

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.04.04

正弦波形同步采样条件的识别与判定

梁志国

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 针对正弦信号同步采样的定量判定, 以及不同步采样时同步误差的定量评价, 提出了一种基于四参数拟合的评价判定方法, 可避免同步判定时影响分辨力的 ± 1 的计点误差。在此基础上, 定义并实现了同步误差的定量评价。在实际正弦曲线、方波曲线和三角波曲线的采集测量实验中, 验证了所述方法的正确性及可行性。使用单频数字滤波处理后, 将其推广应用到非正弦周期信号的同步采集测量评价中。本文所述方法可用在对同步要求较高的采集测量系统的同步特性定量评价中, 也可用在准同步采样测量中, 用于定量给出同步偏差, 以进行测量误差的补偿和修正。

关键词: 计量学; 同步采样; 误差; 正弦; 拟合; 准同步采样

中图分类号: TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)04-0018-05

Recognition and Judgment of Simultaneous Sampling Condition of Sine Wave

LIANG Zhiguo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration,
Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the quantitative judgment of synchronous sampling of sinusoidal signals and the quantitative evaluation of synchronization error in asynchronous sampling, an evaluation and judgment method based on four-parameter fitting is proposed, which can avoid the point counting error of ± 1 that affects the resolution during synchronization judgment. On this basis, the quantitative evaluation of synchronization error is defined and realized. In the actual sine wave, square wave, and triangular wave acquisition and measurement experiments, the correctness and feasibility of the method are verified. After using single-frequency digital filter processing, it can be extended and applied to the synchronous acquisition of non-sinusoidal periodic signals. The method described in this paper can be used in the quantitative evaluation of synchronization characteristics of acquisition and measurement systems with high synchronization requirements, and can also be used in quasi-synchronous sampling and measurement to quantitatively give synchronization deviations for compensation and correction of measurement errors.

Key words: metrology; synchronous sampling; error; sinusoidal; curve-fit; quasi-synchronous sampling

0 引言

同步采样一直有两种不同的含义: ①针对多通道数据采集系统而言, 同步采样意味着不同通道在同时采样时, 其采样时刻点保持统一和一致的特征, 称多通道同步采样^[1-3], 也称为多通道同时采样; ②针对采集通道的采样间隔与被测周期信号的波形周期而言, 当信号波形周期“恰好”等于采样间隔的整数倍, 使得每个信号波形周期“恰好”包含整数个采样数据点, 也被称为信号的同步采样^[4-13]。本文后续内容, 主要指信号的同步采样。

信号同步采样是对周期信号波形等间隔采样的一种特殊采样状态, 通常指每一个信号波形周期“恰好”含有整数个采样点的情况。此时, 采样频率是信号重

复频率的整数倍。

广义的信号同步采样则是指采样序列中“恰好”含有整数个信号波形周期的情况。

同步采样是一种非常特殊且重要的测量条件, 在同步采样条件下, 人们很容易实现采样频率与信号重复频率之间的无误差互导。并且, 信号波形及采样不完善所造成的影响趋于完整和稳定。相应地, 其不确定度评定结果也趋于稳定和真实, 不会由于采样不同步带来的影响而额外变化。另外, 同步采样条件给周期波形采样序列带来的最大益处是其频谱分析结果没有由于采样不同步问题而带来额外的频谱泄漏, 给其频谱分析、失真分析等带来极大的便利。

因而, 人们千方百计地创建同步采样条件, 以简化和避免后续信号分析中的问题和难度。特别是在交

流电能与功率分析中,即使达不到完全的同步采样条件,也希望获得近似同步的采样状态,以期获得更加稳定可靠的波形分析结果。否则,人们就要采取滤波、加窗等数据处理方式,以降低由于不同步造成的频谱泄漏的影响。

除了采用与被测周期信号自动同步与锁相技术的同步采样系统外,任何使用与被测周期信号不同时基的数据采集系统,若想达到完全的同步采样条件都是十分困难的。因而,人们发展了准同步采样理论方法^[14-23],即采样序列包含近似整数个信号波形周期,即对于正弦波而言,包含 $2\pi \cdot N \pm \Delta$ 的相位差,其中, N 为正整数,而 Δ 为“很小”的相位差,在此条件下,通过对 $\pm \Delta$ 的补偿运算或迭代运算,可以对正弦波有效值、功率等使用累积运算获得估计值的参数,达到与同步采样条件下相接近的精度。但 $\pm \Delta$ 的精确测定也具有复杂性和难度,尤其是针对未知信号频率的情况下难度更大,故很多补偿修正类方法只能用于采样间隔和信号周期均精确已知的前提下。

尽管同步采样如此重要并被广泛研究,针对采样同步情况的定量评价方面的研究却一直较少,且多关注于同步不完善造成的误差方面^[24-25],而不是同步问题本身。本文后续内容,即在正弦采样条件下以同步误差的形式,定量评价采样系统与被测信号之间的同步特性关系,以及准确估计准同步采样情况下的相位偏差 $\pm \Delta$ 。

1 测量原理及方法

1.1 基本思想

同步特性关系的实质是被测信号波形周期与均匀采样的时间间隔呈严格的整数比关系,因此,确定该比例是否为整数是同步特性分析与判定的关键,简单的周期计点法判断,无法避免 ± 1 个采样点的计数误差,因而不适用于解决该问题。

在正弦波形采样序列中,则有所不同。等间隔采样的正弦波拟合参数中,其直接拟合参数获得的数字角频率体现了采样间隔与正弦信号的比值关系,使用该参数进行同步特性分析判定,将避免周期计点法中的测量原理误差。

针对非正弦周期信号,通常更难识别其同步采样状态,此时,则可以使用滤波方式,将其谐波均滤除,只剩下基波分量,然后使用正弦拟合方式予以测量。

1.2 测量原理及数据处理方法

1.2.1 正弦波形的同步采样识别

设数据采集系统的通道采集速率为 v , 采样间隔 $\Delta t = 1/v$ 。通道采集数据个数为 n , 包含信号周期数为 N 个。信号周期为 T , 重复频率为 $f = 1/T$, 信号峰值幅度为 E 。

给数据采集系统加载正弦波信号

$$e(t) = E \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: $e(t)$ 为输入正弦信号的瞬时值; E 为输入正弦信号的幅度; f_0 为输入正弦信号的频率; φ_0 为输入正弦信号的初相位。

启动采集,得采集数据序列 $\{x_i\} (i=0, \dots, n-1)$, 按最小二乘法求出采集序列 $\{x_i\}$ 的拟合信号^[26]

$$a(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 t + \varphi) + d \quad (2)$$

式中: $a(t)$ 为拟合信号的瞬时值; A 为拟合正弦信号的幅度; f_0 为拟合正弦信号的频率; φ 为拟合正弦信号的初相位; d 为拟合信号的直流分量值。

由于采集数据序列是一些离散化的抽样值 x_i , 其时间是离散化的 t_i , $t_i = i/v (i=0, \dots, n-1)$, 式(2)可表示为

$$a(t_i) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 t_i + \varphi) + d \quad (3)$$

式中: t_i 为第 i 个测量点的时刻 ($i=0, \dots, n-1$)。

简记为

$$a_{(i)} = A \cdot \sin(\omega \cdot i + \varphi) + d \quad (4)$$

数字角频率 ω 为

$$\omega = 2\pi \cdot f_0/v \quad (5)$$

则实际有效值误差 ρ 为

$$\rho = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - A \cdot \sin(\omega \cdot i + \varphi) - d)^2 \right)^{1/2}$$

当实际有效值误差最小时,可获得式(1)的最小二乘意义下的拟合正弦波信号式(4),此时,可得数字角频率拟合结果。由此得到信号周期 T 与采样时间间隔 Δt 之比 m 为

$$m = T/\Delta t = v/f = 2\pi/\omega \quad (6)$$

令 $\text{int}[*]$ 为对“*”的取整运算符,对 m 进行取整运算,得 M 为

$$M = \text{int}[m] = \text{int}[2\pi/\omega] \quad (7)$$

式中: m 为每个信号周期中包含的采样点数。

n 点采集序列中包含的信号周期数 N 为

$$N = \text{int}[n/m] \quad (8)$$

1.2.2 非正弦周期波形的同步采样识别

对于非正弦类周期信号的同步采样识别,可以使用滤波器首先将其谐波尽数滤除,变成只包含基波分

量的信号波形,滤波方式既可以使用一种滤波器,也可以使用多种不同滤波器进行组合滤波,带通、低通滤波均可。文献[29]所述的单频滤波器,拥有仅仅滤除谐波而对基波参数没有影响的特点,可供选择进行滤波操作。

在对非正弦类周期信号滤波完成以后,其基本上变成正弦波形,可使用 1.2.1 节所述方法进行同步采样特性识别,获得非正弦类周期信号的同步采样特征参数。

2 同步条件的评估

2.1 同步采样

当 $M=m$ 时,每一个信号周期“恰好”包含 m 个采样点,此时,系统对信号处于同步采样状态,对于长度为 m 的倍数的采样序列而言,同步误差为 0。

当 $N=n/m$ 时,全序列 n 个采样点“恰好”包含 N 个信号周期,此时,系统对信号处于广义同步采样状态,对于长度为 n 以及其倍数长度的采样数据序列而言,同步误差为 0。

2.2 非同步采样

当 $M \neq m$ 时,若 $m-M \leq 0.5$,则定义每周期包含 M 个采样点,其同步误差 γ 为

$$\gamma = (M - m)/m \quad (9)$$

当 $M \neq m$ 时,若 $m-M > 0.5$,则定义每周期包含 $M+1$ 个采样点,其同步误差 γ 为

$$\gamma = (M + 1 - m)/m \quad (10)$$

3 实验验证

3.1 正弦波形同步采样识别

用 SCO232 型数据采集系统,对 5720A 型多功能校准器进行采集,获得正弦信号波形如图 1 所示。A/D 位数为 12 bit,测量范围为 $-5 \sim 5$ V,采集速率 $v = 2$ kSa/s,采样点数 $n = 1800$,信号峰值 4.5 V,频率 11 Hz。经四参数拟合得^[26]: $A = 4459.1683$ mV; $\omega = 0.03459784$ rad; $\varphi = -138.431^\circ$; $d = 3.98505$ mV; $\rho = 37.00925$ mV; 有效位数 6.29 Bits。

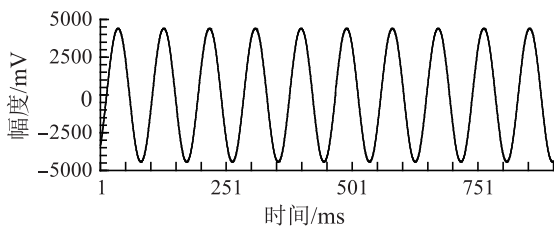


图 1 实测正弦曲线波形

按式(6)计算得 $m = 181.6063$,由于 m 不是整数,可知此时数据采集系统对于信号的采样属于非同步采样状态。

每周期含有 182 个采样点,按照式(10)计算获得采样同步误差 $\gamma = 0.2168\%$ 。

将采样序列进行整周期的准同步采样条件计算时,由于全序列包涵 $n/m = 9.91155$ 个波形周期,若以距离整数周波相差 20% 以内为准同步的周波数作为判据,则 $n/m \approx 10$ 。按 10 个波形周期进行准同步计算时,其准同步误差为

$$\Delta = (n/m - 10) \times 2\pi = -0.555745 \text{ rad}$$

此为直接使用全部 1800 点进行准同步运算时的准同步误差,并未进行数据截取。

在进行数据截取后,可见序列包含 9 个完整波形周期,进行 9 周期的准同步截取后序列长度为 1634 点,其准同步误差为

$$\Delta = (1634/m - 9) \times 2\pi = -0.0158008 \text{ rad}$$

明显小了很多。

3.2 方波同步采样识别

图 2 为标准方波曲线波形,其幅度为 4 V,频率为 34 Hz,占空比为 1:1。以采样速率 2048 Sa/s 进行采样,采样序列长度为 2000 点。

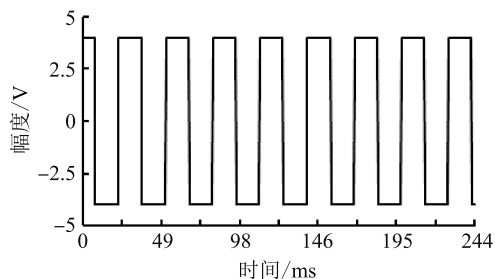


图 2 标准方波曲线波形

图 3 为使用上述方法对图 2 所示波形进行滤波后获得的基波正弦曲线波形^[29],使用最小二乘正弦波曲线拟合获得其基波参数为:幅度 5.1069 V, $\omega = 0.104312872$,频率为 $f_0 = 34.00071$ Hz,相位 90.0309° ,直流分量 1.499317 mV,对应的总失真度 $TD = 3.65\%$ 。

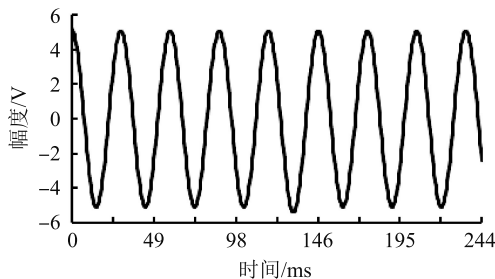


图 3 标准方波滤波后基波曲线波形

按式(6)计算得 $m = 60.2340$ ，由于 m 不是整数，可知此时数据采集系统对于信号的采样属于非同步采样状态。

每周期含有 60 个采样点，按照式(9)计算获得采样同步误差 $\gamma = -0.39\%$ 。

3.3 锯齿波同步采样识别

图 4 为周期斜波曲线波形，其幅度为 4 V，频率为 34 Hz，上升沿与下降沿时间比为 1:4。按采样速率 2048 Sa/s 进行采样，采样序列长度 2000 点。

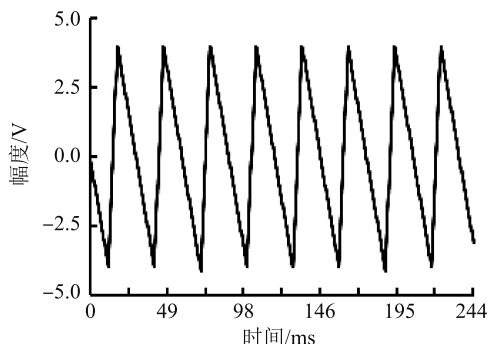


图 4 周期斜波曲线波形

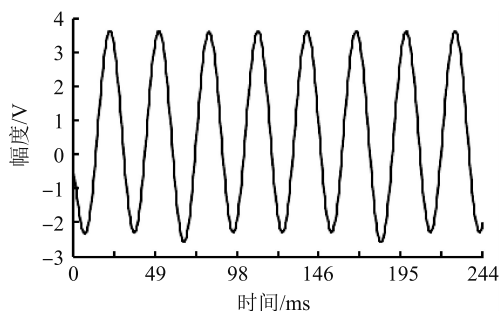


图 5 周期斜波滤波后基波曲线波形

图 5 为使用上述方法对图 4 所示波形进行滤波后获得的基波正弦曲线波形^[29]，用最小二乘正弦波曲线拟合法获得其基波参数为：幅度 2.98336 V， $\omega = 0.104301152$ ，频率为 $f_0 = 33.99689$ Hz，相位 89.6505° ，直流分量 642.630 mV，对应的总失真度 $TD = 6.19\%$ 。

按式(6)计算得 $m = 60.2408$ ，由于 m 不是整数，可知此时数据采集系统对于信号的采样属于非同步采样状态。

每周期含有 60 个采样点，按照式(9)计算获得采样同步误差 $\gamma = -0.409\%$ 。

4 讨论

通过本文所述过程，可以判断采样系统对于所测周期信号是否处于同步采样状态。以正弦拟合方式获

得的结果，基本上可以避免计点法 ± 1 的计点误差，获得较为确切理想的结论。通常，每个信号波形周期包含的采样点数都不是严格的整数。

若处于同步采样状态，则每个信号波形周期包含的采样点数恰好是严格的整数。此时可以计算出每一波形周期恰好包含的采样点数。从而进行采样序列长度的选定，进而使用一系列简捷有效的方法进行其它测量处理。

若处于非同步采样状态，可按照同步误差最小化原则定量判定每个波形周期近似包含的采样点数，并给出同步误差的定量评价结果。

特别是，对于准同步采样方法而言，其多周波准同步误差 Δ 可以定量给出，以利于有效利用补偿修正类准同步采样方法进行部分波形参数估计，为同步测量和准同步测量方法的应用创造了先期技术条件。

本文所述方法的不足之处是，它属于同步采样条件的估计，采样速率“恰好”是信号频率的整数倍的条件较难实现，由于测量误差和不确定度因素，对于真正的同步采样，也可能产生误判^[27-28]。有关问题的解决，需要后续的深入研究。

5 结束语

本文针对正弦信号波形数据采集过程中常见的同步采集的辨识与判定，以及同步误差的定义和估算，本文进行了细致研究，获得了确切可用的方法和结论，本文所述方法可用于电能、电功率等电力行业的正弦基础参量的测量、计量和校准中，有广泛的应用空间。

针对非正弦类周期信号的同步采样问题，可借助于单频滤波技术予以实现，从而使本文所述方法拓展到更为广阔的应用领域，使其具有更大的意义和价值。

参考文献

- [1] 何浩, 杨俊峰, 武杰, 等. 多通道同步高速数据采集系统研制[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(2): 179-181.
- [2] 山昆, 刘建业, 赵伟, 等. 多通道同步采样数据采集系统研究[J]. 微处理机, 2006, 27(4): 20-22.
- [3] 韩海安, 彭宇翔, 薛建立, 等. 高精度多通道同步采样系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 44-47.
- [4] 许遐. 非正弦波形测量的同步采样技术[J]. 电测与仪表, 1988, 25(Z1): 6-8.
- [5] 王培康, 胡访宇. 同步采样法测量无功功率和畸变功率[J]. 电子测量与仪器学报, 1994, 8(1): 15-20.
- [6] 于海生. 锁相同步采样谐波测量方法及其实现[J]. 电测与仪表, 1999, 36(2): 12-14.
- [7] 沈国峰, 王祁, 王华. 交流电参数测量中同步采样的软件定

- 时补偿算法[J]. 电测与仪表, 2003, 40(3): 25-26, 54.
- [8] 黄纯, 彭建春, 刘光晔, 等. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 75-79.
- [9] 张秀丽, 李萍, 陆光华. 高精度软件同步采样算法[J], 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 24-27.
- [10] 忻黎敏, 许维胜, 余有灵. 基于递推离散傅里叶变换和同步采样的谐波电流实时检测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 14-18.
- [11] 门长有, 王荣华, 谭年熊. 一种用于谐波测量的全数字同步采样算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 83-86.
- [12] 石磊, 孙凯明, 张鹏, 等. 电能质量监测中的同步采样系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(3): 98-99, 106.
- [13] 郭敏, 赵成勇, 曹东升, 等. 同步采样和谐波分析方法的实现[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 13-17.
- [14] 戴先中. 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1984, 5(4): 55-61.
- [15] 戴先中. 准同步采样中的几个理论与实际问题[J]. 仪器仪表学报, 1986, 7(2): 203-207.
- [16] 戴先中. 准同步采样应用中的若干问题[J]. 电测与仪表, 1988, 25(2): 4-9.
- [17] 冯志贤, 刘星. 准同步采样技术在非正弦电参量测量中的应用[J]. 电测与仪表, 1989, 26(4): 3-6, 31.
- [18] 潘文. 准同步采样方法应用中的几个问题[J]. 电测与仪表, 1990, 27(6): 6-8.
- [19] 孟卓, 温和. 基于复化梯形的准同步采样频率测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2445-2453.
- [20] 朱亮, 温和, 戴慧芳, 等. 计及噪声的动态谐波准同步采样分析方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 217-223.
- [21] 王震宇, 王学伟. 基于参数自适应的准同步采样法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001(02): 36-39.
- [22] 王帅夫, 宋健, 李恺, 等. 基于准同步采样的电网频率测量装置设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(10): 19-23.
- [23] 王振华, 于同伟, 马志敏, 等. 一种分布式间隔单元的低成本准同步采样系统的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 132-136.
- [24] 潘文. 准同步采样补偿方法及其误差估计[J]. 仪器仪表学报, 1990, 11(2): 192-199.
- [25] 沈国峰, 王祁. 进一步提高准同步采样谐波分析法准确度的方案[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(5): 455-457, 465.
- [26] 梁志国, 朱济杰, 孟晓凤. 四参数正弦曲线拟合的一种收敛算法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1513-1519.
- [27] Deyst J P, Soulders T M, Solomon Jr O M. Bounds on Least Squares Four-Parameter Sine-Fit Errors Due to Harmonic Distortion and Noise[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1994, 44(3): 637-642.
- [28] 梁志国. 12 Bit 量化误差对正弦参数拟合影响的误差界[J]. 计测技术, 2020, 40(5): 1-9.
- [29] Liang Zhiguo, Zhu Jijie. A Digital Filter for the Single Frequency Sinusoid Series[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 16(2): 204-209.

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0206202)

引用格式: 梁志国. 正弦波形同步采样条件的识别与判定[J]. 计测技术, 2021, 41(4): 18-22.