

基于 FPGA+104 工控板实时动态谐波 监控装置设计

杜俊杰¹, 梁俊伟², 和立辉¹, 杜 洋¹

(1. 国网邢台供电公司, 河北 邢台 054000; 2. 北京中科瑞德科技, 北京 100070)

摘要: 现阶段电能质量装置普遍采用 DSP 作为运算核心, 随着电能质量指标逐渐增多其运算能力越发力不从心, 并且其只能对用户谐波实现监测, 对谐波超标用户无法控制, 采用基于 FPGA+104 工控板硬件平台而设计的实时动态谐波监控装置, 实现了电能质量指标的大数据量计算及谐波超标的预警与控制; FPGA 负责频率跟踪、数据采集及 PCI 的数据通讯; 104 工控板负责电能质量各项指标的计算、数据存储、规约转换及人机交互等; 软件采用自适应时域均衡的谐波信号处理方法, 提高了谐波测量准确性和稳定度, 降低了采样频率的抖动与偏差造成的误差; 装置可同时测量 12 条线路的运行参数, 电压电流的有效值测量精度达到 0.1%, 谐波测量精度达到 0.2%; 经在邢台供电公司 28 座变电站的测试与应用, 实现了对谐波源用户谐波的有效监控, 促进了谐波源用户主动谐波治理的积极性, 取得良好效果。

关键词: 谐波; 监控; FPGA; 工控板

Design of Real-time Dynamic Harmonic Monitoring Device Based on FPGA+104 Industrial Control Panel

Du Junjie¹, Liang Junwei², He Lihui¹, Du Yang¹

(1. State Grid Xingtai Power Supply Company, Xingtai 054000, China;

2. Beijing Zhongke Ruide Technology Development, Beijing 100070, China)

Abstract: At present, power quality devices generally use DSP as the computing core. As power quality indicators gradually increase, their computing power becomes more and more unsatisfactory, and they can only monitor user harmonics, and cannot control users with harmonics exceeding the standard. The real-time dynamic harmonic monitoring device designed by the 104 industrial control board hardware platform realizes the calculation of large data volume of power quality indicators and the early warning and control of harmonic exceeding standards. The FPGA is responsible for frequency tracking, data acquisition, and PCI data communication. 104 industrial control board is responsible for the calculation of power quality indicators, data storage, protocol conversion and human-computer interaction. The software adopts the adaptive time domain equalization harmonic signal processing method, which improves the harmonic measurement accuracy and stability, and reduces the error caused by the jitter and deviation of the sampling frequency. Through the testing and application of 28 substations in Xingtai Power Supply Company, the effective monitoring of harmonics of harmonic source users is realized, and the enthusiasm of active harmonic control of harmonic source users is promoted, and good results are obtained.

Keywords: harmonics; monitoring; FPGA; industrial control board

0 引言

电能质量监测设备经过多年的发展, 逐步进入成熟阶段, 但现今大部分采用 DSP 运算处理器, 在电能质量指标越来越多的今天, 电能数据运算量不断增大, DSP 的运算能力越发力不从心。此外供电公司因谐波而发生的设备故障和异常情况逐渐增多, 而传统电能质量监测装置只能实现对谐波的监测, 对谐波超标用户无法实现有效控制, 用户治理主动性较差, 国网公司“谁污染, 谁治理”政策执行难度大, 执行效率较低, 致使电网谐波污染日益加剧, 供电部门面临客户对电能质量投诉的风险越来越大, 凸显

依靠技术手段而非仅靠教育引导及协商管控提高电网安全经济运行的紧迫性。采用更为先进的 FPGA 内核而研制的谐波监控装置实现了电能质量指标的大数据量计算, 并且在传统监测基础上增加了谐波控制功能, 能够对谐波超标线路进行报警并切断处理, 客观上督促污染源用户主动进行谐波的治理。

1 系统结构及原理

1.1 技术方案

谐波监控装置是基于原有的电能质量监测装置, 并综合继电保护的高可靠性而开发, 由于谐波监控装置的采样率比较高, 数据计算量也比较大, 其使用的什么样的硬件平台在很大程度上也就决定了监控装置的性能, 多通道并行采样的高速 A/D 转换芯片和以 DSP 为核心的多 CPU 嵌

收稿日期:2018-12-03; 修回日期:2018-12-21。

作者简介:杜俊杰(1965-),男,河北定州人,教授级高工,主要从事电能质量技术监督及系统无功管理方向的研究。

入式硬件平台已经成为在线式监测终端的主流,但是以微控制器和数字信号处理器为核心软硬件平台结构以及相应的设计开发模式,存在着处理能力不足、可靠性差、更新换代困难等弊端,导致其产品结构越来越复杂,生产成本不断提高,产品维护费用高问题日渐凸显,更为先进的使用 FPGA 芯片(其在进行大量复杂计算方面的高性能已经远超过了同档次的 DSP 芯片)加 104 工控板为硬件平台核心的在线式电能质量监测产品在未来将成为主流。

在 FPGA+104 工控板的谐波监控装置中,FPGA 主要实现频率跟踪与 AD 的采样控制、开出量和开入量控制、和 PCI 的数据通讯^[1]。104 工控板主要实现电能质量各项指标的运算、按键输入、液晶显示、数据通讯、规约转换、数据存储等。

电力系统的频率作为电能质量的指标,需要动态监测,同时作为实施安全稳定控制的重要状态反馈量,要求能够实时重构,其中一个重要环节是保证实时监测系统频率的变化并实时调整数据采样的时间间隔。传统的由锁相环电路实现硬件同步方法实时跟踪信号频率的变化,从而实时调整采样频率,其可靠性不高,当波形畸变时测量存在较大误差,而硬件较复杂,器件的延迟、漂移等也将引入新的误差。另外采用软件实现同步的方法,虽然简化了硬件电路,但是该方法增加了微处理器的计算量,并且由于微处理器中的量化误差和中断响应时间的分散性也必然会导致较大的采样误差^[2]。

随着 FPGA 技术的广泛应用,采用基于频率跟踪和自适应时域均衡的谐波信号处理与分析方法成为新的选择,该方法具有精度高,速度快等特点,在系统频率不断变化的情况下,为减小后续谐波分析的泄露误差,本装置在采用了实时频率测量、采样频率动态调整的同时,将自适应时域均衡理论引入电力信号的谐波处理与分析,提高了整体装置的谐波测量稳定性和准确性,降低了采样频率的抖动与偏差造成的谐波分析误差^[3]。

对于目前电能质量监测对象谐波、闪变及暂态等指标,由 FPGA 技术硬件实现的监测系统,可以提高运算速度和精度,满足极快响应速度的要求。

随着电能质量国家标准陆续更新,对电能质量监测装置提出了新的要求。谐波计算的采样窗口为十周波采样方式,同时增加了分辨率为 5 Hz 的谐间波的计算,以 DSP 为代表的微处理器已经计算起来非常困难,如果把算法移植到工控板上可以轻松完成。

闪变算法要求要不间断采样,同时谐波监控装置需要具有波形录制功能,如何把采集到的波形完整的传送到工控板成为谐波监控装置的关键。PCI 通讯具有成熟、稳定的特点,通讯速度能够达到要求,最终选定 FPGA 和工控板之间采用 PCI 通讯。硬件整体方案如下:

1.2 系统结构

系统由电源、采集、工控、控制和显示单元组成。结构简图如图 2 所示。

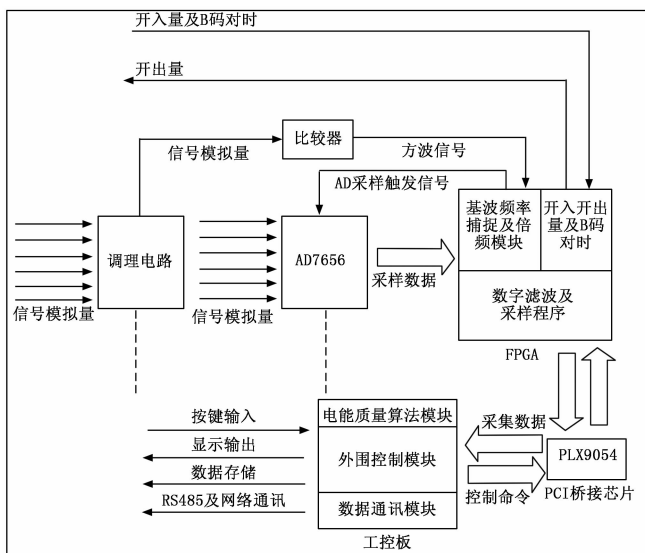


图 1 硬件原理框图



图 2 硬件系统结构图

1.3 工作原理

互感器板上设计有测频电路,将电压信号从模拟转换为数字信号传送至 FPGA 板。FPGA 板对数字信号进行测量后换算成电压信号频率,并根据信号频率实时调整采样周期,然后根据采样周期启动 AD 芯片对多路信号进行同步采集,AD 采集转换完成之后通知 FPGA 进行读取,FPGA 读取采集数据之后通过 PCI 总线传送至工控板。工控板通过各种算法计算得出电能质量参数指标,并判断是否需要控制输出,同时根据用户需要存储超限数据。

2 系统硬件设计

2.1 电源设计

电源采用定制型交直流两用开关电源,输出功率 35 W,效率为 86%,输出纹波峰峰值小于 15 mV。电源输出分为三种,分别为数字、模拟和控制用电源。三种电源相互独立。

2.1.1 数字电源

数字电源为 5 V/2 A,向 FPGA 板和工控板供电。

2.1.2 模拟电源

模拟电源为 ± 12 V/0.5 A,向互感器板运放电路供电。因为运放电路对纹波和噪声比较敏感,所以在模拟电源输出端增加了线性 LDO 电源芯片 TPSA30/TPS7A49 进一步处理,处理之后纹波峰峰值小于 5 mV,噪声小于 14 μ V。

2.1.3 控制电源

控制电源为 24 V/0.5 A,向继电器等控制回路供电。

2.2 互感器板设计

互感器板通过电压/电流互感器和调理电路,将待测试信号进行转换并传送至 AD 芯片,如图 3 所示。

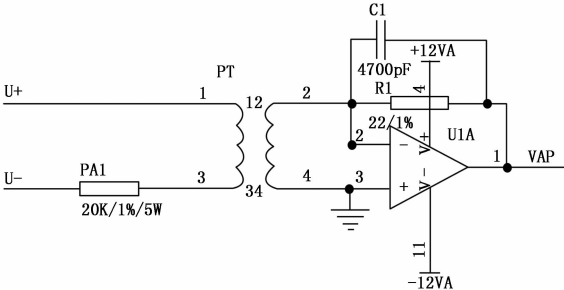


图 3 互感器板设计原理图

2.3 FPGA 板设计

包含多路 AD 芯片和 FPGA 处理器件。FPGA 通过测频电路对信号频率进行实时跟踪, 根据当前频率计算出采集周期并触发多路 AD 进行同步采集。AD 采集完成之后通知 FPGA 器件进行读取。AD 部分设计如图 4 所示。

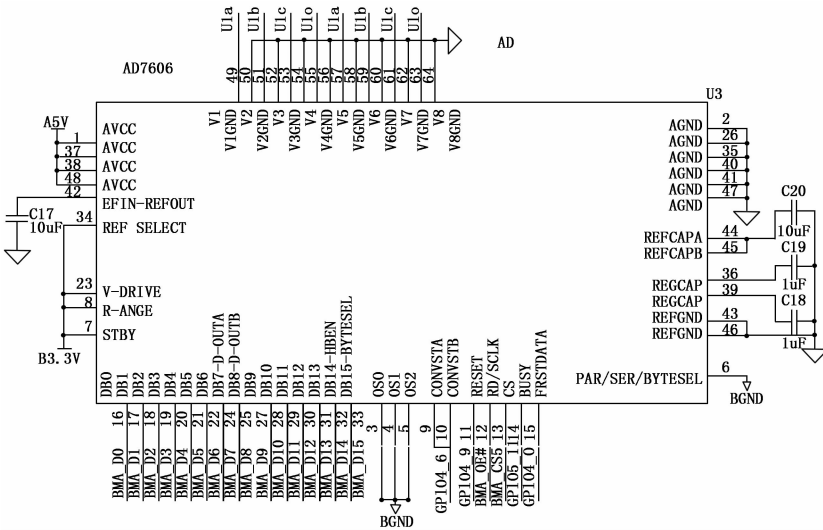


图 4 AD 板原理图

AD 芯片为 16 位采集精度, 每个 AD 具有 8 个采集通道, 可以通过启动信号同时进行采集和转换。与 FPGA 器件通过总线方式进行通信。

FPGA 器件设计如图 5 所示。
芯片共 484 个引脚, 大部分可用于逻辑输入与输出。内部采用低压供电, 包含大规模逻辑处理单元, 非常适合同步时序应用。

2.4 工控板选用

工控板选用行业内成熟产品板卡, 采用 LINUX 嵌入式操作系统。

2.5 控制板设计

控制板采用专用芯片对输出继电器进行控制, 保证其动作可靠性。另外控制回路采用了屏蔽措施, 防止误操作输出, 其设计原理如图 6 所示。

2.6 人机交互设计

采用 6.4 寸真彩液晶作为显示输出, 九宫

格硅胶按键作为参数输入及操作的键盘。

3 系统软件设计

3.1 显示单元

显示单元部分界面如图 7 所示, 可进行数据及图形显示以及参数的设定。

3.2 通信单元

目前全国谐波装置普遍采用 IEC61850 协议进行通讯, 因此, 同样采用 IEC61850 规约, 方便以后与上级部门的数据接轨。而由于实现 IEC61850 规约需要采用操作系统和较大的内存, 和较高的处理速度, 因此搭载 104 工控板使用嵌入式操作系统来提高处理速度, 根据国家电网公司对网络安全性的要求, 采用了 LINUX 系统。

根据全球智能互联网研究院 2018 年对电能质量 61850 通讯规约做出的修订, 新的电能质量监控装置应满足以下新增的通讯功能:

3.2.1 监控终端程序远程更新

监控终端支持文件接收功能, 接收的文件放置于终端的指定目录下。当远程更新监控终端程序时, 使用 SetFile 服务将更新程序传输到监控终端的 \UPLOAD 目录下, 然后通过自定义的遥控节点下发遥控指令通知远程服务端完成程序更新。终端程序烧录或更新后, 终端程序版本号应包含程序写入时间, 终端程序版本号命名规则为: “软件_版本_年月日時分”。

3.2.2 文件传输服务新增

- 1) 终端应支持按时间段召唤录波文件列表, 主站系统可向终端发送 请求的文件目录服务参数中, 通过时间段来获取文件列表。
- 2) 终端还应支持通过文件条目数来获取文件列表。

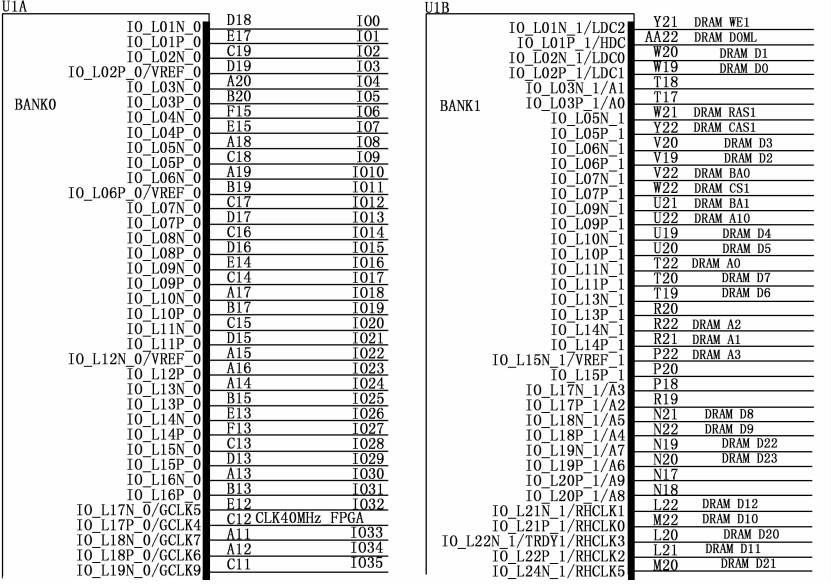


图 5 FPGA 板设计原理图

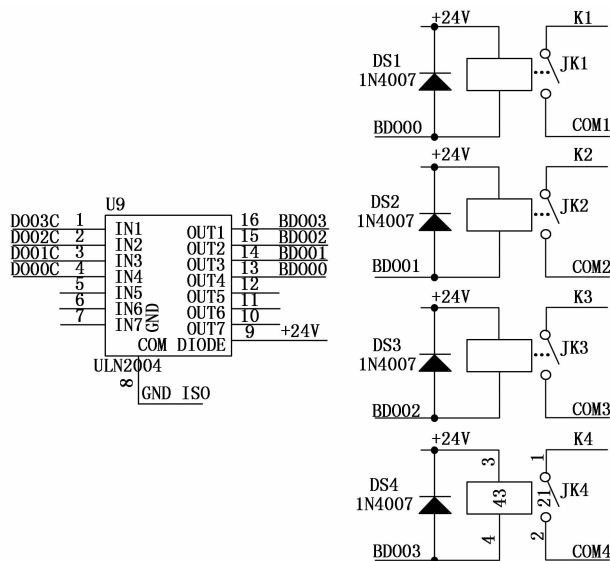


图 6 控制板设计原理图

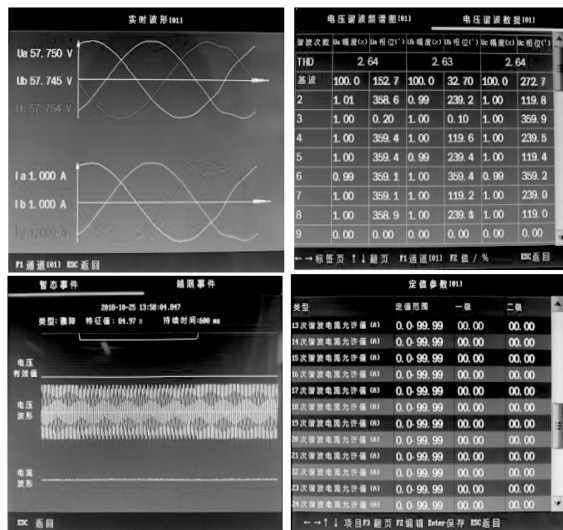


图 7 显示界面设计

3) 增加事件报告:

频率变动事件报告 brcbEveQFVR

电流不平衡事件报告 brcbEveQIUB

电压不平衡事件报告 brcbEveQVUB

电压波动事件报告 brcbEveQVVR

录波事件报告 brcbEveRDRE

设备状态报告 brcbDevice^[4]

3.3 算法设计

主要对监控终端谐波超标继电器控制逻辑算法原理进行介绍。

代码摘要:

```
if(ithd95mark>0)//95%综合判定超标标志
```

```
{
```

```
if(ithd95mark==1 && (ithd95hour==2))//2 小时第一次
```

超标

```
{
    if(Limit[0][1].THDU>0 && Limit[0][1].THDI>0)
    {
        if(iThd && iCurrentHarm)
        {
            //此处记录存底用于查阅
            ....
            //吸合继电器,声光报警用于提示用户超标
            strAl.Format("%d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d 总
            畸变率超限首次告警!",ltm.wYear,ltm.wMonth
            ,ltm.wDay,ltm.wHour,ltm.wMinute,ltm.wSecond);
            AddYXStr(strAl,1); //添加纪录用于人机界面查阅
            ....
        }
        else
        {
            ithd95mark=1;
        }
    }
}
```

```
}
else
{
    ithd95mark=1;
}
ithd95js=0;
ithd95hour=ltm.wHour;
memset(&dthd95buf,0,sizeof(dthd95buf));
char path[100],filename[250];
sprintf(path,(strPath+" D%02d%02d%02d"),ltm.
wYear%100,ltm.wMonth,ltm.wDay);
CreateDirectory(path,NULL); sprintf(path,("d:DATA\
D%02d%02d%02d%02d\%02d"),ltm.wYear%100,ltm.wMonth,ltm.
wDay);
```

```
CreateDirectory(path,NULL);
sprintf(filename,"%s\J%d%02d%02d%02d0000",path,
ltm.wYear,ltm.wMonth,ltm.wDay,ltm.wHour);
WriteFileN(filename,(byte *) &ithd95[0],sizeof(ithd95
[0]));
}
//判断是否连续第二次告警
if(ithd95mark==2 && (ithd95hour==2))
{
    if(Limit[0][1].THDU>0 && Limit[0][1].THDI>0)
    {
        if(iThd && iCurrentHarm)
        {
            thd95[1].tm=ltm;
            for(int i=0;i<6;i++) thd95[1].val[i]=dthd95buf[i]
[120];
            ///写记录继电器
```

```

char filename[100];
char path[100];
sprintf (path, (strPath + " D% 02d% 02d% 02d"), ltm.
wYear%100,ltm.wMonth,ltm.wDay);
CreateDirectory(path,NULL);
sprintf(path, (" D% 02d% 02d% 02d\ d00"), ltm.wYear%
100,ltm.wMonth,ltm.wDay);
CreateDirectory(path,NULL);
printf(filename,"%s\J%d%02d%02d%02d0000",path,ltm.
wYear,ltm.wMonth,ltm.wDay,ltm.wHour);
WriteFileN (filename, (byte *) &thd95[1], sizeof (thd95
[1]));
sprintf(filename,"%s\X%d%02d%02d%02d0000",path,
ltm.wYear,ltm.wMonth,ltm.wDay,ltm.wHour);
WriteFileN(filename,(byte *) &thd95,sizeof(thd95));
strAl.Format("%d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d 总
畸变率超限再次告警!",ltm.wYear,ltm.wMonth
,ltm.wDay,ltm.wHour,ltm.wMinute,ltm.wSecond);
AddYXStr(strAl,1);//添加记录用于人机界面查阅
i95alert+=2;
ithd95mark=1;
}
else
{
ithd95mark=1;
}
else
{
ithd95mark=1;
}
}
ithd95js=0;
ithd95hour=ltm.wHour;
memset(&dthd95buf,0,sizeof(dthd95buf));
//清除标志,开始下一轮判断
}
}

```

3.4 存储设计

为保证数据存储的稳定性,采用固态硬盘作为存储介质。根据历史数据存储需求,选用 64 G 固态硬盘可满足 12 个月的数据存储。

为增强数据存储可靠性,采用增加冗余的删除编码方法对数据进行保护处理。其原理简单介绍如下:

删除编码的基本思想是将需要存储的数据分成每 K 个一组,通过特定的编码方式,增加 $N-K$ 个冗余数据,构成 N ($N>K$) 个数据进行存储。选择的编码方式具有如下特征:若在 N 个数据中可以读取任意不少于 K 个数据,就能恢复全部 K 个原始数据。删除编码的数据编码及其读取

方法均基于多项式 (Polynomial) 求值进行的。下面以 $K=2$, $N=3$ 为例说明其基本原理。

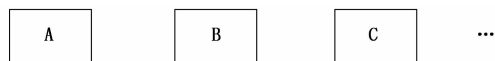


图 8 采用删除编码的存储过程示意图

如图 8 所示,假定需要存储的两个数据为字符 A 和 B。下面求取增加的一个冗余数据。在 ASCII 表 [2] 中查得 A 和 B 的 ASCII 值分别为 65 和 66。假定它们在平面直角坐标系中对应两个点,坐标分别为 A (1, 65), B (2, 66), 如图 9 所示。

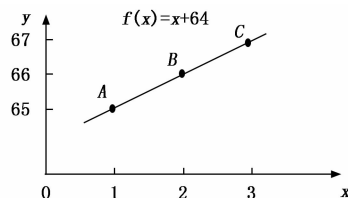


图 9 删除编码求取冗余数据示意图

由平面几何知识可知,这两个点唯一确定一条直线。利用点 A 和点 B 的坐标可以求得该直线的函数方程为 $f(x) = x + 64$ 。增加冗余数据的方法是计算该函数在其它某个给定点的函数值。假定冗余数据对应 $x=3$, 经计算可知其对应函数值为 67, 查 ASCII 表可知对应的字符为 C。数据存储过程见图 5, 其中前两个存储单元中的数据为原始数据, 后一个存储单元中的数据为冗余数据。需要指出的是, 对于用户来说, 原始数据和冗余数据对应点的纵坐标是需要读取或者计算得到的, 但是横坐标是预先知道的。只要可以读取任意不少于 2 个数据, 就可以保证恢复出全部 2 个原始数据字符 A 和 B。

一般地,若删除编码的参数为 N 和 K , 则原始数据对应平面的 K 个不同点。根据代数知识可知, 这 K 个点可以确定一个次数不超过 K 的多项式函数 $f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \dots$ 。求取冗余数据的方法可归结为计算该函数在其它 $N-K$ 个给定点的函数值。在数据读取时, 若原始数据有些不能读取, 但能够读取的数据数目不少于 K , 就可以通过求解线性方程组得到 (即求出系数 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}$), 进而得到原始数据对应的 K 个点的函数值, 恢复出原始数据。

在实际存储中,上述多项式不是定义在实数集上,而是定义在一种特殊的代数系统——有限域 (Finite Field) 上^[5]。

4 实验结果与分析

将试验样机与标准源进行精度对比, 所测结果完全满足国标 A 级精度要求, 具体指标见表 1 所示。

5 结束语

样机测试合格后, 在邢台供电公司王快 110 kV 变电站 8 条用户出线进行挂网试运行, 经过 12 个月的试运行, 各项