

电网状态监测系统 GPS 同步时钟的稳定性研究

张鹏, 王少荣, 程时杰

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: GPS 接收机输出的秒脉冲信号在统计意义下与国际标准时间高度同步, 具有相当高的精度, 但是由于其误差服从正态分布, 单个秒脉冲误差可能较大。为提高基于 GPS 的同步时钟的精度和稳定性, 该文根据 GPS 时钟信号和晶振时钟信号精度互补的特点, 提出了一种利用 GPS 时钟同步晶振时钟的新方法, 实现了高精度、高稳定度的同步时钟。所设计的 GPS 同步时钟不受 GPS 信号短时失效的影响, 具有较高的可靠性和实用性, 能够满足电力系统电网状态监测的要求。

关键词: GPS; 晶振; 误差; 时钟

中图分类号: TM712; TM764

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)23-0018-05

0 引言

全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 是美国研制的导航、授时和定位系统^[1,2], 也是当前全球传播范围最广、精度最高的时间发布系统。GPS 授时获取方便, 用户只需安装廉价的 GPS 接收机就能免费得到所需的时间信息。GPS 授时的优越性使得它在电力系统中得到了越来越广泛的应用, 并正在给电力系统监视、保护和控制技术带来深刻的变化。然而, 由于电力系统与国民经济各部门关系非常密切, 从而对用于电力系统的设备, 特别是用于实时监测控制的设备, 要求非常高。另一方面, GPS 信号是由无线电波传送的, 不可避免地会受到各种干扰, 甚至可能由于军事目的的人为地使 GPS 信号中断。所以, 电力系统利用 GPS 授时作为同步时间源时, 必须考虑 GPS 信号失效情况下的对策问题。

但是, 现有的基于 GPS 的同步时钟装置大都对 GPS 单个秒脉冲信号的依赖性较强。大多是在假设 GPS 信号不会失效的前提下设计的, 一旦 GPS 信号失效, 装置就不能正常运行。为了解决上述问题, 本文提出一种以 GPS 秒脉冲信号同步晶振信号产生高精度的时钟的新方法, 并研制成功了一种具有高稳定性的 GPS 同步时钟发生装置。该方法根据 GPS 时钟信号与晶振时钟信号的互补特点, 采用晶体振荡器和合理的算法, 对同步脉冲进行误差补偿, 所得到的同步时钟不仅精度高、稳定性好, 而且在 GPS 失效时, 能够长期正常稳定地工作长达 8 h。所设计的 GPS 同步时钟已成功地应用于湖南电网状态监测系统。

1 GPS 授时精度及电力系统应用对时间同步精度的要求

目前美国正在推行 GPS 现代化计划, 已停止施加选择可用 (SA, selective availability) 干扰, 成倍地提高了定位和授时精度, 并计划增强信号功率, 增加导航信号和频道, 以提高导航安全^[2]。但是美国对民用用户不承担责任, 不保证民用 GPS 时钟的精度和可靠性。而且民用 GPS 接收机接收到的 GPS 时钟因星历误差、卫星钟差、电离层误差、对流层误差、多径误差、接收机误差、跟踪卫星过少误差等因素的影响, 精度和稳定性难以始终得到保证。通常, GPS 接收机的秒时钟误差服从正态分布, 时钟精度以概率指标表示^[3]。例如 GARMIN GPS25 型接收机, 统计精度为 $1 \mu\text{s}$ (1), 表示 GPS 时钟误差落在 1 范围内的概率为 0.682 8; 落在 2 范围内的概率为 0.954 6; 落在 3 范围内的概率为 0.997 4。但是在卫星失锁和卫星时钟试验跳变的条件下, GPS 时钟的误差达几十甚至上百微秒^[2]。根据本课题组对两个同种信号接收机产生的秒时钟的比较测试, 正常工作条件下最大偏差可能达到 $2 \mu\text{s}$, 在卫星失效的情况下偏差甚至可达毫秒级。

在电力系统状态监测系统中, 时间同步装置是整个系统的核心, 它将 GPS 接收设备提供的标准串行通讯数据和 1 PPS 秒脉冲转换为高精度时间定标系统。即: 从串行通讯接口获得的报文中提取各种需要的信息并传送给特定的处理单元; 利用高稳定度晶振和专门的处理器将统计意义下高精度的 1 PPS 秒脉冲倍频成为同步、均匀、稳定的同步脉冲, 以触发同步数据采集单元。

因此,同步脉冲与 1 PPS 秒脉冲间的同步性、自身均匀性是实现全网同步监测的关键指标。换句话说,同步监测技术对 GPS 接收机提供秒脉冲的精确度要求转化为对同步脉冲精确度的要求。在电网状态监测系统中要求相位测量误差不能超过 1° ,即对应于 50 Hz 的工频信号,同步时钟误差不能超过 55 μs 。在 GPS 时钟正常工作时,我们所设计的同步时钟误差可以稳定在 5 μs 以内,大大提高了同步监测的精度。

2 高精度 GPS 同步时钟设计中应注意的问题

如果在将 1 PPS 秒脉冲倍频为同步脉冲的过程中,过于依赖单个 1 PPS 秒脉冲的精度,则可能由于某个 1 PPS 秒脉冲误差过大,导致对应的该秒 1 PPS 同步脉冲误差过大,使得相应的采集数据不可用。因此,消除个别 1 PPS 秒脉冲误差对同步脉冲的影响,是在 GPS 同步装置研制中需要克服的一个难题。

实际运行数据、试验数据和文献[1]显示 1 PPS 秒脉冲误差过大的原因主要有以下几种: 1 PPS 秒脉冲的高精度是在统计意义下而言的。对一个具体的 GPS 秒脉冲,其偏差可能高达 $2\sim 3\ \mu\text{s}$ 。这样的微秒级偏差对同步精度的影响可以忽略,但实际运行中不排除可能遇到更大的偏差; 1 PPS 接收机短期卫星失锁。此时 1 PPS 秒脉冲继续由接收机内部电路维持供给,由于误差无法得到及时校正,积累误差会导致 1 PPS 秒脉冲精度不再满足要求; 卫星试验、太阳风暴等因素也有可能导致 1 PPS 秒脉冲误差过大; 运行现场电磁干扰强烈。干扰可通过作用于系统电源或 CPU 处理器 1 PPS 秒脉冲输入产生伪 1 PPS 脉冲^[1]。应当指出,1 PPS 秒脉冲误差过大属于偶然现象,通常情况下,其精度是合乎要求的。

GPS 秒脉冲信号存在一定的随机误差,但不存在累积误差,晶振时钟信号的随机误差小,但长时间运行的累计误差较大。基于 1 PPS 秒脉冲统计意义下稳定性好的特点,借助晶振恒温条件下的高稳定性,国内外已有采用 GPS 时钟同步守时钟(原子钟、晶振时钟)方法产生高精度和高稳定性的时钟,这种时钟在正常运行时由 GPS 时钟校正守时钟,在 GPS 时钟不稳定时,由守时钟代替 GPS 时钟。由于现有的同步方法尚未形成严密的数学模型和实现技术,虽能消除因 GPS 卫星短时失锁产生的较大偏差,但

很难消除 GPS 接收机时钟信号的随机偏差。因此,在 GPS 正常工作时,由晶振构成的守时钟可以削弱同步脉冲对单个 1 PPS 秒脉冲精度的过分依赖,提高了时间同步装置的抗干扰能力,使其在各种极端情况下仍可正常工作,从而增强了同步状态监测系统的可靠性。

根据以上分析,要得到高精度、高稳定度的同步时钟,且在 GPS 长期失效下,保证输出同步脉冲的精度,应该注意以下几个问题:

- 1) 消除伪 1 PPS 脉冲,由于 GPS 秒脉冲在传递过程中可能受外部电磁干扰而夹杂着伪脉冲,为避免处理器误判断,应予屏蔽。
- 2) 使用高稳定度晶振,以获取高精度的守时钟。
- 3) 选用合理的算法,用 GPS 时钟同步晶振守时钟,并及时对同步时钟进行误差补偿。

3 高精度同步时钟产生原理

如图 1 所示,为了产生高精度同步时钟信号,我们用计数器 2 和比较器对高精度晶振时钟分频,产生同步时钟。同时,同步时钟信号和 GPS 秒时钟信号均对计数器 1 锁存计数结果,通过减法器求得两者的偏差,并生成偏差序列。该偏差序列包含 GPS 时钟的随机漂移误差和晶振的累计误差,然后对偏差序列进行分析与处理,通过修正比较器的比较值来校正同步时钟信号。在 GPS 失效时,可根据 GPS 时钟失效前的误差序列对同步时钟进行误差修正,保证同步时钟继续正常工作。具体实现方案框图如图 1 所示:

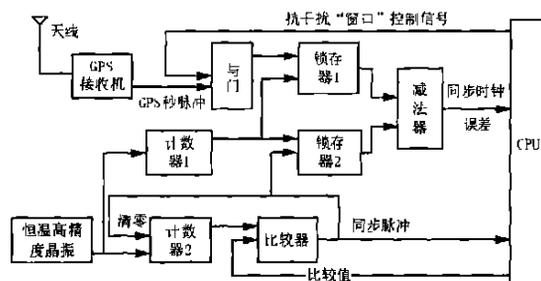


图 1 高精度时钟产生原理

Fig. 1 Generating of high accuracy GPS clock

3.1 干扰脉冲的屏蔽

为降低伪秒脉冲的干扰,提高同步脉冲的精度和稳定性,需要在 GPS 秒脉冲进入 CPU 处理器之前加一个“窗口”,如图 2 所示。该窗口在 GPS 脉冲到来前 t 时刻开启,秒脉冲到来之后 t 时刻关闭,

t 的值可以设的足够小。这样处理器只接收“窗口”范围内的脉冲信号,“窗口”之外的干扰脉冲将会被屏蔽,提高了同步脉冲的稳定性。虽然在窗口内也可能夹杂着干扰脉冲,但通过软件设计可很大限度地消除干扰。

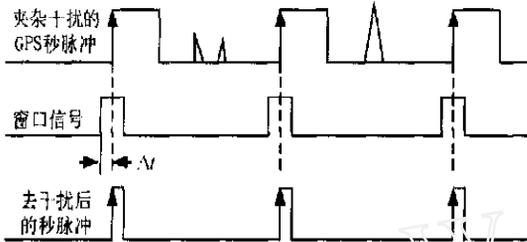


图 2 屏蔽干扰脉冲原理图

Fig. 2 Generating of shielding disturbance pulse

3.2 高稳定度恒温晶振提供工作时钟

用恒温晶振 OCXO (Over Controlled Crystals Oscillator) 提供工作时钟。该晶振采用精密控温,使晶体工作在晶体的零温度系数点的温度上,具有很高的频率精度和稳定度,是目前石英晶振器件中频率稳定度最高的一种。晶振的频率精度是指晶振的实际工作频率与标称频率间的偏差,精度引起的偏差会给测量系统引入累积误差。晶振频率稳定度是指秒级间隔内的瞬时稳定度,即由晶振“相位噪声”引起的频率随机变化,瞬时稳定度通常会给测量系统引入随机误差。本装置中所采用的 OCO100-67 型晶振,它的频率精度达到 10^{-6} 量级,频率稳定度达到 10^{-9} 量级,这样的误差影响可以忽略。恒温晶振的特性使 CPU 处理器能够长期工作在精确而稳定的频率下,极大地削弱了时间和温度的影响。OCXO 的另外一个优点是它的低噪声特性,具有较高的抑制相位噪声的能力。这些优点使本装置同步时钟的精度、温度稳定性和时间稳定性等各项指标得到很大的提高。

3.3 GPS 时钟同步晶振守时钟

同步脉冲是由计数器对晶体振荡信号分频获得的,要得到高精度的同步时钟脉冲,必须精确测量晶振的实际振荡频率,否则,所产生的同步脉冲将与 GPS 秒脉冲出现较大的偏差,倘若 GPS 失效,同步时钟会很快失去同步,整个系统将无法正常工作。同时,为了保证 GPS 同步时钟装置能长期稳定工作,且不受 GPS 短期失效的影响,不仅要准确测量振荡频率,而且要及时对同步脉冲进行误差补偿。

以 GPS 时钟为基准,用计数器就可以准确地求得晶振的振荡频率。如检测时间为 N s,计数器的

计数值为 M ,则振荡频率为 $f = M/N$ 。由于恒温晶振 OCO100-67 具有相当高的稳定度,其随机误差远小于 GPS 秒时钟的随机误差,因此晶振秒时钟的随机误差可以忽略。

目前的 GPS 接收机输出的秒时钟与国际标准时间 (UTC - Universal Co-ordinated Time) 存在一定的误差。考察某一秒时间序列,设第 x 个秒时钟的时间误差为 x ,服从正态分布:

$$x \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

不同档次的 GPS 接收机,数值大小不同,对于 GARMING GPS25 型接收机,其 σ 为 $1 \mu\text{s}$ 。

由于随机误差的存在,每个 GPS 秒时钟与实际时间存在误差,设 N 个秒时钟实际时间长度序列为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$,每个秒时钟对应的随机误差为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,则有:

$$x_i = t_i - 1, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

令

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

由式(2)、(3)得随机误差平均值:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - 1)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} - 1 = \bar{t} - 1 \quad (4)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,根据随机误差得正态分布的低偿性,有 $\sum_{i=1}^n x_i = 0$,于是对式(4)取极限:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\bar{t} - 1) = 0$$

$$\text{即: } \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{t} = 1 \quad (5)$$

因此当 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值 \bar{t} 趋近于 1 s。

由此可见,根据 GPS 秒脉冲具有很高的统计意义下的精度,我们可以利用这个特性来检测晶振的准确频率。在 GPS 两个秒脉冲之间,即单位时间 (1 s) 内,计数器对晶振时钟的计数值即为此秒测得的晶振频率。设 n 个秒时钟内计数器所测得的计数值为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$,则:

$$\bar{N} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (6)$$

由于晶振在检测期,短时间内可认为频率 f 不变,所以,只要 n 取的足够大,就可认为:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} = \bar{N} \quad (7)$$

由此可见,晶体振荡频率 f 等于计数器的算术平均值 \bar{N} ,称为最可信赖值。在测量晶振的频率 f 过程中,GPS 秒时钟的随机误差转化为计数器测量所引起的偏差。由于 N_i 、 t_i 均遵从正态分布,根据正态分布函数的性质可知,算术平均值的标准偏差是测量值标准差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍,测量次数越多,算术平均值的标准偏差就越小。测量精度也就越高,但因为存在 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍的关系,精度的提高随着 n 的增加而变的越来越慢,因此, n 值也不必取的过大。

检测晶体振荡频率时所引起的误差不仅包括 GPS 秒时钟的随机误差,同时也包括计数器计数时的测量误差。因为晶振时钟与 GPS 秒时钟不可能准确同步,计数器在对晶振时钟定时计数时,会引入 1 个计数值测量误差,则晶振测量频率将存在 ± 1 的误差。若晶振以 10 M 频率计算,计数时间为 1 s,则每秒误差是 0.1 μs ,每分钟的误差是 6 μs ,这会使同步脉冲产生相当大的积累偏差。为了减少计数器所引起的测量误差,可以将检测时间单位从 1 s 提高到 1 min,这样每分钟的误差将是 0.1 μs ,精度提高了 60 倍。所以,增加检测时间,可提高测量精度。

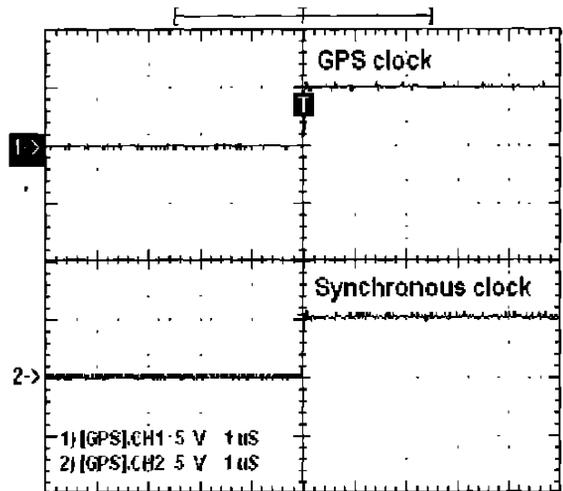
此外,如果再对计数器所得的数据进行排序,消去几个最大和最小值,排除不合理的数据后,对剩下的数据再求算术平均,这样检测值将会更加精确。同时在 GPS 正常工作时,测量数据应实时更新,才能保证同步时钟的长期稳定运行。

同步时钟虽然是通过计数器和比较器对守时钟进行分频产生的,但必须时刻与 GPS 时钟保持同步。由图 1 可知,同步时钟与 GPS 秒时钟的偏差可以减法器获取,如前面所述,为了避免同步时钟过于依赖单个 GPS 秒时钟,应该根据此次从减法器获取的偏差值并结合前 n 次修正量的历史数据,通过比例积分的方式计算出同步脉冲的修正量。这样,同步时钟就克服了因单个 GPS 时钟出现较大的偏差而影响整个系统同步时钟的精度,提高了稳定性。

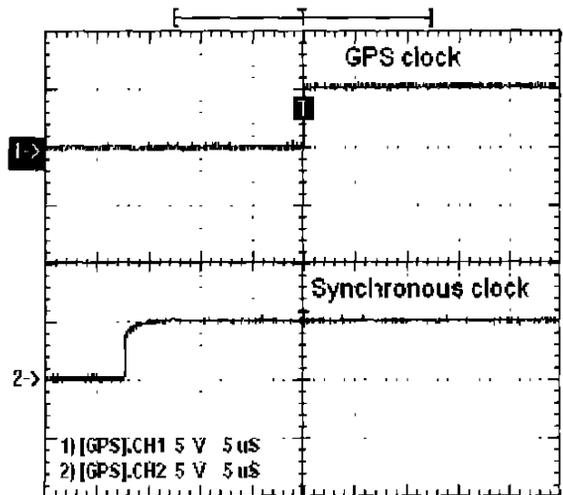
在 GPS 失效时,同步时钟将摆脱 GPS 时钟,而完全由晶振守时钟提供。由于在 GPS 失效之前对晶体振荡器的高精度的测量,以及其频率的高稳定性,本同步时钟装置中,同步时钟每分钟的误差为 0.1 μs ,1 h 为 6 μs 。所以在 GPS 失效时,在误差范围内,可以保证长时间的稳定工作。

4 实验结果及分析

本文在 GPS 时钟失效前后对同步时钟的精度和稳定性进行了测试,测试数据如表 1 所示,其实验波形如图 3 所示。图 3(a) 是 GPS 时钟正常工作时,同步时钟的波形截图。可以看出正常情况下,同步时钟与 GPS 时钟的误差很小,约为 0.1 μs ,达到相当高精度。图 3(b) 为 GPS 失效 3 h 后,同步时钟的波形截图,其误差约为 6 μs 。由实验结果可以分析,该装置在 GPS 失效后,至少可以稳定工作 8 h,使同步误差小于 55 μs ,即应用于相位测量时,误差可小于 1°。该结果充分验证了本文所提出的利用 GPS 时钟同步晶振时钟方法的正确性和可靠性。



(a) GPS 正常工作时的同步时钟图



(b) 失去 GPS 时钟 3 h 后的同步时钟关系图

图 3 同步时钟与 GPS 时钟相位关系图

Fig. 3 Phase comparison between synchronous clock and GPS clock

表 1 同步时钟误差表

GPS 工作状态	同步脉冲误差/ μs
正常	0.1
失效 15 min	1.2
失效 30 min	2.5
失效 1 h	5.5
失效 3 h	17
失效 5 h	29
失效 7 h	43
失效 8 h	52

5 结语

本文根据 GPS 时钟与晶振时钟精度互补的特点,用 GPS 时钟同步晶振信号产生高精度的同步时钟。通过对晶振时钟高精度的测量,采用计数器和比较器对晶振守时钟分频,同时进行误差校正的方法,得到高精度、高稳定度的同步时钟。该同步时钟不仅在 GPS 正常时能够时刻与 GPS 时钟保持高度同步,而且在 GPS 失效时仍能稳定工作长达 8 h,然后软件复位。该同步时钟装置已应用与基于 GPS 的电网状态监测系统,为实现精确可靠的实时监测奠定了坚实基础,该装置可适用于各种高精度的同步采样系统等工业应用场合,具有良好的前景。

参考文献:

- [1] 余晓龙,丁仁杰,胡炯,等 (YU Xiao-long, DING Renjie, HU Jiong, et al). 全网同步监测装置 GPS 接口模块得改进设计与实现 (The Design and Implementation of the GPS Interface Model Based on Synchronism Monitoring Device for the Power Network) [J]. 电子技术应用 (Application of Electronic Technique), 2002, 28(12): 41-43.
- [2] 曾祥君,尹项根,林干,等 (ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, LIN Gan, et al). 晶振信号同步 GPS 信号产生高精度时钟得方法及实现 (Clock of High Accuracy Implemented by Crystal Oscillator in Synchronism with GPS Clock) [J].

电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(8): 49-53.

- [3] 王元虎,周东明 (WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming). 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题 (Some Technical Problem of Satellite Clock Applied on Power Network) [J]. 中国电力 (Electric Power), 1998, 31(2): 10-13.
- [4] 张海雯,张鹏,王少荣,等 (ZHANG Hai-wen, ZHANG Peng, WANG Shao-rong, et al). 高性能 GPS 时间同步装置研制 (Development of High Quality Time Synchronous Device Based on GPS) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2003, 23(4): 37-40.
- [5] 赵让元,李蕾,张红旗 (ZHAO Rang-yuan, LI Lei, ZHANG Hong-qi). GPS 在时间同步装置中的应用 (The Application of GPS on Synchronism Device) [J]. 电子技术应用 (Application of Electronic Technique), 1997, 23(5): 38-40.
- [6] 苗世洪,王少荣,刘沛 (MIAO Shi-hong, WANG Shao-rong, LIU Pei). 一种基于 GPS 的时间同步装置 (A Time Synchronous Device Based on GPS) [J]. 电子计算机与外部设备 (Computer and Peripherals), 2002, 24(1): 15-16.
- [7] 苗世洪,王少荣,刘沛 (MIAO Shi-hong, WANG Shao-rong, LIU Pei). 基于 GPS 的电网状态监测系统的设计与实现 (The Design and Implementation of the GPS Based on Real time Monitoring System for the States of Power Network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(6): 52-54.

收稿日期: 2004-03-31; 修回日期: 2004-06-17

作者简介:

张鹏 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化技术; E-mail: zp_hus@163.com

王少荣 (1960 -), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统的运行和控制;

程时杰 (1945 -) 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析及其控制、人工智能在电力系统中的应用和低压电力网载波通。

Stability study of GPS synchronous clock in the status monitoring system of power network

ZHANG Peng, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The second pulse signal output from GPS receiver is highly synchronous with the universal coordinated time, and it has a high accuracy. But since its error is ranged in normal distribution, the error of a single second pulse signal may be large. To improve the accuracy and stability of the synchronous timer in GPS, this paper presents a new method to implement highly accurate and stable clock by the synchronization of crystal oscillator clock with GPS clock, which is based on the complement of the errors between GPS and crystal oscillator. The designed synchronous timer is not affected by the possible transient invalidation of GPS. It has a high reliability and can satisfy the requirements of the status monitoring system in power network.

Key words: GPS; crystal oscillator; error; clock