基于 APES 算法的高精度间谐波检测

季 宇[1]，孙云莲[1]，梁进祥[1]，祝志慧[2]

（1.武汉大学电气工程学院，湖北 武汉 430072；2.华中农业大学，湖北 武汉 430072）

摘要：针对电力系统中存在的间谐波问题，提出了一种基于 APES（Amplitude and Phase Estimation，APES）算法的间谐波检测方法。该方法是在误差功率最小化目标下的非参数估计方法。分析了该方法在加权最小二乘解释及滤波器组解释下与其他谱估计方法的联系，说明了该方法是对信号频率的渐近无偏估计。通过实验仿真对比了在不同采样时间及信噪比条件下 APES 算法与其他算法的频率估计精度，证明了该方法具有较好的抗噪性及短时间窗估计特性。

关键词：间谐波；误差功率最小；非参数估计；加权最小二乘；渐进无偏估计

High accuracy approach for interharmonic detection via APES

JI Yu[1]，SUN Yun-lian[1]，LIANG Jin-xiang[1], ZHU Zhi-hui[2]

（1.School of Electric Engineering，Wuhan University，Wuhan 430072，China;
2. Huazhong Agriculture University, Wuhan 430072, China）

Abstract：A new method based on amplitude and phase estimation (APES) is presented for the interharmonic detection in power system．This approach is a kind of nonparametric spectral estimator based on the criterion of minimizing error power. The relation between the APES and other spectral estimators is concerned both in a weighted least-squares（WLS）framework and filterbank interpretations. It is proved to be an asymptotically unbiased moment estimators of frequencies of interharmonics．The experiment indicates the accuracy of the frequency estimation of the APES with other algorithm in the different cases of sampling time and SNR．The better anti-noise performance and short time window characteristic of the proposed method are also proved.

Key words：interharmonic；minimizing error power；nonparametric spectral estimator；weighted least-squares；asymptotically unbiased moment estimators

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)16-0044-05

0 引言

随着电力系统中非线性负荷的大量投用，谐波情况也愈发复杂，不仅存在频率为基波整数次的传统谐波，而且存在非整数次谐波成份。IEC 6100-2-1 标准[1]将这类谐波定义为间谐波（Interharmonic）。由于间谐波的幅值较小，以往对其危害性未给予重视，但随着人们对电能质量要求的提高，间谐波对于继保、高精度电子设备的影响以及由于间谐波引起的闪变效应等种种危害日益引起电力工作者的关注。因此，间谐波的准确检测便成为对其有效分析治理的前提和基础。

目前电力系统中的间谐波源主要是以电弧炉为主的波动性负荷及变频调速装置类的非线性负荷[2]。此外，高压直流输电技术从原理上分析等同于交直交的变流器[3]，因此也可划为第二类间谐波源。从频域上分析，前者由于电弧阻抗的时变性导致频谱呈连续谱，后者则是具有特征频率的离散谱，且其频率可通过互调理论进行分析。无论是连续谱还是离散谱都具有间谐波的统一特征即频率非工频整数次且幅值较小，这一特征决定了以往很多检测谐波的方法对于间谐波不再适用。目前间谐波的检测方法可以分为两大类，即非参数估计法和参数估计方法。前者包括 FFT、插值 FFT[4-5]、小波分析[6]、神经网络法[7]、支持向量机法[8]等；后者则主要是基于现代谱估计的方法[9-11]，包括 AR 谱估计法、PRONY 法、BURG 法以及一大类以 MUSIC 方法为典型的子空间分析法。这些方法中 FFT 法在非同步采样时会出现谱峰偏离，引起参数估计误差。插值 FFT 方法针对传统 FFT 方法的上述缺点进行算法修正，通过加窗和插值的方法克服频谱泄露及栏栅效应。然而这类算法运算量较大，一般需要求解高阶

方程组。小波分析类方法是将观测信号利用子带分离技术进行频带划分，得到各个频率谐波。而小波滤波器的混叠性及噪声敏感是这类方法的缺点。支持向量机法及神经网络法使用正交三角函数基来拟合观测数据。其中支持向量机法能够保证全局收敛性，且估计参数是全局最优的，但参数选择问题限制了该方法的广泛应用。参数估计方法中 SVD-TLS 法和 PRONY 法可以直接测量间谐波的全部参数，但计算量较大，且由于在推导公式中存在假设条件（如白噪声假设），因此实际检测结果可能存在较大偏差。Burg 法实质是格型滤波算法，利用莱文森递推公式计算模型参数。该方法避免了求解相关矩阵，但对于高阶模型及大样本情况分析效果较差。子空间法通过分离信号与噪声空间给出观测信号的伪谱，因此只能用于频率检测，且在信噪比较低时效果较差。本文结合 APES（Amplitude and Phase Estimation）算法测量间谐波参数。该方法属于非参数估计法，因此无需先验知识，并且可以直接估计出全部参数。本文中通过对仿真信号模型及交直交变流系统模型产生的间谐波的检测证明该方法在低信噪比及较少的采样数据情况下可精确检测间谐波。

1　APES 算法概述[12]

1.1 加权最小二乘框架解释下的 APES 算法

考虑式 (1)的复谐波模型：

$$x(n)=\beta(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}+\mathrm{e}(n)\ ,\quad n=0,\cdots,N-1 \tag{1}$$

其中：$\beta(\omega)=|\beta(\omega)|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}$，$\beta(\omega)$ 为谐波幅值（含相位信息，故对 $\beta(\omega)$ 的估计即是对幅值和相位同时估计）；$\mathrm{e}(n)$ 是观测随机噪声。现利用循环移位的方法将观测数据扩展成 $M\times L$ 阶矩阵 $\boldsymbol{Y}$。

$$\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{y}_0\ \cdots\ \boldsymbol{y}_{\mathrm{L}-1}]=\begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \cdots & x(L-2) & x(L-1)\\ x(1) & x(2) & & x(L-1) & x(L)\\ \vdots & & & & \vdots\\ x(M-2) & x(M-1) & & x(N-3) & x(N-2)\\ x(M-1) & x(M) & \cdots & x(N-2) & x(N-1)\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中：M 为阵列个数，L 为快照数，$L=N-M+1$ 且满足 $M\le N/2$。设 $\boldsymbol{E}(\omega)=[\boldsymbol{e}_0(\omega)\ \cdots\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{L}-1}(\omega)]$，$\boldsymbol{A}(\omega)=\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}(\omega)\boldsymbol{a}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{T}}(\omega)$。其中 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{P}}(\omega)=[1\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega}\ \cdots\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega(P-1)}]^{\mathrm{T}}$，则式 2 可表示为 $\boldsymbol{Y}=\beta(\omega)\boldsymbol{A}(\omega)+\boldsymbol{E}(\omega)$。根据文献[14]，将谐波参数估计问题转为式（3）所示最优化问题：

$$\min_{\beta,\ \omega}\left\|\boldsymbol{\Phi}^{1/2}(\omega)(\boldsymbol{Y}-\beta(\omega)\boldsymbol{A}(\omega))\right\| \tag{3}$$

矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(\omega)$ 的作用是对误差向量进行预白化，消除向量间的相关性并使功率归一化。而由于谐波向量是独立的，因此该矩阵同时也去除观测数据向量间的相关性。利用乘子法求解上述问题的结论得到：

$$\hat{\beta}(\omega)=\frac{\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega)\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega)}{\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega)\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\omega)\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}(\omega)} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{g}(\omega)=\frac{1}{L}\sum_{l=0}^{L-1}\boldsymbol{y}_l\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega l}=\frac{1}{L}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{L}}^{*}\boldsymbol{\mathrm{a}}_{\mathrm{M}}(\omega) \tag{5}$$

根据白化理论，$\boldsymbol{\Phi}(\omega)$ 的定义为：

$$\boldsymbol{Q}(\omega)=\boldsymbol{\Phi}(\omega)=E[\boldsymbol{e}_l(\omega)\boldsymbol{e}_l^{H}(\omega)]=\boldsymbol{R}-E[|\alpha(\omega)|^2]\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}(\omega)\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega) \tag{6}$$

分析误差相关矩阵的几种估计式：

（1）$M=1$，$L=N$，$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{DFT}}(\omega)=1$，则幅值估计等同于傅氏变换。

（2）$M>1$，$\boldsymbol{\Phi}_{A-\mathrm{DFT}}(\omega)=\boldsymbol{I}$，则估计问题等价于平滑傅氏变换，即 Welch 法。

（3）$M>1$，$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{Capon}}(\omega)=\hat{\boldsymbol{R}}$，问题等价于 Capon 最小方差约束法。

（4）$M>1$，$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{APES}}(\omega)=\hat{\boldsymbol{R}}-\boldsymbol{g}(\omega)\boldsymbol{g}^{H}(\omega)=\hat{\boldsymbol{Q}}(\omega)$，即给出 APES 幅值谱估计，且为无偏估计[14]。

式中：

$$\hat{\boldsymbol{R}}=\frac{1}{L}\sum_{l=0}^{L-1}\boldsymbol{y}_l\boldsymbol{y}_l^{H} \tag{7}$$

1.2 滤波器组解释下的 APES 算法

在滤波器组解释框架中对 APES 算法给出了更直观的定义，即式（18）优化问题：

$$\min_{h,\beta}\sum_{l=0}^{L-1}\left|\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(\omega)\boldsymbol{y}_l-\beta(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega l}\right|^2\ \text{s.t.}\ \boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega)\boldsymbol{h}(\omega)=1 \tag{8}$$

这里 $\boldsymbol{h}(\omega)$ 是阶数为 M 的 FIR 滤波器系数，约束的目的是保证在期望频率处滤波器的增益为 1。将式（8）展开，则

$$\begin{aligned}&\sum_{l=0}^{L-1}\left|\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(\omega)\boldsymbol{y}_{\mathrm{l}}-\beta(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega l}\right|^2=\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\hat{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{h}(\omega)-\\&\beta^{*}(\omega)\boldsymbol{h}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega)-\beta(\omega)\boldsymbol{g}^{\mathrm{H}}(\omega)\boldsymbol{h}(\omega)+|\boldsymbol{g}(\omega)|^2=\\&\left|\beta(\omega)-\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega)\right|^2+\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\hat{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{h}(\omega)\ -\left|\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega)\right|^2\end{aligned} \tag{9}$$

对式（9）以 $\beta(\omega)$ 为变量求极小值可得

$$\beta(\omega)=\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega) \tag{10}$$

将式（10）代入式（9），可转化为下面问题：

$$\min_{h}\boldsymbol{h}(\omega)(\hat{\boldsymbol{R}}-\boldsymbol{g}\boldsymbol{g}^{\mathrm{H}}(\omega))\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}(\omega)\ \text{s.t.}\ \boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{\mathrm{H}}(\omega)\boldsymbol{h}(\omega)=1 \tag{11}$$

使用拉格朗日乘子法计算式（11）并代入式（10），得到：

$$\hat{\beta}_{\mathrm{APES}}(\omega)=\frac{\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega)\hat{\boldsymbol{Q}}^{-1}(\omega)\boldsymbol{g}(\omega)}{\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}^{H}(\omega)\hat{\boldsymbol{Q}}^{-1}(\omega)\boldsymbol{a}_{\mathrm{M}}(\omega)} \tag{12}$$

这与加权最小二乘框架的结论是一致的。从上面可以看出，APES 是以最小化误差功率为目标的，如果将优化项改为最小功率输出，即

$$\min_{\beta,\ \omega}\sum_{l=0}^{L-1}\left|\boldsymbol{h}(\omega)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_l\right|^2 \tag{13}$$

则在相同约束下便得到 Capon 谱估计。特别地，文献[14]证明了滤波器组解释框架与加权最小二乘框架二者是统一的，且后者是前者的特例。

2　仿真实验

2.1 仿真信号测试实验

构造下面含有 4 个谐波分量的实验信号：

$$x=10\sin(2\pi 50t+\pi/4)+3\sin(2\pi 73t+\pi/3)+5\sin(2\pi 121t+\pi/6)+20\sin(2\pi 110t+\pi/5)+e(t) \tag{14}$$

其中，$e(t)$ 是加性高斯白噪声。现取信噪比为 10dB，采样频率 1 kHz，采样点数为 300 点，并比较 APES 算法和其他参数及非参数估计算法的频率搜索精度。图 1 及表 1 分析了该条件下各算法的频率估计能力。

表 1 N=300，SNR=10 dB 时各方法频率估计性能对比

Tab.1 Comparison of frequency estimation between various methods while N=300 and SNR=10 dB

方法	频率估计 / Hz							
	50		73		110		121	
	估计	误差	估计	误差	估计	误差	估计	误差
Welch	48.2	3.6	68.3	6.4	109.8	0.2	-	-
Multiaper	46.1	7.8	69.2	5.2	109.3	0.6	-	-
Cov	48.9	2.1	72.5	0.5	108.7	1.2	120.1	0.1
Yulear	49.3	1.3	65.3	10.6	109.8	0.2	-	-
BURG	50.1	0.2	73.8	1.1	109.5	0.4	123.2	2.6
MUSIC	49.5	0.9	72.7	0.3	110.1	0.1	121.3	1.1
Capon	50.0	0.1	72.9	0.1	110.0	0.1	121.1	0.9
APES	50.07	0.14	72.95	0.07	109.8	0.1	121.1	0.9

为比较各种方法的频率分辨能力定义如下谱峰分离判据：

$$\left|\hat{\alpha}((\omega_1+\omega_2)/2)\right|<\frac{1}{2}\left(\left|\hat{\alpha}(\omega_1)\right|+\left|\hat{\alpha}(\omega_2)\right|\right) \tag{15}$$

满足式（15）条件的两个频率点即可认为被正确识别。测试采样点从 100 到 500，信噪比 1 到 30 下各方法的频率估计性能。观察图 2 可以发现，非参数估计方法，如 Welch 法，Multi 法等抗噪能力普遍强于参数估计法，而现代谱估计法可以在较少采样点数情况下获得较高的分辨率，而基于 DFT 的非参数估计法的频率分辨率往往与采样点直接相关，因此很难在较短的采样时间下获得较高的频率分辨率。但 Capon 算法和 APES 算法对采样点及信噪比的要求均不高，且 APES 相对于 Capon 具有较小的估计方差。

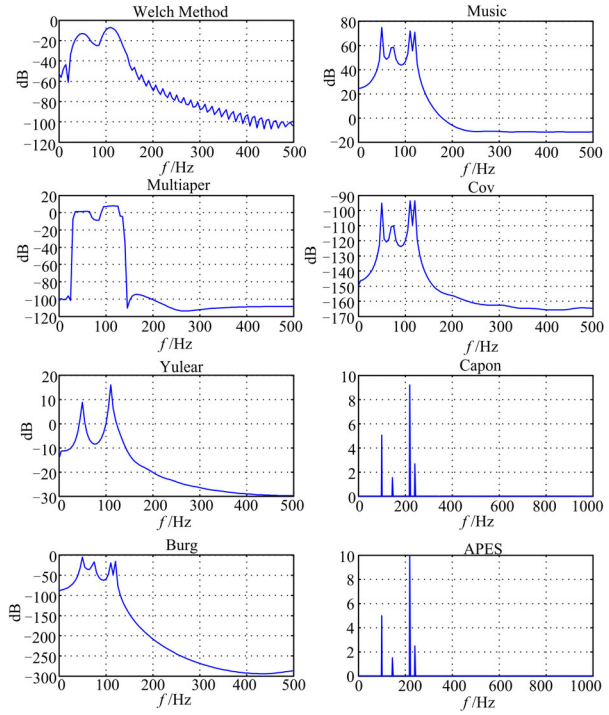
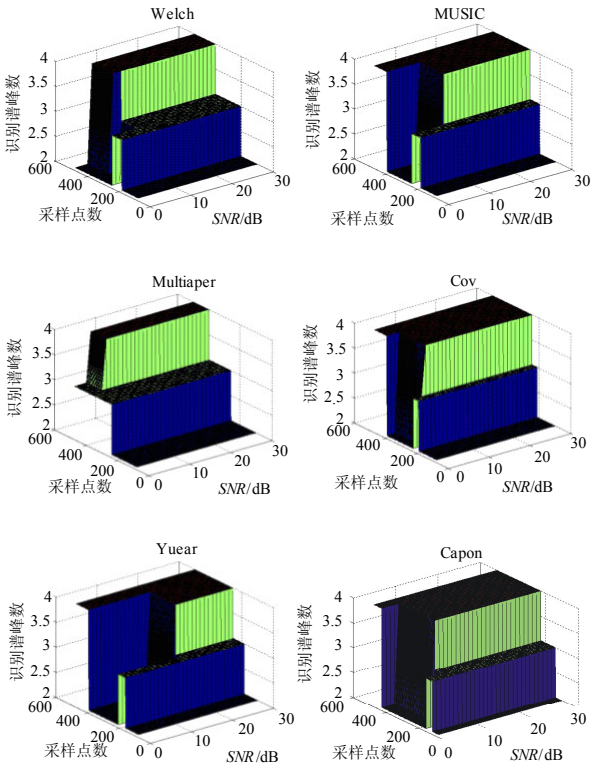


图 1 频谱分析比较

Fig.1 Frequency estimation with different methods



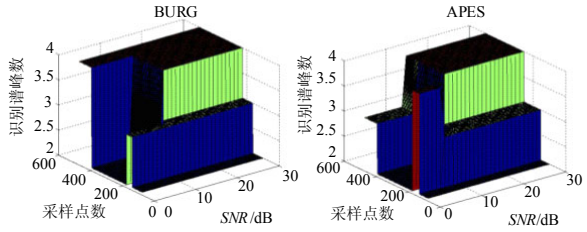


图 2 不同采样点及信噪比下各方法频率估计对比

Fig.2 Spectrum peaks analysis with different *SNR* and *N*

2.2 交直交系统间谐波测量

当前电力系统中存在的大量变频调速设备已经成为了影响电能质量的重要的谐波源，而由此产生的间谐波也成为了目前研究的热点。在大量变频调速设备中，交直交系统越来越成为主流，此外从系统拓扑结构来分析，高压直流输电系统（HVDC）也属于交直交系统。该类系统分为电压型（VSI）和电流型（CSI），图 3 是典型的电流型拓扑结构。

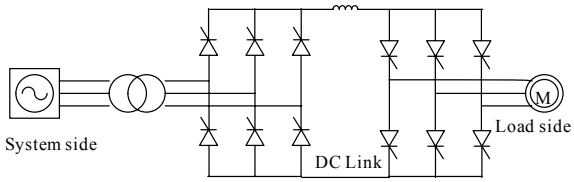


图 3 典型的电流型交直交系统拓扑

Fig. 3 Typical scheme of current type AC-DC-AC system

对于电流型交直交系统产生的间谐波问题可以使用非线性互调原理来进行分析，根据文献[15]的结论，系统供电侧，直流侧及负载侧的电流中间谐波具有如下频率特征：

1）直流侧：$f_{im}^{DC}=\left|6mf_1\pm6nf_2\right|$　m、$n=0,\ 1,\ 2\cdots$

2）系统测：$f_{id}^{s}=\left|6k(f_1\pm f_2)\pm f_1\right|$，　$k=0,\ 1,\ 2\cdots$

$f_{im}^{s}=\left|(6k\pm1)f_1\pm(6mf_1\pm6nf_2)\right|$，　$k=0,\ 1,\ 2\cdots$

3）负载侧：$f_{\mathrm{dr}}^{\mathrm{i}}=\left|6k(f_1\pm f_2)\pm f_2\right|$，　$k=0,\ 1,\ 2\cdots$

$f_{im}^{\mathrm{i}}=\left|(6k\pm1)f_2\pm(6mf_1\pm6nf_2)\right|$，　$k=0,\ 1,\ 2\cdots$

其中：f_1 和 f_2 表示系统侧及负载侧频率；f_{id}^{s} 和 $f_{\mathrm{dr}}^{\mathrm{i}}$ 表示 f_1 和 f_2 在系统侧和负载侧的调和产物；f_{im}^{s} 和 f_{im}^{i} 分别表示 f_1 和直流侧调和频率在系统测的调和产物及 f_2 和直流侧调和频率在系统侧的调和产物。

本文针对电流型系统利用 sumulink 建立仿真模型，如图 4，并对系统侧、直流侧及负载侧电流进行分析，波形如图 5~图 7 所示，频谱如图 8~图 10 所示。

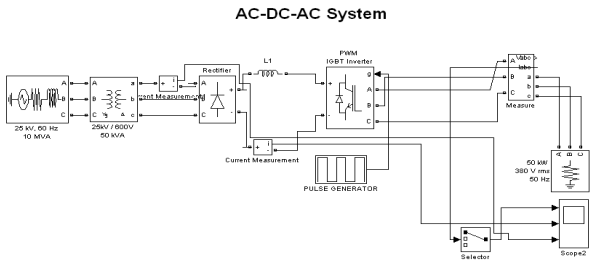


图 4 Simulink 仿真模型

Fig.4 System model based on Simulink

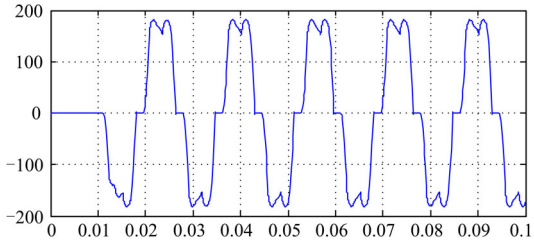


图 5 系统侧电流波形

Fig.3 Waveform of current on the system side

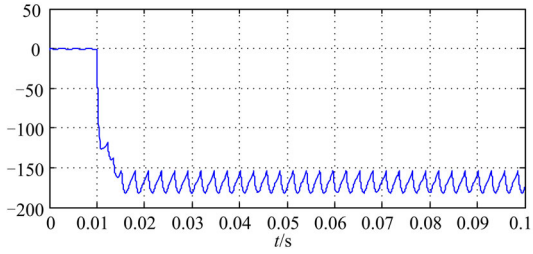


图 6 直流侧电流波形

Fig.6 Waveform of current on the DC link

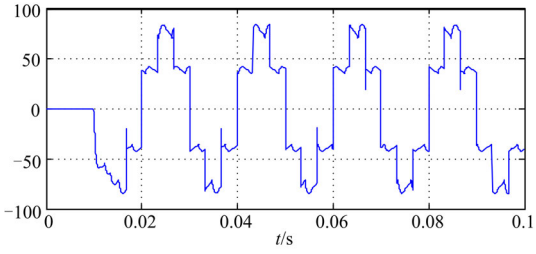


图 7 负载侧电流波形

Fig.7 Waveform of current on the output side

使用 APES 算法对电流波形进行频谱分析，如表 2 所示，实验结果基本符合前面给出的频率特征。

表 2 电流频率特征

Tab.2 Frequency features of current

位置	包含频率 / Hz
直流侧	50，60，120，180，240，300，360，420
系统测	30，50，150，210，330，390
交流侧	15，50，105，175，195，285，435

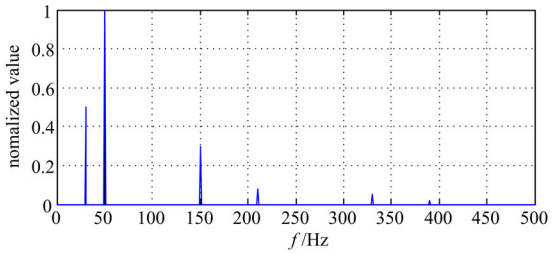


图 8 系统侧频谱分析

Fig.8 Frequency analysis on the supply side

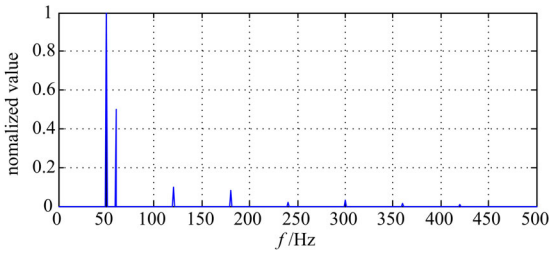


图 9 直流侧频谱分析

Fig.9 Frequency analysis on the DC link

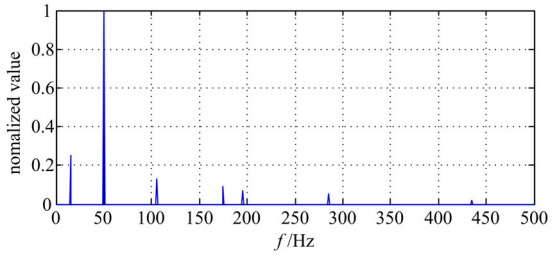


图 10 负载侧频谱分析

Fig.10 Frequency analysis on the output side

3 总结

本文结合 APES 算法对间谐波参数进行检测，分析了 APES 算法在加权最小二乘框架及滤波器组解释框架下与几种常用谱估计法的联系，讨论了各种算法在不同采样时间及信噪比情况下的间谐波检测情况。经实验仿真证明，APES 算法相对于其他谱估计法不需要先验知识，避免了参数估计不准对算法精确度的影响，且在较低信噪比及较短的采样时间下对间谐波参数的检测精度是较好的。最后结合典型的电流型交直交变流系统模型再次证明了该方法在间谐波频率检测中的有效性。需要注意的是由于 APES 算法中存在矩阵求逆，因此计算的数值稳定性不高，且速度较慢，但随着快速算法的不断出现，该方法将可直接在数字信号处理芯片上实现，成为间谐波检测的实时算法。

参考文献

[1] IEC Std. 61000-4-30 power quality measurements methods，testing and measurement techniques[S].

[2] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电，2001，18（3）：6-9.
LIN Hai-xue. Interharmonics in electrical power system[J]. Distribution & Utilization，2001，18（3）：6-9.

[3] 余涛，史军. 基于 FFT 和小波变换的交直流并联输电系统间谐波研究[J]. 电力自动化设备，2008，28（6）：44-48.
YU Tao，SHI Jun. Study of interharmonic in AC/DC parallel transmission system based on FFT and wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems，2008，28（6）：44-48.

[4] 张伏生，耿中行，葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报，1999，19（3）：63-66.
ZHANG Fu-sheng，GENG Zhong-xing，GE Yao-zhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE，1999，19（13）：63-66.

[5] 薛惠，杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报，2002，22（12）：106-110.
XUE Hui，YANG Ren-gang. Precise algorithms for harmonic analysis based on FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE，2002，22（12）：106-110.

[6] 薛惠，杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法[J]. 电力系统自动化，2003，27（5）：49-53.
XUE Hui，YANG Ren-gang. A novel method for non-integer harmonics measurement using continuous wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27（5）：49-53.

[7] 柴旭峥，文习山，关根志，等. 一种高精度的电力系统谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报，2003，23（9）：67-70.
CHAI Xu-zheng，WEN Xi-shan，GUAN Gen-zhi，et al. An algorithm with high accuracy for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE，2003，23（9）： 67-70.

[8] 占勇，丁屹峰. 电力系统谐波分析的稳健支持相量机方法研究[J]. 中国电机工程学报，2004，24（12）：43-47.
ZHAN Yong，DING Yi-feng. A robust support vector algorithm for harmonics analysis[J]. Proceedings of the CSEE，2004，24（12）：43-47.

[9] 石敏，吴国正，尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. 电网技术，2005，29（15）：81-84.
SHI Min，WU Guo-zheng，YIN Wei-min. Inter-harmonic parameter estimation based on multi-signal classification and prony method[J]. Power System Technology，2005，29（15）：81-84.

（下转第 53 页　continued on page 53）

[2] 马继涛，李军，董元方，等. 基于BP神经网络数学模型的短期负荷预测研究[J]. 长春理工大学学报，2007，30（2）：111-114.
MA Ji-tao，LI Jun，DONG Yuan-fang, et al. Research of short term load forecasting based on mathematical model of BP neural network [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology，2007，30（2）：111-114.

[3] 倪明，单渊达. 证据理论及其应用[J]. 电力系统自动化，1996，20（3）：76-80.
NI Ming，SHAN Yuan-da. Evidential theory and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems，1996，20（3）：76-80.

[4] 倪明，高晓萍，单渊达. 证据理论在中期负荷预测中的应用[J] . 中国电机工程学报，1997，17（3）：199-203.
NI Ming，GAO Xiao-ping，SHAN Yuan-da. Application of evidential theory in middle-term load forecasting[J]. Proceedings of the CSEE，1997，17（3）：199-203

[5] 任峰，李伟，丁超. 基于灰色-周期外延组合模型的电力负荷预测[J]. 电网技术, 2007，31（24）：52-54.
REN Feng，LI Wei，DING Chao. Load forecasting based on gray-periodic extensional combinatorial model[J]. Power System Technology, 2007，31（24）：52-54.

[6] 解光军. 量子神经计算[J]. 合肥工业大学学报，2002，25（3）：355-359.
XIE Guang-jun. On quantum neural computation[J]. Journal of Hefei University of Technology，2002，25（3）：355-359.

[7] 吕强，俞金寿. 量子神经元结构设计及其应用[J]. 控制与决策，2007，22（9）：355-359.
Lü Qiang，YU Jin-shou. Structure design of quantum neural unit and its application[J]. Control and Decision，2007，22（9）：355-359.

[8] 解光军，范海秋. 一种量子神经计算网络模型[J]. 复旦大学学报，2004，43（5）：700-703.
XIE Guang-jun. One quantum neural model[J]. Journal of Fudan University，2004，43（5）：700-703.

[9] 高在村. 基于量子门神经网络的车牌字符识别[J]. 计算机工程，2008，34（23）：227-229.
GAO Zai-cun. License plate character recognition based on neural network with quantum gate[J]. Computer Engineering，2008，34（23）：227-229.

[10] 刘刚，黄剑华，刘学仁. 基于改进型BP神经网络的短期电力负荷预测[J]. 电气应用，2005，24（12）：46-49.
LIU Gang，HUANG Jian-hua，LIU Xue-ren. Short-term load forecasting based on improved BP neural network [J]. Electricity Application，2005，24（12）：46-49.

[11] 孙奇，杨伟. D-S证据理论融合改进BP网络的短期负荷预测研究[J]. 继电器，2007，35（7）：61-65.
SUN Qi，YANG Wei. Research on load forecasting of fusion between D-S evidential theory improved BP network[J]. Relay，2007，35（7）：61-65.

[12] 曾鸣，冯义，刘达. 基于证据理论的多模型组合电价预测[J]. 中国电机工程学报，2008，28（16）：84-88.
ZENG Ming，FENG Yi，LIU Da. Electricity price forecasting based on multi-models combined by evidential theory[J]. Proceedings of the CSEE，2008，28（16）：84-88.

收稿日期：2009-09-19；　修回日期：2009-11-02

作者简介：

李　鹏（1982-），男，本科，工程师，主要研究方向为电力系统应用研究；

颜　艳（1984-），女，硕士研究生，主要研究方向为配电自动化。E-mail：yanyan6284@yahoo.com.cn

（上接第 48 页　continued from page 48）

[10] 路鸣，保铮. 改善 MUSIC 空间谱估计分辨率的后处理算法[J]. 电子学报，1990，18（4）：57-62.
LU Ming，BAO Zheng. Post-processing for resolution improvement of the MUSIC algorithm[J]. Actaelectronica Sinica，1990，18（4）：57-62.

[11] 王波，杨洪耕. 基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J]. 继电器，2006，34（4）：49-52.
WANG Bo，YANG Hong-geng. A method for interharmonic measurement based on AR model spectral estimation and interpolation FFT algorithm[J]. Relay，2006，34（4）：49-52.

[12] Petre Stoica，LI Hong-bin，LI Jian. Amplitude estimation of sinusoidal signals：survey，new result，and an application[J]. IEEE Transations on Signal Processing, 2000, 48(2).

收稿日期：2009-09-21；　修回日期：2010-04-22

作者简介：

季　宇（1982-），男，博士，研究方向为现代信号处理在电力系统中的应用；E-mail：anxiso@sina.com

孙云莲（1962-），女，博导，研究方向为现代信号处理在电力系统中的应用，电能质量分析与控制；

梁进祥（1983-），男，硕士，研究方向为无线传感器网络技术在智能电网中的应用。