一种消除衰减直流分量影响的改进DFT递推算法

张秋丽[1]，黄 纯[1]，贺建辉[2]，安 明[3]

（1.湖南大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410082；2.浙江理工大学科学与艺术学院，浙江 杭州 311121；
3.广元电业局，四川 广元 628000）

摘要：分析了傅里叶算法中衰减直流分量引起的误差，推导了精确的误差计算公式，并据此对传统傅里叶算法的计算结果进行修正，提出了改进的傅里叶递推算法。算法递推计算基波和谐波参数，不需计算衰减直流分量的幅值和衰减时间常数，数据窗仅为一个周期再加两个采样点。对电力系统中含有两个衰减直流分量的故障电流进行分析和仿真，结果表明，算法得到的基波和各次谐波分量具有较高的精度，计算量小，响应速度快，易于实现，有着良好的应用前景。

关键词：衰减直流分量；离散傅里叶算法；微机保护；电力系统

An improved recursive discrete Fourier transform algororithm for eliminating decaying DC component

ZHANG Qiu-li[1]，HUANG Chun[1]，HE Jian-hui[2]，AN Ming[3]

（1. College of Electrical and Information Engineering，Hunan University，Changsha 410082，China；
2. Keyi College, Zhejiang Sci-tech University，Hangzhou 311121，China；
3. Guangyuan Electric Power Bureau，Guangyuan 628000，China）

Abstract：First，the error caused by the decaying DC component in traditional Fourier algorithm is analyzed，and the accurate expression of the error is deducted．Then，the fundamental frequency component and each harmonic are estimated recursively by eliminating the error from the result of traditional Fourier algorithm，without calculating the amplitude of decaying component and decaying time constant．At last，the analysis and simulation of fault current with two decaying DC components are conducted．With a data window of only a full-wave and two additional samples，the algorithm is of simple calculation and fast response，and is convenient to be realized．The high accuracy and other good performances of the algorithm promise a broad application prospects．

Key words：decaying DC component；discrete Fourier transform；microprocessor-based protection；power system

中图分类号： TM714　　文献标识码：A　　文章编号： 1674-3415(2010)24-0001-05

0 引言

在电力系统发生故障时，暂态信号中除了含有基波分量以外，还含有谐波分量和具有不确定幅值和衰减时间常数的衰减直流分量[1-2]。通常所用的全波傅里叶算法有很强的滤波能力，且算法简单、稳定性好，因而在电力系统计算机继电保护中得到广泛的应用；但它不宜直接用来处理含有衰减的非周期直流分量的暂态信号，否则计算出的基波、各次谐波的幅值和相角有较大的误差。国内外许多继电保护工作者围绕这个问题作了大量的研究工作，提出了一些相应的算法[3-11]。但是这些算法有些实现起来比较复杂，有些需配以数字滤波器一起工作，有些精度不高，或者需要较高的采样频率来获得高精度，有些算法数据窗要求较长。

本文分析了离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform，DFT）算法中衰减直流分量造成的误差，结合指数函数和等比数列的运算性质，推导出了精确的误差计算公式，据此对传统傅氏算法基波和谐波计算结果进行修正，提出了改进的傅里叶递推算法，并分析了两个衰减直流分量造成的误差以及等效的处理办法。算法递推计算基波和谐波参数，不需计算出衰减直流分量的幅值和衰减时间常数，数据窗仅为一个周期再加两个采样点，计算量小，计算机处理速度快。仿真结果验证了所提算法的可行性和有效性。

1 算法原理

以电流为例，设故障输入信号为：

$$i(t)=A_0\mathrm{e}^{-t/\tau}+\sum_{k=1}^{p}A_k\cos(k\omega t+\varphi_k) \quad (1)$$

式中：A_0 为衰减直流分量的初始值；τ 为衰减时间常数；A_k 和 φ_k 分别为 k 次谐波的幅值和初相角；ω 为基频分量的角频率。

现对输入信号进行采样，采样间隔 Δt，采样频率满足采样定理，生成的有限长离散信号序列为：

$$i[n]=A_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau}+\sum_{k=1}^{p}A_k\cos(\frac{2\pi}{N}kn+\varphi_k) \quad (2)$$

1.1 误差分析

利用全波 DFT 计算故障后第 m 次采样的 k 次谐波分量为：

$$I_k^{\mathrm{DFT}}(m)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+1}^{m}i[n]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}nk}=I_k(m)+I_k^{\mathrm{dc}}(m) \quad (3)$$

其中，$I_k(m)=A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_k}$。

以求解基波分量（$k=1$）的计算为例：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+1}^{m}i[n]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=I_1(m)+I_1^{\mathrm{dc}}(m) \quad (4)$$

其中，$I_1(m)=A_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1}$。

显然信号经过 DFT 计算后包含一个 I_1^{dc} 的误差。

$$I_1^{\mathrm{dc}}(m)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+1}^{m}A_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=\frac{2}{N}A_0\sum_{n=m-N+1}^{m}E^n\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n} \quad (5)$$

其中，$E=\mathrm{e}^{-\Delta t/\tau}$。

1.2 改进 DFT 算法原理

从前面推导的公式可以看出，必须消除 $I_1^{\mathrm{dc}}(m)$，才能得到精确的 $I_1(m)$。

第 $m+1$ 次采样的 DFT 有：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+2}^{m+1}i[n]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=I_1(m+1)+I_1^{\mathrm{dc}}(m+1) \quad (6)$$

其中：

$$I_1^{\mathrm{dc}}(m+1)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+2}^{m+1}A_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=\frac{2}{N}A_0\sum_{n=m-N+2}^{m+1}E^n\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n} \quad (7)$$

由式（4）和式（6）得到：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)=I_1^{\mathrm{DFT}}(m)-i[m-N+1]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m-N+1)}+i[m+1]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}$$

由于 $\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m-N+1)}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}$，可得 DFT 的递推公式，使后一次的计算可以利用前一次的结果：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)=I_1^{\mathrm{DFT}}(m)+\frac{2}{N}(i[m+1]-i[m-N+1])\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)} \quad (8)$$

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)=I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)+\frac{2}{N}(i[m+2]-i[m-N+2])\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+2)} \quad (9)$$

又由式（5）和式（7）可以得出衰减直流分量误差的递推关系：

$$\frac{I_1^{\mathrm{dc}}(m+1)}{I_1^{\mathrm{dc}}(m)}=E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}} \quad (10)$$

第 $m+2$ 次采样的 DFT 结果为：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)=I_1(m+2)+I_1^{\mathrm{dc}}(m+2) \quad (11)$$

其中：$I_1(m+2)=A_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1}$ 为基波分量，

$$I_1^{\mathrm{dc}}(m+2)=\frac{2}{N}\sum_{n=m-N+3}^{m+2}A_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=\frac{2}{N}A_0\sum_{n=m-N+3}^{m+2}E^n\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n} \quad (12)$$

为误差分量。

根据式（4）和式（11）可以得到：

$$\Delta I_1^{\mathrm{dc}}=I_1^{\mathrm{dc}}(m+2)-I_1^{\mathrm{dc}}(m)=I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)-I_1^{\mathrm{DFT}}(m)$$

由误差公式（12）减去式（5）推导出 ΔI_1^{dc}：

$$\begin{aligned}\frac{N}{2A_0}\Delta I_1^{\mathrm{dc}}&=\frac{N}{2A_0}I_1^{\mathrm{dc}}(m+2)-\frac{N}{2A_0}I_1^{\mathrm{dc}}(m)=\\&E^{m+2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+2)}+E^{m+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}-\\&E^{m-N+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m-N+1)}-E^{m-N+2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m-N+2)}=\\&E^{m+2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+2)}-E^{m-N+2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+2)}+\\&E^{m+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}-E^{m-N+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}=\\&E^{m+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}(1-E^{-N})(E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}+1)=\\&E^{m+1}(1-E^{-N})[\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+1)}+E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(m+2)}]\end{aligned}$$

显然结果是个复数，它的实部与虚部的比值 M 为：

$$M=-\frac{\cos\frac{2\pi(m+1)}{N}+E\cos\frac{2\pi(m+2)}{N}}{\sin\frac{2\pi(m+1)}{N}+E\sin\frac{2\pi(m+2)}{N}} \quad (13)$$

于是有

$$E=-\frac{\cos\frac{2\pi(m+1)}{N}+\sin\frac{2\pi(m+1)}{N}\cdot M}{\cos\frac{2\pi(m+2)}{N}+\sin\frac{2\pi(m+2)}{N}\cdot M} \quad (14)$$

由式（10）可以推导出：

$$I_1^{\mathrm{dc}}(m)=\frac{I_1^{\mathrm{dc}}(m+1)-I_1^{\mathrm{dc}}(m)}{E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}-1}=\frac{I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)-I_1^{\mathrm{DFT}}(m)}{E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}-1} \quad (15)$$

此时根据式 (4) 得出第 m 采样点精确的基波相量：

$$I_1(m)=I_1^{\mathrm{DFT}}(m)-I_1^{\mathrm{dc}}(m) \quad (16)$$

1.3 多个衰减直流分量的误差分析

实际上电力系统中送至继电保护的电压、电流信号的情况在不同程度上还要复杂一些。由于铁磁元件的非线性特性，电压互感器、电流互感器二次侧的暂态特性等因素的影响，使得电压、电流信号中除了故障信号中本身固有的衰减直流分量以外，还可能包括互感器产生的衰减直流分量[2]。

设故障信号中含 2 个衰减直流分量，其离散采样序列为：

$$i[n]=B_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau_{\mathrm{B}}}+C_0\mathrm{e}^{-n\Delta t/\tau_{\mathrm{C}}}+\sum_{k=1}^{p}A_k\cos(\frac{2\pi}{N}kn+\varphi_k) \quad (17)$$

对采样值进行全波 DFT 计算后包含两个衰减直流分量误差 $I_{1\mathrm{B}}^{\mathrm{dc}}$ 和 $I_{1\mathrm{C}}^{\mathrm{dc}}$：

$$\begin{aligned}I_1^{\mathrm{DFT}}&=\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i[n]\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=\\&I_1+\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}B_0E_{\mathrm{B}}^n\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}+\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}C_0E_{\mathrm{C}}^n\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=\\&I_1+\frac{2}{N}B_0\frac{1-E_{\mathrm{B}}^N}{1-E_{\mathrm{B}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}+\frac{2}{N}C_0\frac{1-E_{\mathrm{C}}^N}{1-E_{\mathrm{C}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}\end{aligned} \quad (18)$$

其中：$E_{\mathrm{B}}=\mathrm{e}^{-\Delta t/\tau_{\mathrm{B}}}$；$E_{\mathrm{C}}=\mathrm{e}^{-\Delta t/\tau_{\mathrm{C}}}$。

对式（2）进行 DFT 的计算结果为：

$$I_1^{\mathrm{DFT}}=I_1+\frac{2}{N}A_0\frac{1-E^N}{1-E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}$$

其中，$E=\mathrm{e}^{-\Delta t/\tau}$。

令

$$\frac{2}{N}A_0\frac{1-E^N}{1-E\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}=\frac{2}{N}B_0\frac{1-E_{\mathrm{B}}^N}{1-E_{\mathrm{B}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}+\frac{2}{N}C_0\frac{1-E_{\mathrm{C}}^N}{1-E_{\mathrm{C}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}}}$$

也就是

$$\begin{aligned}&A_0(1-E^N)\frac{1-E\cos\frac{2\pi}{N}+\mathrm{j}E\sin\frac{2\pi}{N}}{1+E^2-2E\cos\frac{2\pi}{N}}=\\&B_0(1-E_{\mathrm{B}}^N)\frac{1-E_{\mathrm{B}}\cos\frac{2\pi}{N}+\mathrm{j}E_{\mathrm{B}}\sin\frac{2\pi}{N}}{1+E_{\mathrm{B}}^2-2E_{\mathrm{B}}\cos\frac{2\pi}{N}}+\\&C_0(1-E_{\mathrm{C}}^N)\frac{1-E_{\mathrm{C}}\cos\frac{2\pi}{N}+\mathrm{j}E_{\mathrm{C}}\sin\frac{2\pi}{N}}{1+E_{\mathrm{C}}^2-2E_{\mathrm{C}}\cos\frac{2\pi}{N}}\end{aligned}$$

对上式两边分别取实部和虚部，有：

$$\frac{A_0(1-E^N)\left(1-E\cos\frac{2\pi}{N}\right)}{1+E^2-2E\cos\frac{2\pi}{N}}=\mathrm{Re} \quad (19)$$

$$\frac{A_0(1-E^N)E\sin\frac{2\pi}{N}}{1+E^2-2E\cos\frac{2\pi}{N}}=\mathrm{Im} \quad (20)$$

其中：Re、Im 分别为式（19）右端的实部、虚部，且

$$\mathrm{Re}=\frac{B_0(1-E_{\mathrm{B}}^N)\left(1-E_{\mathrm{B}}\cos\frac{2\pi}{N}\right)}{1+E_{\mathrm{B}}^2-2E_{\mathrm{B}}\cos\frac{2\pi}{N}}+\frac{C_0(1-E_{\mathrm{C}}^N)\left(1-E_{\mathrm{C}}\cos\frac{2\pi}{N}\right)}{1+E_{\mathrm{C}}^2-2E_{\mathrm{C}}\cos\frac{2\pi}{N}}$$

$$\mathrm{Im}=\frac{B_0E_{\mathrm{B}}\sin\frac{2\pi}{N}(1-E_{\mathrm{B}}^N)}{1+E_{\mathrm{B}}^2-2E_{\mathrm{B}}\cos\frac{2\pi}{N}}+\frac{C_0E_{\mathrm{C}}\sin\frac{2\pi}{N}(1-E_{\mathrm{C}}^N)}{1+E_{\mathrm{C}}^2-2E_{\mathrm{C}}\cos\frac{2\pi}{N}}$$

因为参数 B_0、E_{B}、C_0、E_{C} 以及 $\cos\frac{2\pi}{N}$、$\sin\frac{2\pi}{N}$ 都为常数，所以 Re 和 Im 也为常数。

由式（19)、（20）有

$$\frac{E\sin\frac{2\pi}{N}}{1-E\cos\frac{2\pi}{N}}=\frac{\mathrm{Im}}{\mathrm{Re}} \quad (21)$$

则

$$E=\frac{\mathrm{Im}}{\mathrm{Im}\cdot\cos\frac{2\pi}{N}+\mathrm{Re}\cdot\sin\frac{2\pi}{N}} \quad (22)$$

由式（21）可进一步求出 A_0：

$$A_0 = \frac{1 + E^2 - 2E\cos\dfrac{2\pi}{N}}{(1 - E^N)E\sin\dfrac{2\pi}{N}} \cdot \mathrm{Im} \qquad (23)$$

显然，E 和 A_0 均为由 N、B_0、E_B、C_0、E_C 确定的常数。这说明，可以找到这样一个衰减直流分量 $A_0 e^{-n\Delta t/\tau}$，其 DFT 误差与两个衰减直流分量 $B_0 e^{-n\Delta t/\tau_B}$ 和 $C_0 e^{-n\Delta t/\tau_C}$ 的 DFT 误差和相等。

若有多个衰减直流分量，可同理类推，其在 DFT 后产生的误差可等效为一个衰减直流分量的 DFT 误差。于是，1.2 小节的改进 DFT 算法适合于含多个衰减直流分量的情况。

2　计算步骤

求基波参数的算法实现步骤如下：

（1）首先利用 DFT 式（3）计算 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m)$；

（2）根据递推式（8）和式（9）计算 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)$ 和 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)$；

（3）计算 $\Delta I_1^{\mathrm{dc}} = I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2) - I_1^{\mathrm{DFT}}(m)$；

（4）利用式（13）和（14）计算 $E = e^{-\Delta t/\tau}$；

（5）通过式（15）计算衰减直流分量的误差 $I_1^{\mathrm{dc}}(m)$；

（6）通过式（16）$I_1(m) = I_1^{\mathrm{DFT}}(m) - I_1^{\mathrm{dc}}(m)$ 得到精确的基波相量；

（7）当 m 递增（$m = m+1$）时，根据递推公式（9）计算新的 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)$，新的 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m)$、$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)$ 可以分别利用上次计算结果 $I_1^{\mathrm{DFT}}(m+1)$、$I_1^{\mathrm{DFT}}(m+2)$，不需重复计算，重复步骤（3）~（6）。

当需要求 k 次谐波参数时，只要将上述步骤的公式中所有的 $\dfrac{2\pi}{N}$ 换成 $\dfrac{2\pi k}{N}$，即可求出。

3　仿真分析

为了验证算法的精度和可行性，作如下两种模型的仿真计算。

方案一：设输入信号为

$$i_1(t) = 100e^{-t/\tau} + 100\cos(\omega t + 60°) + 5\cos(2\omega t + 30°) + 30\cos(3\omega t + 90°) + 10\cos(5\omega t + 15°)$$

其中：$\omega = 100\ \pi$；$\tau = 25$ ms。

设置采样频率 $f_s = 1\ 600$ Hz，分别利用传统 DFT 算法、文献[3]改进算法（所需数据窗与本算法一致）和本文算法提取 $i_1(t)$ 中的基波及各次谐波的幅值和相角，结果见表 1。

从表 1 中可以看出，传统 DFT 算法的误差很大，文献[3]算法能比较好地解决衰减直流分量的影响，精度有了一定的提高，但本文算法精度更高，理论上误差为零。原因在于文献[3]算法的推导过程是建立在连续的时间域，而本文算法完全建立在离散采样值的基础上。

方案二：当电力系统的故障信号含有两个衰减直流分量时进行仿真（表 2）。

假设输入信号为：

$$i_2(t) = 110\cos 60° \cdot e^{-t/\tau} - 20\cos 60° \cdot e^{-t/\tau'} + 100\cos(\omega t + 60°) + 5\cos(2\omega t + 30°) + 30\cos(3\omega t + 90°) + 10\cos(5\omega t + 15°)$$

表 1　方案一仿真结果

Tab.1 Simulation results of scheme 1

算法	基波误差		2 次谐波误差		3 次谐波误差		5 次谐波误差	
	幅值/%	相角/（°）	幅值/%	相角/（°）		幅值/%	相角/（°）	幅值/%
传统全波 DFT	12.104 7	13.072 3	80.164	42.532 7	18.607 7	5.156 7	14.941	79.086
文献[3]算法	2.502 9	4.355 8	51.972	54.831 3	3.308 3	5.806 1	18.237	12.78
本文算法	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2　方案二仿真结果

Tab.2 Simulation results of scheme 2

算法	基波误差		2 次谐波误差		3 次谐波误差		5 次谐波误差	
	幅值/%	相角/（°）	幅值/%	相角/（°）	幅值/%	相角/（°）	幅值/%	相角/（°）
传统全波 DFT	6.441 1	6.378 7	17.206	35.074 7	9.693 7	2.415 9	6.417	66.767 3
文献[3]算法	1.307 3	2.336 7	25.978	34.249	1.818	2.971 2	8.732	49.660 7
本文算法	0.004 2	0.002 1	0.000 4	0.006 8	0.000 2	0.000 1	0	0.000 2

其中：$\omega = 100\pi$；$\tau = 25$ ms；$\tau' = 0.1$ s。

采样频率仍为1 600 Hz，仿真结果见表 2。

从表 2 中可以看出，当故障信号中含有多个衰减直流分量时，本算法依然能够得到基波和谐波的高精度计算结果。

4　结论

本文分析了衰减直流分量对全波傅氏算法的影响，基于严格的数学推导，提出了一种故障电流的高精度改进 DFT 递推算法。算法具有以下特点：

1）算法通过增加两个采样点，利用三次相邻的 DFT 求出衰减直流分量带来的误差，并将其剔除，得出精确的故障电流基波及各次谐波相量。

2）算法仅需对采样数据进行一次 DFT 运算，随着采样点增加应用递推公式即可得到 DFT 的结果，大大减小了全波傅氏算法的计算量，加快了计算机处理速度。

3）算法适用于电力系统故障电流含有两个或多个衰减直流分量的情况，通过理论推导和计算机仿真证明，算法能够消除两个或多个衰减直流分量的影响。

综上所述，该算法计算简单，稳定性好，数据窗短，能满足微机保护实时性的要求。仿真结果表明，改进算法具有较高的精度，具有较高的理论研究价值和工程实用价值。

参考文献

[1]　张兆宁，孙雅明，毛鹏. 电力系统故障信号分析中基波提取的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报，1999，11（3）：58-65.
ZHANG Zhao-ning，SUN Ya-ming，MAO Peng. A new algorithm for extracting fundamental components in analysis of fault signal in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，1999，11（3）：58-65.

[2]　陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京：中国电力出版社，1992.

[3]　苏文辉，李钢. 一种能滤去衰减直流分量的改进全波傅氏算法[J]. 电力系统自动化，2002，26（23）：42-44.
SU Wen-hui，LI Gang. An improved full-wave fourier algorithm for filtering decaying DC component[J]. Automation of Electric Power Systems，2002，26（23）：42-44.

[4]　高婧，郑建勇. 一种快速滤除衰减直流分量的新型递推傅氏算法[J]. 电力系统及其自动化学报，2003，15（1）：54-57.
GAO Jing，ZHENG Jian-yong. A novel recursive fourier algorithm for filtering decaying DC component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2003， 15（1）：54-57.

[5]　齐先军，丁明，温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 继电器，2005，33（17）：14-16.
QI Xian-jun，DING Ming，WEN Yang-dong. An improved short data window full-wave fourier algorithm for completely filtering decaying DC component[J]. Relay，2005，33（17）：14-16.

[6]　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.

[7]　Kang Sang-Hee，Lee Dong-Gyu，Nam Soon-Ryul，et al. Fourier transform-based modified phasor estimation method immune to the effect of the DC offsets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2009，24（3）：1104-1111.

[8]　Cho Yoon-Sung，Lee Chul-Kyun，Jang Gilsoo，et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2009，24（1）：73-78.

[9]　杨力森，汪芳宗，孙水发. 一种混合递推的 DFT 相量测量算法[J]. 继电器，2008，36（5）：23-27.
YANG Li-sen，WANG Fang-zong，SUN Shui-fa. A mixed recurrence DFT algorithm for phasor measurements[J]. Relay，2008，36（5）：23-27.

[10]　侯有韬，张举. 一种滤除衰减直流分量的快速算法[J]. 继电器，2004，32（6）：6-9.
HOU You-tao，ZHANG Ju. A fast algorithm for decaying DC component filtrationg[J]. Relay，2004，32（6）：6-9.

[11]　熊岗，陈陈. 一种能滤除衰减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.

收稿日期：2009-12-24

作者简介：

张秋丽（1984-），女，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护；E-mail: zql19984@yahoo.com.cn

黄　纯（1966-），男，博士，教授，研究方向为电力系统自动化、电能质量分析与控制、数字信号处理等。