有效滤除偶次谐波的改进半波傅立叶算法

邹智慧，李啸骢，罗晓芬，范垂正

（广西大学电气工程学院，广西 南宁 530004）

摘要：目前的改进半波傅立叶算法，能有效滤除电力系统故障时暂态电信号中的直流分量及奇次谐波分量，从而比较准确地算出基波分量。但信号中若含有较大成分的偶次谐波，算法将出现较大误差。提出一种新的改进半波傅立叶算法，即通过适当增加采样点数，来进一步有效滤除偶次谐波，从而较好地提高算法精度。改进后的算法可应用于快速和准确的微机保护。

关键词：微机保护；暂态电量；傅立叶算法；偶次谐波

Improved half-wave Fourier algorithm that can filtrate even wave components availably

ZOU Zhi-hui，LI Xiao-cong，LUO Xiao-fen，FAN Chui-zheng

(College of Electrical Engineering，Guangxi University，Nanning 530004，China)

Abstract: Existing improved half-wave Fourier algorithm is capable of effectively suppressing the effects of exponential decaying DC and odd-order wave components of transient signals introduced by power system faults, which enables more accurate computation of fundamental wave component. However, if the signals contain much even-order wave components, the algorithm will introduce significant errors. This paper proposes a new improved half-wave Fourier algorithm. By increasing sampling points appropriately, the algorithm can effectively eliminate the effects of even-order wave components to achieve more accurate computation. The new algorithm can be used for fast and accurate microprocessor-based protection.

Key words: microprocessor-based protection; transient signal; Fourier algorithm; even harmonics

中图分类号：TM71；TM744 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2009)20-0065-04

0 引言

随着电力系统的快速发展，电网容量的扩大，使得电力系统的结构越来越复杂，因此对电力系统的实时监控、调度自动化和微机继电保护等的功能要求也日趋提高，而其中电力参数的测量是最基本的功能。如何快速、准确地采集计算各种电力参数显得尤为重要。分析和评价采样算法的标准是：精度、速度。速度和精度是一对矛盾，所以研究算法的实质是如何在速度和精度之间进行权衡。

目前常用的交流采样算法主要建立在傅立叶级数理论和数据拟合理论等基础上，比较典型的有全波、半波傅立叶算法及其改进算法[1~3]、最小二乘算法以及小波分析算法等。在没有偶次谐波的情况下，改进的半波傅立叶算法[3]效果非常理想，数据窗短，计算精确，比较适用于电力系统微机保护，而一旦故障信号中含有比较大成分的偶次谐波，受其影响误差将比较大。本文提出通过适当增加采样点数，对算法进行改进来滤除偶次谐波，提高计算精度，更好地适用于电力系统各种微机保护。

基金项目：国家自然科学基金项目（50747026）；广西科学基金项目（桂科自0728027）；南宁市市校科技合作专项项目（200801029D）；北海市市校科技合作专项项目（北科合200801027）

1 电力系统故障电量

根据电力系统对继电保护速动性要求，保护装置所面对的是电力系统发生故障时的暂态过程。由于电力系统故障的随机性和引起故障的因素的复杂性，欲用精确的数学表达式来描述电力系统故障时的暂态电压、电流信号是比较困难的。在实际过程中，可根据工程需要，做出不同的假设。通常将故障电压、电流函数用3个主要部分表示：

(1) 衰减的非周期分量 $A_0 e^{-\alpha t}$；

(2) 基波分量和整数倍频周期分量

$$\sum_{k=1}^{N} A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k)；$$

(3) 非整数倍频周期分量 $\sum_{j=1}^{m} A_j \cos(\omega_j t+\varphi_j)$ 和干扰。

将各非整数倍频分量和干扰用 W 表示，则电力系统发生故障时，电压、电流函数的解析式为：

$$u(t) = A_0 e^{-\alpha t} + \sum_{k=1}^{N} A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k) + W \tag{1}$$

即电力系统故障时的电压、电流函数是在基波基础上，叠加有衰减的非周期分量、整数、非整数倍频周期分量和其它干扰信号。通常非整数倍频周期分量幅值很小，干扰经过硬件滤除后影响也可以忽略不计。所以通常主要考虑故障信号中衰减的非周期分量[4]、整数倍频周期分量对基波的影响。快速、准确地提取故障信号中的基波分量[5]是提高继电保护快速准确动作的重要手段。

2　微机保护中的傅立叶算法[6]

2.1　全波傅立叶算法

全波傅立叶算法就是电力系统中经常采用的傅氏算法，它是由全周的正弦滤波器和余弦滤波器构成，算法的数据窗为每周波的全部采样点。不过，全波傅立叶算法只能分辨出基频和倍频分量，无法分辨出故障信号中衰减的非周期分量，所以测量出来的基波参数受衰减非周期分量的影响，存在一定误差，满足不了要求。

2.2　半波傅立叶算法

半波傅立叶算法是由半周的正弦滤波器和余弦滤波器构成，算法的数据窗为每周波全部采样点的一半。但是半波傅氏算法不能消除偶次谐波分量和衰减非周期分量的影响，当偶次谐波分量和衰减非周期分量幅值较大时，算法的误差将很大，一般不能应用。这一点在下节的讨论中将会给出解释。

2.3　改进的全波傅氏算法[2]

改进的全波傅氏算法，算法数据窗为 $N+1$ 个点，计算量比较小，采用这种校正方法，不需要做任何假定和简化，就可以消除衰减非周期分量的影响,可以比较精确地计算出故障信号当中基波和各次谐波的幅值和相角。

2.4　改进的半波傅氏算法[3]

为了加快故障时继电保护的动作速度，同理可将这种算法原理应用于半波傅氏算法，算法数据窗为 $\frac{N}{2}+2$ 个点，采样时间约只有半个周期，能有效消除衰减直流分量的影响。若故障信号中不含偶次谐波，此算法效果和改进的全波傅立叶算法一样可以相当精确地算出故障信号中的基波和各奇次谐波的幅值和相角。而当故障信号中含有比较大成分的偶次谐波，该算法还是有一定的误差，需要特殊处理或与其它算法配合滤除偶次谐波才行。经研究，本文提出了一种除了能滤除衰减直流分量和奇次谐波分量外，还能同时滤除部分偶次谐波分量的改进半波傅氏算法。

3　滤除偶次谐波的改进半波傅氏算法

设故障信号为：

$$u(t) = U_0 e^{-\alpha t} + \sum_{k=1}^{M} U_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \tag{2}$$

若信号不含有偶次谐波分量，对其进行半波傅立叶变换后得各奇次谐波系数的实部、虚部分别为：

$$\begin{cases} a_n = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} u(t)\cos(n\omega t)\mathrm{d}t = \\ \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\cos(n\omega t)\mathrm{d}t + \\ \frac{4}{T}\sum_{k=1}^{M}\int_0^{\frac{T}{2}} U_{2k-1}\cos((2k-1)\omega t + \varphi_{2k-1})\cos(n\omega t)\mathrm{d}t = \\ \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\cos(n\omega t)\mathrm{d}t + U_{2k-1}\cos\varphi_{2k-1} \\ b_n = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} u(t)\sin(n\omega t)\mathrm{d}t = \\ \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\sin(n\omega t)\mathrm{d}t + \\ \frac{4}{T}\sum_{k=1}^{M}\int_0^{\frac{T}{2}} U_{2k-1}\cos((2k-1)\omega t + \varphi_{2k-1})\sin(n\omega t)\mathrm{d}t = \\ \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\sin(n\omega t)\mathrm{d}t + U_{2k-1}\sin\varphi_{2k-1} \end{cases} \tag{3}$$

$$令\begin{cases} \Delta K_{cn} = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\cos(n\omega t)\mathrm{d}t \\ \Delta K_{sn} = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_0 e^{-\alpha t}\sin(n\omega t)\mathrm{d}t \end{cases} \tag{4}$$

可将式（3）化简为：

$$\begin{cases} a_n = \Delta K_{cn} + U_n\cos\varphi_n \\ b_n = \Delta K_{sn} + U_n\sin\varphi_n \end{cases} \tag{5}$$

又由于：

$$\int_0^{T/2} \mathrm{e}^{-\alpha t}\cos(n\omega t)\mathrm{d}t =$$

$$\frac{1}{n\omega}\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin n\omega t\Big|_0^{\frac{T}{2}} + \frac{\alpha}{n\omega}\int_0^{T/2}\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin(n\omega t)\mathrm{d}t =$$

$$\frac{\alpha}{n\omega}\int_0^{T/2}\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin(n\omega t)\mathrm{d}t$$

所以ΔK_{cn}、ΔK_{sn}有如下关系：

$$\Delta K_{cn} = \frac{\alpha}{n\omega}\Delta K_{sn} \tag{6}$$

对于基波式（5）可写为：

$$\begin{cases} a = \Delta K_{c1} + U_1\cos\varphi_1 \\ b = \Delta K_{s1} + U_1\sin\varphi_1 \end{cases} \tag{7}$$

对含有偶次谐波分量的故障信号进行半波傅立叶变换后基波系数实部、虚部精确表达式分别为：

$$\begin{cases} a = \Delta K_{c1} + U_1\cos\varphi_1 + \sum\limits_{h=1}^{\infty}\dfrac{-8h}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\sin\varphi_{2h} \\ b = \Delta K_{s1} + U_1\sin\varphi_1 + \sum\limits_{h=1}^{\infty}\dfrac{-4}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\cos\varphi_{2h} \end{cases} \tag{8}$$

$\sum\limits_{h=1}^{\infty}\dfrac{-8h}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\sin\varphi_{2h}$、$\sum\limits_{h=1}^{\infty}\dfrac{-4}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\cos\varphi_{2h}$分别为所有偶次谐波实部和虚部分量和。

若只考虑衰减直流分量和某偶次（2 h次）谐波分量的影响时，则有：

$$\begin{cases} a = \Delta K_{c1} + U_1\cos\varphi_1 + \dfrac{-8h}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\sin\varphi_{2h} \\ b = \Delta K_{s1} + U_1\sin\varphi_1 + \dfrac{-4}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\cos\varphi_{2h} \end{cases} \tag{9}$$

为滤除该偶次谐波分量，可以通过增加采样点数来进行，特采集如下三个数据窗：

(1) 数据窗1，$t\in[0,\frac{T}{2}]$

$$\begin{cases} a_1 = \Delta K_{c1} + U_1\cos\varphi_1 + \dfrac{-8h}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\sin\varphi_{2h} \\ b_1 = \Delta K_{s1} + U_1\sin\varphi_1 + \dfrac{-4}{\pi(4h^2-1)}U_{2h}\cos\varphi_{2h} \end{cases} \tag{10}$$

$$令\begin{cases} A = U_1\cos\varphi_1 \\ B = U_1\sin\varphi_1 \end{cases},\ \begin{cases} L_1 = \dfrac{-8h}{\pi(4h^2-1)} \\ L_2 = \dfrac{-4}{\pi(4h^2-1)} \end{cases},\ \begin{cases} S = U_{2h}\sin\varphi_{2h} \\ R = U_{2h}\cos\varphi_{2h} \end{cases} \tag{11}$$

$$则有：\begin{cases} a_1 = \Delta K_{c1} + A + L_1 S \\ b_1 = \Delta K_{s1} + B + L_2 R \end{cases} \tag{12}$$

(2) 延迟ΔT，取数据窗2，$t\in[\Delta T,\frac{T}{2}+\Delta T]$

$$\begin{cases} a_2 = \Delta K_{c1}\cdot\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} + U_1\cos(\varphi_1+\omega\Delta T) + L_1 U_{2h}\sin(\varphi_{2h}+2h\omega\Delta T) \\ b_2 = \Delta K_{s1}\cdot\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} + U_1\sin(\varphi_1+\omega\Delta T) + L_2 U_{2h}\cos(\varphi_{2h}+2h\omega\Delta T) \end{cases} \tag{13}$$

展开有：

$$\begin{cases} a_2 = \Delta K_{c1}\cdot\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} + A\cos(\omega\Delta T) - B\sin(\omega\Delta T) + L_1 S\cos(2h\omega\Delta T) + L_1 R\sin(2h\omega\Delta T) \\ b_2 = \Delta K_{s1}\cdot\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} + B\cos(\omega\Delta T) + A\sin(\omega\Delta T) + L_2 R\cos(2h\omega\Delta T) - L_2 S\sin(2h\omega\Delta T) \end{cases} \tag{14}$$

$$令\begin{cases} k_m = \cos(m\omega\Delta T) \\ g_m = \sin(m\omega\Delta T) \end{cases},\ \varpi = \mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} \tag{15}$$

则有：

$$\begin{cases} a_2 = \varpi\Delta K_{c1} + Ak_1 - Bg_1 + L_1(Sk_{2h} + Rg_{2h}) \\ b_2 = \varpi\Delta K_{s1} + Bk_1 + Ag_1 + L_2(Rk_{2h} - Sg_{2h}) \end{cases} \tag{16}$$

(3) 延迟$2\Delta T$，取数据窗3，$t\in[2\Delta T,\frac{T}{2}+2\Delta T]$

$$\begin{cases} a_3 = \Delta K_{c1}\cdot(\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T})^2 + A\cos(2\omega\Delta T) - B\sin(2\omega\Delta T) + L_1 S\cos(4h\omega\Delta T) + L_1 R\sin(4h\omega\Delta T) \\ b_3 = \Delta K_{s1}\cdot(\mathrm{e}^{-\alpha\Delta T})^2 + B\cos(2\omega\Delta T) + A\sin(2\omega\Delta T) + L_2 R\cos(4h\omega\Delta T) - L_2 S\sin(4h\omega\Delta T) \end{cases} \tag{17}$$

化简有：

$$\begin{cases} a_3 = \varpi^2\Delta K_{c1} + Ak_2 - Bg_2 + L_1(Sk_{4h} + Rg_{4h}) \\ b_3 = \varpi^2\Delta K_{s1} + Bk_2 + Ag_2 + L_2(Rk_{4h} - Sg_{4h}) \end{cases} \tag{18}$$

联立方程组(6)、(12)、(16)、(18)，有七个方程，就可解得七个未知数ΔK_{c1}，ΔK_{s1}，S，R，A，B，ϖ。这里只需算出ΔK_{c1}，ΔK_{s1}，S，R，即可滤除该偶次谐波和衰减非周期分量。理论上ΔT可取任意值，为了方便计算，可取ΔT为采样时间T_s，为了避免指数运算，可以将$\varpi = \mathrm{e}^{-\alpha\Delta T}$用泰勒级数展开，取低阶项作为近似值，即$\varpi = \mathrm{e}^{-\alpha\Delta T} \approx 1-\alpha\Delta T$，$\varpi^2 = \mathrm{e}^{-2\alpha\Delta T} \approx 1-2\alpha\Delta T$，从而可以大大简化计算。

校正后的基波实部、虚部分别为：

$$\begin{cases} U_1\cos\varphi_1 = a_1 - \Delta K_{c1} - L_1 S \\ U_1\sin\varphi_1 = b_1 - \Delta K_{s1} - L_2 R \end{cases}$$

4　算法的仿真比较

为了验证该算法的效果，用Matlab进行仿真计算，并与改进半波傅氏算法进行了比较，结果见表1和表2。仿真信号设为：

$$u(t)=U_0 e^{\frac{-t}{\tau}}+U_1\cos(\omega_1 t+\varphi_1)+U_2\cos(\omega_2 t+45^\circ)+30\cos(\omega_3 t+45^\circ)+10\cos(\omega_5 t)$$

取直流分量的衰减时间常数 $\tau=30$ ms，全周波采样点数 N=32，ω_1 为基波角频率。

表1　不含偶次谐波时，新算法与改进半波傅氏算法的仿真计算结果和误差

Tab.1 Results and errors of simulating calculation of new algorithm and improved half-wave Fourier algorithm without even harmonic components

U_0	U_1	U_2	φ_1	改进半波傅氏算法		新算法		改进半波傅氏算法误差		新算法误差	
				基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相
150	100	0	45°	100	45°	106.03	41.23°	0	0	6.03%	8.38%
100	100	0	45°	100	45°	103.97	42.43°	0	0	3.97%	5.71%
40	100	0	45°	100	45°	101.56	43.95°	0	0	1.56%	2.33%
100	100	0	45°	100	60°	102.67	56.93°	0	0	2.67%	5.12%
100	100	0	45°	100	30°	105.00	28.10°	0	0	5.00%	6.33%

表2　含二次谐波时，新算法与改进半波傅氏算法的仿真计算结果和误差

Tab.2 Results and errors of simulating calculation of new algorithm and improved half-wave Fourier algorithm with secondary harmonic

U_0	U_1	U_2	φ_1	改进半波傅氏算法		新算法		改进半波傅氏算法误差		新算法误差	
				基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相	基波幅值	基波初相
150	100	20	45°	73.86	80.83°	106.43	51.50°	26.14%	79.62%	6.43%	14.44%
100	100	20	45°	70.24	77.30°	104.81	52.89°	29.76%	71.78%	4.81%	17.53%
40	100	20	45°	69.15	63.39°	102.94	54.60°	30.85%	40.87%	2.94%	21.33%
100	100	20	60°	84.58	93.57°	108.17	66.85°	15.42%	55.95%	8.17%	11.42%
100	100	30	30°	42.44	72.94°	100.40	43.87°	57.56%	143.13%	0.40%	46.23%
100	100	30	45°	61.38	93.22°	106.51	57.97°	38.62%	107.2%	6.51%	28.82%

从上面的仿真计算可以看出，当信号不含偶次谐波时，改进半波傅氏算法很理想，新算法虽然会产生一点误差，但误差都比较小；而当信号中含有偶次谐波分量时，改进半波傅氏算法的误差就相当大，这时新算法的优越性就显现出来，其误差相对改进半波傅氏算法来说就小很多。

如果同时考虑两个偶次谐波的影响，只需再增加一个采样点就可以继续算出它们的分量值，不过求解过程中的计算量有所增加。以此类推，可以根据实际情况适当增加采样点数就可以有效滤除偶次谐波分量的影响。随着高性能微处理器的出现，该算法完全可以满足实时微机保护的要求。

5　结论

本文针对改进半波傅氏算法存在的不能滤除偶次谐波的问题，提出了一种能滤除偶次谐波的改进半波傅氏算法，即通过适当增加采样点数来有效滤除偶次谐波，提高算法的精度，以满足工业生产中对电量的采集要求。仿真结果验证了新算法的正确性和实用性。

参考文献

[1]　李永丽,陈英超,贺家李.一种基于半波傅氏算法的继电保护快速算法[J].电网技术，1996，20(1):52-55.
LI Yong-li，CHEN Chao-ying，HE Jia-li. A Fast Algorithm Based on Half-cycle Fourier Algorithm for Protective Relaying[J]. Power System·Technology，1996，20(1)：52-55.

[2]　熊岗,陈陈.一种能滤除直流分量的交流采样新算法[J].电力系统自动化,1997,21(2):24-26.
XIONG Gang，CHEN Chen. A Novel Alternating Current Sampling Algorithm for Filtering Decaying Direct Current Component[J].Automation of Electric Power Systems,1997，21(2)：24-26.

[3]　丁书文,张承学,龚庆武.半波傅氏算法的改进[J].电力系统自动化,1999,23(5):18-20.

（下转第 107 页　continued on page 107）

下的最大动作电流 $i_{op.max}=K_{rel}K_{st}K_{aper}f_iI_{k.ou.max}/n_{ba}=$ $1.5\times0.5\times2\times0.1\times6.1\times\dfrac{460\times1000\times1}{0.9\times\sqrt{3}\times20\times20000}\approx0.68(A)$，实际此点的定值为 0.2+(6.1−1)×0.5=2.75(A)>>0.68(A)。

按空载时同槽同相同分支 3 匝匝间短路保护灵敏度满足要求认可该保护灵敏度满足要求，即可取不完全裂相横差保护动作值为 0.196825/1.5≈0.13 A，当负荷电流≤额定电流时仍有 0.13 A>>0.04 A，当发电机端（保护区外）发生最大故障短路时仍有 0.13+(6.1−1)×0.5=2.68(A)>>0.68(A)。参考文献[3]，考虑由于定子与转子间气隙不同，使各分支定子绕组电流也不相同，产生第二种不平衡电流，其 $i_{op.min}$ 取 0.15～0.30 I_N/n_{LH}，今 $0.13/\left(\dfrac{460\times1000\times1}{0.9\times\sqrt{3}\times20\times20000}\right)\approx$ 0.176217 仍处 0.15～0.30 之间。

为使同槽同相同分支 3 匝匝间短路时保护灵敏度满足要求，笔者认为不完全裂相横差保护定值取 0.13 A 为宜。

5.3 综合差动保护方式仍有死区

由前计算分析可知，发电机端部发生同相同分支 1 匝匝间短路时，其短路电流<<保护定值，保护不能动作；发电机负荷电流低于某值时，某分支断线保护亦不能动作。由此说明，综合差动保护方式虽然优于其他组合保护方式，但其仍不可避免地存在保护死区。

5.4 综合差动保护方式分析计算较为复杂

综合差动主保护方式虽然结构简单，但发电机定子绕组不同分支发生故障时，主保护中各保护装置的感受量是不一致的；可推知，定子绕组发生相间故障和同相不同分支故障时，主保护中各保护装置的感受量亦是不一致的。这就要求我们在进行工程实际故障综合分析时，需根据保护动作量和实际故障波形进行认真分析，准确分析出故障原因及症结所在。

本文主要根据文献[1,2]进行的分析计算是近似的实际工程处理方法，按该文献所述较为精确的发电机定子绕组内部故障的理论计算方法为多回路分析法，但该法所必需的原始资料和参数太多，且计算过程繁杂必须利用计算机编程完成，这在实际工程处理中是难以实现的，因而本文的分析计算只是从工程实用角度分析故障量及保护动作量的基本趋势。

参考文献

[1] 王维俭，侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础（第二版）[M]. 北京：水利电力出版社，1989.

[2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，1996.

[3] DL/T 684-1999，大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

[4] 何仰赞，等. 电力系统分析[M]. 武汉：华中工学院出版社，1987.

[5] 华北电力学院. 电力系统故障分析[M]. 水利电力出版社，1984.

收稿日期： 2008-11-08；　**修回日期：** 2008-11-24

作者简介：

胡嘉武（1956-），男，高级工程师，工学硕士，从事水电厂技术管理工作。E-mail:hujw@qdc.com.cn

（上接第 68 页　continued from page 68）

DING Shu-wen，ZHANG Cheng-xue，GONG Qing-wu. An Improved Half-wave Fourier Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,1999，23(5)：18-20.

[4] 胡志坚，张承学，陈允平，等. 滤除衰减非周期分量的微机保护算法研究[J]. 电网技术，2001，25(3)：7-11.
HU Zhi-jian,ZHANG Cheng-xue,CHEN Yun-ping,et al. Study on Protective Algorithm for Elimination of Decaying Aperiodic Component[J]. Power System Technology，2001，25(3)：7-11.

[5] 李斌，李永丽，贺家李. 一种提取基波分量的高精度快速滤波算法[J]. 电力系统自动化，2006，30（10）：39-43.
LI Bin,LI Yong-li,HE Jia-li.Accurate and Fast Filtering Algorithm for Fundamental Component[J]. Automation of Electric Power Systems,2006，30(10)：39-43.

[6] 高婧，郑建勇，潘震东. 电力系统微机保护中改进傅氏算法综合性能研究[J]. 继电器，2002，30(10)：16-20.
GAO Jing，ZHENG Jian-yong，PAN Zhen-dong. Study of Improved Fourier Algorithm for Microprocesson-based Protection in Power System[J]. Relay，2002，30(10)：16-20.

收稿日期： 2008-11-09；　**修回日期：** 2009-02-11

作者简介：

邹智慧（1983-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统微机保护；E-mail:zouzhihui2002@163.com

李啸骢（1959-），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统非线性控制、电力系统预测控制。