

基于 EMD 的 Prony 算法在低频振荡模式 参数辨识中的应用

赵礼杰

(东北电力大学输变电技术学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: Prony 算法对分析数据的噪声非常敏感, 对输入信号要求较高, 鉴于此, 提出将 EMD 和 Prony 算法有机结合的电力系统低频振荡模式的辨识方法。该方法以广域测量信号作为输入, 首先利用 EMD 对非平稳、非线性信号的能力进行分解, 通过能量权重比找出含有主导振荡模式的 IMF; 最后利用 Prony 算法对其进行分析后获得电力系统低频振荡模式参数, 扩展了 Prony 法应用范围。通过对 PSASP 仿真轨迹的算例分析, 验证了此方法提取非轴对称振荡信号主导模式的有效性, 并通过与特征根分析进行比较, 表明了此法能相对精确地进行振荡模式辨识, 同时又有很好的复合模式分离能力和良好的抗噪能力。

关键词: 低频振荡; 非平稳信号; EMD; 信号能量; Prony 算法; 阻尼特性

Application of Prony algorithm based on EMD for identifying model parameters of low-frequency oscillations

ZHAO Li-jie

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Prony algorithm is sensitive to the noise of analysis data, and has a higher requirement to the input signal. Because of that, the paper proposes a method for identifying power system low-frequency oscillation, which combines EMD (Empirical Mode Decomposition) with Prony algorithm. This method considers the wide area measurement signals as the inputs of EMD. First of all, it takes advantage of EMD to decompose both non-stationary and nonlinear signal, find IMF (Intrinsic Mode Function) through energy weighting ratio, which has main-mode of low frequency oscillations, then model parameters of low-frequency oscillation in power systems are obtained by analyzing the IMF with Prony algorithm, which enlarge the scope of Prony. In the end, by analyzing the case studies on the curves simulated by PSASP, we found that the result verifies the validity of extracting non-axisymmetric oscillation signal. In addition, by comparing the Eigen-analysis, we can see that the proposed method has a good performance to separate complex mode with off-axis-symmetrical signal, and has a better ability of anti-noise.

Key words: low frequency oscillations; non-stationary signal; empirical mode decomposition (EMD); signal energy; Prony algorithm; damping characteristics

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0009-06

0 引言

随着“全国联网”格局的初步形成, 在大区电网间互联的初期, 难以避免的弱联系给电力系统的动态稳定性带来了负面影响。低频振荡成为系统运行安全的现实威胁^[1]。近来, 随着广域量测系统(WAMS)的不断推广, 大大强化了获取电力系统受扰后运动轨迹的手段^[2]。文献[3]指出, 如何利用现场实测数据, 从而找到振荡特征参数在线实时分析振荡机理是一个值得研究的问题。

文献[4]利用 WAMS 提供的各离散时间点的测

量值采用卡尔曼滤波方法计算系统的机电振荡模式。文献[5]利用快速傅立叶变换和小波分析对 WAMS 提供的节点间的电压相角差时间振荡曲线进行分析, 提取振荡模式。但是, 无论是卡尔曼滤波、傅立叶变换还是小波分析, 都存在难以提取衰减特征的局限性。Prony^[6]算法能用一个指数函数的线性组合来分析等间距采样数据, 可以方便地估算给定信号的频率、衰减因子、幅值和初相, 因而可以直接利用 WAMS 提供的现场实测数据通过 Prony 算法进行低频振荡模式的分析。文献[7]提出一种基于 WAMS 量测和改进 Prony 算法的电力系统低频振

荡模式的分析方法,利用二阶距样本矩阵的奇异值分解估计系统的实际低频阶数再进行 Prony 分析,可以达到在线分析机电振荡模式的要求。然而由于噪声的影响,估计阶数往往多于信号的主导模式,并且不同程度的噪声影响会导致估计阶数不一致,所以进一步减少噪声的影响,使估计阶数与系统的实际主导模式更为接近,可以更加精确地进行机电振荡模式的分析。传统的滤除噪声方法由卡尔曼滤波、维纳滤波等,目前自适应滤波和基于小波变换的滤波方法得到了广泛应用,但这些方法都需要复杂的数学计算,以该类方法对实测的离散数据进行预处理,需要预先确定滤波器的相关参数或系统模型,这些方法对不同形式的噪声的滤波效果不同,有可能难以满足对混合噪声的滤波要求。任何一组非平稳信号是平稳信号的叠加,经验模态分解(EMD)^[8]正是将非线性、非平稳信号进行线性和平稳化处理,得到从高频到低频的 IMF 分量和直流量,且 EMD 最大特征是对实际信号的自适应特征,不需要任何相关参数的设定,从而可以达到更好的滤波效果^[9,10]。

结合以上研究成果,本文提出将经验模态分解(EMD)与 Prony 相结合的改进算法——基于 EMD 的 Prony 算法的电力系统低频振荡模式的辨识方法,其核心是实际轨迹的 EMD 预处理和主导振荡模态参数的提取。首先,通过 EMD 对非平稳的测量数据进行平稳化处理,得到轴对称分量 IMF,并通过信号能量权重判据找到主导模式 IMF 分量。然后,采用 Prony 法对主导模式 IMF 进行低频振荡模态参数的提取。

1 基于 EMD 的 prony 法基本原理

1.1 低频振荡信号的 EMD 分解

经验模态分解(EMD)是美籍华人 Norden E.Huang 提出的一种尺度分离算法^[8],可以将复杂的非平稳信号按多尺度标准逐次分离。其基本思想是:利用三次样条函数拟合上下包络,信号每减去一次上下包络中心轴线,便可得到一条轴对称子波形(IMF)。此法本质上是将非平稳信号进行轴对称化处理,按频率由高到低依次分离出 IMF 分量。

非平稳的复杂信号通过 EMD 分离,得到的各 IMF 分量都是平稳的,可以更有效地反映该物理过程中能量在空间(或时间)尺度上的分布规律,因此 EMD 为非平稳信号的有效成分提取开辟了新思路。同时 IMF 也展示了不能适应特殊环境傅立叶的扩展。

用 EMD 方法从原低频振荡信号中提取固有模态函数(IMF),突出了原信号的局部特征信息。IMF 分量满足条件:①其极值点和过零点的数目应该相等或至多差 1;②分别连接其局部极大值和局部极小值所形成的两条包络线的均值在任意点处为 0,即信号关于时间轴局部对称。

设低频振荡信号 $s(t)$ 的上下包络线的均值为 $m(t)$,由 $s(t)$ 减去 $m(t)$ 得到 $c(t)$,如果 $c(t)$ 同时满足上述两个条件,则认为 $c(t)$ 是从原信号中分解出的一个 IMF 分量。把原信号减去分解出的 IMF 分量,再对剩余量重复前述过程,最终将原信号分解为一组振荡的 IMF 与一个剩余直流分量 r 的和,如式(1):

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) = \sum_{j=1}^p c_j(t) + \sum_{k=p+1}^n c_k(t) + r_n(t) \quad (1)$$

其中: $c_j(t)$, $j=1, \dots, p$ 保持原信号的重要本质特征;剩下的则包含原信号的非本质、非正弦的特征(如噪声)。

文献[12,13]由振幅最大找出含有主导振荡模式的 IMF,本文从信号能量方面着手,由文献[14]定义的转子角偏移轨迹信号能量 $E = \int_0^{\infty} \Delta \delta^2(t) dt$,通过各个 IMF 分量的能量权重比来寻找主导振荡模式:

- 1) 对各个 IMF 求取信号能量 $E_{\text{imf}}(i)$, 同时

$$E_{\text{IMF}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{imf}}(i) \quad (2)$$

- 2) 电力系统低频振荡大多是复合模式,其中最关心的是阻尼比最小且振荡幅度较大的某一主导模式。本文以 IMF 振荡能量最大作为定性分析指标,从 EMD 结果中提取能量权重较大的 IMF 作为振荡主导模式加以分析,其它 IMF 分量若能量足够小则可以忽略。IMF 能量权重如下式:

$$\eta_i = \frac{E_{\text{imf}}(i)}{E_{\text{IMF}}} \times 100\% \quad (3)$$

1.2 基于 EMD 的改进 prony 低频振荡分析

1795 年, Prony 提出了用复指数函数的一种线性组合来描述等间距采样数据的数学模型,从而形成了 Prony 算法^[6,14]。Prony 算法是一种能够根据采样值直接估算出信号频率、衰减因子、幅值和初相位的分析方法。它针对等间距采样点,假设模型是由一系列的具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合,方法所采用的数学模型为一组 P 个具有任意幅值、相位、频率、与衰减因子

的指数函数,输入信号 $(x(0),x(1),\dots,x(N-1))$ 来自主导振荡模式 IMF,在 Prony 分析中可以认为其估计值的离散时间的函数形式为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中: A_i 为幅值; θ_i 为相位; f_i 为频率; α_i 为衰减因子; Δt 为采样时间间隔。

Prony 方法的关键是认识到式 (4) 的拟合是一常系数线性差分方程的齐次解,通过一系列的数学变换,可推出差分方程式为

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

对方程中的参数 a_i 做最小二乘估计,使误差平方和为最小,进而可得到一组线性的矩阵方程为

$$\begin{pmatrix} x(p) & x(p-1) & \dots & x(0) \\ x(p+1) & x(p) & \dots & x(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(N-p-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon(0) \\ \varepsilon(1) \\ \vdots \\ \varepsilon(N-1) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{定义 } r(i, k) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-k)x^*(n-i), i, k = 0, 1, \dots, p,$$

可得 Prony 算法的法方程:

$$\begin{pmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \dots & r(0,p) \\ r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,p) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(p,0) & r(p,1) & \dots & r(p,p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

解此法方程,即可得到系数 a_1, a_2, \dots, a_p 的估计值,由下式求取多项式的根(Prony 极点):

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0 \quad (8)$$

根据递推式 (9) 和 (10) 可以求得参数 b_1, b_2, \dots, b_p :

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{pmatrix} \quad (10)$$

所以幅值 A_i 、相位 θ_i 、频率 f_i 和衰减因子 α_i 可以通过下式获得:

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan \left| \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \right| \\ \alpha_i = \frac{\ln |z_i|}{\Delta t} \\ f_i = \frac{\arctan \left| \frac{\text{Im}(z_i)}{\text{Re}(z_i)} \right|}{2\pi\Delta t} \end{cases} \quad (11)$$

Prony 算法对噪声十分敏感,文献[15]指出,当信噪比小于 40 dB 时,难以得到正确的分析结果。文献[16,17]分别提出了采用离散卡尔曼滤波和低通滤波的数据预处理方法。但是卡尔曼滤波往往需要建立一个系统模型,然而实际输入信号在多数情况下为非平稳信号,缺少对其真正特性的认识;当采用低通或带通滤波器时,除了需要进行时域之间的变换外,还需要预先确定相应的滤波器的截止频率和信号带宽,所以仅仅从实际输入信号来确定滤波器的参数和需要的系统模型相对困难。然而 EMD 分解方法可以有效地将实际信号中的高频噪声提取出来,同时也可以将低频振荡的各种振荡模式分离开来,通过 IMF 能量权重比大小找到含有主导振荡模式的 IMF。这样通过上面的方法既达到了去噪效果,又找到了含有主导振荡模式的 IMF。最后对含有主导振荡模式的 IMF 采取 Prony 算法来提取低频振荡模式参数。

基于 EMD 的 Prony 算法的低频振荡模态参数辨识流程图见图 1。

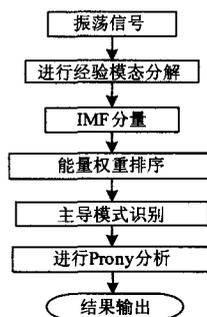


图 1 基于 EMD 的 Prony 算法流程图

Fig.1 Flow chart of Prony algorithm based on EMD

2 算例分析

2.1 算例 1—单机无穷大系统

单机无穷大系统模型如图 2 所示。利用 PSASP 软件对该系统的有限时间扰动试验进行仿真。其中,发电机采用同步机 6 阶模型、励磁系统为 1 阶简化模型,负荷为恒阻抗模型。其中一回线上发生瞬时

短路故障,持续时间为 0.01 s。扰动下功角量测轨迹如图 3 所示。对上述轨迹进行 EMD 分解得 2 个 IMF 分量和 1 个剩余分量,如图 4 所示。由于采用的是仿真数据,数据含有的噪声小,而在实际功角振荡轨迹中含有高频率的噪声,EMD 分解同样可以将高频率的噪声分解出来,达到滤波的处理。从分解结果可以发现:第 1 个 IMF 分量的振幅最大,频率最高;一次下去的 IMF 分量幅值逐渐变小、频率逐渐变低。EMD 分解的一个显著特点就是它可以实现信号主要成分的提取,因为功角振荡轨迹是在多个振荡模式的相互作用产生的。文献[11,12]将各 IMF 分量中振幅最大的 IMF1 和原始振荡信号(去除直流分量)进行比较,从图形吻合的角度确定 IMF1 中包含了该振荡信号最显著的信息,这样未免在辨识过程中带来了困难。本文从 IMF 能量权重比大小去寻找含有主导振荡模式的 IMF,如表 1 所示,达到了同样效果且数字化结果直观方便,避免了人为的因素。

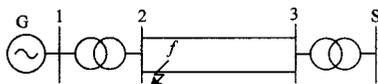


图 2 单机无穷大系统

Fig.2 One machine-infinite system

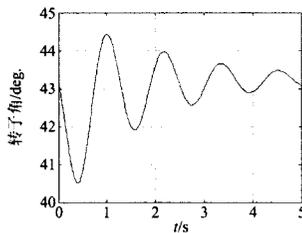


图 3 功角量测轨迹 δ

Fig.3 The measured phase-angle trajectory

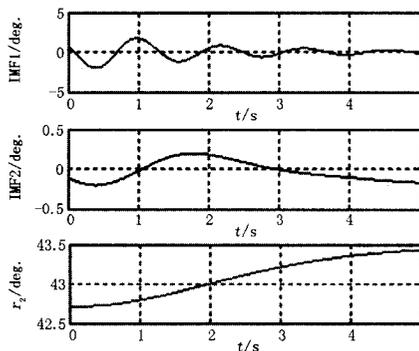


图 4 功角量测轨迹 δ 的 EMD 分解

Fig.4 EMD decomposition of the measured phase-angle trajectory

表 1 IMF 信号能量及其权重比
Tab.1 Stat. result of signal energy analysis

IMF	信号能量 $E_{im}(i)$	权重比 $\eta/(\%)$	E_{IMF}
IMF1	2.879 7	97.43	2.955 8
IMF2	0.076 1	2.57	

对含有主导振荡模式的 IMF1,利用 Prony 算法进行模式分析,如表 2 所示。为了验证对含有主导振荡模式的 IMF 采取 Prony 分析的正确性,用 PSASP 的小干扰稳定计算 QR 法模块,在给定运行方式下求解系统线性化微分方程组状态矩阵的全部特征根,找出机电回路相关比大于 1 特征根如表 3 所示。由此验证了基于 EMD 的 Prony 算法低频振荡模式辨识方法的有效性。

表 2 基于 EMD 的 Prony 算法识别结果

Tab.2 Results of Prony method based on EMD

基于 EMD 的改进 Prony 算法	振幅 /A	频率 /Hz	阻尼比 /(ζ)	相位 /($^\circ$)
0~5 s	2.60	0.85	0.096 9	52.25

表 3 采用 QR 算法计算结果

Tab.3 The results by QR

特征根实部	特根虚部	频率/Hz	阻尼比	机电回路相关比
0~5 s	2.60	0.85	0.096 9	52.25

图 5 给出的是含有主导振荡模式 IMF1 与基于辨识参数的二阶主导振荡模式曲线,两者取得了很好的吻合,说明了基于辨识参数的二阶系统比较准确地反应了原振荡轨迹的动态特征。

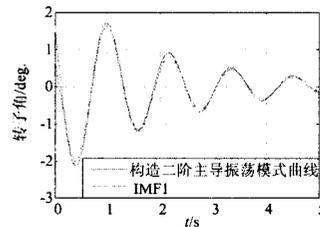


图 5 主导振荡模式曲线

Fig.5 Oscillating cure of main-mode

2.2 算例 2—2 区域 4 机系统分析

基于 EMD 的 Prony 算法在区域模式振荡参数的辨识。本算例系统单线图如图 6 所示,具体参数见文献[18],对上述系统施加如下扰动:其中一回线上发生瞬时短路故障,持续时间为 0.1 s。扰动下 1 号发电机与 4 号发电机之间的功角振荡曲线如图 7 所示。

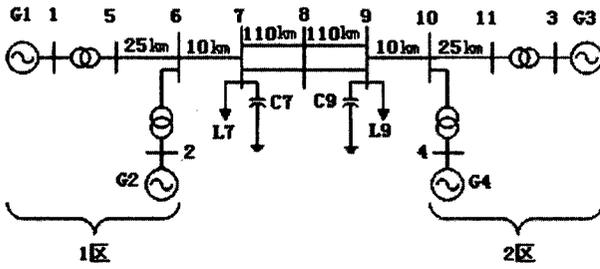


图 6 两区域 4 机系统

Fig.6 Two area 4-generator system

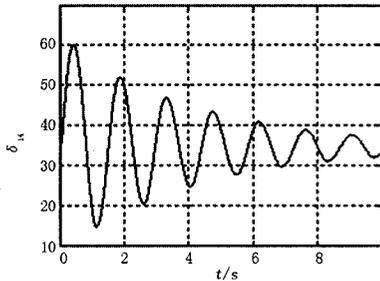


图 7 δ_{14} 功角振荡曲线

Fig.7 Oscillating curve δ_{14}

对上述振荡曲线类似于算例 1 的分析,其 EMD 分解结果如图 8 所示。如表 4 中可以看出, IMF1 的能量权重比达到了 99.77%, 说明了 IMF1 含有实际信号的主导振荡特征, 所以通过能量权重比去识别主导振荡模式具有很好的实用性。

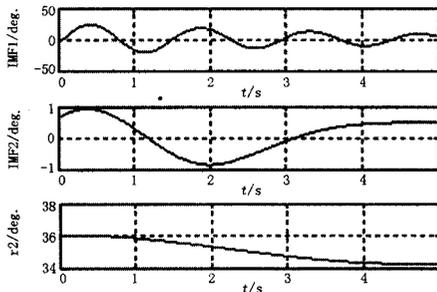


图 8 δ_{14} 功角振荡曲线的 EMD 分解

Fig.8 EMD decomposition of the oscillating curve δ_{14}

表 4 IMF 信号能量及其权重比

Tab.4 Stat. result of signal energy analysis

IMF	信号能量 $E_{imf}(t)$	权重比 $\eta_i/\%$	E_{IMF}
IMF1	652.946 7	99.77	654.4479
IMF2	1.501 1	0.23	

表 5 基于 EMD 的 Prony 算法识别结果

Tab.5 The results of Prony method based on EMD

基于 EMD 的 Prony 算法	振幅 /A	频率 /Hz	阻尼比 ζ	相位 /($^{\circ}$)
0~5 s	26.85	0.692 2	0.054 3	-108.94

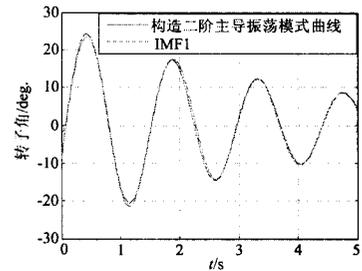


图 9 主导振荡模式曲线

Fig.9 Oscillating curve of main-mode

采取同样的方法对 δ_{13} 、 δ_{23} 、 δ_{24} 相对功角曲线进行主导振荡模式的辨识, 结果如表 5 所示。

表 6 基于 EMD 的 Prony 算法识别结果

Tab.6 Results of Prony method based on EMD

基于 EMD 的 Prony 算法	振幅 /A	频率 /Hz	阻尼比 ζ	相位 /($^{\circ}$)
$\delta_{13}(0\sim 5s)$	28.67	0.693 2	0.053 0	-110.04
$\delta_{23}(0\sim 5s)$	26.24	0.690 1	0.050 6	-107.06
$\delta_{24}(0\sim 5s)$	23.07	0.684 1	0.050 6	-102.71

表 7 采用 QR 算法计算结果

Tab.7 Results by QR

特征根 实部	特征根 虚部	频率 /Hz	阻尼比	机电回路相关比
-0.241 7	4.426 5	0.704 5	0.054 5	1.0E+29
-0.241 7	8.266 5	1.315 7	0.029 2	1.0E+29
-0.241 7	8.190 1	1.303 5	0.029 5	1.0E+29

从表 6 与表 7 中可以看出, 从任意相对功角曲线 δ_{13} 、 δ_{23} 、 δ_{24} 中都可以提取出区域主导振荡模式, 也验证了以能量权重大小来寻找含有主导振荡模式 IMF 的正确性。

综上所述, 基于 EMD 的 Prony 算法在低频振荡模式参数辨识过程中是有效的。

3 结论

本文将 EMD 和 Prony 算法有机地结合在一起, 提出了基于 EMD 的 Prony 算法对电力系统低频振荡模式进行辨识。首先利用 EMD 处理非平稳信号的能力, 通过能量权重比找出含有主导振荡模式的 IMF; 最后利用 Prony 算法对其进行分析后获得电力系统低频振荡模式参数, 扩展了 Prony 法应用范围。算例结果表明, 基于 EMD 的 Prony 算法在提取低频振荡模式参数的有效性和可行性。

参考文献

[1] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动

- 态稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2005,25(11): 6-11.
- YU Yi-xin, LI Peng. The Impact of Weak Interconnection of Bulk Power Grids to Damping and Dynamic Stability of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [2] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
- XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, TONG Lu-yuan, et al. Intra-area Damping Control of Interconnected Power Systems Using Wide-area Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 37-40.
- [3] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J]. 中国电力, 2001, 11(34): 38-41.
- WANG Tie-qiang, HE Ren-mu, XU Dong-jie, et al. The Validity Study of Prony Analysis for Low Frequency Oscillation in Power System[J]. Electric Power, 2001, 11(34): 38-41(in Chinese).
- [4] Korbap, Larsson M, Rehtanz C. Detection of Oscillations in Power Systems Using Kalman Filtering Techniques[A]. in: Proceedings of IEEE Conference in Control Applications[C]. Istanbul, Turkey. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003.183-188.
- [5] MASAhide Hojo, TOKUO Ohnishi, YASUNORI Mitani, et al. Observation of Frequency Oscillation in Western Japan 60 Hz Power System Based on Multiple Synchronized Phasor Measurements[A]. in: Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference[C]. Bologna, Italy. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003.656-661.
- [6] 张贤达, 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- ZHANG Xian-da. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(7): 883-887.
- XIAO Jin-yu, XIE Xiao-rong, HU Zhi-xiang, et al. Improved Prony Method for Online Identification of Low-frequency Oscillations in Power Systems[J]. Journal of Tsinghua University(Sci&Tech), 2004, 44(7): 883-887.
- [8] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.
- [9] 陈东方, 吴先良. 采用 EMD 方法消除瞬态散射回波中的高斯白噪声干扰[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 496-498.
- CHEN Dong-fang, WU Xian-liang. Recovery of Signal from Transient Scattered Response Contaminated by Gaussian White Noise Based on EMD Method[J]. ACTA Electronica Sinica, 2004, 32(3): 496-498(in Chinese).
- [10] 韩春明, 郭华东, 王长林. 利用经验模态分解方法抑制 SAR 斑点噪声[J]. 遥感学报, 2002, 6(4): 266-271.
- HAN Chun-ming, GUO Hua-dong, WANG Chang-lin. Speckle Suppression Using the Empirical Mode Decomposition[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(4): 266-271(in Chinese).
- [11] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 24-29.
- LI Tian-yun, GAO Lei, ZHAO Yan. Analysis of Low Frequency Oscillations Using HHT Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 24-29(in Chinese).
- [12] 李天云, 谢家安, 张方彦, 等. HHT 在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 79-83.
- LI Tian-yun, XIE Jia-an, ZHANG Fang-yan, et al. Application of HHT for Extracting Model Parameters Low Frequency Oscillations in Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 79-83(in Chinese).
- [13] 穆钢, 王宇庭, 安军, 等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(9): 7-11.
- MU Gang, WANG Yu-ting, AN Jun, et al. Signal Energy Method for Identification of Oscillation Mode in Power System Based on Disturbed Trajectory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 7-11(in Chinese).
- [14] 董航, 刘涤尘, 邹江峰. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97-100.
- DONG Hang, LIU Di-chen, ZOU Jiang-feng. Analysis of Power System Low Frequency Oscillation Based on Prony Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 97-100.
- [15] Grund C E, Paserba J J, Hauner J F, et al. Comparison of Prony and Eigen-analysis for Power System Control Design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 964-971.
- [16] Johnson M A, Zarafonitis I P, Celligaris M. Prony Analysis and Power System Stability-some Recent Theoretical and Applications Research[A]. in: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000.1918-1923.
- [17] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域量测信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.

(下转第 19 页 continued on page 19)

新的数值积分方法引入电力系统暂态稳定性数值计算领域,以一个简单的电力系统为例,将新方法与传统的算法进行了对比分析。根据初步的数值实验结果,可以得出以下几个结论:

1) Euler 中点积分法是辛算法;隐式梯形积分法不是辛算法,是一种局域保辛的辛代数动力学算法。Euler 中点积分法与隐式梯形积分法相比,两者同型、同阶,计算量相当,但 Euler 中点积分法具有更好的计算精度。

2) 对于可分系统,显辛算法与传统的 Runge-Kutta 方法相比,两者计算量相当,但显辛算法在计算精度和数值稳定性方面具有较明显的优势。因此,对于采用经典模型的暂态稳定性计算,显辛算法是一种更为有效的新方法。

3) 辛代数动力学算法的计算精度不如同阶的辛几何算法,但高阶辛代数动力学算法比同阶的辛几何算法的计算速度更快一些。在采用大步长同时对计算精度要求较高的情况下,4 阶辛代数动力学算法是一种较好的新方法。

4) 多级、高阶辛 Runge-Kutta 算法具有内在的时间并行特性,而且它在级数增加的同时能够保持阶数的同比增长。这与传统的时间并行计算完全不一样:用隐式梯形积分法进行时间并行计算时,不论时间并行度如何,该方法永远只能是 2 阶的。正是因为辛 Runge-Kutta 算法能够保持阶数与级数之间的同比增长,所以, s 级、 $2s$ 阶的辛 Runge-Kutta 算法在采用 s 倍于 Euler 中点积分法所用步长的情况下,仍能够保持或获得比后者更高的计算精度。

参考文献

- [1] Feng K. Difference Schemes for Hamiltonian formalism and Symplectic Geometry[J]. J Comput Math, 1986, 4(3): 279-289.
- [2] 秦孟兆. 辛几何及计算哈密顿力学[J]. 力学与实践, 1990, 12(6): 1-20.
QIN Meng-zhao. Symplectic Geometry and Computational Hamiltonian Mechanics[J]. Mechanics and Engineering, 1990, 12(6): 1-20.
- [3] Feng K, Qin M Z. Hamiltonian Algorithms for Hamiltonian Dynamical Systems[J]. Progress in Natural Science, 1991, 1(2): 105-116.
- [4] Sun G. Construction of High Order Symplectic Runge-Kutta Methods[J]. J Comput Math, 1993,11(3): 250-260.
- [5] 冯康,秦孟兆. Hamilton系统的辛几何算法[J]. 杭州:浙江科技出版社, 2003.
FENG Kang, QIN Meng-zhao. Symplectic Methods for the Computation of Hamiltonian Systems[M]. Hangzhou: Zhejiang Scientific Press, 2003.
- [6] 孔令华. 一些非线性发展方程(组)的辛和多辛算法[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
KONG Ling-hua. Symplectic and Multi-symplectic Algorithms to Some Nonlinear Evolution Equations[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [7] Wang S J, Zhang H. Algebraic Dynamics Solutions and Algebraic Dynamics Algorithm for Nonlinear Ordinary Differential Equations[J]. Science of China(Series G), 2006, 49(6): 716-728.
- [8] Wang S J, Zhang H. Algebraic Dynamics Algorithm: Numerical Comparison with Runge-Kutta Algorithm and Symplectic Geometric Algorithm[J]. Science of China(Series G), 2007, 50(1): 53-69.
- [9] Wang S J, Zhang H. Symplectic Algebraic Dynamics Algorithm[J]. Science of China(Series G), 2007, 50(2): 133-143.
- [10] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [11] Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability[J]. Iowa: The Iowa State University Press, 1977.

收稿日期: 2008-12-03; 修回日期: 2009-01-19

作者简介:

汪芳宗(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化及电工新技术应用研究; E-mail: fzwang@ctgu.edu.cn
何一帆(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析计算与控制的研究。

(上接第 14 页 continued from page 14)

JU Ping, XIE Huan, MENG Yuan-jing, et al. Online Identification of Low-frequency Oscillation Based on Wide-area Measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).

- [18] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill Inc, 1994.

收稿日期: 2009-07-16; 修回日期: 2009-08-31

作者简介:

赵礼杰(1962-), 男, 本科, 讲师, 长期从事电力系统自动化专业课程的教学与研究。E-mail: 787357498@qq.com