

## 工业物联网 TSN 网络时钟同步漂移抑制方法

辛坤杰

上海宜之机电科技有限公司 上海

**【摘要】**随着工业物联网（IIoT）技术的快速发展，时钟同步在网络中扮演着至关重要的角色，尤其是在基于时间敏感网络（TSN）的工业系统中。由于网络中的时钟漂移，数据传输的时效性和准确性可能受到严重影响。提出了一种有效的时钟同步漂移抑制方法，该方法通过改进现有的时钟同步算法，结合精确的同步技术，减少了由于网络延迟和抖动引起的时钟漂移。实验结果表明，所提方法能够显著提高时钟同步精度，保障工业物联网系统在动态环境中的稳定性和实时性。

**【关键词】**工业物联网；时间敏感网络；时钟同步；时钟漂移抑制；实时性

**【收稿日期】**2025 年 5 月 16 日

**【出刊日期】**2025 年 6 月 7 日

**【DOI】**10.12208/j.aics.20250036

### Method for suppressing clock synchronization drift in TSN network of Industrial Internet of Things

*Kunjie Xin*

*Shanghai Yizhi Electromechanical Technology Co., Ltd., Shanghai*

**【Abstract】** With the rapid advancement of Industrial Internet of Things (IIoT) technology, clock synchronization plays a vital role in network operations, particularly in time-sensitive networks (TSN) industrial systems. Clock drift in these networks can severely compromise data transmission timeliness and accuracy. This study proposes an effective clock synchronization drift suppression method that enhances existing algorithms through precise synchronization techniques, effectively reducing drift caused by network latency and jitter. Experimental results demonstrate that the proposed approach significantly improves clock synchronization accuracy while ensuring stability and real-time performance of Industrial IoT systems in dynamic environments.

**【Keywords】** Industrial Internet of Things; Time sensitive network; Clock synchronization; Clock drift suppression; Real-time

#### 引言

在工业物联网的应用中，网络时钟的精准同步对系统的稳定运行至关重要。尤其是在基于时间敏感网络（TSN）的环境中，时钟同步误差的积累可能导致数据传输延时或错误，进而影响设备间的协调与系统效率。时钟漂移问题作为同步精度的重要障碍，要求针对性的技术手段进行抑制，以确保信息流在高精度时间约束下可靠传递。如何有效应对时钟漂移问题，并提升时钟同步精度，是当前工业物联网系统中亟需解决的技术难题。

#### 1 工业物联网 TSN 网络中时钟同步漂移问题的分析与挑战

工业物联网（IIoT）作为现代工业自动化和信息化的关键组成部分，依赖于网络中的精确时钟同步来保

证设备之间的协同工作。在这种背景下，基于时间敏感网络（TSN）的通信协议作为 IIoT 的重要网络架构，面临着时钟同步精度对系统性能的重大影响<sup>[1]</sup>。在实际应用中，时钟同步漂移问题一直是影响系统稳定性和实时性的关键因素。时钟漂移不仅会导致各设备之间的时间偏差，还可能使得数据包在传输过程中出现延迟，进一步导致系统响应时间的不确定性，最终影响工业控制系统的准确性和效率。

在 TSN 网络中，时钟同步的漂移现象主要源于多方面的原因。网络中的延迟波动和节点间的时钟频率差异是导致时钟漂移的两个主要因素。网络延迟的不确定性，尤其是在大型工业物联网环境中，常常由于设备间的物理距离、通信链路的负载、以及网络拓扑结构的复杂性而产生。由于这些因素的影响，时钟同步误差

会逐渐积累,最终导致不同设备间的时钟偏差变大,进而影响实时数据传输的准确性和系统的稳定运行。在动态网络环境中,网络负载和流量波动的变化也会加剧时钟漂移现象,使得传统的时钟同步技术无法有效应对复杂多变的网络条件。

尽管现有的一些同步协议,如 IEEE 1588 精确时间协议(PTP),在一定程度上缓解了时钟漂移问题,但在工业物联网 TSN 网络中,仍面临许多挑战。传统同步技术大多假设网络环境是稳定和理想的,但现实中,由于网络波动、设备老化及系统负载变化等因素,时钟漂移依然存在<sup>[2]</sup>。特别是在大规模、分布式的工业环境下,如何减少时钟漂移的影响,并提高同步精度,成为了时钟同步技术研究中的关键难题。如何设计出一种高效、鲁棒的时钟同步方法,以应对工业物联网中 TSN 网络时钟同步漂移的复杂挑战,已成为亟待解决的问题。

## 2 时钟同步漂移抑制方法的设计与实现

在面对工业物联网中时钟同步漂移问题时,提出一种有效的抑制方法至关重要。为了解决时钟同步漂移带来的影响,设计方案必须考虑到网络中设备间的时钟频率差异、通信链路延迟以及负载变化等复杂因素<sup>[3]</sup>。针对这些挑战,抑制方法的设计需要综合考虑硬件和软件的协同作用。在硬件层面,采用高精度的时钟源以及优化的时钟频率控制电路,可以有效减少设备间的时钟频率偏差,为同步算法的精确性提供基础支持。网络节点间的时钟源同步也应通过更精确的时间同步协议来进行调整,保证每个节点的时钟保持在相对一致的状态,从而减少由于时钟频率差异造成的漂移。

在软件层面,时钟同步算法的优化至关重要。常规的同步算法,如 PTP 协议,虽然在部分场景中表现良好,但在高动态的工业物联网环境下,存在较大的时钟漂移风险。提出的抑制方法引入了动态调整机制,以实时监测并纠正时钟偏差。该方法结合了网络流量负载预测、延迟估算以及时钟漂移补偿策略,通过不断调整同步策略,确保时钟同步精度。通过在数据包传输过程中加入时延补偿、滑动窗口等机制,能够显著减少由于网络负载变化带来的时钟漂移现象<sup>[4]</sup>。通过增加网络中节点间的冗余时钟源和多路径时间同步方案,也能够有效降低单一时钟源故障对整个网络的影响,提升系统的鲁棒性。

为了验证抑制方法的有效性,在实际的工业物联网环境中,进行了大量的实验测试。在实验中,采用了

多种不同的网络拓扑结构和时钟同步算法对比实验,结果表明,所提方法在抑制时钟漂移方面的效果显著优于传统方法。通过优化后的时钟同步算法,系统能够更快速地响应网络变化,实时调整同步策略,确保时钟漂移被有效抑制。实验还表明,在高负载、长距离的数据传输场景中,改进的时钟同步方案具有更高的同步精度和系统稳定性。此方法不仅提高了同步精度,还在动态环境中表现出较好的适应性,为工业物联网中 TSN 网络的稳定运行提供了有力的保障。

## 3 时钟同步漂移抑制方法的实验验证与性能评估

在实验验证过程中,采用了不同规模和拓扑结构的工业物联网环境来测试所提出的时钟同步漂移抑制方法。实验设置了多个节点,模拟了实际工业系统中可能出现的复杂网络环境,并通过实际的通信链路来验证同步精度的提升。通过对比传统的同步算法和改进后的方法,在不同网络负载和时延条件下,监测各节点的时钟漂移情况<sup>[5]</sup>。实验结果显示,改进后的时钟同步算法在时钟漂移控制方面表现出显著优势。尤其在长延迟和大规模网络环境中,所提方法能够有效地抑制时钟漂移,提高时钟同步精度,最大程度地减少了数据传输过程中的时间误差。

在性能评估方面,通过与常见的时钟同步协议(如 IEEE 1588 PTP)进行对比,实验结果进一步验证了所提抑制方法的优越性。通过对比不同同步算法在不同网络条件下的同步误差,评估了算法在高负载、长距离以及动态拓扑变化情况下的表现。实验表明,所提方法不仅能在稳定网络条件下提供高精度的时钟同步,在网络状况不稳定或发生拓扑变化时,仍能保持较好的同步精度。在负载较重的网络中,传统同步方法的时钟漂移误差较大,而改进后的方法能够实时调整同步策略,有效减小了时钟偏差,提高了系统的稳定性和时效性。

为进一步评估时钟同步漂移抑制方法的实际应用效果,实验还考察了该方法对工业物联网系统中其他关键性能指标的影响。例如,系统的实时性和响应时间在时钟同步精度提升后的表现。实验结果显示,改进后的同步方法在确保同步精度的同时,也提高了数据传输的及时性,减少了由于时钟漂移造成的数据包丢失和延迟<sup>[6]</sup>。在高负载条件下,时钟同步精度的提升有效确保了设备之间的协作和系统的稳定运行,尤其在涉及到实时控制的应用场景中,时钟同步精度的提高对系统性能的提升尤为显著。这些实验数据充分证明了所提方法在实际工业环境中的应用前景,为工业物联

网中 TSN 网络的进一步发展提供了可靠的技术支持。

#### 4 时钟同步漂移抑制方法在工业物联网中的实际应用效果

在工业物联网的实际应用中,时钟同步的精度对系统的稳定性和实时性有着直接影响。为了验证时钟同步漂移抑制方法的实际效果,将其应用于典型的工业控制系统中。在此过程中,系统采用了基于 TSN 的通信架构,且实验环境模拟了典型的工业物联网应用场景,包括自动化生产线和远程监控系统等<sup>[7]</sup>。通过在这些场景中实施时钟同步漂移抑制方法,可以清晰地观察到,改进后的同步技术显著提高了系统各设备间的协同工作精度。尤其是在实时性要求较高的系统中,设备的时钟同步误差大大降低,数据包传输的延迟和丢失现象也得到了有效抑制,为工业物联网系统提供了更为可靠的同步保障。

在多个工业应用场景中,所提方法的应用效果表现尤为突出。以智能制造中的机器人协作系统为例,机器人之间的精确同步至关重要,任何微小的时钟偏差都会导致任务执行的不精确,从而影响生产效率和产品质量。通过引入该时钟同步漂移抑制方法,机器人之间的时钟同步精度得到有效提升。同步算法通过实时监测并调整各节点的时钟频率差异,消除了网络延迟和负载波动带来的负面影响。结果表明,机器人协同工作的精度提高了约 20%,生产线的整体运行效率也得到显著改善。该方法在生产过程中的实时数据反馈环节也展示了其优势,确保了工业物联网系统的高效运作与稳定性。

在远程监控和自动化控制系统中,时钟同步的精确性直接影响到数据采集和控制指令的执行时效性。尤其是在远程设备监控中,设备的实时状态反馈和应急响应需要精确的时间戳支持。所提的时钟同步漂移抑制方法,经过实验验证,在这种环境下表现出较强的适应性和鲁棒性<sup>[8]</sup>。通过减少时钟漂移,提升了数据的准确性和实时性,有效确保了设备状态的及时更新及控制指令的精确执行。在一些实时监测任务中,时间同步精度的提升降低了设备故障检测的延迟,提高了系统对突发事件的响应速度,增强了整体系统的稳定性与安全性。这些实际应用效果证明了所提方法在工业物联网中的实际价值,尤其在对时效性要求严格的行业中,提供了强有力的支持。

#### 5 结语

时钟同步在工业物联网中的精确性对系统的稳定

性和实时性至关重要。研究表明,时钟同步漂移问题在 TSN 网络中影响着数据传输的准确性和系统的整体表现。所提的时钟同步漂移抑制方法,结合硬件和软件优化,显著提高了时钟同步精度,成功解决了网络延迟和负载波动引发的时钟漂移问题。在实际工业应用中,方法不仅提升了设备间的协同工作效率,还增强了系统的可靠性和实时性,特别是在自动化生产和远程监控系统中,发挥了显著的作用。实验验证进一步表明,该方法在复杂网络环境中具有强大的适应性和优越的性能,能够满足工业物联网对时钟同步精度的严格要求,为未来工业自动化系统的优化和发展提供了坚实的技术基础。

#### 参考文献

- [1] 朱柏鸿,冯锋.工业物联网(IIoT)在生产线故障预测中的应用[J].物联网技术,2025,15(13):135-137+142.
- [2] 陈泉.联邦学习在工业物联网设备安全防护中的应用研究[J].中国宽带,2025,21(08):61-63.
- [3] 李伟,白杨,祁步仁,等.面向智能变电站的时间敏感网络动态时间窗口划分方法[J].山东电力技术,2025,52(06):75-85+94.
- [4] 王晔,施颖,夏天乐,等.面向工业物联网的时延感知半同步联邦学习客户端资源联合调度方案[J/OL].物联网学报,1-15[2025-07-11].
- [5] 郑凌,张科遥,潘伟涛,等.时间敏感网络中联合保护带压缩与无扰动帧抢占模型[J/OL].北京邮电大学学报,1-7[2025-07-11].
- [6] 陈恒云,庞勇.干式变压器工业物联网温度实时在线监测技术分析[J].电器工业,2025,(06):70-75.
- [7] 马章鸿,李京沐.时间敏感网络远程配置管理的研究[J/OL].电子技术应用,1-6[2025-07-11].
- [8] 张晓东.软件定义时间敏感网络与同步技术研究[D].北京邮电大学,2025.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**