

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181067

# 计及随机时滞与丢包的电力系统广域信号预测补偿方法

陈中<sup>1,2</sup>, 唐浩然<sup>1,2</sup>, 邢强<sup>1,2</sup>, 周涛<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对广域信号在通信系统的传输过程中具有时滞与丢包以及在实际场景下对量测信号采样过程中信号具有噪声等问题, 建立了一种基于灰色 Verhulst 的预测补偿模型。将该模型与完整集成经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)算法相结合, 提出了一种电力系统广域信号的预测补偿方法。该方法首先通过 CEEMDAN 对广域信号进行降噪, 然后采用灰色 Verhulst 预测方法对多个广域信号分别进行预测, 得出统一时标的控制器输入信号。最后在 OPNET-Matlab 仿真平台中搭建了计及通信系统影响的两区四机系统, 并在 3 种不同的通信场景下对所提算法进行验证。测试结果表明该方法具有一定的抗噪性能并可实现对具有时滞与丢包的广域信号预测补偿, 为广域阻尼控制器的有效应用提供了一种新途径。

**关键词:** 广域电力系统稳定器; 预测补偿; 时滞与丢包; 灰色预测; 完整集成经验模态分解

## A prediction compensation method considering stochastic time delay and data loss of power system wide-area signals

CHEN Zhong<sup>1,2</sup>, TANG Haoran<sup>1,2</sup>, XING Qiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Tao<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to deal with the problems occurring in the transmission process of wide-area signals in communication system such as timedelay, dataloss and the signals noise of sampling process, this paper establishes a prediction compensation model based on grey Verhulst. Combined with the Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMDAN) algorithm, a wide-area signal prediction compensation method is proposed. The method firstly conducts denoising to the input signals by CEEMDAN method and derives the input signals of the unified time label controller based on the forecasting of multiple wide-area signals by grey Verhulst prediction method. Finally, the four-machine two-area (2A4M) Kundur system considering impacts of communication system is simulated on the OPNET-Matlab simulation platform to validate the feasibility of the proposed method with three different communication cases. The test results reveal that the proposed prediction method is noise-tolerant and can conduct forecasting and compensation for wide-area signals containing timedelay and dataloss which provides a novel method for applications of wide-area damping controller.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900602), National Natural Science Foundation of China (No. 51277029), and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/17-JS-199).

**Key words:** WPSS; prediction; time delay and data loss; grey prediction; CEEMDAN

## 0 引言

随着电力网络与信息网络的不断耦合, 广域测

量系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)的逐步建设为实现电力系统广域闭环控制构建了良好的基础<sup>[1]</sup>, WAMS 通过分布在各地的同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)可获得带有时标的互联电网动态信息, 并可将广域信号用于广域电力系统稳定器(Wide-Area Power System Stabilizer, WPSS)之中, 从而可有效抑制区域间低频振荡, 提高整个互联电网的安全运行能力<sup>[2-3]</sup>。但是由于各

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900602); 国家自然科学基金资助项目资助(51277029); 国家电网公司总部科技项目资助(SGTYHT/17-JS-199); 江苏省智能电网技术与装备重点实验室课题项目资助

PMU 装置在电网中的地理位置跨度较大,特别是当 PMU 距离 WAMS 系统中的相量数据集中器(Phasor Data Concentrator, PDC)较远时,量测信号在通信系统中的传输时滞甚至数据包丢失的问题难以忽略<sup>[4-5]</sup>。因此研究如何在利用广域信号的同时,有效降低量测信号时滞与丢包带来的负面影响,是当前广域闭环控制系统研究中的热点之一。

目前,针对广域控制系统时滞的补偿已有较多研究,通常有以下两种途径:(1)通过对 WPSS 的相位超前环节以及增益环节的参数进行设计,从而降低时滞的影响。最常见的方法是通过 Smith 预测或者 Pade 近似法,将问题转化为时滞系统振荡模态的求解<sup>[6-7]</sup>,以及基于 Lyapunov-Krasovskii<sup>[8]</sup>和非线性控制<sup>[9]</sup>等理论对广域阻尼控制器参数进行设计,从而提高时滞电力系统的稳定性,或者采用分段补偿的方法通过切换控制器的参数从而校正不同时滞情况下输入信号的相位误差<sup>[10]</sup>。(2)从广域信号传输的角度出发,对具有时滞的量测信号进行预测补偿从而减弱了通信系统时滞对 WPSS 造成的不良影响。文献[11]表明了通过自回归模型(Autoregressive Model, AR)预测补偿算法能够有效减小对控制性能的影响。文献[12]采用 5 个角速度历史数据建立了基于 GM(1,1)灰色预测模型(Gray Forecast Model, GM),在 300 ms 的时滞范围内实现了 WPSS 控制效果接近于无时滞的理想情况。文献[13]对浙江 PMU 实测信号分析后表明,实际工程运用中 PMU 信号除了具有时滞特性外还往往含有明显的噪声分量,文中将低通滤波器同 Prony 算法相结合,从而实现了对含有噪声的相对角速度信号预测补偿。但以上方法均未考虑通信系统丢包的现象,但由文献[14]可知 WPSS 输入信号的丢包特性也会对控制器抑制区域间低频振荡的效果产生重要影响。文献[15-16]分别采用  $H_\infty$ 控制与滑膜控制的方法设计了考虑随机时滞和数据包丢失的广域阻尼控制器,但目前对于综合考虑时滞与丢包的预测补偿算法研究较少。

考虑到 WPSS 的输入信号通常是具有振荡的非单调特性,并且进一步考虑到实际场景下的输入信号中往往含有一定量的噪声干扰,而噪声往往会使得预测结果出现较大的偏差。因此本文将灰色 Verhulst 算法引入到电力系统广域信号的预测补偿之中,并将该算法同 CEEMDAN 相结合,从而降低了噪声分量对预测精度的影响。

本文首先针对广域信号在通信系统中的随机时滞与丢包建立了一种预测补偿模型,并基于该模型提出了相应的预测补偿算法。该算法首先通过 CEEMDAN 对输入信号进行降噪处理,然后采用灰

色 Verhulst 预测方法对输入 WPSS 的多个广域信号分别进行预测,得出统一时空坐标下的输入信号,从而降低了输入信号的时滞、丢包以及噪声对控制器的影响。并在 OPNET-Matlab 仿真平台中搭建了计及通信影响的两区四机系统,针对 3 种不同的通信场景对算法进行测试,结果表明该方法具有一定的抗噪性能并可实现对具有时滞与丢包的电力系统广域信号预测补偿,为 WPSS 的有效应用提供了一种新途径。

## 1 时滞与丢包统一预测模型

### 1.1 非等间隔灰色 Verhulst 模型

由于灰色 Verhulst 算法在具有灰色 GM(1,1)算法实时性好以及不依赖系统模型等优点的同时,对于非单调的摆动发展序列具有更好的适用性<sup>[17]</sup>,因此本文利用灰色 Verhulst 算法建立广域信号的预测补偿模型。

以某一发电机的角速度量测信号为例,PDC 收到 PMU 发送的数据后,将这些数据按照时标的先后顺序存放在队列之中。假设已收到的  $n$  个历史采样信号为

$$\omega^{(0)}(t_i) = \{\omega^{(0)}(t_1), \omega^{(0)}(t_2), \dots, \omega^{(0)}(t_n)\} \quad (1)$$

其中,信号的采样间隔为

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (2)$$

式中,  $t_i$  为量测信号的时标信息。

当在通信系统为固定时滞的场景下,此时历史数据为固定间隔的时滞信号,间隔为 PMU 的采样周期;但是当在通信系统为随机时滞的场景下,历史数据可能存在“先发后至,后发先至”的数据包粘包现象<sup>[18]</sup>以及当量测信号在传输过程中发生丢包时,会导致历史数据为一组非等间隔的时滞信号,此时的数据的间隔取决于通信系统的时滞与丢包情况。

因此在考虑随机时滞与丢包的电力系统广域信号预测补偿中需建立非等间隔的模型,灰色 Verhulst 预测模型建立的方法如下所述<sup>[19]</sup>。

对式(1)的历史采样值进行一阶累加(1-AGO)后可获得的新数据为

$$\omega^{(1)}(t_i) = \sum_{k=1}^i \omega^{(0)}(t_k) \Delta t_k, \quad i = 1 \sim n \quad (3)$$

得到

$$\omega^{(1)}(t_i) = \{\omega^{(1)}(t_1), \omega^{(1)}(t_2), \dots, \omega^{(1)}(t_n)\} \quad (4)$$

对累加生成的新数据建立白化微分方程,如式(5)所示。

$$\frac{d\omega^{(1)}(t_i)}{dt} + a\omega^{(1)}(t_i) = u(\omega^{(1)}(t_i))^2 \quad (5)$$

式中:  $a$ 、 $u$  为参数;  $t$  为时间。

取  $\hat{\omega}^{(1)}(t_i) = \omega_1^{(1)}(t_i) = \omega_1^{(0)}(t_i)$ , 则响应函数为

$$\hat{\omega}^{(1)}(t_i) = \frac{a\omega_1^{(0)}}{u\omega_1^{(0)} + (a - u\omega_1^{(0)})e^{a(t_i - t_1)}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

对式(6)做累减还原, 从而可得原始采样信号的拟合值, 即

$$\hat{\omega}^{(0)}(t_{i+1}) = [\hat{\omega}^{(1)}(t_{i+1}) - \hat{\omega}^{(1)}(t_i)] \frac{1}{\Delta t_{i+1}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

上述模型中参数  $a$  和  $u$  的最小二乘估计为

$$\mathbf{A} = [a, u] = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^1(t_2) & (z^1(t_2))^2 \\ -z^1(t_3) & (z^1(t_3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^1(t_n) & (z^1(t_n))^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \omega^{(0)}(t_2) \\ \omega^{(0)}(t_3) \\ \vdots \\ \omega^{(0)}(t_n) \end{bmatrix}$$

$z^{(1)}(t_{i+1})$  为  $\omega^{(1)}(t_i)$  在区间  $[t_i, t_{i+1}]$  的背景值。在建立非等间隔预测模型时, 需要确定非等间隔模型下的背景值, 考虑到  $\omega^{(1)}(t)$  为摆动的类指数曲线形式, 故可近似表示为  $\omega^{(1)}(t) = ce^{bt}$ , 并假定该曲线通过两点  $(t_i, \omega^{(1)}(t_i))$  和  $(t_{i+1}, \omega^{(1)}(t_{i+1}))$ , 从而有:

$$\omega^{(1)}(t_i) = ce^{bt_i}, \quad \omega^{(1)}(t_{i+1}) = ce^{bt_{i+1}} \quad (9)$$

通过式(10)可计算出背景值  $z^{(1)}(t_{i+1})$ :

$$z^{(1)}(t_{i+1}) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \omega^{(1)}(t) dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} ce^{bt} dt = \frac{c}{b} (e^{bt_{i+1}} - e^{bt_i}) \quad (10)$$

$$z^{(1)}(t_{i+1}) = \frac{\omega^{(1)}(t_{i+1}) - \omega^{(1)}(t_i)}{\ln(\omega^{(1)}(t_{i+1})) - \ln(\omega^{(1)}(t_i))} \Delta t_{i+1} \quad (11)$$

通过联立式(9)与式(10), 消去待定参数  $b$  和  $c$  后可得到式(11), 由此计算出了非等间隔灰色 Verhulst 预测的背景值, 并且该背景值对等间隔的灰色预测模型同样适用, 即该预测补偿模型对固定时滞同样适用。

由于历史数据窗长度的选择直接影响着预测的精度, 因此本文采用一种自适应的动态历史数据窗选择方法。考虑到计算的快速性与预测的准确性, 本文取历史数据窗  $K$  的长度为 5~20 个数据点。在对广域信号进行预测时, 由目前已有数据的预测误差决定  $K$  的大小, 定义预测误差为

$$E_{f(i)} = \frac{\|\hat{\omega}(t_i) - \omega(t_i)\|}{\|\omega(t_i)\|} \times 100\% \quad (12)$$

式中:  $\hat{\omega}(t_i)$  和  $\omega(t_i)$  分别表示灰色 Verhulst 预测计算得到的数据值与该时刻实际的采样值。

在新的采样信号到达 PDC 后即可计算出该采样值在当前历史数据窗下的  $E_{f(i)}$ , 并采用试探法对下一个预测时刻的  $K$  值进行更新, 即通过计算  $K$  增加或减小后的  $E_{f(i)}$  变化的幅度和方向, 从而确定出  $K$  的增减方向或是  $K$  应保持不变, 为了兼顾计算量与预测精度, 本文认为若当  $E_{f(i)}$  变化幅度的小于 5% 时, 则  $K$  值可不再变化。

考虑到若当前通信系统时滞较大以及丢包率较高的情况下, 预测模型需要对多个数据进行连续的预测, 但是此时由于历史信号中反映当前现状的真实信息缺失, 通常会造成预测误差越来越大。因此本文通过等维新息递补的数据处理方式来提高模型的预测精度, 即在多个数据连续预测时, 将数据窗逐个向前滑动, 这样就保证了数据窗长度不改变的情况下始终含有最新的数据信息。但同时考虑到即使采用了等维新息递补的方法, 预测算法的有效预测长度仍然是有限的, 本文限制最大预测长度为 30 个数据, 若超过此预测长度即可认为是通信系统出现故障, 此时应停止广域信号预测同时退出 WPSS 的运行, 避免控制器提供负阻尼。

## 1.2 考虑随机时滞与丢包的广域信号预测补偿模型

本文以发电机的相对角速度信号构成 WPSS 的广域输入信号, 并对其进行预测补偿。考虑随机时滞与丢包的广域信号预测补偿模型如图 1 所示。

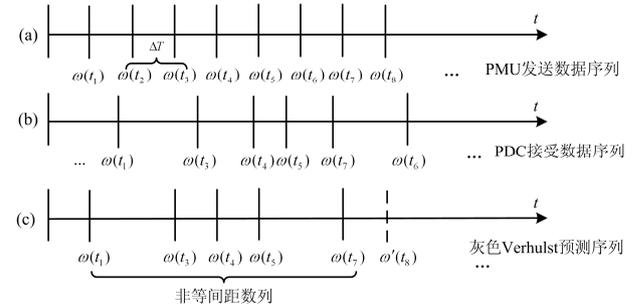


图 1 基于灰色 Verhulst 的信号时滞与丢包预测模型

Fig. 1 Prediction model of signal time delay and data loss based on Gray Verhulst

如图 1(a)所示, 此时 PMU 以固定的采样周期  $\Delta T$  向 WPSS 发送带有时标的角速度量测信号  $\omega(t_i)$ 。由于受到通信系统随机时滞与丢包的影响, 假设 PDC 实际收到的数据序列如图 1(b)所示, 由图 1(b)可知数据传输过程中数据包  $\omega(t_2)$  丢失, 并且信号  $\omega(t_7)$  的到达早于  $\omega(t_6)$ , 即发生了粘包的现象。此时历史数据窗中包含有 5 个历史数据, 则灰色 Verhulst 预测序列如图 1(c)所示, 由  $\omega(t_1)$ 、 $\omega(t_3)$ 、 $\omega(t_4)$ 、 $\omega(t_5)$ 、 $\omega(t_7)$  构成了用于预测信号  $\omega(t_8)$  的非

等间隔历史数据列，并且随着新数据的输入，预测补偿算法将不断向前推进直到 WPSS 退出运行。

由图 1 可构成考虑通信系统随机时滞与丢包的预测补偿模型。由于随机时滞的影响，在数据包粘包的情况下，先发却后至的数据到达时将会对预测模型中的历史数据列进行更新；而发生丢包后，由于该时刻的真实数据缺失，将无法更新历史数据列。由于采用非等间隔的预测算法，故可将随机时滞与丢包建立在同一个预测模型之中。

### 2 考虑信号噪声以及时滞与丢包的预测补偿模型

已有实测表明，PMU 的量测信号中往往含有一定量的噪声干扰，这就使得若直接采用某种预测补偿算法将难以较好地实现量测信号预测补偿。故本文采用 CEEMDAN 算法对历史信号进行分解，随后重构出不含噪声分量的真实量测信号，然后再利用上文构建的预测补偿模型对时滞与丢包信号进行预测补偿。

CEEMDAN 可依据信号自身特点将含噪声的原始信号分解为一系列固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量，能够有效适用于非线性非平稳信号的处理。并且 CEEMDAN 同经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和集成经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)相比，避免了 EMD 直接分解造成的模态混叠现象和 EEMD 分解效率低的问题<sup>[20]</sup>。因此该方法可适用于含有噪声以及时滞与丢包的量测信号序列处理。

本文通过能量门限法获得不含噪声的真实量测信号，计算方法如式(13)和式(14)所示， $M_i$  为信号分量的能量等级， $e_i$  为对  $M_i$  进行归一化处理后的值。对  $e_i$  设置门限阈值，若大于阈值可确定为真实的量测信号分量，而小于阈值则认为是噪声分量， $e_i$  通常取为 0.1<sup>[21]</sup>。

设：

$$M_i = \sum_{t=1}^k IMF_i(t)^2 \quad (13)$$

进行归一化后可得：

$$e_i = \frac{M_i}{\max(M_i)} \quad (14)$$

因此，综合考虑到实际量测信号中的噪声以及通信系统的随机时滞与丢包，本文提出了一种基于灰色 Verhulst 预测与 CEEMDAN 相结合的广域信号

预测补偿方法。具体的算法流程可用图 2 来表示。具体实现步骤如下：

- (1) 利用 CEEMDAN 对历史量测信号进行分解，得到各 IMF 分量。
- (2) 分别对各 IMF 分量进行能量门限筛选滤除信号中的噪声分量，重构出真实的输入信号。
- (3) 采用本文提出的预测模型对重构后的具有随机时滞与丢包的广域信号进行预测补偿，并将预测补偿值下发至 WPSS。
- (4) 若有新的量测信号输入则对历史数据列进行更新；若无新数据输入且尚未超过最大预测长度，则通过等维新息递补的方法对数据进行预测补偿，若超过最大预测长度则算法停止，WPSS 退出运行。

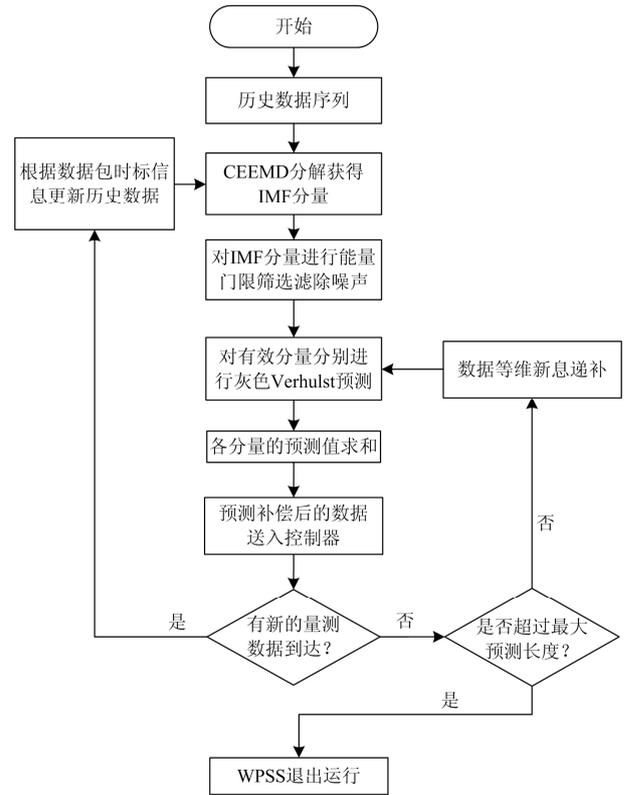


图 2 基于 CEEMDAN 和灰色 Verhulst 的预测流程图

Fig. 2 Flow chart of prediction method based on CEEMDAN and Gray Verhulst

### 3 算例及验证

#### 3.1 OPNET-Matlab 仿真平台中搭建的两区四机系统模型

本文基于 OPNET-Matlab 联合仿真平台，搭建了计及通信系统影响的两区四机系统。其简化模型如图 3 所示，其中两区四机系统具体参数详见文献[22]。

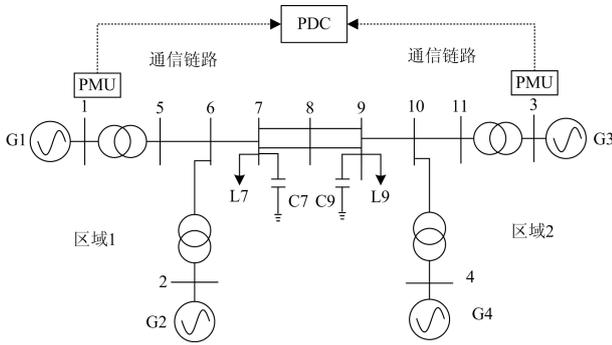


图3 考虑通信系统的两区四机系统

Fig. 3 Four-machine two-area power system with communication system

本文将 PDC 装设在 G1 处与电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS) 构成 WPSS, 其中控制器的传递函数与文献[11]相同, 具体参数如式(15)所示。

$$G_{WPSS(s)} = 26 \times \frac{10s}{1+10} \times \left( \frac{1+0.324s}{1+0.212s} \right)^2 \quad (15)$$

对两区四机系统的线性化分析后可知, 为抑制该系统的区域间低频振荡, 可选择具有较好可观性的由发电机 G1 与 G3 构成的转速差信号  $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$  作为 WPSS 的输入信号。

联合仿真程序将商业级的高级网络通信仿真软件 OPNET 和用于电力系统的仿真软件 Matlab 相结合, 搭建了主从式的信息物理系统协同架构, 用于研究考虑时滞与丢包的广域闭环控制系统。该仿真平台以 Matlab 为核心, 实现联合仿真的时间同步、仿真推进管理以及数据的整合解析和交互管理。OPNET 端模型由通信节点、通信链路、外部接口模型组成。Matlab 软件和外部控制程序之间的数据交互利用 Socket 套接字方式实现。从而实现了 Matlab 与 OPNET 数据的双向传输和仿真进度的控制管理。每一个仿真步长通过 Matlab 向 OPNET 输入待传输的电力信息数据, OPNET 向 Matlab 输出经过通信网络传输后含有时滞信息的电力数据, 从而完成 1 个时刻的通信系统数据与电力系统数据的交互与传输<sup>[23]</sup>。

### 3.2 系统时域仿真验证

为了充分模拟通信系统时滞与丢包的随机特性, 本文考虑了 3 种不同的信号通信传输场景。场景 1 下, 考虑到 PDC 安装在 G1 处的位置因素,  $\Delta\omega_1$  信号的时滞与丢包忽略不计, 而  $\Delta\omega_3$  信号的随机通信时滞为  $0 \leq \tau \leq 150 \text{ ms}$ ; 忽略 PDC 的位置因素, 场景 2 下  $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_3$  信号的随机通信时滞均为  $0 \leq \tau \leq 150 \text{ ms}$ ; 场景 3 下  $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_3$  信号的随机通

信时滞均为  $0 \leq \tau \leq 150 \text{ ms}$ , 且丢包率均为 10%。进一步考虑到 PMU 实际现场采样获得的数据往往包含有一定量的噪声, 因此本文在发电机转速信号中加入了均方差为 0.000 1 rad/s 的白噪声。

在搭建的两区四机系统中, PMU 以每隔 10 ms 的采样速率向 PDC 发送数据, 设定 8 号母线 1 s 时发生三相短路故障, 并于 1.1 s 切除故障。对通信场景 1 下的  $\Delta\omega_1$  信号进行预测补偿, 得到的仿真结果局部放大图, 如图 4 所示。

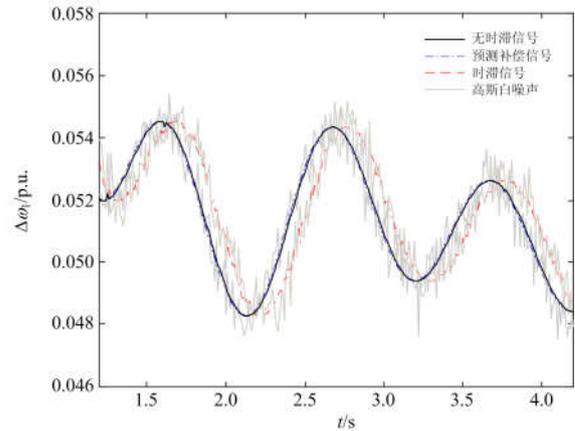


图4 通信场景 1 下 G1 相对角速度预测效果  
Fig. 4 Case 1 prediction of  $\Delta\omega_1$

由于灰色 Verhulst 预测算法能够良好预测的前提是噪声信号的有效滤除, 对图 4 中的原始数据进行 CEEMDAN 的分解与重构, 在计算过程中, 添加了标准差为 0.15 的高斯白噪声信号, 进行 120 次分解运算, 分解结果如图 5 所示。

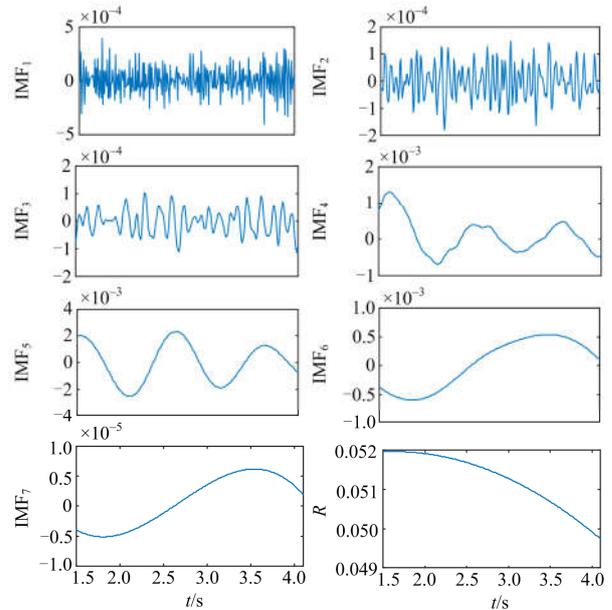


图5 含噪声信号的 CEEMDAN 分解图  
Fig. 5 Noise signal decomposition results based on CEEMDAN

固有模态函数能量值计算结果如表 1 所示,由能量门限法可知,其中 IMF<sub>4</sub>—IMF<sub>6</sub> 为真实信号分量,其余为噪声分量和虚假分量。

表 1 固有模态函数能量值

Table 1 Energy values of intrinsic mode functions

| IMF <sub>i</sub> | IMF <sub>1</sub> | IMF <sub>2</sub> | IMF <sub>3</sub>      | IMF <sub>4</sub> |
|------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| $e_i$            | 0.008 4          | 0.002 8          | 0.001 2               | 0.113 3          |
| IMF <sub>i</sub> | IMF <sub>5</sub> | IMF <sub>6</sub> | IMF <sub>7</sub>      | —                |
| $e_i$            | 1                | 0.114 8          | $1.95 \times 10^{-6}$ | —                |

将 IMF<sub>4</sub>~IMF<sub>6</sub> 以及剩余分量 R 进行叠加,重构出降噪后的量测信号序列,重构信号与实际的原始信号对比结果如图 6 所示。

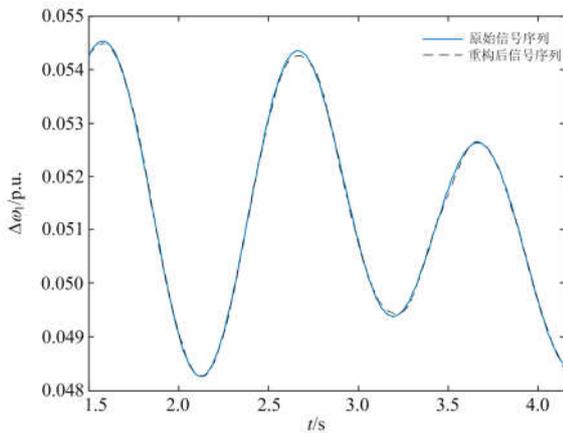


图 6 重构信号与原始信号对比图

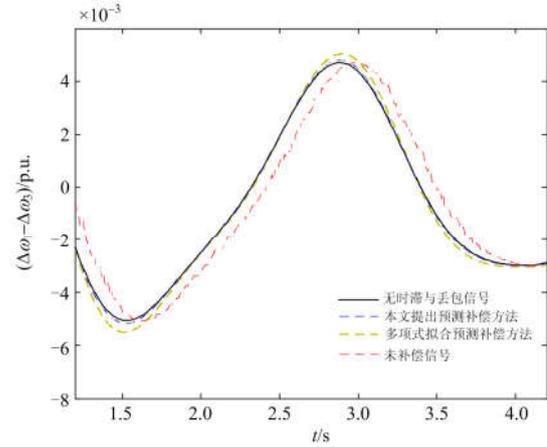
Fig. 6 Comparison of reconstruction signal and original signal

由图 6 可知,采用 CEEMDAN 对含噪声的量测信号先分解再重构后,可有效滤除信号中的噪声分量,为预测补偿算法的应用提供了良好的基础。

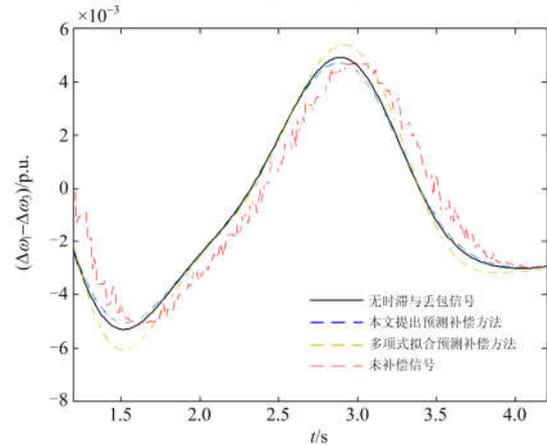
由于信号的时滞与丢包不同,为了减少时滞与丢包的影响,同时最大限度地利用已获得的量测信号,本文采用先分别对  $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_3$  进行预测然后再进行  $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$  运算的预测补偿方法。从而避免了先构造输入信号再进行预测补偿的方法,在应用过程中导致输入信号的时滞与丢包特性由各个子信号中时滞与丢包最严重的信号决定的问题。由于本文考虑了通信系统中广域信号的时滞、丢包以及时滞引发的粘包现象,使得历史数据为非等间隔的数列,导致需要等间隔采样的预测补偿算法在应用过程中可能会出现错误,故本文采用文献[24]提出的基于最小二乘的多项式拟合预测算法与本文提出的算法进行预测补偿效果的比较。

对比不同的预测补偿方法,得到的仿真结果如图 7 所示。其中,含噪声的原始信号均采用 CEEMADN 算法进行降噪处理,为了使图像中两种不同算法的

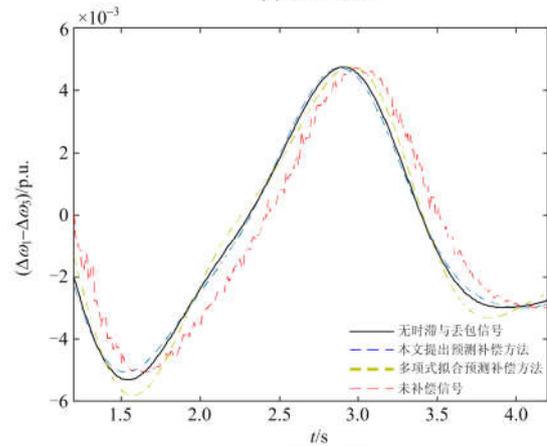
预测补偿效果对比更为清晰,信号的噪声不显示于图中,且对仿真结果进行了局部的放大。



(a) 通信场景1



(b) 通信场景2



(c) 通信场景3

图 7 不同通信场景下控制器广域信号曲线

Fig. 7 Controller wide-area signals curves in different communication scenarios

由图 7 中的控制器广域信号曲线可知,在具有时滞与丢包的通信场景下,不进行预测补偿的信号曲线与理想无时滞丢包的信号曲线在相位和幅值均

会出现一定程度的偏离,并且随着时滞与丢包的增大偏离愈发明显,此时 WPSS 将难以抑制系统区域间低频振荡甚至会造成输出负阻尼的现象。但当采用预测补偿算法后能有效降低时滞与丢包的影响,并且本文提出的综合考虑时滞与丢包的预测算法相比于基于多项式拟合的预测补偿算法,在以上 3 种通信场景下具有更好的预测补偿效果。进一步,可采用式(16)的均方误差作为衡量信号之间偏差的指标。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega(t_i) - \bar{\omega}(t_i))^2}{n}} \quad (16)$$

式中:  $\bar{\omega}(t_i)$  为预测补偿后的信号或未预测补偿的信号;  $\omega(t_i)$  为无时滞、丢包以及噪声的理想信号。采用式(16)对图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)中的广域信号曲线进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 3 种通信场景下误差与运算时间比较

Table 2 Data error and computing time comparison under three communication scenarios

| 通信场景 | 预测补偿方法      | $\sigma$ (rad/s) | 单次预测补偿平均所用时间 $t$ /ms |
|------|-------------|------------------|----------------------|
| 1    | 不预测补偿       | 0.062            | 0                    |
|      | 本文提出预测补偿方法  | 0.000 26         | 8.35                 |
|      | 多项式拟合预测补偿方法 | 0.004 2          | 7.87                 |
| 2    | 不预测补偿       | 0.081            | 0                    |
|      | 本文提出预测补偿方法  | 0.000 31         | 8.64                 |
|      | 多项式拟合预测补偿方法 | 0.006 9          | 7.97                 |
| 3    | 不预测补偿       | 0.087            | 0                    |
|      | 本文提出预测补偿方法  | 0.000 34         | 8.75                 |
|      | 多项式拟合预测补偿方法 | 0.007 9          | 8.21                 |

由表 2 计算结果可知: ① 丢包会使得广域信号与理想信号的误差明显增大; ② WPSS 的输入信号是由多个广域信号构成,随着具有时滞与丢包的信号增多,预测补偿后的信号与理想信号的偏差也会加大,因此在构建 WPSS 时 PDC 的安装位置是不得不考虑的问题; ③ 采用本文提出预测补偿方法,相比于经典的多项式拟合预测补偿,虽然单次运算时间稍微有所增加,但整体的预测补偿精度有较为明显的改善,特别是在信号的拐点处,本文所提方法对于时滞丢包信号具有更好的预测补偿效果。

进一步,可验证 CEEMDAN 对于噪声滤除的有效性以及噪声对于 WPSS 应用过程中的危害性,并且通过随机时滞与丢包最为恶劣的通信场景 3 下的系统动态功角响应曲线,证明本文预测补偿算法的

有效性,结果如图 8 所示。

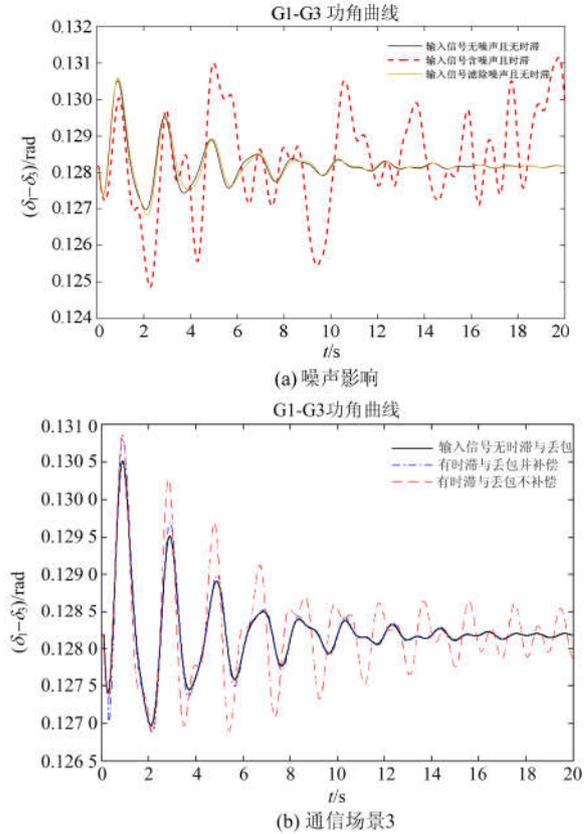


图 8 系统功角曲线

Fig. 8 Simulation curves of system angles

由图 8 中仿真结果可知: ① 噪声对于 WPSS 提供阻尼的性能有着严重影响,在 WPSS 的设计与运用过程中,必须对输入信号采取相应的降噪处理,从而保证 WPSS 能够有效抑制系统区域间低频振荡; ② 输入信号的时滞与丢包会使得控制器抑制振荡的性能减弱,在通信场景 3 下,若不进行相应的措施 WPSS 已经不能使系统保持稳定运行。而采用了本文提出预测补偿算法后,由于对输入信号进行了预测补偿,降低了时滞与丢包带来的负面影响,使得 WPSS 的控制效果与理想无时滞与丢包情况相接近,提高了系统整体的小干扰稳定水平。

## 4 结论

考虑到 WPSS 在应用过程中不可避免地会受到通信系统的随机时滞、丢包以及 PMU 采样过程中的噪声影响,本文提出了一种基于灰色 Verhulst 与 CEEMDAN 的预测补偿算法,通过在 3 种通信场景下的仿真结果表明,该方法能有效预测补偿具有噪声以及随机时滞与丢包的电力系统广域信号。

对于广域闭环控制系统中受时滞与丢包影响的

广域信号采用预测补偿的处理方法, 具有可以避免复杂的时滞电力系统建模以及降低了 WPSS 参数的设计难度等优点。因此在实际工程的运用中如何进一步降低噪声的影响并提高预测补偿算法的准确性与快速性值得展开更加深入的研究。

参考文献

[1] BOSE A. Smart transmission grid applications and their supporting Infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 11-19.

[2] 钱伟, 蒋鹏冲, 车凯. 基于 Wirtinger 不等式的时变时滞电力系统稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 79-85.

QIAN Wei, JIANG Pengchong, CHE Kai. Stability analysis for power system with time-delay based on Wirtinger inequality[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 79-85.

[3] 段刚, 詹庆才, 杨东, 等. 基于多个广域测量系统的联合低频振荡分析和监测[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 101-106.

DUAN Gang, ZHAN Qingcai, YANG Dong, et al. Multiple WAMS-based coordinated analysis and monitoring of low frequency oscillations[J]. Electric Power, 2015, 48(4): 101-106.

[4] 赵熙临, 何晶晶, 付波, 等. 考虑双通道随机时延的区域互联电网 AGC 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 50-57.

ZHAO Xili, HE Jingjing, FU Bo, et al. An AGC method for interconnected power grid with two-channel random delays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 50-57.

[5] 李岩, 胡志坚, 刘宇凯, 等. 基于多目标优化的时滞广域阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 94-101.

LI Yan, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Design of multi-objective optimization based time delay wide area damping controller[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 94-101.

[6] WANG S, MENG X, CHEN T. Wide-area control of power systems through delayed network communication[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(2): 495-503.

[7] 聂永辉, 张鹏宇, 马彦超, 等. 基于 Pade 近似的广域电力系统关键模态时滞轨迹分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 87-92.

NIE Yonghui, ZHANG Pengyu, MA Yanchao, et al. Time delay trajectory analysis of critical modes in wide-area power system based on Pade approximation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 87-92.

[8] 于淼, 路昊阳. 基于  $\varepsilon$ -权衡“阻尼-时滞”电力系统广域阻尼控制[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 80-87.

YU Miao, LU Haoyang. Multiple wide-area damping control of power system based on a  $\varepsilon$ -Tradeoff “damping-time delay” method[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 80-87.

[9] 孙琳, 李天然, 钱俊杰, 等. 基于模糊控制的广域阻尼控制器设计[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 58-62.

SUN Lin, LI Tianran, QIAN Junjie, et al. Design of wide area damping controller based on fuzzy control[J]. Electric Power, 2015, 48(6): 58-62.

[10] 陈刚, 张华, 程林, 等. 改进的 WPSS 分段时延补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 76-82.

CHEN Gang, ZHANG Hua, CHENG Lin, et al. Improved interval time-delay compensation method for WPSS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 76-82.

[11] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时滞的分层预测补偿[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3194-3201.

ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Prediction based on hierarchical compensation for delays of wide-area closed-loop control systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3194-3201.

[12] 刘运花, 黎雄, 刘志雄, 等. 基于灰色预测的广域电力系统稳定器分布延时补偿设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 44-49.

LIU Yunhua, LI Xiong, LIU Zhixiong, et al. A compensation design for wide-area power system stabilizer distributed time delay based on grey prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 44-49.

[13] 杨博, 李永杰, 江全元, 等. 应用 Prony 算法的广域量测信号时滞补偿方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1778-1784.

YANG Bo, LI Yongjie, JIANG Quanyuan, et al. A compensation method for time delay of wide area measurement signals applying improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1778-1784.

[14] 周涛, 陈中, 殷大朋, 等. 基于阻尼转矩分析法的时滞丢包统一建模及其应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 53-57.

ZHOU Tao, CHEN Zhong, YIN Dapeng, et al. Damping torque analysis based unified modeling of time delay and

- data loss and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 53-57.
- [15] LI M, CHEN Y. A wide-area dynamic damping controller based on robust  $H_{\infty}$  control for wide-area power systems with random delay and packet dropout[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4026-4037.
- [16] LI M, CHEN Y. A wide-area stabilizer on sliding mode control for cross-area power systems with random delay and packet dropouts[J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(6): 1-13.
- [17] 张伏生, 刘芳, 赵文彬, 等. 灰色 Verhulst 模型在中长期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 37-39, 81.  
ZHANG Fusheng, LIU Fang, ZHAO Wenbin, et al. Application of grey Verhulst model in middle and long term load forecasting[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 37-39, 81.
- [18] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域测量系统时延的数字仿真方法及实时数字仿真器实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 99-105.  
ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. A digital simulation technique for time delay in wide area measurement system and its realization in real-time digital simulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 99-105.
- [19] 王丰效. 非等间距组合灰色预测模型[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(21): 39-43.  
WANG Fengxiao. Unequal interval combination gray forecast model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(21): 39-43.
- [20] REN Y, SUGANTHAN P N, SRIKANTH N. A comparative study of empirical mode decomposition-based short-term wind speed forecasting methods[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 6(1): 236-244.
- [21] 吴新忠, 邢强, 渠虎. CEEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 48-55.  
WU Xinzhong, XING Qiang, QU Hu. Application of CEEMD in power quality disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 48-55.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw - Hill, 1994.
- [23] 陈中, 唐浩然, 袁宇波. 计及信号随机延时的电力系统小干扰概率稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 145-151.  
CHEN Zhong, TANG Haoran, YUAN Yubo. Probabilistic small disturbance stability analysis of power system considering stochastic signal delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 145-151.
- [24] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 33-38.  
HU Zhixiang, XIE Xiaorong, TONG Luyuan. Characteristic analysis and polynomial fitting based compensation of the time delays in wide-area damping control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 33-38.

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-12-04

作者简介:

陈中(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: chenzhong\_seu@163.com

唐浩然(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: 948361756@qq.com

邢强(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车与电网和交通网互动。E-mail: tmac132180@163.com

(编辑 姜新丽)