

# 基于全球定位系统的高精度事件顺序记录系统

林丹, 王文海

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310027)

(lindan1988@126.com)

**摘要:**为了满足事件顺序记录(SOE)系统数百微秒级分辨率的要求,系统必须实现精确到微秒级的全局时钟同步。通过对现有同步方法的评估并对时钟同步过程误差产生原因的着重分析,利用全球定位系统(GPS)信号为时间源的网络时钟协议(NTP)校时服务器,提出了一种基于改进NTP服务器同步法和1PPS秒脉冲同步法相结合的新方法。新方法利用先进的NTP服务器同步全局秒时钟,消除控制站间时钟误差,并解决同步过程中出现的“跨秒”问题;用1PPS秒脉冲同步毫秒计数器时钟,消除现场可编程门阵列(FPGA)晶振累积误差。该方法实现简单,同步精度高,系统稳定性好。使用该同步方法实现的SOE系统分辨率达0.5 ms,并成功应用于某火电厂汽轮机保护装置。

**关键词:**事件顺序记录;全球定位系统;网络时钟协议;同步时钟;现场可编程门阵列

**中图分类号:** TP277 **文献标志码:** A

## High accuracy sequence of event system based on GPS

LIN Dan, WANG Wen-hai

(National Key Laboratory of Industry Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** In order to meet the resolution requirement of hundreds of microseconds, microsecond global clock synchronization must be achieved in Sequence of Event (SOE) system. By means of assessing the existing clock synchronization methods and analyzing the cause of the error in the clock synchronization process, a new method based on the combination of improved Network Time Protocol (NTP) server synchronization and 1PPS synchronization was proposed. That is: advanced NTP server was used to eliminate the clock error between the control stations, "cross-second" phenomenon was avoided in this situation; 1 PPS was used to synchronize the millisecond counters in order to eliminate the crystal accumulated error of Field Programmable Gate Array (FPGA). This method is simple, precise and stable. The resolution of SOE system by using this technique can be up to 0.5 ms, and it has been applied to the turbine protection system in a power plant successfully.

**Key words:** Sequence of Event (SOE); Global Positioning System (GPS); Network Time Protocol (NTP); synchronous clock; Field Programmable Gate Array (FPGA)

## 0 引言

事件顺序记录(Sequence of Event, SOE)系统以数百微秒级的分辨率获取并记录开关量信号的状态变化信息,实时精确跟踪事件发生时间、首发事件和连锁发生事件的间隔顺序,是系统故障和异常分析的最重要依据<sup>[1-2]</sup>。在电力生产、冶金、造纸等工艺流程相对复杂、实时性要求高的领域里,SOE系统有着广泛的应用。

自从SOE系统问世以来,其时钟同步的问题便一直困扰着业内人士。传统的操作站同步法<sup>[3]</sup>、简单网络时间协议(Simple Network Time Protocol, SNTP)同步法尽管实现简单,但没有解决以太网传输的网络延时不确定性和CSMA/CD(带冲突检测的载波监听多点访问)介质访问控制机制引起的冲突延时不确定性,难以实现真正意义上的时钟同步。目前广泛运用的是全球定位系统(Global Positioning System, GPS)同步法<sup>[4]</sup>,包括串口通信校时同步法、脉冲中断校时同步法和报文编码校时同步法,但是这几种方法也存在同步方式单一、对时精度不高不足<sup>[5]</sup>。本文在以往同步方法的基础上,采用了一种新的同步方法,使SOE系统获得一个高精度的全局同步时钟。

## 1 SOE系统简介

随着工程规模的不断扩大,单一SOE模件已经不能满足高复杂度、高耦合度工程的需要。多个SOE模件,甚至多个由SOE模件组成的SOE控制站成为了理想的解决方案,SOE系统的概念应运而生。

SOE系统结构原理如图1所示。开关信号通过光电隔离电路和滤波电路进入系统,具有高速数字信号处理特性的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)根据可编程的扫描周期扫描DI通道信号变位情况,若变位,则将其加上自身时间标签放入缓存单元;控制站定期修正FPGA时间标签做一次站内同步,通过CAN总线读取SOE模件存储单元,并将其上传到操作站;操作站建立专用线程,采取三级缓存机制,将事件以文件的形式保存下来,用户可以通过操作站的人机界面对事件进行读取、排序、查找和打印等高级操作。

## 2 误差来源与分析

模件规模的扩大,不仅是量的增加,也为管理、调度、全局时钟同步等提出了很多新的挑战课题,原来单一的卡内时

收稿日期:2010-11-03;修回日期:2011-02-12。 基金项目:国家“核高基”重大专项(2010ZX01042-002-003-006)。

作者简介:林丹(1988-),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向:工业以太网、现场总线;王文海(1967-),男,浙江宁波人,研究员,教授,主要研究方向:分布式控制系统、生产过程自动化。

钟同步问题已经升级为站内同步和站间同步。根据时间标签的产生过程,时钟误差主要由以下两部分组成:

1) FPGA 晶振累积误差。在实际应用中,SOE 记录的初始时间标签由 FPGA 内的秒计数器 TIMER0 和可编程毫秒计数器 TIMER1 共同产生。尽管 FPGA 内置晶振的稳定性和精确性已相当高,但长时间运行难免有走时累积误差。又由于 SOE 模件时钟的相互独立性,站内不同步的问题就不可避免。

2) 控制站间时钟误差。各个控制站的时钟相对独立,相互之间存在时间差,以此时钟校正 SOE 模件时钟,全局同步难以保证。即便采用网络自身的 SNTP 同步或其他单一时钟服务器同步,同步精度仍然不高。

本文设计的时钟同步方法的目的是让所有的 SOE 模件数据采集通道达到高精度的全局时钟同步。

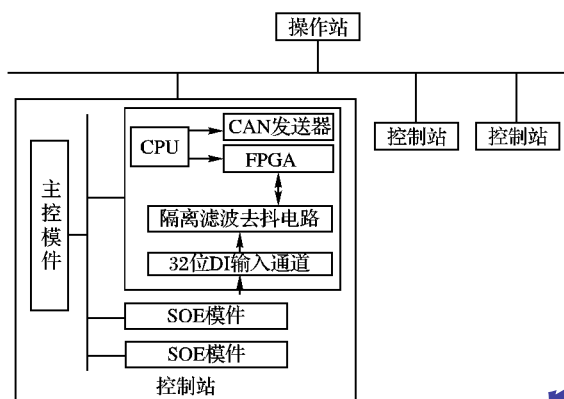


图1 SOE系统结构原理

### 3 误差处理

#### 3.1 GPS 时钟服务器原理

GPS 是新一代卫星导航、授时和定位系统,它由导航卫星、地面监控系统和用户接收机三大部分组成,具有全天候、高精度、自适应等显著特点。GPS 时钟服务器由 GPS 接收器、中心处理单元、通信总线、输出电路等部分构成。GPS 接收器负责接收来自卫星上的信号,并能自动补偿信号在卫星和接收器之间的传输延时,输出与国际标准时间 UTC(协调世界时)保持同步精度为 150 ns 的 1PPS(1 Pulse Per Second)秒脉冲信号,并通过 RS232 串口输出与 1PPS 脉冲前沿相对应的协调世界时、日期及接收器所处方位等信息。输出接口电路可以利用中心处理单元定制,包括可编程输出秒、分、时脉冲信号,IRIG-B、DCF77 编码信号和 NTP 网络定时信号。本文设计采用的是 1PPS 秒脉冲输出信号和网络时钟协议(Network Time Protocol, NTP)网络定时信号。GPS 时钟服务器装置原理如图 2 所示。

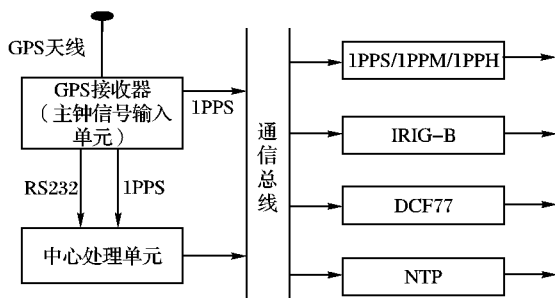


图2 GPS时钟服务器装置原理

#### 3.2 使用改进的 NTP 服务器同步控制站间时钟

NTP 是用于在分布式时间服务器和客户端之间进行时间同步的标准互联网协议,它充分考虑了互联网上时间同步的复杂性,定义了协议实现过程中所使用的结构、算法和实体。它具有网络开销小、安全系数高、即使网络故障仍能持续稳定的特点。

##### 3.2.1 NTP 服务器同步原理

GPS 时间服务器内置的 NTP 模块通过 RS232 接口获得 GPS 同步时钟提供的标准时间信息和秒脉冲信号,该时间信号同步于 UTC。NTP 服务器软件使模块成为标准 NTP 网络时间服务器,并能通过客户端软件同步网内的所有控制站、操作站、路由器和交换机。每次同步过程都是采用客户端/服务器方式进行通信,客户端发送一个同步请求数据包,服务器接收后回送一个应答数据包,两个数据包都带有时间戳。NTP 根据这两个数据包的时间戳确定时间误差,并通过一系列的算法来消除网络传输的不确定影响,对时间延时进行自动补偿,以保证时间的精确度。这个同步过程一般不超过 10 ms。

根据 GPS 时间服务器使用手册,当每秒 NTP 请求量小于 100 时,可处理用户终端量 48 000 个,时间标签误差小于 100 ms。这个精度对于高同步精度要求的 SOE 系统是远远不够的。因此,不能只依靠 NTP 服务器实现全局时钟同步,而是采用 NTP 服务器同步控制站时钟的秒部分,其余部分同步任务由 GPS 时钟服务器输出的 1PPS 脉冲信号和高稳定高精度晶振时钟共同完成。

##### 3.2.2 SOE 控制站间时钟同步

控制站 1 的主控模件(CCM1)和控制站 2 的主控模件(CCM2)请求 NTP 服务器同步时钟的过程如图 3。

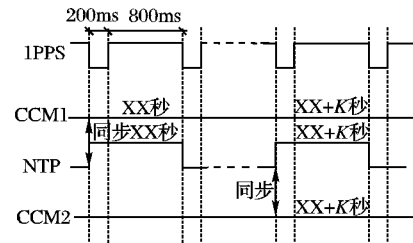


图3 NTP服务器同步时钟

注:1PPS 为 GPS 时钟服务器输出的高精度秒脉冲序列信号,采用 TTL 电平输出,下降沿触发有效,下降时间为 10 ns,下降沿的时间准确度小于 0.2  $\mu$ s,脉冲宽度 200 ms,不存在累积误差。对于 SOE 数百微秒级的分辨率,1 PPS 存在的 0.2  $\mu$ s 的随机误差不会影响同步站间同步精度。

当第  $N$  个 1 PPS 触发 CCM1 时,CCM1 向 NTP 发出时钟同步请求,NTP 服务器处理,使 CCM1 中 FPGA 的秒计时器 TIME0 得到一个“XX 年 XX 月 XX 日 XX 时 XX 分 XX 秒”的时钟,当下一个 1PPS 到来时,TIME0 加 1,仍然与 NTP 同步。经过  $K$  个 1PPS 后,CCM1 的 TIME0 增加  $K$  秒,NTP 也增加  $K$  秒,时间信息均为“XX 年 XX 月 XX 日 XX 时 XX 分 XX +  $K$  秒”。假设第  $N + K$  个 1PPS 触发 CCM2,CCM2 向 NTP 发出时钟同步请求,NTP 服务器处理,使 CCM2 中 TIME0 得到一个“XX 年 XX 月 XX 日 XX 时 XX 分 XX +  $K$  秒”的时钟,此时,CCM1 的 TIME0 和 CCM2 的 TIME0 均与 NTP 服务器时间同步,当再有 1PPS 到来时,三个时钟均随之变化。这样就实现了所有控制站与 NTP 服务器的秒时钟同步。

##### 3.2.3 “跨秒”问题的解决方案

在同步过程中,必须解决好“跨秒”问题。所谓“跨秒”是指,由于高频率访问 NTP 服务器,NTP 时钟误差达 100 ms,在

同步过程中,如果两个控制站在不同的 1PPS 下降沿请求 NTP 服务器同步时间,同步时钟可能造成 1s 的误差。如图 4 所示。

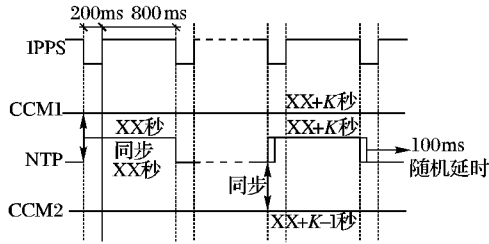


图4 “跨秒”问题

CCM1 在第  $N$  个 1PPS 同步的时钟为“XX 年 XX 月 XX 日 XX 时 XX 分 XX 秒”,CCM2 在第  $N + K$  个 1PPS 同步的时钟为“XX 年 XX 月 XX 日 XX 时 XX 分 XX + K - 1 秒”。这个误差是由 NTP 服务器的时间标签与 1 PPS 信号误差达 100 ms 造成的。在测试的过程中,发现采用在 1PPS 下降沿时刻立即同步控制站时钟的方法产生“跨秒”现象的概率比较大,而当这种现象出现后,只有到下一次同步后才有可能消除 1 s 误差,那么在此期间发生的 SOE 事件时间标签都完全失去意义。

1 PPS 的下降沿同步时,NTP 同步时钟会出现较大误差,误差公式为:

$$\Delta T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (1)$$

其中: $\Delta t_1$  为 NTP 时间标签误差,小于 100 ms; $\Delta t_2$  为 NTP 服务器同步时间,小于 10 ms; $\Delta t_3$  为 1 PPS 随机误差,小于 0.2  $\mu$ s。

因此,在 1PPS 下降沿的  $\pm \Delta T$  时间内,NTP 的时间标识不是完全准确的,应采取措施,避免在 1 PPS 下降沿的  $\pm \Delta T$  时间内同步。为此,我们采用“中间时间段同步法”,即用 FPGA 中毫秒计数器 TIME1,当 TIME1 处于 400~600 ms 时同步,让同步时间落在 NTP 服务器的准确时间内,这样可以保证同步时钟全局一致。如图 5 所示。

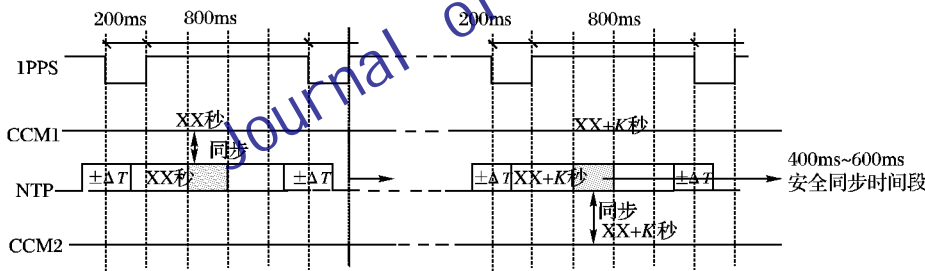


图5 “中间时间段同步法”

### 3.3 使用 1 PPS 秒脉冲序列抑制 FPGA 晶振累积误差

#### 3.3.1 1 PPS 秒脉冲随机误差分析<sup>[6-8]</sup>

目前,GPS 时间服务器输出的 1PPS 秒脉冲不存在累积误差,但它与 UTC 存在一定的随机误差  $\varepsilon$ ,且  $\varepsilon$  服从正态分布,取样本数为  $N$ ,则有:

$$\varepsilon \sim N(0, \delta^2) \quad (2)$$

不同性能的 GPS 接收机,  $\delta$  数值大小不同,如本系统采用的 Motorola 公司 VP Oncore GPS 接收机的  $\delta$  为 50 ns。经计算 GPS 时钟与 UTC 误差落在  $3\delta$  的概率为 0.999 6,由此可见 1PPS 秒脉冲在统计意义下具有很高的精度,正常工作条件下最大偏差为 1.6  $\mu$ s,完全可以保障 SOE 毫秒级的同步精度。

#### 3.3.2 高精度晶振信号的频率稳定度分析

由于 SOE 记录的初始时间标签以 FPGA 晶振频率信号为基准,晶振的频率精度直接影响时间标签精确度。晶振频率精度是指晶振的实际工作频率与标准频率之间的偏差,频率精度引起的偏差会给测量系统引入累积误差。晶振的短期

频率稳定度在时域上是指某一取样时间内频率平均值的随机起伏的量,由阿伦方差<sup>[9]</sup>表征:

$$\delta_y = \frac{1}{M\tau f_0} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (f_{i+1} - f_i)} \quad (3)$$

其中: $M$  为频差倍增倍数; $\tau$  为采样事件; $m$  为采样组数; $f_0$  为被测频率的标称值; $f_i$  为第  $i$  次的频率测量值。本文所用的 EP1S30 FPGA 芯片采用 20 MHz 的温度补偿晶振,其典型的阿伦方差值在  $10^{-9}$  数量级,有很高的频率稳定度,可以认为它的工作频率在短时间内是不变的;但是长期运行,若不采取措施,将会产生累积误差。

#### 3.3.3 FPGA 晶振累积误差的抑制方案

经上一章分析可知,GPS 时间服务器的 1PPS 脉冲信号具有随机误差可以忽略、没有累积误差的特点;FPGA 晶振时钟信号具有累积误差大、短时间内稳定精确的特点。我们可以将两者结合起来,让 FPGA 的 TIMER1 根据晶振产生毫秒时钟,1PPS 脉冲信号每秒复位 TIMER1;并在 FPGA 内设计秒计数器 TIMER0,当 GPS 时钟服务器在线时,记录 1PPS 的个数产生秒时钟,当 GPS 故障或干扰离线时,根据晶振时钟继续产生秒时钟。采用这种综合方法,在 GPS 正常工作时,每个 FPGA 持续利用晶振时钟的时间仅仅是 1s。在此期间,晶振频率稳定度极高,累积误差可以忽略,据此产生的所有毫秒时钟精确同步。

## 4 SOE 系统设计与应用

### 4.1 SOE 系统全局同步时钟设计

根据两种同步误差的解决方案,设计出 SOE 系统全局同步时钟结构如图 6 所示。

采用 GPS 时钟服务器自带的 NTP 服务器与 1PPS 秒脉冲结合实现 SOE 系统控制站站间秒时钟精确同步。由于晶振时钟短时间稳定精确,NTP 服务器同步时钟时要消耗一定的

网络资源,不必做到每 1PPS 同步一次。我们选择控制站启动时同步一次,正常运行时每十分钟同步一次。站间同步误差为 1PPS 脉冲的随机波动误差,最大误差小于 1.6  $\mu$ s。

采用主控模块设置全局秒时钟,用 1PPS 与 FPGA 晶振时钟互补特性结合实现 SOE 模块间毫秒时钟同步。SOE 模块 FPGA 的秒计数器 TIMER0 的初值由控制站设置,

初值的同步精度可以由控制站的同步精度保证,此后, TIMER0 对 1PPS 累加计数产生秒时钟。秒时钟的同步误差为 1PPS 脉冲的随机波动误差,最大误差小于 1.6  $\mu$ s。FPGA 的毫秒计时器 TIMER1 由对 20 MHz 晶振脉冲计数得到,理论上,可对 TIMER1 编程提高 SOE 系统分辨率,但如此高频率的对 DI 中断扫描采样对 CPU 的要求太高。目前,对 SOE 的分辨率要求是 1 ms,没必要投资大量的硬件成本,盲目提高精度。当然,若有特殊需要,必须提高 SOE 分辨率,此方法也可实现。综上考虑,我们设置 TIMER1 的溢出值为 1999,SOE 分辨率计算公式为:

$$\frac{1\text{PPS 秒脉冲分辨率}}{\text{毫秒计数器溢出值} + 1} = \frac{1\text{ s}}{1999 + 1} = 0.5\text{ ms} \quad (4)$$

毫秒计数器的同步误差为 FPGA 晶振 1 s 的最大走时误差,远远小于 0.5 ms,可以忽略。

### 4.2 性能检验

用 FPGA 做成简易的信号发生器,产生两种 8 路可编程输



出信号,来测试 SOE 系统的性能。第一种信号,频率为 200 Hz ~ 2 MHz,步进 50 Hz 的同步方波;第二种信号,后一路比前一路延迟时间可调,调节精度为 0.1 ms 的低电平到高电平跳变信号。该信号经放大输出电路,可以直接驱动 SOE 模块。

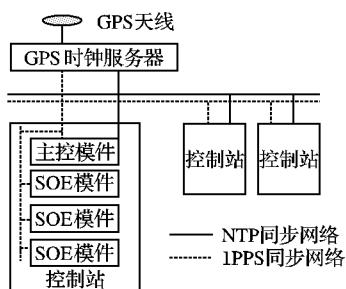


图6 SOE系统全局同步时钟结构

1) 同步性测试:使用第一种测试信号,将8路信号接入不同控制站内的8路SOE DI通道,启动信号源,查看8路SOE记录是否相同。若相同,逐步增大方波的频率,直到8路SOE记录对相同的信号跳变产生不同的时间标签,这时的方波半周期,即是SOE系统的同步精度。经多次测试,当方波频率为200 kHz时,有些SOE记录出现不同步,则SOE系统的同步精度为2.5 μs。

2) 站内分辨率测试:使用第二种测试信号,将8路信号接入同一控制站内的8路SOE DI通道,设置初始时间间隔为10 ms,启动信号源,查看8路SOE记录顺序和时间间隔是否正确。若正确,不断减小测试信号时间间隔,直到有两个通道无法分辨信号跳变顺序,则上次的时间间隔即为站内分辨率。经多次测试,得到SOE系统的站内分辨率为0.5 ms。

3) 站间分辨率测试:使用第二种测试信号,测试方法同上,只是将信号源接入不同的控制站内SOE DI通道。经多次测试,得到SOE系统的站间分辨率为0.5 ms。

由于篇幅所限,只给出站间分辨率测试部分SOE记录,如表1。当间隔为0.6 ms时,从时间标签可以分辨出事件发生的先后顺序。时间标签的编程设定分辨率是0.5 ms,与事件实际发生的时间误差控制在0.5 ms内,不影响区分事件先后顺序。当间隔为0.4 ms时,从前两条记录可以看出,时间标签已无法区分事件发生的顺序,此时的记录已不能为工程人员所参考。

表1 站间分辨率测试SOE记录

间隔/ms	事件时间/ms	事件描述	通道地址
0.6	54 875.5	0→1	Net1-M1-C1
	54 876.0	0→1	Net2-M1-C1
	54 876.5	0→1	Net1-M2-C1
	54 877.0	0→1	Net2-M2-C1
0.5	23 902.0	0→1	Net1-M1-C1
	23 902.5	0→1	Net2-M1-C1
	23 903.0	0→1	Net1-M2-C1
	23 904.5	0→1	Net2-M2-C1
0.4	49 340.0	0→1	Net1-M1-C1
	49 340.0	0→1	Net2-M1-C1
	49 340.5	0→1	Net1-M2-C1
	49 341.0	0→1	Net2-M2-C1

由以上验证可知:该SOE系统的实际分辨率为0.5 ms,同步精度为2.5 μs,达到国际先进水平<sup>[10]</sup>。

#### 4.3 应用实例

该SOE系统已用于某钢铁集团自备火电厂四期工程。

为了保证汽轮机设备的安全,防止设备损坏和事故发生,除了要求调节系统动作可靠性以外,还应具有必要的保护装置,以便在汽轮机调节系统失灵或发生其他事故时,能及时动作,迅速停机。汽轮机保护装置有很多,如:超速保护装置、轴向位移保护装置、低油压保护装置、低真空保护装置、轴承温度保护装置。自动主汽阀是保护装置共有的执行元件,它的作用是在汽轮机保护装置动作后,迅速切断汽源,使汽轮机停止运行。由于保护装置很多,导致自动主汽阀关闭的原因也很多,如果出现“自动主汽阀关闭”报警,如何从众多保护装置中寻找“自动主汽阀关闭”的原因,最终找出事故发生的根源是很关键的。

汽轮机保护装置的执行阀都是快关门,通常要求其关闭时间不大于0.5 s,联锁保护发生后,往往有一系列的阀门动作,普通的事记录仪很难准确记录事件发生的精确时间和先后顺序。我们设计的具有全局统一时钟的高分辨率SOE系统可以满足汽轮机保护装置的需要。通过将汽轮机保护装置有关的执行阀配置到SOE硬件配置工具中,设置好系统时钟,启动设备,如果有相关事件发生,SOE系统能够准确记录事件发生的时间、位置、阀门描述等信息,为工程师事后分析原因,施行抢救措施提供依据。

该系统已顺利通过电厂热工部门的离线测试,符合生产要求,现已正常投运。

本文针对SOE系统全局时钟同步精度不高的现状,提出了一种基于改进NTP服务器同步法和1PPS秒脉冲同步法相结合的新方法来实现时钟同步,并将其成功应用于工艺流程复杂、实时性要求高的电力生产领域。该设计方法是建立在GPS信号的高稳定性和高精度基础上,所以如何使其在电磁干扰强、气候恶劣的工况下应用,将是进一步的研究方向。该方法具有通用性,可以推广到高速铁路、核电、通信等其他需要精确时钟的领域,具有较为广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 韩跃进. DCS事件顺序记录性能分析及测试[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(6): 72-73.
- [2] 王洪哲, 王荣茂. 提高SOE信息真实性的探讨[J]. 东北电力技术, 2005(2): 25-28.
- [3] 罗嘉, 潘笑. INFL90 SOE系统的网络与通讯[J]. 工业控制计算机, 2003, 16(8): 49-50.
- [4] 邹红艳, 郑建勇. 基于GPS同步时钟的统一校时方案[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 59-61.
- [5] 张玉屏. GPS时钟同步系统介绍及其在水电厂中的应用[J]. 水电厂自动化, 2007(4): 358-362.
- [6] 曾祥君, 尹项根, 林干, 等. 晶振信号同步GPS信号产生高精度时钟的方法及实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 49-53.
- [7] 张鹏, 王少荣, 程时杰. 电网状态检测系统GPS同步时钟稳定性研究[J]. 继电器, 2004, 32(23): 18-22.
- [8] 谢黎, 黄国方, 沈健. 数字化变电站中高精度同步采样时钟的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 61-65.
- [9] TAVELLA G. The characterization of clock behavior with the dynamic Allan variance[C]// Proceedings of the Annual IEEE International Frequency Control Symposium. [S. l.]: IEEE, 2003: 239-244.
- [10] 刘文丰, 傅强. 几种分散控制系统的SOE性能测试比较[J]. 电力系统自动化, 2005, 18(6): 35-38.