

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221693

# 电力系统数字信号检测校准装置的研究与实现

赵锦<sup>1</sup>, 陈光华<sup>2</sup>, 刘德森<sup>3</sup>, 黄岩<sup>3</sup>, 郑明友<sup>4</sup>, 张源应<sup>2</sup>

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100000; 2. 珠海开普检测技术有限公司, 广东 珠海 519000;  
3. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 湖北能源集团涑水水电有限公司, 湖北 鹤峰 445800)

**摘要:** 随着智能变电站的大规模建设推广, 数字化设备及测试仪的应用越来越多, 电力系统数字信号准确度的检测校准成为必需环节。目前, 电力系统数字信号准确度测试方法不统一, 测试系统针对性不强、便利性不足、不确定性高, 影响了检测校准的效率和质量, 不利于数字化设备在智能变电站的推广应用和长期质量安全。为解决这一问题, 研究和实现了一种电力系统数字信号检测校准装置。从理论值、时标和算法溯源三方面, 实现电力系统数字信号准确度全性能指标检测校准。试验及工程验证表明, 研究成果的功能和抗干扰性满足标准要求和应用需求, 提升了电力系统数字信号检测校准的效率和质量。

**关键词:** 数字信号; 检测; 校准; 理论值溯源; 时标溯源; 算法溯源

## Study and development of a testing and calibrating device for a digital signal in a power system

ZHAO Jin<sup>1</sup>, CHEN Guanghua<sup>2</sup>, LIU Desen<sup>3</sup>, HUANG Yan<sup>3</sup>, ZHENG Mingyou<sup>4</sup>, ZHANG Yuanying<sup>2</sup>

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100000, China; 2. Zhuhai Ketop Testing Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. Xuchang Ketop Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China;  
4. Hubei Energy Group Loushui Hydropower Co., Ltd., Hefeng 445800, China)

**Abstract:** With the large-scale construction and promotion of smart substations, the application of digital equipment and testers is increasing significantly. Thus the test and calibration of digital signal accuracy of a power system have become key issues. At present, the testing methods of digital signal accuracy in a power system are unprofessional, inconvenient and inaccurate. This affects the efficiency and quality of test and calibration, and is not conducive to the promotion and application of digital equipment in smart substations and long-term quality and safety. To solve this problem, a digital signal test and calibration device for a power system is researched and implemented. From the three aspects of theoretical value, time scale and algorithm traceability, the full performance index of digital signal accuracy can be tested and calibrated. Test and engineering verification show that the function and anti-interference results meet the standard and application requirements, and improve the efficiency and quality of digital signal test and calibration.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804252).

**Key words:** digital signal; test; calibrate; theoretical value traceability; time scale traceability; algorithm traceability

## 0 引言

随着智能变电站的大规模推广应用, 电力系统数字化设备和测试仪的应用越来越多, 数字信号传输成为智能变电站的重要特征。电力系统数字信号由与时间相关的离散采样点组成, 其准确度指标与模拟量信号不同, 需要进行针对性的验证。但是, 目前电力系统数字信号的测试方法不统一, 测试系

统针对性不强、便利性不足、不确定性高, 影响了数字信号检测校准的效率和质量<sup>[1]</sup>, 不利于数字化设备的推广应用。

在数字化测试仪的应用中, 数字信号精度异常现象屡见不鲜, 尤其是设备老化导致故障率升高时, 数字信号精度无法保证。为推进数字信号检测校准工作, 电力行业颁布了《T/CEEIA 459-2020 数字信号装置校准规范》, 规定了数字信号校准的量纲和方法<sup>[2]</sup>, 但其需要专业测试系统支撑才能落地。

基于此, 本文研究和实现了一种电力系统数字

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804252)

信号检测校准装置,从理论值、时标和算法溯源上对标准要求进行研究实现、提高自动测试水平,实现数字信号全精度指标测试,助力行业高效开展数字信号检测、校准、验收和到货全检工作。

## 1 现状分析

行业标准规定了电力系统数字信号准确度的内容,主要包括幅值、相位、离散度、延迟时间、同步性等。目前,针对以上内容,行业内检测校准方法并不统一,主要分为两种。

1) 通过搭建数模转换系统,将数字信号变为模拟信号,再利用模拟信号溯源理论和检测校准方法,测量被测信号的幅值和相位误差。这种方式被某些计量中心应用,但这种方式不够科学,忽略了数字信号本身的特征,除了幅值和相位精度外,其他准确度参量和指标则无法得到验证。

2) 借助网络记录仪解析数字信号报文,分析数字信号的各项指标<sup>[3]</sup>。这种方式被很多检测机构和企业合作应用,但网络记录仪对数字信号的分析要在抓取报文后非实时状态下进行,对时间窗和采样点数的选取受人为操作影响大,不确定性高。同时,需要人工逐个查看结果并计算误差,效率低。尤其是针对瞬时值(每个采样点),无法做到全时间窗分析、统计和显示,容易遗漏瞬时精度失真的情况。此外,网络记录仪时标精度不高(1  $\mu$ s),低于数字化测试仪自身精度和指标要求,给数字信号时间相关指标的验证带来不确定性。另外,这种方式的自动化程度比较低,手动操作和人工计算的占比大,容易造成测量失误。

电力行业需要新的测试设备,统一测试方法,提高数字信号测试的精度、效率、质量和科学性。

## 2 系统设计

### 2.1 系统框架

数字信号检测校准系统如图1所示。系统包括:数字信号检测校准装置(简称:检测校准装置)、数字信号输出装置和GPS时钟源。GPS时钟源为系统提供时间同步信号<sup>[4]</sup>,数字信号输出装置输出数字信号,检测校准装置针对数字信号进行检测校准。

### 2.2 硬件设计

检测校准装置硬件结构如图2所示,包括高性能数据处理模块、时钟与同步模块、报文接收模块以及人机界面和配置模块。

时钟与同步模块负责时间管理与数据同步,接收IRIG-B信号<sup>[5-7]</sup>。光网口和报文接收模块负责从



图1 数字信号检测校准系统

Fig. 1 Digital signal detection and calibration system

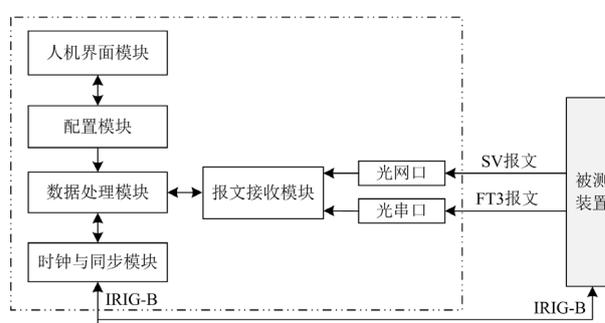


图2 硬件设计框图

Fig. 2 Hardware design block diagram

被测装置接收数字信号。数据处理模块负责对数字信号进行解析,提炼特征值。人机界面和配置模块与后台机通信,实现数据、指令的传输和配置文件的导入导出。

### 2.3 软件设计

检测校准装置软件采用分层与模块化设计,如图3所示,主要分为交互层、逻辑层以及驱动层。每层由各种功能模块组成,模块之间相互独立,根据模块部署情况不同,分别采用外部消息队列或者内部函数接口进行数据交互。

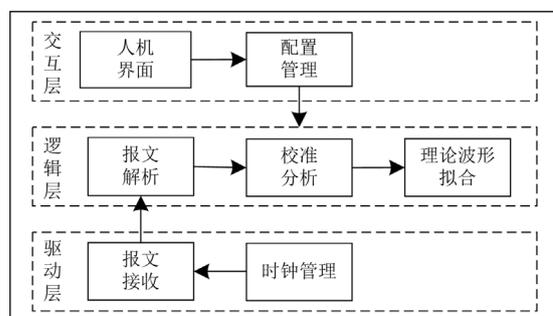


图3 软件设计框图

Fig. 3 Software design block diagram

交互层负责人机交互、生成配置并控制逻辑行为；逻辑层负责报文解析、波形拟合、校准分析并产生输出数据；驱动层负责驱动硬件进行时钟管理与报文接收。

### 3 关键技术

#### 3.1 基于波形比对的理论值溯源

电力系统数字信号是由既定采样率的离散采样点所组成的波形。从宏观上看，该信号具备有效值幅值和相位，这点与模拟量相同。从微观上看，组成波形的每个采样点有自己的幅值和相位。当采样点的分布与理想状态存在偏差时就会产生误差，当采样点的误差较大时，数字波形会出现畸变<sup>[6-8]</sup>。

电力设备使用前端输入的数字信号，既可能提炼有效值进行逻辑判定，也可能针对采样点进行分析或重采样，这时采样点的瞬时值会影响计算结果或动作行为。因此，验证电力系统数字信号的精度，既要考核有效值误差，也应考核瞬时值误差<sup>[9-11]</sup>。

针对幅值和相位，T/CEEIA 459-2020 采用理论值溯源方式，对比被测数字波形与基准波形，得到有效值和瞬时值等误差。检测校准装置从以下两个方面进行研究实现。

##### 1) 基准波形生成

根据被测数字化设备或数字化测试仪的输出设定值(拟输出数字波形的参数信息)，包括：采样率、频率、基波有效值及初始相角、谐波分量有效值及初始相角，在检测校准装置上预设信息，依据式(1)匹配采样脉冲在本地生成理论波形，并为每个采样点分配时标<sup>[12]</sup>，作为计算误差的基准波形。

$$x(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n [U_k \cos(k\omega t + \varphi_k)] \quad (1)$$

式中： $U_0$  为直流变量； $U_k$  为谐波幅值； $\varphi_k$  为第  $k$  阶谐波的初始相位。

以 4 kHz 采样率对正弦信号采样为例(采样间隔为 250  $\mu$ s)。基准波形的幅值有效值和每个采样点的幅值瞬时值(含相位)由检测校准装置的数据处理模块自动提取<sup>[13-15]</sup>。

##### 2) 波形自动对齐

在时间同步状态下，被测装置实际输出数字波形具有在 0 序号时刻输出特定初始相角的特点<sup>[16]</sup>。因此，在构造基准波形时，检测校准装置通过保证基准波形 0 序号时刻与被测波形一致来实现两者时域上的对齐，保证误差分析精度。针对少数被测装置由于精度受损或设计受限导致 0 序号时刻初始相位不稳定的情况，则通过抓取一段实际数字波形，

计算 0 序号时刻初始相角实现对齐<sup>[17]</sup>。波形对齐与校准过程示意如图 4 所示，此处以标准正弦信号为例进行说明。

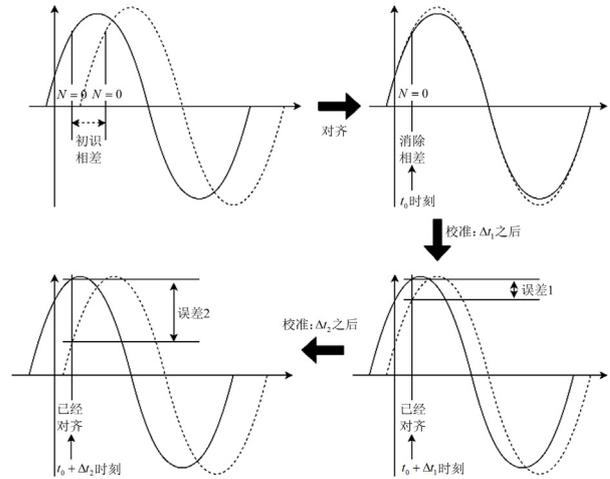


图 4 波形对齐与校准过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of waveform alignment and calibration process

#### 3.2 基于精确时间戳的时标溯源

电力系统数字信号的一个重要特征就是与时间相关联，对于既定采样率的数字信号，额定延时、采样间隔的准确性都会影响数字信号的精度<sup>[18-20]</sup>。

以额定延时为例，对于数字信号输出装置，定义为预定发送时刻与实际发送时刻的差值，即 0 号报文实际发送时刻与基准采样脉冲时刻的差值。数字信号额定延时的示意如图 5 所示。

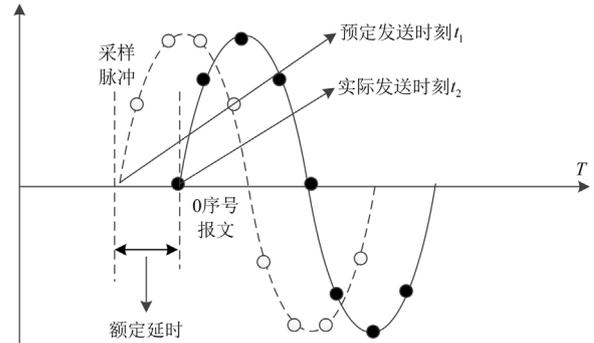


图 5 数字信号额定延时示意图

Fig. 5 Schematic diagram of digital signal rated delay

因此，可将额定延时的检测校准在时间层面上溯源，通过测试设备记录被测数字信号每个采样点的精确时标，进而验证额定延时的精度<sup>[21-22]</sup>。

检测校准装置具备精确时间戳能力，通过 FPGA 实现 IRIG-B 信号源的调频与锁相，支持内部时钟的高精度调整，为各模块提供精准的时间节拍。针

对光网口报文接收, FPGA 监视网口 PHY 器件, 标定网络报文前导字节到达时刻, 同时根据系统设定参数校准光网口硬件延时, 精准获取报文到达时刻。接收报文时间标定方法如图 6 所示。

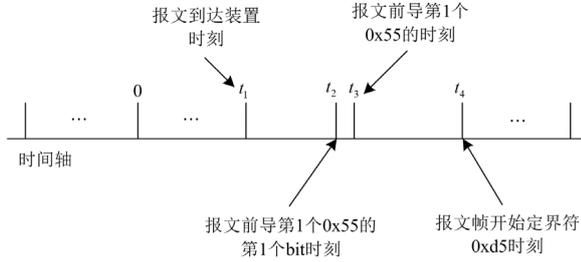


图 6 接收报文时间标定方法

Fig. 6 Time calibration method for receiving messages

报文到达时刻  $t_1$  是需要标定的时刻, 接收标定模块记录  $t_3$  是报文前导第 1 个 0x55 的时刻, 记录  $t_4$  是报文帧开始定界符 0xd5 的时刻, 通过时间回溯得到  $t_2$  是报文前导第 1 个 0x55 的第 1 个 bit 的时刻, 同时校正硬件延时时间 ( $t_2 - t_1$ ), 获取真实的报文到达装置的时刻  $t_1$ , 即此帧报文的时间戳。

### 3.3 基于典型算法的算法溯源

为分析数字信号精度, 需要提炼被测波形的特征量, 这要靠算法实现, 尤其是当频率变化或者基波信号中叠加有谐波分量时。

T/CEEIA 459-2020 规定了数字信号校准时用以提炼各参量的典型算法, 通过统一算法来消除算法不同可能带来的分析误差<sup>[23]</sup>。检测校准装置将典型算法进行实现, 以 45 Hz/50 Hz/55 Hz 3 种信号为例 (相同采样率): 同样时间窗内, 三者采样周波数量不同; 单一周波内, 三者采样点数不同。反映在同一个坐标系中, 三种数字波形的分布如图 7 所示 (左侧为时域, 右侧为频域)。

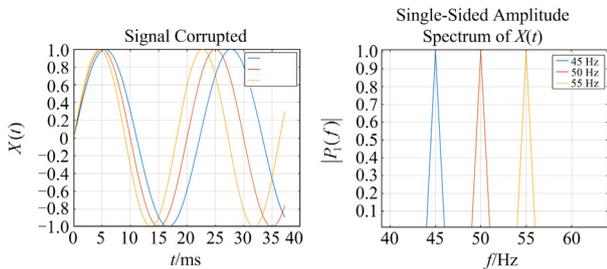


图 7 不同频率数字波形的分布

Fig. 7 Distribution of digital waveforms at different frequencies

检测校准装置采用 FFT (快速傅里叶) 算法进行频率最优估计, 跟踪提取频率并正确解析幅值和相位。针对被测数字波形: 1) 通过“过零点”估算频

率的大概值; 2) 以估算频率为基准, 连续取两个周期做 FFT (若估算频率和实际频率完全相同, 连续两个周期做 FFT, 计算出的幅值和相位应完全一致); 3) 如果估算频率有误差, 计算出的幅值和相位就有漂移, 用漂移算出  $\Delta f$ , 修正估算频率进行第二步迭代, 一直迭代到误差小于允许值 (0.0005 Hz, 小于行业 0.001 Hz 的精度要求)<sup>[24-25]</sup>; 4) 在正确跟踪和提炼频率之后, 用准确的频率再进行一次 FFT, 结果就是幅值和相位。

## 4 实现方案

### 4.1 幅值和相位的检测校准

第一, 针对幅值有效值。

(1) 利用检测校准装置记录被测数字信号, 时间窗不小于 1 s。(2) 设置被测数字报文幅值有效值为  $A$ , 检测校准装置自动计算幅值估计最优值  $\hat{A}$ , 有效值误差  $W$  的计算公式为

$$W = (\hat{A} - A) / A \times 100\% \quad (2)$$

数字信号幅值估计最优值  $\hat{A}$  计算公式为

$$\hat{A} = \sqrt{\sum_{n=1}^N A_n^2} / 2, (A_n \text{ 为 } n \text{ 次谐波幅值}) \quad (3)$$

第二, 针对幅值瞬时值。

对于数字信号输出装置, 需设定发送参数: 采样率、幅值、频率、初始相角。

(1) 检测校准装置记录被测数字信号所有采样点的瞬时值  $X_n$ , 记录时间窗不小于 1 s。(2) 根据瞬时值最优估计算法估计数字信号的初始相位角。(3) 根据初始相位角和采样间隔, 生成理论波形, 计算时间窗内所有采样点的瞬时值理论值  $\hat{X}_n$ 。(4) 瞬时值误差计算公式如式(4)~式(6)所示。

$$\Delta X = \hat{X}_n - X \quad (4)$$

$$\hat{\varepsilon}_n = \Delta X / (\sqrt{2} \times A) \quad (5)$$

$$\hat{\varepsilon}_{\max} = \max(\hat{\varepsilon}_n) \quad (6)$$

式中:  $\Delta X$  为第  $n$  个采样点的瞬时值误差;  $\hat{\varepsilon}_n$  为第  $n$  个采样点的峰值瞬时误差;  $\hat{\varepsilon}_{\max}$  为最大峰值瞬时误差。

对于一个时间窗口的数字交流采样序列  $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N)$ , 假定其频率为 50 Hz, 瞬时值最优估计算法如下。

1) 利用 Kalman 算法估计初始相位最优值。

(a) 利用 Kalman 算法估计时间窗口内的初始相位  $\varphi_0$ 。

(b) 利用初始相位  $\varphi_0$  和采样参数, 计算单个采

样点的理论值  $x(t)$ ，其数学表达式为

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (7)$$

为对初始相位  $\varphi_0$  进行滤波，采用向量序列

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \end{bmatrix}, \text{ 信号的数学表达式为}$$

$$x(t) = [A \cos \omega t - A \sin \omega t] \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

相应的 Kalman 方程为

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \\ Z_k = [A \cos \omega t_k - A \sin \omega t_k] X_k + \omega_k \end{cases} \quad (9)$$

校准期间频率不变，因此 Kalman 方程中的系统噪声方差矩阵  $Q=0$ ，观测噪声可采用自适应 Kalman 算法：

$$R = (Z_k - H_k \hat{X}_k)^T (Z_k - H_k \hat{X}_k) \quad (10)$$

从而得递推方程组，如下：

$$\begin{cases} X_k = \hat{X}_{k-1} \\ P_k = \hat{P}_{k-1} \\ X_k = X_k + \hat{K}_k (Z_k - H_k X_k) \\ K_k = P_k (H_k P_k H_k^T + R_k) \\ \hat{P}_k = (1 - K_k H_k) P_k \end{cases} \quad (11)$$

(c) 计算 10 个周波的采样点，得到初始相位最优估计值：

$$\hat{X} = X_k = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2) 由采样序列获取采样点的最优估计值。

$$t_n = (n-1)\Delta t, n=1,2,\dots,N \quad (13)$$

$$\hat{x}_n = [A \cos \omega t_n - A \sin \omega t_n] X \quad (14)$$

式中， $\Delta t$  为采样间隔。

第三，针对相位。

(1) 被测装置按最大通道数量输出数字报文，选定其中一个数字通道  $I$ ，设定其初始相位  $\varphi_0$ 。(2) 检测校准装置分析得到数字通道  $I$  的实际初始相位  $\varphi'$ 。(3) 相位误差  $\Delta\varphi$  计算如式(15)。

$$\Delta\varphi_0 = \varphi' - \varphi_0 \quad (15)$$

检测校准装置测试数字信号幅值和相位精度的界面如图 8 所示，自动对齐被测波形和基准波形，自动开展有效值误差和瞬时值误差的分析和显示。

#### 4.2 采样间隔和延时的检测校准

第一，针对采样间隔。

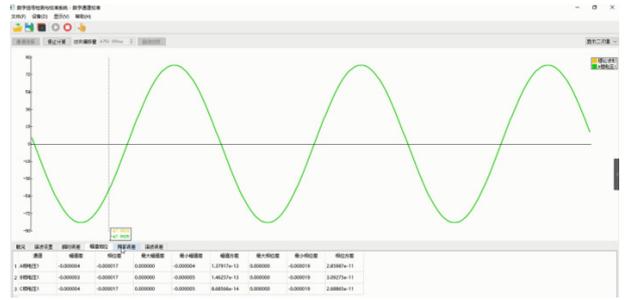


图 8 幅值和相位精度测试界面

Fig. 8 Amplitude and phase accuracy test interface

设定被测装置按照采样率  $f_0$  发送数字报文，利用检测校准装置接收并统计 5 min 的采样间隔。采样间隔精度通常采用采样间隔误差表示。

$$\Delta T = T - T_0 \quad (16)$$

$$T_0 = 1/f_0 \quad (17)$$

式中： $T$  为采样间隔测量值； $T_0$  为采样间隔基准值。

通过统计采样间隔误差，得到误差最大值。

$$M_T = \max(T_i - T_0) \quad (18)$$

式中： $M_T$  为采样间隔误差的最大值； $T_i$  为实测采样间隔。

第二，针对额定延时。

(1) 设置被测装置的额定延迟时间为  $T_d$ ，并设定其在整秒  $T_1$  时刻发出数字报文。(2) 检测校准装置接收到第一帧采样序号为 0 的数字报文时刻记为  $T_2$ 。(3) 额定延迟时间  $T_d$  计算如式(19)。

$$T_d = T_2 - T_1 \quad (19)$$

式中： $T_1$  为被测装置数字报文发送时刻； $T_2$  为检测校准装置接收第 1 帧 0 序号数字报文时刻。

(4) 额定延迟误差  $\Delta T_d$  计算如式(20)。

$$\Delta T_d = T_d - T_{d0} \quad (20)$$

式中， $T_{d0}$  为额定延迟时间设定值。

检测校准装置测试数字信号采样间隔和延时精度的界面如图 9 所示，在预定时间内自动抓取和分析数字报文，提炼指标信息并给出统计结果。



图 9 采样间隔和延时精度测试界面

Fig. 9 Sampling interval and delay accuracy test interface

### 4.3 频率和谐波的检测校准

第一, 针对频率。

(1) 设定被测装置输出数字信号的频率  $f_0$ , 检测校准装置记录时间窗不小于 10 s。(2) 检测校准装置解析被测数字报文, 得到频率的最优估计值  $\hat{f}$ 。

(3) 频率误差计算公式如式(21)。

$$W = \frac{\hat{f} - f_0}{f_0} \times 100\% \quad (21)$$

式中:  $W$  为频率误差;  $f_0$  为设定值。

频率最优估计算法: 记被测装置设定频率  $f_0$  为预估频率,  $\hat{f}$  为最优估计值, 则  $\hat{f} = f_0 + \Delta f$ ,  $\Delta f$  为估算频差, 输入正弦信号如式(22)。

$$x(t) = U_m \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_0) \quad (22)$$

式中:  $U_m$  为信号有效值;  $\varphi_0$  为信号初始相位。

在不知道准确真实频率的情况下, 先用设定频率  $f_0$  作傅里叶变换:  $f_0 \times T_0 = 1$ 。

$$a = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} U_m \times \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_0) \times \sin(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m f_0}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \cos(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0) \sin(\pi \Delta f T_0) \quad (23)$$

$$b = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} U_m \times \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_0) \times \cos(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m (f_0 + \Delta f)}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \sin(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0) \sin(\pi \Delta f T_0) \quad (24)$$

进一步对第二个周期作傅里叶变换:

$$a' = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^{2T_0} U_m \times \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_0) \times \sin(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m f_0}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \cos(3\pi \Delta f T_0 + \varphi_0) \sin(\pi \Delta f T_0) \quad (25)$$

$$b' = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^{2T_0} U_m \times \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_0) \times \cos(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m (f_0 + \Delta f)}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \sin(3\pi \Delta f T_0 + \varphi_0) \sin(\pi \Delta f T_0) \quad (26)$$

根据式(23)与式(24)、式(25)与式(26), 令:

$$X = \frac{a}{a'} = \frac{\cos(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}{\cos(3\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)} \quad (27)$$

$$Y = \frac{b}{b'} = \frac{\sin(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}{\sin(3\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)} \quad (28)$$

对式(27)、式(28)进一步展开, 得到:

$$X = \frac{1}{\cos(2\pi \Delta f T_0) - \sin(2\pi \Delta f T_0) \frac{\sin(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}{\cos(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}} \quad (29)$$

$$Y = \frac{1}{\cos(2\pi \Delta f T_0) + \sin(2\pi \Delta f T_0) \frac{\cos(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}{\sin(\pi \Delta f T_0 + \varphi_0)}} \quad (30)$$

式(29)与式(30)化简得式(31)。

$$\cos(2\pi \Delta f T_0) = \frac{XY + 1}{X + Y} = \frac{ab + a'b'}{ab' + a'b} \quad (31)$$

因此得到估算频差  $|\Delta f|$  和频率最优估计值  $\hat{f}$  分别如式(32)和式(33)所示。

$$|\Delta f| = \frac{1}{2\pi T_0} \arccos\left(\frac{ab + a'b'}{ab' + a'b}\right) \quad (32)$$

$$\hat{f} = f_0 \pm |\Delta f| \quad (33)$$

式中,  $\pm$  符号根据  $a$ 、 $b$  的符号确定所在象限选取。

第二, 针对谐波。

(1) 检测校准装置记录接入的数字报文, 时间窗不小于 10 s, 依据算法对数字报文进行谐波分解。各阶谐波幅值数学表示为

$$\hat{A}_0, \hat{A}_1, \dots, \hat{A}_i \quad (34)$$

式中:  $\hat{A}_0$  为直流分量幅值;  $\hat{A}_i$  为第  $i$  次谐波幅值;  $i=1$  代表基波幅值。

(2) 谐波幅值误差计算公式为

$$\hat{W}_n = (\hat{A}_n - A_{n0}) / A_{n0} \times 100\% \quad (35)$$

式中:  $A_{n0}$  为谐波幅值设定值;  $W_n$  为  $n$  次谐波误差。

谐波分解采用加窗 FFT 算法, 无需对信号进行同步采样。窗函数选择具有高计算精度的布莱克曼-哈里斯窗函数, 时域表达式为

$$W(n) = 0.35875 - 0.48829 \cos \frac{2\pi n}{N-1} + 0.14128 \cos \frac{4\pi n}{N-1} - 0.01169 \cos \frac{6\pi n}{N-1} \quad (36)$$

设有单一频率信号  $x(t)$ , 频率为  $f_0$ , 幅值为  $A$ , 初始相位为  $\varphi_0$ , 经过采样频率为  $f_s$  ( $f_s \geq 2f_0$ ) 的重采样后, 表达式为

$$x(n) = A \sin \left( 2\pi \frac{f_0}{f_s} \times n + \varphi_0 \right) \quad (37)$$

加窗  $W(n)$  后, 信号的傅里叶变换如下:

$$X(f) = \sum_{n=1}^{\infty} (x(n) \times W(n) \times e^{j2\pi n}) = 0.5j \left\{ e^{j\varphi_0} W \left[ \frac{2\pi(f - f_0)}{f_s} \right] - e^{j\varphi_0} W \left[ \frac{2\pi(f + f_0)}{f_s} \right] \right\} \quad (38)$$

在  $f_0$  附近的连续频谱表达式为

$$X(f) = (A/2j)e^{j\varphi_0} W \left[ \frac{2\pi(f - f_0)}{f_s} \right] \quad (39)$$

对其进行离散抽样，离散傅里叶变换表达式为

$$X(f) = (A/2j)e^{j\varphi_0} W \left[ \frac{2\pi(n\Delta f - f_0)}{f_s} \right] \quad (40)$$

$\Delta f = 1/NT$ ， $N$  为数据的截断长度。在  $f_0 = k_0\Delta f$  处应为峰值，但因采样很难达到同步，因此  $k_0$  一般不为整数。设  $k_0$  左右两侧的谱线分别为第  $k_1$  和第  $k_2$  条谱线，则意味着取的这两条谱线应为峰值点附近最大和次大幅值的谱线。存在  $k_1 \leq k_0 \leq k_2 (k_2 = k_1 + 1)$ ，令这两条谱线的幅值分别为  $y_1 = |X(k_1\Delta f)|$ ， $y_2 = |X(k_2\Delta f)|$ 。由于  $0 \leq k_0 - k_1 \leq 1$ ，引入辅助参数  $c = k_0 - k_1 - 0.5$ ， $c \in [-0.5, 0.5]$ ，见式(41)。

$$\frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} = \frac{\left| W \left[ \frac{2\pi(-c + 0.5)}{N} \right] \right| - \left| W \left[ \frac{2\pi(-c - 0.5)}{N} \right] \right|}{\left| W \left[ \frac{2\pi(-c + 0.5)}{N} \right] \right| + \left| W \left[ \frac{2\pi(-c - 0.5)}{N} \right] \right|} \quad (41)$$

令  $d = (y_2 - y_1)/(y_2 + y_1)$ ，则式(41)是以  $c$  为自变量、 $d$  为因变量的函数，记为  $d = f(c)$ ，其反函数为  $c = f^{-1}(d)$ 。采用多项式逼近方法可以计算出  $c$ ：

$$c = \left( \frac{2.6197085d + 0.2865675d^3 +}{0.1283d^5 + 0.08024d^7} \right) \quad (42)$$

经布莱克曼-哈里斯窗修正后的幅值表达式为

$$A = \frac{(y_1 + y_2) \left( \frac{3.06539676 + 0.965559979c^2 +}{0.163556c^4 + 0.01985c^6} \right)}{N} \quad (43)$$

检测校准装置测试数字信号幅值和相位精度、频率精度的测试界面分别如图 8 和图 10 所示，自动提炼谐波、频率信息，统计、显示结果及分布情况。

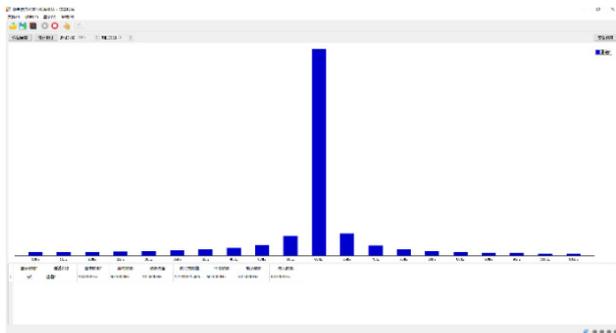


图 10 频率精度测试界面

Fig. 10 Frequency accuracy test interface

## 5 应用效果

### 5.1 工程应用

检测校准装置已应用于数字化测试仪的检测校准，获得用户认可。本文展示 2 种数字化测试仪的测试结果，测试仪 1 为数字化继电保护测试仪，测试仪 2 为手持式光数字测试仪，结果如表 1 所示。

表 1 工程应用效果

准确度参量	设定输出值	测量结果		判定
		测试仪 1	测试仪 2	
幅值有效值	1.000 00 A	1.000 32 A	1.001 48 A	合格
	10.000 00 V	10.002 03 V	10.007 34 V	合格
幅值瞬时值	100.000 00 A	141.400 45 A	141.400 67 A	合格
	500.000 00 V	707.000 92 V	707.011 76 V	合格
相位	30.0000°	30.0006°	29.9873°	合格
额定延时	500.000 μs	499.981 μs	500.087 μs	合格
采样间隔	250.000 μs	249.996 μs	250.012 μs	合格
频率	10.0000 Hz	10.0001 Hz	9.9996 Hz	合格
谐波(13 次)	20.000%	20.010%	19.987%	合格

注：1. 被测波形幅值瞬时值测量结果选取的是波峰处；2. 谐波测量结果选取的是叠加 13 次谐波、谐波含量 20% 条件下的输出值。

在此基础上，仿真被测数字波形出现错误：  
(1) 电流采样值突变(90°位置，连续 5 个采样点瞬时值放大 1 倍)，如图 11 所示；(2) 采样值中断(90°位置开始，连续中断 5 个采样点)，如图 12 所示。

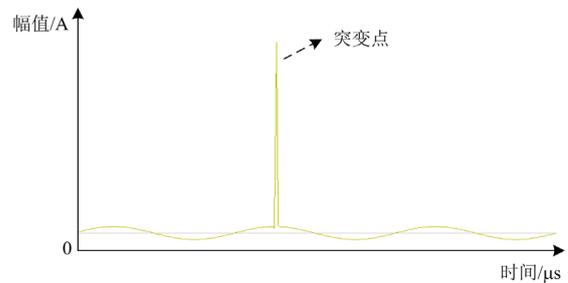


图 11 采样值突变

Fig. 11 Sampling value mutation

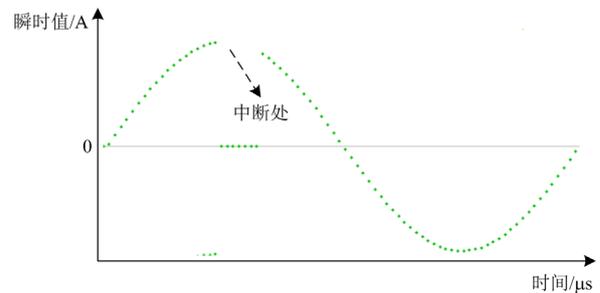


图 12 采样值中断

Fig. 12 Sampling value interrupt

将被测数字波形接入检测校准装置,测试结果如表2所示。

表2 异常数字信号的测试

Table 2 Abnormal digital signal testing

准确度参量	设定输出值	测量结果		
		45°位置	90°位置	判定
幅值瞬时值/A	100.000 00	99.986 36	282.903 55	不合格

准确度参量	设定输出值	测量结果		
		最小间隔	最大间隔	判定
采样间隔/ $\mu\text{s}$	250.000	249.992	1499.894	不合格

注: 1.被测数字波形 45°位置无畸变, 90°位置有畸变; 2. 被测数字波形中断5个采样点, 最大采样间隔 1500.000  $\mu\text{s}$ 。

综上, 检测校准装置功能正常, 可以正确分析数字信号各参量的误差, 测量结果符合预期。

## 5.2 抗干扰性

考虑到除实验室外, 检测校准装置还应用于工业生产环境, 本文参考 DL/T 1501-2016 等标准要求, 开展电磁兼容试验, 试验结果如表3所示。

表3 EMC 试验结果

Table 3 Result of EMC test

序号	试验项目	试验要求	试验结果
1	脉冲群干扰	严酷等级: 3级	合格
2	静电放电干扰	严酷等级: 3级	合格
3	辐射电磁场干扰	严酷等级: 3级	合格
4	快速瞬变干扰	严酷等级: B级	合格
5	传导发射限值	150 kHz~30 MHz 内传导 发射值不超过标准要求	合格
6	辐射发射限值	30 MHz~1 GHz 内辐射发 射值不超过标准要求	合格

## 6 结论

本文研制的电力系统数字信号检测校准装置提高了数字信号精度检测校准的效率和质量, 依托标准统一了测试方法, 优化了测试系统, 适用于制造企业的研发和出厂测试, 也适用于检测校准机构及电力用户的型式试验、设备校准、入网测试和到货全检等。

本文研制装置从理论值溯源、时标溯源和算法溯源上进行研究和设计, 对标准要求实现, 助力行业高效开展数字化设备数字信号部分的检测、校准、验收和到货全检工作, 有利于促进数字化设备和数字化测试仪的应用推广, 为建设智能变电站和智能电网提供测试工具支撑。

## 参考文献

[1] 陈光华, 王鹏飞, 赵应兵, 等. 智能变电站智能终端自动测试仪设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 162-169.

- CHEN Guanghua, WANG Pengfei, ZHAO Yingbing, et al. Automatic test equipment design of intelligent terminals in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 162-169.
- [2] 中国电器工业协会. 数字信号装置校准规范: T/CEEIA 459—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [3] 国家能源局. 数字化继电保护试验装置技术条件: DL/T 1501—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4] 姚致清, 王鹏飞, 陈光华, 等. 电力系统合并单元测试仪测量误差检测校准装置研制及性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 119-126.
- YAO Zhiqing, WANG Pengfei, CHEN Guanghua, et al. Development and performance analysis of a measurement error test and calibration device for a merging unit tester in a power system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 119-126.
- [5] 周华良, 郑玉平, 徐建松, 等. 混合组网下采样值传输时延值测量的可信度评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 162-169.
- ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, XU Jiansong, et al. Credibility evaluation of time delay measurement of transmission for sample value in mixed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 162-169.
- [6] 彭桂喜, 袁思遥, 孙昊, 等. 继电保护装置检验测试智能体的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 174-179.
- PENG Guixi, YUAN Siyao, SUN Hao, et al. Study and implementation of a test agent for relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 174-179.
- [7] 孙福寿, 汪雄海. 一种分析继电保护系统可靠性的算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 32-35, 76.
- SUN Fushou, WANG Xionghai. A new method for reliability analysis of protection in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35, 76.
- [8] 何笠, 滕予非, 石涛, 等. 智能变电站 PMU 装置测试仪研制[J]. 四川电力技术, 2018, 41(3): 61-67.
- HE Li, TENG Yufei, SHI Tao, et al. Research on development of PMU tester in smart substation[J]. Sichuan Electric Technology, 2018, 41(3): 61-67.
- [9] 周华良, 郑玉平, 姜雷, 等. 适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 96-100.
- ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, JIANG Lei, et al. An equal-interval sampling control and synchronization method for merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 96-100.
- [10] 张冉, 陈光华, 陈皓帆, 等. 继电保护测试仪时间测量

- 精度检测校准装置研制及性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13):163-170.
- ZHANG Ran, CHEN Guanghua, CHEN Haofan, et al. Development and performance analysis of a time measurement accuracy test and calibration device for a relay protection tester[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 163-170.
- [11] 申莉, 甘依依, 孙国学, 等. 数字化电能表校准技术研究及应用[J]. 电测与仪表, 2014, 51(24): 89-95.
- SHEN Li, GAN Yiyi, SUN Guoxue, et al. Research and application of calibration technology for digitized electric energy meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(24): 89-95.
- [12] 衷春, 王飞, 陈娟. 基于FPGA的精密时间测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2015(12): 76-79.
- ZHONG Chun, WANG Fei, CHEN Juan. Design of precise time measurement system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2015(12): 76-79.
- [13] 杨臻, 赵燕茹. 一种智能变电站一体化信息平台的设计方案研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(3): 59-64.
- YANG Zhen, ZHAO Yanru. Design and study of an integrative information platform for smart substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(3): 59-64.
- [14] LI Zirun, XU Jin, WANG Keyou, et al. FPGA-based real-time simulation for EV station with multiple high-frequency chargers based on C-EMTP algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 283-293.
- [15] 李忠安, 沈全荣, 王言国, 等. 电力系统智能装置的自动化测试系统设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 77-79.
- LI Zhongan, SHEN Quanrong, WANG Yanguo, et al. Electrical power system intelligence installment automated test system design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 77-79.
- [16] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 120-125.
- ZHANG Xiaoli, LIU Huihai, LI Junqing, et al. Automatic test platform in smart substation for relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 120-125.
- [17] 中国电力企业联合会. 数模一体继电保护试验装置技术规范: T/CEC 247—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [18] 国家能源局. 合并单元测试设备技术规范: NB/T 42087—2016[S]. 北京: 新华出版社, 2016.
- [19] 周前, 赵阳, 马长武, 等. 基于 IRIG-B 的继电保护系统中秒脉冲和 250  $\mu$ s 脉冲生成方法[J]. 电工技术, 2020(7): 78-80.
- ZHOU Qian, ZHAO Yang, MA Changwu, et al. Generation method of second Pulse and 250  $\mu$ s pulse in relay protection system based on IRIG-B[J]. Electric Engineering, 2020(7): 78-80.
- [20] 李保恩. 智能变电站继电保护装置自动测试平台的研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 131-135.
- LI Baoen. Research and application of automatic test platform for intelligent substation relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 131-135.
- [21] 李澄, 陆玉军, 王宁, 等. 智能变电站便携式综合测试仪的研制[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 19-22.
- LI Cheng, LU Yujun, WANG Ning, et al. Development of portable integrated tester for the smart substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 19-22.
- [22] 国家能源局. 智能变电站手持式光数字信号试验装置技术规范: DL/T 1944—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [23] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125.
- [24] 陈国军, 贾学东, 朱蕊, 等. 一种基于幅度相位修正的高精度时间间隔测量方法[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(4): 340-343, 349.
- CHEN Guojun, JIA Xuedong, ZHU Rui, et al. A high precision time interval measurement method based on amplitude-phase correction[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2020, 37(4): 340-343, 349.
- [25] 杨臻, 赵燕茹. 一种智能变电站一体化信息平台的设计方案研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(3): 59-64.
- YANG Zhen, ZHAO Yanru. Design and study of an integrative information platform for smart substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(3): 59-64.

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-03-27

作者简介:

赵锦(1981—), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为新能源、储能及智能电网技术; E-mail: zhaojin@sgecs.sgcc.com.cn

陈光华(1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、智能配电网自动化设备及系统, 通信网络、时间同步及可靠性测试技术; E-mail: chenguanghua@ketop.cn

刘德森(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、协议一致性测试、通信网络。E-mail: liudesen@ketop.cn

(编辑 魏小丽)