

# 基于广义形态滤波与改进矩阵束的 电力系统低频振荡模态辨识

金 涛 刘 对

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350116)

**摘要** 针对当前互联电力系统中越来越严重的低频振荡现象，提出一种高精度低频振荡模式辨识方法来克服现有方法的一些不足。该方法基于广义形态开、闭运算设计了新型广义形态滤波器，可以有效地去除噪声，较好地保留信号的原有特征；低频振荡信号通过该滤波器滤波后再使用改进矩阵束算法进行模式辨识，可以获得高精度的各个模式参数。对于辨识算法的关键定阶问题，采用归一化奇异熵定阶方法，该方法能在系统拟合精度指标相差不大的情况下使模态阶数的估计值更加接近真实值，提高了辨识的准确性。通过仿真算例、测试系统及电网实际案例验证了本文提出的方法的有效性和可行性，为电力系统阻尼控制和电网的稳定运行提供了有效依据。

**关键词：**低频振荡 广义形态学 矩阵束 奇异熵 模态辨识

中图分类号：TM712

## Power System Low Frequency Oscillation Identification Based on the Generalized Morphological Method and Improved Matrix Pencil Algorithm

Jin Tao Liu Dui

(College of Electrical Engineering and Automation Fuzhou University  
Fuzhou 350116 China)

**Abstract** Since more and more serious low-frequency oscillation phenomena have happened in interconnected power grids, a high-accuracy low-frequency oscillation identification method is proposed to overcome the shortages of the existing methods. The method is based on the opening and closing operations of generalized morphology to design an improved generalized morphological filter, which can effectively eliminate the noise and retain the original features of signals. An advanced matrix pencil algorithm was proposed to identify parameters from low frequency oscillation signals. A standardized singular entropy technique was utilized to solve the key problem of order determination. By this way the estimating value of the order can be very close to the real value in the power system, which enhances identification accuracy. Simulations verified the proposed low-frequency oscillation identification method.

**Keywords:** Low frequency oscillation, generalized morphology, matrix pencil, singular entropy, mode identification

## 0 引言

随着电网规模的增大、远距离输电及电气间弱互联的增多、高放大倍数快速励磁装置的大量使用，使得电网暂态稳定性和电压质量得以提升，但也加剧了电力系统的振荡失稳，这些都有可能导致弱阻尼的低频振荡现象发生<sup>[1-3]</sup>。近年来，国内外电网曾发生过多次低频振荡现象<sup>[4]</sup>，这给电力系统带来了较大的危害，且越来越成为限制互联电网传输能力的瓶颈。稳定性问题是大电网的重要问题；迅速、精确地完成低频振荡模式的在线辨识，可以为实现电网稳定运行及阻尼控制提供有效依据。

互联电网是一个大规模复杂的非线性结构，建立较复杂、详细的数学模型，并列写方程、求解大规模矩阵的特征值是传统用于辨识参数方法的主要步骤。通常，因为大电网较为复杂或者缺少较完善和较准确的结构参数，且“维数灾”现象时有发生，这使矩阵特征值的计算难度加大<sup>[5]</sup>。基于广域测量的低频振荡模态识别方法能够从振荡信号中提取所需要的模态信息。现有的辨识方法有 Prony 算法、快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）、希尔伯特-黄变换（Hilbert-Huang Transform, HHT）以及小波变换法。传统的 Prony 算法是用指数形式函数的线性组合来描绘采样数据为等间距的数学模型，由于 Prony 算法受噪声影响较大，这样将无法得到较为准确的振荡模式参数<sup>[6-8]</sup>。文献[9,10]中介绍了 FFT 算法对含噪声的电力系统数据进行分析，该算法的准确度较高、鲁棒性较好，但此算法无法完全辨识出振荡模式参数。文献[11,12]中介绍了 HHT 方法，该方法对非线性、非平稳的信号分析是特别有效的，但是在分析的过程中会出现端点效应以及模态混叠，对辨识的效果有很大的影响。文献[13,14]采用小波脊算法来处理时变振荡信号，在低频振荡领域有重要意义，但此算法在提取多频率成分信号时存在分辨率不高的问题。文献[15,16]使用矩阵束（Matrix Pencil, MP）算法进行电力系统振荡模态及故障参数辨识，然而文献中对于算法的定阶问题是通过各奇异值与最大奇异值的比值来得到模态阶数，在含噪声时会产生较大的误差。在含噪情况下，模态阶数的确定就反映在非零奇异值数量的选择上；如果阶数取得过小，计算时会产生漏辨识；阶数过大，则会出现较多虚假模态，计算所需要的时间、内存也会相应的加大。因此，合理的定阶方法应确保阶数包含系统主要模态，而且计算时使虚

假模态尽可能的少。

为了克服现有方法的不足，本文将归一化奇异熵引入到矩阵束算法中来进行系统模态定阶；为进一步提高矩阵束算法的抗噪性能，使其在低信噪比时仍能获得高精度的辨识结果，本文采用新型广义形态滤波与改进矩阵束算法相结合来对电力系统低频振荡模态分析。经过数值仿真、4 机 11 节点系统仿真以及电网真实数据的实例仿真表明本文的方法可以较准确、快速地辨识出系统的主导模态，同时通过与 Prony 算法辨识的模式参数进行比较，本文算法的可行性与有效性进一步得以验证。

## 1 广义形态滤波

### 1.1 广义数学形态滤波算法

数学形态学方法是采用结构元素收集需要处理的信息，从信号的整体或局部中获得可以利用的信息。形态学的一些基础运算包含有腐蚀、膨胀以及由这两种运算构成的开、闭运算等。

待处理信号  $f(n)$  是采样得到的一维多值信号，其定义域为  $D_f = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ ；结构元素  $g(n)$  为一维序列， $D_g = \{0, 1, 2, \dots, P\}$  是其定义域，其中  $N$  和  $P$  为整数， $N \geq P$ 。定义灰值膨胀运算和腐蚀运算为

$$(f \oplus g)(n) = \max \{f(n-x) + g(x) \mid (n-x) \in D_f \text{ 且 } x \in D_g\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min \{f(n+x) - g(x) \mid (n+x) \in D_f \text{ 且 } x \in D_g\} \quad (2)$$

灰值膨胀运算  $\oplus$  和腐蚀运算  $\ominus$  是不可逆的，闭运算是先经过膨胀运算再经过腐蚀运算，而开运算是刚好相反。由于开、闭运算过程中选择的是相同的结构元素，所以无法较全面的除去正负脉冲<sup>[17,18]</sup>；本文针对传统的开、闭运算进行改进，构造一类新的广义形态开 $\circ$ 和广义形态闭 $\bullet$ ，使用的是不同结构元素以及膨胀与腐蚀的组合。

$$f \circ g = f \Theta g_1 \oplus g_2 \quad (3)$$

$$f \bullet g = f \oplus g_1 \Theta g_2 \quad (4)$$

当选取  $g_1 = g_2$  时，广义形态开、闭与普通的形态开、形态闭运算相同。为构造出更复杂、去噪效果更好的形态学滤波器，可以利用开、闭运算的级联形式，以达到双边滤波的效果。由于形态开的反扩展性和形态闭的扩展性，对于形态开-闭滤波器和形态闭-开滤波器而言在滤除信号中噪声的同时，存

在统计量偏移现象；为消除这种现象的影响，选用不同尺寸的结构元素构建的广义开-广义闭滤波器和广义闭-广义开滤波器。

设信号  $f(n)$  的结构元素为  $g_1(n)$  和  $g_2(n)$  且  $g_1(n) \subseteq g_2(n)$ ，则广义开运算和闭运算构成的广义开-广义闭  $GCO$  和广义闭-广义开  $GOC$  表达式为

$$GCO[f(n)] = (f \Theta g_1 \oplus g_2 \oplus g_1 \Theta g_2)(n) \quad (5)$$

$$GOC[f(n)] = (f \oplus g_1 \Theta g_2 \Theta g_1 \oplus g_2)(n) \quad (6)$$

则混合滤波器为

$$y(n) = \frac{GOC[f(n)] + GCO[f(n)]}{2} \quad (7)$$

## 1.2 衡量滤波效果的方法

在对信号进行滤波过程中，判别滤波效果好坏的主要有信噪比（Signal Noise Ratio, SNR）以及信号重构的方均误差（Mean Squared Error, MSE）两个标准。一般，算法的滤波效果越好则 SNR 越大，MSE 越小。SNR 的计算公式为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N [\hat{x}(n) - x(n)]^2} \quad (8)$$

式中， $N$  为信号的长度； $x(n)$  为原始的参考信号； $\hat{x}(n)$  为去噪后信号。

图 1 所示为使用广义形态滤波与本文方法对含噪声信号进行滤波的效果比较，从中可以看出本文方法要好于广义形态滤波。

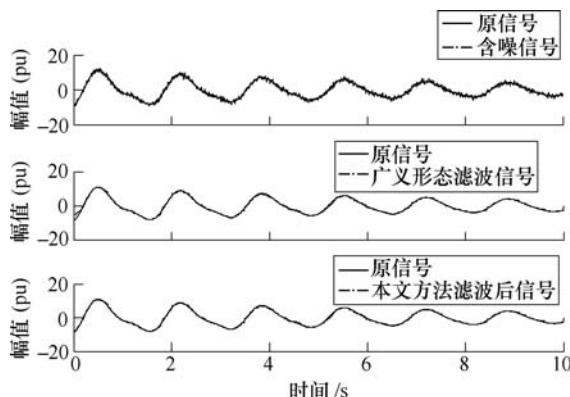


图 1 原信号、含噪信号及滤波效果比较

Fig.1 Original signal, noisy signal, generalized morphological filter and signal denoised by the proposed method

## 2 改进 MP 算法在低频振荡中的应用

### 2.1 改进 MP 算法的步骤

在数字信号处理领域一些学者提出了基于 MP 算法求解阻尼系数和信号极点，相比于现有的 Prony 算法，在计算速度与抗噪声性能方面有较大的优势；该算法的基本原理是运用采样数据创建两个 Hankel 矩阵，根据矩阵的特殊关系来求解其广义特征值，利用求得的广义特征值可以求出所要求解的极值点。在求解广义特征值的过程中为减少噪声的影响，采用 SVD 分解法和矩阵的降秩法，使算法具有好的鲁棒性，以此为基础本文提出了改进的 MP 算法用于电力系统低频振荡分析。

设无噪声的理想采样数据为  $x(n)$ ， $n=1, 2, \dots, N-1$ 。现在用  $M$  阶的指数模型来估计，即

$$x(n) = \sum_{i=1}^M b_i z_i^{n-1} \quad (9)$$

构造参数为  $L$  的两个矩阵束  $X_0$ 、 $X_1$ ， $L$  为矩阵束的参数

$$X_0 = \begin{bmatrix} x(L-1) & \dots & x(0) \\ x(L) & \dots & x(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x(N-2) & \dots & x(N-L-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (10)$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} x(L) & \dots & x(1) \\ x(L+1) & \dots & x(2) \\ \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & \dots & x(N-L) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (11)$$

由  $X_1 q_k = z_k X_0 q_k$ ，其中  $z_k (k=1, \dots, M)$  为信号的第  $k$  个极点，两边同乘  $X_0^+$  得： $X_0^+ X_1 q_k = z_k X_0^+ X_0 q_k = z_k q_k$ 。由此可见  $z_k$  是  $X_0^+ X_1$  的第  $k$  个特征值，因为  $X_0^+ X_1$  为  $L$  阶方阵，所以还存在  $L-M$  个零特征值。

根据观测数据序列  $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$  构造 Hankel 数据矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x(L) & \dots & x(0) \\ x(L+1) & \dots & x(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & \dots & x(N-L-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (12)$$

恰当地选择  $L$  可以抑制噪声干扰，通常取  $L=N/4 \sim N/3$ 。

对  $X$  进行奇异值分解有  $X=UDV$ 。其中  $U$  为  $N-L$  阶正交矩阵； $V$  为  $L+1$  阶正交矩阵； $D$  为  $(N-L) \times (L+1)$  阶对角阵，对角元素为  $d_i (i=0, 1, 2, \dots, L+1)$ ，并且  $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_{L+1}$ 。

对于理想  $M$  阶信号,  $d_1, d_2, \dots, d_M$  不为 0,  $d_{M+1} = \dots = d_{L+1} = 0$ 。而对于非理想型信号, 也许  $d_{M+1}, \dots, d_{L+1}$  不为零, 但是它们的值相对于  $d_1, d_2, \dots, d_M$  比较小。

文献[19,20]借鉴奇异熵在机械信号滤波中的应用, 将其引入到低频振荡分析中, 然而此种定阶方法存在一些主观因素的影响; 为克服此影响本文将用归一化奇异熵来对系统定阶。信号的奇异熵增量为

$$\Delta E_i = -\frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_j} \lg \frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad 1 \leq i \leq n \quad (13)$$

从奇异熵的增量可知,  $k$  阶奇异熵  $E_k$  的定义为

$$E_k = \sum_{i=1}^k \Delta E_i \quad k \leq n \quad (14)$$

归一化奇异熵的定义为

$$E = \frac{E_k}{E_n} \quad k \leq n \quad (15)$$

归一化奇异熵给出的是系统包含模态的一种度量, 当  $E$  大于某一限值  $\varphi$  ( $\varphi$  可根据不同程度的噪声取值) 时, 可以确定主导模态可能已经接近饱和, 剩下的主要是噪声干扰引起的, 这时的  $k$  值就可以定为系统的模态阶数  $M$ 。

重新构造  $D'$ 、 $V_0^H$ 、 $V_1^H$ 。 $D'$  为  $(N-L) \times L$  阶矩阵, 前  $M$  行由  $D$  的前  $M$  个奇异值组成, 后  $N-L-M$  行为 0, 这样得到的  $D'$  矩阵可有效消除噪声的影响。 $V_0^H$  为  $X$  奇异分解后的前  $M$  个主导右特征向量  $V^H$  的第  $1 \sim L$  行;  $V_1^H$  为  $X$  奇异分解后的  $V^H$  的前  $M$  个主导右特征向量的第  $2 \sim L+1$  行。

$$D' = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_M \\ \mathbf{0}_{(N-L-M) \times M} & \mathbf{0}_{(N-L-M) \times (L-M)} \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (16)$$

得到样本矩阵  $X'_0$ 、 $X'_1$  为

$$\begin{cases} X'_0 = U D' V_0^H \\ X'_1 = U D' V_1^H \end{cases} \quad (17)$$

由式 (18) 可以求得相应的振荡角频率以及衰减因子为

$$\alpha_i + j\omega_i = \frac{\ln z_i}{T_s} \quad i = 1, \dots, M \quad (18)$$

式中,  $\alpha_i$ 、 $\omega_i$ 、 $T_s$  分别表示低频振荡的衰减因子、振荡角频率、数据时间间隔。

利用采样数据  $x(n)$  和求得的极点  $z_i (i=1, \dots, M)$ , 可以采用式 (19) 求取参数  $b$ 。

$$X = Zb \quad (19)$$

其中

$$X = [x(0) \quad x(1) \quad \cdots \quad x(N-1)]^T$$

$$b = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_M]^T$$

则振荡信号幅值  $A_i$  和相位  $\theta_i$  为

$$\begin{cases} A_i = \text{abs}(b_i) \\ \theta_i = \arctan \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \end{cases} \quad (20)$$

## 2.2 算法拟合精度指标及算法流程

由以上的计算过程可以看出, 测量值越准确, 拟合值  $\hat{x}(i)$  与原信号  $x(i)$  也就越相近, 相应的误差就越小, 但是通常这两者并不能达到完全的拟合, 通常采用信号拟合精度 (Accuracy Of Fitting, AOF) 来表征拟合的准确度, 令

$$AOF = 20 \lg \frac{\|x(i)\|}{\|x(i) - \hat{x}(i)\|} \quad (21)$$

式中,  $x(i)$  是实测样本值;  $\hat{x}(i)$  为拟合值; 定义  $\|\cdot\|$  算子为 2 范数, 单位为 dB。AOF 的结果越大, 表示拟合效果越好, 普遍认为 AOF 值达到 10dB 以上时, 分析得到的结果是可以接受。

在详细介绍形态学滤波原理和改进 MP 算法后, 给出本文算法具体实施过程的流程如图 2 所示。

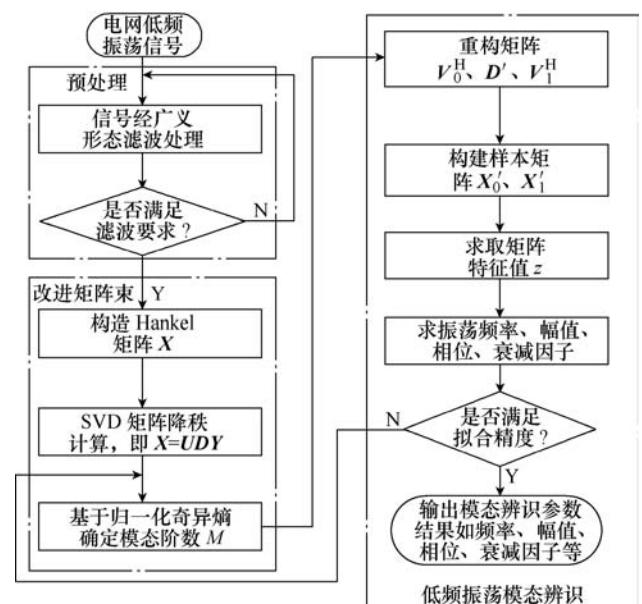


图 2 提出的低频振荡分析算法流程

Fig.2 The algorithm flow for the proposed method

### 3 算例仿真分析

#### 3.1 数值信号算例仿真

构造测试信号

$$y = 4e^{-0.01t} \cos\left(2\pi \times 1.3t + \frac{\pi}{6}\right) + 12e^{-0.6t} \cos\left(2\pi \times 0.3t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (22)$$

该测试信号有一定的特殊性，含有两个主导的振荡模式，频率依次为 1.3Hz、0.3Hz。图 3a、图 3b 给出了原始信号和含白噪声信号以及采用本文方法进行滤波后的信号，从图中可以看出采用本文方法可以有效地去除信号中白噪声的干扰，使滤波后的信号更加接近于原信号。

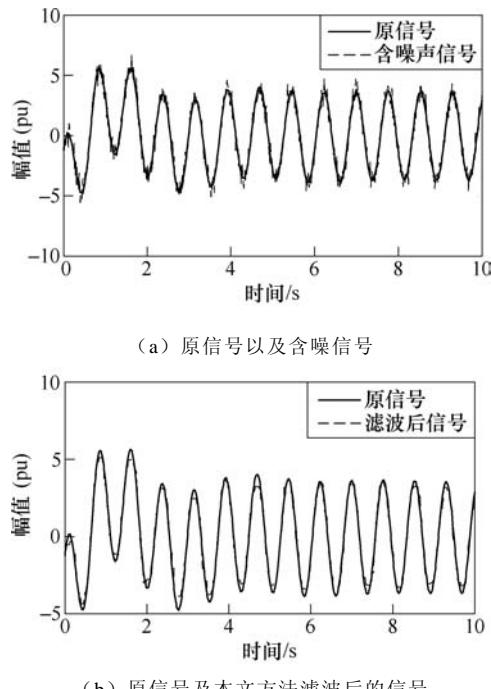


图 3 本文方法的滤波效果分析

Fig.3 Filtering effect of the proposed method

表 1 为三种方法滤波效果的信噪比和方均误差的比较，从表中去噪后的 SNR 和方均误差可看出本文方法效果比广义形态滤波及均值滤波的效果都要好。

图 4 为使用 Prony 算法、MP 算法及本文算法

表 1 滤波效果的比较

Tab.1 Comparison of the effects of filters

滤波方法	SNR/dB		方均误差
	去噪前	去噪后	
均值滤波	15.154 6	17.860 7	0.352 7
广义形态	15.154 6	18.689 9	0.320 6
本文方法	15.154 6	19.128 4	0.304 8

对含噪信号进行辨识后的拟合曲线。由拟合的曲线可以看出：Prony 算法拟合的曲线有较大的误差，而采用 MP 算法的拟合效果要好于 Prony 算法，本文采用的算法拟合曲线更加接近于原始信号。

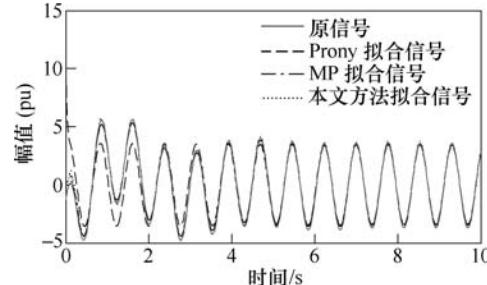


图 4 不同算法对含噪声信号辨识后的拟合曲线结果

Fig.4 The identified results by Prony algorithm, MP algorithm and the proposed algorithm

表 2 为三种算法辨识效果的比较；表中的结果表明，本文采用的方法可以在辨识阶数较低的情况下达到较高的拟合精度，从而使辨识拟合的曲线更加接近于原始信号。

表 2 三种算法辨识拟合效果的比较

Tab.2 Identification comparison of the three algorithms

辨识方法	阶数	拟合 AOF/dB	
Prony 算法	14	2.866 6	
MP 算法	10	10.865 2	
本文方法	4	11.872 9	

表 3 为采用 Prony 算法、MP 算法以及本文算法对含噪信号进行模式辨识的结果，其中误差为绝对误差。由辨识的模式参数对比可知，Prony 算法

表 3 含白噪声信号辨识的结果

Tab.3 Results of identification with noise

辨识方法	模式	类型	理论值		辨识结果	
			频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
Prony 算法	1	计算值	1.300 0	0.001 2	1.300 9	0.001 6
		误差	0.000 0	0.000 0	0.000 9	0.000 4
	2	计算值	0.300 0	0.303 3	—	—
		误差	0.000 0	0.000 0	—	—
MP 算法	1	计算值	1.300 0	0.001 2	1.299 8	0.001 0
		误差	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.000 2
	2	计算值	0.300 0	0.303 3	0.320 1	0.282 1
		误差	0.000 0	0.000 0	0.020 1	0.021 2
本文方法	1	计算值	1.300 0	0.001 2	1.299 7	0.001 0
		误差	0.000 0	0.000 0	0.000 3	0.000 2
	2	计算值	0.300 0	0.303 3	0.301 8	0.294 5
		误差	0.000 0	0.000 0	0.001 8	0.008 8

对含噪声的信号较为敏感，辨识参数的误差较大；MP 算法在辨识精度上高于 Prony 算法，但是仍存在一定误差；而本文算法在对含噪信号进行辨识时，能够有效去除噪声的干扰，准确地辨识出系统的模式参数，且辨识的模式参数误差较小，有效地验证了本文算法的可行性及准确性。

### 3.2 IEEE 2 区域 4 机仿真

本文对 IEEE 2 区域 4 机系统<sup>[21,22]</sup>进行仿真分析来验证该算法的有效性。该系统中，两个区域之间通过弱联络线来连接，系统的负荷很重，这种典型系统很容易发生低频振荡问题；正常运行时，由 G1、G2 组成的区域 1 向由 G3、G4 组成的区域 2 传送 413MW 功率。仿真对 G1、G3 的励磁参考电压在 1s 时刻施加幅值为 0.05，持续时间为 0.1s 的方波脉冲干扰信号，仿真得到发电机输出角速度波形以及联络线功率振荡波形。

由于仿真的效果较理想，为了验证本文方法的实用性，用 15dB 的白噪声污染理想信号来模拟实际采样信号；图 5 所示分别为发电机 G1、G3 转速变化曲线和联络线功率振荡信号以及含噪声的变化曲线。

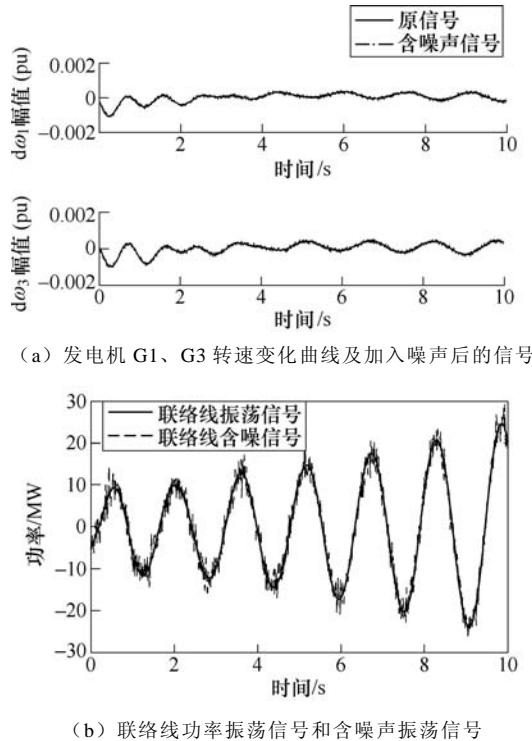


图 5 仿真原信号及加入噪声后的信号

Fig.5 Original signal and noisy signal for simulations

图 6 为发电机 G1、G3 转速变化曲线在含噪声情况下采用 MP 算法、本文算法进行辨识后拟合的曲线图；从拟合曲线可以看出采用本文的辨识方法

效果要优于采用 MP 算法，说明本文算法有较高的抗噪性能。

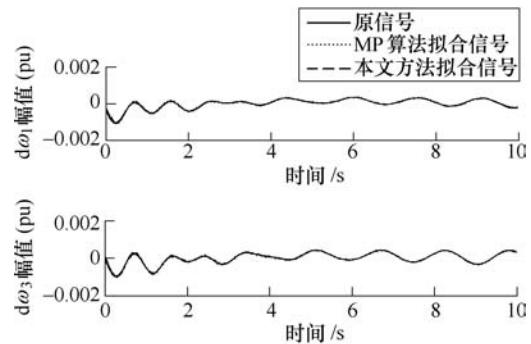


图 6 G1、G3 转速变化曲线及不同算法辨识结果

Fig.6 G1, G3 speed signal and the identification results by MP algorithm and the proposed method

本文算法的辨识结果见表 4。从表 4 的辨识结果来看，本文算法能够准确地辨识出真实的振荡模式参数，对发电机 G1、G3 的转速变化曲线进行辨识分别能得到各自区域内的局部主导振荡模式，进一步验证了本文算法的准确性与可行性。

表 4 本文算法辨识的结果（发电机转速）

Tab.4 The identification results obtained by the proposed method algorithm (speed signals of G1 and G3)

机组	模式	理论值		本文方法辨识值	
		频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
G1	1,2	1.115 9	0.096 9	1.099 9	0.093 0
	误差	0.000 0	0.000 0	0.001 6	0.003 9
	3,4	0.640 2	-0.027 1	0.640 0	-0.026 5
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.000 6
	5,6	0.069 9	0.353 7	0.062 8	0.447 8
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 7	0.094 1
G3	1,2	1.153 5	0.087 9	1.141 8	0.077 7
	误差	0.000 0	0.000 0	0.011 7	0.010 2
	3,4	0.640 8	-0.026 7	0.640 9	-0.027 0
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 3
	5,6	0.074 7	0.369 4	0.068 7	0.428 3
	误差	0.000 0	0.000 0	0.006 0	0.058 9

图 7 所示为联络线功率振荡信号及不同算法辨识结果。表 5 列出本文算法对联络线功率的辨识结果。同样，从图 7 和表 5 对功率联络线振荡信号进行辨识的结果来看，本文提出的方法都具有较好的辨识精度，从中也可以看出该系统具有振荡频率为 0.64Hz 的区域振荡。

表 6 为采用 MP 算法和本文算法分别对含噪 G1、G3 转速变化曲线及联络线功率振荡信号进行

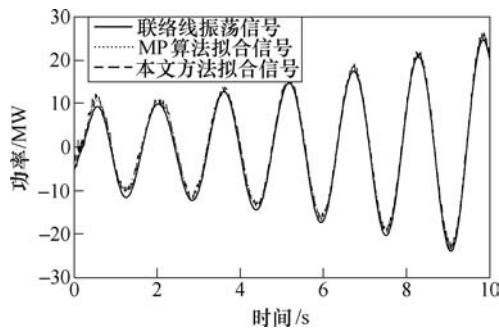


图 7 联络线功率振荡信号及不同算法辨识结果

Fig.7 Tie-line power signal and the identification results by MP algorithm and the proposed method

表 5 本文算法辨识的结果(联络线功率)

Tab.5 The identification results obtained by the proposed method algorithm (tie-line power signal)

线路	模式	理论值		本文方法辨识值	
		频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
	1,2	1.021 8	0.113 5	1.034 0	0.100 6
功率	误差	0.000 0	0.000 0	0.012 2	0.012 9
传输线	3,4	0.640 9	-0.026 9	0.640 1	-0.029 1
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 8	0.002 2

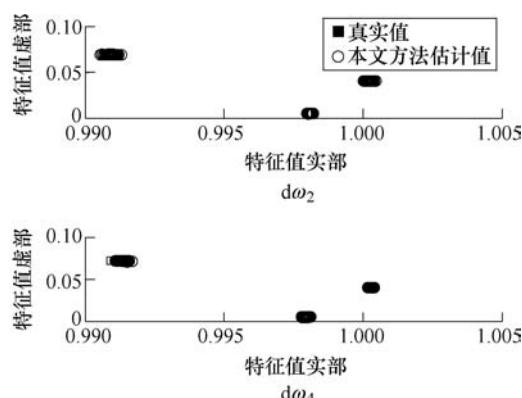
表 6 MP 算法与本文算法拟合效果的比较

Tab.6 Comparison of the effects of different algorithms

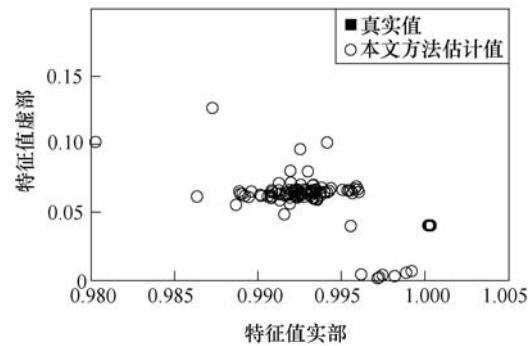
类别	编号	MP 算法		本文算法	
		阶数	拟合精度/dB	阶数	拟合精度/dB
发电机	G1	18	6.667 6	6	10.882 8
	G3	17	9.815 7	6	11.043 9
联络线	P12	10	9.839 9	5	10.057 1

拟合效果对比表; 对比数据可知, 采用本文算法进行模式辨识时, 能够在较低阶数下达到较高的拟合信噪比, 进一步说明本文方法在去噪方面有较大的优势。

图 8 为发电机 G2、G4 转速变化曲线及联络线



(a) 发电机 G2、G4 转速变化曲线特征值估计



(b) 联络线功率振荡信号特征值估计

图 8 发电机转速和联络线功率信号特征值估计

Fig.8 Eigenvalues of generator signal and tie-line power signal estimated by the proposed algorithm

功率振荡信号在含噪声情况下采用本文算法进行 100 次辨识的特征值估计结果, 从图中可知本文算法的 100 次特征值估计值与真实值基本重合, 说明本文算法的辨识结果较为准确。

根据以上分析, 本文也利用 K-均值聚类分析理论分析多次辨识的结果, 以确定本文提出方法的有效性。表 7 为本文算法 100 次辨识结果进行 K-均值聚类分析得到的特征值类中心值对比结果。由对比结果可以看出: 本文方法的辨识值与真实值很接近, 误差较小。

表 7 K-均值聚类分析的结果(发电机转速)

Tab.7 K-means algorithm analysis results

机组	特征值	真实值聚类结果		本文方法聚类结果	
		实部	虚部	实部	虚部
G2	1	0.998 0	0.004 7	0.998 1	0.004 9
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 2
	2	0.990 7	0.069 3	0.990 9	0.069 1
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.000 2
	3	1.000 3	0.040 3	1.000 2	0.040 3
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 0
G4	1	0.997 8	0.004 9	0.997 9	0.005 2
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 3
	2	1.000 3	0.040 3	1.000 3	0.040 3
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	3	0.990 9	0.072 0	0.991 3	0.071 8
	误差	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.000 2

图 9 为采用辨识参数绘制的振荡模式矢量图, 由局部振荡模式图 9a 可以看出 G1、G2 之间的相位差接近  $180^\circ$ , 有强烈的局部振荡模式; G3、G4 之间也有强烈的局部振荡模式, 其相位差同样接近

180°。由区域振荡模式矢量图 9b 可以发现, 区域 1 与区域 2 之间有相位几乎相反的区域振荡模式。以上的分析可以验证干扰同时存在区域 1 与区域 2 中, 这与起初对 G1 (区域 1 内)、G3 (区域 2 内) 的励磁参考电压加扰动相符, 更加体现了本文算法辨识的真实性和准确性。

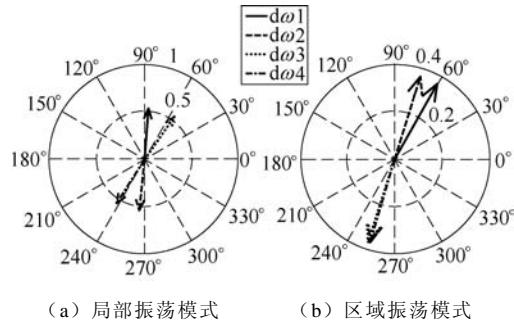


图 9 振荡模式矢量图分析

Fig.9 Normalized vector graph of the oscillation modes

### 3.3 美国电网实例仿真分析

本文也应用实际获取的美国电网低频振荡数据进行了算法验证。以某地 PMU 获取的低频振荡的数据为例, 当日时间 6 时 27 分 35 秒开始记录; 把 PMU 记录到的数据进行 Matlab 重绘得到的频率曲线以及采用本文所述的方法进行去噪后的曲线如图 10 所示。

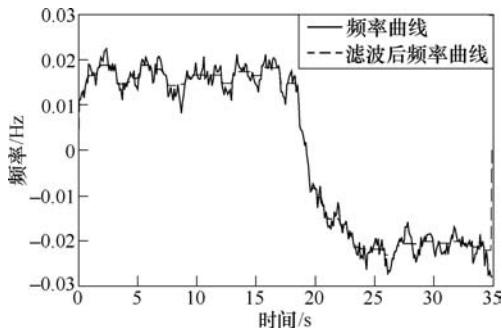


图 10 实际测量的信号以及去噪后的曲线

Fig.10 Curves of actual measured signal and denoising signal

图 11 为对 PMU 检测到的数据进行小波分析得到的小波时频分析。从图中可以看出, 不同频率分量的能量在图中对应不同的颜色, 颜色越暖, 频率分量的能量越高; 相反, 颜色越冷, 频率分量的能量越低。仔细观察可以看出在 15~27s 时间段内小波时频信号的颜色最暖, 说明此段频率变化剧烈, 因而在图 11 中选择该时间段, 即图 12 中两虚线之间的数据进行辨识。

对 PMU 采集的频率进行功率谱估计, 得到的功率谱曲线如图 13 所示, 通过功率谱曲线可以看

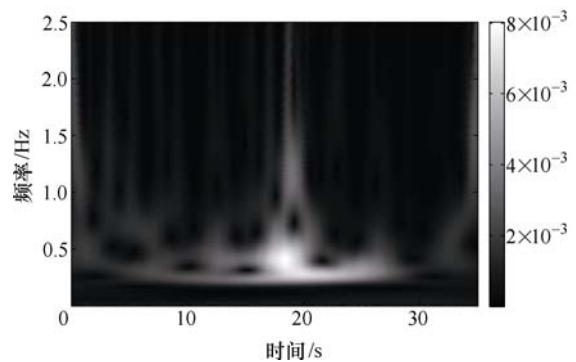


图 11 信号小波时频分析

Fig.11 The wavelet time-frequency analysis

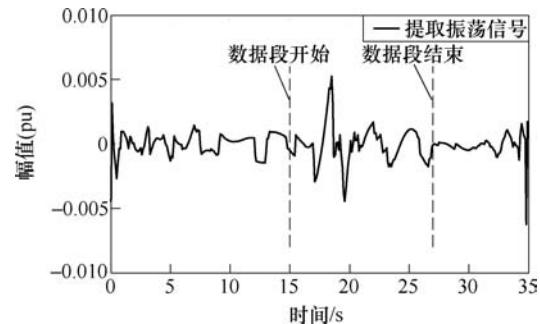


图 12 辨识数据区间选择

Fig.12 Selection of the identification data segment

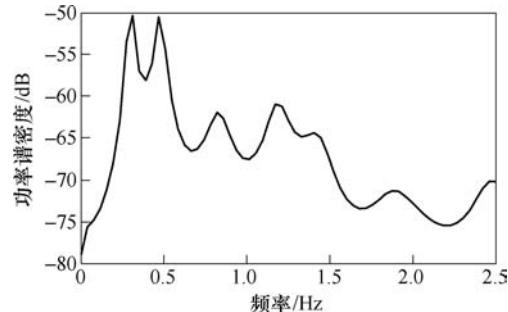


图 13 检测信号分析的功率谱曲线

Fig.13 Power spectrum curve of measurement signal

出: 在频率为 0.31Hz、0.47Hz、0.82Hz、1.17Hz 左右的位置时出现明显尖峰, 从而可以判定该低频振荡的主导模态频率会在以上 4 个数据附近。

分别采用 Prony 算法、MP 算法及本文算法对选取的数据段进行模式辨识, 其辨识的结果见表 8。由表中模式参数可以看出, 本文算法在只需要 8 阶的情况下辨识出和 MP 算法较为接近的低频振荡的主导模态辨识结果, 但本文辨识的阶数较低从而具有较大的速度和时间优势。

## 4 结论

本文针对电力系统低频振荡信号的特点, 设计广义形态滤波器来对含噪声的信号进行滤波预处

表8 数据辨识的结果

Tab.8 The results of real data identification

辨识方法	模式	频率/Hz	阻尼比	阶数
Prony 算法	1,2	0.293 6	0.042 0	24
	3,4	0.506 2	0.079 2	
	5,6	0.925 1	0.124 4	
	7,8	1.238 7	0.073 8	
MP 算法	1,2	0.310 9	0.020 9	17
	3,4	0.513 5	0.037 5	
	5,6	0.866 4	0.040 5	
	7,8	1.186 7	0.011 8	
本文方法	1,2	0.314 7	0.006 2	8
	3,4	0.508 9	0.023 1	
	5,6	0.863 4	0.047 6	
	7,8	1.219 7	0.002 8	

理, 能够快速去除噪声对信号的影响, 有效地抑制噪声对低频振荡模式辨识的影响; 提出的归一化奇异熵定阶方法能在系统拟合信噪比相差不大的情况下使系统的估计阶数更加逼近真实值, 从而有效降低了系统辨识复杂度, 提高了系统的辨识效率。通过数值仿真、系统仿真以及电网实际数据的仿真分析验证了本文算法在电力系统低频振荡模式辨识中的正确性和有效性。

本文所提出的算法拥有抗噪性、辨识参数较为准确等优点, 因此其在基于实测轨迹的低频振荡分析及阻尼控制器设计研究中将是一种行之有效的方法。课题下一步的研究目标将集中在用低频振荡局部和区域间矢量分析或非线性多项式动态相关分析的方法, 探索参数空间对低频振荡和模态相互作用特性的影响。

## 参考文献

- [1] 赵妍, 李志民, 李天云. 低频振荡模态参数辨识的共振稀疏分解 SSI 分析方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 136-144.  
Zhao Yan, Li Zhimin, Li Tianyun. Low frequency oscillation modal parameter identification using resonance-based sparse signal decomposition and SSI method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 136-144.
- [2] 董恒锋, 徐政, 黄弘扬, 等. 大电源特高压集中外送系统低频振荡的网侧控制技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(29): 571-580.  
Dong Hengfeng, Xu Zheng, Huang Hongyang, et al. Grid side damping control technologies of low frequency oscillation of ultra high voltage transmission systems for large-scale energy bases[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(29): 571-580.
- [3] 李从善, 刘天琪, 刘利兵, 等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 10-17.  
Li Congshan, Liu Tianqi, Liu Libing, et al. A auto-disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 10-17.
- [4] Ma Jin, Zhang Pu, Fu Hongjun, et al. Application of phasor measurement unit on locating disturbance source for low-frequency oscillation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 340-346.
- [5] 顾丽鸿, 周孝信, 严剑秋, 等. 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 1-7.  
Gu Lihong, Zhou Xiaoxin, Yan Jianqiu, et al. Real time small signal stability analysis of power systems interconnected by ultra high voltage transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 1-7.
- [6] 张程, 金涛. 基于 ISPM 和 SDM-Prony 算法的电力系统低频振荡模式辨识[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1209-1216.  
Zhang Cheng, Jin Tao. Identification of low frequency oscillations in power systems using an improved smoothness priors method and second-derivative method-Prony[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1209-1216.
- [7] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-141.  
Li Anna, Wu Xi, Jiang Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-141.
- [8] Darshana P W, Udaya D A, Krish N. Identification of dominant low-frequency modes in ring-down oscillations using multiple Prony models[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015,

- 9(15): 2206-2214.
- [9] Seyyed A H, Nima A, Mohammad H V. A fourier based wavelet approach using Heisenberg's uncertainty principle and shannon's entropy criterion to monitor power system small signal oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3314-3325.
- [10] Jonsson M, Begovic M, Daalder J. A new method suitable for real-time generator coherency determination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1473-1482.
- [11] 唐西胜, 孙玉树, 齐智平. 基于 HHT 的风电功率波动及其对电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2115-2121.  
Tang Xisheng, Sun Yushu, Qi Zhiping. Analysis of wind power fluctuation characteristics and its impact on power system low frequency oscillation based on HHT[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2115-2121.
- [12] 马燕峰, 赵书强. 用改进的 Hilbert-Huang 变换辨识电力系统低频振荡[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1492-1499.  
Ma Yanfeng, Zhao Shuqiang. Identification of low frequency oscillations in power system based on improved Hilbert-Huang transform[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1492-1499.
- [13] 栾某德, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于改进小波系数奇异值分解和小波去噪的低频振荡时变模式辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 141-147.  
Luan Moude, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al. A method to identify time-varying mode of low frequency oscillation by continuous wavelet transform based on raising singular value decomposition of wavelet coefficient and wavelet denoising[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 141-147.
- [14] José L Rueda, Carlos A Juárez, István Erlich. Wavelet-based analysis of power system low-frequency electromechanical oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1733-1743.
- [15] 胡楠, 李兴源, 李宽, 等. 基于四阶混合平均累计量的矩阵束算法在低频振荡在线辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 53-60.  
Hu Nan, Li Xingyuan, Li Kuan, et al. A modified matrix pencil method based on fourth-order mixed mean cumulant for low frequency oscillation mode on-line identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 53-60.
- [16] 王臻, 李承, 张舜钦, 等. 基于改进矩阵束滤波与检测的异步电动机故障诊断新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 213-219.  
Wang Zhen, Li Cheng, Zhang Shunqin, et al. A new filter and detection approach of fault in asynchronous motor based on improved matrix pencil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 213-219.
- [17] 黄南天, 张卫辉, 蔡国伟, 等. 采用改进多分辨率快速 S 变换的电能质量扰动识别[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1412-1418.  
Huang Nantian, Zhang Weihui, Cai Guowei, et al. Power quality disturbances classification with improved multiresolution fast S-transform[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1412-1418.
- [18] 董飞飞, 刘涤尘, 涂炼, 等. 基于 MM-ARMA 算法的次同步振荡模态参数辨识[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1252-1257.  
Dong Feifei, Liu Dichen, Tu Lian, et al. Subsynchronous oscillation modal parameter identification based on MM-ARMA algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1252-1257.
- [19] 党杰, 李勇, 徐友平, 等. 基于 WAMS 和奇异熵矩阵束方法的电网低频振荡仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 14-18.  
Dang Jie, Li Yong, Xu Youping, et al. Power grid low frequency oscillation simulation analysis based on WAMS and singular entropy matrix pencil method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 14-18.
- [20] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 基于奇异熵 TLS-ESPRIT 算法的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 7-12.  
Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Yang Huan. Small signal stability analysis based on singular entropy and TLS-ESPRIT algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 7-12.
- [21] 蔡国伟, 杨德友, 张俊丰, 等. 基于实测信号的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 59-65.

- Cai Guowei, Yang Deyou, Zhang Junfeng, et al. Mode identification of power system low-frequency oscillation based on measured signal[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 59-65.
- [22] 马燕峰, 刘伟东, 赵书强. 基于包络线拟合的低频振荡性质在线判别[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 46-53.
- Ma Yanfeng, Liu Weidong, Zhao Shuqiang. On-line identification of low-frequency oscillation properties based on envelope fitting[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2014, 38(23): 46-53.

#### 作者简介

金 涛 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为在线测量理论与方法、电力系统广域监测和智能电网等。  
E-mail: jintly@fzu.edu.cn (通信作者)

刘 对 男, 1990 年生, 硕士研究生, 研究方向为电力系统广域监测信号处理与低频振荡分析。  
E-mail: 396640292@qq.com

(编辑 郭丽军)

## “无线电能传输机理及技术”专题征稿启事

无线电能传输是目前国际上一个热门和前沿研究方向, 各国企业界都把其作为未来技术和经济的增长点。然而, 现阶段无线输电技术在传输机理及应用等方面还存在诸多问题, 需要进一步探讨和研究。

为进一步加强学术交流, 《电工技术学报》编辑部拟邀请华南理工大学张波教授担任特约主编, 于 2017 年主持 1 期关于“无线电能传输机理及技术”研究成果的专题, 现真诚邀请各位专家、学者积极撰文, 踊跃投稿, 共同研讨无线电能传输机理及技术的最新进展、研究经验和未来发展方向。

### 一、征文包括(但不限于)以下主题

1. 新型无线电能传输机理;
2. 感应与谐振无线电能传输技术比较研究;
3. 无线电能传输系统参数设计及优化方法;
4. 无线电能传输系统电磁兼容问题;
5. 新能源汽车静动态无线充电技术;
6. 移动设备无线电能传输技术;
7. 医疗器械无线电能传输技术;
8. 家用电器无线电能传输技术;
9. 能源互联网的无线电能传输技术。

### 二、重要日期

1. 论文投稿截止日期: 2017 年 5 月 30 日。
2. 论文预计刊出时间: 2017 年 8 月(或者 9 月)。

### 三、投稿方式

请登录杂志网站 (<http://www.ces-transaction.com>) 注册作者用户名投稿, 格式请参考网站“投稿指南”中的论文模板, 投稿时请在投稿栏目中选择“无线电能传输机理及技术”, 备注中注明为“无线电能传输机理及技术”专题论文。

### 四、联系人

《电工技术学报》编辑部: 郭丽军 电话: 010-68595315 Email: glijun@126.com  
华南理工大学: 张 波 Email: epbzhang@scut.edu.cn