相同,此时设置 Z_{amp} 为正弦信号的软件放大倍数, B_a 为正弦信号的直流电平,并对 Z_{amp} 和 B_a 展开计算,以实现机械臂系统的两路正弦信号 \sin 、 \cos 经补偿后的直流电平以及幅值一致。设定 I_{max} 表示补偿前的正弦信号峰值, I_{min} 表示补偿前的正弦信号谷值,通过对 I_{max} 和 I_{min} 展开计算可以得出 Z_{amp} 和 B_a , Z_{amp} 和 B_a 的定义如下:

$$\begin{cases} B_a = (I_{max} - I_{min})/2 + p_s I_{min} \\ Z_{amp} = B_{out} p_q / (I_{max} - I_{min}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 B_{out} 表示直流电平相关参数。

通过得到的 Z_{amp} 和 B_a 对正弦信号展开补偿,将正弦信号的 A/D 量与 B_a 相减,再将结果与 Z_{amp} 相乘,以实现正弦信号直流电平与幅值的补偿。

2) 相位补偿

利用差分放大可以使莫尔条纹信号近似于正弦曲线,为提高细分的准确率,需要使进入细分的 \sin 与 \cos 保持较高的正交性,即 \sin 与 \cos 的相位保持 90° 差值。但由于机械臂系统在控制过程中存在误差,造成信号相位差无法保证为 90° ,两路信号无法实现正交,从而导致原本呈现圆形的 Lissajou 图变为椭圆形。由于在所有误差中,不正交形成的误差对细分的影响最大,因此需要展开以下处理。

设定 γ 表示 \sin 与 \cos 的相位偏差,此时两路信号的相位差值是 $90^\circ - \gamma$,则两路信号的定义为

$$\begin{cases} p_s = p \sin \vartheta \\ p_q = p \cos(\vartheta + \gamma) \end{cases} \quad (6)$$

将 \sin 路的信号视为参考信号,此时 \cos 路信号与期望信号的相位 γ 相比较为落后。在对信号展开细分处理之前先对 \cos 路信号的相位展开补偿,以确保 \sin 路与 \cos 路的信号正交。

基于泰勒公式得到函数 $g(x+x_0)$ 的描述如下:

$$g(x+x_0) = g(x) + g'(x)x_0 + \frac{g''(x)}{2!}x_0^2 + \dots + \frac{g^{(n)}(x)}{n!}x_0^n \quad (7)$$

式中 x 表示信号点对应的横坐标。根据式(7)对 $\cos(\vartheta + \gamma)$ 展开处理,得到式(8)如下:

$$\cos(\vartheta + \gamma) = \cos \vartheta - \sin \vartheta \cdot \gamma - \cos \vartheta \cdot \gamma^2/2 \dots \quad (8)$$

如果 $\gamma < 15^\circ$ ($\gamma < 0.26 \text{ rad}$),表示此时二阶分量已经达到极小值,为将式(8)展开简化处理,选择一阶算法如下:

$$\cos(\vartheta + \gamma) = \cos \vartheta - \sin \vartheta \cdot \gamma \quad (9)$$

则 $\cos \vartheta = \cos(\vartheta + \gamma) + \sin \vartheta \cdot \gamma$,利用相位补偿后的

$\cos \vartheta$ 信号对相角 ϑ 的公式展开计算。

在煤炭采样机械臂的实际应用中,利用 A/D 转换器可以获取 $\cos(\vartheta + \gamma)$ 与 $\sin \vartheta$,通过 Lissajou 图形分析技术,按照 γ 的特殊点模长能够获得相位差 γ 的值。

利用机械臂系统中的数据信号绘制 Lissajou 图形,并对其中采样信号到中心点的距离模长展开计算,Lissajou 示意图如图 1 所示,根据软件插值方法确定图形中短轴 N 和长轴 S 对应的模长。

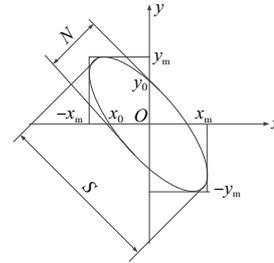


图 1 相位差求解图

如果 \sin 路与 \cos 路的信号相位偏离等于 90° ,则 Lissajou 图形为椭圆形,图形中长轴与短轴的比例和信号相位差的反正切呈现正比关系,此时通过下式可以得出信号的相位差 γ :

$$\gamma = 2 \arctan(N/S) \quad (10)$$

根据上式计算结果对相位展开补偿,使其达到理想状态。综合利用幅值补偿和相位补偿这两个方面的处理,机械臂系统的采样精度可以得到有效提高。通过消除信号传输过程中的畸变,可以保证传输的信号与原始信号的一致性,从而提高机械臂系统的数据采集质量。

2 实验与分析

为了验证煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术的整体有效性,需要对其展开测试。将 ABB IRB 1200 煤炭采样机械臂系统连接到 Peak System PCAN-USB 控制器上。配置控制器与机械臂之间的通信连接,确保二者正常通信。设置实验参数:采样频率分别为 100 Hz、500 Hz、1 kHz、10 kHz;传输速率(CAN 总线速率)分别为 125 kB/s、250 kB/s、500 kB/s、1 MB/s;峰值补偿值为 0.2 V;谷值补偿值为 0.1 V;相位偏差为 30° ;相位补偿量为 -15° 。

将 Tektronix AFG31000 模拟信号发生器连接到煤炭采样机械臂系统的输入端口。使用 Tektronix TBS1000 示波器进行观察和记录监测煤炭采样机械臂系统的输出信号和实际输入信号。

将示波器的输出连接至 A/D 转换器,使得信号可以进行数字化处理和记录。启动煤炭采样机械臂系统和数据记录设备,并确保数据记录设备能够准确记录示波器输出的数字化信号。

1) 信号处理效果

由于从机械臂系统中采集到的有用信号中混着大量噪声信号,使得有用信号难以被准确分辨,从而影响后续的信号补偿效果。因此,现利用煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术、文献[3]方法和文献[4]方法对采集到的信号展开处理,3 种方法的处理效果如图 2 所示。

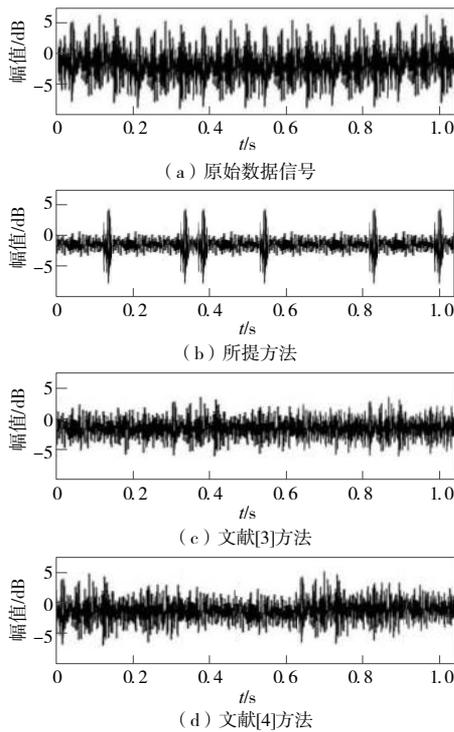


图 2 信号处理效果

根据图 2 可知,按文献[3]和文献[4]方法处理后的信号中仍存在较多噪声,无法分辨出有用信号;而所提方法能够有效清除图 2(a)中的噪声信号。从所提方法处理后的小波信号图中能够清晰看出有用信号。这是由于所提方法中采用了相关系数筛选和信号重构两个步骤。相关系数筛选能够识别噪声较多的分量并排除其影响;而信号展开重构则会去除噪声分量,使得最终的信号更加干净和准确。因此,所提方法对噪声的处理效果更好,更利于后续的信号补偿工作。

2) 信号补偿误差

在机械臂系统的信号传输过程中,设置 ϕ 表示机械臂系统中采集到的原始信号和补偿信号之间形成的误差,则根据误差 ϕ 的大小可以判断出

信号补偿方法的补偿精度。 ϕ 值越大,表明信号补偿精度越低;相反, ϕ 值越小,表明信号补偿精度越高。误差 ϕ 的定义如下:

$$\phi = (\|C_i - C_j\| / \|C_i\|) \times 100\% \quad (11)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为任意向量的欧几里得范数,通常为 $L2$ 范数; C_i 为采集到的原始信号的向量形式; C_j 为补偿信号的向量形式。

根据式(11),对煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术、文献[3]方法和文献[4]方法的误差展开计算,其结果如图 3 所示。

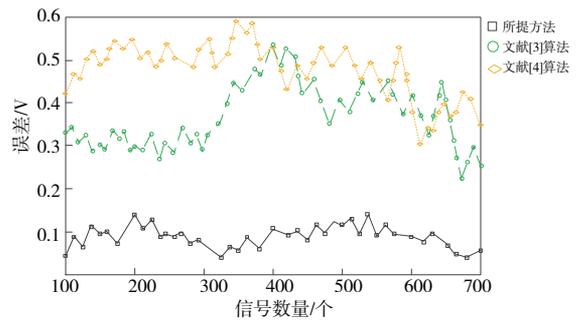


图 3 误差对比图

由图 3 可得,所提方法的误差波动幅度较小,实现了对信号传输畸变的整体补偿,提高了信号的准确性和稳定性。

3) 信号补偿时序图

将补偿前后的信号制作成时序图,其时序图如图 4 所示。

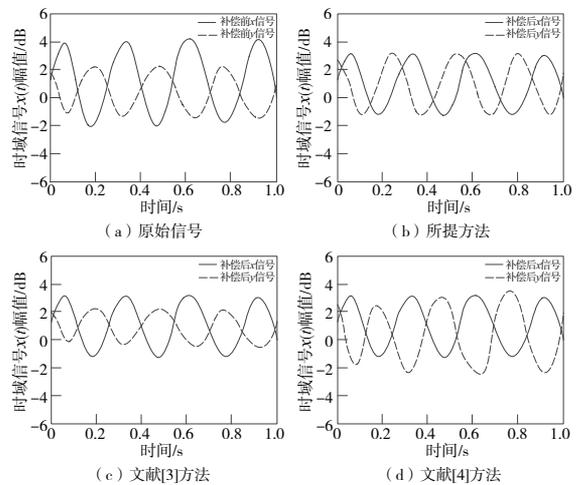


图 4 信号补偿时序图

由图 4 可知,所提方法能够有效补偿机械臂系统中的信号幅值,即所提方法的信号补偿效果更好。

4) 信号补偿 Lissajou 图

将以上 3 种方法的信号补偿效果绘制成

Lissajou 图形。Lissajou 图中的曲线越接近圆形,表明该方法的信号补偿效果越好,不同方法的 Lissajou 图形如图 5 所示。

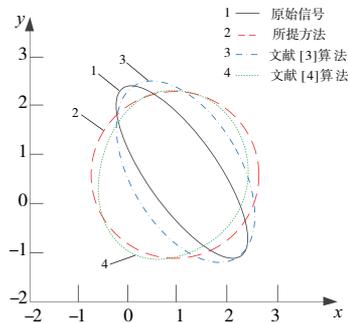


图 5 信号补偿 Lissajou 图

分析图 5 可知,原始图像的正交相位误差较大且呈现椭圆形,经所提方法展开处理后的信号接近于圆形:表明正弦信号的正交相位误差得到了较好的补偿。

3 结语

目前的信号补偿方法存在信号处理效果差、补偿效果差和补偿误差大等问题。为解决上述问题,提出了一种煤炭采样机械臂 CAN 控制信号传输畸变补偿技术。经验证得到以下结论:

- 1) 该方法能够有效清除噪声信号,使得有用信号更加清晰可辨,具有较好的信号处理效果;
- 2) 该方法误差波动幅度较小,具有较高的信

号补偿精度和稳定性;

3) 该方法能够有效补偿机械臂系统中信号的幅值偏差,使得补偿后的信号幅值更加一致;

4) 该方法能够较好地补偿正交相位误差,使得信号形成的曲线更加接近圆形。

参考文献:

- [1] 姚兴岭,张亮,张淑坤. 基于挖掘力模型的采样机械臂运动位姿节能控制研究[J]. 中国工程机械学报, 2021,19(4):318-323.
- [2] 卢俊,张群飞,史文涛,等. 基于通信信号的水下目标主动探测多普勒估计与补偿方法[J]. 西北工业大学学报,2021,39(5):962-970.
- [3] 徐珂,尚自乾,严发宝,等. 毫米波宽带太阳射电观测系统的信号平坦度补偿方法[J]. 中国科学:技术科学,2021,51(4):413-423.
- [4] 陈广森,秦风,高原. 基于维纳滤波的同轴电缆脉冲信号传输畸变补偿研究[J]. 强激光与粒子束,2021,33(12):173-178.
- [5] 何慰,方勇纯,梁潇,等. 一种两自由度飞行机械臂系统的设计与实现[J]. 航空学报,2021,42(2):324280.
- [6] 吴勇,朱建军,邹奔. EEMD 改进算法在异步电机轴承故障诊断中的应用[J]. 中国舰船研究,2022,17(6):111-117.
- [7] 马星河,孔卫东,李自强,等. 一种基于 S_VMD 与 Sdr_SampEn 的局部放电信号去噪方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(18):29-38.

收稿日期:2023-08-10

(上接第 242 页)

参考文献:

- [1] 徐伟强. 工业环境下人机协作过程中机器人主动安全策略研究[D]. 南昌:华东交通大学,2023.
- [2] SHARKAWY A N, MOSTFA A A. Neural networks design and training for safe human-robot cooperation[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2022, 34(8):582-596.
- [3] 张堃,刘志诚,刘纪元,等. 面向人机协作系统的上肢姿态精准识别算法研究[J]. 仪器仪表学报,2023, 44(1):275-282.
- [4] 张蕊,杨冬,沈永旺,等. 基于 GA-BP 神经网络的接触式人机协作意图理解方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(11):86-91.
- [5] 张蕊. 基于触力觉融合信息的人机交互与柔顺控制方法研究[D]. 天津:河北工业大学,2019.

- [6] CAI Z Y, FENG Z Q, ZHOU L R, et al. A framework and algorithm for human-robot collaboration based on multimodal reinforcement learning [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022:2341898.
- [7] 姚启,缪新颖. 基于主成分分析及 GA-LM 的水产养殖环境溶解氧和氨氮含量预测[J]. 大连海洋大学学报,2021,36(5):851-858.
- [8] 汪卫,陈建政,吴越. 基于 GA-LSMT 的轮轨力连续测量研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4):111-118.
- [9] LU Q, LIU S, LI W, et al. Combination of thermodynamic knowledge and multilayer feedforward neural networks for accurate prediction of M S temperature in steels [J]. Materials and Design, 2020, 192:108696.

收稿日期:2024-10-16