

基于延拓相关算法的蓄电池内阻参数提取研究

司 伟, 冯长江, 黄天辰

(陆军工程大学石家庄校区 车辆与电气工程系, 石家庄 050000)

摘要: 针对蓄电池内阻参数提取中待测微弱信号易受噪声和干扰的影响, 利用信号和噪声的不相关性, 提出了一种基于延拓相关理论的抗噪处理算法; 该算法选取两路同频正交参考信号中的一路信号注入蓄电池, 然后将输出信号和原两路正交参考信号分别经过采样滤波后转化成离散序列, 对离散信号进行延拓相关运算, 最后利用和差三角函数得到内阻幅值和相位的计算值; 实验结果表明, 在高噪声背景下该算法有较高信号分辨率, 对蓄电池内阻幅值和相位的测量有较高准确度。

关键词: 数据延拓; 相关原理; 蓄电池内阻; 噪声干扰; 幅值; 相位

Research on Internal Resistance Parameter Extraction of Battery Based on Extension Correlation Algorithm

Si Wei, Feng Changjiang, Huang Tianchen

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Considering the influence of noise and interference on the weak signal to be detected in the extraction of internal resistance parameters, a noise immunity algorithm based on continuation correlation theory is proposed, which is based on the correlation between signal and noise. The algorithm selects one of the two orthogonal reference signals in the same frequency signal and injects into the battery, then the output signal and the reference signal respectively through two orthogonal sampling filter are transformed into discrete sequence of discrete signal extension related operations, and finally calculates trigonometric obtain amplitude and phase values of resistance. The experimental results show that the algorithm has high signal resolution in the high noise background, and has a high accuracy for measuring the amplitude and phase of the battery internal resistance.

Keywords: data extension; correlation principle; internal resistance of battery; noise interference; amplitude; phase

0 引言

实际研究中, 储能蓄电池内阻不仅反映电池的荷电状态, 还能对电池内部健康状态分析提供参考依据^[1-2]。蓄电池作为重要储能环节, 通过其内阻参数提取能给军用新能源微电网互补协同工作系统提供有效控制策略, 提高系统运行质量和稳定性。然而蓄电池是复杂非线性系统, 待提取电压信号为毫伏级, 易受噪声信号和干扰信号影响, 因此蓄电池内阻信号提取技术实质是一种微弱信号处理技术。噪声信号在日常生活中还是在信息处理领域广泛存在, 它们通常混在有用信号中影响有用信号正常表达和传导, 这迫切需要去除噪声, 分离出有用信号^[3-4]。结合蓄电池内阻信息的提取, 普通的方法是很难得到准确的内阻参数, 这将导致影响内阻信号的正常测量。因此, 开展对蓄电池在噪声和干扰环境下内阻参数提取的研究尤为重要^[5-6]。

目前, 在微弱信号处理领域, 实际参数提取常采用的方法有取样积分与数字式平均、锁相放大技术和自适应噪

声抵消等。其中取样积分与数字式平均最早于加利福尼亚大学劳伦茨实验室里被提出, 顾名思义, 取样积分与数字式平均就是把每个输入信号的周期根据恢复信号所要求的精度进行 N 个时间间隔划分, 然后采样这些时间间隔的信号并对各周期中处于相同位置的取样进行积分或平均。

自适应噪声抵消技术是通过提高信号传输或信号检测过程中的信噪比, 重点分析干扰、噪声的特性, 利用噪声与目标信号函数不相关性, 自适应的调整信号的传输特性。为了提取出目标信号, 主要通过改变滤波器的设计属性参数, 尽可能的抑制和衰减噪声信号^[7-8]。

锁相放大技术用调制器将直流或低频信号的频谱迁移到调制频率上, 再进行信号放大可减小噪声的不利影响, 然后用相敏检测器对信号进行解调处理。根据锁相放大器的设计特性, 使用低通滤波器抑制噪声时, 调制频率无法影响低通滤波器的频带宽度, 因此在稳定性方面低通滤波器相较于带通滤波器更具有优势^[9-10]。

其中锁相放大技术在内阻检测领域应用最广泛, 它于 20 世纪 30 年代首先被提出, 并且迅速进入到商业化的应用阶段, 得到广泛发展。基于锁相放大技术的锁相放大器能够在噪声环境中准确提取信号幅值和相位信息。以锁相放大器为例进行分析, 它采用零差检测方法和低通滤波技术, 在测量信号时, 引入与测量信号相同的频率的参考信号, 然后可以提取以参考频率为中心的指定频带内的信号, 最

收稿日期:2018-09-05; 修回日期:2018-09-21。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307184)。

作者简介:司 伟(1994-),男,四川营山人,在读研究生,主要从事装备电气性能测试与智能化系统方向的研究。

冯长江(1963-),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事装备电气性能测试与智能化系统方向的研究。

后通过低通滤波器能有效滤除所有频率分量，得到需要提取信号的直流分量。但是法基于硬件电路，能在噪声和干扰环境下分辨出内阻信号，然而该方法具有结构复杂，成本高昂和操作复杂等缺点。

为此，文献 [1] 提出了一种特征分解谱估计蓄电池内阻检测方法，该方法是一种软件设计方法。在考虑信号已知特性后，将样本分为信号子空间和噪声子空间两部分，通过一个频率估计函数来确定在不同噪声背景下的对应幅值和功率，能很好提取有用微弱信号。然而该方法只对 Randles 模型的阻抗谱幅值部分进行分析，没有得到信号相位的估计值，不能辨识出 Randles 模型中电感和电容信息。

针对以上问题，本文提出一种延拓相关原理的蓄电池微弱信号参数提取软件算法，该算法不仅能检测信号幅值和相位信息，同时降低噪声干扰对信号提取的影响，并且实验验证了算法的有效性和可靠性。其中文献 [2] 将相关算法运用到信号相位检测上，并根据算法中的非整周期积分带来的误差项提出了修正措施。

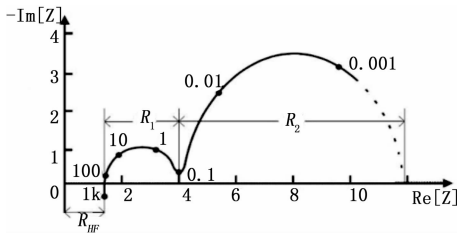


图 1 蓄电池 Randles 模型电化学阻抗谱

1 延拓相关算法

1.1 相关检测原理基本概念

相关检测原理的本质是微弱信号提取，相关检测原理以随机过程和信息论为基础，利用信号具有周期性，而噪声是随机的、前后没有相关性，通过对目标信号用确定的函数表示，选择与目标信号有相同频率的参考信号进行乘法积分运算可以达到去除噪声的效果，广泛应用在通信、光学、声学、自动控制和振动分析等领域。根据这一特性，相关检测原理在算法设计和硬件实现方面都取得显著成果。

设两路同频信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 如式 (1) 所示，其中 A 、 B 表示信号幅值， θ_1 、 θ_2 表示信号初相位， N_1 (1) N_2 (2) 表示叠加在两路信号的噪声。

$$\begin{cases} x(t) = A \cos(\omega t + \theta_1) + N_1(t) \\ y(t) = B \cos(\omega t + \theta_2) + N_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

噪声信号与有效信号相关性较小，相关算法能较好地抑制与有效信号不相关的各种形式噪声，对其进行相关运算可得：

$$\begin{cases} R_{xy} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t) dt = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ R_{xx} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t) dt = \frac{A^2}{2} \\ R_{yy} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t) dt = \frac{B^2}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中， R_{xy} 、 R_{xx} 、 R_{yy} 分别表示两个相关函数相乘积分的结果， T 为信号周期，可知在经过整周期相关运算后，对噪声信号 N_1 (1) N_2 (2) 有很大滤除效果。

1.2 误差分析

由于相关算法是基于整周期积分，在实际条件中，受到滤波后出现的瞬态效应以及非整周期采样对信号的影响，积分区间不为整周期。设积分区间 $(0, T + \Delta T)$ ，进行相关运算，如式 (3) 所示：

$$R_{xy} = \frac{1}{T + \Delta T} \int_0^{T + \Delta T} x(t)y(t) dt = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2\omega(T + \Delta T)} \cos(\omega\Delta T + \theta_1 + \theta_2) \sin(\omega\Delta T) \quad (3)$$

式 (3) 相比式 (2) 可知，积分区间非整周期会带来误差项。同理， R_{xx} 和 R_{yy} 的非整周期积分相关运算也存在误差，分别为：

$$\begin{cases} \frac{AB}{2\omega(T + \Delta T)} \cos(\omega\Delta T + \theta_1 + \theta_2) \sin(\omega\Delta T) \\ \frac{A^2}{2\omega(T + \Delta T)} \cos(\omega\Delta T + 2\theta_1) \sin(\omega\Delta T) \\ \frac{B^2}{2\omega(T + \Delta T)} \cos(\omega\Delta T + 2\theta_2) \sin(\omega\Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

将 R_{xy} 、 R_{xx} 、 R_{yy} 离散化后， $E\{R_{xy}\}$ 、 $E\{R_{xx}\}$ 、 $E\{R_{yy}\}$ 期望值可以表示为：

$$\begin{cases} \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) + \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_1) + \frac{A^2}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_2) + \frac{B^2}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \end{cases} \quad (5)$$

综上所述，当积分区间与采样周期不匹配时，式 (5) 的前半部分不为 0，存在较大误差。

1.3 基于自回归模型数据延拓理论

为了消除滤波和非整周期采样对信号失真的影响，让信号整周期积分，通过基于自回归模型的数据延拓研究，能较好解决该问题。

其中自回归模型简称 AR 模型，是统计上一种处理时间序列的方法，用同一变量之前各期的不同值，然后根据以前记录值来预测本次变量最大概论出现的值，因此自回归模型的函数变化关系只是用来预测自己，而不是用来预测其它参数变量，顾名思义叫做自回归模型。基于自回归模型的回归分析是从线性回归发展而来，并且被广泛运用在经济学、信息学、自然现象的预测上。自回归模型具有如下优点：

1) 在用回归分析法分析多因素模型时，更多研究单一变量的各自变化，减少对变量间关系的考虑，因此更加简单和方便；

2) 自回归模型的客观性较强，运用回归模型，只要采用的模型和数据相同，按照标准的数学分析方法就可以计算出唯一的结果。

设信号 $s(n)$ 的自回归模型表示为：

$$\begin{cases} s(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k) + Gu(n) \\ H(z) = \frac{G}{A(z)} = \frac{G}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \end{cases} \quad (6)$$

它的输出是当前输入和模型过去 p 个输出的加权之和, $u(n)$ 是噪声, p 是模型的阶数, a_k 为预测系数, 预测的 $s(n)$ 表示为:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-i) \quad (7)$$

其中: $s(n)$ 和 $\hat{s}(n)$ 的偏差称为预测误差, 表示为:

$$e(n) = s(n) - \hat{s}(n) \quad (8)$$

由于 $s(n)$ 的过去值来估计当前值为线性预测, 为使预测平方误差和最小, 需要满足:

$$E = \sum_n e^2(n) = \sum_n [s(n) - \hat{s}(n)]^2 = \sum_n [s(n) - \sum_{i=1}^p a_i s(n-i)]^2 \quad (9)$$

式中, E 对 a_i 的偏微分应为 0, 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_j} &= 2 \sum_n s(n)s(n-j) - 2 \sum_{i=1}^p a_i \sum_n s(n-i)s(n-j) = 0 \\ \sum_n s(n-i)s(n-j) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

在定义 $\phi(j, i)$ 后, 用 $\phi(j, i) = \sum_n s(n-j)s(n-i)$ 代替, 可以将式 (10) 简写成:

$$\sum_{i=1}^p a_i \phi(j, i) = \phi(j, 0) \quad (11)$$

最后, 最小均方误差可以表示成:

$$E = \phi(0, 0) - \sum_{i=1}^p a_i \phi(0, i) \quad (12)$$

可知最小误差由固定分量和预测器系数分量组成, 为了求解预测器系数, 通过求出 $\phi(j, i)$, 利用式 (11) 即可求出预测系数 a_i , 但是 $\phi(j, i)$ 的求解过程十分复杂, 首先通过 $s(n)$ 的自相关函数:

$$r(j) = \sum_{n=0}^{N-1-j} s(n)s(n-j), 1 \leq j \leq p \quad (13)$$

利用 $\phi(j, i) = r(j-i)$ 的关系式将最小均方误差表示为:

$$E = r(0) - \sum_{i=1}^p a_i r(i) \quad (14)$$

转化成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & r(2) & \cdots & r(p-1) \\ r(1) & r(0) & r(1) & \cdots & r(p-2) \\ r(2) & r(1) & r(0) & \cdots & r(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p-1) & r(p-2) & r(p-3) & \cdots & r(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ r(3) \\ \vdots \\ r(p) \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后利用递推方法可以估算出预测系数 a_i 。利用自回归模型中预测系数 a_i 来延拓, 能使延拓后信号波形中原信号边界到两侧两个点有相同频率, 保留了原信号的变化趋

势, 不会增加新的频率特征。

2 延拓相关算法应用分析

2.1 数据延拓流程图

设采样数据:

$$[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{N-1} \ x_N] \quad (16)$$

信号采样周期和积分周期进行估计判断, 假设信号周期估计结果为采样点数 P , 积分整周期点数为 N , N 除以 P 的余数为 k , 余数为 m 。当 m 为 0 时则不需要处理, 当 m 不为 0 时, 则未达到积分整周期, 进行数据延拓, 补充数据点:

$$[x_{(k-1)p+m+1} \ \cdots \ x_{kp}] \quad (17)$$

形成新的整周期采样信号:

$$[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{N-1} \ x_N \ x_{(k-1)p+m+1} \ \cdots \ x_{kp}] \quad (18)$$

解决了相关长度与信号周期不匹配的问题, 该方法实现流程如图 2 所示。

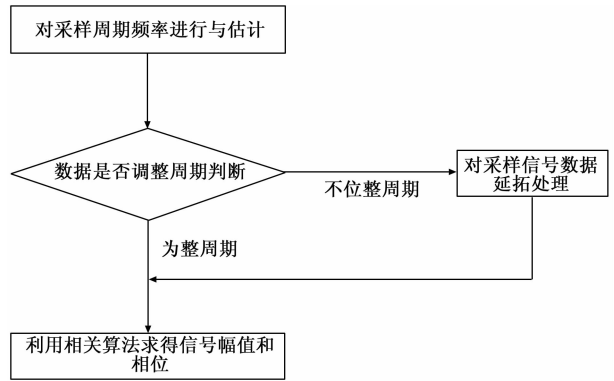


图 2 数据延拓算法流程图

2.2 相关算法流程图

将延拓相关算法应用到蓄电池内阻测试系统中, 求取内阻幅值和相位信息。通过相位差 90° 的正交参考信号, 能较大程度减小随机性的相位误差, 提高测量精度, 为了得到蓄电池准确幅值和相位信息, 然后进行其如图 3 所示的算法流程。

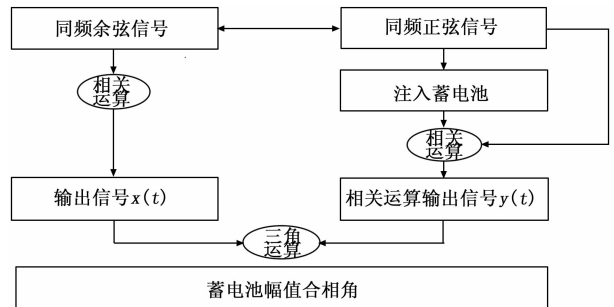


图 3 蓄电池内阻相关算法原理框图

2.3 和函数计算步骤

离散后同频参考信号 $x(n)$ 、 $y(n)$, 离散化后如式 (19) 所示:

$$\begin{cases} x(n) = \cos(\omega n) \\ y(n) = \sin(\omega n) \end{cases} \quad (19)$$

蓄电池为非线性系统，将 $y(n)$ 注入电池后输出信号离散化为 $z(n)$ ：

$$z(n) = A \sin(\omega n + \theta) + N(n) \quad (20)$$

进行相关运算后，得：

$$\begin{cases} R_{xz} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n)z(n) \\ R_{yz} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(n)z(n) \end{cases} \quad (21)$$

上述推导经过三角函数和差公式，得：

$$\begin{cases} A = \sqrt{R_{xz}^2 + R_{yz}^2} \\ \theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{R_{yz}}{R_{xz}} \end{cases} \quad (22)$$

其中：式 (19) 为电流信号，式 (20) 是电压信号，由欧姆定理可知 A 为内阻幅值信号， θ 为内阻相位信号，结合图 1 的模型可辨识出蓄电池内阻参数，包括电阻、电容和电抗。

3 延拓相关算法实验

结合上述原理推导可知，本文研究工作以同频正弦弦输入离散信号为基础，经过蓄电池系统后，提取离散输出电压信号在噪声和干扰背景下中的内阻信息，如式 (23) 所示：

$$u(t) = U \cos(2\pi ft + \theta_1) + N_1(t) \quad (23)$$

以所测信号幅值 $U=200 \text{ mV}$ ， $f=100 \text{ Hz}$ 为例，有：

$$u(t) = 200 \cos(200\pi t + \theta_1) + N_1(t) \quad (24)$$

3.1 数字滤波器设计

数字滤波器是一个离散时间系统，使用数字滤波器时应注意对输入模拟信号进行限带、抽样和模数转换，并且输入信号的数字频率，按照奈奎斯特抽样定理，要使抽样信号的频谱不产生重叠。数字滤波器在各个领域得到广泛应用，包括语言信号处理、图像信号处理、医学生物信号处理等。按照频率划分，数字滤波器有低通、高通、带通、带阻和全通等类型，按照其它方式划分，它可以分为时不变的或时变的、因果的或非因果的、线性的或非线性的，其中应用最广的是线性、时不变数字滤波器。

在对信号采样后，输出信号中有工频干扰和高次谐波等非高斯白噪声，因此除了激励信号频率 100 Hz 外，其他频率可以看成噪声。需要通过设计相应滤波器，选择信号通过滤波器后频率成分的幅值和相位变化。根据 Matlab 信号处理工具箱提供的滤波器函数，采用巴特沃斯带通滤波器，调用格式为 $[n, Wn] = \text{buttord}(Wp, Ws, Rp, Rs)$ ， n 为滤波器阶数， Rp 表示带通纹波最大衰减， Rs 表示阻带纹波最小衰减， Wn 表示归一化截止频率， Wp 为通带频率， Ws 为阻带频率，仿真程序参数设置如下：

$$Wp = [60 \ 200] / 500;$$

$$Ws = [50 \ 250] / 500;$$

$$Rp = 3;$$

$$Rs = 40;$$

图 4 为设计的让 100 Hz 信号通过的巴特沃斯滤波器幅频和相频特性曲线。可知 100 Hz 采样滤波信号在经过数字滤波器后可以分辨工频、高频干扰。

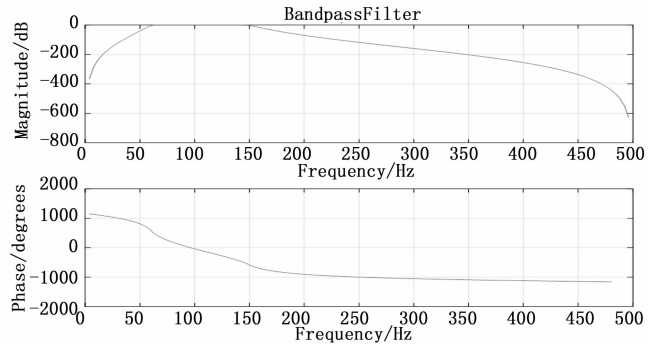


图 4 滤波器幅相频特性曲线

3.2 数据延拓处理

信号通过数字滤波器后有瞬态效应，使有限长信号输出失真，又可知信号非整周期采样时也会造成测量数据误差较大，结合自回归模型，对信号进行数据延拓。自回归系数可以用 MATLAB 自带的 lpc 函数，调用形式 $ar = \text{lpc}(x, p)$ ，其中 p 是自回归阶数， ar 是自回归系数，也称预测系数。通过对检测信号分析，找到失真信号与标准信号序列差值，用已有预测系数预测数据，主要程序如下：

```
ar1=lpc(x,p);
yy=zeros(M,1);
yy=[yy;x(1:p)];
for l=1:M
    for k=1:p
        yy(M+1-l)=yy(M+1-l)-yy(M+1-l+k)*ar1(k+1);
    end
    yy(M+1-l)=real(yy(M+1-l));
end
y=yy(1:M);
```

以 100 Hz 采样滤波信号为例进行实验，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，经过延拓输出的信号相较于未进过延拓输出的信号相较于原始信号对比，重合度更高。可以知道通过对信号采样滤波能选择所需频带信号通过，会让待测信号一定程度失真，通过数据延拓能很好减少失真。

3.3 数据相关算法处理

数据延拓处理后，对于复杂环境和仪器产生的加性高斯白噪声，利用相关原理进行处理析，图 6 为分别在信噪比为 5 db, 10 db, 20 db 和 40 db 的环境下形成的原始信号。

利用相关原理，将原始信号相关算法处理得到的新信号如图 7 所示。

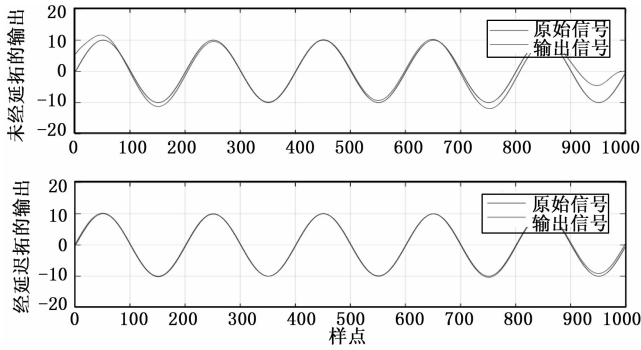


图 5 延拓处理前后信号拟合度对比

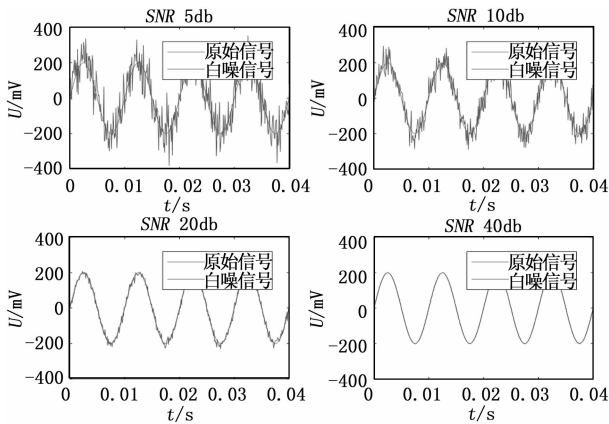


图 6 不同信噪比下原始信号

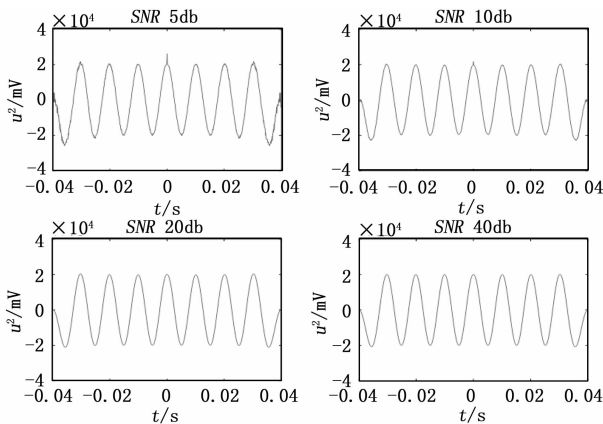


图 7 不同噪声背景下相关算法计算结果

由图 7 可知利用相关原理对高斯白噪声有很好的滤除效果。

3.4 不同噪声背景延拓相关算法计算结果

取 100 Hz 参考信号注入蓄电池, 采样滤波输出信号, 实际检测到幅值 200 mV, 相位 5°。

再让实际采样信号在不同噪声背景下进行延拓相关运算。调用 Matlab 中定积分函数 $m = trapz(t, r)$ 函数, 其中 t 为自己设定定积分区间, r 为正弦参考信号和待测响应信号相关运算输出函数。同理设为余弦参考信号与待测响应信号相关运算输出函数, 代入函数 $n = trapz(t, r')$ 。通

过式 (22) 计算内阻幅值和相位信息, 内阻幅值和相位检测结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 当信噪比 5 db 以上时, 幅值信号误差在 1.57% 以内, 相位误差在 2.37% 以内。设计的延拓相关算法能较好滤除噪声和干扰, 较准确估计幅值和相位信息。

表 1 不同信噪比下幅值和相位检测结果

信噪比/db	测量幅值/mV	误差/%	测量相位/(°)	误差/%
5	203.1400	1.57	5.1185	2.37
10	200.2207	0.11	5.0635	1.27
15	199.3705	0.31	4.9109	1.78
20	199.5318	0.23	5.1424	2.85
25	200.4404	0.22	4.9140	1.72
30	199.6002	0.20	5.0355	0.71
35	199.9377	0.03	4.9606	0.79
40	200.1013	0.05	5.0316	0.63

4 结语

本文设计了一种针对蓄电池内阻微弱信号提取的延拓相关算法。通过采样、滤波和数据延拓相关处理, 可以很好滤除噪声和干扰。通过实验分析, 该方法幅值和相位计算值准确度较高, 可以替代蓄电池内阻检测硬件环节, 简化硬件电路, 降低系统硬件成本。

参考文献:

- [1] 唐骏宇, 冯长江. 基于特征分解谱估计的蓄电池内阻检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 37-40.
- [2] 沈廷鳌, 涂亚庆, 刘翔宇, 等. 基于相关原理的非整周期信号相位差测量算法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (9): 2153-2160.
- [3] 沈艳林, 涂亚庆, 刘 鹏, 等. 非整周期采样信号频率估计的相频匹配方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (6): 1221-1226.
- [4] 田 蕊. 基于现代信号处理的铅酸蓄电池内阻检测 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] 沈廷鳌, 涂亚庆, 李 明, 等. 数据延拓式相关的相位差测量方法及验证 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (6): 1331-1337.
- [6] 王 静, 李忠科. 25 Hz 相敏轨道电路相位差测量非整周期采样误差校正算法 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (S1): 374-376.
- [7] 李运涛, 曹建刚, 董志强, 等. 蓄电池内阻检测方法研究与实现 [J]. 火炮发射与控制学报, 2012 (4): 59-62.
- [8] 邓 荣, 江国栋. 高质量抑制噪声的便携式蓄电池内阻测试仪 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (9): 105-108.
- [9] 温 巍, 胡绍海. 基于正弦波扫描激励的铅酸电池内阻分析 [J]. 电池, 2012, 42 (4): 223-224.
- [10] Khan M R, Mulder G, Van Mierlo J. An online framework for state of charge determination of battery systems using combined system identification approach [J]. Journal of Power Sources, 2014, (246): 629-641.