文章编号:1674-2974(2024)06-0159-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024235

基于新型改进矩阵束的便携式电网同步相量测量装置

唐求 ,李琛恭†,花金辉 ,黄潇
(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对传统同步相量算法受电网间谐波影响较大的问题,本文提出了一种基于新型改进矩阵束的电网同步相量测量算法.将电网信号构建成Hankel矩阵,对其进行奇异值分解并使用自适应定阶方法滤除其中的噪声干扰分量,通过矩阵运算得到准确的电压幅值、频率及相角.经过仿真验证,本算法对含有间谐波分量的电网信号测量结果优于流行的傅里叶变换测量算法.并根据此算法设计了一款便携式电网同步相量测量装置,可解决传统同步相量测量设备体积庞大、成本较高的问题,利用高精度卫星同步信号监测晶振实际频率,动态调整采样控制参数降低采样时间误差,将同步采样的电网波形参数与时间标签等无线传输至移动终端,完成电网信号幅值、频率及相角计算.实际测试表明,本装置具有较高的测量精度,其中电压幅值、频率和相角测量误差分别为0.038 5%、0.000 51 Hz和0.053 7°,满足《电力系统同步相量测量装置检测规范》(GB/T 26862—2011),具有较强的实际应用价值.

关键词:电网同步相量测量;矩阵束;移动终端;间谐波;便携式装置
中图分类号:TH89 **文献标志码**:A

Portable Grid Synchrophasor Measurement Device Based on New Improved Matrix Pencil

TANG Qiu, LI Chengong†, HUA Jinhui, HUANG Xiao
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Because the traditional synchronized phasor algorithm is greatly affected by the intermediate harmonics of the power grid, this paper proposes a synchronized phasor measurement algorithm based on a newly improved matrix bundle. The power grid signal is constructed into a Hankel matrix, which is decomposed into singular values, and the noise interference components are filtered out using an adaptive order determination method. The accurate voltage amplitude, frequency and phase angle are obtained through matrix operation, and the simulation results show that this algorithm is superior to the traditional recursive Fourier transform algorithm in measuring power grid signals containing interharmonic components. A portable power grid synchronous phasor measurement device is designed to solve the problem of large volume and high cost of traditional synchronous phasor measurement equipment. The actual frequency of the crystal oscillator is monitored by high-precision satellite synchronous signal, and the sampling control parameters are dynamically adjusted to reduce the sampling time error.

* **收稿日期**:2023-09-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177078), National Natural Science Foundation of China(52177078)
作者简介:唐求(1970—),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:cg.li@hnu.edu.cn

The synchronously sampled power grid waveform parameters and time tags are wirelessly transmitted to mobile terminals to complete the calculation of power grid signal amplitude, frequency and phase angle. The actual test shows that the device has high measurement accuracy, in which the measurement errors of voltage amplitude, frequency and phase angle are 0.038 5%, 0.000 51 Hz and 0.053 7°, respectively, which meets the requirrement of "Test specification for synchrophasor measurement unit for power systems"(GB/T 26862—2011), and has practical application value.

Key words: grid synchrophasor measurement; matrix pencil; mobile terminal; interharmonics; portable device

非线性、冲击性负荷和电力电子设备的不断增加,导致电网扰动问题越来越严重,直接影响公用电网可靠性和安全经济运行[1].电网相量的在线监测与分析是发现电网扰动的前提条件,电网相量测量系统可以在电网侧或用户侧实现电网频率、相角及其他信息的在线监测,实时获得电网参数,是电网监测的有效手段[2-3].

早期的同步相量测量主要使用过零点检测方法,该方法对硬件装置要求较低且易于实现,但受电网中的谐波及噪声影响,测量误差较大[4].在后续的研究中,卡尔曼滤波器法[5]、最小二乘法[6]等相继应用于同步相量测量.其中卡尔曼滤波器法计算量较大,对硬件要求较高,工程实现代价大;最小二乘法计算精度较高,但随着测量数据量的增加计算复杂度剧增.因此二者在工程中应用均受限.目前相量测量设备大多采用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)算法[7].文献[8]推导了非同步采样下DFT所产生的相角误差,利用相角误差对频率进行跟踪,得到更高精度的频率值.文献[9]利用DFT对测量信号进行稀疏化,以Dirichlet矩阵为观测矩阵,通过压缩传感重构测量信号,提升了传统DFT算法的测量精度.文献[10]利用递归傅里叶变换(Recursive DFT, RDFT)简化DFT的计算量,通过最小二乘估计法对相角序列进行多项式拟合计算信号得到频率估计值,对原始采样序列进行重采样并迭代计算频率二次估计值,提高了频率的测量精度.

基于DFT的电网相量测量算法具有良好的抗谐波能力和较高的计算效率,但由于非整周期采样下的频谱泄露影响,此类算法在间谐波或带外干扰存在时性能较差[11-12],而间谐波是最常见的电力污染之一[13],有效的相量测量方法应该进一步发展,以提供更高的检测准确性和鲁棒性.

在完成相量测量后,相应的硬件装置需要被部署以满足实际的工程需求.目前广泛使用的基于DFT的同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)[14]大多依赖数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)进行数据运算[15-16],导致传统同步相量测量装置具有体积庞大、价格较高、安装复杂、不适合大面积配置等缺点,无法满足当前智能电网大面积配置的要求[17].

为解决上述问题,本文首先提出一种基于新型改进矩阵束的电网相量测量方法,将电网信号构建成Hankel矩阵,并进行奇异值分解,使用自适应定阶方法,滤除信号中的干扰信号,可显著降低间谐波对电网同步相量测量的影响,从而得到准确电网参数.对于硬件测量装置的设计,本文采用具有可移植性高、性能强等优点的Android移动终端实现电网相量测量中的数据处理,配合以高性能微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)STM32F407为核心的处理电路实现电压数据的采集与发送,可节约硬件成本,减小装置体积,提升数据处理速度.

此外,为解决晶振频率可能出现偏移[18]、引起采样时间误差的问题[19],利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)提供的误差在100 ns以内的高精度秒脉冲(Pulse Per Seconds, PPS)信号[20],监测晶振实际频率,实现变间隔同步采样,并触发逐次比较型模数转换器[21](Successive Approximation-Analog to Digital Converter,SAR-ADC)实现电网信号的同步采样,从而降低采样误差.最后,在仿真验证本文新型改进矩阵束有效性的基础上,将其植入移动终端,该终端可利用蓝牙、Wi-Fi实现与MCU之间的数据传输,解决传统有线连接传输距离受限以及布线困难等问题,方便数据传输[22],可有效完成实际应用中

的电网相量测量任务,具有较强的实际应用价值.

1 基于新型改进矩阵束的相量测量算法

1.1 同步相量定义

同步相量即以时间信号作为采样过程的基准,通过对采样数据计算而得到的相量数据.因此,电力系统电气信号模拟量的相量之间存在确定的相位关系.设模拟信号为:

$$y(t) = A_{\mathrm{m}} \cos(\omega t + \theta) \tag{1}$$

式中:A_{m}为幅值;ω为角频率;θ为相角.式(1)可以被表示为相量形式,即:

$$\boldsymbol{A} = \left(A_{\mathrm{m}}/\sqrt{2}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta} \tag{2}$$

如图1所示,当$y(t)$的最大值与秒脉冲1 PPS同步时,同步相位角为0°;当$y(t)$正向过零与秒脉冲1 PPS同步时,同步相位角为-90°.

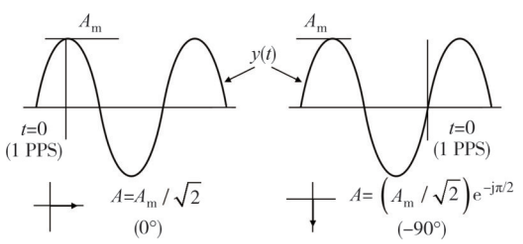


图1　波形信号与同步相量的转化关系

Fig.1　Convention for synchrophasor representation

1.2 新型改进矩阵束同步相量测量算法

复杂电网信号可以看作由M个余弦分量和噪声信号组成:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{M} A_i \mathrm{e}^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) + n(t) \tag{3}$$

式中:M为余弦分量的个数;A_i为幅值;α_i为衰减因子;f_i为频率;θ_i为相位;$n(t)$为噪声信号.对式(3)进行欧拉变换并化简后得到离散采样信号:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{M} p_i z_i^{k\Delta t} \tag{4}$$

式中:$0 \leqslant k \leqslant N-1$,$N$为信号$y(t)$的采样点数;$p_i = A_i \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta}$代表采样信号的留数信息;$z_i = \mathrm{e}^{z_i + \mathrm{j}w_i}$表示极点信息,其中$\omega_i = 2\pi f_i$为角频率.

通过采样数据$y(k\Delta t)$构造出Hankel矩阵$\boldsymbol{Y}$:

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L)\times(L+1)} \tag{5}$$

式中:L为矩阵束参数,一般选取$N/4 \leqslant L \leqslant N/3$.

对矩阵$\boldsymbol{Y}$进行奇异值分解:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{U}$为$(N-L)\times(N-L)$的正交矩阵;$\boldsymbol{V}$为$(L+1)\times(L+1)$正交矩阵;$\boldsymbol{S}$为$(N-L)\times(L+1)$对角阵,主对角元素σ_i为$\boldsymbol{Y}$的奇异值.

对于理想的M阶信号,有$\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \cdots \geqslant \sigma_M \geqslant 0$,且其余奇异值均为零;对于含噪声信号,其余特征值可能因噪声的干扰变为非零值.对此,本文提出一种新型改进矩阵束算法,自适应判断奇异值矩阵阶数,消除因干扰变为非零值的奇异值,有效降低噪声对测量结果的影响.

依据奇异值在某点处会发生突变的现象[23],可以求出σ_i的对数值w_i,即

$$w_i = \lg \sigma_i \tag{7}$$

再定义相邻对数值之差:

$$D_j = w_j - w_{j+1}, j = 1, 2, \cdots, i-1 \tag{8}$$

当相邻奇异值产生突变,则相邻奇异值的数量级会发生较大变化,D_j也会取得相应的较大值,定义D_j取最大值时的下标作为模型的阶数M_0,即:

$$\max\left(D_j\right) = D_{M_0} \tag{9}$$

将对应$i > M_0$的奇异值σ_i全部置零,得到新的奇异值矩阵$\boldsymbol{S}'$,计算出频率成分数量为M_0,即:

$$\boldsymbol{S}' = [\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_{M_0}, 0, \cdots, 0] \tag{10}$$

此时取出$\boldsymbol{V}$矩阵中前M_0个右奇异向量构成$(L+1)\times M_0$矩阵$\boldsymbol{V}'$,删去$\boldsymbol{V}'$的最后一行得到$\boldsymbol{V}_1$,删去$\boldsymbol{V}'$的第一行得到$\boldsymbol{V}_2$,生成$\boldsymbol{Y}_1$和$\boldsymbol{Y}_2$:

$$\begin{cases} \boldsymbol{Y}_1 = \boldsymbol{U}\boldsymbol{S}'\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{Y}_2 = \boldsymbol{U}\boldsymbol{S}'\boldsymbol{V}_2^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{11}$$

其中,$\boldsymbol{Y}_1$和$\boldsymbol{Y}_2$可分别表示为:

$$\boldsymbol{Y}_1 = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-2) \end{bmatrix}_{(N-L)\times L} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{Y}_2 = \begin{bmatrix} y(1) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(2) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L)\times L} \tag{13}$$

通过构造矩阵束$\boldsymbol{Y}_2 - \lambda\boldsymbol{Y}_1$,$z_i$为$\boldsymbol{Y}_2 - \lambda\boldsymbol{Y}_1$的广义特征值,将求解$z_i$的问题转化为求解$\boldsymbol{Y}_2 - \lambda\boldsymbol{Y}_1$广义特征值的问题,对上述极点信息的求取转化为求解

式(14)特征值的过程为:

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{Y}_1^{+}\boldsymbol{Y}_2=\left\{\boldsymbol{Y}_1^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Y}_1\right\}^{-1}\boldsymbol{Y}_1^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Y}_2 \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{Y}_1^{+}$为$\boldsymbol{Y}_1$的伪逆矩阵;$\boldsymbol{Y}_1^{\mathrm{H}}$为$\boldsymbol{Y}_1$的共轭转置矩阵.

获得z_i与M_0后,留数p_i可利用最小二乘法的线性方程组计算得到:

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_{M_0} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_{M_0}^{N-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{M_0} \end{bmatrix} \tag{15}$$

由式(15)可求解出信号中各模态分量的幅值、相位及频率:

$$\begin{cases} A_i=\left|p_i\right| \\ \theta_i=\arctan\left[\mathrm{Im}(p_i)/\mathrm{Re}(p_i)\right] \\ f_i=\arctan\left[\mathrm{Im}(z_i)/\mathrm{Re}(z_i)\right]/(2\pi\Delta t) \end{cases} \tag{16}$$

综上,本文提出的新型改进矩阵束同步相量测量算法流程图如图2所示,首先将所采集电网信号构建成Hankel矩阵,对其进行奇异值分解,然后使用自适应定阶方法滤除噪声分量,最终通过矩阵运算得到电压幅值、频率及相角.

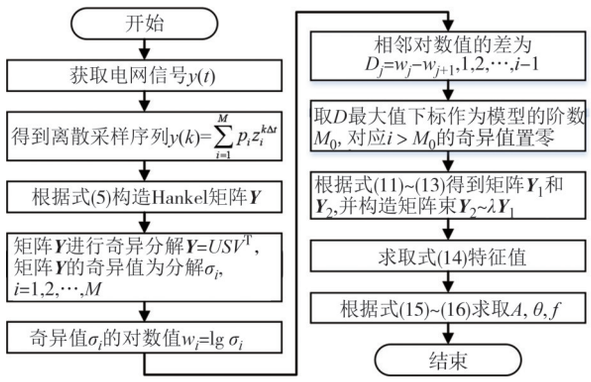


图2 新型改进矩阵束同步相量测量算法流程

Fig.2 New improved matrix bundle synchronous vector measurement algorithm flowchart

1.3 算法仿真实验

为验证本文算法的优越性,利用MATLAB分别生成信噪比为60 dB的50 Hz标准电网信号、三次谐波、含有幅值大小为基波幅值10%的50.5 Hz、51 Hz、52 Hz以及55 Hz间谐波信号,对本文提出的新型改进矩阵束同步相量测量算法进行仿真测试,并与传统矩阵束算法、文献[10]算法进行对比,结果如表1所示.

表1 频率测试结果

Tab.1 Frequency test results

检验条件/Hz	本文算法		传统矩阵束算法		文献[10]算法	
	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差
50	2.2×10^{-8}	2.66×10^{-5}	2.53×10^{-7}	2.83×10^{-5}	3.04×10^{-8}	2.34×10^{5}
50.5	3.69×10^{-5}	2.05×10^{-2}	4.69×10^{-5}	2.51×10^{-2}	8.15×10^{-4}	5.48×10^{5}
51	2.56×10^{-4}	3.83×10^{-3}	1.70×10^{-3}	1.10×10^{-1}	1.80×10^{-3}	1.05×10^{5}
52	4.75×10^{-5}	1.16×10^{-3}	2.60×10^{-3}	2.20×10^{-1}	3.19×10^{-3}	2.01×10^{5}
55	1.08×10^{-5}	1.94×10^{-4}	8.60×10^{-4}	5.56×10^{-2}	4.17×10^{-4}	1.60×10^{5}

由表1可见,在不同情况下,本文算法频率测量最大误差均小于2.05×10^{-2} Hz,平均误差均小于2.56×10^{-4} Hz,满足《电力系统同步相量测量装置检测规范》(GB/T 26862—2011)(下文简称规范)要求,且对偏离工频及含有间谐波分量电网信号的频率测量精度高于传统矩阵束算法和文献[10]算法,证明了本文算法在动态测量情况下的优越性.如图3~图4所示,使用本文算法分别与文献[10]算法、传统矩阵束算法测量含55 Hz间谐波分量的50 Hz工频信号比较,可见本文算法频率测量稳定性明显优于文献[10]算法和传统矩阵束算法.在完成向量检测后需要对硬件装置进行更加便携和紧凑化设计.

为验证本文算法在噪声环境下测量精度影响,利用MATLAB分别生成含谐波和简谐波分量的不同

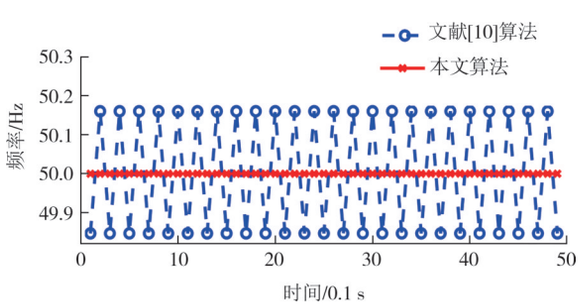


图3 本文算法与文献[10]算法测量频率结果对比

Fig.3 Comparison of the measurement frequency results between this algorithm and the literature [10] algorithm

电网模拟信号后进行仿真分析,如表2所示,本文算法频率测量最大误差均小于5.50×10^{-2}量级,平均误差均小于1.08×10^{-5}量级,受噪声干扰,精度略有下降,但精度依然满足规范要求.

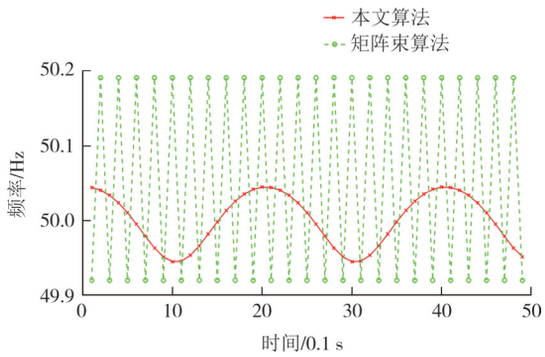


图 4　本文算法与原始矩阵束算法测量频率结果对比

Fig.4　Comparison of the measurement frequency results between this algorithm and Traditional MP algorithm

表 2　本文算法噪声仿真实验结果(信噪比 60)

Tab.2　Noise simulation experiment results of this algorithm (SNB=60)

检验条件	最大误差/Hz	平均误差/Hz
2 次谐波	2.47×10^{-5}	1.10×10^{-6}
6 次谐波	2.37×10^{-5}	1.17×10^{-6}
10 次谐波	2.79×10^{-5}	1.03×10^{-6}
14 次谐波	2.27×10^{-5}	1.18×10^{-6}
18 次谐波	2.53×10^{-5}	1.13×10^{-6}
含 49.5 Hz 间谐波	5.50×10^{-2}	9.20×10^{-7}
含 55 Hz 间谐波	1.94×10^{-4}	1.08×10^{-5}
含 65 Hz 间谐波	2.57×10^{-5}	2.40×10^{-6}
含 75 Hz 间谐波	2.68×10^{-5}	1.28×10^{-6}
含 125 Hz 间谐波	2.38×10^{-5}	9.52×10^{-7}

2　便携式电网同步相量测量装置设计

2.1　硬件单元设计

本文中便携式电网同步相量测量装置主要由稳压模块、电压调理模块、模数转换器 AD7606、蓝牙模块 HC-05、GPS/北斗模块 ATK1218 以及基于 Android 系统的移动终端等组成,系统硬件框图如图 5 所示.其中稳压模块负责将输入电压转换为各模块需要的电压进行供电;最小系统控制电路实现电网数据采集和发送;信号调理电路完成电压转换并使用滤波器抑制高频噪声;模数转换模块通过 SPI 通信与 MCU 进行双向通信;时间同步单元完成信号触发和外部中断同步采样;最终通过蓝牙通信将数据送到移动测量终端.便携式电网同步相量测量装置实物图如图 6 所示,该装置设计紧凑、集成,结合移动终端,使电网相量数据传输、计算和观察更加方便.

稳压模块将输入电压源信号转换为±9 V、5 V 与

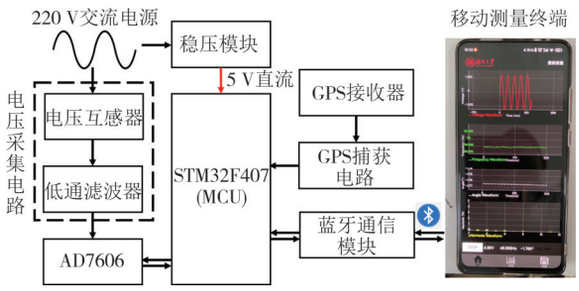


图 5　装置硬件设计

Fig.5　Hardware circuit design

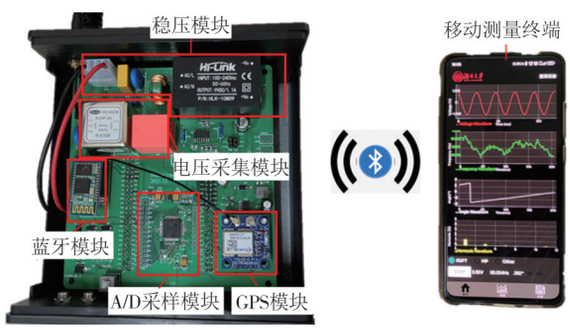


图 6　便携式硬件装置实物图

Fig.6　Picture of portable hardware device

3.3 V 直流输出为硬件各模块供电,使用芯片型号与转换示意如图 7 所示.其最小系统板采用基于 STM32F407 的采集电路控制单元用于控制其他模块功能及电网数据采集和发送.

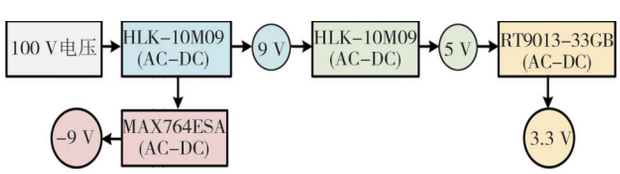


图 7　稳压模块示意图

Fig.7　Schematic diagram of voltage stabilizing module

电压采集电路包括微型精密电压互感器和低通滤波器两部分,220 V 交流电压通过电压互感器转换为±5 V 范围的交流电压,经低通滤波器有效抑制高频噪声.如图 8 所示.输入电压 V_{in} 经采集电路,其输出为:

$$V_{out} = TR \times V_{in} \times \frac{R_2}{R_1} \tag{17}$$

式中:TR 为电流型电压互感器一次绕组与二次绕组的匝数比,TR、R_1 与 R_2 取值分别为 1 kΩ、120 kΩ 与 1.5 kΩ.R_3 与 C_1 构成的低通滤波器截止频率为:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} \tag{18}$$

式中:R_3 与 C_1 分别为 820 Ω、1 μF,截止频率为 194 Hz,选用该截止频率可有效滤除高次谐波干扰.在此条

件下,输出电压约为 $7.55_{\text{p-p}}$,在满足 AD7606 输入范围同时保持了较大电压,提高了测量结果的精度.

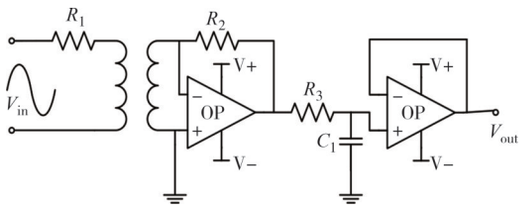


图 8 电压调理电路

Fig.8 Voltage acquisition circuit

GPS 接收器能够接收 PPS 信号,以此触发 MCU 的外部中断,实现同步采样.AD7606 是 16 位 SAR-ADC,可通过SPI接口实现与MCU之间的双向通信,采样率最高可达200 kHz,在保证蓝牙传输数据完整性且所采集电网信息可有效计算出电网参数的前提下,本文设定其采样率为1.2 kHz.蓝牙模块选用高性能主从一体蓝牙串口模块 HC-05,波特率范围为 4 800 bps~1 382 400 bps,本文选用波特率为 115 200 bps,可保证传输的稳定性及足够的传输速率.通过 PPS 信号外部触发 AD7606 进行电压同步采样,以 10 Hz 的速率将采样数据通过 HC-05 发送至移动终端.

2.2 软件设计

2.2.1 同步采样控制方法

同步采样控制过程如图 9 所示.装置的晶振受外界干扰或其他原因可能导致频率出现一定偏移,很难确保实际频率为采样频率的整数倍,需考虑采样时间误差.为此,本文采用变采样间隔方法对采样时间误差进行补偿:通过记录相邻 X 个 PPS 信号之间晶振实际生成脉冲的数量,监测晶振频率.设晶振理想频率为:

$$f_{\text{OSC}} = G \cdot f_{\text{s}} \tag{19}$$

式中:G 为每个采样周期的时钟脉冲数;f_{s} 为采样率.若偏移后的频率为 f'_{OSC},则

$$f'_{\text{OSC}} = \frac{\text{TP}}{X} \tag{20}$$

式中:TP 为在 X 个 PPS 脉冲中实际测得的晶振脉冲数量.

选取最接近 G 的脉冲数 G_1 与 G_2,且满足:

$$G_1 + 1 = G_2 \tag{21}$$

将 G_1 与 G_2 轮流设置为定时器的定时控制间隔,动态调整 AD7606 的采样率,降低采样时间误差.

2.2.2 相量测量软件设计

本文在 Windows 操作系统中进行 Android 软件开发,Android 系统开发环境主要包括 JDK(Java Development Kit)、Android Studio 和 Android SDK(Software Development Kit)三部分.开发语言为 Java 编程语言,使用 Redmi K20Pro(内存 6 GB)作为软件的测试平台,处理器为高通骁龙 855(主频 2.84 GHz).

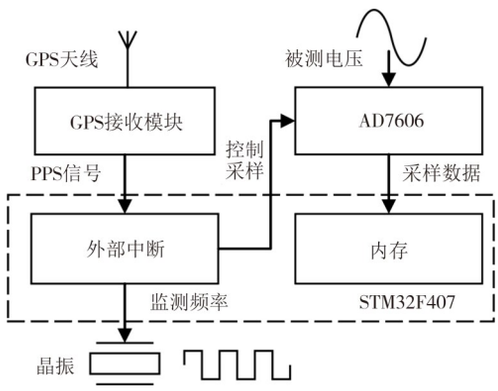


图 9 同步采样过程

Fig.9 Synchronized sampling process

终端通过蓝牙接收 MCU 采集的电网数据与时间标签,利用新型改进矩阵束算法对数据进行计算处理,得到的电压幅值、频率及相角信息,以曲线形式直观展示测量结果.软件功能结构及使用界面如图 10 所示.

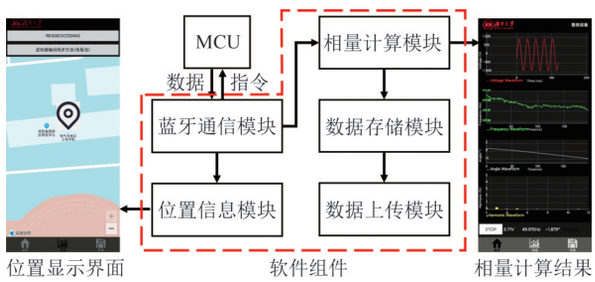


图 10 软件功能结构及使用界面

Fig.10 Software function structure and user interface

2.3 硬件误差分析与修正

电网同步测量系统中,硬件装置误差主要来源于 ADC 量化误差及失调误差.量化误差是一种原理性误差,由于芯片位数有限,量化时进行最低位数确定存在取舍问题;失调误差则是因为模拟输入电压与数字编码对应关系出现偏移,如图 11 所示.硬件装置误差除了选用高性能、高稳定性的元器件降低误差出现概率外,对于失调误差也可通过平移转换函数 X 轴进行修正.硬件装置采集不同频率点下同步相量数据,对数据进行多次线性拟合,通过算法进行修正.

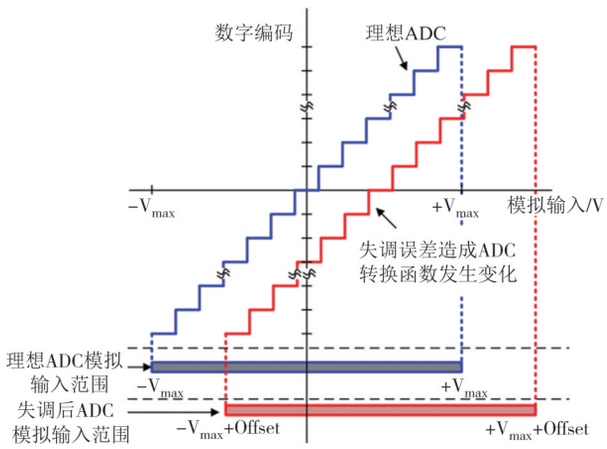


图 11　ADC 失调误差示意图

Fig.11　Schematic diagram of ADC misalignment erro

3　测试结果与分析

同步相量测量装置研制完成后,对其进行测试实验,如图 12 所示.使用 Agilent 33500B 信号发生器产生标准交流电,其频率和相角精度分别为 1 千分率(实验温度 23℃±5℃)和 0.1°,使用 Aigtek-2081 高压放大器放大信号发生器电压.

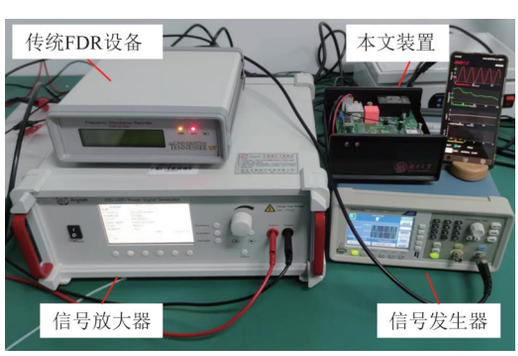


图 12　实验装置

Fig.12　Experimental equipment

分别使用本装置中的变间隔同步采样方式与固定间隔采样方式对信号发生器生成的标准 50 Hz 正弦波进行测量,补偿前后相角测量误差如图 13 所示.可见,变间隔采样后的相角测量误差进一步降低,有效提升了装置的测量精度.

为评估本文装置对实际电网信号幅值、频率和相角测量的准确性,使用传统的频率扰动记录仪[24](Frequency Disturbance Recorder,FDR)与本装置进行对比,该 FDR 内部使用 16 位 ADC.首先,使用信号发生器对本装置的测量结果进行测试.测试过程中,信号发生器与本装置同时接收 GPS 信号进行时间同步,测试后从设备中导出数据进行分析,结果分别如

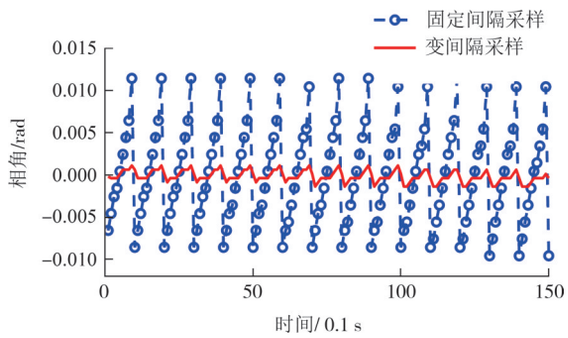


图 13　固定间隔采样和变间隔采样的相角误差

Fig.13　Phase angle measurement results for fixed and variable interval sampling

表 3~表 5 所示.

电压幅值测试时使用高压放大器放大信号发生器电压,额定电压值为 $100/\sqrt{3}$,即 55.74 V,电压基准值为 1.2 倍的额定电压值,即 70 V.由表 3 可见,本装置对幅值测量具有较高的精度,电压幅值测量误差不超过 0.04%,完全满足规范中 0.2% 的要求.

表 3　幅值测试结果

Tab.3　Amplitude test results

输入幅值/V	测量均值/V	电压幅值测量误差/%
46.66	46.652 3	0.010 9
52.50	52.526 9	0.038 5
58.33	58.344 2	0.020 3
64.16	64.182 4	0.031 9
70.00	70.013 0	0.018 6

为测量不同频率时装置的测量精度,调整信号发生器的输入频率,测量结果参见表 4,虽然频率测量精度随频率偏移而稍低,但仍满足规范中 0.002 Hz 的要求.

表 4　频率测试结果

Tab.4　Frequency test results

输入频率/Hz	测量均值/Hz	频率测量误差/mHz
49.90	49.899 79	0.21
49.98	49.979 76	0.24
50.00	49.999 92	0.08
50.02	50.020 51	0.51
50.10	50.099 94	0.06

为测量不同相角时装置的测量精度,输入频率固定为 50 Hz,通过设置信号发生器中正弦信号的初相角改变输入电压信号的相角,相角测试结果如表 5 所示,可见相角测量误差小于 0.2°,满足规范要求.

使用本装置与传统设备分别对信号发生器产生的 50 Hz 标准交流电进行了频率测量,实验结果如

表 5 相角测试结果(输入频率=50 Hz)

Tab.5 Phase test results(input frequency=50 Hz)

输入相角/(°)	测量均值/(°)	相角测量误差/(°)
10	9.978 6	0.021 4
60	59.965 1	0.034 9
90	90.001 6	0.001 6
180	179.966 0	0.034 0
210	209.946 3	0.053 7

图 14 所示.本文设计的装置频率测量结果与 FDR 设备测量结果相近,该装置对 50 Hz 标准信号的频率测量具有较高的精度.

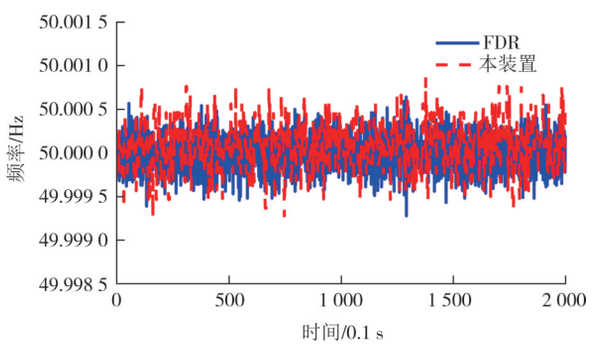


图 14 50 Hz 信号频率测量结果对比

Fig.14 Comparison of 50 Hz signal frequency measurement result

为测试实际环境下的本装置测量精度,使用本装置与 FDR 设备同时测量 220 V 实际电网信号,使用时间标签将二者的测量结果对齐,频率、相角测量结果分别如图 15 和图 16 所示.本装置测量得到的频率和相角结果与 FDR 设备测量结果曲线基本重合,表明该装置可以有效捕捉电网频率与相角信息随时间的动态变化过程,具有准确性高的优点.

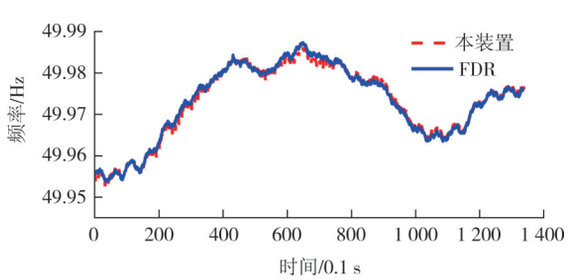


图 15 实际电网信号频率测量结果

Fig.15 Actual grid signal frequency measurement result

为测试本装置在实际运行中的可靠性,通过 Android Profiler 工具对移动终端的实时 CPU 占用率及内存使用情况进行了监测,结果如图 17 所示.装置运行时移动终端的 CPU 占用率与实际使用内存大小较稳定,CPU 占用率一直低于 31%,使用内存大小低于 150 MB.由于 CPU 占用率和内存使用空间一直保持在较低的水准,表明该装置可实现长期稳定的电网相量监测,验证了其较强的工程实用价值.

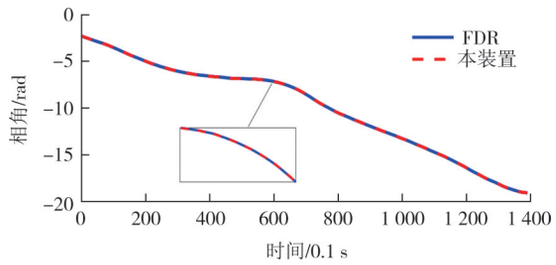


图 16 实际电网信号相角测量结果

Fig.16 Actual grid signal phase angle measurement result

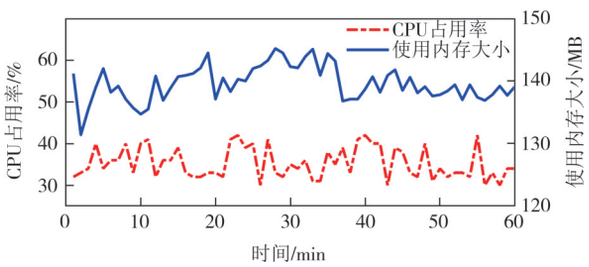


图 17 工作时移动终端的 CPU 占用率及内存使用情况

Fig.17 CPU usage and memory usage of the mobile terminal during work

4 结 论

本文针对传统同步相量测量算法受电网中间谐波影响较大的问题,提出了基于新型改进矩阵束的同步相量测量方法,经过仿真验证了本文算法对比传统算法的优越性,并以此设计了便携式电网同步相量测量装置,解决传统同步相量测量设备成本较高、布置较复杂、体积庞大的问题.之后将电网信号采集电路与移动终端相结合,降低了装置的硬件成本,经过与现有设备的对比测试,其对电网频率和相角测量误差分别小于 0.000 51 Hz 和 0.053 7°,验证了本装置对电网频率及相角测量结果的准确性.本文所设计的装置实现了电网同步相量测量装置的低成本化、便携化以及轻量化,利于同步相量测量装置的普及,在电网相量参数的动态测量领域具有应用价值.

参考文献

[1] ANGIONI A, LIPARI G, PAU M, et al. A low cost PMU to monitor distribution grids[C]//2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). Liverpool, UK: IEEE, 2017:1-6.

[2] PEGORARO P A, BRADY K, CASTELLO P, et al. Line impedance estimation based on synchrophasor measurements for power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1002-1013.

[3] AHMAD T, SENROY N. Statistical characterization of PMU error for robust WAMS based analytics [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 920-928.

[4] 柳昀. 适用于动态条件的同步相量测量算法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
LIU Y. Study on synchronous phasor measurement algorithm for dynamic conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

[5] 刘洁波, 黄纯, 江亚群, 等. 基于强跟踪泰勒-卡尔曼滤波器的动态相量估计算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 433-441.
LIU J B, HUANG C, JIANG Y Q, et al. Dynamic phasor estimator based on strong tracking Taylor-Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 433-441. (in Chinese)

[6] 曹磊, 赵庆生, 王旭平, 等. 基于改进泰勒加权最小二乘法的相量测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 24-30.
CAO L, ZHAO Q S, WANG X P, et al. A phasor measurement algorithm based on improved Taylor weighted least squares [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 24-30. (in Chinese)

[7] 张婕. 同步相量测量装置的硬件设计与算法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
ZHANG J. Hardware design and algorithm research of synchronous phasor measurement device [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[8] 金涛, 陈毅阳, 段小华, 等. 基于改进DFT的电力系统同步相量测量算法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 1-10.
JIN T, CHEN Y Y, DUAN X H, et al. Research on synchronous phasor measurement algorithm of power system based on improved DFT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 1-10. (in Chinese)

[9] 于华楠, 杜瑶, 郭树旭. 基于压缩传感的高精度同步相量测量方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 312-318.
YU H N, DU Y, GUO S X. High-precision synchronous phasor measurement based on compressed sensing [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 312-318. (in Chinese)

[10] 姚文轩. 基于广域同步测量的电能质量参数检测关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017.
YAO W X. Research on key technologies of power quality parameter detection based on wide area synchronized measurement [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)

[11] 黄瑞, 宋健, 肖宇, 等. 基于改进矩阵束的动态同步相量测量算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 135-142.
HUANG R, SONG J, XIAO Y, et al. Dynamic synchronous phasor estimation algorithm based on improved matrix pencil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(2): 135-142. (in Chinese)

[12] 姚文轩, 滕召胜, 唐求, 等. 非同步采样下电力系统相量测量修正算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 79-85.
YAO W X, TENG Z S, TANG Q, et al. Power system phasor measurement and correction algorithm under asynchronous sampling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 79-85. (in Chinese)

[13] 刘晏池, 王雪, 刘佑达, 等. 基于分布式压缩感知的智能用电网络高分辨率谐波与间谐波测量[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2161-2166.
LIU Y C, WANG X, LIU Y D, et al. High-resolution harmonic and interharmonic measurement in smart power utilization network based on distributed compressed sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2161-2166. (in Chinese)

[14] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.
DUAN G, YAN Y Q, XIE X D, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80. (in Chinese)

[15] 尹宇翔. 电能质量检测分析方法研究及其DSP实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
YIN Y X. Research and the implementation on DSP of power quality detection and analysis methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[16] 滕召威. 基于嵌入式平台的电能质量在线监测系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
TENG Z W. Research on power quality online monitoring system based on embedded platform [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)

[17] 刘志文, 朱增坤, 周治国, 等. 一种基于FPGA+ARM架构的μPMU实现[J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 8-13.
LIU Z W, ZHU Z K, ZHOU Z G, et al. A design of μPMU based on the structure of FPGA+ARM [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(22): 8-13. (in Chinese)

[18] WALLS F L, VIG J R. Fundamental limits on the frequency stabilities of crystal oscillators [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(4): 576-589.

[19] ZHAN L W, ZHAO J Y, CULLISS J, et al. Universal Grid Analyzer design and development [C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015: 1-5.

[20] JIANG X C, ZHANG J M, HARDING B J, et al. Spoofing GPS receiver clock offset of phasor measurement units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3253-3262.

[21] KONONOV Y G, OSPISHCHEV M A, RUDNEV V Y. Current and voltage synchronous measurements using NI cRIO system with sigma-delta ADC NI 92xx and S.E.A. GPS modules [C]//18th International Workshop on ADC Modelling and Testing, 2014.

[22] 钱志鸿, 刘丹. 蓝牙技术数据传输综述[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 143-151.
QIAN Z H, LIU D. Survey on data transmission in Bluetooth technology [J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 143-151. (in Chinese)

[23] 刘思议, 金涛, 刘对. 基于改进小波阈值去噪和RCRSV-MP算法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 166-172.
LIU S Y, JIN T, LIU D. Power system low-frequency oscillation mode identification base on improved wavelet threshold de-noising and RCRSV-MP algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 166-172. (in Chinese)

[24] ZHAN L W, LIU Y, YAO W X, et al. Utilization of chip-scale atomic clock for synchrophasor measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2299-2300.