

控制与决策

Control and Decision

基于对偶观测器的谐波提取方法

文新宇, 王震, 张文康, 孙金刚

引用本文:

文新宇, 王震, 张文康, 孙金刚. 基于对偶观测器的谐波提取方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1847–1852.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1517>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种反向递推正弦干扰观测器的设计方法

Design method of reverse recursive sinusoidal disturbance observer

控制与决策. 2021, 36(2): 403–410 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

基于对偶观测器的谐波提取方法

文新宇^{1†}, 王震¹, 张文康¹, 孙金刚²

(1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024; 2. 尼得科电机(青岛)有限公司, 山东 青岛 266300)

摘要: 提出一种基于对偶观测器的标准正弦信号提取方法. 将受到谐波干扰的信号通过一种辅助滤波器得到与谐波频率相关的可测变量; 然后利用对偶关系将受干扰信号分解为已知函数和受标准正弦信号驱动的待估项; 进而构造观测器估计未知参数, 直接对标准正弦信号进行重构. 该方法可以将谐波信号表示为关于辅助变量的参数形式, 直接建立频率与干扰谐波之间关系, 实现标准信号与干扰谐波的分离. 由于只需要估计受标准正弦信号驱动的未知参数, 很大程度上可以降低计算复杂度. 利用李雅普诺夫稳定性理论证明: 当不存在有界噪声时, 这种观测器可以渐近跟踪标准频率信号; 在多源干扰环境下, 观测器误差动态满足一致最终有界特性. 仿真结果验证了该对偶观测结构的有效性.

关键词: 辅助滤波器; 对偶观测器; 正弦信号; 谐波提取; 多源干扰; 渐近稳定; 一致最终有界

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1517

引用格式: 文新宇, 王震, 张文康, 等. 基于对偶观测器的谐波提取方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1847-1852.

Harmonic extraction method based on dual observer

WEN Xin-yu^{1†}, WANG Zhen¹, ZHANG Wen-kang¹, SUN Jin-gang²

(1. Electronic Information Engineering College, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Nico Motor (Qingdao) Co., Ltd, Qingdao 266300, China)

Abstract: In this paper, a sinusoidal extraction method based on a dual observer is proposed. Passing the disturbed harmonic through an special auxiliary filter, measurable variables related to the harmonic frequency can be obtained. Then the unexpected signal is decomposed into a known function and the required estimation term driven by standard signal. The observer is constructed to estimate the required estimation term, thereby the standard sinusoidal signal can be reconstructed directly. This method can represent the disturbance as a parametric form about auxiliary variable, so as to derive the relationship between frequency and harmonic directly, with which the standard signal and disturbance can be decoupled. Because only the unknown parameter driven by standard sinusoidal signal needs to be estimated, the computational complexity is greatly reduced. According to the Lyapunov stability theory, if the bounded noise is absent, the observer can track the standard signal asymptotically. In the multi-disturbances environment, the uniform ultimately bounded performance of estimation error can be guaranteed by adjusting the parameters. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed dual observation structure.

Keywords: auxiliary filter; dual observer; sinusoidal signal; harmonic extraction; multi-source disturbance; asymptotic stability; uniformly ultimately bounded

0 引言

谐波现象普遍存在于磁轴承^[1]、AC-DC 转换器^[2]、磁盘驱动器^[3]以及液压伺服^[4-5]等机电系统中, 这种谐波不仅会影响系统的控制精度, 甚至会破坏系统的稳定性. 在干扰抵消控制、信号处理、电力电子以及仪表测量领域, 对干扰谐波的重构或提取也是一个重要的课题. 目前, 常用的谐波处理方法包括傅里

叶变化、最小二乘和小波变换等方法. 快速傅里叶变换(FFT)检测方法可以选择性地消除特定频率的谐波, 精确度较高, 但检测耗时长, 实时性较差, 而且会产生频谱泄露和栅栏效应^[6-7]. 小波变换法在时域和频域都有良好的局域性, 但运算量大、最佳小波基不易选取, 而且会产生频带重叠与频谱泄露现象^[8], 降低了检测的精度与鲁棒性. 在电力电子系统中, 基于

收稿日期: 2020-11-03; 录用日期: 2021-03-03.

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121132); 山西省研究生创新项目(2020SY424); 山西省重点研发计划国际科技合作项目(201903D421045).

[†]通讯作者. E-mail: wxysunrain@163.com.

瞬时无功功率理论是一种近似的谐波检测方法,该方法具有良好的实时性,动态响应速度快^[9],但低通滤波器的参数选择困难,计算量大,操作复杂^[10].文献[11]采用最小二乘网格搜索法分析两个频率相近的正弦波参数估计问题;文献[12]采用扩展卡尔曼滤波器跟踪单正弦信号的频率;文献[13]利用归一化频率算法跟踪检测平稳的概周期信号,该方法具有一定的鲁棒性,但估计的参数局部收敛.

近年来,基于自适应理论的谐波检测问题得到了广泛的研究^[14-16],可以直接对谐波参数进行估计,并且可以保证渐近收敛特性和全局性.在经典的干扰抵消方法中,谐波被描述为外部系统,利用观测器^[17-22]或内模原理^[23-25]可以对外部系统进行重构.现有算法需将干扰谐波信号作为一个整体估计,或估计所有的谐波参数,算法复杂,运算量大,估计参数全局性难以保证,而且估计值和各个谐波分量本身存在非线性关系,误差动态具有时变特性,分析手段也往往存在局限性.

本文提出一种新型全局收敛的谐波提取结构,只需要估计特定频率的状态信号,且估计方程以及误差动态均具有线性定常形式,易于工程实现.首先构造辅助滤波器,将干扰谐波信号分解为辅助变量函数和受标准正弦信号驱动的待估项,直接建立谐波与谐波频率之间联系,从而对于干扰谐波和标准正弦信号重新描述;其次,构造观测器以获取估计值,然后利用对偶关系反推相关矢量,实现标准信号和干扰谐波的提取.这种观测器充分利用频率与谐波的关系,使得估计误差具有线性定常动态形式,且具有更加灵活的参数整定方式.

1 问题描述

本文考虑一类受干扰谐波以及有界噪声影响的标准正弦信号,将可测量的信号描述为

$$d(t) = d_0(t) + d_1(t) + \Delta(t). \quad (1)$$

其中: $d_0(t)$ 为标准正弦信号, $d_1(t)$ 为干扰谐波, $\Delta(t)$ 为有界噪声.不失一般性,假设 $d_0(t)$ 为单正弦信号,因此 $d_0(t)$ 和 $d_1(t)$ 可以描述为

$$\begin{cases} d_0(t) = \Phi_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \\ d_1(t) = \sum_{i=1}^m (\Phi_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)). \end{cases} \quad (2)$$

其中: Φ_n 、 ω_n 、 φ_n ($n = 0, 1, \dots, m$)分别为各正弦分量的幅值、角频率和相角.

本文研究目标是从可测信号 $d(t)$ 中提取标准正弦信号 $d_0(t)$,通过构造特殊的辅助滤波器,根据频率

将干扰谐波分解为对偶形式,然后对标准正弦信号进行估计.

首先定义如下辅助滤波器:

$$\dot{\xi}(t) = G\xi(t) + Ld(t). \quad (3)$$

其中: $\xi(t) \in R^{2m \times 1}$, Hurwitz 矩阵 $G \in R^{2m \times 2m}$, $L \in R^{2m \times 1}$, α 为常数, (G, L) 可控且满足如下形式:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha \\ -g_1 & -g_2 & \dots & -g_{2m} \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

辅助滤波器建立了信号 $d(t)$ 与辅助变量 $\xi(t)$ 之间的动态关系,根据频率可将标准正弦与干扰谐波分解为对偶形式.首先考虑单正弦情况,即 $d_1(t) = \Delta(t) = 0$.

定理1 假设存在如下映射:

$$\dot{\xi}_0(t) = G\xi_0(t) - Ld_0(t). \quad (5)$$

其中: $\xi_0(t) \in R^{2m \times 1}$, (G, L) 满足式(4).则标准正弦信号 $d_0(t)$ 可表示为

$$d_0(t) = \theta_0^T \xi_0(t) + \theta_0^T \delta_0(t). \quad (6)$$

其中: $\theta_0^T \in R^{1 \times 2m}$ 且满足

$$\theta_0^T = \left[\left(-g_1 + \frac{\omega_0^{2m}}{\alpha^{2m-1}} \right) \dots \left(-g_{2m-1} + \frac{m\omega_0^2}{\alpha} \right) - g_{2m} \right], \quad (7)$$

向量 $\delta_0(t) \in R^{2m \times 1}$ 满足

$$\dot{\delta}_0(t) = G\delta_0(t). \quad (8)$$

证明 根据文献[26]引理1,当存在映射(5)时,标准正弦信号 $d_0(t)$ 可表示为式(6), θ_0^T 是与频率相关的未知向量, $\delta_0(t)$ 满足式(8).将式(6)代入(5),可得

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_0(t) &= G\xi_0(t) - L\theta_0^T \xi_0(t) - L\theta_0^T \delta_0(t) = \\ &= W_0 \xi_0(t) - L\theta_0^T \delta_0(t). \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$W_0 = \begin{bmatrix} \theta_{0,1} & \dots & \theta_{0,2m} \\ 0 & \alpha & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha \\ -g_1 - \theta_{0,1} & -g_2 - \theta_{0,2} & \dots & -g_{2m} - \theta_{0,2m} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

辅助变量 $\xi_0(t)$ 为辅助滤波器的输出信号, $\delta_0(t)$ 为指数衰减向量.结合式(6)可知, $\xi_0(t)$ 将收敛到与 $d_0(t)$ 同频的信号.因此 W_0 的特征根满足

$$(s^2 + w_0^2)^m = s^{2m} + (g_{0,2m} + \theta_{0,2m})s^{2m-1} + \dots + \alpha^{2m-1}(g_{0,1} + \theta_{0,1}). \quad (11)$$

通过对比特征多项式系数,可以推算出式(7)。□

由于 $d_0(t)$ 受到 $d_1(t)$ 与 $\Delta(t)$ 的影响,无法直接利用辅助变量对标准正弦信号 $d_0(t)$ 进行重构,在介绍 $d_0(t)$ 提取方法之前,首先给出如下定理。

定理2 对于动态方程(3),当 (G, L) 满足形式(4)时,干扰谐波 $d_1(t)$ 可以描述为

$$d_1(t) = \theta_1^T \xi(t) + \theta_1^T \delta(t). \quad (12)$$

其中: $\theta_1^T = [\theta_{1,1} \ \theta_{1,2} \ \dots \ \theta_{1,2m}]$,未知参数 $\delta(t)$ 满足

$$\dot{\delta}(t) = G\delta(t) - Ld_0(t) - L\Delta(t). \quad (13)$$

证明 依据文献[27]定理1,考虑动态系统

$$\dot{\check{\xi}}(t) = G\check{\xi}(t) + Ld_1(t). \quad (14)$$

其中: $\check{\xi}(t) \in R^{2m \times 1}$,谐波信号 $d_1(t)$ 可以表示为

$$d_1(t) = \theta_1^T \check{\xi}(t) + \theta_1^T \check{\delta}(t), \quad (15)$$

$\check{\delta}(t) \in R^{2m \times 1}$ 满足动态方程

$$\dot{\check{\delta}}(t) = G\check{\delta}(t). \quad (16)$$

根据式(15)可得

$$d_1(t) = \theta_1^T \check{\xi}(t) + \theta_1^T \check{\delta}(t) = \theta_1^T \xi(t) + \theta_1^T \delta(t) + \theta_1^T [\check{\xi}(t) - \xi(t)]. \quad (17)$$

结合式(3)、(14)、(16)和(17)可得

$$\begin{cases} \dot{\check{\xi}}(t) - \dot{\xi}(t) = G[\check{\xi}(t) - \xi(t)] - L[d_0(t) + \Delta(t)]; \\ \dot{\check{\xi}}(t) - \dot{\xi}(t) + \dot{\check{\delta}}(t) = \\ G[\check{\xi}(t) - \xi(t) + \check{\delta}(t)] - L[d_0(t) + \Delta(t)]. \end{cases} \quad (18)$$

令 $\delta(t) = \check{\xi}(t) - \xi(t) + \check{\delta}(t)$,则干扰谐波可重新描述为式(12),其中 $\delta(t)$ 满足式(13)。□

进一步分析可知,式(13)满足映射(5),根据定理1,可将标准正弦信号 $d_0(t)$ 描述为

$$d_0(t) = \theta_0^T \delta(t) + \theta_0^T \bar{\delta}(t). \quad (19)$$

其中: $\delta(t) \in R^{1 \times 2m}$,向量 $\bar{\delta}(t)$ 满足方程

$$\dot{\bar{\delta}}(t) = G\bar{\delta}(t) + L\Delta(t). \quad (20)$$

将式(19)代入(13),得到

$$\dot{\delta}(t) = W_0\delta(t) - L\theta_0^T \bar{\delta}(t) - L\Delta(t). \quad (21)$$

由定理1可知,系数矩阵 W_0 满足式(10),相关参数 θ_0^T 满足式(7)。结合式(3)和(13)可得

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) + \dot{\delta}(t) &= G\xi(t) + G\delta(t) + Ld_1(t) = \\ &W_1[\xi(t) + \delta(t)], \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha \\ -g_1 + \theta_{1,1} & -g_2 + \theta_{1,2} & \dots & -g_{2m} + \theta_{1,2m} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

如式(22)所示, $[\xi(t) + \delta(t)]$ 稳定性取决于矩阵 W_1 ,且 $[\xi(t) + \delta(t)]$ 将收敛到与 $d_1(t)$ 同频的信号。类似于式(11),通过对比特征式系数可以得到

$$\theta_1^T = \left[\left(g_1 - \sum_{i=1}^m \omega_i^2 \right) g_2 \ \dots \ g_{2m} \right]. \quad (24)$$

本文的主要工作是设计一种新的对偶观测器,只考虑频率已知情况,通过辅助滤波器对 $d(t)$ 重新描述,根据频率将其分解为干扰谐波与标准正弦信号(式(12)、(19))。由式(7)、(24)可以得到与频率相关矢量 θ_0 、 θ_1 的表达式。当频率未知时,利用式(9)可以对相关矢量进行估计,从而得到 θ_0 、 θ_1 的估计值,因此,本文方法可以推广到频率未知的情况。

2 对偶观测器的设计

本文提出的观测器结构如图1所示,通过辅助滤波器将 $d(t)$ 中的干扰谐波分量分解为一个已知的辅助变量函数和待估项(式(12))。构造观测器对待估项 $\delta(t)$ 进行估计,从而得到标准正弦分量 $d_0(t)$ 和干扰谐波 $d_1(t)$ 的估计值,通过调节观测器增益可使观测器具有良好的性能指标。

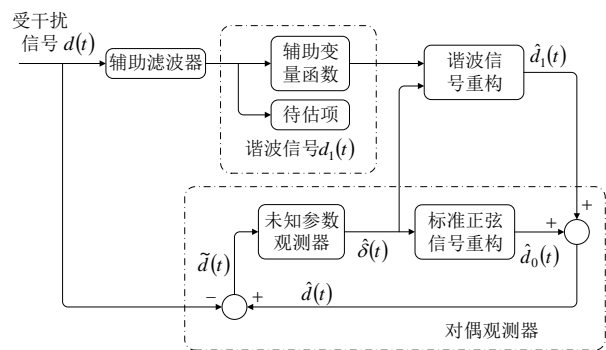


图1 对偶观测器原理

根据状态观测器设计思想,可以构造观测器为

$$\dot{\hat{\delta}}(t) = G\hat{\delta}(t) - L\hat{d}_0(t) - B[d(t) - \hat{d}(t)], \quad (25)$$

其中反馈增益 $B \in R^{2m \times 1}$ 。标准正弦信号估计值为

$$\hat{d}_0(t) = \theta_0^T \hat{\delta}(t). \quad (26)$$

干扰谐波的估计值为

$$\hat{d}_1(t) = \theta_1^T \xi(t) + \theta_1^T \hat{\delta}(t). \quad (27)$$

由式(26)、(27)可得

$$\hat{d}(t) = \theta_0^T \hat{\delta}(t) + \theta_1^T \xi(t) + \theta_1^T \hat{\delta}(t), \quad (28)$$

从而可得 $d(t)$ 估计误差为

$$\begin{aligned} \tilde{d}(t) &= d(t) - \hat{d}(t) = \\ &(\theta_0^T + \theta_1^T) \tilde{\delta}(t) + \theta_0^T \bar{\delta}(t) + \Delta(t). \end{aligned} \quad (29)$$

将式(25)整理可得

$$\dot{\hat{\delta}}(t) = W_0 \hat{\delta}(t) - B \tilde{d}(t). \quad (30)$$

由式(26)、(27)可知, $\hat{d}_0(t)$ 与 $\hat{d}_1(t)$ 的稳定性取决于 $\hat{\delta}(t)$, 为此, 下一节将对 $\hat{\delta}(t)$ 的收敛特性进行分析.

现有的方法往往需要估计谐波信号的所有参数(幅值、相角与频率), 具有一定的保守性. 本文在频率已知的情况下, 仅估计特定频率的信号, 从而减少待估计参数. 该方法具有线性定常系统的特性, 参数的调节和稳定性的分析比较容易.

3 稳定性分析

本节将对估计误差的稳定性进行分析, 在之前的工作中, 通过辅助滤波器设计将谐波信号 $d(t)$ 中的干扰谐波与标准正弦信号描述为对偶形式, 这样仅估计 $\delta(t)$ 便可将干扰谐波与标准正弦信号重构.

结合式(21)、(30), 可得误差动态方程

$$\dot{\tilde{\delta}}(t) = \dot{\delta}(t) - \hat{\delta}(t) = A \tilde{\delta}(t) + C(\theta_0^T \bar{\delta}(t) + \Delta(t)). \quad (31)$$

其中: $A = W_0 + B(\theta_0^T + \theta_1^T)$, $C = (B - L)$.

定理3 若存在 $P \in R^{2m \times 2m} > 0$ 满足

$$\Lambda = \begin{bmatrix} (A^T P + P A) & P C \theta_0^T \\ \theta_0 C^T P & (G + G^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (32)$$

则估计误差 $\tilde{\delta}(t)$ 一致最终有界. 当有界噪声 $\Delta(t)$ 不存在时, $\tilde{\delta}(t)$ 渐近稳定.

证明 建立 Lyapunov 函数

$$V(t) = \tilde{\delta}^T(t) P \tilde{\delta}(t) + \bar{\delta}^T(t) \bar{\delta}(t). \quad (33)$$

令 $x^T = [\tilde{\delta}^T(t) \quad \bar{\delta}^T(t)]$, 结合式(20)、(31)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= x^T \Lambda x + \Delta^T(t) C^T P \tilde{\delta}(t) + \bar{\delta}^T(t) L \Delta(t) + \\ &\tilde{\delta}^T(t) P C \Delta(t) + \Delta^T(t) L^T \bar{\delta}(t) = \\ &x^T \Lambda x + [\Delta^T(t) C^T P \quad \Delta^T(t) L^T] x + \\ &x^T [\Delta^T(t) C^T P^T \quad \Delta^T(t) L^T]^T. \end{aligned} \quad (34)$$

由式(32)可知, 存在 $\gamma > 0$, 使得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\gamma \|x\|^2 + \|[\Delta^T(t) C^T P \quad \Delta^T(t) L^T]\| \|x\| + \\ &\|[\Delta^T(t) C^T P^T \quad \Delta^T(t) L^T]^T\| \|x\|. \end{aligned} \quad (35)$$

综上分析, 由于 A 、 P 、 G 、 θ_0^T 以及 $\Delta(t)$ 有界, 在满足式(32)条件下, 估计误差 $\tilde{\delta}(t)$ 一致最终有界. 并且当 $\Delta(t) = 0$ 时, 由式(32)、(34)可知, 估计误差渐近稳

定. \square

标准正弦信号的估计误差值为

$$\tilde{d}_0(t) = \theta_0^T(t) \tilde{\delta}(t) + \theta_0^T(t) \bar{\delta}(t), \quad (36)$$

干扰谐波的估计误差值为

$$\tilde{d}_1(t) = \theta_1^T(t) \tilde{\delta}(t). \quad (37)$$

由式(36)、(37)可知, $\tilde{d}_0(t)$ 与 $\tilde{d}_1(t)$ 的稳定性取决于 $\tilde{\delta}(t)$ 的稳定性. 结合定理3知: 当 $\Delta(t)$ 不存在时, 估计误差 $\tilde{d}_0(t)$ 、 $\tilde{d}_1(t)$ 渐近稳定; 当存在 $\Delta(t)$ 时, 估计误差 $\tilde{d}_0(t)$ 、 $\tilde{d}_1(t)$ 一致最终有界.

本文所提出的观测器具有线性定常的形式, 其稳定性容易分析, 全局性条件也易于满足. 通过调节观测器参数可以提高估计误差的收敛速度和鲁棒性.

4 仿真实验

为验证所提出观测器的性能, 采用不同条件下的仿真算例验证对偶观测器方法的有效性.

仿真1 首先考虑双频信号, 其中 $d_0(t) = 220 \times \sin t$, $d_1(t) = 220 \sin(5t + 2)$, 选取

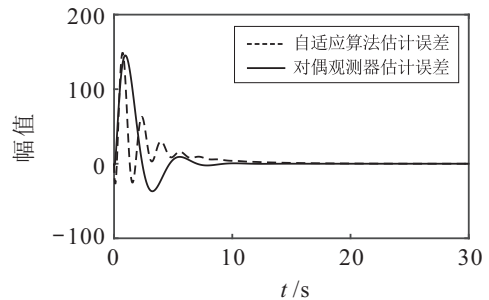
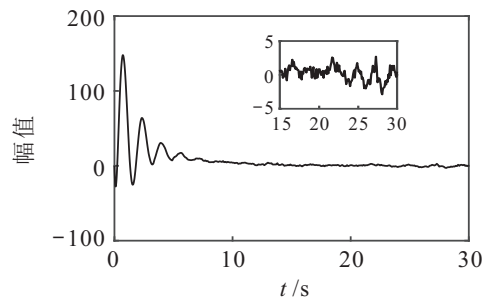
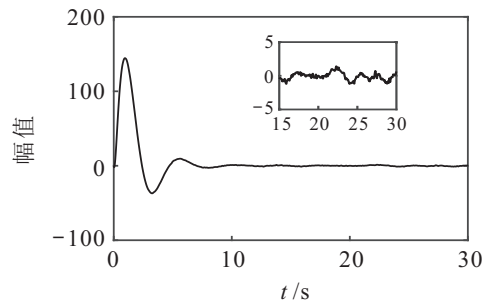


图2 估计误差比较 ($d_0(t) = 220 \sin t$)



(a) 有界噪声下自适应算法估计误差



(b) 有界噪声下对偶观测器估计误差

图3 估计误差鲁棒性分析 ($d_0(t) = 220 \sin t$)

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -25 & -10 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

由式(7)、(24)可得 $\theta_0^T = [-24 \quad -10]$, $\theta_1^T = [0 \quad 10]$. 选取增益 $B^T = [0.09 \quad 0.09]$. 文献[16]的自适应算法参数 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 4$. 有界噪声 $\Delta(t)$ 用方差为5、均值为0的随机噪声表示.

如图2所示,当 $\Delta(t) = 0$ 时,本文算法相对于自适应算法具有较快的收敛速度. 如图3所示,在有界噪声影响下,本文算法具有更小的稳态估计误差.

仿真2 对于多、高频谐波信号 $d_1(t) = 170 \times \sin(500\pi t + 3) + 150 \sin(700\pi t + 5)$,基频信号 $d_0(t) = 220 \sin(100\pi t + 1)$, Hurwitz矩阵 G 选为

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 200\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200\pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 200\pi \\ -g_1 & -g_2 & -g_3 & -g_4 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

其中: $g_1 = 100\pi, g_2 = 400\pi, g_3 = 600\pi, g_4 = 400\pi$. 选取反馈增益 $B^T = [2.0 \quad 4.0 \quad 1.5 \quad -1.2]$,自适应算法参数 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_6 = 80$.

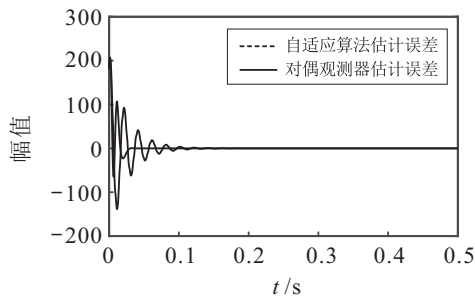
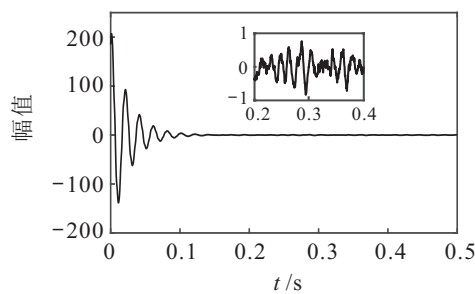
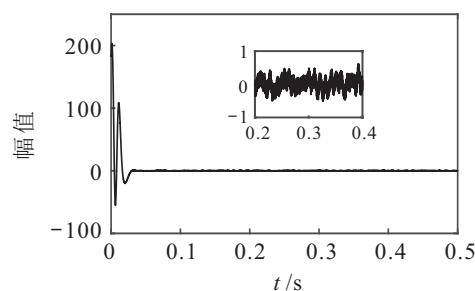


图4 估计误差比较($d_0(t) = 220 \sin(100\pi t + 1)$)



(a) 自适应算法估计误差



(b) 对偶观测器估计误差

图5 估计误差鲁棒性分析($d_0(t) = 220 \sin(100\pi t + 1)$)

如图4所示,在无 $\Delta(t)$ 影响时,自适应算法收敛速度较慢,而对偶观测器具有快速收敛的特性. 如图5所示,自适应算法对有界扰动的抑制作用较弱.

5 结论

本文提出了一种基于对偶观测器的标准正弦信号提取方法. 在频率已知的情况下,通过构造特殊的辅助滤波器,根据频率将标准正弦与谐波分解为对偶形式,直接对标准正弦与谐波进行重构. 由于减少了待估计参数,降低了参数运算复杂度,从而可以快速提取特定频率的正弦信号. 该观测器具有线性定常的形式,使得系统具有灵活的参数整定策略. 仿真结果表明,所提出的算法具有收敛速度快、鲁棒性强的特点. 本文介绍了在频率已知条件下对谐波如何进行提取,当频率未知时如何实现对于干扰谐波的提取与补偿将是下一步的研究方向.

参考文献(References)

- [1] Yoon S Y, Di L, Lin Z L. Unbalance compensation for AMB systems with input delay: An output regulation approach[J]. Control Engineering Practice, 2016, 46: 166-175.
- [2] Pham H, Jung H, Hu T S. State-space approach to modeling and ripple reduction in AC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1949-1955.
- [3] Chamanbaz M, Keikha E, Venkataramanan V, et al. Design of a probabilistic robust track-following controller for hard disk drive servo systems[J]. Mechatronics, 2014, 24(6): 582-589.
- [4] Won D, Kim W, Shin D, et al. High-gain disturbance observer-based backstepping control with output tracking error constraint for electro-hydraulic systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 787-795.
- [5] Kim W, Shin D, Won D, et al. Disturbance-observer-based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2290-2298.
- [6] 房国志, 杨超, 赵洪. 基于FFT和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 75-79. (Fang G Z, Yang C, Zhao H. Detection of harmonic in power system based on FFT and wavelet packet[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 75-79.)
- [7] 郑恩让, 杨润贤, 高森. 关于电力系统FFT谐波检测存在问题的研究[J]. 继电器, 2006, 34(18): 52-57. (Zheng E R, Yang R X, Gao S. Study on problems about detecting harmonic based on FFT in power system[J]. Relay, 2006, 34(18): 52-57.)
- [8] 曹健, 林涛, 强晓刚, 等. 采用改进支持向量机和复

- 小波变换的谐波及间谐波测量方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1384-1390.
- (Cao J, Lin T, Qiang X G, et al. Harmonic and inter-harmonic measuring method using improved support vector machine and complex wavelet transform[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1384-1390.)
- [9] 王兆安, 刘进军, 王跃. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 209-239.
- (Wang Z A, Liu J J, Wang Y. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. The 3rd edition. Beijing: China Machine Press, 2016: 209-239.)
- [10] 黄海宏, 江念涛, 毕楠夏, 等. 一种混合谐波检测法在APF中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 297-303.
- (Huang H H, Jiang N T, Bi N X, et al. Application of hybrid harmonic detection method in APF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2): 297-303.)
- [11] Barbedo J G A, Lopes A. Estimating frequency, amplitude and phase of two sinusoids with very close frequencies[J]. International Journal of Signal Processing, 2009, 5(2): 138-145.
- [12] Bittanti S, Savaresi S M. On the parametrization and design of an extended Kalman filter frequency tracker[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(9): 1718-1724.
- [13] 储昭碧, 丁明, 杜少武, 等. 归一化频率自适应梳状滤波器的稳定性分析[J]. 自动化学报, 2010, 36(11): 1581-1593.
- (Chu Z B, Ding M, Du S W, et al. Stability analysis of normalized frequency adaptive comb filter[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(11): 1581-1593.)
- [14] Bodson M, Douglas S C. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequency[J]. Automatica, 1997, 33(12): 2213-2221.
- [15] Hou M. Parameter identification of sinusoids[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(2): 467-472.
- [16] Dai Z Y, Lin W. Adaptive estimation of three-phase grid voltage parameters under unbalanced faults and harmonic disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5613-5627.
- [17] Guo L, Chen W H. Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2005, 15(3): 109-125.
- [18] Yang J, Li S H, Yu X H. Sliding-mode control for systems with mismatched uncertainties via a disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 160-169.
- [19] Yang J, Ding Z T, Chen W H, et al. Output-based disturbance rejection control for non-linear uncertain systems with unknown frequency disturbances using an observer backstepping approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(9): 1052-1060.
- [20] Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods—An overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63(2): 1083-1095.
- [21] 魏新江, 张林青. 一类随机系统基于干扰观测器的抗干扰控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 939-942.
- (Wei X J, Zhang L Q. Anti-disturbance control for a stochastic systems with disturbances based on disturbance observer[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 939-942.)
- [22] Wang L, Liu X, Wang C. Improved disturbance observer based control for airborne photoelectric stabilized platform[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2019(188): 133-136.
- [23] Ding Z T. Universal disturbance rejection for nonlinear systems in output feedback form[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(7): 1222-1226.
- [24] Zhou K L, Yang Y H, Blaabjerg F, et al. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1220-1230.
- [25] Kong H, Sukkarieh S. An internal model approach to estimation of systems with arbitrary unknown inputs[J]. Automatica, 2019, 108: 108482.
- [26] Nikiforov V O. Nonlinear servocompensation of unknown external disturbances[J]. Automatica, 2001, 37(10): 1647-1653.
- [27] Wen X Y, Yan P. Two-layer observer based control for a class of uncertain systems with multi-frequency disturbances[J]. ISA Transactions, 2016, 63: 84-92.

作者简介

文新宇(1977—), 男, 副教授, 博士, 从事干扰估计和补偿、干扰观测等研究, E-mail: wxysunrain@163.com;

王震(1994—), 男, 硕士生, 从事干扰估计和补偿的研究, E-mail: wzglaxy@163.com;

张文康(1995—), 男, 硕士生, 从事电能质量控制、谐波抑制的研究, E-mail: zhang1125107821@qq.com;

孙金刚(1982—), 男, 硕士, 从事高效节能电机、驱动器的研究, E-mail: sjg_set@163.com.

(责任编辑: 李君玲)