

信号与系统第二次大作业指导书

电力系统同步相量计算

电机工程与应用电子技术系

二〇二四年春季学期

2024 年春信号与系统大作业——电力系统同步相量计算

1. 背景介绍

随着经济的发展和技術应用的成熟，目前我国正在大力建设区域电网互联工程，这对于合理利用资源，节省投资，提高供电可靠性具有重要意义。过去，电力系统监视手段主要包括侧重于监视系统的稳态操作的数据采集和监视控制系统（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA），以及侧重于记录电磁暂态过程的各种故障录波装置。由于不同位置的监测结果之间缺乏准确可靠的通用时间标准，所记录的数据仅部分有效，并且难以对整个系统进行整体动态分析。

随着卫星授时、电力通信网络和数字信号处理技术的快速发展，以同步相量测量技术为基础的广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）成为新一代电网动态监测和控制系统。同步相量测量提供电力系统电气量的实时测量。这些测量数据可用于验证系统模型，测量稳定边界和系统稳定负荷的最大化。同步相量测量信息包含每个测量量值的幅值和相角以及相应的时间标签。而同步相量测量技术的核心是相量估计算法的设计，即算法的估计精度将直接影响到应用效果。

为加深学生对信号处理的理解，更好地了解电力系统量测技术，同时加深专业志趣，设计信号与系统课程大作业。本次大作业通过了解，学习，实现并探究电力系统同步量测技术，重点考核学生数字信号处理相关的文献阅读，完成实现，问题分析与解决，报告撰写与最终展示等能力，提高学生综合素质。

2. 作业内容

本次大作业将会给出指定的一段时域信号，该信号模拟电力系统实际情况，除基波外含有一定谐波、间谐波、噪声、频率与幅值波动。学生针对给定的时域信号，准确计算出基波相量，给出基波相量实时变化曲线。并尽可能准确分析其谐波，间谐波种类与含量。完成同步相量计算大作业报告一份，其中需要分析同步相量计算过程中遇到的难点，阐述解决问题的方法。最终会择优进行大作业结果展示。

为有效激发专业学习志趣，提高课程挑战度，共设置三种难度梯度。第一梯度为必做内容，其余梯度为加分内容。

【必做内容】

给定的一段时域信号文件 `Signal_1.csv`。已知该信号基波频率在 50Hz 附近，且频率不变。采样率 10kHz。除基波信号外，该信号可能含有 2~29 次谐波与小于 300Hz 的间谐波。该信号发生过一次幅值阶跃。需要完成的内容如下：

1. 需要计算出该信号的基波相量，并给出幅值、相角随时间变化曲线。

2. 分析给出谐波、间谐波种类与含量。
3. 尽可能降低由信号幅值阶跃产生的误差，并给出阶跃发生时刻。

思考：1.电力系统中同步相量的相角随时间变化曲线具有什么特点，为什么？

2.数据窗长对相量计算结果有什么影响？

3.如何降低谐波、间谐波对相量计算精度的影响？

4.对于同步相量算法，如何设计使其能够更快跟踪信号幅值的阶跃变化？

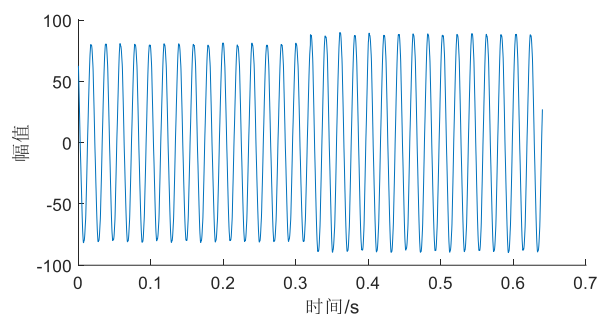


图 1 必做内容信号示例图

【加分内容 1】

给定的一段时域信号文件 Signal_2.csv。已知该信号基波频率在 50Hz 附近，采样率 10kHz。除基波信号外，该信号可能含有 2~29 次谐波与小于 300Hz 的间谐波，并含有一定的白噪声。该信号发生过一次幅值阶跃与频率阶跃。需要完成的内容如下：

1. 需要计算出该信号的基波相量，并给出幅值、相角随时间变化曲线。
2. 给出该信号的信噪比。
3. 尽可能降低由信号幅值与频率阶跃产生的误差，并分别给出阶跃发生时刻。

思考：1.基波信号的频率变化，对于相量计算精度有什么影响？

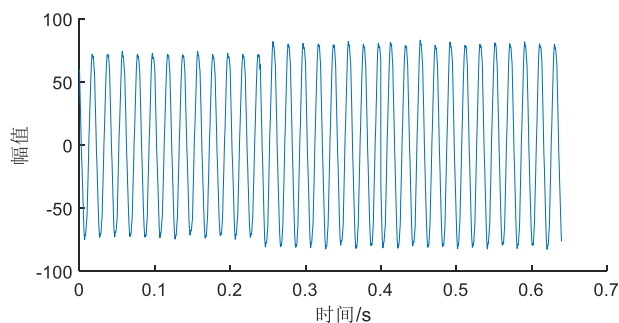


图 2 加分内容 1 信号示例图

【加分内容 2】

给定的一段时域信号文件 Signal_3.csv。已知该信号基波频率在 50Hz 附近，采样率 10kHz。除基波信号外，该信号可能含有 2~29 次谐波与小于 300Hz 的间谐波。该信号在全时段进行了幅值调制。需要完成的内容如下：

1. 需要计算出该信号的基波相量，并给出幅值、相角随时间变化曲线。

2. 准确跟踪信号幅值调制过程。

思考：1.对于同步相量算法，如何设计使其能够有效应对信号幅值的连续变化？

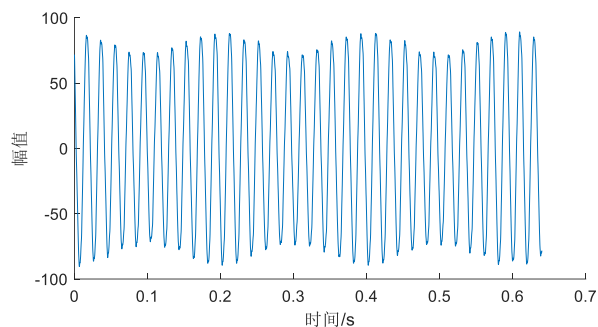


图 3 加分内容 2 信号示例图

【加分内容 3】

给定的一段时域信号文件 `Signal_4.csv`。已知该信号为实际电力系统一段电压信号，采样率 6400Hz。需要完成的内容如下：

1. 需要计算出该信号的基波相量，并给出幅值、相角随时间变化曲线。
2. 分析给出谐波、间谐波种类与含量，给出该信号的信噪比。
3. 给出信号频率随时间变化曲线。

思考：1.采样率的变化对同步相量计算有什么影响？

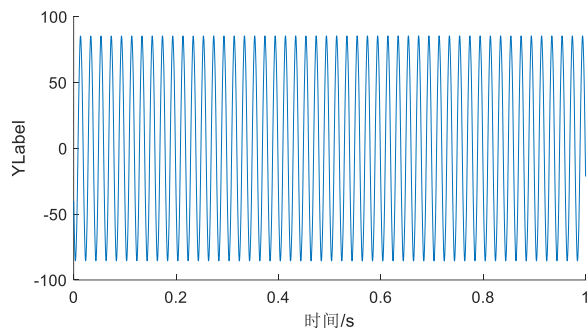


图 4 加分内容 3 信号示例图

3. 评分标准

本次大作业基础分值共 100 分。其中必做内容成绩满分 100 分，各加分内容满分为 10 分。必做内容成绩与加分内容成绩主要由信号分析结果准确度与大作业报告完成质量决定。最终成绩由必做内容成绩+加分内容成绩。

4. 最终报告要求

- (1) 完成大作业要求的相关内容，并提供算法程序与指定 CSV 格式曲线数据。
- (2) 分析提高相量计算精度过程的遇到的问题，并给出解决方法。
- (3) 回答指导书中的思考题。
- (4) 总结此次大作业的收获。

5. 基础知识介绍：

【相量算法简介】

同步相量算法作为 PMU 装置的基础和核心，其响应速度及测量精度将直接决定 WAMS 系统的监测可靠性和后续应用价值。目前研究中，依据量测精度和响应性能的侧重不同，同步相量算法可以分为稳态和动态两大类，稳态算法包括离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）以其改进算法、滤波器方法等，动态算法则包括卡尔曼滤波、泰勒级数变换以及小波变换等。下面以较具代表性的 DFT 算法为例，简要说明相量计算的过程。

在交流电力系统中，电压、电流的理想信号可以使用相量表示，假设时域正弦信号为：

$$x(t) = \sqrt{2}X \cos(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

那么该信号可以采用极坐标和直角坐标形式的相量来表示：

$$\bar{X} = Xe^{j\phi} = X \cos \phi + jX \sin \phi = X_R + jX_I \quad (2)$$

一般地，对于时域采样信号，我们可以通过离散傅里叶变换（DFT）将输入的采样值转化为频域信号，从而得到相量值：

$$\begin{cases} \bar{X}(1) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cos(\frac{2\pi}{N}k) - j \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \sin(\frac{2\pi}{N}k) \\ \bar{X}(r) = \bar{X}(r-1) + j \frac{\sqrt{2}}{N} (X_{N+r} - X_r) \cdot \exp[-j \frac{2\pi}{N}(r-1)] \end{cases} \quad (3)$$

上式 $\bar{X}(r)$ 和 $\bar{X}(r-1)$ 分别表示当前时刻和上一时刻的相量，N 为交流信号每周期的采样点数。进一步地，由三相相量计算正序相量的变换式为：

$$\bar{X}_1(r) = \frac{1}{3} [X_A(r) + \alpha X_B(r) + \alpha^2 X_C(r)] \quad \alpha = \exp(j2\pi/3) \quad (4)$$

如果电力系统各点在同步时间（如 GPS 时间）下测量数据，那么各点的相量就可以在同一个时间参考系下相互关联，形成各点时间同步的相量。

上述传统 DFT 算法在静态条件下具备良好的谐波抑制特性和快速运算特性。然而，当系统中存在衰减直流分量时，DFT 算法的计算精度将降低；在动态过程中，系统难以对信号进行完整周期采样，栅栏现象和频谱泄漏现象的出现以及算法对信号动态特性的不完全表示也会使得 DFT 算法产生较大的估计误差。为此，近年来一些同时考虑频率和时间同步的自适应方法受到了广泛关注，以求在频率偏差较大、幅值时刻变化、量测噪声及间谐波干扰严重等实际场景下兼顾动稳态响应速度和计算精度，提升相量算法的综合性能。

【谐波算法简介】

在谐波分析理论发展的近百年的时间里，先后诞生了频域理论和时域理论，形成了多种谐波分析计算以及测量方法，现对主要方法进行介绍。

1.基于傅里叶变换的谐波分析

基于傅里叶变换的谐波分析是当今应用最多也是最广泛的一种方法。它有离散傅里叶变换过渡到快速傅里叶变换的基本原理构成。采用 FFT 进行谐波分析的主要过程为：首先对电网电压、电流信号进行采样和截断，然后对离散序列进行 FFT 变换，从而可以获得信号的基波和各次谐波分量，包括频率、幅值和相位。根据采样定理，只有采样频率 f_s 不小于信号最高频率 f_c 的 2 倍时，采样值才能无失真地包含所有原始信号的所有信息，否则会发生频谱混叠现象，不能获得全部频谱。

在实际谐波监测中，傅里叶变换对信号不能实现同步采样，进而出现频谱泄露和栅栏效应，导致计算出的信号参数不准确。为了提高精度，通常需要对 FFT 进行改进。已有的方法主要是利用加窗插值法对 FFT 进行修正，其主要流程如图 6 所示。其中窗函数是用来截断采用序列以抑制频谱泄露，其表达式如式(1)所示，其已经发展出矩形窗、Hann 窗、Hamming 窗、Blackman 窗、Blackman-Harris 窗等数十种窗以适应不同的场景。

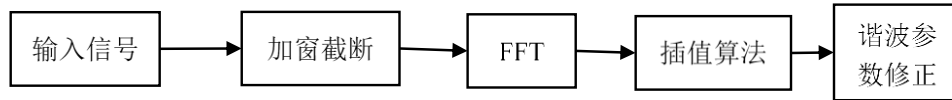


图 6 改进 FFT 主要流程

$$w_H(n) = \sum_{h=0}^{H-1} (-1)^h a_h \cos \frac{2\pi hn}{N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

2.基于小波理论的谐波分析

小波分析针对不同的频率在时域上的取样步长是可调的，通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化，使高频处时间细分，低频处频率细分，即对于高频信号采用窄窗口函数，对于低频信号采用宽窗口函数，特别适用于分析奇异信号。因此，小波分析方法常用于对电力系统中谐波和间谐波进行检测与分析。实际工程应用中常采用离散小波变换。当伸缩因子和平移因子的次数分别为 m 和 n ，得到离散小波变换为：

$$DWT(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} f(t) g(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (6)$$

在小波分析理论的基础上，发展出来了基于小波包算法、正交小波变换分析、离散和连续小波包结合的方法、基于小波变换的 Kalman 滤波、傅里叶变换和小波变换结合的方法等

一系列改进方法。

小波分析法能够有效地从变化的信号中提取突变信息,在对突变信号和不平稳信号的分析中有较大优势。然而,由于小波窗口能量不集中或分频不合理,很容易造成频谱混叠。此外,在三相不平衡的电力系统中,利用小波分析法检测谐波也难达到理想的效果。

3.希尔伯特-黄变换法(HHT)

HHT 方法是对一个信号进行平稳化处理,即将时间信号通过经验模态分解(EMD),产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,每个序列称为一个固有模态函数(IMF),再分别针对每个固有模态函数进行 HHT 变换,得到各自频率和幅值的瞬时值,其变换框图如图所示。

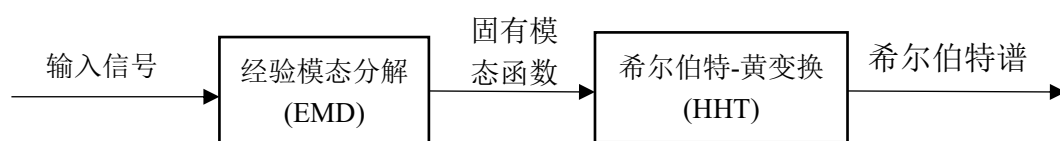


图 7 HHT 变换框图

HHT 变换法是近年来提出的一种新的信号处理方法,在分析非线性、非平稳性以及随机信号上有较大的优势,但由于其自身的种种缺陷在一定程度上限制了它在信号分析领域的应用。

【窗函数简介】

如果时域信号是周期性的,而抽样时不满足完整周期抽样时,对信号进行频谱分析,本来集中的线谱将分散在该线谱临近的频带内,产生原信号中不存在的新的频率成分,在频谱分析技术上称这种效应为泄露。由于实际电力系统中的频率是在动态变化的,因此实际信号频谱分析泄露误差难以避免。为了减少泄露误差,除尽可能采用完整周期采样外,主要采取窗函数法。

窗函数法实际是用一个窗函数与原始的时域信号作乘积的过程。常用的窗函数有矩形窗、汉宁窗、汉明窗、高斯窗、布莱克曼窗等。使用不同的时间窗,它的时域形状和频域特征是不相同的。

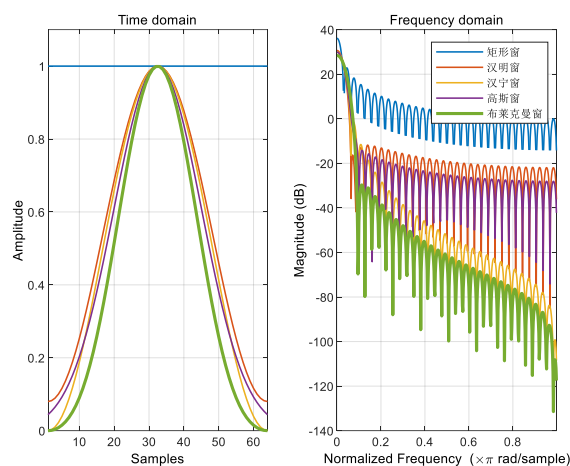


图 8 不同窗函数时域及频域波形

加窗函数时，应使窗函数频谱的主瓣宽度应尽量窄，以获得高的频率分辨能力；旁瓣衰减应尽量大，以减少频谱拖尾，但通常都不能同时满足这两个要求。对信号施加了窗函数，则频谱还需要进行修正。修正分幅值修正和能量修正，如果是单条谱线则为幅值修正；如果是宽带则为能量修正。

基于窗函数的 FIR 设计就是通过选择合适窗函数来找到满足要求的滤波器，一般步骤是这样的：

- 1) 确定频域的响应函数 $H_d(e^{j\omega})$;
- 2) 确定频域的响应函数的傅里叶逆变换，找到连续脉冲响应函数 $h_d(t)$;
- 3) 对脉冲响应函数 $h_d(t)$ 按照一定的采样频率进行采样，获得离散信号 $h_d(n)$;
- 4) 选择合适的窗函数，对离散信号 $h_d(n)$ 加窗，获得有限长度的脉冲响应 $h(n)$;