

含周期性脉冲噪声的低压电力线噪声建模研究

应展烽, 吴军基, 郭昊坤, 万 萌

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 传统峰式马尔科夫链模型不能应用于含有周期性脉冲噪声的电力线噪声建模中, 所以提出了一种新型低压电力线噪声建模方法, 该方法将电力线噪声分为脉冲群内噪声和脉冲群外噪声 2 类。脉冲群内噪声使用峰式马尔科夫链建模, 脉冲群外噪声使用传统马尔科夫链建模。仿真结果表明, 新型电力线噪声模型所构造出的电力线噪声不仅在统计规律上与真实噪声相同, 而且在时域波形上也有极高的相似度。

关键词: 低压电力线; 通信; 马尔科夫链模型; 峰式马尔科夫链; 噪声; 建模

中图分类号: TM 73; TN 915.853

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.011

0 引言

低压电力线通信 LPLC (Low-voltage Power Line Communication) 技术是指利用低压 (220/380 V) 配电线路作为通信介质, 实现数据、语音、图像等综合业务传输的通信技术^[1]。近年来, LPLC 技术已被广泛应用于电力设备通信、远程抄表、电气设备监控等领域中^[2-3]。然而, 低压电力线不是专用通信信道, 信道中的噪声干扰比其他通信信道更加复杂, 噪声会使信号误码率增加^[4-6], 通信质量降低, 严重时甚至导致通信完全失效。故对电力线噪声进行建模研究有利于有效地分析 LPLC 噪声特性、为 LPLC 设备性能测试提供真实的噪声源, 提高设备的抗干扰能力和传输速率、同时也可作为 LPLC 国家/行业相关标准制定提供依据, 具有重要理论和工程价值。

低压电力线中的噪声可以分为背景噪声和脉冲噪声两大类^[7,8]。背景噪声包括有色背景噪声、窄带噪声和异步于工频的周期脉冲噪声, 脉冲噪声包括同步于工频的周期脉冲噪声和异步脉冲噪声。国内外已有学者对这 2 类噪声建模问题进行了研究。背景噪声方面, 文献[9]提出背景噪声模型可用一组白噪声通过 AR 模型后得到, 文献[10-11]分别运用奇异值分解法、Levinson-Durbin 递推法、Gram-Schmidt 正交法 3 种计算方式验证该模型, 但得到的模型仅能从频域验证, 较难恢复其时域波形, 因此不能直观地反映模型正确性及精确性, 无法应用于 LPLC 设备性能测试中。脉冲噪声方面, 由于其幅度、宽度、间隔和符号的统计特性时变性极强, 建模方法研究较少。文献[12-13]提出了一种基于分群的马尔科夫链的脉冲噪声模型, 但该方法忽略脉冲噪声幅度、宽度、间隔和符号之间的相互联系, 故利用该模型仿

真得到的脉冲噪声时域波形, 与真实脉冲噪声波形存在较大差异。文献[14-15]提出了一种基于峰式马尔科夫链的脉冲噪声模型, 该方法考虑了噪声幅度、宽度、间隔和符号之间的相互影响, 可得到脉冲噪声的时域波形, 但该方法不能应用于含有大量周期性脉冲噪声的电力线噪声建模中。这是由于周期性脉冲噪声带有周期性极强的脉冲群信号, 若将这些脉冲噪声信号间隔简单地加入随机过程中, 建模所得的时域噪声波形与真实噪声波形存在一定差异。

本文根据实测噪声数据, 针对含有周期性噪声的电力线噪声模型的缺陷, 提出了一种含周期性脉冲噪声的低压电力线噪声峰式马尔科夫链建模方法。仿真结果表明, 因考虑了周期性脉冲噪声特性, 故该模型克服了文献[10-15]所提模型的不足, 得到了与实测噪声统计误差极小的仿真模型, 且其时域波形也有极高的相似度。

1 含周期性脉冲噪声的电力线噪声特性分析

为分析含有周期性脉冲噪声的低压电力线噪声特性, 对实验室中的一条低压线路的电力线噪声进行了实测。实测系统框图如图 1 所示, 噪声通过基于电感耦合器的耦合网络耦合至存储示波器, 存储示波器获取噪声数据存储后再传输至 PC 机进行存储和分析。



图 1 实测系统框图

Fig.1 Block diagram of measuring system

图 2(a)为其中一组实测噪声波形。观察图像发现, 电力线噪声中存在周期性出现的脉冲噪声, 这些脉冲噪声幅度 (本文中的幅度是指噪声幅值绝对值, 幅度与其正负符号结合代表幅值) 一般高出有色背景噪声 3~5 倍, 相邻脉冲噪声之间的时间间隔几乎一致, 约为 1.5×10^{-5} s。为了深入观察脉冲噪声特性,

收稿日期: 2012-08-04; 修回日期: 2013-06-23

基金项目: 国家电网公司科技项目 (2011LY226090424)

Project supported by the Science and Technology Innovation Project of State Grid Corporation of China (2011LY226090424)

图2(b)将其中的脉冲噪声进行了放大,并将脉冲噪声的幅度包络变化趋势用虚线标出。由图2(b)可见,周期性的脉冲噪声可视为一个多脉冲组成的脉冲群,而群外噪声主要由幅度较小的有色背景噪声组成。脉冲群内的噪声幅度呈现先上升后下降的变化态势,而不同幅度的脉冲,其间隔和宽度的取值也在变化,即脉冲间隔、宽度和幅度相关,当某个时刻的脉冲幅度确定后,通过统计方法,可以得到脉冲间隔和宽度取值概率。

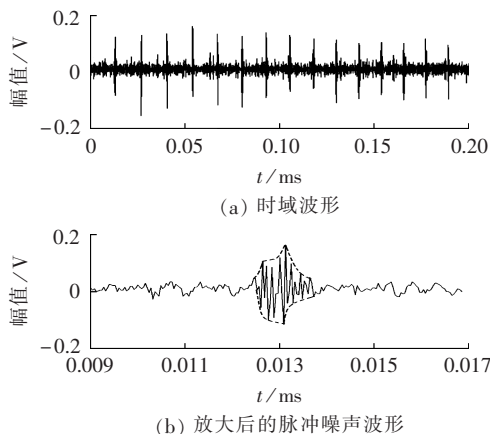


图2 实测电力线噪声

Fig.2 Measured power line noise

2 峰式马尔科夫链原理

2.1 传统马尔科夫链

马尔科夫链是一类重要随机过程,常被用于电力线噪声建模中。

设有一个离散的随机过程 $X(n)$ 在第 k 时刻的值为 $X(k)$, $X(k)$ 可在 $[a_0, a_1, \dots, a_m]$ 范围内取值,将 a_i 称为随机过程中的一个状态, m 为随机过程的状态总数。传统马尔科夫链定义如下:若状态都是离散的随机过程 $X(n)$, 在 k 时刻状态 $X(k)$ 已知的条件下,其后 $k+1$ 时刻所处的状态只与 k 时刻的状态有关,而与之前时刻的状态无关,则该过程称为马尔科夫链^[16]。

根据马尔科夫链定义,将式(1)称为在 $X(k)$ 取值为 a_i 状态条件下、 $X(k+1)$ 取值为 a_j 时的条件概率或转移概率,由转移概率构成的矩阵称为马尔科夫链的转移矩阵。

$$p_{ij}(k+1, k) = P\{X(k+1) = a_j | X(k) = a_i\} \quad (1)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, m$$

2.2 峰式马尔科夫链

由于传统马尔科夫链仅依靠随机变量的上一个时刻的状态来判断下一个时刻状态,没有考虑随机变量的变化趋势,那么当随机变量的变化在局部时域上存在一种先增大后减小的趋势时,利用传统马尔科夫链建立的模型必会有失准确性。应采用峰式

马尔科夫链进行描述。

文献[17]给出了峰式马尔科夫链的定义:若在 $k+1$ 时刻状态 $X(k+1)$ 不仅与 $X(k)$ 有关,还与 $X(k)$ 、 $X(k-1)$ 之间的关系有关,当 $X(k) > X(k-1)$ 时, $X(k+1) > X(k)$ 的概率大于 $X(k+1) < X(k)$ 的概率;当 $X(k) < X(k-1)$ 时, $X(k+1) < X(k)$ 的概率大于 $X(k+1) > X(k)$ 的概率(即分清状态转移前,随机变量取值是处于上升还是下降趋势)。此类特殊的马尔科夫链所构成的序列形似山峰,称之为峰式马尔科夫链。

根据峰式马尔科夫链定义,在同样的 $X(k)$ 取值状态下, $X(k+1)$ 状态取值存在 2 个转移概率,分别表示如下:

$$p_{ij}(k+1, k, k-1) = P\{X(k+1) = a_j | X(k) = a_i | X(k) > X(k-1)\}$$

$$p'_{ij}(k+1, k, k-1) = P\{X(k+1) = a_j | X(k) = a_i | X(k) < X(k-1)\}$$

3 噪声建模

3.1 脉冲群分离

根据周期性脉冲噪声的电力线噪声特性分析,本文提出将脉冲群内的噪声与群外的噪声分离开来,分别进行峰式马尔科夫链和传统马尔科夫链建模。

建模时首先需将脉冲群信号从电力线噪声信号中分离,结合前文所述的周期性脉冲群的特点,本文采用如下方法来分离脉冲群信号:

步骤1 根据实测噪声结果,在 $t=t_0$ 时刻取出一个幅度值为 A_{t_0} 的噪声,前往步骤2;

步骤2 设定一个脉冲群幅度判定阈值 A_{th} , 若有 $A_{t_0} \geq A_{th}$, 则认为 t_0 时刻附近存在脉冲群,前往步骤3;若 $A_{t_0} < A_{th}$, 无法判断 t_0 时刻附近是否存在脉冲群,返回到步骤1,选取 $t=t_1$ 时刻的噪声进行判断;

步骤3 设定一个时间宽度阈值 t_D , 并将区间 $(t_0 - t_D, t_0 + t_D)$ 判定为包含脉冲群噪声的一个时间区间,即有一个脉冲群落在该区间内;

步骤4 返回到步骤1,选取 $t=t_0+t_D$ 时刻的噪声再次进行判断,如此循环直到最后一个噪声信号判断结束。

上述方法中的幅度阈值 A_{th} 和时间宽度 t_D 是可调阈值,前者用来判定一个脉冲群存在的大致时刻,后者用来确保将该脉冲群内的信号全部取出。这 2 个阈值的取值与实测噪声有关。经大量实验结果统计发现, A_{th} 的取值为有色背景噪声平均幅度的 2~4 倍、 t_D 的取值为脉冲群周期宽度的 $1/6 \sim 1/3$ 时,脉冲群分离效果最佳。

选取 $A_{th} = 0.05$ V, $t_D = 0.3 \times 10^{-5}$ s, 对图 2(a) 的噪声信号进行脉冲群分离,可得图 3 所示的结果。

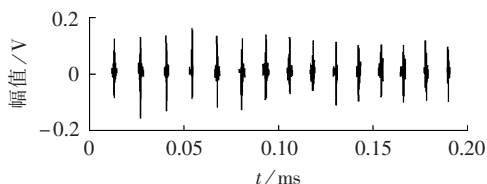


图 3 分离脉冲噪声群

Fig.3 Separation of impulsive noise group

3.2 脉冲群内模型

脉冲群分离后,可使用峰式马尔科夫链进行群内噪声的幅度建模。将群内噪声幅度变化规律与峰式马尔科夫链定义结合起来,可进一步描述如下。

$k+1$ 时刻的噪声幅度不仅和 k 时刻的幅度有关,还和 $k-1$ 时刻的幅度有关;如果 k 时刻幅度大于 $k-1$ 时刻幅度,那么 $k+1$ 时刻幅度大于 k 时刻幅度的概率明显高于 $k+1$ 时刻幅度小于 k 时刻幅度的概率;如果 k 时刻幅度小于 $k-1$ 时刻幅度,那么 $k+1$ 时刻幅度大于 k 时刻幅度的概率明显小于 $k+1$ 时刻幅度小于 k 时刻幅度的概率。即 $k+1$ 时刻幅度不仅与 k 时刻幅度有关,还和 k 时刻与 $k-1$ 时刻的幅度大小关系有关。利用峰式马尔科夫链对实测脉冲群内噪声幅度建模后,可获得 2 个噪声幅度的状态转移概率矩阵:一个是 k 时刻幅度大于 $k-1$ 时刻幅度时, $k+1$ 时刻幅度的状态转移概率矩阵;另一个是 k 时刻幅度小于 $k-1$ 时刻幅度时, $k+1$ 时刻幅度的状态转移概率矩阵。

又由于群内噪声的宽度、间隔与幅度相关,故通过统计可得到不同幅度状态下的噪声宽度、间隔的状态取值概率矩阵。同样,下一个时刻噪声幅度的正负符号(幅度与其正负号一起代表了噪声的幅值)也可视为与幅度相关的概率状态,因此正负符号也可得到与幅度相关的状态取值概率矩阵。状态取值概率矩阵与状态转移概率矩阵的区别为:状态取值概率矩阵的元素直接代表状态发生的概率,而状态转移概率矩阵代表了上一个时刻状态向下一个时刻状态转移的概率。

理论上,噪声幅度状态数划分得越多,则概率统计得到的状态转移概率和状态取值概率矩阵便越符合实际,但事实上其计算将占用大量的内存,耗费大量时间。故工程中应根据硬件条件和精度要求综合考虑所需的噪声幅度状态数。

本文将噪声的幅度分为 91 个状态(其中一个为幅度取值为 0 的状态),则宽度、间隔与正负符号对应幅度也应分为 91 个状态,可得到脉冲群内噪声幅度的状态转移概率矩阵以及噪声的宽度、间隔与正负符号的状态取值概率矩阵如下(因状态数较多,矩阵维数较大,故在此仅列出部分概率矩阵内容):

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.6859 & 0.1793 & 0.0607 & \cdots & 0 \\ 0.4879 & 0.2249 & 0.1073 & \cdots & 0.0035 \\ 0.3333 & 0.1824 & 0.2201 & \cdots & 0.0063 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.6188 & 0.1935 & 0.0587 & \cdots & 0.0029 \\ 0.3817 & 0.2824 & 0.1221 & \cdots & 0 \\ 0.2658 & 0.3418 & 0.1899 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NaN} & \text{NaN} & \text{NaN} & \cdots & \text{NaN} \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.2573 & 0.2436 & 0.0803 & \cdots & 0.0009 \\ 0.3434 & 0.3155 & 0.0812 & \cdots & 0.0023 \\ 0.3340 & 0.3954 & 0.0873 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 0.3900 & 0.3447 & 0.1360 & \cdots & 0.0019 \\ 0.7077 & 0.2413 & 0.0278 & \cdots & 0 \\ 0.7757 & 0.2053 & 0.0152 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_5 = [1.0000 \quad 0.4214 \quad 0.5188 \quad \cdots \quad 0.5000]$$

其中, P_1 为 k 时刻幅度大于 $k-1$ 时刻幅度时, $k+1$ 时刻幅度的状态转移概率矩阵; P_2 为 k 时刻幅度小于 $k-1$ 时刻幅度时, $k+1$ 时刻幅度的状态转移概率矩阵(NaN 表示不存在,即表示不可能在之前 2 个幅度处于下降的情况下得到较高的幅度); P_3 、 P_4 、 P_5 分别为不同幅度状态下, $k+1$ 时刻群内噪声宽度、间隔与正负符号的状态取值概率矩阵。应当说明的是, P_5 只有 1 行,其元素代表不同幅度下噪声幅值取正号的概率,由此易得到噪声幅值取负号的概率。

3.3 脉冲群外模型

脉冲群外大多为有色背景噪声,其幅度并不具备峰式马尔科夫链的一般特性,故采用传统马尔科夫链进行建模即可。

利用传统马尔科夫链对实测脉冲噪声进行统计,得到脉冲群外噪声幅度的状态转移矩阵为:

$$P_6 = \begin{bmatrix} 0.4653 & 0.2812 & 0.1613 & \cdots & 0.0006 \\ 0.4682 & 0.1385 & 0.1095 & \cdots & 0.0018 \\ 0.3249 & 0.2240 & 0.2019 & \cdots & 0.0032 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

而群外噪声的宽度、间隔与正负符号的状态取值概率矩阵如 P_7 、 P_8 、 P_9 所示。

$$P_7 = \begin{bmatrix} 0.7675 & 0.1761 & 0.0431 & \cdots & 0 \\ 0.6233 & 0.2458 & 0.0813 & \cdots & 0 \\ 0.5314 & 0.2709 & 0.1066 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.1563 & 0.2051 & 0.1406 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_8=\begin{bmatrix} 0.9446 & 0.0554 & 0 & \cdots & 0 \\ 0.9618 & 0.0374 & 0.0008 & \cdots & 0 \\ 0.9417 & 0.0583 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_9=[0.8430 \quad 0.3412 \quad 0.4144 \quad \cdots \quad 0.7826]$$

4 仿真比较分析

首先给出不考虑脉冲群时噪声建模后的仿真结果。图 4 为文献[14-15]利用峰式马尔科夫链对图 3 噪声建模后,利用状态转移概率矩阵生成的噪声时域波形。该模型忽略了脉冲噪声群的存在,直接对所有实测噪声信号进行峰式马尔科夫链建模,无法将脉冲群的时域特征反映在噪声模型中。尽管从随机过程上看,该模型所构造的噪声状态转移概率误差很小,但从时域上看,模型构造的噪声波形不存在周期性脉冲噪声的规律,与实测波形有一定差异。

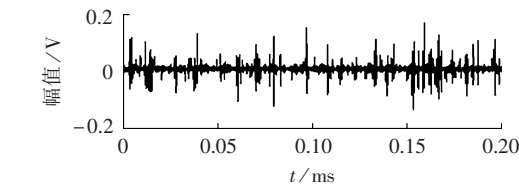


图 4 文献[14-15]所提模型构造的电力线噪声
Fig.4 Power line noise constructed by model proposed by reference[14-15]

图 5 为本文方法建模后,利用状态转移概率矩阵及状态取值概率矩阵生成的仿真波形。对比图 5、图 4 及图 2(a)可以发现,相比文献[14-15]所构造的电力线噪声,本文建模方法考虑了周期性脉冲噪声的特点,所构造噪声中的脉冲噪声也与实际情况一样,以周期脉冲噪声群的形式出现。仿真结果与实测电力线噪声的时域波形吻合度良好,反映了脉冲群即周期性脉冲噪声的存在,更加符合脉冲出现的实际情况。

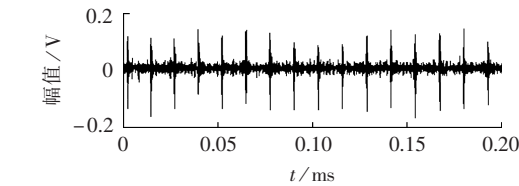


图 5 本文建模方法构造的电力线噪声
Fig.5 Power line noise constructed by proposed model

为进一步验证本文噪声模型仿真得到噪声在统计规律上的正确性,利用本文建模方法再次构造 20 组这样的噪声序列,通过统计求得各概率矩阵如下:

$$\mathbf{P}_{11}=\begin{bmatrix} 0.6857 & 0.1791 & 0.0609 & \cdots & 0.0003 \\ 0.4777 & 0.2149 & 0.1021 & \cdots & 0.0066 \\ 0.3358 & 0.1862 & 0.2156 & \cdots & 0.0052 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{22}=\begin{bmatrix} 0.6254 & 0.1849 & 0.0554 & \cdots & 0.0012 \\ 0.3908 & 0.2745 & 0.1199 & \cdots & 0 \\ 0.2745 & 0.3347 & 0.1711 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{NaN} & \text{NaN} & \text{NaN} & \cdots & \text{NaN} \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{33}=\begin{bmatrix} 0.2486 & 0.2498 & 0.0840 & \cdots & 0.0008 \\ 0.3450 & 0.3100 & 0.0884 & \cdots & 0.0020 \\ 0.3733 & 0.4055 & 0.0770 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{44}=\begin{bmatrix} 0.3888 & 0.3373 & 0.1376 & \cdots & 0.0034 \\ 0.7003 & 0.2427 & 0.0293 & \cdots & 0 \\ 0.7786 & 0.1959 & 0.0153 & \cdots & 0.0051 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{55}=[1.0000 \quad 0.4163 \quad 0.4896 \quad \cdots \quad 0.5000]$$
$$\mathbf{P}_{66}=\begin{bmatrix} 0.4729 & 0.2731 & 0.1719 & \cdots & 0.0006 \\ 0.4503 & 0.1504 & 0.1017 & \cdots & 0.0018 \\ 0.3165 & 0.2156 & 0.1837 & \cdots & 0.0032 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{77}=\begin{bmatrix} 0.7608 & 0.1698 & 0.0403 & \cdots & 0 \\ 0.6333 & 0.2358 & 0.0798 & \cdots & 0 \\ 0.5218 & 0.2780 & 0.1055 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.1558 & 0.2030 & 0.1414 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{88}=\begin{bmatrix} 0.9580 & 0.0420 & 0 & \cdots & 0 \\ 0.9620 & 0.0372 & 0.0008 & \cdots & 0 \\ 0.9838 & 0.0617 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1.0000 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{99}=[0.8414 \quad 0.3489 \quad 0.4098 \quad \cdots \quad 0.7797]$$

其中, $\mathbf{P}_{11}$ 和 $\mathbf{P}_{22}$ 为仿真得到的脉冲群内噪声幅度的状态转移概率矩阵; $\mathbf{P}_{33}$ 、 $\mathbf{P}_{44}$ 、 $\mathbf{P}_{55}$ 分别为仿真得到的群内噪声宽度、间隔与正负符号的状态取值概率矩阵; $\mathbf{P}_{66}$ 为仿真得到的群外噪声幅度状态转移概率矩阵, $\mathbf{P}_{77}$ 、 $\mathbf{P}_{88}$ 、 $\mathbf{P}_{99}$ 分别为仿真得到的群外噪声宽度、间隔与正负符号的状态取值概率矩阵。

将上述概率矩阵与实测噪声的概率矩阵对比,可得各状态概率的绝对误差矩阵 $\mathbf{E}_1$ 至 $\mathbf{E}_9$ 如下:

$$\mathbf{E}_1=\begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0002 & 0.0002 & \cdots & 0.0003 \\ -0.0102 & -0.0100 & -0.0052 & \cdots & 0.0031 \\ 0.0025 & 0.0038 & -0.0045 & \cdots & -0.0011 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{E}_2=\begin{bmatrix} 0.0066 & -0.0036 & -0.0033 & \cdots & -0.0017 \\ 0.0091 & -0.0079 & -0.0022 & \cdots & 0 \\ 0.0087 & -0.0071 & -0.0138 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_3 = \begin{bmatrix} -0.0092 & 0.0062 & 0.0037 & \cdots & -0.0001 \\ 0.0016 & -0.0055 & 0.0072 & \cdots & -0.0003 \\ -0.0107 & 0.0101 & -0.0067 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_4 = \begin{bmatrix} -0.0012 & -0.0074 & 0.0016 & \cdots & 0.0015 \\ -0.0074 & 0.0374 & 0.0015 & \cdots & 0 \\ 0.0029 & -0.0094 & 0.0001 & \cdots & 0.0051 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_5 = [0 \quad -0.0051 \quad -0.0296 \quad \cdots \quad 0]$$

$$E_6 = \begin{bmatrix} -0.0076 & -0.0081 & 0.0106 & \cdots & 0 \\ -0.0179 & 0.0119 & -0.0078 & \cdots & 0 \\ -0.0084 & -0.0084 & -0.0182 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_7 = \begin{bmatrix} -0.0067 & -0.0063 & -0.0028 & \cdots & 0 \\ 0.0100 & -0.0100 & -0.0015 & \cdots & 0 \\ -0.0096 & 0.0071 & -0.0011 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0.0005 & -0.0021 & 0.0008 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_8 = \begin{bmatrix} 0.0134 & -0.0134 & 0 & \cdots & 0 \\ 0.0002 & -0.0002 & 0 & \cdots & 0 \\ -0.0034 & 0.0034 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_9 = [-0.0016 \quad 0.0077 \quad -0.0046 \quad \cdots \quad -0.0029]$$

可见,各误差矩阵中的值均较小,这说明利用噪声模型仿真得到的噪声不仅在时域波形上具有良好的相似度,同时其统计规律与实测噪声的统计规律基本一致。因此,所构造的电力线噪声模型具有良好的精度。

5 结论

噪声干扰是影响电力线通信可靠性的最主要因素之一,且目前尚无明确的标准,故对其模型的研究有着重要的理论与实际意义。本文建立了含周期性脉冲的低压电力线噪声模型,并进行了仿真验证。仿真结果表明本文模型所构造的低压电力线通信信道噪声与实际测量的噪声相比,转移概率误差极小,且时域波形具有更大的相似度,为今后低压电力线通信信道噪声建模问题提供了切实可行的方案,为建立低压电力线通信信道噪声标准提供了理论参考依据。

参考文献:

- [1] 姜霞,NGUIMBIS J,程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(11):30-35.
JIANG Xia,NGUIMBIS J,CHENG Shijie. Noise characteristics investigation in low voltage power line communication[J].

Proceedings of the CSEE,2000,20(11):30-35.

- [2] GÜZEL T,ÜSTÜNEİ E,CELEBI H B,et al. Noise modeling and OFDM receiver design in power line communication[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2011,26(4):2735-2742.
- [3] 祁明晰,祁昶,黄天戌. 基于电力线载波通信技术的智能家居系统[J]. 电力自动化设备,2005,25(3):72-75.
QI Mingxi,QI Chang,HUANG Tianshu. Home automation system based on power line carrier communication technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(3):72-75.
- [4] 梅杨,宗群龙. 基于节点相关度的电力线载波通信路由算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):95-97.
MEI Yang,ZONG Qunlong. Routing algorithm of power line communication network based on node relevance[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):95-97.
- [5] 戚佳金,刘晓胜,李贵娇,等. 低压窄带电力线通信信道编码方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):78-81.
QI Jiajin,LIU Xiaosheng,LI Guijiao,et al. Channel coding methods of narrow-band LV power line communication[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):78-81.
- [6] 李凤飞,刘光熹,胡国荣. 一种适用于电力线通信系统的抗窄带噪声方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):84-87.
LI Fengfei,LIU Guangxi,HU Guorong. Narrowband noise rejection for power line communication system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):84-87.
- [7] 房曙光. 低压电力线通信信道特性[J]. 继电器,2007,35(22):53-56.
FANG Shuguang. Characteristics of low voltage power line communication channels[J]. Relay,2007,35(22):53-56.
- [8] 孙秀娟,罗运虎,刘志海,等. 低压电力线载波通信的信道特性分析与抗干扰措施[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):43-46.
SUN Xiujuan,LUO Yunhu,LIU Zhihai,et al. Channel characteristics analysis and anti-jamming measures of low-voltage power line carrier communication[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):43-46.
- [9] 张有兵,何海波,吴昕,等. 低压电力线载波通信中信道模型的研究[J]. 继电器,2002,30(5):20-24.
ZHANG Youbing,HE Haibo,WU Xin,et al. Modeling of the channel for low voltage power line carrier communication[J]. Relay,2002,30(5):20-24.
- [10] 吴军基,郭昊坤,孟绍良,等. 电力线通信信道背景噪声建模研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):6-10.
WU Junji,GUO Haokun,MENG Shaoliang,et al. Modeling research of back noise in power line communication channel[J]. Power System Protection and Control,2011,39(23):6-10.
- [11] 郭昊坤,应展烽,吴军基,等. 基于 Gram-Schmidt 正交法的电力线背景噪声建模[J]. 电力系统通信,2012,33(3):1-4.
GUO Haokun,YING Zhanfeng,WU Junji,et al. Modeling of back noise in power line communication channel based on Gram-Schmidt orthogonal[J]. Telecommunications for Electric Power System,2012,33(3):1-4.
- [12] 李平,赵志辉,张振仁. 低压电力线信道中脉冲噪声的建模及仿真[J]. 继电器,2007,35(5):58-62.
LI Ping,ZHAO Zhihui,ZHANG Zhenren. Modeling and simulation of the impulse noise in low voltage power line communication channel[J]. Relay,2007,35(5):58-62.
- [13] ZIMMERMANN M,DOSTERT K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band power line communications[J].

IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility,2002,44 (1): 249-258.

[14] 郭昊坤,吴军基,应展烽,等. 一种改进的马尔科夫链及其在电力线通信信道脉冲噪声建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):129-132.

GUO Haokun,WU Junji,YING Zhanfeng,et al. The application of improved Markov chain in power line communication channel's impulse noise modeling[J]. Power System Protection and Control,2012,40(5):129-132.

[15] 郭昊坤,吴军基,衡思坤,等. 低压电力线通信信道噪声建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):61-66.

GUO Haokun,WU Junji,HENG Sikun,et al. Modeling and simulation of the noise in low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control,2012,40(13): 61-66.

[16] 何选森. 随机过程[M]. 北京:人民邮电出版社,2009:251-284.

[17] 郭昊坤,吴军基,应展烽,等. 一类特殊随机序列的改进马尔科夫链建模[C]//第十六届全国青年通信学术会议论文集(上). 北京:国防工业出版社,2011:127-130.

GUO Haokun,WU Junji,YING Zhanfeng,et al. A special kind of random sequences' improved Markov chain modeling[C]// Proceedings of the 16th NCYC. Beijing,China;National Defense Industry Press,2011:127-130.

作者简介:

应展烽(1982-),男,浙江台州人,讲师,博士后,研究方向为电力系统通信、数据挖掘等(E-mail:yingzhanfeng@163.com);

吴军基(1955-),男,河南南阳人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护、电能质量分析、数据挖掘等(E-mail:wjj807@126.com);

郭昊坤(1987-),男,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为电力系统通信、信号处理与分析(E-mail:ghk1222@126.com);

万萌(1988-),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统通信、信号处理与分析(E-mail:wanmeng1988@126.com)。

Modeling of low-voltage power line noise containing periodic pulses

YING Zhanfeng,WU Junji,GUO Haokun,WAN Meng

(School of Energy and Power Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

Abstract: As the traditional peak-type Markov chain model cannot be applied to the modeling of power line noise containing periodic pulses,a method of low-voltage power line noise modeling is proposed,which classifies the power line noise into the noise inside pulse group and the noise outside pulse group. The former is modeled with peak-type Markov chain while the latter is modeled with traditional Markov chain. Simulative results show that,the low-voltage power line noise constructed by the proposed model is not only statistically same as the real noise,but also similar to it in time-domain waveform.

Key words: low-voltage power line; communication; Markov chain model; peak-type Markov chain; noise; model buildings

(上接第 57 页 continued from page 57)

Adaptive inverse control of superheated steam temperature

WANG Wanzhao,WANG Jie

(School of Electrical Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China)

Abstract: A scheme combining neural network identification technology and adaptive inverse control technology is proposed for the control of boiler superheated steam temperature in fossil-fired power plant, which applies the RBF neural network to online identify the Jacobian information of the controlled object and then the DRNN(Diagonal Recurrent Neural Network) to online identify the inverse model of the controlled object. The identified inverse model,as a controller,is set before and connected in series with the controlled object to form an adaptive inverse control system. Simulation with the superheated steam temperature of supercritical 600 MW unit as the controlled object shows that,the proposed control scheme,with excellent control quality,adapts well to the variable properties of object and overcomes its large inertia and nonlinearity effectively.

Key words: boilers; adaptive inverse control; superheated steam temperature; DRNN; Jacobian information; cascading control; neural networks