

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209523

基于PTP协议的列车通信网络时间同步优化研究

程顺岭¹ 李常贤² 赵科¹(1.大连交通大学自动化与电气工程学院 大连 116028; 2.大连交通大学轨道交通装备
国家地方联合工程研究中心 大连 116028)

摘要: 目前列车通信网络支持的网络时钟协议,时间同步精度只能达到亚微秒,无法满足当前列车各节点时间同步精度的需求。针对上述问题,本文提出将精确时钟协议应用在列车通信网络中。为了实现低偏差范围情况下的高同步精度,本文在传统PI控制算法基础上,在改进的时钟伺服系统中提出多模型PI控制优化算法,设定比例系数KP和积分系数KI的阈值极限值,推导阈值极限值与PI输出补偿值的定量关系,进而补偿从节点的时间偏差。最后,以某列车通信网络场景为研究对象在OMNeT++仿真平台进行建模仿真,分析主从节点时间偏差值。与传统PI控制算法得到的时间偏差值相比,列车通信网络中各节点的时间偏差的改进值均在30 ns以内,同步偏差最低可达1.38 ns,验证了所提算法的优越性。

关键词: 列车通信网络;时间同步;精确时钟协议;时钟伺服系统;PI控制

中图分类号: TP273+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Research on time synchronization optimization of train communication network based on PTP protocol

Cheng Shunling¹ Li Changxian² Zhao Ke¹(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for rail transit equipment, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The traditional network clock protocol supported by the current train communication network can only achieve sub-microsecond time synchronization accuracy, which cannot meet the needs of the time synchronization accuracy of each node of the current train. Aiming at the above problems, this paper proposes to apply the precise clock protocol to the train communication network. In order to achieve high synchronization accuracy under the condition of low offset range, based on the traditional PI control algorithm, this paper proposes a multi-model PI control optimization algorithm in the improved clock servo system, and sets the threshold limit values of the proportional coefficient KP and the integral coefficient KI. The quantitative relationship between the threshold limit value and the PI output compensation value is derived to compensate for the offset of the slave node. Finally, taking a train communication network scene as the research object, modeling and simulation is carried out on the OMNeT++ simulation platform, and the offset value of the master and slave nodes is analyzed. Compared with the offset value obtained by the traditional PI control algorithm, the improvement value of the offset of each node in the train communication network is all within 30 ns, and the offset can be as low as 1.38 ns, which verifies the superiority of the proposed algorithm.

Keywords: train communication network; time synchronization; precision clock protocol; clock servo system; PI control

0 引言

在七纵八横的铁路网中,所依靠的列车通信基础设施建立在时钟同步的基础上,它是关于列车通信基础设施中的所有时钟节点必须达成一致的概念^[1]。由于网络时钟协

议(network clock protocol, NTP)支持的时间同步精度只能达到亚微秒,无法满足当前列车各节点时间同步精度的需求,针对上述情况,在2019年,邹昕洋等人将时间敏感网络(time sensitive network, TSN)技术应用在列车中,其遵循的精确时钟协议(precision clock protocol, PTP)实现了

列车主从节点之间纳秒级的时间同步精度^[2]。同一年, Agarwal 等^[3]也提供了一种可行的代替 GPS 时间同步技术的方案—TSN 技术,实验证明,在高消息速率下,TSN 的时间偏差获得了令人满意的结果。这进一步证明 PTP 协议较之 NTP 协议有很大的优势。在提出的减小时间偏差方法方面,目前国内外学者主要采用时钟伺服系统中的 PI/PID 控制器,能够实现时间调谐、设备控制以及参数调节等功能,其广泛应用于现代工业等领域^[4]。2013 年, Xu 等^[5]基于 PTP 协议设计了一种新的时间同步方法,采用传统 PI 时钟伺服来降低级联实时网络中同步偏差的增长率。实验结果表明,测量的从时钟的偏差峰值仅为 59.37 ns,显著降低了同步偏差。2015 年, Fan 等^[6]设计了一个可变积分 PID 控制器优化 PTP 协议中同步消息的发送机制,以此调整时间偏差,研究结果表明,与积分固定 (fixed integral, FI) 方法相比,主从时钟时间偏差收敛速度显著提高。

上述同步方法在列车通信应用领域展开的研究较少,虽然文献 [2] 在列车通信网络 (train communication network, TCN) 中实现了纳秒级的同步精度,但是时间偏差还是较大。同样,文献 [5] 提出的基于传统 PI 时钟伺服过于简单,且易于实现,同步性能可以进一步提高。文献 [6] 仅仅研究了从时钟偏斜整体收敛性,不能得出主从时钟具体的时间偏差精确值。而且加入微分控制会带来高频干扰,使控制器输出中产生明显的“突跳”,稳定性下降^[7]。因此,为了实现更精确、更小偏差的时间同步,本文在传统 PI 控制器基础上,提出三种不同模型下的 PI 控制优化算法,通过阈值极限法补偿主从节点时间偏差,保证从节点同主节点的时间精确性。通过比较 3 种模型算法,选则一种最优模型算法将其应用在列车通信网络系统中,保证列车从节点通信的稳定性。在算法空间复杂度和稳定性方面较之传统算法更具有优越性。最后利用 OMNeT++ 仿真软件对优化模型算法进行仿真验证。

1 精确时钟同步

本文使用用于网络测量和控制系统的 IEEE1588 (institute of electrical and electronics engineers) 标准,该标准定义了一种网络协议—PTP 协议^[8]。PTP 协议是一种基于数据包的双向通信协议,可实现网络分布式系统中设备实时时钟的精确同步,通常应用在以太网网络上^[9]。

PTP 协议定义了 3 种时钟类型,包括普通时钟 (ordinary clock, OC)、边界时钟 (boundary clock, BC)、透明时钟 (transparent clock, TC)^[10]。这些时钟被组织为主-从同步层次结构,主-从同步层次结构的最顶端为最高级时钟,它决定了整个系统的参考时间,通过使用时间信息的从时钟交换 PTP 事件报文来实现同步,以将从时钟的时钟调整到层次结构中主时钟的时间。在一个系统中, OC 可以作为最高级时钟,或者作为主从层次结构内的从时钟, BC、TC 像普通的交换机一样,负责转发传输的报文。

PTP 协议定义事件报文和通用报文,事件报文包括 Sync 报文、Pdelay_Req 报文、Pdelay_Resp 报文;通用报文包括 Announce 报文、Follow_Up 报文等^[10]。其中事件报文是计时报文,在发送和接收时产生精确时间戳。本文将上述报文用于产生并传递时间信息,并采用对等延时机制测量链路延时和时间偏差。对等延时机制如图 1 所示。

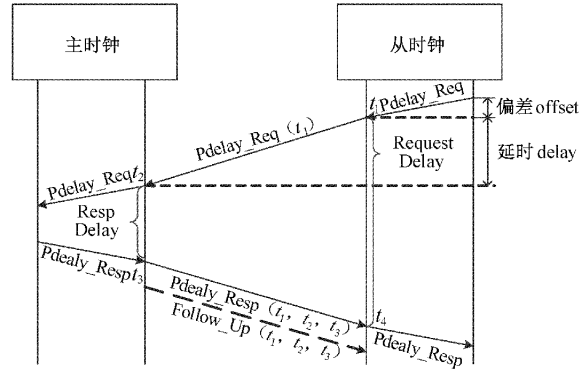


图 1 对等延时机制

报文交换模式如下所述:

- 1) 请求端,主时钟在 t_1 时刻向从时钟发送 Pdelay_Req 报文,标记时间戳为 t_1 。
- 2) 响应端,从时钟接收到来自主时钟的 Pdelay_Req 报文,标记时间戳为 t_2 。
- 3) 响应端,接收到 Pdelay_Req 报文后,从时钟会发送 Pdelay_Resp 报文给主时钟,并标记时间戳为 t_3 。
- 4) 请求端,主时钟接收到来自从时钟的 Pdelay_Resp 报文,标记时间戳为 t_4 。

在报文交换结束时,从时钟拥有 4 个时间戳,即 t_1, t_2, t_3, t_4 。根据这些时间戳可以计算出主时钟和从时钟之间的路径延时 (delay) 和时间偏差 (offset)。式 (1)~(4) 为计算过程。假设主时钟到从时钟的传输时间与从时钟到主时钟的时间一致。

由式 (1)~(2):

$$t_2 - t_1 = offset + delay \tag{1}$$

$$t_4 - t_3 = offset - delay \tag{2}$$

可得出:

$$delay = [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)] / 2 \tag{3}$$

$$offset = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2 \tag{4}$$

2 精确时钟同步协议的改进

2.1 时钟伺服系统

在 PTP 协议中,时钟伺服系统是时间同步的核心^[11]。时间偏差的补偿依赖与该系统。本文改进的时钟伺服系统如图 2 所示,由于传统 PI 控制器抗干扰性较弱,本文在 PI 控制器前,加入卡尔曼滤波器来进一步提高同步性能。

2.2 PI 控制器设计

P、I 的协同作用,兼顾了快速、精确和稳定的需求^[12],

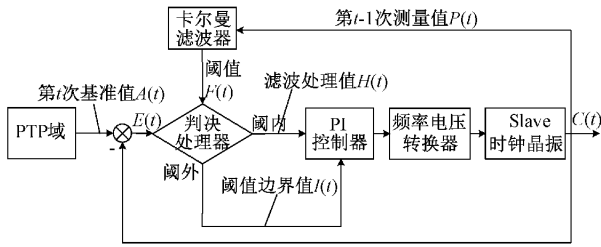


图2 改进时钟伺服系统

使得运转良好的时钟伺服系统成为可能。本文提出的多模型PI控制器结构如图3所示。工作原理是，给定值为主时钟的基准时间，实际输出值为从时钟的标准时间，控制偏差为时间偏差 e_t ，为控制量，主时钟与从时钟的时间偏差经过多模型PI控制器，分别通过CONSTANT模型、SGLLIM模型、DBLLIM模型3种模型算法得出3个时间偏差补偿值，从时钟利用补偿值进行时间的调整。由于系统是非理想系统，存在噪声等干扰，因此在多模型PI控制器前加一个故障检测器，在干扰过大时进行故障诊断^[13-14]。本文将干扰值量化为Interfere，为变量。

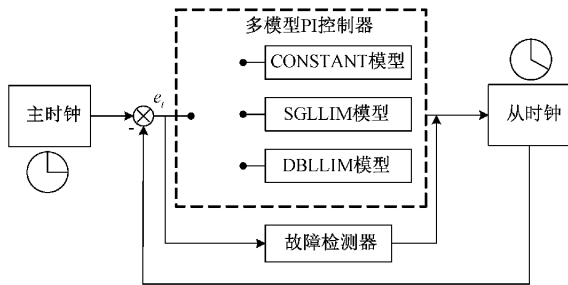


图3 多模型PI控制器结构

2.3 PI控制算法设计

本文PI参数整定采用工程整定方法^[15]，即通过多次对 KP 、 KI 数据进行分析，选出一组最优的 KP 、 KI 调整过大或过小的时间偏差。PI控制器调节从时钟有时间间隔，其时间间隔为时间偏差的采样间隔，即每当输入一个时间偏差到PI控制器中，PI控制器就会进行一次偏差调节，比例调节对过大的时间偏差进行调节，积分调节对过小的时间偏差进行调节。由于时间偏差过大会引起列车通信网络各节点的时间失调，导致信号中断、信号延迟等影响，时间偏差过小可能会出现负增偏差，这同样会引发故障。介于上述情况，本文提出3种模型下的PI控制优化算法，3种模型分别为CONSTANT模型、SGLLIM模型、DBLLIM模型，分别对应3种 K 值算法，在本文中， K 值代表 KP 、 KI 的统称。

1) CONSTANT模型算法

此模型算法采用常量PI控制，PI参数需要经过多次实验选择。

2) SGLLIM模型算法

此模型对于 KP 、 KI 两个系数是独立的， K 值有单极

限值，并且为强制极限，在该模型算法中为上极限，在这里，我们定义 KP （同理 KI ）：

$$KP = S_{SGLLIM} \cdot G(t) \quad (5)$$

式(5)、(6)中， S_{SGLLIM} 表示SGLLIM模型算法中时间缩放程度，跟时间变量 t 有关。 $G(t)$ 表示指数函数，其表达式为：

$$G(t) = D(t)^Y \quad (6)$$

式(6)中， Y 为一个常数量， $D(t)$ 为时间函数， $t_{syncinterval}$ 为同步时间间隔。 $D(t)$ 表达式为：

$$D(t) = 2t_{syncinterval} \quad (7)$$

结合式(5)~(7)，可以得出SGLLIM模型算法的 K 值的总表达式，如式(8)所示。

$$K = S_{SGLLIM} \cdot 2t_{syncinterval}^Y \quad (8)$$

在该算法中，假设存在强制极限，定义上极限值为 K_L ，其表达式为：

$$K_L = M_N / D(t) \quad (9)$$

由于上极限不能为无穷大， M_N 为所取值的最大范数。式(9)中的分母为除0以外的任意实数。

最后比较 K 和 K_L 的大小，如下：

(1)如果 $K \geq K_L$ ，那么 $K = K_L$ 。

(2)如果 $K < K_L$ ，那么取 K 值。

最后，使用 K 值给出 KP 、 KI 值。

3) DBLLIM模型算法

同理SGLLIM模型算法，该模型算法的 KP 、 KI 相对独立，并且 K 值有双极限值，在这里，定义 KP （同理 KI ）。

$$KP = S_{DBLLIM} \cdot B(t) \quad (10)$$

式(10)中， S_{DBLLIM} 表示DBLLIM模型算法的时间缩放程度，跟时间变量 t 有关。 $B(t)$ 表示指数函数，其表达式为：

$$B(t) = B^{D(t)} \quad (11)$$

式(11)、(12)中， B 为一个常数量， $D(t)$ 为时间函数， $t_{syncinterval}$ 为同步间隔时间。 $D(t)$ 表达式为：

$$D(t) = 2t_{syncinterval} \quad (12)$$

结合式(10)~(12)，可以得出DBLLIM模型算法的 K 值的总表达式，如式(13)所示。

$$K = S_{DBLLIM} \cdot B^{2t_{syncinterval}} \quad (13)$$

由于 K 值存在阈值，即双极限值，将上极限定义为 K_{max} ，将下极限定义为 K_{min} ， K_{max} 、 K_{min} 不能为0，分两种情况进行讨论。

对于上极限：

(1)如果 $K > K_{max}$ ，那么 $K = K_{max}$ 。

(2)如果 $K_{min} < K < K_{max}$ ，那么取 K 值。

对于下极限：

(3)如果 $K \leq K_{min}$ ，那么 $K = K_{min}$ 。

(4)如果 $K_{min} < K < K_{max}$ ，那么取 K 值。

最后，使用 K 值给出 K_{max} 、 K_{min} 的值。

基于上述3种模型算法，将每一种模型算法中的 K 值

带入下面的计算当中,求取时间补偿值 $T(t)$,调整时间偏差。下面对时间补偿值 $T(t)$ 进行算法研究。

改进的时钟伺服系统如图 2 所示,PI 控制器的输入量分两种情况讨论:(1)如果经判决处理器的输出量是测量偏差值,此值就是 PI 控制器的输入值;(2)如果经判决处理器的输出量是阈值边界值,此值就是 PI 控制器的输入值。在本文中,我们将阈值边界值上沿设为 α ,将阈值边界值下沿设为 β ,推导过程如下。

当输入量进入 PI 控制器后,对此输入值进行比例积分调节。首先进行初始化和单位换算,将秒级单位转化成纳秒级,然后计算比例因子 P 和积分因子 I ,表达式如下:

$$P = KP \cdot H(t) \tag{14}$$

$$I = KI \cdot H(t) \tag{15}$$

或

$$P = KP \cdot I(t) \tag{16}$$

$$I = KI \cdot I(t) \tag{17}$$

式(14)~(17)中, $H(t)$ 和 $I(t)$ 为输入量,分别代表测量偏差值、阈值边界值,单位为 ns。

在计算 P 和 I 之前,先设置 KP 、 KI 系数得出输出量,即经过 PI 控制器后的时间补偿值 $T(t)$,如式(18)所示。

$$T(t) = P + I + Interfere \tag{18}$$

式(18)中, $Interfere$ 表示干扰因子,如果存在干扰,我们需要将干扰量考虑在内。下面对得到的 $T(t)$ 进行验证,我们定义 $T(t)$ 存在阈值,分 3 种情况进行讨论:

(1)如果 $T(t) > \alpha$,那么 $T(t) = \alpha$ 。

(2)如果 $T(t) < \beta$,那么 $T(t) = \beta$ 。

(3)去除上面两种情况, $Interfere = I + Interfere$ 。

所以最后得到的时间补偿值,如式(19)所示。

$$T(t) = P + 2I + Interfere \tag{19}$$

综上所述,时间补偿值 $T(t)$ 即为 PI 控制器的输出量。将该输出量经过时钟伺服系统的其他模块传送给从时钟,进行时间偏差的校正。

上述推导的 PI 控制器操作流程如图 4 所示。

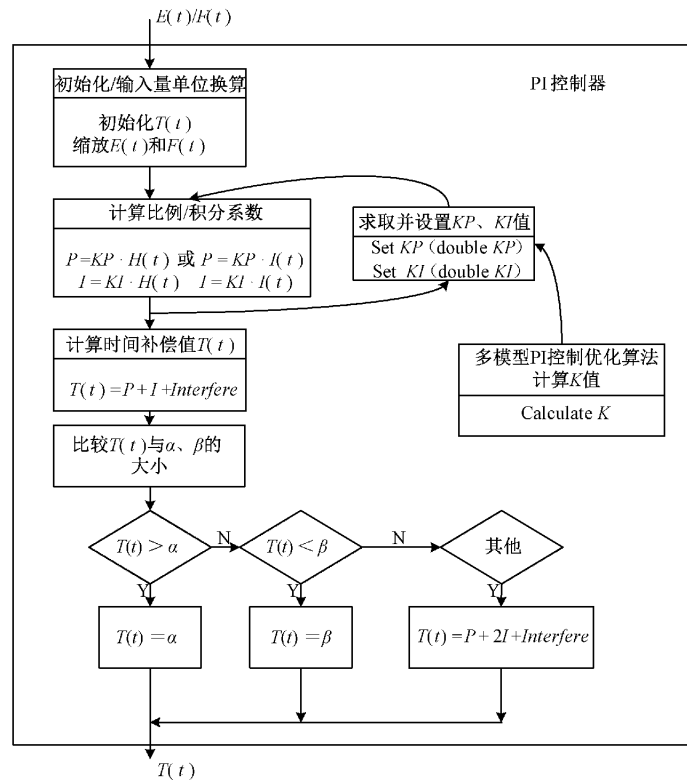


图 4 PI 控制器操作流程

3 仿真验证与分析

本文建立列车通信网络系统,通过 OMNeT++ (objective modular network testbed in C++)^[16] 仿真平台进行建模分析,与传统 PI 控制算法作比较,验证第 2 章提出的 CONSTANT、SGLLIM、DBLLIM 模型 3 种模型算法。

3.1 列车通信网络场景

IEC61375-1 协议规定列车通信网络将列车骨干节点 (train backbone node, TBN) 分为列车骨干网络和该组成网络的组成网网络两部分^[17]。如图 5 所示,一共分为两层,上层为列车级网络拓扑,下层为组成网网络拓扑。本文将 PTP 协议引入列车通信网络,PTP 协议提供一种机制,即所有节点均可被模型化为包含一个实时时钟,因此,

本文研究的研究内容是基于列车通信网络，将参与节点的时钟同步到高精度。我们在列车级的上层加入一个主节点时钟，用于提供整个列车通信网络的基准时间。

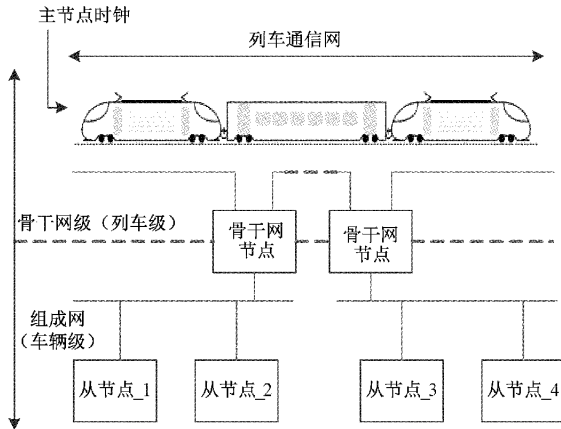


图 5 列车通信网络

3.2 网络建模仿真

本文利用 OMNeT++ 仿真平台的时钟模块建立列车通信网络。整个拓扑为嵌套层级结构，如图 6~8 所示，其中图 6 的顶层拓扑称之为系统模块，图 7 的中层拓扑称之为子模块，图 8 的底层拓扑称之为子子模块。每个时钟模块都有一个自身的子模块和子子模块。

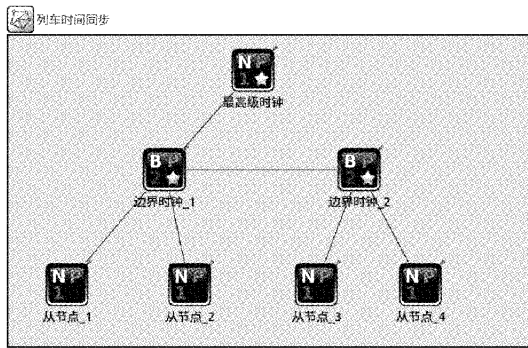


图 6 系统模块

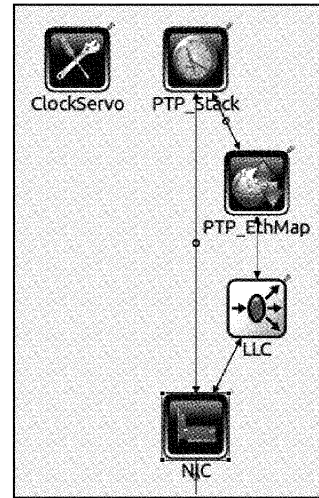


图 7 子模块

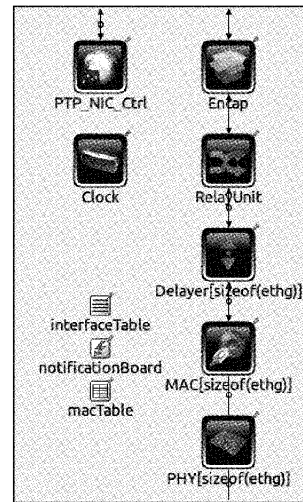


图 8 子子模块

3.3 仿真结果分析

1) 传统 PI 控制算法

传统 PI 控制算法通过仿真得出主从节点的偏差结果如图 9 所示。

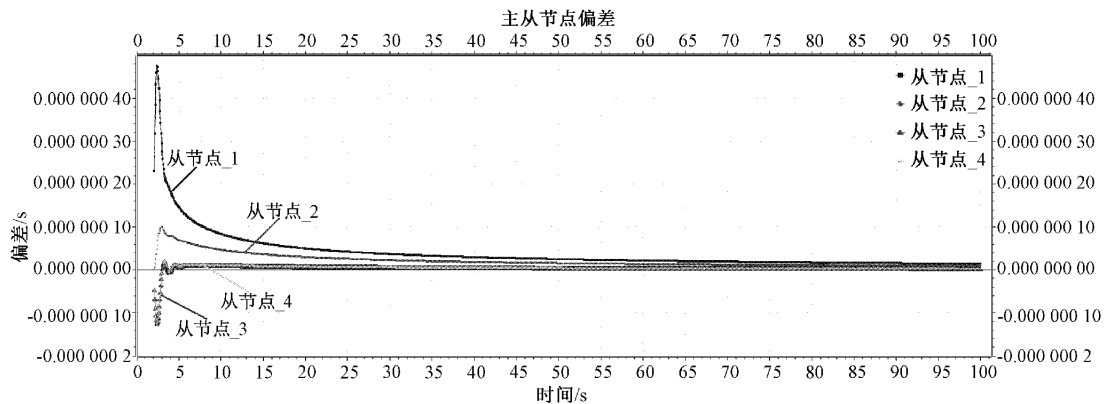


图 9 传统 PI 控制算法的主从节点偏差

如表 1 所示,从节点_1~从节点_4 的时间偏差分别为 31.66、22.24、20.18、21.17 ns,下面根据传统 PI 算法,仿真并计算 3 种模型算法的改进值。

2)CONSTANT 模型算法

常量模型中,PI 参数经多次试验选择为 $KP = 5$ 、 $KI = 0.5$,得到的从节点的偏差结果如图 10 所示。

表 1 传统 PI 控制算法下的主从节点偏差

模块名称	原始值/s
从节点_1	3.166×10^{-8}
从节点_2	2.224×10^{-8}
从节点_3	2.018×10^{-8}
从节点_4	2.117×10^{-8}

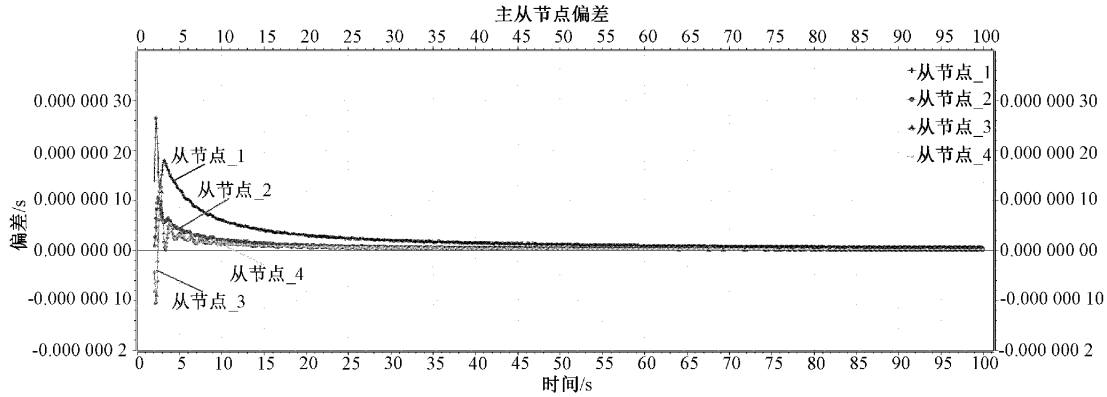


图 10 CONSTANT 模型算法下的主从节点偏差

表 2 CONSTANT 模型算法下的主从节点偏差

模块名称	主从偏差/s
从节点_1	1.093×10^{-8}
从节点_2	9.699×10^{-9}
从节点_3	9.630×10^{-9}
从节点_4	9.688×10^{-9}

度提高。

表 3 对比主从节点偏差

模块名称	原始值/s	当前值/s	改进值/ns
从节点_1	3.166×10^{-8}	1.093×10^{-8}	20.73
从节点_2	2.224×10^{-8}	9.699×10^{-9}	12.54
从节点_3	2.018×10^{-8}	9.630×10^{-9}	10.55
从节点_4	2.117×10^{-8}	9.688×10^{-9}	11.48

CONSTANT 模型算法下的主从节点偏差如表 2 所示。对比主从节点偏差如表 3 所示,经过 CONSTANT 模型算法对时间偏差的校正,从节点_1~从节点_4 的偏差改进值分别为 20.73、12.54、10.55、11.48 ns,由于各个从节点的状态不一样,所以它们在时间上有微小的波动,但整体波动不大。通过 CONSTANT 模型的 PI 调整,时间精

3)DBLLIM 模型算法

此模型对于 KP 、 KI 系数来说相对独立,并且 K 值有双极限值,得到的主从节点时间偏差结果,如图 11 所示。

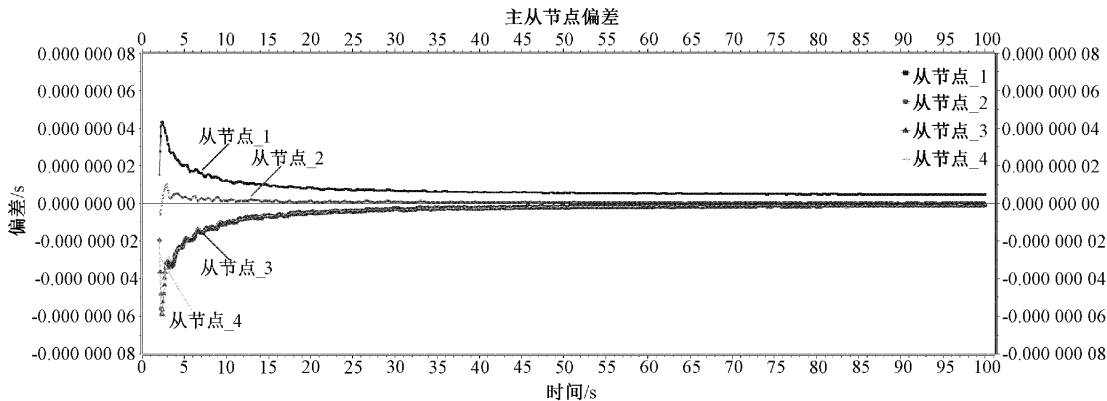


图 11 DBLLIM 模型算法下的主从节点偏差

时钟时间的正负代表时钟时间相对于基准时间的快慢,DBLLIM 模型算法下的主从节点偏差如表 4 所示。对比主从节点偏差如表 5 所示,从节点_1~从节点_4 的偏差改进值分别为 25.05、17.46、12.48、13.59 ns,时间精度得

到明显提升。

4)SGLLIM 模型算法

此模型对于 KP 、 KI 两个系数来说相对独立,并且 K 值有单极限值,并且为强制极限,在此模型中,极限为上极

限,得到的主从节点时间偏差结果如图12所示。

表4 DBLLIM模型算法下的主从节点偏差

模块名称	主从偏差/s
从节点_1	6.607×10^{-9}
从节点_2	4.776×10^{-9}
从节点_3	-7.698×10^{-9}
从节点_4	-7.557×10^{-9}

表5 对比主从节点偏差

模块名称	原始值/s	当前值/s	改进值/ns
从节点_1	3.166×10^{-8}	6.607×10^{-9}	25.05
从节点_2	2.224×10^{-8}	4.776×10^{-9}	17.46
从节点_3	2.018×10^{-8}	-7.698×10^{-9}	12.48
从节点_4	2.117×10^{-8}	-7.557×10^{-9}	13.59

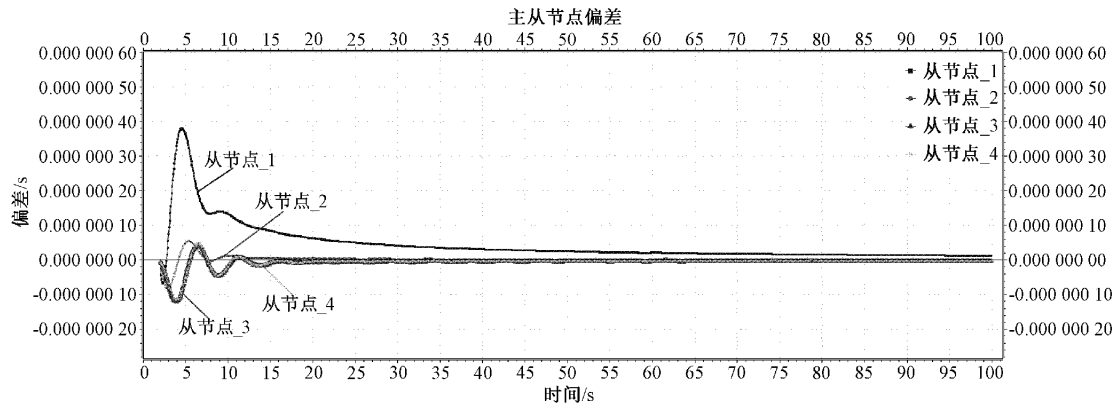


图12 SGLLIM模型算法下的主从节点偏差

表6 SGLLIM模型算法下的主从节点偏差

模块名称	主从偏差/s
从节点_1	2.727×10^{-9}
从节点_2	1.380×10^{-9}
从节点_3	-2.043×10^{-9}
从节点_4	-1.980×10^{-9}

表8 改进后三种模型算法下的主从节点偏差

模块名称	CONSTANT	DBLLIM	SGLLIM
	模型偏差/s	模型偏差/s	模型偏差/s
从节点_1	1.093×10^{-8}	6.607×10^{-9}	2.727×10^{-9}
从节点_2	9.699×10^{-9}	4.776×10^{-9}	1.380×10^{-9}
从节点_3	9.630×10^{-9}	7.698×10^{-9}	2.043×10^{-9}
从节点_4	9.688×10^{-9}	7.557×10^{-9}	1.980×10^{-9}

SGLLIM模型算法下的主从节点偏差如表6所示。对比主从节点偏差如表7所示,从节点_1~从节点_4的偏差改进值分别为28.93、20.86、18.14、19.19 ns,时间精度得到极大改善。

表7 对比主从节点偏差

模块名称	原始值/s	当前值/s	改进值/ns
从节点_1	3.166×10^{-8}	2.727×10^{-9}	28.93
从节点_2	2.224×10^{-8}	1.380×10^{-9}	20.86
从节点_3	2.018×10^{-8}	-2.043×10^{-9}	18.14
从节点_4	2.117×10^{-8}	-1.980×10^{-9}	19.19

改进后3种模型算法下的主从节点偏差如表8所示,无论使用哪一种模型算法,主从节点的时间偏差值都有所改进,同时,我们也可以看出SGLLIM模型算法下的时间同步偏差最小,最低可达1.38 ns。这表明单极限K值可以最大化的减小时间偏差。将SGLLIM模型算法应用在列车通信网络系统中,能够最大化的保证列车从节点通信的稳定性。

4 结 论

本文指出网络时钟协议支持的时间同步精度不足之处,提出TSN技术应用在列车通信网络中。在传统PI控制算法基础上,结合通信过程中的受干扰因素,提出多模型PI控制优化算法。最后,以某列车通信网络场景为研究对象,利用OMNeT++仿真软件进行建模仿真,分析各节点的时间偏差值,验证所提算法的优越性。多模型PI控制优化算法下的列车通信节点的时间偏差的改进值均低于30 ns,同步偏差最低可达1.38 ns。验证了优化算法的精确性。在未来进一步的工作中,我们会逐步优化算法,降低算法的时间复杂度,便于更契合列车通信网络。并且我们将继续开发平台,与带有TSN功能的设备互联来进一步检验算法。

参考文献

- [1] 张旭. 基于时间敏感网络的列车以太网通信技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2021, DOI:10.27369/d.cnki.gtdky.2021.000069.

- [2] 邹昕洋,张友鹏.基于 PTP 协议的铁路时间同步网络同步技术研究[J].铁道标准设计,2019,63(5):133-137.
- [3] AGARWAL T, NIKNEJAD P, BARZEGARAN M R, et al. Multi-level time-sensitive networking(TSN) using the data distribution services (DDS) for synchronized three-phase measurement data transfer [J]. IEEE Access, 2019, PP(99): 1-1.
- [4] 田雪松,张鹏.基于 SOA 整定的 PID 控制器在稳定平台中的应用[J].国外电子测量技术,2021,40(8):115-119.
- [5] XU X, XIONG Z H. A new time synchronization method for reducing quantization error accumulation over real-time networks: Theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1659-1669.
- [6] FAN Z, LIU Y, LI H, et al. A servo design for slave clock in IEEE 1588 synchronization networks [J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(4): 615-624.
- [7] 张波. PID 算法在控制系统中的应用[J].信息记录材料,2021,22(7):197-199.
- [8] 于泽人,王欣立.列车以太网通信与时间敏感网络技术标准化探索[J].中国标准化,2021(13):147-150.
- [9] JÜRGEN SCHEURING, BERNHARD U. Time-sensitive networking in the automotive industry[J]. ATZelectronics worldwide,2020, 15(9): 54-58.
- [10] A precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems: IEEE 1588 INT 1-10-2009 [S]. 美国电气电子工程师学会,2019.
- [11] PUTTNIES H, DANIELIS P, SHARIF A R, et al. Estimators for time synchronization—survey [J]. Analysis and Outlook, 2020, 1(2): 398-435.
- [12] 周向阳,时延君.惯性稳定平台单神经元/PID 自适应复合控制与参数优化[J].仪器仪表学报,2019,40(11):189-196.
- [13] 汪勉.基于网络演算的网络故障检测方法研究[J].电子测量技术,2020,43(19):132-137.
- [14] 何亚屏,方攸同,吴丽然,等.地面自动过分相测量回路故障诊断及容错控制[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):75-81.
- [15] 王雨佳.一类自适应 PD/PI 控制器设计及其应用[D].北京:北京交通大学,2019, DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2019.001508.
- [16] LE C, QIAO D. Evaluation of real-time ethernet with time synchronization and time-aware shaper using OMNeT++[C]. DOI:10.1109/ELTECH.2019.8839517.
- [17] SCHIFERS C, HANS G. IEC 61375-1 and UIC 556-international standards for train communication[C]. DOI:10.1109/VETECS.2000.851393.

作者简介

程顺岭,硕士研究生,主要研究方向为列车网络控制,时间敏感网络及列车通信网络仿真等。

E-mail:csl20202100@163.com

李常贤,工学博士,教授,主要研究方向为列车网络控制技术、列车与变流器电磁兼容技术。

E-mail:lichangxianzju@163.com

赵科,工学硕士,副教授,主要研究方向为列车网络控制技术,智能控制。

E-mail:zhaoke@djtu.edu.cn