

# 用于船舶综合电力系统同步测量的高精度 PTP 混合时钟同步方法

路 遥, 江汉红, 王 义

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 为了满足船舶综合电力系统同步测控亚微秒级的精度要求, 通过分析各种时钟同步协议的优缺点和传统时钟同步方法对船舶同步测量的局限性, 提出一种基于 IEEE1588 协议的卫星时钟同步与时钟同步频率补偿算法相结合的混合时钟同步方案以实现同步测量。所提方案以环星型拓扑结构的交换式以太网为背景, 基于集成 IEEE1588 协议功能的以太网收发器设计了同步测量节点, 并研究了一种频率补偿算法, 可以动态地对时钟节点的晶振频率进行补偿, 使时钟具有良好的守时性, 保证了主从时钟的偏差恒定。通过仿真分析和试验对同步偏差性能进行测试, 结果显示同步精度维持在  $\pm 200$  ns 以内, 达到了 IEC61850 关于同步测量的标准, 满足了船舶综合电力系统时间同步的需要。

**关键词:** 船舶综合电力系统; PTP; IEEE1588 协议; 同步测量; 频率补偿算法; IEC61850; 混合时钟同步

**中图分类号:** TM 935; TP 29

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.032

## 0 引言

随着船舶向全电化、信息化方向发展, 船舶综合电力系统 IPS (Integrated Power System) 得到迅速发展。同时, 网络化控制系统 NCS (Networked Control System) 及智能化电子设备 IED (Intelligent Electronic Device) 也在 IPS 中得到了广泛应用。如何使 IPS 这样呈现分布式布设的复杂机电系统在网络环境下实现多种自动化控制信息的传输和分布式数据的处理, 保证数据的同步性、时序性和全局有效性, 对操控台、服务器和控制器等网络化控制系统节点的时间同步精度提出了很高的要求。文献[1]针对现有船舶数据获取精度不高、通用性不强的特点, 利用全球定位系统 (GPS)/北斗双授时保证主时钟稳定, 通过 IEEE1588 精确授时保证同步, 改进通用性接口提高了装置间的互联性。文献[2]实现了一种基于 FPGA+ARM 结构的适用于船舶电力系统的同步相量测量装置。文献[3]借助无迹卡尔曼滤波递推框架获取各种电气参数的估计值, 使得对包含电力参数信息的向量值的估计更加有效, 提高了同步相量测量的精度。但上述研究都是单一地在硬件或算法方面进行改进, 对同步精度的提升有限。利用将卫星时钟同步与时钟同步频率补偿算法相结合的混合时钟同步方案进行同步测量, 能获得更高的同步精度。

## 1 时钟同步协议及方案

网络时间同步主要通过网络时间协议 NTP (Network Time Protocol) 和精确时间协议 PTP (Precision Time Protocol) 2 种技术途径实现<sup>[4]</sup>。其中,

NTP 和简单网络时间协议 SNTP (Simple Network Time Protocol)<sup>[5-7]</sup>是最常用的网络时钟协议。在一般的环境下, NTP 的时间精度在广域网上为毫秒级<sup>[8]</sup>, 在局域网上的精度更高, 可以达到亚毫秒级。SNTP 由 NTP 改编而来, 只具有受时功能, 不具有分发时间的功能, 也没有实现 NTP 的相关同步算法, 因此可以视为 NTP 的子集。不同于传统陆地广域电力系统, 船舶 IPS 的发配电设备布置在船舶底层, 空间封闭、布线密集, 不能同陆地广域电力系统同步测量一样为每个测量单元配备卫星时钟的独立天线和接收模块。此外, 亚毫秒级的同步精度也难以满足 IEC61850 标准 T5 等级  $\pm 1 \mu\text{s}$  的精度要求。

网络测量和控制系统的精准时钟同步协议, 即 IEEE1588 协议, 用于将网络内的其他时钟 (从时钟) 同步于最精确的时钟 (主时钟)<sup>[9]</sup>。该协议设计的初衷是针对小型局域网, 同步精度可达亚微秒级<sup>[10]</sup>, 对系统内存和处理器性能没有特别高的要求, 在低成本的终端设备应用具有可行性。

根据不同的实现机制, 时钟同步可分为硬件时钟同步、软件时钟同步、混合时钟同步。硬件时钟同步是指硬件设施时钟 (如 GPS 接收机、UTC 接收机、特殊的时钟信号线等) 同步本地时钟的脉冲时间信号, 主要的操作对象是计算机的硬件时钟。硬件时钟同步的同步精度很高, 可以达到  $10^{-9} \sim 10^{-6}$  s, 但前提是需要同步时钟同步设备的硬件支持, 因此时钟同步的成本很高, 实现复杂。软件时钟同步是指时钟同步算法用串行数据流的形式输出时钟信息, 根据时钟同步信息同步局部时钟。软件时钟同步因具有工作量大、时钟节点间的同步误差易累积、时钟同步信息受串口通道传输距离的限制、传输延迟不稳定等问题, 导致软件同步精度比较低, 一般约为  $10^{-6} \sim$

$10^{-3}$  s。混合时钟同步是指将软、硬件时钟同步的优点相结合进行的同步机制。

综上所述,本文采用基于 IEEE1588 协议的卫星时钟同步与局域网时钟频率补偿算法相结合的混合时钟同步方案,实现船舶 IPS 的同步测量。

## 2 IEEE1588 同步原理

IEEE1588 同步系统作为一种主从同步系统,其主时钟周期性地发布 PTP<sup>[11-12]</sup> 以及时间信息,从时钟端口接收主时钟端口发送的时间戳信息,系统据此计算得到主/从线路时间延时和时间偏差,利用计算结果调整本地时间,使从设备的时间与主设备的时间保持同步。IEEE1588 同步原理如图 1 所示。

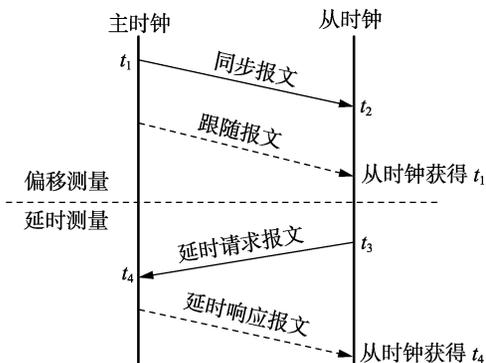


图 1 IEEE1588 同步原理

Fig.1 IEEE1588 synchronization principle

同步前,首先通过最佳主时钟(BMC)算法确定主时钟和从时钟。同步过程需要用到 4 种时钟报文类型:同步(Sync)报文,跟随(Follow\_Up)报文,延时请求(Delay\_Req)报文,延时响应(Delay\_Resp)报文。其中同步报文和延时请求报文属于事件消息,跟随报文和延时响应报文属于通用消息,事件消息需要打上精确的时间戳。

同步过程分为以下 2 个阶段。

**a. 偏移测量**,用来测定主、从时钟之间的时间偏差值( $\alpha$ )。首先,主时钟周期性地(默认 2 s)向从时钟发送同步报文,并在报文发送时打下时间戳,随后发送跟随报文,该报文携带着同步报文准确的发送时间  $t_1$ ;然后,从时钟接收同步报文,记录报文准确的到达时间  $t_2$ 。

**b. 延时测量**,用来测定主、从时钟之间的网络延时( $\beta$ )。首先,从时钟向主时钟发送延时请求报文,并记录该报文的发送时间  $t_3$ ,主时钟接收后记录该报文准确的到达时间  $t_4$ ;然后,主时钟向从时钟发送包含时间信息  $t_4$  的延时响应报文。该阶段是无周期的,间隔 4~60 s 不等,目的是减少网络负荷。

假设从主时钟到从时钟的延时和从时钟到主时钟的延时相同,根据  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  这 4 个数值,可以列写以下 2 个等式:

$$t_2 - t_1 = \alpha + \beta \quad (1)$$

$$t_4 - t_3 = \beta - \alpha \quad (2)$$

基于此,可根据从时钟计算网络延时和时间偏差值,并由此调整本地时钟,完成一次同步过程。

$$\alpha = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)}{2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (4)$$

## 3 IEEE1588 同步精度误差分析

从 IEEE1588 同步原理可知,网络延时和时间偏差值的测量是基于主、从时钟的偏差恒定和传输路径对称<sup>[13]</sup>的假设。传输路径对称指的是主时钟到从时钟的传输路径与从时钟到主时钟的传输路径一致;主、从时钟的偏差恒定指的是分布式系统中每个网络节点本地时钟的走时稳定,一般系统的时钟节点都是使用有源或者无源晶振驱动计数器实现计时,因此晶振的好坏直接决定了同步的精度。

### 3.1 晶振补偿分析

晶振的本质是利用石英晶体的压电效应生产的一种振荡器<sup>[14]</sup>。国际电工委员会将石英晶体振荡器分为 4 类:普通晶体振荡器(SPXO),电压控制式晶体振荡器(VCXO),温度补偿式晶体振荡器(TCXO),恒温控制式晶体振荡器(OCXO)。不同的振荡器有不同的频率稳定性要求,如表 1 所示。

表 1 晶振振荡器的频率稳定性要求

Table 1 Frequency stability requirements of crystal oscillators

振荡器类型	频率稳定度要求	振荡器类型	频率稳定度要求
OCXO	$-10^{-7} \sim 10^{-7}$	带电热调节 TCXO	$-10^{-5} \sim -2.5 \times 10^{-6}$
带集成电路 TCXO	$-5 \times 10^{-7} \sim -10^{-7}$ , $10^{-7} \sim 5 \times 10^{-7}$	VCXO	$-2 \times 10^{-5} \sim -10^{-5}$ , $10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$
带普通集成电路 TCXO	$-10^{-6} \sim -5 \times 10^{-7}$ , $5 \times 10^{-7} \sim 10^{-6}$	SPXO	$< -2 \times 10^{-5}$ , $> 2 \times 10^{-5}$
带数字智能集成电路 TCXO	$-2.5 \times 10^{-6} \sim -10^{-6}$ , $10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$		

由表 1 可知,OCXO 利用恒温槽使得振荡器的温度保持稳定,能够将温度变化引起的温漂降到最低,是目前精度较高的晶振,但是其价格昂贵,所有节点都采用 OCXO 不太现实。SPXO 因为成本低廉,其应用最为普遍,但是精度低、稳定性差。本地时钟最常使用的晶振就是 SPXO。对于一个标称频率为 100 MHz、精度为  $\pm 5 \times 10^{-5}$  的 SPXO 而言,其频率偏差为  $\pm 100 \times 50 \times 10^{-6}$  MHz。如果不采取任何补偿措施,主、从时钟在一个同步周期(默认 2 s)的偏差达到  $\pm 2 \times 50 \times 2 \mu\text{s}$  ( $\pm 200 \mu\text{s}$ ),低于 IEC61850 标准 T2 等级  $\pm 100 \mu\text{s}$  的精度要求。因此,为了在成本与性能之间达到平衡,本文决定通过频率补偿算法提

高 SPXO 的精度。

### 3.2 频率补偿算法

普通的数字时钟是由振荡器和计数器组成的,其显示时间的原理是:振荡器振荡 1 次,计数器数值加 1,假设振荡器的频率为 100 MHz,则当计数器数值记满  $10^8$  次时,即完成了 1 s 的计时<sup>[15]</sup>。根据 IEEE1588 协议同步原理可知,主、从时钟偏差是由从时钟进行计算,因此可以通过利用时钟偏差值来改变从时钟计数频率的方法进行频率补偿;当从时钟比主时钟慢时,加大从时钟的计数频率;当从时钟比主时钟快时,减小从时钟的计数频率,从而达到主、从时钟的频率相对稳定。

基于此,笔者提出一种频率补偿算法,核心是计算频率补偿值,设为  $\gamma$ ,计算方法如下。

主时钟周期性地发送同步报文,假设链路延时为  $\beta$ ,当主时钟发送第  $n$  个同步报文时,主时钟的时间为  $M_n$ ,当从时钟接收到第  $n$  个同步报文时,从时钟的时间为  $S_n$ ,则此时主时钟的时间变为  $M_n + \beta$ ;同理,当主时钟发送第  $n+1$  个同步报文时,主时钟的时间为  $M_{n+1}$ ,当从时钟接收到第  $n+1$  个同步报文时,从时钟的时间为  $S_{n+1}$ ,频率补偿值为  $\gamma_n$ ,则此时主时钟时间变为  $M_{n+1} + \beta$ ;当主时钟发送第  $n+2$  个同步报文时,主时钟的时间为  $M_{n+2}$ ,当从时钟接收到第  $n+2$  个同步报文时,从时钟的时间为  $S_{n+2}$ ,频率补偿值为  $\gamma_{n+1}$ ,则此时主时钟时间变为  $M_{n+2} + \beta$ ;如果从时钟在接收到第  $n+2$  个同步报文后实现同步,则此时有式 (5) 成立。

$$M_{n+2} + \beta = S_{n+2} \quad (5)$$

在这 2 次同步过程中,从时钟的时间增量为:

$$\Delta T = (S_{n+2} - S_{n+1}) - (S_{n+1} - S_n) \quad (6)$$

因为同步报文是周期发送的,则有:

$$M_{n+2} = M_{n+1} + (M_{n+1} - M_n) \quad (7)$$

将式 (5)、(7) 代入式 (6), 可得:

$$\Delta T = 2(M_{n+1} - S_{n+1}) - (M_n - S_n) + \beta \quad (8)$$

又因为根据同步原理方程式 (2) 可得:

$$S_{n+1} - M_{n+1} = \beta - \alpha_{n+1} \quad (9)$$

$$S_n - M_n = \beta - \alpha_n \quad (10)$$

将式 (9)、(10) 代入式 (8), 可得从时钟时间增量与主、从时钟偏差的关系为:

$$\Delta T = 2\alpha_{n+1} - \alpha_n \quad (11)$$

进而可得频率补偿值增量与频率补偿值的关系为:

$$\Delta \gamma = \frac{2\alpha_{n+1} - \alpha_n}{S_{n+1} - S_n} \gamma \quad (12)$$

一般情况下,  $S_{n+1} - S_n$  变化较小,  $\gamma$  也变化较小。

为了简化模型,将  $S_{n+1} - S_n$  和  $\gamma$  的比值视为常数  $k$ ,  $k$  的取值与晶振品质、标称频率等因素有关。

### 3.3 频率补偿模型

基于频率补偿算法建立一种频率补偿模型,模型原理图如图 2 所示。图中,  $\alpha = 2\alpha_{n+1} - \alpha_n$  为偏差值;  $\gamma$  为频率补偿值,  $\gamma = \gamma_{\text{diff}} + \gamma_{\text{ini}}$ ,  $\gamma_{\text{diff}}$  为频率补偿值增量,可根据式 (12) 求得,  $\gamma_{\text{ini}}$  为初始频率补偿值;  $k$  为一常数;  $f$  为实际晶振频率,累加器分频将  $f$  转化为一个稳定的计数频率  $F$ ;  $T$  为计数器数值,当累加器累加到上限值时溢出,同时计数器数值加 1。IEEE1588 标准规定用一个 64 位整形寄存器表示时间,前 32 位表示秒以上,后 32 位表示秒以下。本文模型只关心秒以下,因此采用一个 32 位的数表示时间。  $\gamma_{\text{ini}} = 2^{32}/d$ ,  $d$  为分频比,在综合考虑易于分频和保证仿真效果后,选用 4 分频的初始工作模式,则  $\gamma_{\text{ini}} = 1\,073\,741\,824$ 。晶振每振荡一次所经历的时间叫作时钟分辨率,如 50 MHz 的普通晶振,晶振振荡  $5 \times 10^7$  次耗时 1 s,则时钟分辨率为 20 ns,因为选用 4 分频,则理论周期  $T = 80$  ns。

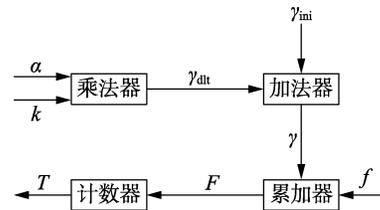


图 2 频率补偿模型原理

Fig.2 Principle of frequency compensation model

频率补偿原理如下:当实际晶振频率  $f$  发生漂移与标称频率发生偏差时,从时钟计算偏差值  $\alpha$ ,在乘法器中得到频率补偿值增量  $\gamma_{\text{diff}}$ ,在加法器中与  $\gamma_{\text{ini}}$  相加得到频率补偿值  $\gamma$ ,在累加器中进行累加。因此  $\alpha$  值越大,则  $\gamma$  值越大,累加器的溢出速率越快,计数器数值增加越快,在单位时间内计数器的计数次数增多,使从时钟的周期减小。

## 4 仿真分析

根据频率补偿算法和模型,使用 Quartus II 软件对频率补偿模型进行时序仿真,采用原理图输入电路模块实现方案。根据图 2 建立仿真模型,仿真模型见附录中图 A1。

假设标称频率为 50 MHz 的晶振由于时漂、温漂等因素发生偏差,频率变为 49.98 MHz,笔者设置不同偏差值,通过观察计数周期来判断频率补偿算法是否有效。

a. 设置偏差值为 0,仿真结果如附录中图 A2 所示。为减少随机误差,分频率取 10 个周期进行采集,并取平均值,求得计数周期为  $80.272\,5\, \text{ns} > 80\, \text{ns}$ ,说明:晶振频率下降导致单位时间内计数器

计数次数减少、周期变长。

b. 设置偏差值为  $200 \mu\text{s}$ , 仿真结果如附录中图 A3 所示。为减少随机误差, 分频频率取 10 个周期进行采集, 并取平均值, 求得计数周期为  $80.0347 \text{ ns}$ , 优于情况 a 的结果。说明随着偏差的产生, 频率补偿算法开始执行, 晶振频率补偿方案确实能够提高晶振频率、减小时钟周期, 验证了所提方案的可行性、合理性、有效性。

## 5 同步测量系统试验

### 5.1 同步测量节点设计

同步测量节点应具有实现时间同步、同步测量和数据处理的功能。其结构如图 3 所示。

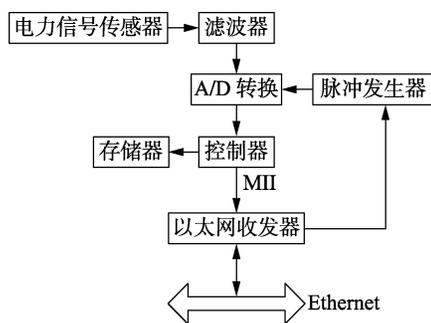


图 3 同步测量节点结构

Fig.3 Frame of synchronous measurement node

为了准确地获取 IEEE1588 时间戳, 以太网收发器采用集成 IEEE1588 协议功能的芯片, 控制器采用带 MII 接口的数字信号处理器 (DSP) 实现报文的收发并计算时钟偏差、校正本地时钟。脉冲发生器采用 FPGA 对输入频率进行分频以获取所需的采样频率。

### 5.2 同步试验平台搭建

试验平台基于环星型网络拓扑结构, 卫星时间信号接收机作为主时钟, 交换机采用支持 IEEE1588 协议的西门子 RSG2288 型交换机, 配置成透明时钟 TC (Transparent Clock), 如附录中图 A4 所示。

2 个同步测量节点同步于一个主时钟, 对同一信号进行测量, 控制器采集信号并发送至上位机, 通过计算正序电压过零点的时间值对同步精度进行测试, 测试平台如图 4 所示。

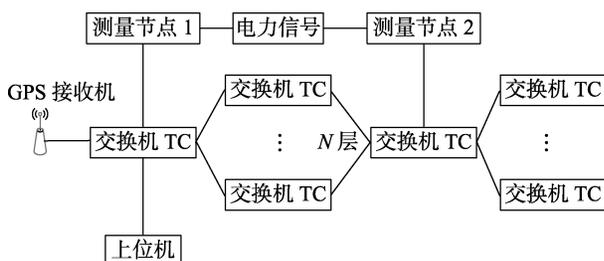


图 4 测试平台框图

Fig.4 Block diagram of test platform

### 5.3 同步试验结果统计

环星型网络拓扑结构中, 当  $N$  取不同数值 ( $N \geq 1$ ) 时, 网络节点数不同, 拓扑规模不同。分别记录不同  $N$  值下 10 000 次试验的统计结果, 如表 2 所示。

表 2 同步测量数值

Table 2 Synchronous measurement values

N	误差均值/ 误差最大值/		N	误差均值/ 误差最大值/	
	ns	ns		ns	ns
1	148	176	3	155	183
2	152	179			

由表 2 可知, 同步测量误差均在  $\pm 200 \text{ ns}$  以内, 达到了 IEC61850 标准 T5 等级  $\pm 1 \mu\text{s}$  的精度要求, 满足船舶 IPS 对时间同步的需要。

## 6 结论

本文提出一种基于 IEEE1588 协议的卫星时钟同步与时钟同步频率补偿算法相结合的混合时钟同步方案以实现同步测量。针对晶振漂移问题, 提出了晶振频率补偿算法, 并验证了该算法的可行性和有效性; 设计同步测量节点, 通过试验验证了同步测量的精度, 在少量成本的基础上实现了高精度同步, 为分布式系统的扩展节约了大量的财力、物力。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 王彦东, 邵英, 王黎明, 等. 基于舰船综合平台的精确同步数据采集设计[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(4): 70-75.  
WANG Yandong, SHAO Ying, WANG Liming, et al. Design of precision synchronization data acquisition based on integrated platform management system [J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(4): 70-75.
- [2] 陈楚, 吴强, 王黎明, 等. 船舶电力系统同步向量测量装置的研制[J]. 船电技术, 2015, 35(11): 64-69.  
CHEN Chu, WU Qiang, WANG Liming, et al. Research on synchrophasor measurement unit for ship's power system [J]. Marine Electric, 2015, 35(11): 64-69.
- [3] 肖雄波, 夏立, 王黎明. 一种改进状态模型的动态向量测量算法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 47-52.  
XIAO Xiongbo, XIA Li, WANG Liming. A dynamic phasor measurement algorithm based on improved state model [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(12): 47-52.
- [4] 侯重远, 江汉红, 芮万智, 等. 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, 33(1): 148-152.  
HOU Chongyuan, JIANG Hanhong, RUI Wanzhi, et al. Improvement of NTP synchronization accuracy for switch-oriented power monitoring networks [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 148-152.
- [5] 胡巨, 高新华. SNTP 对时方式在数字化变电站中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 143-147.  
HU Ju, GAO Xinhua. Application of SNTP-based time synchronization in digital substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 143-147.
- [6] MILLS D. Network time protocol specification, implementation and

- analysis[EB/OL]. [2017-12-14]. <http://www.wendangku.net/doc/52fb54d0240c844769eae7.html>.
- [7] MILLS D. Simple network time protocol for IPv4, IPv6 and OSI [EB/OL]. [2017-12-14]. <https://wenku.baidu.com/view/390dac39376baf1ffc4fad6.html>.
- [8] DAVID D, GLENN B. Using NTP to control and synchronize system clock-part III: NTP monitoring and troubleshooting[M]. Indianapolis, USA: Sun Blue Prints, 2001; 5.
- [9] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems; IEEE1588[S]. [S.l.]: IEEE, 2008.
- [10] EIDSON J, KANG L. IEEE 1588 standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems [C]//Sensors for Industry Conference. Houston, TX, USA: IEEE, 2002: 98-105.
- [11] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE standard 1588-2002 for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S]. New York, USA: IEEE, 2002.
- [12] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE standard 1588-2008 for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S]. New York, USA: IEEE, 2008.
- [13] 叶品勇, 魏建功, 陈新之. IEEE1588 对时同频算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 113-115.
- YE Pinyong, WEI Jianguo, CHEN Xinshi. IEEE1588 synchronization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 113-115.
- [14] GUI Benxuan, LIU Jinhua. Realization of IEEE1588 high-precision synchronous algorithm[J]. Electronics Optics and Control, 2006, 13(5): 90-94.
- [15] 吴歆馨. 基于 IEEE1588 高精度网络时钟同步系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- WU Xinxin. The study of the high accuracy network clock synchronization system based on IEEE1588 [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

#### 作者简介:



路 遥

路 遥(1990—),男,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向为电力系统网络化测控(E-mail: louie61229@foxmail.com);

江汉红(1960—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统能量管理系统;

王 义(1985—),男,湖北仙桃人,博士研究生,主要研究方向为智能微电网技术。

## A high-precision PTP hybrid clock synchronous method for synchronous measurement of ship integrated power system

LU Yao, JIANG Hanhong, WANG Yi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to meet the accuracy requirement of sub- $\mu\text{s}$  level in ship integrated power system synchronous measurement, a hybrid clock synchronous scheme combined with the satellite clock synchronization based on IEEE1588 protocol and the clock synchronous frequency compensation algorithm is proposed, which is based on the analysis of the advantages and disadvantages of each clock synchronous protocol and the limitations of traditional clock synchronous methods. Setting the interactive Ethernet with circular-star topology structure as the background, the synchronous measurement nodes are designed based on the Ethernet transceiver integrated with IEEE1588 protocol, and a frequency compensation algorithm is proposed to compensate the crystal frequency of clock nodes dynamically, which can ensure the clock good punctuality and constant deviation between master clock and slave clock. The synchronization deviation performance is tested by simulation analysis and experiment, results show that the synchronization precision maintains within  $\pm 200$  ns, meeting the synchronous measurement standard of IEC61850 and the requirements of ship integrated power system for synchronization.

**Key words:** ship integrated power system; PTP; IEEE1588 protocol; synchronous measurement; frequency compensation algorithm; IEC61850; hybrid clock synchronous

# 附录

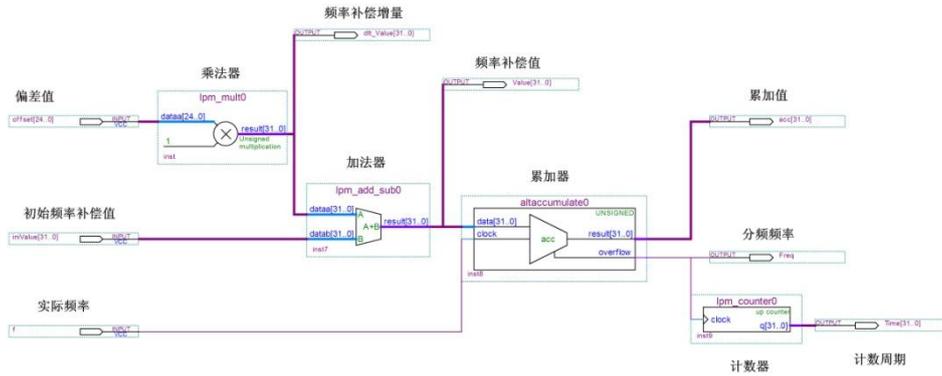


图 A1 仿真模型  
Fig.A1 Simulation model

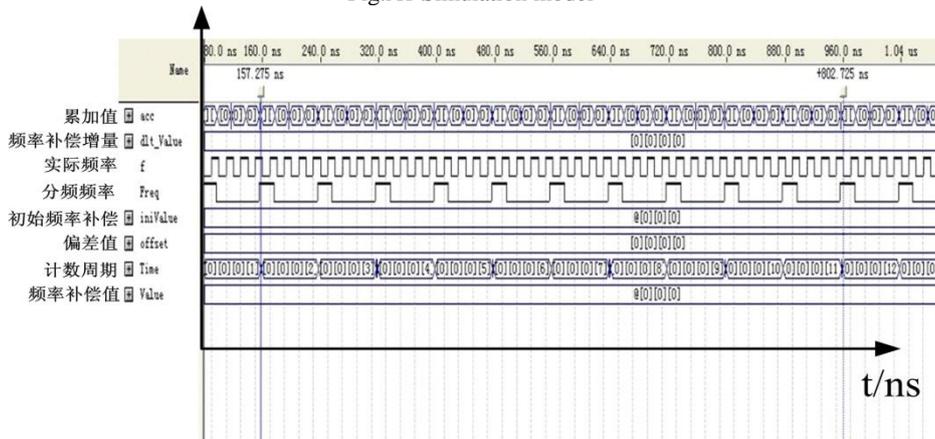


图 A2 偏差值为 0 时的仿真结果  
Fig.A2 Simulative results when deviation value is zero

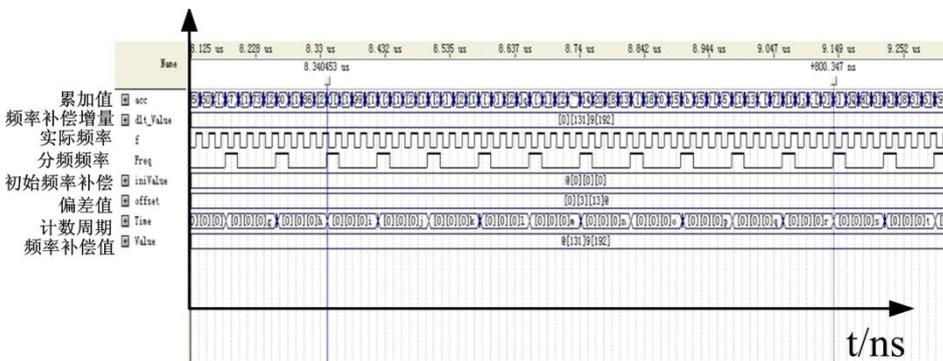


图 A3 偏差值为 200μs 时的仿真结果  
Fig.A3 Simulative results when deviation value is 200μs



图 A4 交换机的配置  
Fig. A4 Configuration of switches