

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211529

## 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

张冉<sup>1</sup>, 陈光华<sup>2</sup>, 陈皓帆<sup>3</sup>, 黄岩<sup>1</sup>, 银庆伟<sup>1</sup>, 裴常富<sup>4</sup>

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 珠海开普检测技术有限公司, 广东 珠海 519000;  
3. 五凌电力有限公司白市水力发电厂, 湖南 怀化 418000; 4. 华能沁北发电有限责任公司, 河南 济源 454000)

**摘要:** 为推进智能变电站建设, 针对继电保护测试仪时间测量精度缺少验证手段导致的保护测控等关键二次设备应用和推广受影响的问题, 研制了一种针对继电保护测试仪时间测量精度开展检测校准的装置。首先, 分析现有方法的弊端, 提出继电保护测试仪时间测量精度检测校准的整体思路, 明确设计方案。其次, 利用输入数据精确时间标定和精准时间的输出控制技术, 实现 SV、GOOSE 和硬接点信号的高精度采集和输出。最后, 基于动作事件生成及精确时间戳实现电力系统常见动作时间的高精度、宽量程模拟, 作为继电保护测试仪测量的基准误差。试验及工程验证结果表明, 新研制装置的时标精度、动作时间模拟和抗干扰能力满足标准要求 and 应用需求, 有效解决了继电保护测试仪时间测量精度无法检测校准的行业难题, 提高了检测校准能力和效率。

**关键词:** 继电保护测试仪; 动作时间; 时间测量; SV; GOOSE

### Development and performance analysis of a time measurement accuracy test and calibration device for a relay protection tester

ZHANG Ran<sup>1</sup>, CHEN Guanghua<sup>2</sup>, CHEN Haofan<sup>3</sup>, HUANG Yan<sup>1</sup>, YIN Qingwei<sup>1</sup>, PEI Changfu<sup>4</sup>

(1. Xuchang Ketop Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Zhuhai Ketop Testing Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. Wuling Power Corporation Ltd. Baishi Hydropower Plant, Huaihua 418000, China;  
4. Huaneng Qinbei Power Generation Co., Ltd., Jiyuan 454000, China)

**Abstract:** In promoting the construction of a smart substation, there is a problem that the application and popularization of key secondary equipment such as protection and monitoring device are affected by the lack of verification means for the time measurement accuracy of relay protection tester. Therefore a device for testing and calibrating the time measurement accuracy is developed. First, the disadvantages of the existing methods are analyzed, the overall idea of the time measurement accuracy test and calibration for the relay protection tester is proposed, and a design scheme is completed. Secondly, based on accurate time calibration of input data, precise time output control technology, high-precision acquisition and output of SV, a GOOSE and hard output signal are achieved. Finally, based on action event generation and accurate timestamp technology, a high-precision and wide-range simulation of common action time of a power system are realized. This is the reference error measured by the protective relay test, as the reference error of the tester. Test and engineering verification results show that the time accuracy, action time simulation and anti-interference ability of the latest developed device meet the standard requirements and application requirements. They effectively solve the industry problem that the time measurement accuracy of the relay protection tester cannot be tested and calibrated, and improve the test and calibration ability and efficiency.

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

**Key words:** relay protection tester; action time; time measurement; SV; GOOSE

## 0 引言

时间测量是继电保护测试仪的重要功能, 需要准确测试电力系统继电保护及自动化设备的动作时

间或响应时间等, 涉及 SV、GOOSE、硬开入和硬开出信号。针对继电保护测试仪的时间测量精度, 相关标准有明确规定。为验证继电保护测试仪的标准符合性, 确保其时间测量能力满足电力行业需求, 需对其时间测量精度进行检测校准<sup>[1-4]</sup>。

目前, 由于缺少专业设备, 检测机构需要借助

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804252)

多种仪器搭建复杂系统,才能间接完成继电保护测试仪时间测量精度验证。但是,现有方法无法全量程验证,且误差源多、配置复杂、接换线多、精度低<sup>[5-6]</sup>,不能满足应用需求。

因此,有必要研究研制专业测试设备,简化测试系统、减少误差源,提高测试效率和精度,解决行业难题。

### 1 现状分析

标准要求继电保护测试仪时间测量精度应优于 100 μs。目前,一般通过图 1 所示方法验证继电保护测试仪时间测量的精度:继电保护测试仪提供 SV、GOOSE 或硬开入信号,继电保护装置接收到以上信号后经过自身的功能逻辑处理,输出相应反馈信号,再接回继电保护测试仪,同时接入网络报文记录分析装置<sup>[7-8]</sup>。

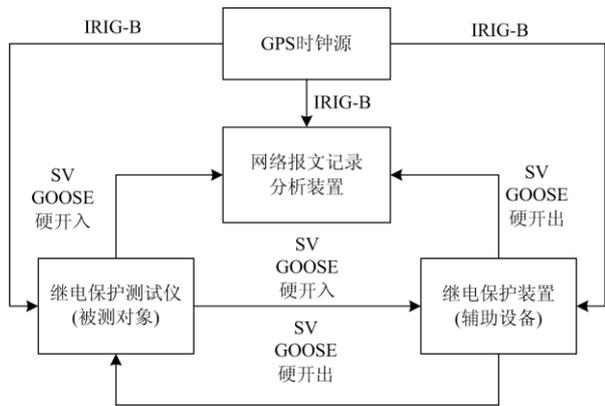


图 1 当前检测系统图

Fig. 1 Current test system diagram

继电保护装置从接入到输出信号间的时间差  $\Delta T_1$  作为动作时间实际值(接入和输出信号的时标由网络报文记录分析装置提供),继电保护测试仪的计算值  $\Delta T_2$  作为动作时间测量值。 $\Delta T = \Delta T_2 - \Delta T_1$ , 作为继电保护测试仪动作时间的测量误差。

现有方法弊端: 1) 继电保护装置动作时间固定、无法调整,无法全量程(1 ms~100 s)模拟动作时间; 2) 继电保护装置动作时间精度低(ms 级),波动大,导致继电保护测试仪测量结果波动大,降低分析精度; 3) 网络报文记录分析装置记录硬接点信号的时标精度低(> 100 μs, 不满足要求)。当动作时间小于 1 ms 时,动作时间实际值的精度无法保证,影响对继电保护测试仪测量精度的计算和判定。

### 2 系统设计

目前行业内没有继电保护测试仪时间测量精度

检测校准装置(简称:检测校准装置)的相关技术规范和设计规范。因此,在进行系统设计时参考了数字化继电保护试验装置、数模一体继电保护试验装置等的要求<sup>[9-11]</sup>。同时,在性能指标设计上,参考了行业标准对于上述装置时间测量精度的要求。

#### 2.1 系统框架

如图 2 所示,整个系统包括:检测校准装置、继电保护测试仪(被测对象)和 GPS 时钟源。

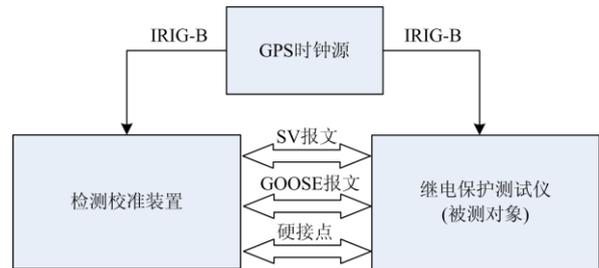


图 2 继电保护测试仪时间测量精度检测校准系统框架

Fig. 2 Framework of time measurement error test and calibration system for relay protection tester

GPS 时钟源为系统提供时间同步信号<sup>[12]</sup>。继电保护测试仪输出 SV、GOOSE 或硬接点信号给检测校准装置,检测校准装置经既定时间延迟(即动作时间)输出反馈信号给继电保护测试仪。

#### 2.2 硬件设计

检测校准装置硬件结构如图 3 所示,包括高性能数据处理模块、时钟与同步模块、快速开入/开出模块、报文收/发模块以及人机界面和配置模块。

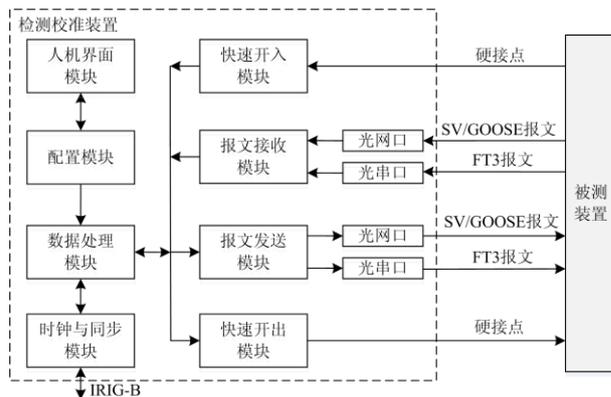


图 3 硬件设计框图

Fig. 3 Hardware design block diagram

数据处理模块负责整体管理。时钟与同步模块负责时间管理与数据同步,可接收、输出 IRIG-B 信号<sup>[12]</sup>。快速开入模块负责采集外部带电接点信号并打精确时间戳;快速开出模块负责精准控制开出自有源接点信号。光网口和报文收/发模块负责向(从)

被测装置发送(接收)数字信号。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4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,采用内部消息接口进行数据交互<sup>[13]</sup>。

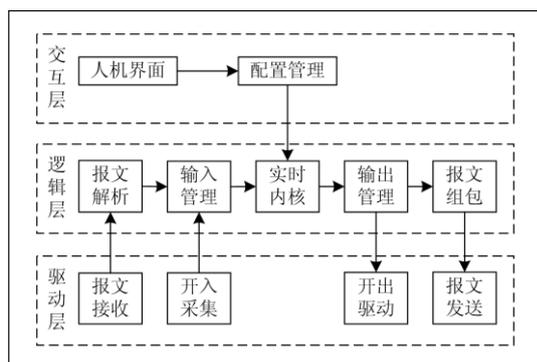


图4 软件设计框图

Fig. 4 Software design block diagram

交互层负责人机交互、生成配置并控制逻辑行为;逻辑层负责提取数据、逻辑演算并产生输出数据;驱动层负责驱动硬件采集数据和控制输出。

### 2.4 检测校准流程

检测校准流程如图5所示,启动检测校准装置

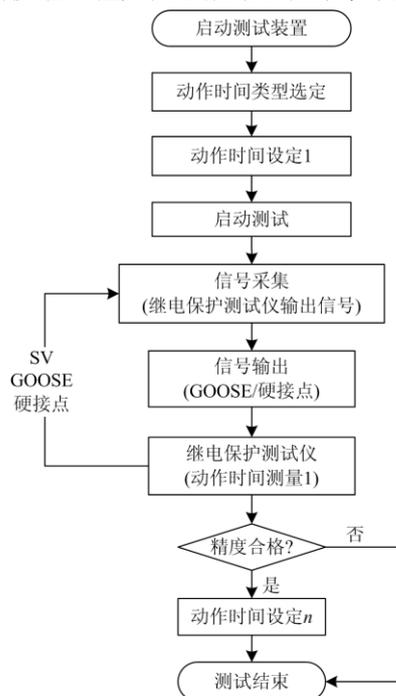


图5 检测校准流程图

Fig. 5 Flow chart of test and calibration

和后台软件,根据需求选择动作时间设定的类别,配置延迟时间参数后启动测试<sup>[14-15]</sup>。

检测校准装置接收继电保护测试仪的输出信号,经既定延迟时间后发送反馈信号给继电保护测试仪。记录继电保护测试仪动作时间测量值,与检测校准装置的动作时间设定值比较,得到误差。

## 3 关键技术

### 3.1 输入数据的精确时间标定

高精度内部时钟管理是时间测量精度检测校准的基石。通过FPGA器件实现了与IRIG-B信号源的调频与锁相,实现内部时钟的高精度调整,为各模块提供精准的时间节拍<sup>[16-18]</sup>。

当测试仪接入外部时钟源时,时钟逻辑实时统计内外时钟差异,采用误差逼近算法对本地时钟精度进行调整,保证内部时间节拍同步。原理示意如图6所示。

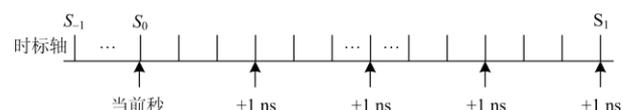


图6 输入数据的精确时间标定

Fig. 6 Accurate time calibration of input data

示例:假如前一秒与本地系统时间偏差100 ns,那么将在下一秒进行100 ns的调整。首先计算出调整位置,以100 MHz时钟为例,每隔1 000 000个时钟调整一次,即增加1 ns。

#### 1) 光网口接收时间标定

针对光网口报文接收,FPGA器件监视网口PHY器件,对网络报文前导字节到达时刻进行标定,同时根据系统设定参数,校准光网口硬件延时,进而精准获取报文到达时标。接收报文时间标定方法如图7所示。

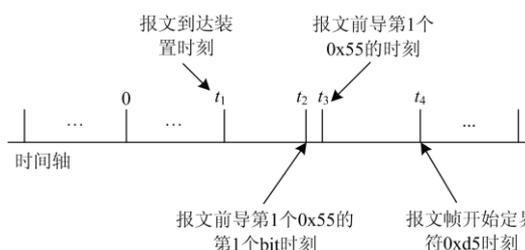


图7 接收报文时间标定方法

Fig. 7 Time calibration method for receiving messages

报文到达转置时刻 $t_1$ 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 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。

### 2) 硬开入事件时间标定

针对硬开入, FPGA 器件对开关量输入电压进行高频采样与实时比对。当开入电压超过变位阈值时, 立刻进行时间标定, 在处理完消抖等逻辑后, 对初始变位时刻进行回溯, 并将回溯到的变位时刻时标作为开入的精确变位时标<sup>[19]</sup>。

## 3.2 精准时间的输出控制

检测校准装置针对 SV、GOOSE 和硬接点信号, 实现精准时间的输出控制, 主要包括以下方面。

### 1) 以太网口报文精确输出控制

FPGA 优化并实现网络 MAC 层逻辑直接操控网络 PHY 器件, 可以很精准地评估网络数据从准备到实际发送的时间间隔<sup>[20-21]</sup>。在此前提条件下, 光网口的报文发送由前置机系统软件层进行组包, 并为每个数据包提供精确输出时间标签。FPGA 从总线队列中获取到数据包时提取该时间标签, 并对逻辑时延和硬件时延进行补偿计算, 得到真正需要写入网络 PHY 的时间, 随后实时监控当前时间, 在指定时刻精准写入以完成网络报文精准时间发送。

示例: 一帧报文要求在当前秒的 1 267 500 ns 时刻发出, 发送时间控制如图 8 所示。数据处理模块在  $t_1$  时刻获取要发送的报文及时间标签, 假如硬件延时需要耗时 80 ns, 为确保报文在  $t_3 = 267\ 500\ ns$  时刻离开装置, 那么需要控制报文在  $t_2 = 1\ 267\ 420\ ns$  时刻离开报文输出模块。

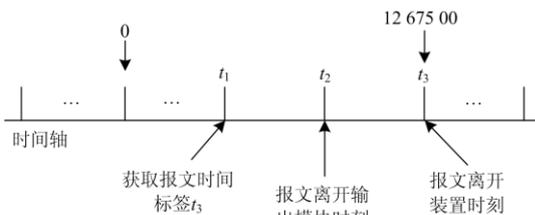


图 8 报文发送时间控制逻辑

Fig. 8 Control logic of message sending time

### 2) 硬接点信号精确输出控制

采用快速开出节点, 使用专门的前置硬件进行控制, 减少前置硬件时延的不确定性。检测校准装置在开出的驱动上进行切片管理。切片时间间隔内的底层驱动时延与硬件时延由 FPGA 器件进行补偿, 前置机系统软件则对上层逻辑时延进行补偿。系统软件与 FPGA 精确合作到达开出时刻的精准控制。

## 3.3 动作时间高精度设定

基于动作事件生成及精确时间戳, 检测校准装

置可高精度设定电力系统常见动作时间<sup>[22]</sup>。针对标准规定的动作时间类型, 检测校准装置支持以下 4 种模式: 1) 数字报文输出与数字报文接回; 2) 数字报文输出与硬接点接回; 3) 硬接点输出与数字报文接口; 4) 硬接点输出与硬接点接回。

以被测装置数字报文输出与硬接点接回模式说明高精度动作时间设定的实现方式, 如图 9 所示。

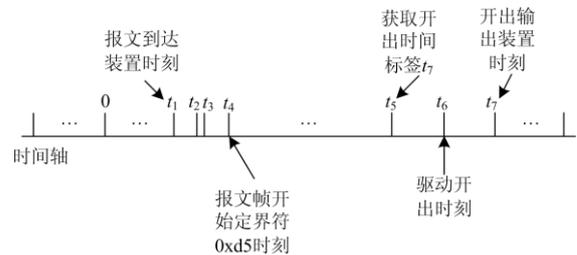


图 9 高精度动作时间设定的实现方法

Fig. 9 Realization method of high precision action time setting

检测校准装置根据输入报文精确时间标定方法记录报文到达时刻  $t_1$ 。同时, 开出模块在  $t_5$  时刻获取开出时间标签  $t_7$ , 根据开出模块逻辑用时与开出硬件延时, 在  $t_6$  时刻驱动开出, 确保在  $t_7$  时刻硬接点输出有效,  $t_7-t_1$  即为动作时间  $\Delta T$ 。

## 4 试验与验证

本文从两个方面对检测校准装置进行验证:

- 1) 借助校准体系和方法验证时标精度和动作时间设定精度; 2) 通过工程应用验证功能性能的有效性。

验证系统如图 10 所示, 图中各装置通过百兆光以太网和信号线实现直连。检测校准装置和继电保护测试仪形成闭环测量系统<sup>[23-24]</sup>, GPS 时钟源提供时间同步信号, 网络报文记录分析装置记录 SV/GOOSE 的时标(精度优于 100 ns), 示波器记录硬接点信号的时标(精度优于 1  $\mu s$ )。

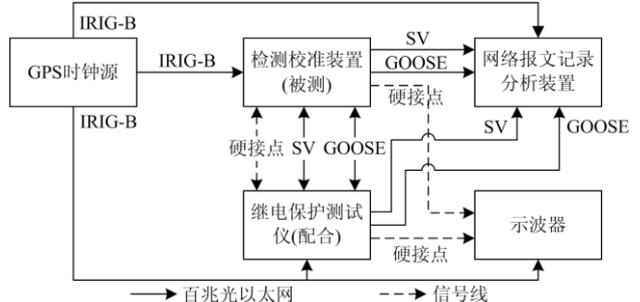


图 10 检测校准装置精度验证结构图

Fig. 10 Diagram of calibration device accuracy verification structure

### 4.1 时标精度验证

时标精度验证的信号类型包括 SV/GOOSE(优

于 100 ns)和硬接点(优于 5  $\mu$ s)。

#### 1) 输入数据的时标精度验证

继电保护测试仪定时发送 SV/GOOSE(硬接点)信号,检测校准装置记录信号到达时刻  $t_1$ ,网络报文记录分析装置(示波器)记录信号到达时刻  $t_0$ ,  $t_1 - t_0$  即为输出信号的时标误差。每种信号分别进行 100 次试验,结果如表 1 所示。

表 1 输入数据的时标精度

Table 1 Time accuracy of input data

数据类型	误差最小值	误差均值	误差最大值	标准差	结论
SV	32 ns	65.2 ns	75 ns	12.5 ns	合格
GOOSE	43 ns	62.6 ns	68 ns	8.8 ns	合格
硬接点	1.712 $\mu$ s	2.730 $\mu$ s	3.453 $\mu$ s	0.597 $\mu$ s	合格

#### 2) 输出数据的时标精度验证

检测校准装置设定  $t_0$  时刻发送 SV/GOOSE(硬接点)信号,网络报文记录分析装置(示波器)记录信号到达时刻  $t_1$ ,  $t_1 - t_0$  即为输出信号的时标误差。每种信号分别进行 100 次试验,结果如表 2 所示。

表 2 输出数据的时标精度

Table 2 Time accuracy of output data

数据类型	误差最小值	误差均值	误差最大值	标准差	结论
SV	31 ns	60.0 ns	79 ns	12.6 ns	合格
GOOSE	34 ns	57.8 ns	69 ns	11.8 ns	合格
硬接点	0.942 $\mu$ s	1.428 $\mu$ s	1.877 $\mu$ s	0.301 $\mu$ s	合格

表 1 和表 2 中的误差均值为 100 次试验的平均值,标准差是以 100 次试验误差值为样本的标准差。试验数据表明,数字信号采集和输出时标精度符合  $\pm 100$  ns 的指标,硬接点信号采集和输出时标精度符合  $\pm 10$   $\mu$ s 的指标,故判定结论为合格。

## 4.2 动作时间设定精度验证

根据标准规定的动作时间类型,本文对 6 种动作时间设定精度(优于 10  $\mu$ s)进行验证。

#### 1) 收到 SV 开始到发送 GOOSE 结束

继电保护测试仪定时发送 SV 信号,网络报文记录分析装置记录 SV 报文到达时刻  $t_0$ ;检测校准装置收到 SV 后延时  $T_0$  输出 GOOSE,网络报文记录分析装置记录 GOOSE 报文到达时刻  $t_1$ ,  $t_1 - t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。 $T_1 - T_0$  即为动作时间设定精度,共进行 100 次试验,结果如表 3 所示。

#### 2) 收到 SV 开始到发送硬接点开出结束

继电保护测试仪定时发送 SV 信号到检测校准装置和网络报文记录分析装置,网络报文记录分析装置记录 SV 报文到达时刻  $t_0$ ;检测校准装置收到 SV 后延时  $T_0$  输出硬接点信号,示波器记录硬接点

信号的时标  $t_1$ ,  $t_1 - t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。 $T_1 - T_0$  即为动作时间设定精度,共进行 100 次试验,结果如表 4 所示。

表 3 动作时间设定精度(收到 SV 开始/发送 GOOSE 结束)

Table 3 Accuracy of action time (from receiving SV to sending GOOSE)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ms	标准差/ms	结论
1	1.000 126	0.000 126	0.000 019	合格
50	50.000 133	0.000 133	0.000 025	合格
100	100.000 143	0.000 143	0.000 023	合格
1 000	1 000.000 139	0.000 139	0.000 018	合格
10 000	10 000.000 147	0.000 147	0.000 015	合格
99 999	99 999.000 153	0.000 153	0.000 028	合格

表 4 动作时间设定精度(收到 SV 开始/发送硬接点开出结束)

Table 4 Accuracy of action time (from receiving SV to sending hard output signal)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
1	1.001 561	1.561	0.000 154	合格
50	50.001 536	1.536	0.000 113	合格
100	100.001 612	1.612	0.000 109	合格
1 000	1 000.001 621	1.621	0.000 148	合格
10 000	10 000.001 631	1.631	0.000 132	合格
99 999	99 999.001 689	1.689	0.000 122	合格

#### 3) 收到 GOOSE 开始到发送 GOOSE 结束

继电保护测试仪定时发送 GOOSE 信号,网络报文记录分析装置记录 GOOSE 报文到达时刻  $t_0$ ;检测校准装置收到 GOOSE 后延时  $T_0$  输出 GOOSE,网络报文记录分析装置记录 GOOSE 到达时刻  $t_1$ ,  $t_1 - t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。 $T_1 - T_0$  即为动作时间设定精度,共进行 100 次试验,结果如表 5 所示。

表 5 动作时间设定精度(收到 GOOSE 开始/发送 GOOSE 结束)

Table 5 Accuracy of action time (from receiving GOOSE to sending GOOSE)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
1	1.000 128	0.128	0.000 017	合格
50	50.000 136	0.136	0.000 024	合格
100	100.000 145	0.145	0.000 021	合格
1 000	1 000.000 146	0.146	0.000 016	合格
10 000	10 000.000 149	0.149	0.000 018	合格
99 999	99 999.000 158	0.158	0.000 027	合格

#### 4) 收到 GOOSE 开始到发送硬接点开出结束

继电保护测试仪定时发送 GOOSE 信号,网络报文记录分析装置记录 GOOSE 报文到达时刻  $t_0$ ;检测校准装置收到 GOOSE 后延时  $T_0$  输出硬接点信号,示波器记录硬接点信号的时标  $t_1$ ,  $t_1 - t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。 $T_1 - T_0$  即为动作时间设定精度,共进行 100 次试验,结果如表 6 所示。

表 6 动作时间设定精度(收到 GOOSE 开始/发送硬接点开出结束)

Table 6 Accuracy of action time (from receiving GOOSE to sending hard output signal)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
1	1.001 519	1.519	0.000 126	合格
50	50.001 541	1.541	0.000 112	合格
100	100.001 587	1.587	0.000 110	合格
1 000	1 000.001 629	1.629	0.000 142	合格
10 000	10 000.001 651	1.651	0.000 109	合格
99 999	99 999.001 832	1.832	0.000 129	合格

5) 收到硬接点信号开始到发送 GOOSE 结束

继电保护测试仪定时发送硬接点信号, 示波器记录硬接点信号的时标  $t_0$ ; 检测校准装置收到硬接点信号后延时  $T_0$  输出 GOOSE, 网络报文记录分析装置记录 GOOSE 报文到达时刻  $t_1$ ,  $t_1-t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。  $T_1-T_0$  即为动作时间设定精度, 共进行 100 次试验, 结果如表 7 所示。

表 7 动作时间设定精度(收到硬接点开始/发送 GOOSE 结束)

Table 7 Accuracy of action time (from receiving hard input signal to sending GOOSE)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
1	1.003 576	3.576	0.000 129	合格
50	50.003 588	3.588	0.000 131	合格
100	100.003 612	3.612	0.000 113	合格
1 000	1 000.003 671	3.671	0.000 098	合格
10 000	10 000.003 656	3.656	0.000 112	合格
99 999	99 999.003 713	3.713	0.000 118	合格

6) 收到硬接点信号开始到发送硬接点信号结束

继电保护测试仪定时发送硬接点信号, 示波器记录硬接点信号的时标  $t_0$ ; 检测校准装置收到硬接点信号后延时  $T_0$  发送硬接点反馈信号, 示波器记录硬接点信号的时标  $t_1$ ,  $t_1-t_0$  即为实际动作时间  $T_1$ 。  $T_1-T_0$  即为动作时间设定精度, 共进行 100 次试验, 结果如表 8 所示。

表 8 动作时间设定精度(收到硬接点开始/发送硬接点信号结束)

Table 8 Accuracy of action time (from receiving hard input signal to sending hard output signal)

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
1	1.004 386	4.386	0.000 172	合格
50	50.004 507	4.507	0.000 123	合格
100	100.004 587	4.587	0.000 092	合格
1 000	1 000.004 669	4.669	0.000 098	合格
10 000	10 000.004 681	4.681	0.000 116	合格

$T_0$ /ms	$T_1$ 均值/ms	差值均值/ $\mu$ s	标准差/ms	结论
99 999	99 999.004 712	4.712	0.000 121	合格

表 3—至表 8 中的差值均值为 100 次试验的平均值, 标准差是以 100 次试验差值为样本的标准差。试验数据表明, 检测校准装置各类信号动作时间设定精度均符合  $\pm 10 \mu$ s 的指标, 故判定结论为合格。

4.3 抗干扰性验证

考虑到除实验室外, 检测校准装置还应用于工业生产环境, 参考《DL/T 1501-2016 数字化继电保护试验装置技术条件》等的电磁兼容要求, 验证其抗干扰能力, 结果如表 9 所示<sup>[25-26]</sup>。

表 9 电磁兼容试验结果

Table 9 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

4.4 工程应用验证

检测校准装置已在继电保护测试仪型式试验中得到应用, 获得了制造企业和用户的认可。本文选取 3 种继电保护测试仪的测试结果进行汇总, 测试仪 1 为数字化继电保护试验装置, 测试仪 2 为数模一体继电保护试验装置, 测试仪 3 为手持式光数字信号试验装置, 结果如表 10 所示。

表 10 工程应用效果

Table 10 Engineering application effect

时间测量 类型	时间设 定/ms	时间测量结果/ms			结果
		测试仪 1	测试仪 2	测试仪 3	
SV->发	1	1.036	1.121	1.044	满足要求
GOOSE<-收	50	50.041	50.132	50.061	满足要求
SV->发	100	100.035	100.129	100.043	满足要求
GOOSE->发	1 000	1 000.045	1 000.233	1 000.067	满足要求
GOOSE->发	10 000	10 000.064	10 000.251	10 000.073	满足要求
GOOSE<-收	99 999	99 999.102	99 999.397	99 999.176	满足要求

工程验证证明: 检测校准装置动作时间设定功能正常, 在 1 ms~100 s 范围内设定的动作时间能够

被继电保护测试仪正确接收并测量, 测量结果符合期望。检测校准装置满足实际应用需求, 测试效率和精度相比现有测试方法显著提高。

## 5 结语

本文研制的时间测量精度检测校准装置解决了继电保护测试仪时间测量精度缺少有效验证手段的难题, 为继电保护测试仪关键性能指标的验证提供了解决方案, 适用于制造厂家的研发测试和出厂测试, 也适用于电力用户和各级电科院的入网测试和到货全检等。

本文研制装置在系统复杂度、准确性和试验效率方面与传统方法相比都有明显提高, 有利于继电保护测试仪在电力行业的推广和应用, 进一步保证和提升保护、测控等变电站智能二次设备的质量, 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] 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): 91-96.  
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): 91-96.
- [2] 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.
- [3] 杨慧霞, 余姿雨, 赵瑞辰, 等. 继电保护装置测试用例智能生成技术的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 124-129.  
YANG Huixia, YU Ziyu, ZHAO Ruichen, et al. Research and implementation of intelligent generation technology for test case of relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 124-129.
- [4] 王晓建, 王龙, 袁慧宏, 等. 基于站内、站间多信息源的站域-广域一体化保护系统研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(11): 63-68.  
WANG Xiaojian, WANG Long, YUAN Huihong, et al. Research on the integrated protection system with substation-wide area level based on multi information sources from intra/inter stations[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(11): 63-68.
- [5] 陈创, 陈文睿, 李津. 面向继电保护系统级测试的缺陷自动定位方法[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 10-16.  
CHEN Chuang, CHEN Wenrui, LI Jin. Automatic defect locating method for relay protection systematic testing[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 10-16.
- [6] 潘本仁, 魏超, 桂小智, 等. 便携式电弧光保护测试仪的设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 149-155.  
PAN Benren, WEI Chao, GUI Xiaozhi, et al. Development and application of a portable arc protection tester[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 149-155.
- [7] 曾伟. 智能变电站系统继电保护跳闸方式的研究[J]. 电力设备管理, 2019(6): 41-44.  
ZENG Wei. Research on the way of relay power protection tripping of intelligent substation system[J]. Electric Power Equipment Management, 2019(6): 41-44.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 黄凯, 王哲, 刘慧, 等. 基于 DSP 的变压器保护跳闸逻辑测试仪的研究[J]. 河南科技, 2018(19): 34-37.  
HUANG Kai, WANG Zhe, LIU Hui, et al. Research on the tripping logic of transformer protection detector based on DSP[J]. Henan Science and Technology, 2018(19): 34-37.
- [12] 姚致清, 陈光华, 王鹏飞, 等. 合并单元直流偏置对母线保护的影响分析及解决方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 167-172.  
YAO Zhiqing, CHEN Guanghua, WANG Pengfei, et al. Analysis and solution for the influence of DC bias of a merging unit on bus protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 167-172.
- [13] 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.
- [14] 王俊辉, 魏芳, 刘园伟, 等. 智能变电站过程层设备时钟偏差测量试验方法研究[J]. 电工技术, 2020(1): 150-152, 159.  
WANG Junhui, WEI Fang, LIU Yuanwei, et al. Research on the test method of clock deviation measurement of

- process layer equipment in smart substation[J]. *Electric Engineering*, 2020(1): 150-152, 159.
- [15] 肖晖. 光继电保护测试仪测量结果不确定度评估[J]. *电子质量*, 2021(10): 62-66.  
XIAO Hui. Evaluation of uncertainty of measurement results of optical relay protection tester[J]. *Electronics Quality*, 2021(10): 62-66.
- [16] 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.
- [17] 徐望, 陈鑫, 李方能, 等. 高精度时间间隔测量方法分析[J]. *导航定位学报*, 2021, 9(4): 71-78.  
XU Wang, CHEN Xin, LI Fangneng, et al. Method analysis on high precision time-interval measurement[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2021, 9(4): 71-78.
- [18] 刘永欣, 易永辉, 陶永健, 等. 智能变电站过程层网络同步对时方案优化[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(10): 112-116.  
LIU Yongxin, YI Yonghui, TAO Yongjian, et al. Synchronous optimization scheme of smart substation process level network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(10): 112-116.
- [19] 曾柳中. 变电站继电保护缺陷分析及消缺措施研究[J]. *电气开关*, 2021, 59(3): 77-80.  
ZENG Liuzhong. Research on relay protection defect analysis and absent defect measure of a transformer substation[J]. *Electric Switchgear*, 2021, 59(3): 77-80.
- [20] 黄景毅. 基于交换芯片 MAC 与 PHY 数据通信系统的设计与研究[J]. *通信电源技术*, 2020, 37(6): 12-14.  
HUANG Jingyi. Design and research of data communication system based on exchange chip MAC and PHY[J]. *Telecom Power Technology*, 2020, 37(6): 12-14.
- [21] 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.
- [22] 刘华龙, 阮宜蓓. 傅里叶算法暂态特性以及微机保护的動作时间[J]. *机电设备*, 2020, 37(6): 75-78.  
LIU Hualong, RUAN Yijing. The transient characteristics of fourier algorithm and action time of microcomputer protection[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2020, 37(6): 75-78.
- [23] 李文强, 李悠, 杨梅, 等. 微机型继电保护测试仪技术指  
标和检定方法的研究[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(7): 51-56.  
LI Wenqiang, LI You, YANG Mei, et al. Research on the technology index and the verification method of the test instrument of microcomputer based relay protection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(7): 51-56.
- [24] 蔡东东, 何在民, 刘正阳, 等. 基于码密度法的 FPGA 进位链时延标定[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(3): 240-247.  
CAI Dongdong, HE Zaimin, LIU Zhengyang, et al. Calibration of FPGA carry chain delay based on code density method[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2019, 42(3): 240-247.
- [25] 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.
- [26] 李振华, 沈聚慧, 李振兴, 等. 隔离开关电弧模型及对 Rowgowski 线圈电流互感器的传导干扰研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 131-139.  
LI Zhenhua, SHEN Juhui, LI Zhenxing, et al. Research on an arc model of a disconnecter for conduction interference of a Rogowski coil electronic transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 131-139.

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-28

作者简介:

张冉(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化以及通信规约测试技术; E-mail: zhangran@ketop.cn

黄岩(1993—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统, 电力系统信息安全, 通信网络测试技术; E-mail: huangyan@ketop.cn

银庆伟(1985—), 男, 本科, 通信作者, 工程师, 主要研究方向为智能变电站自动化设备系统, 电动汽车充换电系统, 电力系统通信规约及测试技术, 信息安全测试技术。E-mail: yinqingwei@ketop.cn

(编辑 葛艳娜)