

## 船舶电力系统时钟同步及改进技术研究

王彦东, 王黎明, 邵英, 左文

(海军工程大学 电气工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 为了提高船舶电力系统时钟同步精度, 减少由于测试时间基准不同带来的误差, 提出了一种新的船舶综合平台时钟同步方案; 利用 PTP 同步报文中时间戳的精确值于每周期利用偏差对从时钟进行修正的同时, 将多周期的时钟漂移进行综合, 改进同步精度; 利用 Matlab 进行时钟误差建模, 进行算法改进及硬件验证; 仿真和测试结果表明, 该算法能够在 IEEE1588 同步方案的基础上将同步精度进一步提升至 60 ns 左右, 在不改变以太网同步策略的基础上进一步改进同步精度, 具有重大的研究价值和工程实践意义。

**关键词:** 船舶电力系统; 时钟同步精度; 卡尔曼滤波; 时钟漂移

## Research on Clock Synchronization and Improvement Based on Ship Integrated Power System

Wang Yandong, Wang Liming, Shao Ying, Zuo Wen

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** For improving the accuracy of clock synchronization and reducing the offset brought about by the disunion of measure benchmark of the ship integrated power system, a method to improve the accuracy of clock synchronization is proposed. By taking advantage of the time stamp included in the packet network, offset can be used to modify the slave clock, and the accuracy of the synchronization between master and slave clock can be compensated. Modeling with Matlab, afterwards the slave clock can be modified both in algorithm and in hardware. Simulation and test results shows that this method can provide signal with the offset less than 60ns, not only the problem of measurement accuracy is resolved, and more improvement could be achieved via the ethernet, meaning more in research and project.

**Keywords:** ship integrated power system; clock synchronization; improvement; time stamp

## 0 引言

船舶电力系统属于运行工况多样、用电负荷类型众多的独立又完整的电力系统。文献 [1] 指出, 船舶综合电力系统信息化下, 信息战的效能将得到更大发挥。综合电力系统需要连续不断的实时处理大量数据, 长时间记录系统运行状态, 这就要求底层电力参数具有统一的时间基准。依托于以太网的 PTP (Precision Time Protocol) 同步协议为分布式系统在精确时间基准上统一动作提供了可能, IEEE1588 同步技术在不断革新过程中, 更加值得在船舶综合电力系统环境下进行时间同步研究。

## 1 船舶综合电力系统时钟同步技术现状

船舶综合平台管理系统高效能实现的基础都建立在高精度数据获取之上, 通过将电压电流信息上传至中央处理中心, 由综合集控台完成数据处理和实时监控。

## 1.1 NTP 同步

传统船舶电力系统通信建立于 NTP (Network Time Protocol) 之上, 如图 1 所示。

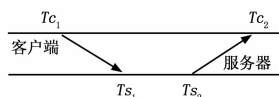


图 1 NTP 同步原理

客户端通过与服务器之间的两次报文交互即可完成与服务器的时间同步。算法如下:

$$T_{c1} - T_{s1} = t_{csd} - t_{offset} \quad (1)$$

$$T_{s2} - T_{c2} = t_{offset} + t_{csd} \quad (2)$$

$$t_{csd} = \frac{(T_{c1} - T_{s1}) + (T_{s2} - T_{c2})}{2} \quad (3)$$

$$t_{offset} = (T_{s2} - T_{c2}) - \frac{(T_{c1} - T_{s1}) + (T_{s2} - T_{c2})}{2} = \frac{(T_{s1} + T_{s2}) - (T_{c1} + T_{c2})}{2} \quad (4)$$

$T_{c1}$  为客户端当前时间,  $T_{s1}$  为服务器接收到报文后记录的本地时间,  $T_{c2}$  为客户端在接受到该报文时记录下的当前时间。计算出路径延迟 (delay) 和相对于服务器的时钟偏差 (offset), 完成时间同步。

## 1.2 船舶 NTP 同步

整个局域网以主干千兆光纤以太网, 百兆以太网分节点计算机的方案进行设计<sup>[2]</sup>。如图 2 所示。

基于局域网的船舶综合平台主要包括数据采集终端和上层综合处理中心, 终端通过 CAN 网周期性将采集数据上传至 PC 机, PC 机通过以太网将数据上传至上层集控中心进行处理<sup>[3]</sup>。NTP 协议在应用层打时标, 假设路径延迟相等都使得该协议存在很大的不足, 不能完全满足综合平台高精度、实时性的要求。IEEE1588 的时间同步方案使各节点数据精确同步采集成为可能。

## 1.3 IEEE1588 时间同步

IEEE1588 协议为综合平台由毫秒级向亚微秒级精度的实时性监控提供了可能, 为异步通信模式下的精确时间同步创造了条件, PTP 报文同步方式及 MII 层加时间戳原理如图 3 所示。

IEEE1588 也作了主从路径延时相等这一假设, 但在尽量

收稿日期: 2014-03-02; 修回日期: 2014-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金(61101206)。

作者简介: 王彦东(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事检测技术与时钟同步技术方向的研究。

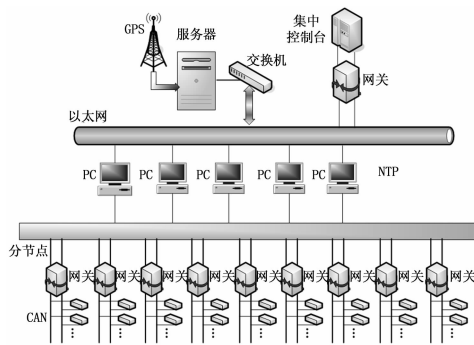


图 2 传统船舶综合平台 NTP 时钟同步网络结构

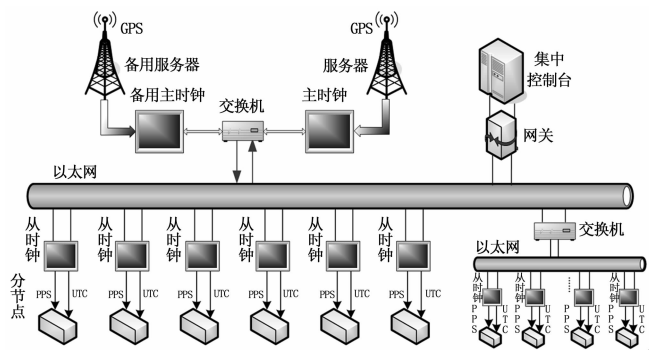


图 4 基于 IEEE1588 的船舶综合平台

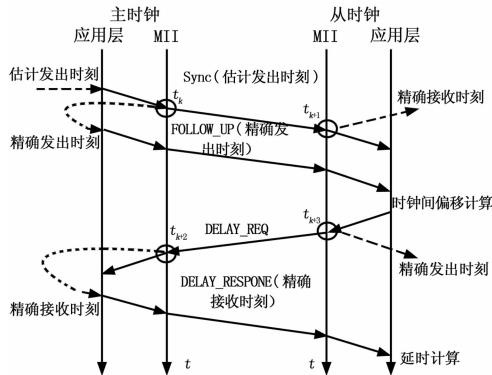


图 3 改进后的 IEEE1588 同步原理图

靠近物理层的 MII 处打时标来减小操作系统和协议栈的方案极大得减小了由操作系统和协议栈引起的误差<sup>[4]</sup>。算法如下。

主时钟到从时钟的延时：

$$T_{msd} = t_{k+1} - t_k \quad (5)$$

从时钟到主时钟的延时：

$$T_{smd} = t_{k+3} - t_{k+2} \quad (6)$$

假设通信线路对称：

$$T_{msd} = T_{smd} \quad (7)$$

则线路延时：

$$T_{delay} = \frac{T_{msd} + T_{smd}}{2} = \frac{(t_{k+1} - t_k) + (t_{k+3} - t_{k+2})}{2} \quad (8)$$

从时钟相对于主时钟的偏差：

$$T_{offset} = t_{k+1} - t_k - T_{delay} = t_{k+1} - t_k - \frac{(t_{k+1} - t_k) + (t_{k+3} - t_{k+2})}{2} = \frac{(t_{k+1} - t_k) - (t_{k+3} - t_{k+2})}{2} \quad (9)$$

## 2 船舶电力系统 PTP 时钟同步技术

### 2.1 船舶电力系统精确数据获取方案

IEEE1588 同步方案，只需在原有网络上添加同步报文便可实现，这些同步报文在和其他信息包共享网络时只占用少量的网络资源。本文提出的基于 GPS 和 IEEE1588 的精确数据同步方案如图 4 所示。

经过 GPS/北斗授时的主时钟拥有最高时钟准确度，作为全网时钟源为其他时钟提供精确授时。经过授时的从时钟既可以直接为设备提供精确 PPS (Pulse Per Second) 秒脉冲信号和 TOD (Time of Date)，又可以作为边界时钟为下一级时钟

提供精确授时。该方案摒弃了传统 NTP 网络同步方案需要安置大量的 GPS 和 PC 机完成时间同步的方案，数据采集方式由传统的自触发采集、周期性上传的方式改为精确 PPS 秒脉冲触发方式。

### 2.2 IEEE1588 精确数据同步技术底层应用

该方案中时钟的守时<sup>[5]</sup>功能，使得船舶的多项性能有了进一步提升的空间，图 5 为应用设计示例。

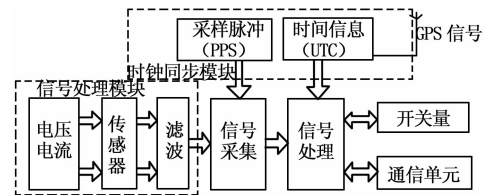


图 5 时钟同步模块信号采集应用示意图

模拟电信号经变换、调制后进行 A/D 转换，时钟同步模块提供触发信号，同时利用时钟同步模块的 TOD 时间为每组数据贴上“时间标签”，最终输出带有精确时间标记的数据包。该方案可以更好的实现各系统的运行监控和故障分析，通过电力系统自动化控制设备的开关动作、调整的先后顺序及准确时间来分析事故的原因及过程。诸如时间顺序记录、继电保护、故障测距、实时信息采集等在该方案的作用下都能保证数据的有效性。

## 3 IEEE1588 时钟同步算法改进

### 3.1 算法研究

由于温度变化、电磁干扰、振荡器老化和生产调试等原因，时钟的振荡频率和标准频率之间难免会存在一定误差<sup>[6]</sup>，协议只是对主从时钟的偏差进行了补偿，并未从根源上对产生时钟偏差的频率偏差进行补偿。文献 [7-10] 针对 PTP 同步存在的问题进行了大量研究，时钟同步的精度和稳定性的研究和应用依然存在很多问题。

若将时钟同步建立在时变的时钟漂移即时钟漂移变化率之上，同步精度将会取得更加理想的效果。本文重在研究该模型，将其进行硬件实现。经过比较，文献 [11] 中提到的时钟模型及 Allan 方差抑制方法对时钟漂移修正及精度的提高有较大作用。

时钟模型：

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{D}{2} t^2 + \frac{\hat{\omega}(t)}{2\pi\nu_{nom}} \quad (10)$$

$x(t)$  为系统时间函数， $x_0$  为初始时间， $y_0$  为相对频率偏差， $D$  为频率漂移， $\varphi(t)$  为随机噪声方差， $\nu_{nom}$  为标称频率。Allan 方差模型：

$$ADEV(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2} \{ [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]^2 \}} \quad (11)$$

利用 Allan 方差建模的方法能够有效分析并抑制随机噪声信号, 左边表示任意  $\tau$  时刻的方差, 括号内为总体均值,  $x(t+\tau)$  为  $\tau$  时刻的观测值。其中,  $\tau = n\tau_0$  为观测间隔,  $\tau_0$  为采样间隔,  $n$  为观测周期内的采样个数。

### 3.2 硬件验证设计流程

在 PTP 同步模型中可以利用每次得到的偏差值作为采样值, 令  $\tau_0 = 2\text{ s}$ , 10 个数据为一周期, 即  $n=10$ , 利用方差估计值及偏差值完成本次修正, 并根据下次时间戳的信息同估计值比较, 完成模型修正及偏差补偿, 具体流程图如图 6 所示。

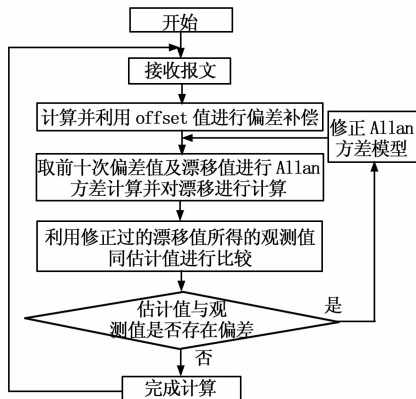


图 6 Allan 方差时钟修正流程图

### 4 验证分析

验证主要围绕同步精度和稳定性进行, 完成多组数据测试、稳定性测试<sup>[12]</sup>。将方差建模及抑制算法移植到基于 STM32F207 的嵌入式时钟同步平台<sup>[13]</sup>进行验证进行数据统计后可得如图 7~8 所示结果, 建立的实验平台如图 9 所示。

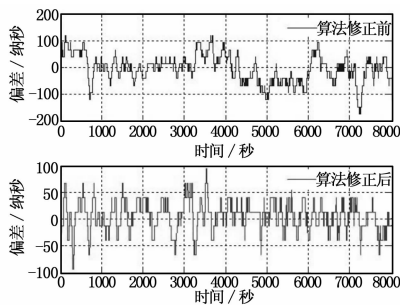


图 7 多周期从时钟偏差统计

图 7 为多周期偏差结果。上方为修正前数据, 外界环境的影响出现了很多 150ns 以外的跳变数据。下方为经算法改进后的时钟同步结果, 同步偏差始终维持在 50ns 左右, 没有大的数据跳动现象, 不仅保证了主从同步精度, 而且保证了稳定性。

图 8 为统计结果的频率偏差分布直方图, 可以直观比较算法改进前后的数据, 集中分布在 60ns 的结果, 极大得保证了数据精度。

本文在研究过程中仍存在的问题: 基于时钟模型误差修正算法的研究不够深入; 频率漂移校正算法还应考虑更多的噪声信号类型及软件修正方法。

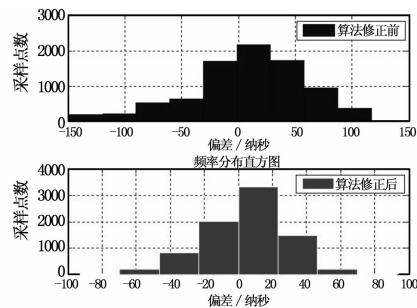


图 8 时钟偏差分布直方图



图 9 时钟同步测试方案硬件连接图

### 5 结论

本文针对以往船舶综合电力系统基于 NTP 网络同步方式存在的同步精度低、布点不便、故障查询不准的问题进行了基于 IEEE1588 的改进设计。针对已有 IEEE1588 同步技术存在的稳定性不高, 抗干扰能力不强的问题进行算法改进及硬件实现并取得良好的效果。50ns 级的精度为更进一步的应用奠定了坚实的基础, 基于此的多项研究可以由此展开。

#### 参考文献:

- [1] 马伟明. 舰船电气化与信息化复合发展之思考 [J]. 海军工程大学学报, 2010, 22 (5): 1-4.
- [2] 郭蒙. 海洋工程船综合平台管理系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [3] 高志远, 徐美强, 吴昱明. 一个高精度网络对时软件的设计和实现 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (12): 76-80.
- [4] 陈实, 许勇, 王正凤, 等. 电网实时动态检测技术及应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [5] 魏丰, 朱广伟, 王瑞清, 等. 一种 GPS 校准的数字式高精度守时钟 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (4): 920-926.
- [6] 魏丰, 孙文杰. IEEE-1588 协议时钟同步报文的精确时间标记方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (1): 162-169.
- [7] Moon S B, Skelly P, Towsley D. Estimation and removal of clock skew from network delay measurements [A]. Proc. 18th Annu. JointConf [C], IEEE Comput. Commun. Soc. 1999: 227-234.
- [8] Troxel G D. Time surveying: Clock synchronization over packet networks [D]. Massachusetts Institute of Technology. 1994.
- [9] Abubakari H, Sastry S. IEEE 1588 Style Synchronization over Wireless Link [A]. Proc. Int. IEEE Symp. On Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication-IS-PCS 2008 [C], Ann Arbor, MI, 2008: 127-130.
- [10] Bletsas A. Evaluation of Kalman filtering for network timekeeping [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2006, 52 (9): 1452-1460.

(下转第 2303 页)

表 2 3 种方式的发送和接收时间

(单位: s)

数据量	状态	查询方式		标准 SCI 中断方式		FIFO 模式下中断方式	
		发送	接收	发送	接收	发送	接收
1 kB		0.902 10	0.310 36	0.855 62	0.293 07	0.428 09	0.142 69
2 kB		1.810 53	0.621 92	1.721 26	0.592 01	0.856 33	0.286 78
4 kB		3.612 91	1.250 67	3.432 48	1.181 99	1.720 15	0.573 51
8 kB		7.225 6	2.490 9	6.853 93	2.350 82	3.425 67	1.145 69

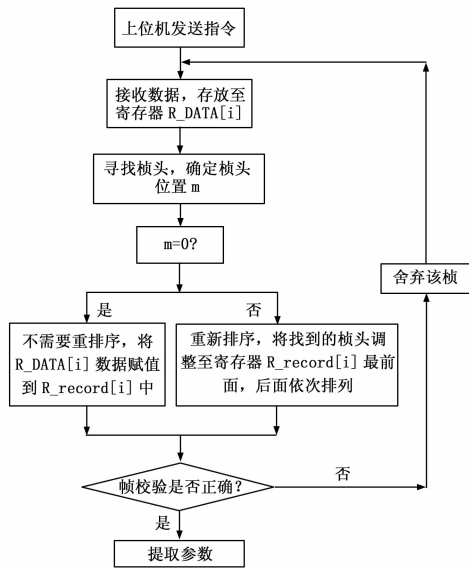


图 4 重排序流程图

外部因素变化), 统计这 3 种方式下 DSP 发送和接收数据所花费的时间, 如表 2 所示。以传输 8 kB 数据为例, 由表 2 可知, 采用 FIFO 模式下中断方式, 较前两种方式, 发送和接收分别节省了 3.799 93 s、3.428 26 s 和 1.345 21 s、1.205 13 s。由此可见, 采用 FIFO 模式下中断的串口通信方式, 节省 CPU 机时资源。与查询方式相比, 提高数据的传输效率率达 110.9%。当数据量越大, 采用该串口传输模式用时越少, 其优越性越明显。

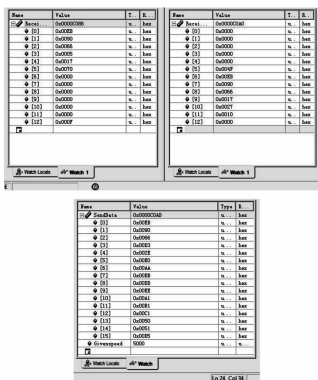


图 5 CCS3.3 下 DSP 接收与发送数据寄存器界面

在 CCS3.3 编译环境下运行 DSP, 将接收数据寄存器 RData<sup>[13]</sup> 和重排后的接收数据寄存器 R\_reorder<sup>[13]</sup> 调用出来, 如图 5 第二列和第一列数据所示。第三列为 DSP 定时发送的数据。每隔 5 ms 发送一次数据, 同时接收数据, 并将接收到的数据解读出来显示在图表中。

从图 5 中可以看出: RData<sup>[13]</sup> 中接收到的字符是错位的(曲线中数据表示错位的变化数据), 经过重排序后, 调整字符次序, R\_reorder<sup>[13]</sup> 中数据通过通信协议帧校验, 成功接收。经过多次实验, 验证了该方法的可靠性。

经计算, 发送一次数据所用时间为:

$$timeT = \frac{1 \times 10 \times 16}{115\ 200} = 1.388\ 89\ ms$$

花费时间明显小于定时器周期 5 ms, 满足要求, 可见数据可以在 5 ms 内发送出去。

#### 4 结束语

相比查询方式和标准 SCI 模式下的中断方式, 使用 FIFO 模式的中断方式, 可大大提高 CPU 的通信效率, 节省了 DSP 的机时资源, 让 CPU 有“时间和精力”去做其它重要事情。当数据量越大, 采用该串口传输模式用时越少, 其优越性越明显。

经过实验验证, DSP 接收的数据经过重排序后, 解决了上位机和 DSP 之间的上电时序问题, 为上位机与 DSP 之间的高效通信提供了有效方法, 具有一定的工程实际应用意义。

#### 参考文献:

- [1] 范 锐. 现场总线的发展趋势 [J]. 自动化仪表, 2000, 21 (2): 1-4.
- [2] 李朝青. 8051 串行口及串行通信技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [3] 顾卫钢. 手把手教你学 DSP [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [4] 刘陵顺, 高艳丽, 张树团, 等. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [5] 袁 航, 周 瑛, 周太勋. 用中断方式实现串口通信技术 [J]. 起重运输机械, 2003, (10): 17-18.
- [6] 胡景春, 庄海军. TMS320VC33 同步串行口和 PC 实现异步串行通信 [J]. 电子产品世界, 2010, 23 (9): 107-108.
- [7] 张 琴, 向先波. TMS320F24x 与 PC 机串行通信接口设计及应用 [J]. 今日电子, 2008, 5 (4): 221-222.
- [8] 马朝鲜, 魏胜利. 总线技术与 PC 机结合的通信系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, (7): 1963-1965.

(上接第 2283 页)

- [11] ITU-T G. 810. Definitions and Terminology for Synchronization Networks [S]. (August 1996) International Telecommunication Union, Geneva.
- [12] 郭 彬, 单庆晓, 肖昌炎, 等. 电网时钟系统的北斗/GPS 双模

同步技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 139-141.

- [13] IEEE Std 1588-2008. IEEE Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems [S]. 2008.