

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104114

迭代ICA与LEVKOV联合的瞬态 响应工频干扰抑制方法^{*}

任 杰¹ 杨双龙^{1,2} 王俊翔¹ 邵春莉³

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 工业自动化安徽省工程技术研究中心 合肥 230009;
3. 安徽大学电气工程与自动化学院 合肥 230601)

摘 要:针对传感器瞬态响应中的工频干扰因频率游动、谐波及频带混叠导致难以去除的问题,提出了迭代独立分量分析(ICA)与LEVKOV联合抗工频干扰的方法。将迭代ICA法与LEVKOV法相结合,通过构造工频参考信号,采用迭代ICA的方法以减小瞬态响应中频率游动的工频干扰,再利用LEVKOV法通过线性段均值滤波和非线性段噪声模板滤波来进一步削弱工频干扰及其谐波干扰,从而提高瞬态响应信号中工频干扰的滤除精度。仿真和实验数据验证结果表明,所提出的迭代ICA与LEVKOV联合抗工频干扰法相较于独立的迭代ICA法和LEVKOV法而言,对传感器瞬态响应中的工频干扰具有更好的抑制效果。

关键词:传感器瞬态响应;工频干扰;迭代ICA法;LEVKOV法;频率游动
中图分类号: TN911. 7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 40

Anti-power interference method of combining iterative ICA and LEVKOV for transient response

Ren Jie¹ Yang Shuanglong^{1,2} Wang Junxiang¹ Shao Chunli³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Engineering Technology Research Center of Industrial Automation, Hefei 230009, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the problem that the power interference in the sensor transient response is difficult to remove due to frequency swinging, harmonic and frequency aliasing, a joint anti-power interference method of iterative ICA and LEVKOV is proposed. For the proposed method, the iterative ICA method is combined with LEVKOV method; iterative ICA method is first used to reduce the power interference with frequency swinging based on constructing reference signal of power interference, and then LEVKOV method is used to further remove the weakened power interference and its harmonic interferences by the means of mean filtering for linear segment and noise template filtering for nonlinear segment, so as to improve the filtering accuracy of the power interference mixed in the sensor transient response. The simulation and experimental data verification results show that, compared with the separated iterative ICA method and LEVKOV method, the proposed anti-power interference method of combining iterative ICA and LEVKOV has a better suppression effect on the power interference in the sensor transient response.

Keywords: sensor transient response; power interference; iterative ICA method; LEVKOV method; frequency swinging

0 引 言

随着科学技术的飞速发展与工业自动化程度的不断提高,越来越多的应用场合需要实现对动态信号的测量,

这就要求所使用的传感器具有良好的动态特性^[1]。传感器的动态特性通常通过动态实验的方法获取其瞬态响应信号来进行分析评价。然而,实验过程中由于实验场地或实验设备的原因,不可避免会向传感器输出的微弱信号中引入工频干扰,从而影响对传感器动态特性的时频

分析。同时,由于实际工频干扰的频率往往存在小范围波动^[2],且与传感器的瞬态响应中的有用信号存在频段混叠,还会混有工频谐波干扰,这就导致很难采取有效的方法对工频干扰进行滤除。

面对工频干扰,研究学者们提出了很多抑制工频干扰的方法,主要可以分为时域滤波、频域滤波和时频分析 3 大类。时域滤波方法有独立分量分析(ICA)^[2-5]、LEVKOV 法^[6]、平滑滤波等。其中,ICA 通过寻找满足统计独立和非高斯的成分,从而将与有用信号无关的工频干扰分离出来,但该方法需要单独测量工频干扰或通过构造工频干扰作为参考信号来进行干扰分离^[2];LEVKOV 法是针对心电信号中的工频干扰问题而提出来的,通过对心电信号进行人为分段,从而分别采用不同的滤波方法,可有效抑制其中的工频干扰,但对其他信号特征不同的信号的滤波效果不佳;平滑滤波运算简单、实时性好,但其实质上等效于频域低通滤波器,在抑制干扰的同时也会削弱有用信号。频域滤波方法常用的为陷波器滤波,可对某一特定频率的干扰进行消除。文献[7-12]分别采用了基于窗的 FIR 滤波器、变步长最小均方(LMS)自适应陷波器、LMS 滤波器、归一化最小均方(NLMS)滤波器和陷波器对心电信号中的工频干扰进行去除,均取得了不错的效果。但不论是固定还是自适应陷波滤波器,均难控制其陷波系数使其不影响频带混叠的有用信号。时频分析方法中常用的为小波滤波^[13-20]。小波滤波具有良好的时频局部化特性,通过保留由有用信号控制的小波系数,发现并去掉由噪声控制的小波系数,从而滤除噪声;但是,由于小波滤波的频窗较宽,会同时滤除工频及其附近的其它频率的有效信号,且其消噪系数同样不易控制,容易造成过滤波和欠滤波,从而使信号发生严重失真。综上,现有的工频干扰抑制方法均较难用于传感器瞬态响应的工频消噪。

针对传感器瞬态响应信号的特征与实际工频干扰的特点,本文提出一种联合迭代 ICA 与 LEVKOV 法的工频干扰抑制方法。其基本思路为先通过循环迭代构造工频干扰参考信号来使用 ICA 法减小瞬态响应中频率游动的工频干扰,再利用 LEVKOV 法对工频及其谐波干扰进行进一步的消除,从而提高对传感器瞬态响应中工频干扰的滤波效果。

1 迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法

1.1 ICA 法抗工频干扰

ICA 法本质上就是一种盲信号分离的“解混”方法。其从信号的统计特征出发,依据信号之间的独立性建立判据,在缺乏源信号本身以及信号传输通道的先验知识

的情况下,仅通过使用合适的优化算法对观测到的混合后信号进行处理就能实现源信号的恢复。设混合系统输出为 N 个长度为 T 的信号序列 $x_i(t)$,即观测信号矩阵为 $\mathbf{X} = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_N(t)]^T, N \times T$ 维;则 ICA 的目的即为获取 $M \times N$ 维的解混矩阵 $\mathbf{W}$,并用其对 $\mathbf{X}$ 进行“解混”得到 M 个长度为 T 的信号序列 $y_i(t)$,即获得解混后的信号矩阵 $\mathbf{Y} = [y_1(t), y_2(t), y_3(t), \dots, y_M(t)]^T$;ICA 盲信号分离模型为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (1)$$

ICA 通常应用于“正定”条件,即观测信号的数量 N 大于等于源信号数量 M 。而在对传感器的瞬态响应进行降噪时,观测信号只有一个传感器的输出信号。此时,要通过 ICA 来分离有用信号和工频干扰,则不满足“正定”条件。因此,在用 ICA 法来消除工频噪声时,需要构造参考信号来使得盲分离模型满足“正定”条件^[3]。一般用 ICA 来进行工频干扰抑制的步骤如下。

1) 对传感器信号 $\mathbf{x}$ 进行傅里叶变换,根据其幅值谱和相位谱构造工频噪声参考信号 $\mathbf{r}$; $\mathbf{r}$ 的幅值为幅值谱中 50 Hz 附近的最大值, $\mathbf{r}$ 的相位为相应频点处的相位。

2) 构造观测矩阵 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}, \mathbf{r}]^T$,对 $\mathbf{X}$ 按行去均值得到 $\tilde{\mathbf{X}}$,即:

$$\tilde{\mathbf{X}}_j = \mathbf{X}_j - E(\mathbf{X}_j) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_j$ 为 $\mathbf{X}$ 的第 j 行向量, $j = 1, 2$ 。 $E(\mathbf{X}_j)$ 为 $\mathbf{X}$ 中第 j 行向量的均值。

3) 令对 $\tilde{\mathbf{X}}$ 进行白化处理。白化处理的任务就是通过寻找到一个白化矩阵来消除观测信号之间的相关性,而且经过白化处理以后的观测信号方差为 1。首先对 $\tilde{\mathbf{X}}$ 进行奇异值分解:

$$E(\tilde{\mathbf{X}} \tilde{\mathbf{X}}^T) = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为协方差矩阵 $E(\tilde{\mathbf{X}} \tilde{\mathbf{X}}^T)$ 的特征向量构成的正交矩阵, $\mathbf{D}$ 为协方差矩阵 $E(\tilde{\mathbf{X}} \tilde{\mathbf{X}}^T)$ 的特征值构成的对角阵。则白化矩阵 $\mathbf{V}$ 可表示为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{U}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{U}^T \quad (4)$$

白化过程可描述为:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{V}\tilde{\mathbf{X}} \quad (5)$$

式中: $\tilde{\mathbf{X}}$ 为白化后的信号矩阵。

4) 利用 ICA 进行盲信号分离^[5],获得噪声分离后的信号 $\mathbf{Y}$ 。ICA 具体计算过程如下。

(1) 选择非线性函数 $g(u) = u^3$ 。

(2) 确定独立成分数 m , m 为观测矩阵 $\mathbf{X}$ 中的信号个数(传感器信号 $\mathbf{x}$ 与工频参考信号 $\mathbf{r}$ 的数量之和);令

$j = 1$ 。

(3) 给解混矩阵 $\mathbf{W}$ 中的第 j 列 $\mathbf{w}_j$ 赋初值,使得 $\mathbf{w}_j$ 具有单位范数,即 $\|\mathbf{w}_j\|_2 = 1$ 。

(4) 由式(6)、(7)对 $\mathbf{w}_j$ 进行迭代计算, $\mathbf{w}_{jr}$ 为 $\mathbf{w}_j$ 中第 r 行的元素, k 为迭代次数, $\odot$ 表示两向量之间对应元素相乘, E 表示对向量求均值;若满足收敛条件(一般为 $\mathbf{w}_j$ 更新前后的差值小于某个值),则迭代停止,转到步骤(5),否则一直迭代,直至算法收敛或满足迭代终止条件。

$$\mathbf{w}_{jr}^{[k+1]} =$$

$$E\{\bar{\mathbf{X}}_r \odot g((\mathbf{w}_j^{[k]})^T \cdot \bar{\mathbf{X}})\} - E\{g'((\mathbf{w}_j^{[k]})^T \cdot \bar{\mathbf{X}})\} \mathbf{w}_{jr}^{[k]} \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_j^{[k+1]} = \mathbf{w}_j^{[k+1]} / \|\mathbf{w}_j^{[k+1]}\|_2 \quad (7)$$

上步迭代收敛后,最终的 $\mathbf{w}_j^{[k+1]}$ 即为解混矩阵 $\mathbf{W}$ 中的列向量。

(5) 令 $j = j + 1$,若 $j \leq m$ 则返回到步骤(3),否则,得到解混矩阵 $\mathbf{W}$ 。

(6) 由 $\mathbf{Y} = \mathbf{W}\bar{\mathbf{X}}$ 得到分离结果矩阵 $\mathbf{Y}$,从 $\mathbf{Y}$ 中可得到经 ICA 分离工频干扰后的传感器瞬态响应信号分量。

对于工频干扰频率固定、无工频谐波干扰且与工频不存在频带混叠的平稳信号,上述方法能得到相对较好的工频抑制效果。但对于瞬态响应信号,由于其与工频干扰存在频带混叠,频谱分析中工频频谱则会受有用信号的频谱及其泄漏的影响,从而使得上述步骤一构造的工频参考信号与实际工频信号存在一定的相位偏差;所以,根据构造的工频参考信号来对瞬态响应信号进行 ICA 去工频干扰时,则可能出现“过分离”(分离噪声幅度大于实际噪声)或“欠分离”(分离噪声幅度小于实际噪声)现象,其结果均是分离后的传感器信号中仍然残留较大的工频干扰分量,从而导致工频干扰抑制效果不好。

另外,工频干扰频率游动时,上述 ICA 法同样因构造工频参考信号与实际干扰频率、相位不一致而使得工频干扰抑制效果不好。而对于工频谐波干扰的问题,虽然也可以采用上述 ICA 法构造多个谐波干扰参考信号进行多次 ICA 分离,但由于谐波分量往往较多且与传感器瞬态响应信号存在频带混叠等问题,从而使得采用上述方法时过程繁杂且效果并不好。

1.2 LEVKOV 法抗工频干扰

LEVKOV 法是一种常用于心电信号中工频干扰抑制的时域滤波方法。心电信号的特征表现为平稳段与脉动段交替出现。LEVKOV 法即根据心电信号在不同段的幅值和斜率特性,将其分为线性段(平稳段)和非线性段(脉动段),线性段工频噪声利用噪声整周期均值滤波法进行消除,而非线性段工频噪声则利用线性段的噪声模板来消除。

保证 LEVKOV 法滤波效果的关键在于如何准确的识别信号中的非线性段。文献[6]提出采用斜率阈值来

解决线性段和非线性段的判断问题。即在对信号滤波之前,先计算当前采样点的斜率与上一个采样点的斜率的差值 d ;若差值 d 小于设定阈值 M ,则认为该采样点处于线性段,采用均值滤波法来滤波;反之,则认为该采样点处于非线性段,采用噪声模板法来滤波。在从传感器的动态标定实验中获取传感器的瞬态响应信号时,通过连续采集瞬态响应前后的数据可使其同样具有类似于心电信号的线性段(初始平稳段)和非线性段(瞬态响应过程)的特征。因此,同样可将 LEVKOV 法应用于传感器瞬态响应信号的工频干扰抑制。但是,心电信号在一个周期内非线性段持续时间很短,且不会出现多次震荡,而瞬态响应中非线性段持续的时间较长,且为多次震荡,所以为避免 LEVKOV 方法用于去除瞬态响应工频干扰时将非线性段误判为线性段,本文判定非线性段的条件如下:若有 $d_n, d_{n+1}, d_{n+2}, \dots, d_{n+q}$ 均小于 M ,即从当前采样点开始的连续 q 个采样点处的 d_n 均小于 M ,则用线性段方法进行滤波;否则用非线性段方法滤波。假设待滤波的信号为 x ,LEVKOV 法的具体滤波步骤如下。

1) 根据式(8)计算当前采样点的斜率(差分值)。

$$D_n = x_{n+N} - x_{n+0} \quad (8)$$

式中: N 为工频干扰信号的整周期采样点数,即 $N = f_s/f$, f_s 为采样频率, f 为工频频率。

2) 令 $d_n = |D_n - D_{n-1}|$,若有 $d_n, d_{n+1}, d_{n+2}, \dots, d_{n+q}$ 均小于 M ,则用线性段方法进行滤波;否则用非线性段方法滤波。

针对线性段,采取工频整周期均值滤波法去除工频干扰,即计算一个工频周期信号的平均值与当前点的线性偏移量,从而得到当前信号的滤波结果,具体滤波算式为:

$$y_n = \frac{x_n + \dots + x_{n+N-1}}{N} - \frac{x_{n+N} - x_n}{N} \cdot \frac{N-1}{2} \quad (9)$$

针对非线性段,则以前一个工频周期的工频干扰信号为模板来消除当前工频周期内信号中的工频干扰;即,先按式(10)计算出前一个工频干扰周期中对应点的工频干扰值,以此为工频噪声模板值,然后按式(11)计算当前点的滤波结果。接下来的 $N-1$ 个采样点,均采用非线性段方法滤波,然后转入步骤 1)。

$$\text{temp}_{n-N} = x_{n-N} - y_{n-N} \quad (10)$$

$$y_n = x_n - \text{temp}_{n-N} \quad (11)$$

由上述内容可以看出 LEVKOV 法具有运算简单、参数可调的优点。线性段整周期均值滤波和非线性段“模板法”滤波还赋予其能够去除工频谐波干扰且能跟随噪声幅值变化的特点。但是,从方法原理可知,工频频率游动会破坏滤波算法的整周期条件,从而影响该方法的滤波效果。另外,由于如何准确的识别信号中的非线性段是保证 LEVKOV 法滤波效果的关键,因此斜率阈值 M 的

选取就显得十分重要; M 值如果过大,则易将非线性段识别为线性段导致滤波效果变差; M 值如果过小,则会使非线性段过长,导致噪声模板滤波效果不好。因此,针对不同的信号进行滤波时, M 值的选取也要随之变化;对于如何选择合适的 M 值,目前大都依赖经验去选择。

LEVKOV 法的滤波效果不仅受 M 值的影响,还与叠加在有用信号上的工频干扰幅值大小有关。针对幅值较小的工频干扰,LEVKOV 法滤波效果较好;但当工频干扰的幅值较大时,滤波效果就会受到影响。这是因为 LEVKOV 法在非线性段时是采用“模板法”来进行滤波的,当工频干扰的幅值较大且波动的时候,此时的“模板值”与实际的工频干扰值之间的差值就会变大。而且非线性段长度越长,其工频干扰与前面线性段模板的偏差就越大;频率变化同样会引起非线性段实际工频干扰与模板偏差增大。

因此,LEVKOV 法适用于工频噪声频率相对固定、幅值相对较小的场合,且有用信号中非线性段持续时间越短、滤波效果越好。

1.3 迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法

由上述分析可知,单独的 ICA 法去工频干扰会出现“过分离”或“欠分离”现象,无法克服工频频率游动问题,滤波结果中仍然可能残留较大的工频干扰,且无法去除工频谐波干扰。LEVKOV 法虽然能够滤除工频及其谐波干扰,但针对频率游动或幅值较大的工频干扰,滤波效果也会变差。因此,针对传感器的瞬态响应信号,本文提出迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法,先采用迭代 ICA 法对传感器输出的瞬态响应信号进行迭代 ICA 分离以降低瞬态信号中的工频干扰,然后通过 LEVKOV 法对迭代 ICA 滤波结果进行再次滤波以进一步降低残留工频干扰和工频谐波干扰,最终得到迭代 ICA 法与 LEVKOV 法联合的工频干扰抑制结果。

迭代 ICA 法主要是克服 ICA 法抑制频率游动工频干扰能力的不足,采用 1.1 节的 ICA 方法流程对传感器瞬态响应信号进行多次迭代滤波,每次 ICA 滤波的输入信号为上一次 ICA 滤波的输出信号,即 $\mathbf{x}^{[i+1]} = \text{ICA}(\mathbf{x}^{[i]})$, i 为迭代次数,从而逐步降低信号中的工频干扰。如同单次 ICA 滤波,迭代 ICA 滤波仍然存在“过分离”或“欠分离”现象,残留工频干扰。需要说明的是,由于工频干扰的频率游动一般非常慢,在短时间内可视为频率缓慢线性变化;所以,在工频干扰幅值平稳时,根据 ICA 法步骤 1) 构造的工频噪声参考信号 $\mathbf{r}$ 的频率接近信号中间段的工频干扰频率,相位则存在偏差,据此进行 ICA 滤波的结果无论是信号中间段还是信号两端都残留较大的工频干扰;考虑 ICA 盲信号分离模型的线性特性,残留工频干扰的平均频率仍与原工频干扰的平均频率近似相同;因此,对 ICA 滤波结果继续进行迭代 ICA 滤波时,可

逐步降低瞬态信号中间段的工频干扰,但频率偏差可能导致瞬态响应信号两端残留的工频干扰因混频而发生幅值波动、甚至变大。这会影响到后续 LEVKOV 的滤波效果,尤其会导致后续 LEVKOV 滤波后的信号两端的残余工频干扰可能依然较大。

上述迭代 ICA 滤波后,由于残留的仍然是工频干扰,所以可采用 1.2 节所述的 LEVKOV 法对其做进一步的滤波,以进一步降低工频干扰并消除其谐波干扰。同样,工频干扰频率游动时,按固定频率(50 Hz)进行 LEVKOV 滤波,会在有频率偏差的信号段残留相对较大的工频干扰;另外,干扰频率游动时,迭代 ICA 滤波结果也可能使 LEVKOV 滤波结果的信号两端残留工频干扰依然较大。因此,实际滤波时,可取 LEVKOV 滤波的工频频率为信号中间段工频干扰频率,继而可对误差较大的信号两端进行反复迭代 LEVKOV 滤波以逐步减小残余工频干扰。这就要求瞬态响应信号的暂态过程尽量处于信号的中间段,从而可使信号两端的 LEVKOV 迭代滤波更容易。对于实际传感器的瞬态响应信号的采集而言,这是容易做到的。需要说明的是,虽然 LEVKOV 法在线性段采用整周期均值滤波法而在理论上无法克服频率游动的问题,但由于实际工频频率游动的范围很小,对工频干扰整周期采样点数影响也就很小,所以 LEVKOV 法即使采用固定 50 Hz 工频频率进行滤波也能在工频频率游动的情况下大幅降低工频干扰。

据此,迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法的具体流程如图 1 所示。其中, p 为迭代 ICA 法的 ICA 迭代次数。

由前述分析可知,对于传感器的瞬态响应信号,上述迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法可在工频频率游动的情况下有效去除瞬态响应信号中的工频干扰及其谐波干扰,且信号中的瞬态响应段越短、工频频率游动越小、干扰幅值越稳定,滤波效果越好。另外,需要说明的是,由于 ICA 法和 LEVKOV 法均为时域方法,所以所提方法同样为时域滤波法,信号滤波不会产生时延、相位滞后等问题。

2 方法验证

为了验证本文所提方法的工频干扰抑制效果,根据 1.3 节的方法流程,分别进行仿真验证和实验数据验证。仿真验证主要是针对给定传感器模型的阶跃响应输出信号中的工频干扰进行抑制,从而对比分析迭代 ICA 法、LEVKOV 法和迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频抑制效果;实验数据验证则是通过对一具体的传感器的阶跃响应实验数据进行工频干扰的抑制消除,从而验证方法的有效性。

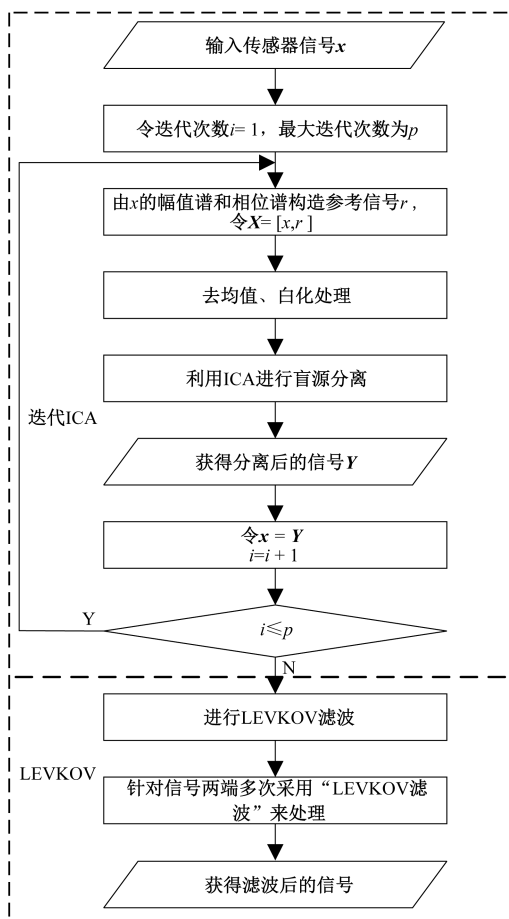


图 1 迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法流程

Fig. 1 Flowchart of a joint anti-power interference method of iterative ICA and LEVKOV

1) 仿真实验

以式(12)所给定的传感器 z 域离散模型(对应的采样率为 10 kHz)^[1]为例,向其施加阶跃激励来产生阶跃响应输出 s ,然后在输出信号中加上频率在 49.8 ~ 50.2 Hz 游动且含 3 次、5 次谐波的工频干扰 e ,从而获取含工频干扰的阶跃响应输出信号 x ,信号的时间长度为 10 s。其中, e 的具体表达式如式(13)所示, x 的表达式如式(14)所示。由于实际工频干扰的频率游动非常慢,所以仿真中在 10 s 时间以内采用线性模型来表达频率游动情况,即 $f = 49.8 + 0.04t$ 。

$$G(z) = \frac{0.033688 - 0.16458z^{-1} + 0.32646z^{-2}}{1 - 5.3184z^{-1} + 11.5736z^{-2} - 0.31274z^{-3} + 0.070722z^{-4} + 0.2042z^{-5} - 12.7105z^{-3} + 5.2157z^{-4} + 5.8702z^{-5} - 0.30783z^{-6} - 0.086537z^{-8} + 0.014463z^{-9} - 12.6344z^{-6} + 5.0036z^{-8} + 0.93345z^{-9}} \quad (12)$$

$$e = 0.03 \times \cos(2\pi \cdot f \cdot t) + 0.0025 \times \cos(2\pi \cdot 3f \cdot t) + 0.001 \times \cos(2\pi \cdot 5f \cdot t) \quad (13)$$

$$x = s + e \quad (14)$$

据此,则得未加工频干扰的阶跃响应输出 s 和含工频干扰的阶跃响应输出 x 的波形如图 2 所示。

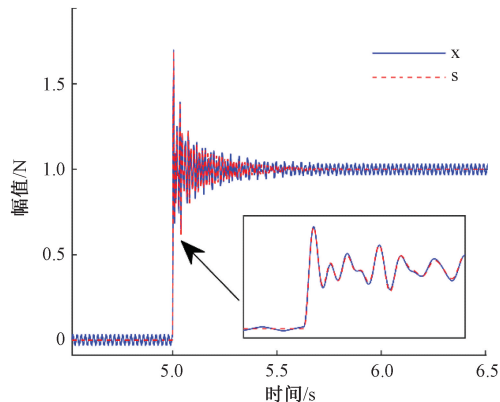


图 2 模型的阶跃响应信号

Fig. 2 Step response signal of the model

对含工频干扰的阶跃响应信号 x 分别采用迭代 ICA 法(迭代次数取 p 值为 50)、LEVKOV 法(M 取值为 0.006,取 q 值为 30)和迭代 ICA 与 LEVKOV 联合法(迭代次数 p 取值为 50,取 M 值为 0.003 1,取 q 值为 30)进行工频干扰滤波。此处,针对阶跃响应中应用迭代 ICA 与 LEVKOV 联合法抑制工频干扰的情况, M 值的选取方法为首先求出所有采样点处的 d 值,使得 M 稍大于“非线性段”(此处瞬态响应为阶跃响应,因此起跳点之前均为线性段)之前的所有 d 值,然后根据滤波效果对 M 值稍作调整即可。3 种方法的滤波效果如图 3 所示。图 3 中,ICA、LEV 和 I-L 分别为迭代 ICA 法、LEVKOV 法、迭代 ICA 与 LEVKOV 联合法的工频抑制结果曲线, x 、 s 分别为含噪声和不含噪声的阶跃响应曲线。

通过图 3 可以看出,单独的迭代 ICA 滤波在工频 50 Hz 附近出现了对工频干扰的“欠分离”的情形,且不能去除谐波干扰;单独的 LEVKOV 法则能有效去除工频及其谐波干扰,但其在频谱图上导致信号谱线在工频干扰及其谐波频率处波动;迭代 ICA 与 LEVKOV 联合滤波的方法则相较于 LEVKOV 法而言进一步提高了阶跃响应的工频干扰抑制效果,不仅时域的工频干扰信号更小,工频抑制后频谱图上的信号谱线在工频干扰频率及其谐波频率处也更平滑。

综上,仿真结果表明,迭代 ICA 与 LEVKOV 联合法对工频干扰的抑制效果要优于单独使用迭代 ICA 法和单独使用 LEVKOV 法。

2) 实验数据验证

以一风洞应变天平的实际动态标定实验数据(阶跃响应信号)为例,采用本文所提的迭代 ICA 与 LEVKOV 联合滤波法来对其进行工频干扰滤波,以验证方法的效

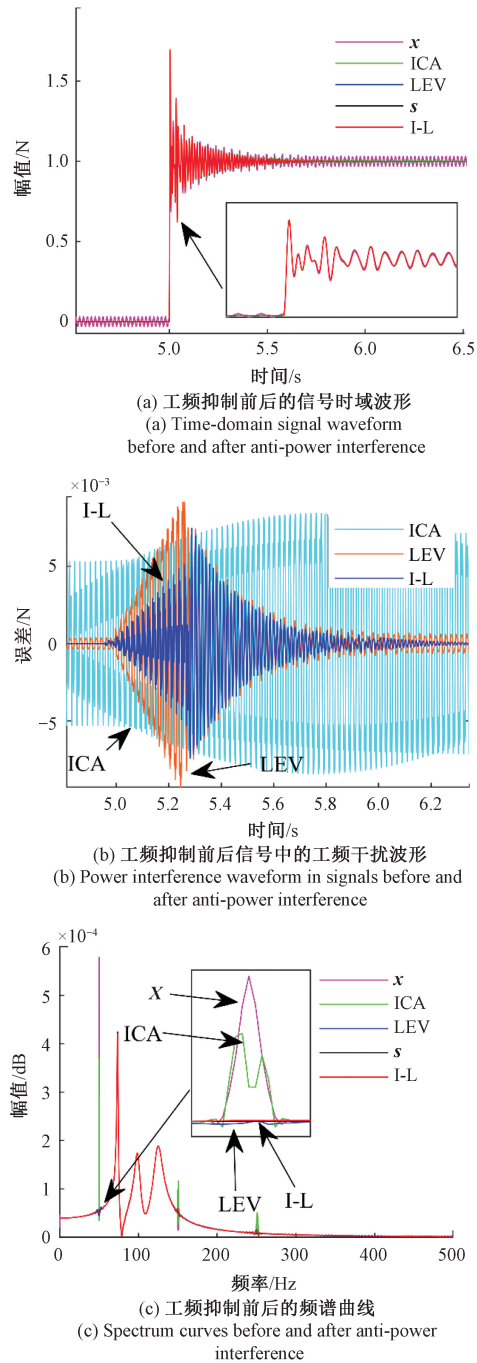


图 3 三种方法的工频抑制效果对照图
Fig. 3 Comparison diagram of power interference suppression effects of the three methods

果。该风洞应变天平是一种能将空间任意矢量力沿笛卡尔坐标系分解为 3 个正交方向的力(阻力 F_x 、升力 F_y 、偏航力 F_z)和 3 个正交的力矩(滚转力矩 M_x 、偏航力矩 M_y 、俯仰力矩 M_z)并进行测量的六维力传感器。风洞天平的阶跃响应数据的采样率为 10 kHz,各通道截取的实验数据长度为 10 s。限于篇幅,下面只给出其中的一个力方

向 F_y (迭代次数取 p 值为 50,取 M 值为 0.004 231,取 q 值为 30)和一个力矩方向 M_z (迭代次数取 p 值为 50,取 M 值为 0.004 3,取 q 值为 30)的阶跃响应信号的工频干扰抑制结果如图 4、5 所示。

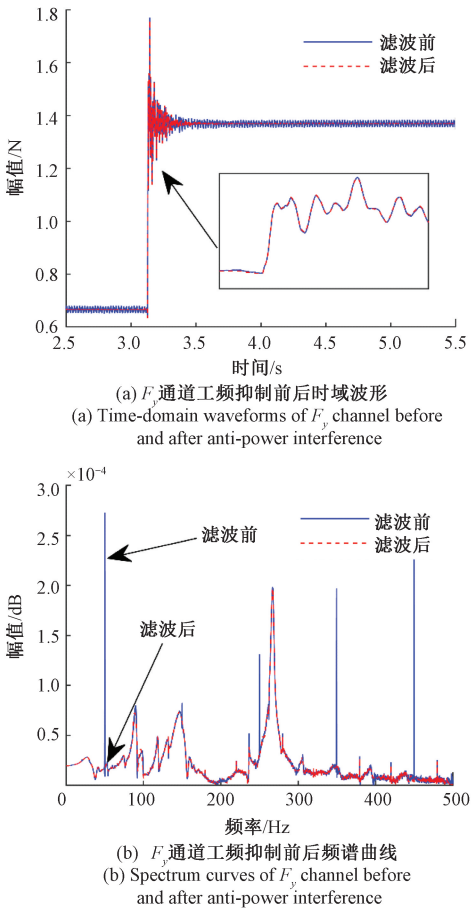
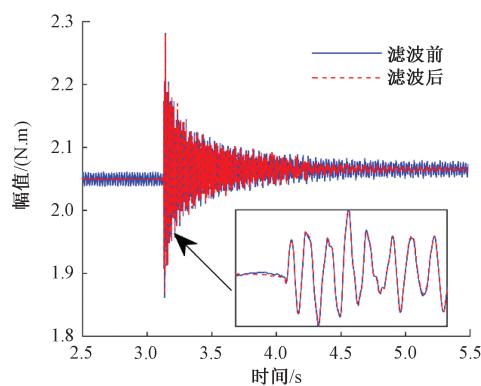
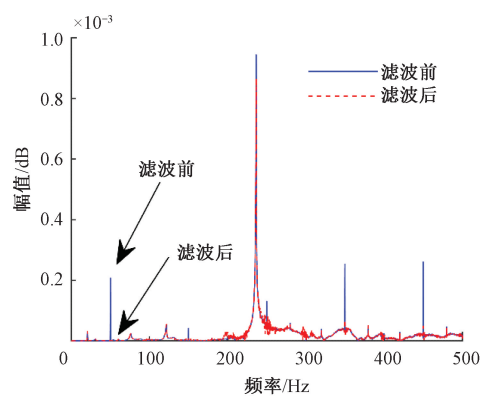


图 4 天平 F_y 通道阶跃响应信号工频抑制效果
Fig. 4 Power interference suppression effect of the step response signal of balance F_y channel

由图 4、5 可以看出,传感器阶跃响应信号中的工频及其谐波干扰被大幅降低,且有效信号未发生明显畸变。其中,由图 4(a)和 5(a)的滤波前后的时域波形可以看出,在传感器阶跃响应信号的初始段与平稳段中,由工频干扰引起的波动几乎被完全消除,暂态过程中的工频干扰也被有效抑制,波形未发生明显畸变,且无时延;同样,由图 4(b)和 5(b)的滤波前后的频谱图可以看出,传感器阶跃响应的频谱曲线在工频及其谐波频率处的干扰幅值被大幅衰减,相应频点处的曲线变得更加平滑,且传感器阶跃响应中的瞬态响应频谱保持较好,未出现工频及其谐波频率处干扰幅值的过度抑制情况。然而,对比图 4(b)和 5(b)也可看出,传感器 F_y 通道阶跃响应的滤波效果要比 M_z 通道的滤波效果好, M_z 通道在进行工频抑制后,其频谱曲线在 263.3 Hz 处出现了“削峰(信号发生畸变)”现象,而 F_y 通道则几乎没有出现“削峰”情况,且



(a) M_z 通道工频抑制前后时域波形
(a) Time-domain waveforms of M_z channel before and after anti-power interference



(b) M_z 通道工频抑制前后频谱曲线
(b) Spectrum curves of M_z channel before and after anti-power interference

图 5 天平 M_z 通道阶跃响应信号工频抑制效果

Fig. 5 Power interference suppression effect of the step response signal of balance M_z channel

F_z 通道滤波后频谱在工频及其谐波频率处也更为平滑。这主要是因为所提方法的滤波效果受阶跃响应调节时间的影响;调节时间越长,则 LEVKOV 法所处理的“非线性段”就越长,导致 LEVKOV 滤波过程中使用的“干扰模板”也就越长,从而导致 M_z 通道的滤波效果相对较差,抑制了部分有用信号。

由上述结果可以看出,迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制法对传感器瞬态响应信号中的工频干扰有不错的抑制效果,特别是在面对暂态过程相对较短的瞬态响应时,工频干扰的抑制效果更好。

3 结 论

本文针对传感器瞬态响应中常会受到的工频干扰影响的问题提出了迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制方法。通过迭代 ICA 法来降低频率游动的工频干扰,通过 LEVKOV 法来进一步降低工频及其谐波干扰。仿真结果表明,迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑

制法对频率游动的工频干扰的抑制效果要优于单独使用迭代 ICA 法以及 LEVKOV 法。实际传感器阶跃响应数据的工频抑制结果表明,迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制法能够大幅降低传感器阶跃响应信号中的工频及其谐波干扰,且信号中的暂态响应过程越短、滤波效果越好。

综上所述,本文所提出的迭代 ICA 与 LEVKOV 联合的工频干扰抑制法对瞬态响应中含有游动频率的工频及其谐波干扰具有较好的抑制效果,可以应用于传感器的动态标定等场合以降低传感器瞬态响应信号中的工频干扰的影响。当然,对于瞬态响应过程过长且工频干扰频率、幅值变化的情况,所提方法也有待改进以进一步提高工频干扰抑制效果。

参考文献

- [1] YANG S L, YANG R, ZHA F Y, et al. Dynamic compensation method based on system identification and error-overrun mode correction for strain force sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106649-106670.
- [2] 张思远, 林婷婷. 基于 ICA 的核磁共振探测随机噪声压制方法[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 314-316.
ZHANG S Y, LIN T T. Random noise removing of MRS signals based on ICA [J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 314-316.
- [3] 姜弢, 汪彦龙, 王京椰, 等. 基于 PCA 最优阶数的并行震源工频噪声压制[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 15-23.
JIANG T, WANG Y L, WANG J N, et al. Noise suppression of power-line interference for simultaneous source data based on PCA optimal rank analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 15-23.
- [4] 周媛媛, 常莹, 陈浩, 等. 基于参考台的盲源分离法在抑制地磁场近场噪音中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 572-586.
ZHOU Y Y, CHANG Y, CHEN H, et al. Application of reference-based blind source separation method in the reduction of near-field noise of geomagnetic measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 572-586.
- [5] ABLIN P, CARDOSO J, GRAMFORT A. Faster ICA under orthogonal constraint[C]. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2018: 4464-4468.
- [6] 孙九菊, 郭峰林, 杨茜. 一种滤除心电信号 50Hz 工频干扰的算法[J]. 武汉工业学院学报, 2012, 31(02): 62-64.
SUN J J, GUO F L, YANG Q. An algorithm for filtering

- 50 Hz frequency interference of ECG [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2012, 31(2): 62-64.
- [7] PANDA R, PATI U C. Removal of artifacts from electrocardiogram using digital filter [C]. 2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, 2012: 1-4.
- [8] GOWRI T, KUMAR P R, REDDY D V R K. Performance of variable step size LMS adaptive algorithm for the removal of artifacts from electrocardiogram using DSP processor [C]. 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), 2017: 342-346.
- [9] SUNDEEP G, KUMARI U V R. Reduction of power line interference by using adaptive filtering techniques in electrocardiogram [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2012, 1(5): 83-86.
- [10] BHAVANI S A, KUMAR D, SEETHALAKSHMI K. Performance study of various adaptive filter algorithms for noise cancellation in respiratory signals [J]. Signal Processing: An International Journal, 2010, 4(5): 267-278.
- [11] SAXENA S, JAIS R, HOTA M K. Removal of powerline interference from ECG signal using FIR, IIR, DWT and NLMS adaptive filter [C]. 2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 2019: 0012-0016.
- [12] GILANI S O, ILYAS Y, JAMIL M. Power line noise removal from ECG signal using notch, band stop and adaptive filters [C]. International Conference on Electronics, 2018: 1-4.
- [13] 吴红卫, 李铎, 顾思洪. 小波滤波在时间同步系统中应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 182-189.
- WU H W, LI D, GU S H. Application research of wavelet filtering in time synchronization system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 182-189.
- [14] 周金, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于改进小波阈值函数和 CEEMD 电能质量扰动检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 146-153.
- ZHOU J, GAO Y P, WU C, et al. Detection of power quality disturbances based on improved wavelet threshold function and CEEMD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 146-153.
- [15] 余琼芳, 胡亚倩, 杨艺. 基于小波特征及深度学习的故障电弧检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 105-113.
- YU Q F, HU Y Q, YANG Y. Arc fault detection based on wavelet feature and deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 105-113.
- [16] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
- HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 35-46.
- [17] WIJESINGHE S. Time series forecasting: Analysis of LSTM neural networks to predict exchange rates of currencies [J]. Instrumentation, 2020, 7(4): 25-39.
- [18] WDESILVA C. A systematic approach for instrumentation of a mechatronic system [J]. Instrumentation, 2019, 6(1): 116-136.
- [19] 刘超, 林晓焕, 廖文, 等. 基于小波变换与 ICA 结合的 EP 信号提取研究 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(9): 35-39.
- LIU CH, LIN X H, LIAO W, et al. Independent wavelet transform and component analysis in EP signal extraction [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(9): 35-39.
- [20] 张俊杰, 冯俞. 分层阈值电力电缆局放电信号的小波去噪研究 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(5): 68-72.
- ZHANG J J, FENG Y. Research on wavelet denoising of discharge signal of layered threshold power cable [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(5): 68-72.

作者简介



任杰, 2019 年于河南理工大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为自动检测与信号处理技术。
E-mail: 1044866531@qq.com

Ren Jie received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include automatic detection and signal processing technology.



杨双龙 (通信作者), 2014 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为自动检测技术和数字信号处理。

E-mail: ysl_dslab@hfut.edu.cn

Yang Shuanglong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2014. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests include automatic detection technology and digital signal processing.