

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.04.008

基于物理层时间捕获的GIS局部放电无线监测系统时间同步方案研究

吴夕楠¹, 陈洪涛², 李立学¹, 郑益慧¹, 赵建明², 王 昕¹

(1. 上海交通大学电工与电子技术中心, 上海 200240; 2. 国网吉林省电力有限公司松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要: 在GIS局部放电无线监测系统中, 时间同步是一个重要环节, 而目前的无线时间同步方法在开销、能耗和精度等方面不能满足无线监测系统的要求。文中首先分析了影响无线网络时间同步精度的各项不确定性延迟, 为此, 引入了物理层时间捕获技术, 在此基础上提出了一种新的时间同步方案。然后, 基于CC2530芯片和TCXO温补晶振搭建了硬件实验平台, 并对其进行了电磁抗干扰分析。最后, 通过实验确定了时间捕获的响应延迟为4 μs , 据此对同步进行修正后, 得到了文中方案单次同步带来的误差为亚纳秒级, 同步精度随时间的漂移约为 1×10^{-6} 。通过理论分析和实验验证, 该方案完全满足无线监测系统的时间精度要求, 可以灵活应用于无线监测系统。

关键词: GIS局部放电; 无线监测; 时间同步; 物理层时间捕获; CC2530; TCXO

Research on the Time Synchronization Method of GIS Partial Discharge Wireless Monitoring System Based on Physical Layer Time Capturing

WU Xinan¹, CHEN Hongtao², LI Lixue¹, ZHENG Yihui¹, ZHAO Jianming², WANG Xin¹

(1. Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Songyuan Power Supply Company, Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin Songyuan 138000, China)

Abstract: In GIS partial discharge wireless monitoring system, time synchronization is an important segment. However, current synchronization methods cannot satisfy the requirement of wireless system in several ways. In this article, the uncertain delays in wireless system are eliminated and a new synchronization method is proposed based on physical layer time capturing. Then an experiment platform is built based on CC2530 and TCXO and electromagnetic interference is analyzed. Finally, capturing delay is confirmed to 4 microseconds. After the synchronization is corrected, the result is obtained: the single-synchronization error is sub-nanosecond and the accumulated drift in path with time is about 1×10^{-6} . With theoretical analysis and experiment, the method in this article satisfies the time accuracy requirement and can be applied in wireless monitoring system flexibly.

Key words: GIS partial discharge; wireless monitoring; time synchronization; physical layer time capturing; CC2530; TCXO

0 引言

GIS局部放电在线监测是电网智能化建设的重

要内容, 相比于传统的有线监测系统, GIS局部放电无线监测系统具有成本低、便携化、安装便捷的优势^[1-2], 但同时也对无线监测节点间的高精度时间同步提出了挑战。如果数据的同步性不能得到保证,

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-02-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61533012); 上海市自然科学基金(14ZR1421800); 流程工业综合自动化国家重点实验室开放课题基金。

Project Supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (61533012), Shanghai Natural Science Foundation (14ZR1421800), Open Project Foundation of State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries.

那么就无法精确判断局部放电产生的时间和工频相位,监测系统也就失去了意义^[3-8]。目前对无线时间同步的研究大多是基于理论分析,缺乏实用性,因此,研究一套无线监测网络时间同步的可操作性方案是十分必要的。

在传统的时间同步方案中,多采用NTP(network time protocol,网络时间协议)和GPS(global positioning system,全球定位系统)^[9-11]。NTP能够实现计算机网络的高精度时间同步,但开销、功耗、体积和存储空间等方面的约束使其不能适用于无线监测网络^[12]。GPS可以方便地提供精度达100 ns的同步时间,但其穿透性较差,并且其成本和功耗都不能满足无线监测网络的需求^[13]。为此,研究人员提出了一些无线网络时间同步算法。RBS算法同步是接收节点间的同步,无法同步发送者与接收者,且能耗太大^[14];TPSN算法采用树形层次结构,一旦根节点失效,就要重新进行分级,适应性和健壮性较低^[15];LTS算法通过分布式方法实现全网的时间同步,但该算法精确度较低^[16];ATS算法利用了簇和平均值的思想,精度高,但对存储能力要求较高,不适用于轻量级的无线监测节点^[17]。文[18]提出了一种微秒级的无线网络时间同步算法,并在软件平台上进行了模拟验证。但其没有考虑信号传输延迟和节点晶振频率的温度漂移带来的同步误差,并且缺乏硬件平台上的实验验证,还不能很好地应用于实际网络中。

针对以上存在的问题,文中提出了一种基于物理层时间捕获的无线时间同步方案,消除了物理层以上的不确定性延迟,并通过实验手段修正了物理层时间捕获的响应延迟。最后基于CC2530芯片和TCXO温补晶振搭建了硬件实验平台,得到文中方案的单次同步误差为亚纳秒级,随时间的累积漂移约为 1×10^{-6} 。而GIS局部放电无线监测系统所需的同步误差要求在10 μ s以上,因此方案完全满足要求。

1 基于物理层时间捕获的同步方案

1.1 无线报文传输路径延迟

在无线信号传输的关键路径中,主要包含6个方面的时间延迟^[19-22],见图1。



图1 无线报文传输路径延迟

Fig. 1 Delays on the route of a wireless message

其中发送延迟、访问延迟和接收处理延迟是物理层以上的延迟,受到处理器调度和信道带宽的影响,无法准确确定。传输延迟和接收延迟是消息在物理层按位收发的延迟,传播延迟是消息在通信介质中传播的时间,这些延迟是可以确定的延迟。因此,如果可以在物理层获得时间戳,就可以有效避免物理层以上的各部分时间延迟,最大限度地提高时间同步精度。

1.2 节点时钟模型

节点的时间是通过晶振和计数器表示的。

$$c(t) = \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau + c(t_0) \quad (1)$$

式(1)中, $f(\tau)$ 和 $c(t_0)$ 分别表示晶振的脉冲频率和计数器在 t_0 时刻的初值。理想时钟的脉冲频率恒为1,但在实际情况中晶振受温湿度等影响,脉冲频率存在一定误差,这是同步消息传输路径延迟之外的一个关键误差来源。

温湿度等在短时间内变化很小,可以认为晶振频率维持不变,并令 $t_0 = 0$,得到节点 i 的时钟模型为

$$c_i = f_i \cdot t + c_{0,i} \quad (2)$$

这是一个线性映射,同时,2个线性映射之间也满足线性关系

$$c_j(t) = s_{ij} \cdot c_i(t) + o_{ij} = \frac{f_j}{f_i} c_i(t) + (c_{0,j} - \frac{f_j}{f_i} c_{0,i}) \quad (3)$$

式(3)中, s_{ij} 和 o_{ij} 分别表示节点间的相对频偏和相位差。文中方案中采用了精度为 1×10^{-6} 的温补晶振,则

$$s_{ij \max} = \frac{1 + 10^{-6}}{1 - 10^{-6}} \approx 1.000\ 002 \quad (4)$$

$$s_{ij \min} = \frac{1 - 10^{-6}}{1 + 10^{-6}} \approx 0.999\ 998 \quad (5)$$

因此在误差允许范围内,可以取 $s_{ij} = 1$,得到简化的节点时间转换关系

$$c_j(t) = c_i(t) + o_{ij} = c_i(t) + (c_{0,j} - c_{0,i}) \quad (6)$$

也即只考虑节点间时间的相位差。

1.3 节点时间校正技术

无线传感器网络的时间同步是通过节点间的时间校正实现的,单程报文传递、双程报文交换、广播参考报文和参数拟合技术是目前主要的节点时间校正技术。要在轻量化的传感器节点上实现低开销的时间校正,单程报文传递技术是最符合要求的,见图2。

节点 i 在 c_{ia} 时刻向节点 j 发送一个报文,其中包含时间信息 c_{ia} 。节点 j 在时刻 c_{jb} 接收到节点 i 发送的报文,并记录下接收时间 c_{jb} 。如果知道节点

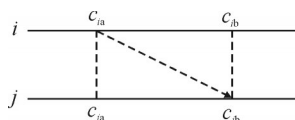


图2 单程报文传递模型

Fig. 2 Model of one-way message passing

i 和节点 j 之间报文的传播延迟 d 的上下界分别为 $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$, 那么可以得到节点 i 和节点 j 之间的时间偏差, 也即相位差为

$$o_{ij} = c_{jb} - c_{ia} - (d_{\max} + d_{\min})/2 \quad (7)$$

可以看出, 单程报文传递是一个较为粗略和理论化的时间校正技术, 表现在如下2个方面:

1) 将无线报文传输路径中的延迟笼统等效为传播延迟, 而实际情况中, 传播延迟以外的各项延迟在高精度需求的同步系统中是不能忽略的。

2) 节点 i 的发送时间戳 c_{ia} 是无法通过当次报文传递给节点 j 的, 因此在实际应用中, 通过单次报文并不能完成节点间的时间校正。

1.4 物理层时间捕获技术

针对单程报文传递中存在的第一个问题, 文中引入了物理层时间捕获技术。节点的 RF 装置在帧的 SFD(start of frame delimiter, 帧开始界定符)位收发完成时产生一个上升沿跳变, 见图3。



图3 硬件支持的SFD信号

Fig. 3 Hardware-supported SFD signal

物理层时间捕获是基于硬件支持的对 SFD 上升沿的捕获, 并存在确定的延迟, 可以通过实验手段获得。这样就消除了通信路径中物理层以上的延迟, 如果忽略传播延迟, 并修正物理层时间捕获的响应延迟, 即可以认为物理层时间捕获的收发节点的收发时间戳是在同一时刻。

1.5 无线时间同步方案

基于物理层时间捕获技术, 并针对单程报文传递在实际应用中存在的问题, 文中提出了一种新的无线时间同步方案。同步过程见图4。

其具体步骤如下, 其中节点 A 是主节点, 并与 GPS 等 UTC 标准时间源连接, 节点 B 是等待同步的节点:

1) 节点 A 与 GPS 装置进行一次通信, 获取当前的 UTC 时间。

2) 节点 A 构造 1 条同步消息 S_1 , 并在其发送过程

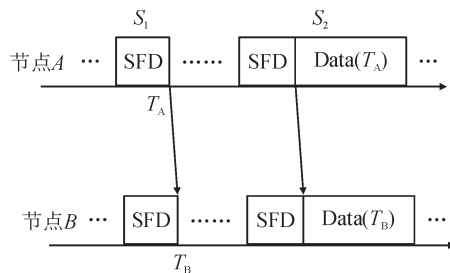


图4 无线时间同步过程

Fig. 4 Procedure of wireless time synchronization

中, 使用物理层时间捕获技术记录其发送时刻 T_A 。

3) 节点 B 在接收 S_1 时, 使用物理层时间捕获技术记录其接收时刻 T_B 。

4) 节点 A 构造第 2 条同步消息 S_2 , 将记录下来的 T_A 发送给节点 B 。

5) 节点 B 接收到 S_2 后, 计算时间校正量 $T_A - T_B$, 并结合物理层时间捕获的响应延迟修正本地的系统时间。这样就完成了 1 对节点间的 1 次时间同步。

6) 根据所需的节点时间精度要求, 设定合适的同步间隔, 重复步骤 2)-5)。

1.6 同步方案理论分析

该方案的精度偏差主要来自于 3 个方面:

1) 传播延迟: 相距 100 m 的节点, 其传播延迟约为 $0.3 \mu s$, 延迟较小。并且局部监测网络的节点间距不会很大, 各节点间的间距是确定的, 这样就可以根据需要忽略传播延迟或进行修正。

2) 物理层时间捕获的响应延迟: 这个延迟是微秒级别并且是确定不变的, 因此可以通过实验手段确定并消除。

3) 晶振频率的漂移: 节点同步的不确定性误差主要来自于此, 但由于应用了高精度的有源晶振, 该偏差极小, 可以根据同步精度的要求, 设置合适的同步间隔, 将晶振随时间的累计偏差控制在一定范围内。

根据以上分析可知, 经过同步的 2 节点间的时间误差为

$$d = \alpha t + \beta \quad (8)$$

式(8)中: d 为 2 节点的时间误差; t 为单次同步完成后所经历的时间; α 表征节点间误差随时间的变化速率; β 表征单次同步完成的时刻节点间的时间误差。由于硬件节点的个体差异性, α 和 β 是不确定的量, 但是应当呈现一定的规律。

文中方案中采用的是 TCXO 温补晶振, 其精度约为 1×10^{-6} , 在忽略传播延迟并且修正物理层时间捕获的相应延迟的前提下, 式(8)中的系数 α 应当与

晶振精度相对应, β 应当趋于零。

2 硬件实验平台搭建

无线时间同步系统主要包含3部分:绝对时间同步源、Zigbee CC2530节点、TCXO温补晶振。绝对时间同步源可为无线节点构成的局域网络提供UTC标准时间,如GPS同步装置。但在文中实验中要验证的是节点之间的相对同步精度,因此其硬件实验平台无需使用绝对时间同步源。文中的硬件实验平台采用3个Zigbee CC2530节点和TCXO恒温晶振,见图5。

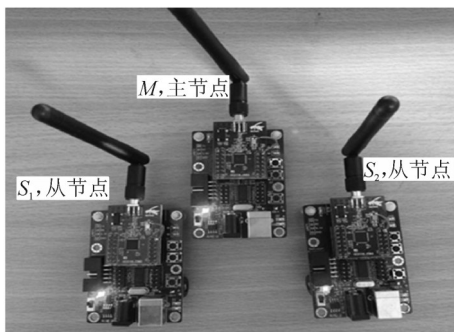


图5 硬件实验平台

Fig. 5 Hardware experiment platform

1) Zigbee CC2530 节点。CC2530 是 TI 公司的 2.4 GHz 第二代片上系统,提供一个与 IEEE 802.15.4 兼容的 RF 收发器。节点共有 4 个定时器,即 Timer₁~Timer₄,其中 Timer₂ 是 MAC 定时器,并且其捕获源为 SFD 信号,在该实验中选择 Timer₂ 作为节点的系统时钟。

2) TCXO 温补晶振。温补晶振一般使用 AT 切的基频晶体,其精度在 -40~85 °C 的范围内为 2×10^{-5} 左右。TCXO 通过温度补偿电路削弱了温度变化对晶振精度的影响。在该实验中,选用的温补晶振精度为 1×10^{-6} 。

3 电磁抗干扰

变电站是一个强电强磁环境,空间存在着强烈的电磁波干扰。文中方案采用的通信频段为 2.4 GHz,分频点(2.4、1.2 GHz 和 800 MHz)的电磁干扰对其通信可靠性影响最大,而变电站内的电磁波背景噪声一般不超过 150 MHz,因此 2.4 GHz 通信一般不会受到干扰^[22]。然而,当局部放电、开关操作等发生时,会产生高频电磁干扰,其频率超过 2.4 GHz。为保证时间同步的可靠性,采取以下措施减轻高频电磁干扰对系统的影响:

1) 采用封闭金属盒对电路板进行电磁屏蔽,同时通过合理布线、布局提高电路板本身的抗干扰能力。

2) 适当提高时间同步发起频率,保证一定的同步次数余量。这样,当由于电磁干扰导致某次时间同步失败时,在下次同步后依然可以保证系统所需的同步精度。

4 实验测试与结果分析

4.1 确定物理层时间捕获的响应延迟

为获得物理层时间捕获的响应延迟,通过编程使节点 A 按一定时间间隔向节点 B 发送消息。同时,将 2 个节点靠近放置,并将两者的 SFD 信号引出到 I/O 引脚,通过双通道高速示波器进行显示,见图 6。上、下 2 条线分别为节点 A 和节点 B 的 SFD 信号。

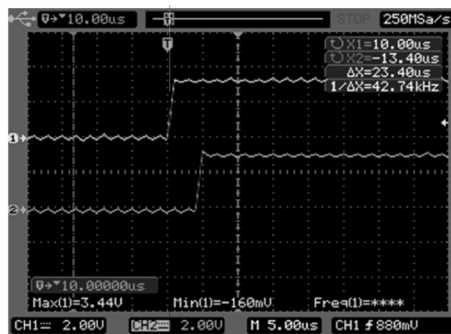


图6 确定时间捕获的响应延迟

Fig. 6 Determining the delay of time capturing

由图 6 可以得到物理层时间捕获的响应延迟为 4 μ s,将其加入到节点时间的修正量中,即可消除该延迟对同步精度的影响。

4.2 确定无线时间同步方案的同步误差

实验方法见图 7。将一个节点设置为主节点,另 2 个节点设置为从节点。在完成一次时间同步之后,经过设定的测试延时,由主节点发送一条测试信号,利用物理层时间捕获技术分别记录主节点的发送时间和 2 个从节点的接收时间。

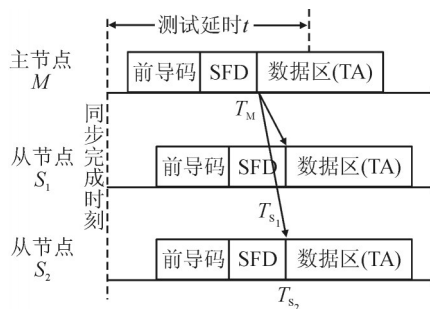


图7 同步误差实验方案

Fig. 7 Experiment method of synchronization error

调整测试延时为 0.5~5.0 s, 分别得出其同步误差, 并通过线性拟合确定节点间时间同步的整体规律。得到的实验数据见表 1、2。

使用 MATLAB 进行线性拟合, 得到主节点与

2 个子节点之间的时间偏差 d_1 和 d_2 的线性特性分别为

$$d_1 = 1.1037t + 0.0154 \quad (9)$$

$$d_2 = 0.7064t + 0.0254 \quad (10)$$

式(9)、(10)中: d 的单位为 μs ; t 的单位为 s。

表1 主节点与从节点1的时间误差

Table 1 Time errors between master node and slave node 1

测试延时 t/s	误差 $d_1/\mu\text{s}$					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均
0.5	0.625 00	0.406 25	0.562 50	0.593 75	0.687 50	0.575 00
1.0	1.062 50	1.187 50	1.093 75	1.093 75	1.093 75	1.106 25
1.5	1.687 50	1.625 00	1.718 75	1.687 50	1.687 50	1.681 25
2.0	2.250 00	2.250 00	2.125 00	2.218 75	2.093 75	2.187 50
2.5	2.750 00	2.750 00	2.812 50	2.781 25	2.750 00	2.768 75
3.0	3.281 25	3.187 50	3.468 75	3.375 00	3.375 00	3.337 50
3.5	3.906 25	3.937 50	3.843 75	4.000 00	3.937 50	3.925 00
4.0	4.375 00	4.500 00	4.406 25	4.437 50	4.468 75	4.437 50
4.5	4.968 75	4.968 75	5.000 00	5.000 00	5.000 00	4.987 50
5.0	5.562 50	5.531 25	5.312 50	5.500 00	5.593 75	5.500 00

表2 主节点与从节点2的时间误差

Table 2 Time errors between master node and slave node 2

测试延时 t/s	误差 $d_2/\mu\text{s}$					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均
0.5	0.437 50	0.343 75	0.375 00	0.312 50	0.406 25	0.375 00
1.0	0.625 00	0.781 25	0.562 50	0.656 25	0.812 50	0.687 50
1.5	1.125 00	0.968 75	1.281 25	1.156 25	1.156 25	1.137 50
2.0	1.468 75	1.562 50	1.312 50	1.437 50	1.218 75	1.400 00
2.5	1.750 00	1.750 00	2.000 00	1.718 75	1.843 75	1.812 50
3.0	2.093 75	1.968 75	2.281 25	2.156 25	2.218 75	2.143 75
3.5	2.625 00	2.500 00	2.437 50	2.562 50	2.531 25	2.531 25
4.0	2.781 25	2.906 25	2.875 00	2.875 00	2.937 50	2.875 00
4.5	3.156 25	3.312 50	3.062 50	3.312 50	3.187 50	3.206 25
5.0	3.500 00	3.500 00	3.500 00	3.531 25	3.531 25	3.512 50

由此可见, 同步过程本身带来的误差在亚纳秒级, 可以忽略不计。而当同步时间间隔为 1 s 时, 晶振偏差带来的误差为 $1 \mu\text{s}$ 左右。在 GIS 局部放电无线监测系统中, 节点间时间同步的需求一般为 $10 \mu\text{s}$ 以上。以同步需求为 $10 \mu\text{s}$ 为例, 只需设定节点间的同步间隔为 10 s 以内, 即可保证所需的同步精度。当系统同步精度要求越低, 同步间隔就可以越大, 从而降低系统的网络 and 能量开销。因此, 针对不同要求的无线监测系统, 该方案都具有很好的灵活性和适应性。

5 结语

通过理论分析和实验验证, 可以看出, 基于物

理层时间捕获的 GIS 局部放电无线监测系统时间同步方案能够消除通信路径中的各项延迟, 得到高精度的时间同步效果。通过 TI CC2530 芯片搭建的硬件实验平台表明, 文中方案同步本身带来的误差为亚纳秒级, 同步精度随时间的漂移与节点晶振的精度漂移一致, 约为 1×10^6 。并且, 通过灵活地选取同步间隔时间, 该方案可以满足不同监测系统的精度要求, 适应性较强。

参考文献:

- [1] 陈雪薇, 马国明, 李成榕, 等. 高压开关柜无线测温系统设计及可靠性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 152-160.
CHEN Xuewei, MA Guoming, LI Chenrong, et al. Wireless temperature measuring system design for high voltage

- switchgear and its reliability research[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 152-160.
- [2] 陈贤熙, 王俊波, 余红波, 等. 移动式特高频在线监测系统在GIS局部放电检测中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 157-161.
- CHEN Xianxi, WANG Junbo, YU Hongbo, et al. Application of mobile uhf on-line monitoring system to PD detection of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 157-161.
- [3] 宋 辉, 盛戈皞, 王传庆, 等. 基于无线同步的避雷器阻性电流测量系统[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 49-55.
- SONG Hui, SHENG Gehao, WANG Chuanqing, et al. Arrester resistive current measuring system based on wireless synchronization[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 49-55.
- [4] 胡凯旋, 刘利强, 李昌陵, 等. 基于仿生模式识别的GIS局部放电类型辨识[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 35-41.
- HU Kaixuan, LIU Liqiang, LI Changling, et al. GIS partial discharge type recognition based on the BPR[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 35-41.
- [5] 律方成, 金 虎, 王子建, 等. 基于组合核多特征融合的GIS局部放电检测与识别[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 334-340.
- LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge detection and recognition based on the kernel combination and multiple feature fusion method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 334-340.
- [6] 李国伟, 章 涛, 王俊波, 等. 基于超高频法的GIS局部放电类型判断方法[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 63-68.
- LI Guowei, ZHANG Tao, WANG Junbo, et al. Judgment of partial discharge types in GIS based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 63-68.
- [7] 王伟平, 何炳锋. 基于特高频法GIS局部放电在线检测技术的分析与应用[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 183-187.
- WANG Weiping, HE Bingfeng. Analysis and application of on-line monitoring technique of partial discharge for GIS based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 183-187.
- [8] 邵先军, 何文林, 石华军, 等. UHF传感器GIS局部放电检测特性的实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 46-55.
- SHAO Xianjun, HE Wenlin, SHI Huajun, et al. Experimental and simulation research on gis partial discharge detection characteristics of UHF sensors[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 46-55.
- [9] AHMAD A, ZENNARO D, SERPEDIN E, et al. A factor graph approach to clock offset estimation in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(7): 4244-260.
- [10] 姜 雷, 郑玉平, 艾淑云, 等. 基于合并单元装置的高精度时间同步技术方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 90-94.
- JIANG Lei, ZHENG Yuping, AI Shuyun, et al. A highly accurate time synchronization technology scheme based on merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 90-94.
- [11] 侯重远, 江汉红, 刘 亮. 面向交换式电力监测网的NTP同步精度提高方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 2(1): 32-33.
- HOU Chongyuan, JIANG Hanhong, LIU Liang. Improvement of NTP synchronization accuracy for switch-oriented power monitoring networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 2(1): 32-33.
- [12] 王 越, 万 洪. 一种节能的无线传感器网络多跳自适应时间同步算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1557-1563.
- WANG Yue, WAN Hong. One of energy efficient wireless networks multi-hop adaptive time synchronization algorithm[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2013, 26(11): 1557-1563.
- [13] 齐 华, 王 恒, 刘 军. 可变周期的基于贝叶斯估计的TPSN改进算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 407-408.
- QI Hua, WANG Heng, LIU Jun. Changeable cycle for improvement based on the bayes estimation of the TPSN algorithm[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2013, 26(3): 407-408.
- [14] LIU J, ZHOU Z, PENG Z, et al. Mobi-sync: Efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(2): 406-416.
- [15] CHAUDHARI Q. A simple and robust clock synchronization scheme[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2): 328-322.
- [16] 胡永利, 孙艳丰, 尹宝才. 物联网信息感知与交互技术[J]. 计算机学报, 2012(6): 1447-1449.
- HU Yongli, SUN Yanfeng, YIN Baocai. Information sensing and interaction technology in internet of things[J]. Chinese Journal of Computers, 2012(6): 1447-1449.
- [17] REN R Y, ZHANG J, HE T, et al. EBRP: Energy-balanced routing protocol for data gathering in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(12): 2018-2125.
- [18] 宋姗姗. 基于SFD捕获的无线传感器网络时间同步方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- SONG Shanshan. A new time synchronization method for wireless sensor network based on SFD[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [19] 陈珍萍, 黄友锐, 唐超礼, 等. 无线传感器网络能量有效精度可控时间同步[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 597-603.

- 漏方法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6):67-70.
- LONG Jinzhuang, WANG Ketao, ZHAO Xin, et al. A practical engineering method for GIS leaking quantitative detection[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 67-70.
- [10] 上海市电力公司. 变电运行操作技能必读[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- Shanghai Municipal Electric Power Company. The substation operation skills required[M]. Beijing: China Power Press, 2001.
- [11] 曹建忠. 倒闸操作安全技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- CAO Jianzhong. Pour switching operation safety technology [M]. Beijing: China Power Press, 2007.
- [12] 张艳妍, 蒙海军, 姚翔. GIS设备包扎检漏的新方法及在工程中的应用[J]. 电力建设, 2007, 28(11): 48-51.
- ZHANG Yanyan, MEND Haijun, YAO Xiang. A new method of GIS binding leakage inspection and its engineering application[J]. Electric Power Construction. 2007, 28(17):48-51.
- [13] 张新中. 气体绝缘开关柜漏气问题的分析与处理[J]. 高压电器, 2010, 46(6):93-96.
- ZHANG Xinzong. Analysis and treatment of gas-leaage in gas-insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus. 2010, 46(6):93-96.
- [14] 张建华, 陶瑞基, 袁文雄. 110 kV GIS设备SF₆气室压力异常升高的处理[J]. 高压电器, 2012, 48(2):107-109.
- ZHANG Jianhua, TAO Ruiji, YUAN Wenxiong. Dealing with abnormal pressure rising in SF₆ gas chamber of 110 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 107-109.
- [15] 李泰俊, 王章启, 张挺, 等. SF₆气体水分管理标准的探讨及密度与湿度监测的研究技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):169-174.
- LI Taijun, WANG Zhangqi, ZHANG Ting, et al. Discussion about the water vapor content standard & research on monitoring SF₆ gas's density and humidity[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):169-174.
- [16] 电力设备预防性试验规程:DL/T 96—1996[S]. 1996.
- Preventive test code for electric power equipment: DL/T 96—1996[S]. 1996.
- [17] 额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674—2008[S]. 2008.
- Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated Voltages of 72.5 kV and above: GB 7674—2008[S]. 2008.
- [18] 李庆扬. 数值分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986: 207-222.
- LI Qingyang. Numerical analysis[M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology University Press, 1986:207-222.
- [19] 蔡志建. 对描述性统计量的偏度和峰度应用的研究[J]. 北京体育大学学报, 2009, 32(3): 75-76.
- CAI Zhijian, On the application of deviation and kurtosis in descriptive statistics[J]. Journal of Beijing Sport University, 2009, 32(3): 75-76.
- 王成江(1971—), 男, 教授, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断、放电与绝缘现象等方面的研究和开发工作。
- 王晓娟(1990—), 女, 硕士, 研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测与故障诊断。
- 周广(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备在线监测与故障诊断。
- 张琦(1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力设备在线监测与故障诊断。

(上接第59页)

- CHEN Zhenping, HUANG Yourui, TANG Chaoli, et al. Energy efficient precision controllable time synchronization for wireless sensor network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(6):597-603.
- [20] AKHLAQ M, SHELTAI T. RTSP: An accurate and energy-efficient protocol for clock synchronization in WSNs[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(3):578-589.
- [21] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu. Wireless sensors network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [22] 张惠娟, 韩叶, 凌跃胜, 等. 变电站电磁干扰预测分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(s1):412-417.
- ZHANG Huijuan, HAN Ye, LIN Yuesheng, et al. The forecast analysis in substation electromagnetic interference[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(s1):412-417.
- 吴夕楠(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测。