

一种 TTE 固化点排序方法研究

谢楠楠, 沈绪榜, 刘泽响, 卢 飞

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 时间触发以太网(TTE)以高精度时钟同步为基础, 具备高可靠实时传输和无冲突确定访问的优点, 适用于下一代航空航天电子系统强实时性、高确定性的通信需求. 固化点排序用于还原各网络节点的时钟偏差, 是高精度时钟同步的关键. 本文提出一种 TTE 固化点二分插入排序方法, 具有固化点实时收集排序、高可靠性、时间复杂度小等优点. 仿真实验证明, 该方法能高效地完成固化点排序, 具有促使 TTE 网络时钟同步的作用.

关键词: TTE; 时钟同步; 固化点; 二分插入排序

中图分类号: TP3

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2018)02—0006—05

Research on a Sort Method of TTE Permanence Point

XIE Nan-nan, SHEN Xu-bang, LIU Ze-xiang, LU Fei

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Time-triggered Ethernet (TTE) is based on high-precision clock synchronization, with the advantages of highly reliable real-time transmission and conflict-free determinately access, which can meet the communication requirements of the next generation of aerospace electronic systems to be strong real-time and high certainty. Permanence point ordering is used to restore the clock deviation of each network node, is a key step for high-precision clock synchronization. In this paper, a binary insert ordering method of TTE permanence points is proposed, which has the advantages of real-time collection and sorting of permanence point, high reliability and low time complexity. The simulation shows that the design can efficiently accomplish the ordering of permanence points, and has the effect to promote clock synchronization of TTE network.

Key words: TTE; clock synchronization; permanence point; binary insert ordering

1 引言

传统总线在传输性能、网络确定性以及系统安全可靠等方面已很难满足新型航空航天电子系统的总体要求. SAE AS6802 是 2011 年发布的可容错的时钟同步协议^[1], 主要定义了一种高精度且容错的时钟同步技术, 即时间触发以太网 TTE(Time-Triggered Ethernet), 它使传统以太网具备高速、实时、容错的通信功能^[2].

TTE 网络的主要功能及性能通过带宽分配和时分复用的虚拟链路技术实现, 网络流量分为时间触发(TT)流量、速率约束(RC)流量以及尽力传(BE)流量. 时钟同步作为实现时间触发的基本前

提, 是保证 TTE 网络实时性和确定性的基础. TTE 网络通过 PCF(Protocol Control Frame, 协议控制帧)的信息交流, 建立高精度、可容错的全局时钟同步. 本文在对 TTE 网络时钟同步技术研究的前提下, 提出一种固化点二分插入排序方法, 完成设计实现, 并进行仿真验证.

2 时钟同步概述

TTE 网络构件主要包括时间触发以太网交换机(CM, Compression Master)、控制器终端(SM, Synchronization Master)和客户终端(SC, Synchronization Client)及物理链路. 同一集群内, TTE 时钟同步过程为 SMs 向 CM 节点发送 PCFs, CM 收到

即任意两个有效固化点间的最大差值,为可配置值.

最大计时时间计算方法如下:记 permanence_pit 为 p , receive_pit 为 r , $\text{pcf_transparent_clock}_n$ 为 TC , 相同整合周期的任意两个 PCF 固化点可以表示为

$$p_1 = \max_transmission_delay - \text{TC}_1 + r_1$$

$$p_2 = \max_transmission_delay - \text{TC}_2 + r_2$$

相减移项可得

$$r_2 - r_1 = (p_2 - p_1) + (\text{TC}_2 - \text{TC}_1)$$

若要取得最大接收间隔 $\max(r_2 - r_1)$, 需同时取得 $(p_2 - p_1)$ 和 $(\text{TC}_2 - \text{TC}_1)$ 的最大值; 根据 OW 定义, 可得 $\max(p_2 - p_1) = \text{OW}$; 对于 $(\text{TC}_2 - \text{TC}_1)$ 当 TC_2 取最大值, TC_1 取 0 时, 得 $\max(\text{TC}_2 - \text{TC}_1)$ 为最大传输延迟; 综合以上可得 $\max(r_2 - r_1) = \text{OW} + \max_transmission_delay$.

3.2 排序过程

整合周期相同的一组 PCFs, 在满足接收时间间隔的条件下, 共用一个排序过程. 单个 PCF 固化点二分插入排序的步骤如图 3 所示, 具体步骤如下:

- (1) 单个 PCF 固化点执行二分插入过程, 获取已有相同整合周期的有序固化点序列的元素个数;
- (2) 将序列分为大致相同的前后两个子序列: 序列元素总数为奇数时, 以最中间的固化点值为基准分为前后两个子序列, 为偶数时, 以最中间的两个固化点中间分开分别为前后两个子序列;
- (3) 将当前 PCF 固化点与序列中间数进行比较: 为奇数时与中间数比较, 若小, 则插入序列缩小为前一半, 否则缩为后一半; 为偶数时, 先与前子序列的最后元素比较, 若小, 则待插入序列缩小为前一半, 否则与后子序列的第一个数比较, 小则插入中间两数之间, 大则待插入序列缩小为后一半; 比较时若相等, 则比较序列的后一项, 当小于后一元素时, 插入到两元素之间; 序列缩小一半时转(4), 直接可插入时转(5);
- (4) 对缩小后 PCF 固化点序列重复(2)到(3)操作;
- (5) 当前 PCF 固化点插入后, 与已有整合周期相同的固化点形成新的有序序列.

值得注意的是, 当 PCF 固化点与已有固化点相等时, 按时间优先级, 认为新到 PCF 的固化点更大. 为了避免故障 SM 对时钟同步计算造成的影响, CM 中可以有多个并行的排序过程, 每个 SM 的固化点在同一个排序过程中至多出现一次^[3].

二分插入排序是将有序固化点序列先二分, 再

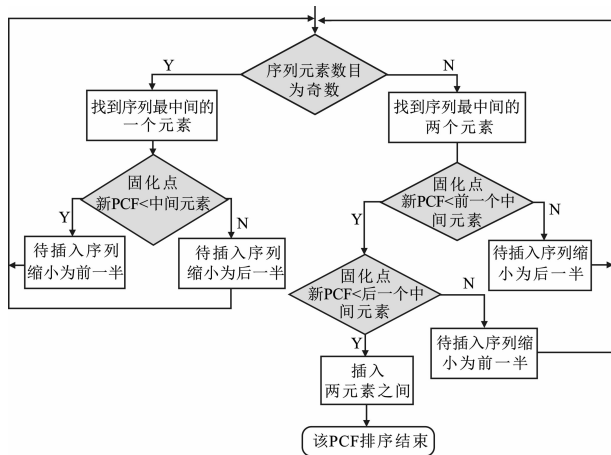


图 3 单个 PCF 固化点二分插入过程

通过比较缩小后的子序列的边界元素, 逐渐缩小范围, 确定插入位置. 该方法充分利用了元素间的次序关系, 每比较一次, 待比较序列的元素个数缩小一半. 在最坏情况下, 循环比较被执行了 $O(\log n)$ 次. 循环体内运算需要 $O(1)$ 时间, 因此整个过程在最坏情况下的时间复杂性为 $O(\log n)$.

3.3 收集过程

收集过程在整合周期相同的 PCFs 固化点为有序序列的条件下进行. 如果同步域内的节点都同步, 所有 SMs 发送的整合周期相同的 PCFs 可以在第一个 OW 内收集齐. 实际上每个 SM 都存在非同步或故障的可能, 本文考虑容错两个 SM 的情况^[4]. 根据

$$\max_OW = (f + 1) \times OW$$

f 表示 SM 容错个数, 因此本文中 $f = 2$, 收集阶段长度最大为 $3 \times OW$. 与协议中描述的动态开窗过程不完全相同, 压缩函数的开始时刻为有序固化点序列的第一个固化点, 以此开启第一个 OW, 收集过程如下:

- (1) 第一个 OW 内的 PCF 固化点个数小于 2 时, 终止收集, 否则开始第二个 OW;
- (2) 第二个 OW 内没有收集到 PCF 固化点, 终止收集, 否则开始第三个 OW;
- (3) 第三个 OW 结束后终止收集.

选取相同整合周期 PCFs 开启的所有压缩函数中, 落入固化点数量最多的一个 OW, 计算得到一个容错的压缩校验值, 经过延迟阶段完成时钟校正过程.

PCFs 固化点的排序结果决定了启动压缩函数的个数以及收集阶段开启 OW 的数目, 保证了系统的容错性能, 最终决定了系统的时钟同步性能^[5].

4 排序的设计实现

基于上述固化点排序方法,将 8 端口 TTE 交换机固化点排序模块的设计实现划分为 3 个子模块:排序状态机、固化点存储区和存储区访问控制,模块结构如图 4^[6].

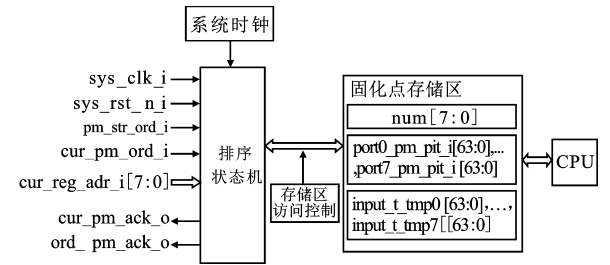


图 4 排序模块结构

表 1 为排序模块信号描述.

表 1 排序模块信号描述

信号名称	信号描述
sys_clk_i	输入,系统全局时钟
sys_rst_n_i	输入,系统复位
pm_str_ord_i	输入,启动排序标识
cur_pm_ord_i	输入,当前固化点开始插入标识
cur_reg_adr_i[7:0]	输入,存储区当前访问地址
cur_pm_ack_o	输出,当前固化点插入完成标识
ord_pm_ack_o	输出,排序完成标识

4.1 固化点存储区

固化点存储区包括:记录已排序固化点个数的寄存器 num[7:0];排序前按接收顺序存储的固化点原始序列, port0_pm_pit_i[63:0], ..., port7_pm_pit_i[63:0], 其中 port0_pm_pit_i[63:0] 表示交换控制器的端口 0 计算出的固化点;排序后递增的有序固化点序列, input_t_tmp0[63:0], ..., input_t_tmp7[63:0]. 根据排序逻辑和控制信号,改变固化点存储区的值.

4.2 排序状态机

排序状态机分为 8 个状态:空闲状态、PCF 超时控制状态、计算 PCF 固化点状态、获取已有有序固化点序列状态、插入排序状态、更新有序固化点序列状态、插入成功状态^[7]、排序成功状态. 状态转移如图 5.

4.3 存储区访问控制

存储区访问控制,根据排序状态机的状态转移产生访问固化点存储区的读写控制信号及数据等.

5 仿真验证

本文的仿真验证主要针对 TTE 网络时钟同步

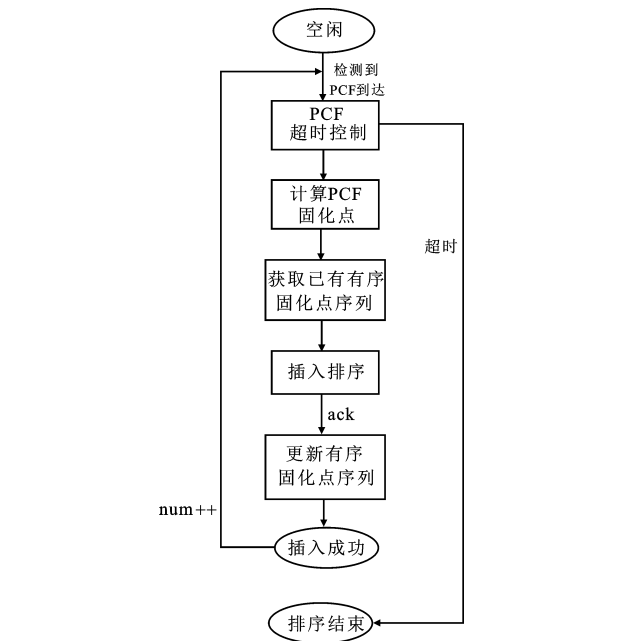


图 5 排序状态机状态转移

过程中的固化点二分插入排序. 固化点排序对相同整合周期的 PCFs 进行整合,还原 PCF 发送时刻的相对顺序,对排序完成后的有序固化点序列,执行固化点在观察窗口 OW 内的收集过程. 基于固化点二分插入排序实现的固化点排序结果如图 6 所示.

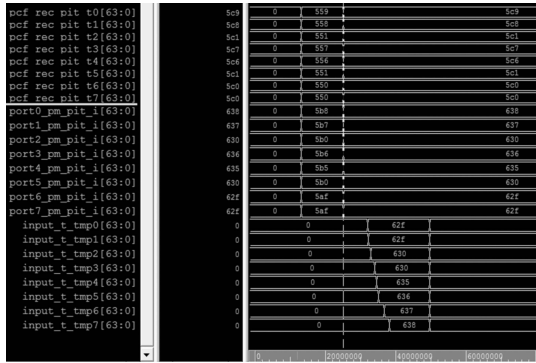


图 6 固化点排序仿真波形图

图中 pcf_rec_pit_t_i(0≤i≤7)表示 CM 节点的端口 i 接收 PCF 的时刻点, port_i_pm_pit 为端口 i 的固化点, input_t_tmp_i 为经过二分插入排序后的有序固化点序列. 端口 0~7 的接收时刻点分别为 0x5c9、0x5c8、0x5c1、0x5c7、0x5c6、0x5c1、0x5c0、0x5c0, 根据固化函数计算对应的固化点并进行排序, 得到有序固化点序列为 0x62f、0x62f、0x630、0x630、0x635、0x636、0x637、0x638, 再经过收集、计算过程得到时钟校验值, 用于修正系统时钟.

仿真结果表明,二分插入排序能有效完成固化点的排序,促使系统实现稳定的时钟同步状态,保证

TTE 网络的各项性能要求.

6 结束语

本文在 SAE AS6802 协议的基础上,提出了一种 TTE 网络时钟同步过程中的固化点二分插入排序方法,该方法能有效地对相同整合周期的 PCFs 固化点进行排序,并通过改变协议中压缩函数的收集过程,选取 PCFs 固化点最多的 OW,计算得到一个容错的压缩校验值,完成时钟修正过程.实验证明该方法能满足 TTE 网络时钟同步的性能要求.本方法已经在相关的 TTE 网络 CM 节点设计中应用,接下来将继续研究有利于促进时钟同步的其他固化点排序方法或不需要排序而直接收集的其他固化点处理方法,最终目的是提高 TTE 网络时钟同步的速度和精度.

参考文献:

- [1] SAE Technical Standard. SAE AS6802[S]. USA, SAE International. 2011-11-02.
- [2] KOPTEZH. Real-time systems design principles for distributed embedded applications[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2011.
- [3] 张栩培,贺占庄,王瑞晓,等. AFDX 交换机警管算法研

究及实现[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(1): 114-118.

- [4] 郭爱英. 时间触发以太网同步技术的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [5] 黄韬,陈长胜. TTE 时间同步协议关键算法研究和仿真分析[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(3):437-442.
- [6] Echtle K, Mohamed S. Clock synchronization issues in multi-cluster time-triggered networks [C]//Measurement, Modeling, and Evaluation of Computing Systems and Dependability and Fault Tolerance. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 39-61.
- [7] 蒋社稷,卢海涛,史志钊,等. 时间触发以太网在航空电子系统中的应用[J]. 电光与控制, 2015, 22(5): 84-88.

作者简介:

谢楠楠 女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式计算机系统结构. E-mail: nan199200@163. com.

沈绪榜 男, (1933-), 中科院院士, 博士生导师, 研究员. 研究方向为并行计算、高级计算机系统结构和片上系统设计方法学.

刘泽响 男, (1978-), 硕士生导师, 副总工程师. 研究方向为计算机系统结构和片上系统设计方法学.

卢飞 男, (1987-), 工程师. 研究方向为计算机系统结构.

(上接第 5 页)

速度、提高搜索精度和跳出局部极值的问题上取得很好的效果. 而且在算法效率方面相比于传统 PSO 算法和 EDA-PSO 算法, RSEPSO 算法表现更好. 在本算法的基础上, 下一步的研究就是如何能更好的将此算法与实际问题相结合, 解决应用方面的问题.

参考文献:

- [1] Chen S, Chiou C. Multiattribute decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets, PSO techniques and evidential reasoning methodology[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 1(6):403-409.
- [2] Kaveh A, Zolghadr A. Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints [J]. Computers & Structures, 2014, 130(1):10-21.
- [3] 石松, 陈云. 层次环形拓扑结构的动态粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(8):1-5.
- [4] 吕莉, 赵嘉, 孙辉. 具有反向学习和自适应逃逸功能的粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 34(5): 1336-1341.
- [5] 吴华丽, 吴进华, 汪秀莉. 基于动态改变惯性权值的

粒子群算法[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(10):6-8.

- [6] 朱蓉, 靳雁霞, 范卫华. 融合优质粒子分布的粒子群优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 35(3): 576-580
- [8] 冯昌利, 高雷阜. 一种结合混沌和逃逸的自适应粒子群优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(26): 35-38.
- [7] Aberbour J, Graba M, Kheldoun A. Effect of cost function and PSO topology selection on the optimum design of PID parameters for the AVR System[C]//International Conference on Electrical Engineering. China, HongKong, 2016 :1-5

作者简介:

靳雁霞 女, (1973-), 博士, 副教授. 研究方向为智能优化算法、虚拟现实技术.

张鑫(通讯作者) 男, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为智能优化算法. E-mail: 1173807438@qq. com.

薛丹 女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为智能优化算法.