

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240503

## 基于振荡模态辨识的负阻尼振荡故障源定位方法

刘芳<sup>1</sup>, 彭宇恒<sup>1</sup>, 刘乾易<sup>1</sup>, 林思思<sup>1</sup>, 李勇<sup>2</sup>, 刘康志<sup>3</sup>

(1. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;  
3. 千叶大学电气与电子工程系, 日本 千叶 263-8522)

**摘要:** 大规模、多区域、高度耦合的互联电力系统正面临着扰动响应强、非线性时变、振荡模态复杂等问题。为了从广域测量系统累积的海量数据中挖掘系统故障状态下的振荡信息, 实现故障源定位, 提出一种基于振荡模态辨识的负阻尼振荡故障源定位方法。首先, 提出一种数据驱动的振荡模态辨识(data-driven mode identification, DDMI)方法, 实现负阻尼低频振荡的模态参数辨识, 从而筛选出主导模态信号。其次, 基于阻尼转矩法推导了发电机在多模态下振荡能量计算式。进一步地, 利用模态参数辨识结果复现不同模态下的振荡信号, 计算主导模态振荡能量, 实现振荡故障发电机定位。最后, 通过含风电接入的新英格兰系统进行仿真, 验证了DDMI方法的优越性。定位结果表明所提定位方法在多机故障情况下仍能准确定位故障源。

**关键词:** 振荡模态辨识; 振荡定位; 阻尼转矩分析; 振荡能量

### Fault source location method for negative damping oscillations based on oscillation mode identification

LIU Fang<sup>1</sup>, PENG Yuheng<sup>1</sup>, LIU Qianyi<sup>1</sup>, LIN Sisi<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, LIU Kangzhi<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan)

**Abstract:** Large-scale, multi-regional, highly coupled interconnected power systems are increasingly facing challenges such as strong perturbation responses, nonlinear time-varying behavior, and complex oscillation modes. To extract oscillation information under fault conditions from the massive data accumulated by wide-area measurement systems (WAMS) and to achieve fault source localization, a negative damping oscillation fault source location method based on oscillation mode identification is proposed. First, a data-driven mode identification (DDMI) method is proposed to identify modal parameters of low-frequency oscillations with negative damping, thereby filtering out the dominant modal signals. Next, based on damping torque analysis, the calculated formula of generator oscillation energy in different oscillation modes is defined. Furthermore, the oscillation signals for different modes are reproduced using the identified modal parameters to compute the dominant mode oscillation energy, which enables the localization of the oscillation-causing generator. Finally, simulations are conducted on a New England power system model with wind power integration to verify the effectiveness of the DDMI method. The results show that the proposed localization method can accurately locate the fault source under multi-machine fault scenarios.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62373373).

**Key words:** oscillation mode identification; oscillation localization; damping torque analysis; oscillation energy

## 0 引言

随着现代电力系统互联程度的加深和各类电力

电子设备的使用, 电网结构和运行方式变得更为复杂, 电力系统低频振荡频发。目前, 振荡辨识方法主要分为基于模型的模态分析法<sup>[1-3]</sup>和基于广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)数据的实测信号分析法<sup>[4-5]</sup>。基于模型的模态分析法采用近似的线性或非线性电力系统模型对振荡模态进行分析。该方法可从机理上揭示电力系统在某一工况

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62373373); 湖南省自然科学基金重点项目资助(2024JJ3033); 湖南省科技创新计划项目资助(2022RC3051)

下的动态行为,但是难以用于振荡的实时监测。基于 WAMS 的实测信号分析法对实测振荡信号进行分析,其物理意义直观。近年来,由于 WAMS 广泛应用,实测信号分析法已成为振荡辨识的主要方法。

同时,WAMS 的广泛应用累积了海量的运行数据。如何结合目前不断发展的数据驱动技术和海量数据来实现振荡模态辨识已成为一个重要的研究方向。在此基础上,针对如今频繁发生的负阻尼低频振荡,为了实现控制信号优选与故障溯源,负阻尼振荡故障发电机的定位至关重要。

对于负阻尼振荡定位的实现,国内外主要采用能量函数法和阻尼转矩法。能量函数法通过应用 Lyapunov 函数对电力系统稳定性进行分析<sup>[6]</sup>。该方法能够得到系统振荡和能量耗散之间的联系,对负阻尼振荡定位和强迫振荡定位均适用。文献[7-8]指出,由于故障会给系统引入负阻尼特性,导致故障所在的设备产生暂态能量并对系统贡献负阻尼,可根据这一特性实现振荡定位。文献[9]基于发电机的动能方程和网络分支的势能方程,提出了一种模态动能参与因子,用于评价低频区间振荡时各发电机的参与度。文献[10]通过多元经验模态分解法分离出表征不同振荡模态的固有模态函数分量,从而计算各发电机的耗散能量流,根据耗散能量流实现振荡源定位。文献[11]建立了基于端口控制哈密顿理论的发电机能量函数。文献[12]基于上述能量函数,将其推广至多机系统,提出了一种基于发电机振荡耗散能量流的阻尼评估方法。文献[13]分析了基于振荡耗散能量流的能量函数法在新英格兰实际振荡事件的可行性与效率。文献[14]通过分析支路模式振荡能量与发电机状态变量之间的解析关系,建立了基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法。然而,上述文献中采用的能量函数法无法判别强迫振荡故障和负阻尼故障之间的区别,容易导致错误定位,无法针对性地实施防控措施。

因此,近年来阻尼转矩法广泛应用于负阻尼故障定位<sup>[15-17]</sup>,阻尼转矩法将由系统小扰动导致的发电机电磁转矩变化量分解为同步转矩和异步转矩(也称阻尼转矩)。该方法认为电气阻尼转矩系数为负数的发电机就是故障源。文献[15]通过阻尼转矩法分析了低频振荡与机械功率和电磁功率的阻尼转矩之间的关系。文献[16]从阻尼转矩的角度分析了多机电力系统次同步振荡失稳的物理意义。文献[17]结合旋转不变性技术和阻尼转矩分析法计算电机阻尼转矩系数,从而判断振荡源位置。阻尼转矩分析法能够实现负阻尼振荡的有效定位且具有明确的物理意义,但是目前的研究方法仍存在一定局限性,

负阻尼振荡故障源的定位易受非主导模态振荡信号的影响,会导致误定位且定位结果不够直观,难以完成复杂工况下的故障定位。

为解决上述问题并充分利用 WAMS 积累的海量数据,本文提出了一种基于振荡模态辨识的负阻尼振荡故障源定位方法。首先,结合大量振荡数据和数据挖掘技术,提出一种数据驱动的模态辨识(data-driven mode identification, DDMI)方法,实现多振荡模态参数辨识。然后,基于阻尼转矩分析法推导出发电机的振荡能量计算式,利用模态参数辨识结果计算各模态振荡能量,从而实现负阻尼振荡故障源定位。最后,利用新英格兰 10 机 39 节点系统进行仿真分析,通过 DDMI 方法对振荡信号进行模态辨识,并与振荡信号频谱进行对比,验证了 DDMI 方法能准确辨识主导模态。为定量分析辨识结果的精度,利用辨识结果复现振荡信号,并与其他两种方法进行对比,结果表明 DDMI 方法的辨识精度在 3 种指标下比其他方法至少提高 40%。通过振荡辨识结果计算各电机主导模态振荡能量,分析计算所得故障源是否与实际一致,从而验证负阻尼故障源定位方法在多机故障情况下的准确性。

## 1 数据驱动的振荡模态辨识方法

为提高负阻尼低频振荡故障源定位的准确度,避免负阻尼振荡的非主导模态信号对故障定位的影响,本文提出了一种数据驱动的宽频带振荡模态辨识方法,从而实现主导振荡模态的振荡参数辨识。

振荡数据库的构建是实现振荡模态辨识的基础,也是影响振荡辨识精度的关键因素,不恰当的数据库会导致辨识结果完全错误从而导致振荡能量无参考价值。振荡数据根据其获得方式和时间可分为历史数据、实时数据和仿真数据 3 种类别。仿真数据又包括模型仿真数据和构造仿真数据两种。本文采用历史振荡数据和实时振荡数据来建立原始振荡数据库,并利用实时振荡数据来适当扩充振荡数据库。在建立振荡数据库时,在仿真过程中加入了各种不同的运行条件和故障类型,丰富数据库中振荡数据,使得该方法能够准确地辨识振荡模态参数。

此外,每个振荡数据序列都有相应的振荡模态参数标签,包括各个模态的幅值、阻尼系数和频率等。振荡数据中的历史振荡数据和模型仿真数据的标签来源于结合经验模态分解算法和 Prony 算法的模态辨识方法。该方法首先使用经验模态分解算法提取振荡模态,然后使用 Prony 算法辨识每个模态的参数<sup>[18]</sup>。实时振荡数据的标签来源于 DDMI 方法。DDMI 方法的整体框架如图 1 所示。图 1 中,

$N$  为振荡数据的总量,  $n$  和  $m$  为振荡数据的维数。当电力系统中产生待辨识的振荡数据时, DDMI 方法首先对电磁功率变化和转速变化振荡信号进行去趋势处理, 之后剔除其中存在大段数据缺失或异常的振荡数据序列。针对个别数据点缺失或异常的振荡序列, 则采用三次样条插值法进行补充或者替换。

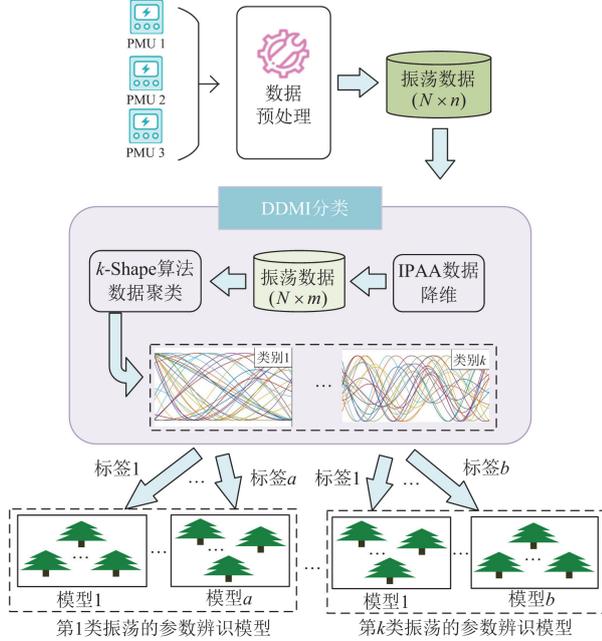


图1 DDMI方法的整体框架

Fig. 1 Overall framework of DDMI method

其次, 随着 WAMS 的广泛应用和设备记录时间的增加, 振荡数据维度与复杂程度在不断变大。因此, 本文在分段聚合近似(piecewise aggregation approximation, PAA)算法<sup>[19]</sup>的基础上, 引入增幅事件和突变点作为聚合依据, 提出了改进分段聚合近似(improved PAA, IPAA)算法进行降维, 其步骤如下所述。

1) 输入  $N \times n$  维振荡数据集  $X$ , 设定阈值  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  均为所选数据段总量的 40%, 并归一化处理。

2) 将数据按 5 个点为一段, 共分成  $n/5$  段。计算每段内的增幅事件数  $\lambda_j$  和突变点数  $\mu_j$ 。

3) 依据各段的  $\lambda_j$  和  $\mu_j$  判断近似方法: 若  $\lambda_j < \delta_1$  且  $\mu_j < \delta_2$ , 则取均值代替; 若  $\lambda_j < \delta_1$  但  $\mu_j > \delta_2$ , 采用极值替换; 若  $\lambda_j > \delta_1$  但  $\mu_j > \delta_2$ , 使用最大值与最小值替代; 若均大于  $\delta_1$ , 保留原序列。

4) 计算数据维度, 若未达标, 则逐步上调爬坡事件和边缘点阈值并重复步骤 2) 和步骤 3), 直至达到目标维数后输出降维后的振荡数据集。

IPAA 算法根据某段数据的增幅事件数和突变

点个数来确定各子数据段的聚合近似方法, 从而在确保降低数据维度的同时尽可能多地保留原始振荡中的曲线特征信息。

然后, 采用  $k$ -Shape 算法<sup>[20]</sup>对电磁功率变化和转速变化振荡数据进行聚类, 将振荡数据分为  $k$  类。基于互相关度量方法,  $k$ -Shape 算法提出了一种基于形状的距离(shape-based distance, SBD), 可通过两条曲线之间的形状相似度来区分振荡数据。

最后, 根据待辨识振荡信号与各类聚类中心的 SBD 判断待辨识信号类别, 基于随机森林算法得到各振荡数据类别对应的参数辨识模型, 进而计算各个振荡模态幅值、阻尼系数和频率。

## 2 阻尼转矩分析

假设有一个  $n$  机电力系统, 且系统中所有发电机均装设电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS), 系统中的同步发电机均采用三阶模型。对于某一振荡模态所对应的系统特征根, 经过计算推导, 可得到该  $n$  机系统的数学模型<sup>[21]</sup>。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \\ M \Delta \dot{\omega} = -K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q - D \Delta \omega \\ T'_{d0} \Delta \dot{E}'_q = -K_4 \Delta \delta - K_3^{-1} \Delta E'_q + \Delta E_{fd} \\ T_A \Delta \dot{E}_{fd} = -K_A K_5 \Delta \delta - K_A K_6 \Delta E'_q + K_A \Delta U_{PSS} - \Delta E_{fd} \\ \Delta U_{PSS} = G_{PSS}(s) \Delta \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n]^T$  为  $n$  台发电机的功角变化量求导;  $\Delta \omega = [\Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \dots, \Delta \omega_n]^T$  为  $n$  台发电机转速变化量求导;  $\Delta E'_q = [\Delta E'_{q1}, \Delta E'_{q2}, \dots, \Delta E'_{qn}]^T$  为  $q$  轴暂态电势求导;  $\Delta E_{fd} = [\Delta E_{fd1}, \Delta E_{fd2}, \dots, \Delta E_{fdn}]^T$  为励磁电压求导;  $\Delta U_{PSS} = [\Delta U_{PSS1}, \Delta U_{PSS2}, \dots, \Delta U_{PSSn}]^T$  为 PSS 的输出电压变化量;  $M = \text{diag}(M_i)$ 、 $D = \text{diag}(D_i)$ 、 $T'_{d0} = \text{diag}(T'_{d0i})$ 、 $T_A = \text{diag}(T_{Ai})$ 、 $K_A = \text{diag}(K_{Ai})$ 、 $G_{PSS}(s) = \text{diag}(G_{PSSi}(s))(i=1, 2, \dots, n)$ , 分别为由系统中  $n$  台发电机的转子惯性时间常数、机械阻尼系数、励磁绕组时间常数、励磁机时间常数、励磁机增益和 PSS 的传递函数构成的对角阵;  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ 、 $K_6$  表示系统的系数矩阵, 与系统结构和参数有关;  $\omega_0$  为发电机同步转速。

根据式(1), 可得到如图 2 所示的多机电力系统模型的框图, 其中  $\Delta T_e = [\Delta T_{e1}, \Delta T_{e2}, \dots, \Delta T_{en}]^T$  为由  $n$  台发电机的电磁转矩变化量构成的向量。

由图 2 可得到  $\Delta T_e$  与  $\Delta \delta$  和  $\Delta E'_q$  之间的关系:

$$\Delta T_e = -(K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q) \quad (2)$$

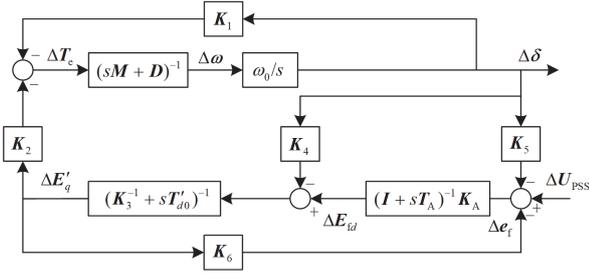


图2 多机系统模型的框图

Fig. 2 Block diagram of multi-machine system mode

$$\begin{cases} \Delta E'_q = [\Delta e_f (I + sT_A)^{-1} K_A - K_4 \Delta \delta] (K_3^{-1} + sT'_{d0}) \\ \Delta e_f = -K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta E'_q + \Delta U_{PSS} = \\ \quad (G_{PSS}(s) - K_5) \Delta \delta - K_6 \Delta E'_q \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)进行化简整理, 可得

$$\begin{cases} \Delta E'_q = E(s) \Delta \delta \\ E(s) = [K_3^{-1} + sT'_{d0} + (I + sT_A)^{-1} K_A K_6]^{-1} \cdot \\ \quad [-K_4 + (-K_5 + G_{PSS}(s))(I + sT_A)^{-1} K_A] \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入到式(2)中, 可得

$$\Delta T_e = -(K_1 + K_2 E(s)) \Delta \delta = B(s) \Delta \delta \quad (5)$$

式中,  $B(s)$  为  $n \times n$  的电磁转矩系数矩阵, 其中第  $i$  行、第  $j$  列的元素为  $B_{ij}(s)$ 。

由式(1)的第二个子式可得

$$\Delta \dot{\omega} = -M^{-1} K_1 \Delta \delta - M^{-1} D \Delta \omega - M^{-1} K_2 \Delta E'_q \quad (6)$$

对式(6)作 Laplace 变换, 并结合式(2)可得

$$s \Delta \omega = -M^{-1} (\Delta T_e + D \Delta \omega) \quad (7)$$

由于转子回路产生的电磁阻尼转矩远大于系统机械阻尼, 故可假设  $D = 0$ 。由此式(7)可转化为

$$\Delta T_e = -s M \Delta \omega = -\frac{s^2 M}{\omega_0} \Delta \delta \quad (8)$$

当发电机为同步发电机时, 其转速等于发电机转速, 即  $\omega_0 = 1$  (标么值), 联立式(5)和式(8)可得

$$s^2 M \Delta \delta = B(s) \Delta \delta \quad (9)$$

不失一般性地, 可假设 1 号发电机的功角变化量  $\Delta \delta_1$  为未知量, 则式(9)可改写为

$$\begin{bmatrix} B_{22}(s) - M_2 s^2 & B_{23}(s) & \cdots & B_{2n}(s) \\ B_{32}(s) & B_{33}(s) - M_2 s^2 & \cdots & B_{3n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n2}(s) & B_{n3}(s) & \cdots & B_{nn}(s) - M_2 s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{21}(s) \\ B_{31}(s) \\ \vdots \\ B_{n1}(s) \end{bmatrix} \Delta \delta_1 \quad (10)$$

用  $B_e(s)$  来表示式(10)左侧的  $(n-1) \times (n-1)$  阶

矩阵, 化简可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = -B_e(s)^{-1} \begin{bmatrix} B_{21}(s) \\ B_{31}(s) \\ \vdots \\ B_{n1}(s) \end{bmatrix} \Delta \delta_1 = Z(s) \Delta \delta_1 \quad (11)$$

式(11)表明,  $\Delta \delta_k (k = 2, 3, \dots, n)$  可以用 1 号电机的功角变化量  $\Delta \delta_1$  来表示。

结合式(5)和式(11), 可得

$$\Delta T_e = B(s) \Delta \delta = B(s) \begin{bmatrix} 1 \\ Z(s) \end{bmatrix} \Delta \delta_1 = K_c(s) \Delta \delta_1 \quad (12)$$

由式(12)可推得  $\Delta \delta_1$  为未知量时的通式为

$$\Delta T_e = K_c(s) \Delta \delta_1 \quad (13)$$

式中,  $K_c(s) = [z_1, z_2, \dots, 1, \dots, z_{n-1}]$ , 其中 1 是第  $i$  个元素。

假设某一振荡模态  $r$  所对应的系统特征根为  $s_r = \sigma_r \pm j\omega_r$ , 其中  $\sigma_r$  反映了振荡衰减的速度,  $\omega_r$  为自然振荡频率。结合式(13)与式(1)并将特征根  $s_r$  代入, 将转矩分为同步转矩分量与异步转矩分量, 将第  $i$  台发电机在振荡模态  $r$  下的同步转矩系数  $k_{ei}(s_r)$  正交分解, 并将异步转矩系数方向分量的功角变化量根据式(1)用转速变化量表示, 得到

$$\begin{aligned} \Delta T_{ei}(s_r) &= k_{ei}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) = \\ &= k_{si}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) + k_{ji}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) = \\ &= k_{si}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) + \frac{k_{ji}(s_r) \omega_0}{s} \Delta \omega_i(s_r) = \\ &= k_{si}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) + k_{di}(s_r) \Delta \omega_i(s_r) \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $k_{si}(s_r)$  表示第  $i$  台发电机在振荡模态  $r$  下的同步转矩系数;  $k_{di}(s_r)$  表示第  $i$  台发电机在振荡模态  $r$  下的异步转矩系数, 即阻尼转矩系数。式(14)表明, 第  $i$  台发电机在模态  $r$  下的电磁转矩变化量  $\Delta T_{ei}(s_r)$  由同步转矩分量和异步转矩分量共同构成。同步转矩分量与发电机功角变化量成比例, 异步转矩分量与发电机转速变化量成比例。

由式(14)可得到  $\Delta T_{ei}(s_r)$ 、 $\Delta \delta_i(s_r)$ 、 $\Delta \omega_i(s_r)$  之间的相位关系, 如图 3 所示。

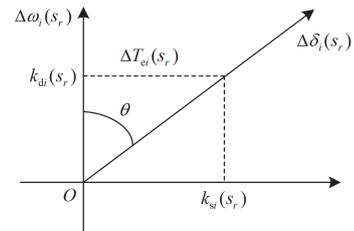
图3  $\Delta T_{ei}(s_r)$ 、 $\Delta \delta_i(s_r)$ 、 $\Delta \omega_i(s_r)$  之间的相位关系图Fig. 3 Phase among  $\Delta T_{ei}(s_r)$ ,  $\Delta \delta_i(s_r)$ , and  $\Delta \omega_i(s_r)$

图 3 中  $\theta$  表示  $\Delta T_{ei}(s_r)$  与  $\Delta \omega_i(s_r)$  的相位差。如果  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ ，那么阻尼转矩系数  $k_{di}(s_r) > 0$ ；否则， $k_{di}(s_r) < 0$ 。当第  $i$  台发电机的阻尼转矩系数为负数时，则可认为第  $i$  台发电机在振荡模式  $r$  下提供的是负阻尼转矩，即第  $i$  台发电机为振荡模式  $r$  的故障发电机。

根据小扰动定理， $\Delta \delta_i$  和  $\Delta \omega_i$  可以表示为

$$\begin{cases} \Delta \delta_i = \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i(s_r) \\ \Delta \omega_i = \sum_{i=1}^n \Delta \omega_i(s_r) \end{cases} \quad (15)$$

联立式(14)和式(15)，可得

$$\Delta T_{ei}(s_r) = \sum_{r=1}^n k_{si}(s_r) \Delta \delta_i(s_r) + \sum_{r=1}^n k_{di}(s_r) \Delta \omega_i(s_r) \quad (16)$$

式(16)表明，多机系统中某台发电机的同步转矩系数和异步转矩系数是由不同振荡模式下的同步转矩系数和异步转矩系数叠加而成的。因此，可以对各振荡模式逐个进行能量分析，从而确定哪些电机是故障源。

### 3 基于阻尼转矩的振荡能量和定位步骤

假设 WAMS 采集到的振荡数据长度为  $l$ ，由 DDMI 方法可辨识得到振荡信号中包含的各振荡模式信号。其中，第  $i$  台发电机在振荡模式  $r$  下的电磁转矩变化量和发电机转速变化量可用向量表示，如式(17)所示。

$$\begin{cases} \Delta T_{ei}(s_r) = [\Delta T_{ei}(s_r)_1, \Delta T_{ei}(s_r)_2, \dots, \Delta T_{ei}(s_r)_l] \\ \Delta \omega_i(s_r) = [\Delta \omega_i(s_r)_1, \Delta \omega_i(s_r)_2, \dots, \Delta \omega_i(s_r)_l] \end{cases} \quad (17)$$

式中， $\Delta T_{ei}(s_r)_j$ 、 $\Delta \omega_i(s_r)_j$  分别表示第  $j$  时刻对应的电磁转矩变化量和发电机转速变化量。

$\Delta T_{ei}(s_r)$  与  $\Delta \omega_i(s_r)$  间的相位关系可用点积表示，如式(18)所示。

$$F = \Delta T_{ei}(s_r) \cdot \Delta \omega_i(s_r) = \Delta T_{ei}(s_r) (\Delta \omega_i(s_r))^T \quad (18)$$

当  $F < 0$  时，表明  $\Delta T_{ei}(s_r)$  与  $\Delta \omega_i(s_r)$  之间夹角  $90^\circ < \theta < 270^\circ$ ，则第  $i$  台发电机在该模式下向系统提供负阻尼，可认为该发电机是故障源。

根据式(18)，可定义第  $i$  台发电机在振荡模式  $r$  下的振荡能量  $W_{ir}$  为

$$\begin{aligned} W_{ir} &= \int_{j=1}^{j=l} \Delta P_{ei}(s_r)_j d\Delta \omega_i(s_r)_j = \\ &\int_{j=1}^{j=l} \omega_{ij}(s_r)_j \Delta T_{ei}(s_r)_j d\Delta \omega_i(s_r)_j \approx \\ &\sum_{j=1}^{j=l} \omega_{ij}(s_r)_j \Delta T_{ei}(s_r)_j \Delta \omega_i(s_r)_j \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可知，振荡能量  $W_{ir}$  在数值上等于  $\omega_{ij}(s_r)$ 、 $\Delta T_{ei}(s_r)$  与  $\Delta \omega_i(s_r)$  的点积，其中  $\omega_{ij}(s_r)$  恒

为正值，不影响  $W_{ir}$  正负。因此，可以通过计算振荡能量的正负来确定  $\Delta T_{ei}(s_r)$  与  $\Delta \omega_i(s_r)$  之间的相位关系，从而实现负阻尼振荡故障源的定位。当  $W_{ir}$  随着时间减少时，则表明第  $i$  台发电机提供的是负阻尼，即第  $i$  台发电机为故障源。

基于振荡能量的故障源定位步骤如下。

1) 通过 WAMS 采集各个发电机的电磁功率变化量和转速变化量。

2) 采用 DDMI 方法对各个发电机的电磁功率变化量和转速变化量进行模式参数辨识，得到  $k$  个振荡模式的具体参数，从而筛选出主导振荡模式。

3) 根据步骤 2) 辨识得到的主导振荡模式参数，复现电磁功率变化量和转速变化量的主导振荡模式信号。

4) 选择合适的时间窗，计算主导振荡模式  $r$  下的各发电机的振荡能量，根据振荡能量的曲线来确定主导振荡模式  $r$  下是否存在故障发电机。若存在，则成功定位故障源；否则，令  $r = r + 1$ ，计算主导振荡模式  $r + 1$  下的各发电机的振荡能量，直到找到故障源。

### 4 算例分析

以图 4 所示的新英格兰 10 机 39 节点系统为例，在多个发电机故障情况下验证本文所提模式辨识方法与负阻尼振荡源定位方法的有效性。系统中的所有发电机均装设调速系统、励磁系统和 PSS，且在节点 16 加入了风力发电机。

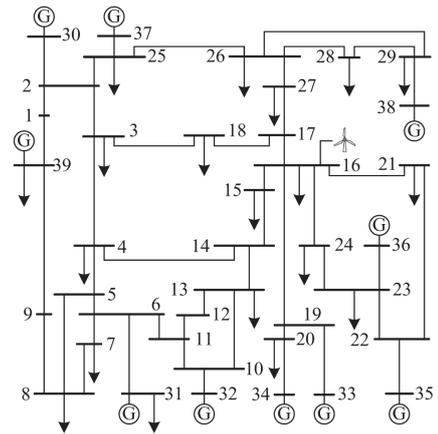


图 4 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 4 New England IEEE 10-machine 39-bus system

#### 4.1 降维与聚类结果分析

针对降维聚类，以样本总量为 100 的振荡数据为例进行测试。由于缺少可直接衡量降维效果的指标，通过降维后的聚类评价衡量降维效果。采用的

聚类评价指标包括紧密性指标(compactness, CP)、戴维森堡丁指标(davies-bouldin index, DBI)和聚类正确率。CP 指标表示类内紧密性程度。DBI 指标表示类间离散程度。CP 与 DBI 指标值越小, 说明聚类效果越好。

图 5(a)为单纯  $k$ -shape 算法聚类结果。采用 IPAA 与  $k$ -Shape 相结合的算法(IPAA- $k$ -Shape)对振荡数据进行聚类, 其聚类结果如图 5(b)所示。同时, 采用下采样(down sample, DS)和 PAA 方法作为对比方法, 其聚类结果如图 5(c)与图 5(d)所示。

同时根据聚类结果对应的原始振荡数据, 计算得到不同降维方法后聚类结果的聚类评价指标, 如表 1 所示。由表 1 可知, IPAA 方法能够在减少数据维度的同时保留原始振荡数据的曲线特征信息。DS- $k$ -Shape 效果略差于 IPAA- $k$ -Shape 方法, 而 PAA- $k$ -Shape 方法虽然降低了数据维度, 但是导致大量特征信息丢失, 综合各类指标, IPAA 方法是这 3 种降维方法中的最优选。

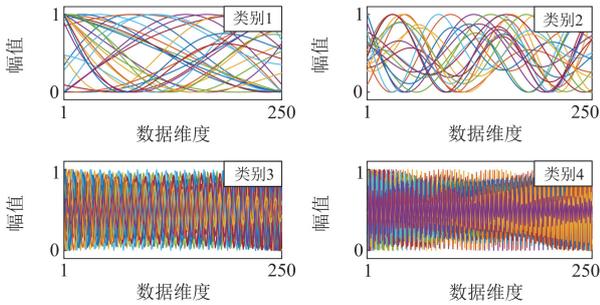
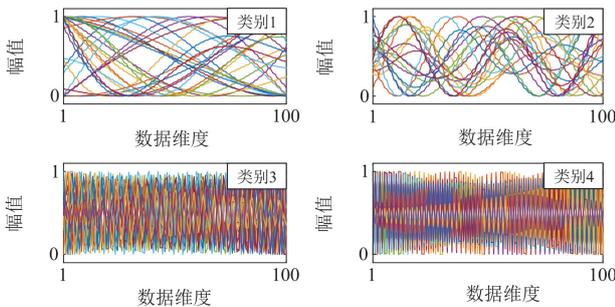
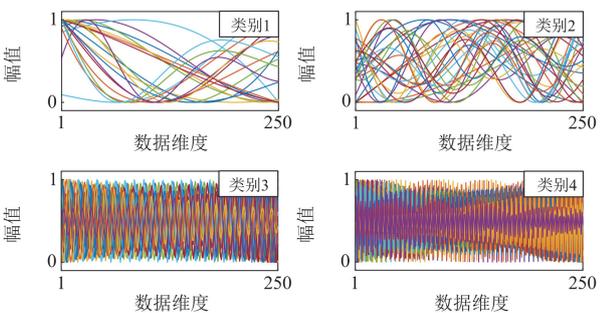
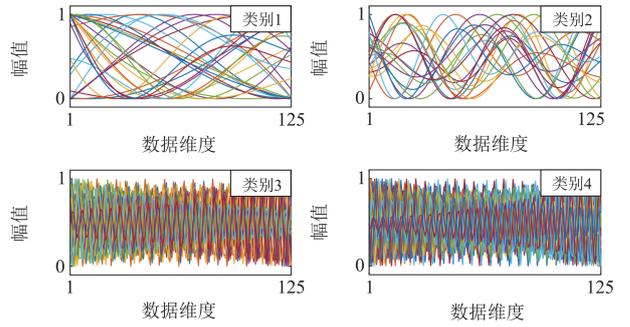
(a)  $k$ -Shape算法(b) IPAA- $k$ -Shape算法(c) PAA- $k$ -Shape算法(d) DS- $k$ -Shape算法图 5 不同降维方法与  $k$ -Shape 算法相结合的聚类结果Fig. 5 Clustering results of different dimensionality reduction methods combined with  $k$ -Shape algorithm

表 1 不同处理方法的聚类结果评价指标

Table 1 Evaluation index of clustering results of different treatment

方法	CP	DBI	正确率/%	数据维度
$k$ -Shape	0.2267	0.4432	100	250
<b>IPAA-<math>k</math>-Shape</b>	<b>0.2267</b>	<b>0.4432</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
PAA- $k$ -Shape	0.3590	1.3975	74	50
DS- $k$ -Shape	0.2446	0.5398	96	125

## 4.2 振荡模态辨识结果分析

将 5、8 号电机的 PSS 参数放大, 设置为故障电机并在该节点加入负荷阶跃变化, 以该运行工况下的 5 号电机的电磁功率变化量作为振荡模态辨识信号, 以此验证所提振荡模态辨识方法的有效性。通过该算例得到的 5 号电机的振荡信号如图 6 所示。

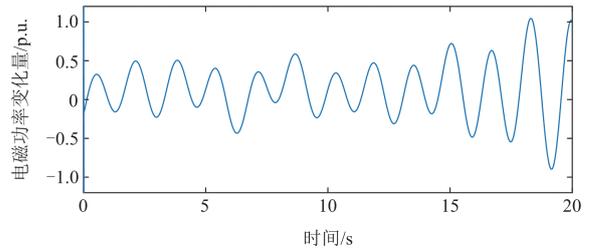


图 6 G5 电磁功率变化量

Fig. 6 Variation of G5 electromagnetic power

采用快速傅里叶变换分析法(fast Fourier transform, FFT)对 5 号电机的电磁功率变化量进行频谱分析, 得到如图 7 所示的振荡信号频谱图, 可从频谱图中得到振荡信号的振荡模态个数、幅值、频率等信息, 并可通过频谱图判断出主导模态信号, 为后续的振荡模态辨识结果的分析提供了参考。从图 7 中可以看出, 该振荡信号主要包含 1.3 Hz 左右的主导振荡模态、0.6 Hz 左右和 0.3 Hz 左右的次主导振荡模态, 所有振荡模态都属于低频振荡。

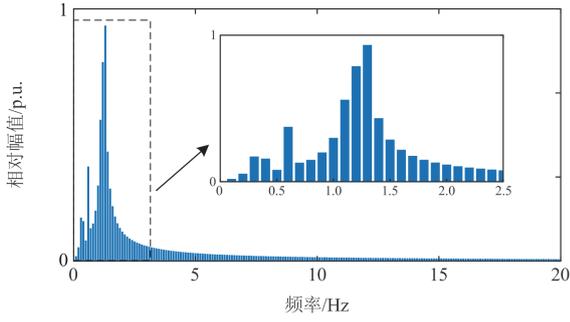


图 7 G5 电磁功率变化量单边频谱图

Fig. 7 Unilateral spectrogram of G5 electromagnetic power change

通过 DDMI 方法对 5 号电机的电磁功率变化量进行模态辨识, 可得到多种振荡模态, 取其中 4 种最主要的振荡模态进行辨识, 辨识结果如表 2 所示。与上述通过 FFT 方法得到的频谱对比可知, 所提 DDMI 方法对于主导模态辨识具有更高的准确度。

表 2 振荡信号多模态辨识结果

Table 2 Multi-modal identification results for oscillation signals

模态	幅值	阻尼系数	频率/Hz
1	$1.9 \times 10^{-6}$	-0.13	1.26
2	$6.2 \times 10^{-7}$	-0.14	0.63
3	$5 \times 10^{-7}$	-0.08	1.58
4	$3.3 \times 10^{-7}$	0.40	0.45

由表 2 可知, DDMI 方法辨识出的第一主导振荡模态频率为 1.26 Hz, 与 FFT 方法计算结果近似。此外, 所提的 DDMI 方法对于次主导振荡模态也具有很好的辨识效果, 以上结果说明所提 DDMI 方法在主导模态辨识方面具有极高的准确性。

由于 FFT 方法计算的振荡模态的各项参数并不是真实的准确参数, 故只能作为参考结果, 为了实现辨识结果准确度的精准评估, 可以通过辨识得到多振荡模态参数的辨识结果来复现振荡信号, 计算复现信号与实际信号之间的多类误差指标评估辨识结果的准确性。同时采用小波包-Prony 方法<sup>[21]</sup>和均值滤波-Prony<sup>[22]</sup>(mean filter-Prony, MF-Prony)方法进行振荡信号复现, 作为 DDMI 方法的对比项。取振荡信号的前 2 s, 全部复现信号与原始振荡信号如图 8 所示。从图 8 中可以看出, DDMI 方法复现效果最佳, 而 MF-Prony 方法复现效果最差, 这是因为 MF 方法需要较大的数据量计算初值, 在计算初值过程中会产生端点问题, 导致辨识精度下降。

为定量分析辨识与复现结果, 采用均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和对称平均绝对百分比误差 (symmetric mean absolute percentage error, SMAPE) 3 个

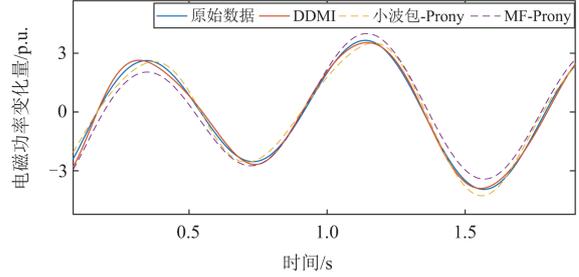


图 8 不同方法振荡信号复现对比图

Fig. 8 Oscillation signals reproducing comparison of different methods

指标评价, 分别表示为  $e_{RMSE}$ 、 $e_{MAE}$ 、 $e_{SMAPE}$ , 其计算分别如式(20)一式(22)所示。

$$e_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (20)$$

$$e_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (21)$$

$$e_{SMAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{(|\hat{y}_i| + |y_i|)/2} \quad (22)$$

式中,  $\hat{y}_i$ 、 $y_i$  分别为振荡信号复现值和真实值。

复现误差结果如表 3 所示。从表 3 中可知, 所提 DDMI 方法各项误差均小于其他方法, 表明 DDMI 方法在多模态辨识中更具优越性。

表 3 不同模态辨识方法的误差分析

Table 3 Error analysis of modal identification methods

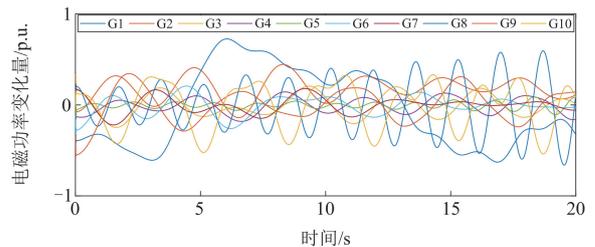
辨识方法	RMSE	MAE	SMAPE
DDMI	0.1564	0.1273	0.1590
小波包-Prony <sup>[21]</sup>	0.2486	0.1779	0.3214
MF-Prony <sup>[22]</sup>	0.4347	0.4033	0.5220

### 4.3 振荡源定位结果分析

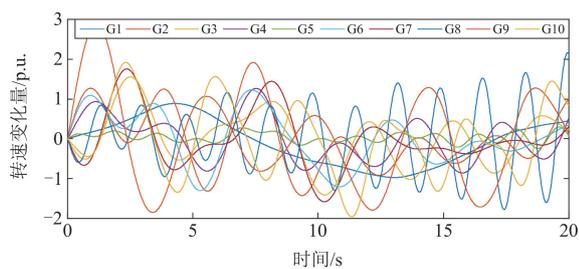
#### 4.3.1 双电机故障

在 5、8 号发电机故障情况下对本文定位方法进行测试。在仿真前调整系统中的 5、8 号发电机的电力系统稳定器的放大倍数, 并加入负荷的随机阶跃变化, 仿真得到各发电机  $\Delta P_{ei}$  和  $\Delta \omega_i$  如图 9 所示。

采用 DDMI 方法对采集到的各个发电机的  $\Delta P_{ei}$  和  $\Delta \omega_i$  进行模态辨识, 可以得到双发电机故障时电



(a) 电磁功率变化量



(b) 转速变化量

图9 G5和G8故障时的各发电机的电气量

Fig. 9 Electrical quantities of each generator in case of G5 and G8 faults

磁功率变化量  $\Delta P_{ci}$  和转速变化量  $\Delta \omega_i$  的第一主导振荡模态参数, 如表4所示。根据模态参数辨识结果, 设置时间窗为 10 s, 可通过定义的振荡能量函数得到各个发电机在主导振荡模态下的振荡能量曲线和近似振荡能量变化分别如图10和图11所示。

从图11可以看出, 5号发电机和8号发电机的振荡能量均随时间变化而减少, 其余发电机的振荡能量则随时间变化而增加。这表明系统中5号发电

表4 G5、G8故障时各发电机  $\Delta P_{ci}$  和  $\Delta \omega_i$  的

第一主导振荡模态参数

Table 4 First dominant oscillation modes parameters of  $\Delta P_{ci}$  and  $\Delta \omega_i$  for each generator during G5 and G8 faults

发电机	$\Delta P_{ci}$ 、 $\Delta \omega_i$	幅值/ p.u.	阻尼 系数	频率/Hz	相位/rad
G1	$\Delta P_{c1}$	6.3	-0.057	0.11	-0.4 $\pi$
	$\Delta \omega_1$	1.3	-0.059	0.11	0
G2	$\Delta P_{c2}$	2.4	-0.12	0.62	-0.47 $\pi$
	$\Delta \omega_2$	1.2	-0.13	0.62	0.01 $\pi$
G3	$\Delta P_{c3}$	1.6	-0.058	0.62	0.54 $\pi$
	$\Delta \omega_3$	9.1	-0.066	0.62	1.02 $\pi$
G4	$\Delta P_{c4}$	1.4	-0.047	0.6	-0.40 $\pi$
	$\Delta \omega_4$	6	-0.037	0.6	0.08 $\pi$
G5	$\Delta P_{c5}$	1.8	0.13	1.25	-0.44 $\pi$
	$\Delta \omega_5$	1.1	0.11	1.23	0.35 $\pi$
G6	$\Delta P_{c6}$	2.2	-0.22	0.64	-0.45 $\pi$
	$\Delta \omega_6$	8.4	-0.23	0.65	0.02 $\pi$
G7	$\Delta P_{c7}$	1.9	-0.2	0.65	0.52 $\pi$
	$\Delta \omega_7$	9.3	-0.24	0.65	$\pi$
G8	$\Delta P_{c8}$	2.2	0.06	1.18	0.46 $\pi$
	$\Delta \omega_8$	5.7	0.058	1.18	0.98 $\pi$
G9	$\Delta P_{c9}$	3.5	-0.13	0.45	-0.50 $\pi$
	$\Delta \omega_9$	2.4	-0.18	0.45	0.01 $\pi$
G10	$\Delta P_{c10}$	3.7	-0.058	0.58	0.50 $\pi$
	$\Delta \omega_{10}$	1.3	-0.051	0.58	0.96 $\pi$

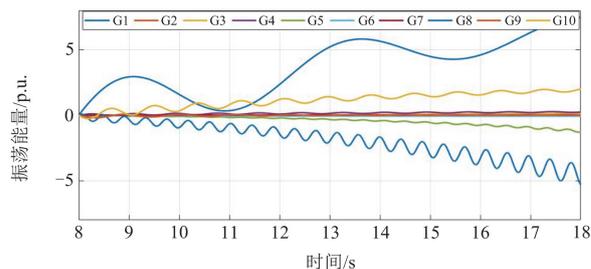


图10 G5和G8故障时的振荡能量曲线图

Fig. 10 Oscillation energy curves during G5 and G8 faults

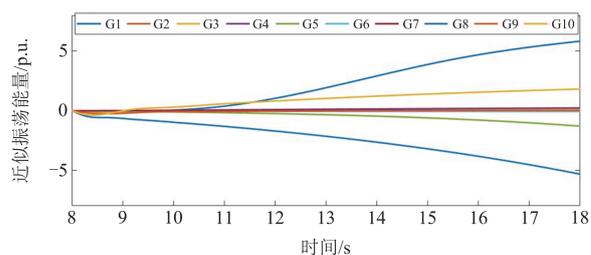


图11 G5和G8故障时的近似振荡能量变化

Fig. 11 Approximate oscillation energy change during G5 and G8 faults

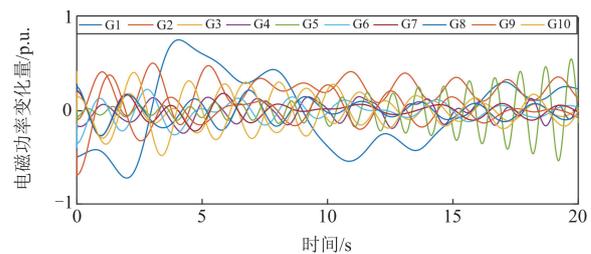
机和8号发电机均向系统提供了负阻尼。因此, 可判断5号发电机和8号发电机均存在故障情况, 为主导振荡模态下的故障源, 定位结果与故障假设条件一致。

#### 4.3.2 三电机故障

进一步增加故障复杂程度, 在2、5、9号发电机故障情况下对本文定位方法进行测试。仿真得到各个发电机的  $\Delta P_{ci}$  和  $\Delta \omega_i$  如图12所示。通过DDMI方法进行模态辨识, 可得到如表5所示的三电机故障时发电机  $\Delta P_{ci}$  和  $\Delta \omega_i$  的第一主导振荡模态参数。

根据模态参数辨识结果, 设置时间窗为 10 s, 可通过定义的振荡能量函数计算得到如图13所示的各个发电机在主导振荡模态下的振荡能量曲线。

从图13可以看出, 2、5、9号发电机的振荡能量均随时间变化而减少, 均向系统提供了负阻尼, 可判断2、5、9号发电机均存在故障情况。定位结果与故障条件一致。通过上述两个多机故障实验, 证明了基于DDMI的故障源定位方法在多发电机故



(a) 电磁功率变化量

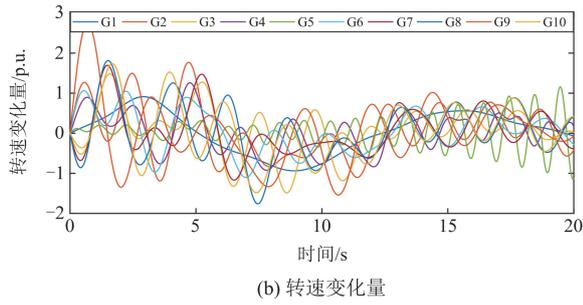


图 12 G2、G5 和 G9 故障时各个发电机的电气量  
Fig. 12 Electrical quantities of each generator  
G2, G5 and G9 faults

表 5 G2、G5 和 G9 故障时各发电机  $\Delta P_{ei}$  和  $\Delta \omega_i$  的第一主导振荡模态参数

Table 5 First dominant oscillation mode parameters of  $\Delta P_{ei}$  and  $\Delta \omega_i$  for each generator during G2, G5 and G9 faults

发电机	$\Delta P_{ei}$ , $\Delta \omega_i$	幅值/p.u.	阻尼系数	频率/Hz	相位/rad
G1	$\Delta P_{e1}$	8.3	-0.1	0.099	-0.42 $\pi$
	$\Delta \omega_1$	9.0	-0.07	0.096	0.03 $\pi$
G2	$\Delta P_{e2}$	2.2	0.049	0.62	0.46 $\pi$
	$\Delta \omega_2$	3.1	0.056	0.62	1.01 $\pi$
G3	$\Delta P_{e3}$	2.5	-0.096	0.61	0.54 $\pi$
	$\Delta \omega_3$	1.5	-0.18	0.61	1.02 $\pi$
G4	$\Delta P_{e4}$	1.1	-0.052	0.59	-0.39 $\pi$
	$\Delta \omega_4$	1.1	-0.046	0.59	0.1 $\pi$
G5	$\Delta P_{e5}$	3.2	0.097	1.23	-0.31 $\pi$
	$\Delta \omega_5$	8.2	0.097	1.23	0.21 $\pi$
G6	$\Delta P_{e6}$	3.0	-0.5	0.35	-0.43 $\pi$
	$\Delta \omega_6$	1.2	-0.5	0.35	-0.02 $\pi$
G7	$\Delta P_{e7}$	1.9	-0.22	0.66	0.53 $\pi$
	$\Delta \omega_7$	7.2	-0.24	0.65	0.98 $\pi$
G8	$\Delta P_{e8}$	3.1	-0.11	0.54	0.71 $\pi$
	$\Delta \omega_8$	1.3	-0.1	0.54	-0.85 $\pi$
G9	$\Delta P_{e9}$	1.8	0.12	0.48	-0.48 $\pi$
	$\Delta \omega_9$	1.0	0.08	0.48	-0.07 $\pi$
G10	$\Delta P_{e10}$	3.6	-0.1	0.53	0.52 $\pi$
	$\Delta \omega_{10}$	1.6	-0.14	0.53	-1.02 $\pi$

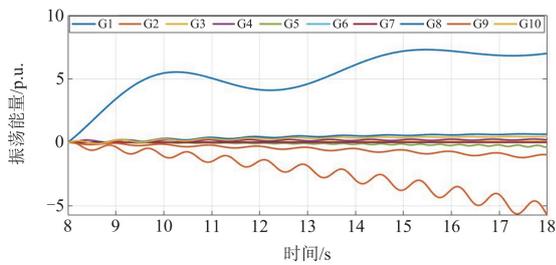


图 13 G2、G5 和 G9 故障时的振荡能量曲线

Fig. 13 Oscillation energy curve during G2, G5 and G9 faults

障情况下的可行性。结合前述的模态辨识环节误差，可以分析出前述环节的低误差对振荡能量计算具有一定干扰，但极难影响其变化趋势，说明该算法具有较强的鲁棒性。

### 5 结论

本文提出了一种基于振荡模态辨识的负阻尼振荡故障发电机定位方法。所提方法结合数据驱动技术和海量振荡数据，通过 IPAA 降维与随机森林方法辨识出主导振荡模态参数，实现宽频带振荡模态参数的准确辨识。然后，基于多机系统阻尼转矩分析定义了振荡能量，并分析该振荡能量变化与负阻尼振荡之间的关系。通过模态辨识结果进行主导模态信号的复现与振荡能量计算，最终实现了负阻尼振荡故障发电机的有效定位。利用 10 机 39 节点系统进行仿真，验证了所提方法的有效性，得到的结论如下。

1) 本文所提 DDMI 方法可实现多振荡模态参数的准确辨识，从中提取主导振荡模态并完成主导振荡模态信号的复现，避免非主导模态信号对振荡能量计算的影响。

2) 定义的多模态能量函数能够计算主导模态的振荡能量，通过振荡能量变化判断振荡源，避免对个别模态存在负阻尼的振荡现象的漏判误判。

3) 设计的故障定位方法在非单一故障源时仍可通过振荡能量曲线定位全部故障源，且结果直观。

### 参考文献

- [1] 张程, 邱炳林. 基于可调 Q 因子小波变换与稀疏时域法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 63-72.  
ZHANG Cheng, QIU Binglin. Modal identification of low-frequency power system oscillations based on adjustable Q-factor wavelet transform and sparse time-domain method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 63-72.
- [2] 徐衍会, 刘慧, 成蕴丹, 等. 基于 VMD 和主客观赋权的次同步振荡能量主导因素辨识[J]. 电力建设, 2024, 45(3):137-148.  
XU Yanhui, LIU Hui, CHENG Yundan, et al. Identification of dominant factors of sub-synchronous oscillation energy based on VMD and subjective and objective weighting[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 137-148.
- [3] PHILIP J G, YANG Y, JUNG J. Identification of power system oscillation modes using empirical wavelet transform and Yoshida-Bertecco algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 48927-48935.
- [4] JIANG T, BAI L, LI G, et al. Estimating inter-area dominant oscillation mode in bulk power grid using multi-channel continuous wavelet transform[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 394-405.
- [5] 王杨, 王超群, 晁苗苗, 等. 基于同步相量数据幅频特征的次超同步振荡模式辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 63-72.

- 2023, 51(19): 1-11.  
WANG Yang, WANG Chaoqun, CHAO Miaomiao, et al. Sub-and super-synchronous oscillation mode identification based on amplitude and frequency characteristics of synchronous phasor data[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 1-11.
- [6] BI J, SUN H, XU S, et al. Mode-based damping torque analysis in power system low-frequency oscillations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(4): 1337-1347.
- [7] 李莹, 富亚洲, 王官宏. 电力系统超低频频率振荡分析及扰动源定位[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1770-1780.  
LI Ying, FU Yazhou, WANG Guanhong. Ultra-low frequency oscillation analysis and location in power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1770-1780.
- [8] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 电力系统超低频频率振荡机理分析与抑制研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 553-568.  
XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo, et al. Survey and prospect of ultra-low frequency oscillation mechanism analysis and suppression in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 553-568.
- [9] YU Y, GRIJALVA S, THOMAS J J, et al. Oscillation energy analysis of inter-area low-frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1195-1203.
- [10] 姜涛, 刘博涵, 李雪, 等. 基于自适应投影多元经验模态分解的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3527-3538.  
JIANG Tao, LIU Bohan, LI Xue, et al. Forced oscillation location in power systems using adaptive projection intrinsically transformed multiple empirical mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3527-3538.
- [11] LI Y, SHEN C, LIU F. An energy-based methodology for locating the source of forced oscillations in power systems[C]// 2012 IEEE International Conference on Power System Technology, July 25-27, 2012, Beijing, China: 1-6.
- [12] 祝翰兴, 叶华, 高磊. 基于振荡能量消耗的发电机阻尼评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 41-50.  
ZHU Hanxing, YE Hua, GAO Lei. Generator damping evaluation method based on oscillation energy consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 41-50.
- [13] MASLENNIKOV S, LITVINOV E. ISO New England experience in locating the source of oscillations online[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 495-503.
- [14] 孙正龙, 王嘉琛, 潘超, 等. 基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6589-6601.  
SUN Zhenglong, WANG Jiachen, PAN Chao, et al. Low-frequency oscillation area location method based on branch mode oscillation energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6589-6601.
- [15] 高建瑞, 李国杰, 汪可友, 等. 电力系统超低频振荡的阻尼与同步转矩分析[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1001-1007.  
GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Damping torque and synchronous torque analysis of power system ultra-low frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1001-1007.
- [16] 王一珺, 杜文娟, 王海风. 基于改进复转矩系数法的多风电场接入引发多机电力系统次同步振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2383-2394.  
WANG Yijun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis of subsynchronous oscillation in multi-machine power system caused by the integration of multiple wind farms based on improved complex torque coefficient method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2383-2394.
- [17] YU R, JIANG H, LI H, et al. Identification method of negative and weak damping generator sets based on TLSESPRIT and damping torque analysis[C]// 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering, December 15-17, 2021, Chengdu, China: 1-6.
- [18] KHODAPARAST J, FOSSO O B, MOLINAS M. Phasor estimation by EMD-assisted Prony[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4736-4748.
- [19] 司江宽, 吐松江·卡日, 范想, 等. 基于 SO-PAA-GAF 和 AdaBoost 集成学习的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 152-160.  
SI Jiangkuan, TUSONGJIANG Kari, FAN Xiang, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on SO-PAA-GAF and AdaBoost ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 152-160.
- [20] 魏勇, 李学军, 李万伟, 等. 基于空间密度聚类和 K-shape 算法的城市综合体负荷模式聚类方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 37-44.  
WEI Yong, LI Xuejun, LI Wanwei, et al. Load pattern clustering method of an urban complex based on DBSCAN and K-shape algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 37-44.
- [21] SHALTOU A A, ABU AL-FEILAT K A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 280-286.
- [22] 张煜林, 陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 115-121.  
ZHANG Yulin, CHEN Hongwei. Parameter identification of harmonics and inter-harmonics based on CEEMD-WPT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 115-121.

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-08-17

作者简介:

刘芳(1982—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定, 电网规划, 故障诊断, 新能源发电技术和智能电网等; E-mail: csuliufang@csu.edu.cn

刘乾易(1992—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究生导师, 研究方向为新型电力系统电能质量优化与控制。E-mail: liu7y@foxmail.com

(编辑 魏小丽)