



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402811

引用格式:陈敏峰,王桂荣,金英连,等.基于 IgH EtherCAT 的时钟同步补偿方案设计与性能测试[J].科学技术与工程,2025,25(3):1150-1156.

Chen Minfeng, Wang Guirong, Jin Yinglian, et al. Design and performance testing of clock synchronization compensation scheme based on IgH EtherCAT[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1150-1156.

# 基于 IgH EtherCAT 的时钟同步补偿方案设计与性能测试

陈敏峰,王桂荣,金英连,周坤,王斌锐\*

(中国计量大学机电工程学院,杭州 310018)

**摘要** 为了提升机器人通信系统多时钟同步性能,通过对分布式时钟同步补偿方案进行研究,设计时钟误差定量补偿与动态补偿算法,采用基于 IgH EtherCAT 通信协议栈实现同步补偿方案,最后在六轴机械臂上开展轨迹跟踪与通讯性能测试。结果表明,与非 IgH 同步方案相比,该同步方案的应用提高了机械臂末端执行器的轨迹圆精度。时钟同步误差降至 54 ns,同步误差容许范围在  $\pm 200$  ns 以内。可见补偿方案提高了时钟同步性能,满足机械臂的应用需求。

**关键词** 时钟同步;误差补偿;EtherCAT;通信性能;机械臂

中图分类号 TP242.2;

文献标志码 A

## Design and Performance Testing of Clock Synchronization Compensation Scheme Based on IgH EtherCAT

CHEN Min-feng, WANG Gui-rong, JIN Ying-lian, ZHOU Kun, WANG Bin-rui\*

(College of Mechanical and Electrical, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**[Abstract]** To enhance the synchronization performance of multiple clocks in robotic communication systems, a study was conducted on a distributed clock synchronization compensation scheme. Quantitative compensation and dynamic compensation algorithms for clock errors were designed. The synchronization compensation scheme, based on the IgH EtherCAT communication protocol stack, was implemented, and trajectory tracking and communication performance tests were conducted on a six-axis robotic arm. The results show that the application of this synchronization scheme improves the circular trajectory precision of the robotic arm's end effector compared to non-IgH synchronization schemes. The clock synchronization error is reduced to 54 ns, with the error tolerance within  $\pm 200$  ns. It is evident that the compensation scheme enhances clock synchronization performance and meets the application requirements of the robotic arm.

**[Keywords]** clock synchronization; error compensation; EtherCAT; communication performance; robotic arm

面对工业机器人技术的快速发展,传统控制器采用的封闭结构限制其开放性、软件可扩展性和网络功能,难以满足市场发展的需求<sup>[1]</sup>。在大多国外产品独立研发工业实时以太网协议,复杂控制应用的协议组件和代码不公开的情况下,凸显出研发机器人控制器通信解决方案的重要性。

黄睿等<sup>[2]</sup>面对工业机器人封闭式控制结构的问题,设计基于 TwinCAT3 与 EtherCAT 通讯协议的开源机器人控制系统架构,但对通讯性能进行优化。文献[3]对 3 种基本拓扑结构的时钟同步误差

进行了仿真分析。文献[4]研究 EtherCAT 从站在同步管理器模式和分布时钟模式下的中断信号误差,但未对时钟同步算法及其实现过程展开研究。文献[5-6]分别通过 SOEM (simple open EtherCAT master library) 框架和 IgH EtherCAT 框架设计通信方案。Luo 等<sup>[7]</sup>在 Linux + Xenomai 双内核系统上,构建 IgH EtherCAT 的六轴机械臂运动控制系统,双内核的设计减低了系统调度延迟。文献[8]提出了基于 FPGA (field programmable gate array) 的通信主站方案。文献[9]通过研究主站到参考从站之间的

收稿日期:2024-04-17 修订日期:2024-07-18

基金项目:浙江省自然科学基金(LGG22F030001);浙江省基础公益项目(TGG24E050007)

第一作者:陈敏峰(1999—),男,汉族,浙江嘉兴人,硕士研究生。研究方向:时钟同步通信。E-mail:1438825943@qq.com。

\*通信作者:王斌锐(1978—),男,汉族,山西平遥人,博士,教授。研究方向:仿生机器人。E-mail:wangbrpaper@163.com。

传输延时与各从站的初始时钟偏移量,提高主从控制系统的时钟同步精度,通过移植 SOEM 框架设计分布式时钟同步算法。但没有使用 IgH EtherCAT 框架设计,没有考虑动态漂移补偿方案,本文中考虑此方向并进一步研究。

基于 IgH EtherCAT 工业总线搭建一种硬件开发难度小、成本低、通信性能高、无需外接通讯板卡的软件型通信方案,以满足机器人控制器应用需求。通过设计一种分布式时钟同步方案,实现误差的定量补偿与动态补偿,以解决传输延迟、时钟偏移和时钟漂移等问题,主要研究如下内容。

(1) 面对参考时钟与从站时钟之间的传输延时、时钟偏移及时钟漂移影响因素,设计一种分布式时钟同步方案,分别实现误差的定量补偿与动态补偿,以提高从站时钟的同步性能。

(2) 面对固有通信协议的限制,研究其成本效益高、可移植和开发灵活的 IgH EtherCAT 协议栈完成同步补偿方案,期望达到纳秒级的同步精度。

(3) 在实际机械臂上进行的实验,评估时钟同步优化方案的效果,并针对补偿过程中各项补偿值的变化进行了深入的性能分析。

# 1 EtherCAT 分布式时钟同步

## 1.1 EtherCAT 同步方式

分布式时钟(distributed clock, DC)模式基于 IEEE 1588 协议<sup>[10]</sup>的分布式时钟机制实现,维持主站时钟、参考时钟与其他各从站时钟一致<sup>[11]</sup>,如图 1 所示效果。通常选择主站连接的第一个具备分布式时钟功能的从站作为参考从站,以支持分布式时钟同步。

分布式时钟模式优势支持对各个从站初始传输延时、时钟偏移、时钟漂移的测量和补偿,支持周期性的同步操作来保持各从站的时钟精确同步,从而确保各从站的时钟在设定的通信周期后精准地触发

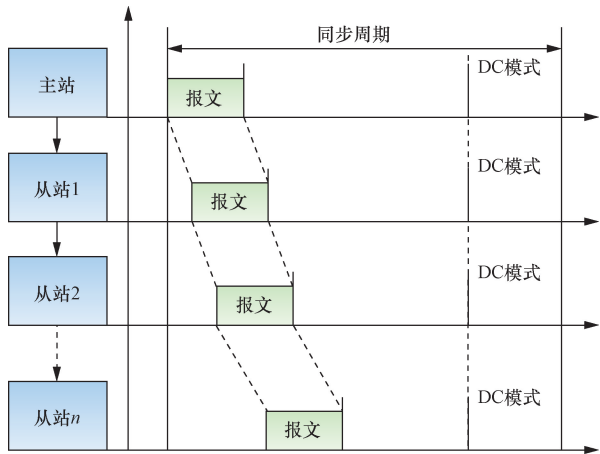


图 1 分布式时钟模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed clock mode

同步信号(Sync),实现执行器同步执行主站下发的动作指令。

## 1.2 时钟同步误差组成

时钟同步误差<sup>[12]</sup>的产生主要有三个方面:各从站的传播延迟、时钟偏移量与时钟漂移量。

传输延迟包括主站和各从站之间的线缆传输延时与各从站内部的数据帧处理延时以及数据帧转发延时。数据帧在网络中传输和从站处理数据所需的时间差引起的<sup>[13]</sup>。由于这些延时是不可避免的,它们可能导致数据帧到达不同的从站时产生时间差,影响了整个系统的同步性能。

时钟偏移由于无法确保各从站设备可以同时上电,即使所有设备都接受相同的上电时间,也会因为启动过程的不同,各个时钟的起始点也会有差异。这种初始偏移导致系统在启动阶段时各个时钟之间存在差异,差异的时间偏差会影响时钟同步的准确性。

时钟漂移是由于各个从站时钟晶振的微小差异导致的。每个时钟源的振动频率可能存在微小的不同,每个本地时钟将存在各自不同的漂移量。当长时间运行后,时钟漂移会导致各个从站的时钟逐渐偏离同步。

如图 2 所示分布式时钟同步实现过程包含三个误差补偿,补偿方案的实现能够保持系统中各从站的时钟在设定的精度范围内同步运行<sup>[14]</sup>。

为了确保同步的准确性,分布式时钟同步补偿的示意步骤如下:首先进行传输延时的测量,然后测量计算最大的各从站初始时钟偏移量值,最后测量时钟漂移量。补偿设计分布式时钟同步算法以参考从站的系统时间为标准,通过静态和动态的补偿机制,将各从站的本地时钟同步到参考从站的系统时间,以确保各从站之间保持同步,以支持同步执行主站下发的动作指令。

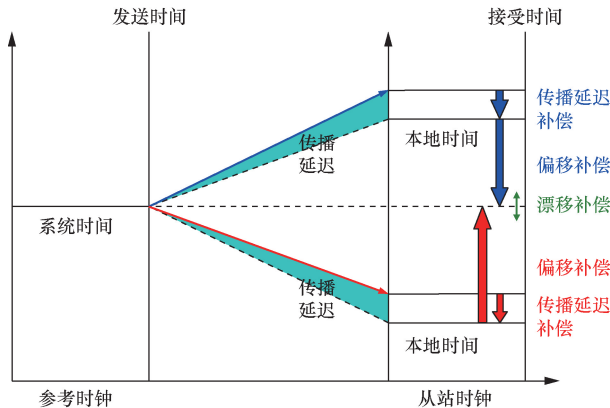


图 2 时钟同步误差补偿示意图

Fig. 2 Schematic diagram of clock synchronization error compensation

## 2 同步误差计算

### 2.1 传输延时补偿计算

从站传输图如图 3 所示,假设所有电缆间的延迟都对称<sup>[15]</sup>,各从站的物理网络口的接口类型相同,从站数据在从站控制器没有中断,则两端口间的网线延迟  $t_{Wij}$  相同,从站的处理延迟  $t_p$  相同,从站的传输延迟  $t_F$  也都相同。

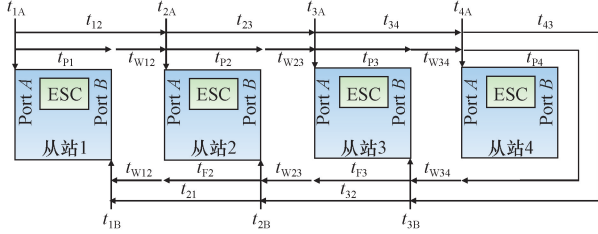


图 3 从站传输示意图

Fig. 3 Slave station transmission schematic diagram

如图 3 所示,首先计算从站 3 与站 4 的传输延时  $t_{34}$ 。因处于通信网络末端,传输延时等于处理延迟和网线延迟相加,即

$$t_{34} = t_{P3} + t_{W34} \quad (1)$$

$$t_{43} = t_{P4} + t_{W34} \quad (2)$$

假设所有从站的处理延迟都相同,则  $t_{P3} = t_{P4}$ 。可以推导出

$$t_{34} = t_{43} = t_p + t_{W34} \quad (3)$$

数据帧到从站 3 的端口 B 的接收时间  $t_{3B}$  为

$$t_{3B} = t_{34} + t_{34} + t_{43} \quad (4)$$

推导从站 3 和站 4 之间的传输延时  $t_{34}$  为

$$t_{34} = t_{43} = (t_{3B} - t_{3A})/2 \quad (5)$$

在线形串行网络中不是头尾的从站计算相邻的两个从站的传输延时,如从站 2 和站 3 之间的传输延时  $t_{23}$  与  $t_{32}$ ,计算公式为

$$t_{23} = t_{P3} + t_{W23} \quad (6)$$

$$t_{32} = t_{F3} + t_{W23} \quad (7)$$

从站的处理延迟  $t_p$  与从站的传输延迟  $t_F$  之差为  $t_{DIFF}$ ,即

$$t_{DIFF} = t_{P3} - t_{F3} \quad (8)$$

该差值取决于所选用的物理层介质。随着主站控制从站数量的增加,  $t_{DIFF}$  将从站数量的增加而逐渐累积,因此不能忽略  $t_{DIFF}$ 。而在计算网络中最后两个从站之间的传输延迟时,不需要考虑  $t_{DIFF}$  这个差值,因为最后一个从站仅使用了端口 A。

由于从站的处理延时相同可得

$$t_{23} = t_p + t_{W23} \quad (9)$$

$$t_{32} = t_{23} - t_{DIFF} \quad (10)$$

从站 2 的端口 A 接收时间之间的关系为

$$t_{2B} = t_{2A} + t_{23} + t_{34} + t_{43} + t_{32} \quad (11)$$

从而得到从站 2 和站 3 之间的传输延时为

$$2t_{23} - t_{DIFF} = (t_{2B} - t_{2A}) - (t_{3B} - t_{3A}) \quad (12)$$

$$t_{23} = \frac{(t_{2B} - t_{2A}) - (t_{3B} - t_{3A}) + t_{DIFF}}{2} \quad (13)$$

$$t_{32} = \frac{(t_{2B} - t_{2A}) - (t_{3B} - t_{3A}) - t_{DIFF}}{2} \quad (14)$$

如图 3 所示从站 1 和站 2 之间传输延时可以如同  $t_{23}$  计算过程公式得

$$t_{12} = \frac{(t_{1B} - t_{1A}) - (t_{2B} - t_{2A}) + t_{DIFF}}{2} \quad (15)$$

$$t_{21} = \frac{(t_{1B} - t_{1A}) - (t_{2B} - t_{2A}) - t_{DIFF}}{2} \quad (16)$$

参考从站与各个从站之间的传输延时  $t_{REF,i}$  计算公式为

$$t_{REF,2} = t_{12} \quad (17)$$

$$t_{REF,3} = t_{12} + t_{23} \quad (18)$$

$$t_{REF,4} = t_{12} + t_{23} + t_{34} \quad (19)$$

将式(11)、式(13)、式(15)代入式 17 ~ 式 19 化简得

$$t_{REF,2} = \frac{(t_{1B} - t_{1A}) - (t_{2B} - t_{2A}) + t_{DIFF}}{2} \quad (20)$$

$$t_{REF,3} = \frac{(t_{1B} - t_{1A}) - (t_{3B} - t_{3A}) + 2t_{DIFF}}{2} \quad (21)$$

$$t_{REF,4} = \frac{(t_{1B} - t_{1A}) + 2t_{DIFF}}{2} \quad (22)$$

归纳式(20) ~ 式(22)可得到第  $i$  个从站到参考从站对应传输延时为

$$t_{REF,i} = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \frac{(t_{1B} - t_{1A}) - (t_{iB} - t_{iA}) + (i-1)t_{DIFF}}{2}, & 1 < i < n \\ \frac{(t_{1B} - t_{1A}) + it_{DIFF}}{2}, & i = n \end{cases} \quad (23)$$

主站根据式(23)计算参考时钟与各从站之间的延时,随后将计算结果写入从站的系统时间延迟寄存器(0x0928 ~ 0x092B)。

### 2.2 时钟偏移补偿计算

时钟偏移是由于无法保证从站的本地时钟和参考时钟上电时刻相同引起的。此偏差补偿只需一次,每个从站都提供有系统时钟偏移寄存器,通过该寄存器可以写入补偿值,以消除从站与参考从站之间上电的初始时钟偏差。

各从站将分别记录端口 A 及端口 B 中收到 Ethernet 前导码的首位时的本地时间<sup>[15]</sup>,并将其作为时间戳存放在 EtherCAT 处理单元收信时间寄存器(0x0918 ~ 0x091F)。主站计算参考从站初始时

钟偏移量  $t_{off}$  是主站到参考从站之间的传输延时减去主站发送数据帧时的系统时间的差值,若此时  $t_{LOCAL} > t_{SYS,REF}$ ,即可得

$$t_{OFF} = t_{LOCAL} - t_{SYS,REF} \tag{24}$$

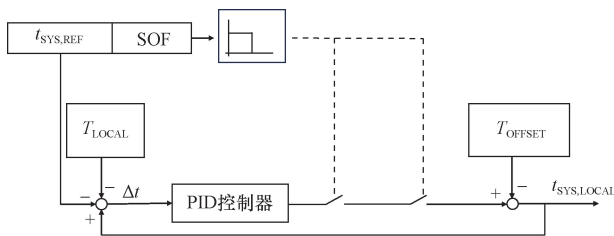
主站根据式(24)计算每个从站的初始时钟偏移量,将其写入各从站的初始时钟偏移寄存器(0x0920~0x0927)中以补偿初始时钟偏差。

### 2.3 时钟漂移补偿计算

主站在测量传播延迟和偏移补偿之后,在独立的数据帧中连续发送约 15 000 次的 ARMW/FRMW 命令,使从站时钟同步,完成从站初始化。随后随着数据处理周期的进行,每个周期都可能发生时钟漂移,再周期性地发送漂移补偿数据帧,周期动态补偿时钟漂移。计算各从站的时钟漂移量  $\Delta t$  的公式为

$$\Delta t = t_{LOCAL} + t_{OFF} - t_{DELAY} - t_{SYS,REF} \tag{25}$$

当  $\Delta t > 0$  时,意味着从站本地时间较标准时间超前,需要减缓运行;当  $\Delta t < 0$  时,意味本地时间较标准时间滞后,需要加快运行。时间控制环路调整本地时钟的运行速度。时钟漂移量  $\Delta t$  作为漂移补偿闭环反馈如图 4 所示的输入值,用于对本地时钟漂移进行动态补偿。确保各从站的时钟动态漂移后能够有效同步,维持系统的同步性能。



SOF (static output feedback) 表示静态输出反馈;  
PID (proportion integral differential) 比例积分微分  
图 4 漂移补偿闭环反馈

Fig. 4 Drift compensation closed loop feedback

## 3 分布式时钟同步方案

### 3.1 时钟同步流程设计

在 EtherCAT 主从系统的时钟初始化阶段,同步方案实现基于 IgH EthCAT 开源通信库的关键功能和接口。整体时钟同步流程如图 5 所示。

整体时钟同步流程如下:在 IgH EthCAT 主站启动后,等待从站状态机扫描完从站。对数据链路层中状态寄存器进行查询,以监测各个从站的状态,并获取 EtherCAT 总线的拓扑结构。从站初始化先选择第一个 DC 从站作为参考时钟,主站开始测量从站间各个方向上的传播延时。各从站计算测试帧的收信时间,之后主站读取接收时间寄存器时间

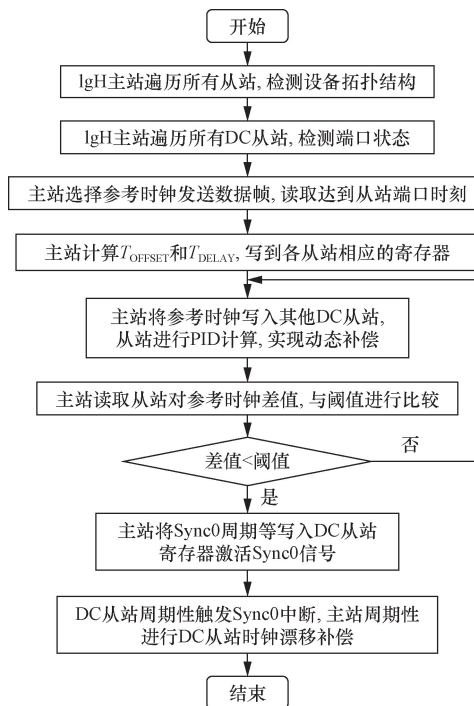


图 5 时钟同步流程图

Fig. 5 Clock synchronization flowchart

戳,通过式(23)计算出计算所有从站间的传输延时  $t_{DELAY}$ 。补偿时钟偏移将个从站时钟的本地时间与系统时间进行比较根据式(25)计算出  $t_{OFF}$ 。通过在各从站中写入系统时间偏移寄存器数值补偿每个从站的时间差,所有的从站得到同一个时间值。

主站将参考时钟写入其他 DC 从站,参考时钟与本地时钟间的漂移补偿必须通过测量时间差并调整本地时钟,定期执行补偿操作。当主站周期读取从站的系统时间差值寄存器,其设置差值大于阈值时进入时间控制环路计算补偿值调整本地时钟运行速度,差值小于阈值时主站会将 Sync 周期时间和 Sync 起始时间写入寄存器,并触发 Sync 同步信号。

### 3.2 时钟同步程序实现

分布时钟同步的程序实现步骤:首先通过 `ecrt_master_slave_config()` 主站函数,读取数据链路状态寄存器(0x0110~0x0111)和从站的特征信息寄存器(0x0008~0x0009),获取 EtherCAT 总线拓扑结构和从属配置以便计算传输延时。主站调用 `ecrt_master_select_reference_clock()` 选择分布式时钟的参考时钟,通常选择第一个从站,并记录主站发帧的系统时间。

主站调用 `ec_master_delay()` 函数计算各从站的传输延时,并同时访问各从站的接收数据时间的寄存器(0x0918~0x091F)。随后,利用式(25),将计算得到的初始时钟偏移值写入各从站的寄存器

(0x0920-0x0927)。主站依据式(23)计算各从站的  $t_{\text{DELAY}}$ , 将  $t_{\text{DELAY}}$  值写入各从站的传输延时寄存器 (0x0928 ~ 0x092B) 中。时钟漂移补偿调用函数 `ecrt_master_sync_reference_clock_to()` 将 DC 参考时钟的漂移补偿以参考时钟为基准计算, 后 `ecrt_master_sync_slave_clocks()` 将所有从时钟同步到参考时钟 DC 时钟漂移补偿。确保时钟的精确同步。

最后函数 `ecrt_master_activate()` 告诉主设备配置阶段完成, 实时操作将开始。主站将周期性通过时钟漂移控制环路计算时钟漂移量  $\Delta t$  周期补偿。

## 4 性能验证

### 4.1 实验平台

控制系统的通讯主站为运行在研华 X86 工控机上, 系统为 Ubuntu 18.04, 内核版本为 4.15.2-20geneic, 并安装有 5.4.193-rt-preempt 实时补丁。本节的目的是通过实验验证本文设计的分布式时钟同步方案的性能, 在新松 SR4C 机械臂上进行实物实验。实验平台由主控器、示教器、4KG 新松 SR4C 机械臂、以 EtherCAT 串联拓扑的 6 个 Panasonic 驱动器组成, 搭建如图 6 所示性能测试平台。



图 6 性能测试平台

Fig. 6 Performance testing platform

### 4.2 六轴机械臂同步画圆评估实验

本节展示六轴机械臂在球面上同步绘制曲面圆的实验, 实验目的是验证通过实施同步优化方案, 机械臂在连续位姿变化时能否保持轨迹的连续性和平滑性, 以及控制系统的同步稳定性。图 7 所示为机械臂整体轨迹呈现连续且平滑效果。

圆轨迹通过在机械臂末端安装靶球用 Leica-AT403 型号的激光跟踪仪对机械臂轨迹进行跟踪。跟踪出的轨迹导出数据在 MATLAB 上显示如图 8 所示。

为了评估多轴同步精度, 通过量化轨迹圆与标准圆的相似度来说明。在 MATLAB 中使用 PCA (principal component analysis) 算法确定数据点最佳拟合平面, 将三维数据点投影到该平面上。对数据

点进行采用最小二乘法拟合圆, 以获取圆心和半径。公式计算以标准圆的半径减去圆度误差, 然后将得到的值除以标准半径, 来量化轨迹数据圆与标准圆之间的相似程度。

性能评估的结果如表 1 所示。实验结果显示, 改进的补偿组在同步精度上的表现优于传统 EtherCAT 组, 抖动均值显著降低, 表明同步稳定性得到了提升。轨迹的圆度误差越低, 实验中机械臂画圆

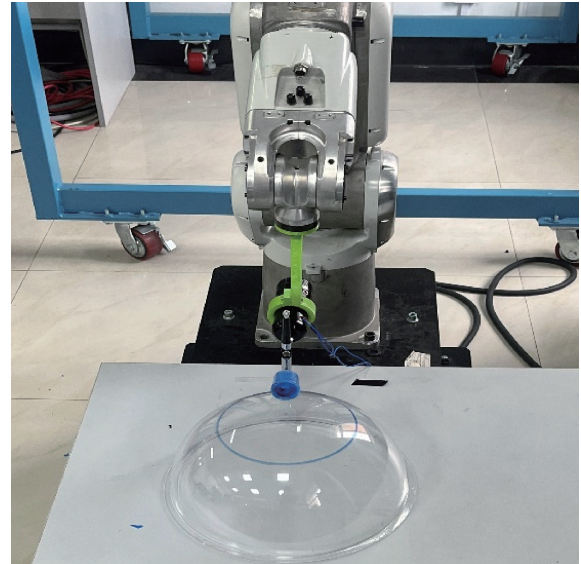


图 7 球面多关节协同画圆

Fig. 7 Curved surface manipulator multi-axis collaborative circle drawing

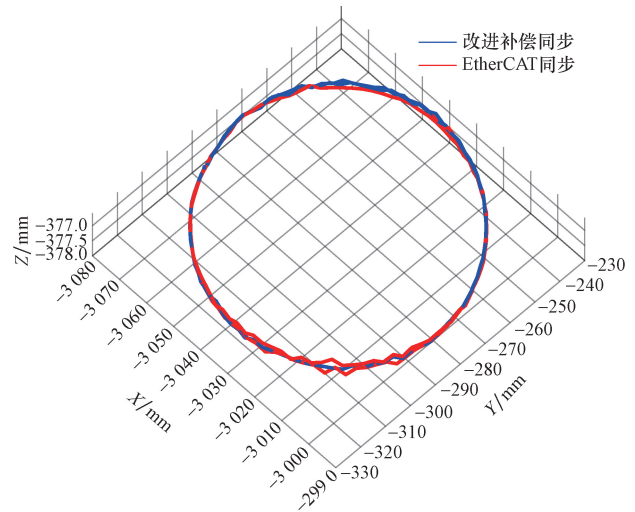


图 8 补偿方案对比效果图

Fig. 8 Comparison of compensation scheme effects

表 1 同步性能评估

Table 1 Synchronization performance evaluation

测试组	同步均值/ns	抖动均值/ns	相似度/%
传统 EtherCAT	101	227	97.82
改进补偿	54	95	98.13

的形状与标准圆接近,相似度较高。本节评估了方案在实际运动控制中的控制性能,下节分别对各从站时钟补偿值测量分析。

### 4.3 时钟同步性能分析

本节测量各从站时钟性能指标,分析方案有效性,期间通讯周期时间设置为 1 ms。性能分析工具为串联于工控机以太网输出端口与伺服驱动器之间的 netANALYZER 工业以太网分析仪。该分析仪负责捕捉网络中所有的记录帧,诊断工业以太网网络的性能和可靠性。实验数据的提取分析使用数据帧 wireshark 工具与 MATLAB 数据分析,完成同步性能测试。

在实验的开始首先测试使用无补偿方案时从站 6 的时钟误差。结果绘制在图 9 的散点分布图中,观察从站 6 系统时间误差的变化趋势。

图 9 为从站 6 无补偿时钟在 1 000 次采样中的变化趋势,从站系统时间的误差从初始值 4 μs 逐渐增加至 15 μs,并且误差会随时间逐渐扩大。

图 10 所示为改进补偿的同步方案,对各从站的寄存器(0x092C)连续读取 10 000 次,以测量从站时钟与参考时钟间的时钟误差作图 10。同步方案对比无补偿方案有效减小从站时钟误差,并且各从站时钟误差随补偿效果后趋于稳定。

从站 1 的本地时钟为参考时钟,各从站以参考时钟为基准,来调整自己的本地时间,因此图 10 中

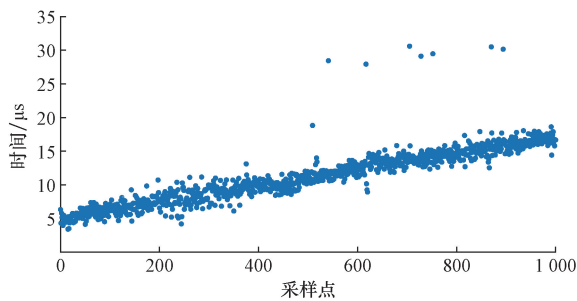


图 9 从站 6 无补偿时钟误差

Fig. 9 Clock error without compensation

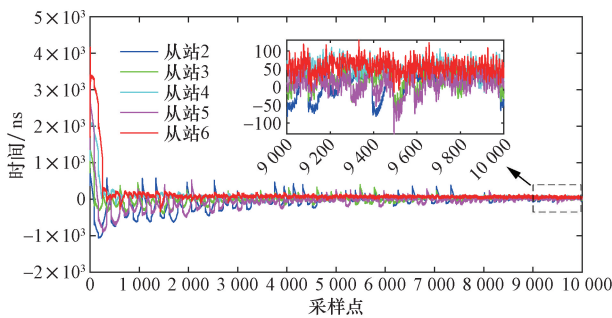


图 10 各从站时钟同步误差采样图

Fig. 10 Sampling graph of clock synchronization errors across slave stations

从站 1 的同步误差为零,没有绘制从站 1 曲线。

观察从站 2,初始阶段有较大幅度来回波动,收敛变化曲线在整个序列中波动较大。而最远相连的从站 6,则在初始时刻出现非常显著的收敛变化,收敛变化曲线在峰值后迅速降低调整回稳定,波动较小。同步方案下对比前后从站,前后的时钟初始偏差逐渐增大,收敛效果趋向平滑。从站 6 的初始偏差值最大,收敛效果快速,时钟误差可降至 54 ns。

在图 10 中周期性补偿阶段取采样点 9 000 到 10 000 的数值,在小窗中直观表示。其中从站 6 时钟误差均值为最大,均值为 54 ns。从站 2 时钟误差范围 -82 ~ 80 ns,从站 3 误差范围 -81 ~ 76 ns,从站 4 时钟误差范围 -15 ~ 110 ns,从站 5 误差范围 -141 ~ -15 ns,从站 6 误差范围 -15 ~ 130 ns。在分布时钟同步补偿方案的应用下,各从站本地时钟误差范围在 -141 ~ 130 ns 之间,同步效果满足容许误差在 ±200 ns 以内的性能指标。

网络分析仪抓取各从站的补偿值统计在表 2 中。各从站以参考时钟为基准,来调整各自的本地时间,因此表 2 中无从站 1 的补偿值。

取传输补偿值与漂移补偿值可作图 11,看传输补偿与漂移补偿值变化与补偿值权重大小。

结合数据表 2 和图 11 可以分析各补偿值效果。

(1)偏移补偿值:偏移补偿值差异显著,从站 2、3 的偏移补偿值相对较小,而从站 4、5、6 的偏移补偿值非常大。表明在同步过程启动时,从站与主站之间会存在极大的时间差异。对从站 4、5、6 偏移补偿值调整以实现同步。

(2)传输补偿值:从从站 2 到从站 6,传输补偿值逐渐增大,反映网络中数据传输延迟的递增趋势。说明网络拓扑中的位置对延迟有直接影响,从站 6 的传输补偿值最高。

(3)漂移补偿均值:漂移补偿均值在从站之间差异显著,从负值到正值不等。从站 2、3、5 显示出负的漂移补偿均值,意味着这些从站的时钟速率较主站时钟慢,而从站 4 和 6 的正漂移补偿均值则表

表 2 同步补偿方案数据统计表

Table 2 Synchronous compensation plan data statistics table

组别	时间/ns				
	从站 2	从站 3	从站 4	从站 5	从站 6
偏移补偿值	109 161	185 123	19 530 222	20 144 623	20 253 941
传输补偿值	105	206	310	410	520
漂移补偿均值	-21	-34	15	-41	20
漂移补偿最大	11	19	60	39	52
漂移补偿最小	-72	-76	-30	-96	-22
时钟误差均值	8	16	35	9	54

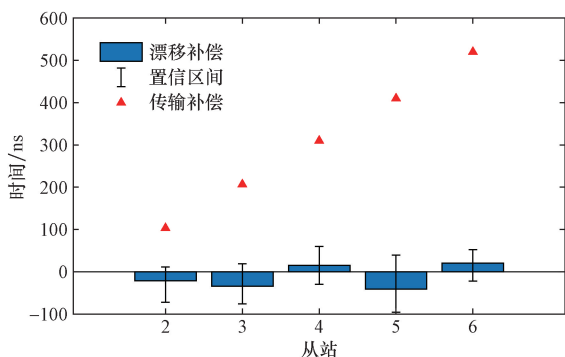


图 11 传输补偿与漂移补偿均值区间

Fig. 11 Transmission compensation and drift compensation mean range

明其时钟速率快。漂移补偿最值在正负波动, 漂移补偿策略可以维持时钟的稳定。

## 5 结论

面对主从站时钟之间的传输延时、时钟偏移及时钟漂移会减低时钟同步精度的问题。

(1) 本文设计分布式时钟同步补偿方案, 完成时钟同步误差补偿算法, 通过基于 IgH EtherCAT 协议栈完成定量及动态补偿同步补偿方案。

(2) 实验测试机械臂轨迹圆精度提升, 从站时钟误差降至 54 ns, 误差容许范围在  $\pm 200$  ns 以内。补偿方案满足工业机器人的应用需求。

(3) 研究展示了基于 IgH EtherCAT 的软件架构在提高通讯性能方面的潜力与同步补偿方案的必要性, 为提高机器人控制系统的通信性能和运动控制提供了有益的参考。

### 参 考 文 献

[1] 褚旭龙, 史冬梅, 刘进长. 近 20 年中国智能机器人领域研究热点——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2477-2484.  
Chu Xulong, Shi Dongmei, Liu Jinchang. Research hotspots in the field of intelligent robots in China over the past 20 years: a bibliometric analysis based on CiteSpace [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2477-2484.

[2] 黄睿, 张新, 朱华炳, 等. 基于 TwinCAT3 的一种开源机器人控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4): 1561-1569.  
Huang Rui, Zhang Xin, Zhu Huabing, et al. Design of an open-source robot control system based on TwinCAT3 [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(4): 1561-1569.

[3] 胡鑫明, 蒋大海, 雷妮, 等. 一种 EtherCAT 主站存取网络结构设计[J]. 现代电子技术, 2024, 47(3): 91-96.  
Hu Xinming, Jiang Dahai, Re Ni, et al. Design of an EtherCAT master station access network structure [J]. Modern Electronic Technology, 2024, 47(3): 91-96.

[4] 王猛飞. 基于 EtherCAT 的工业机器人感知与控制系统设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
Wang Mengfei. Design of industrial robot perception and control system based on EtherCAT [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[5] Park S M, Kim H W, Kim H J, et al. Accuracy improvement of master-slave synchronization in EtherCAT networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58620-58628.

[6] 马平, 刘胜旺, 苏攀杰, 等. IGh EtherCAT 主站分布式时钟机制的应用与研究[J]. 机械设计与制造, 2022(1): 262-265, 270.  
Ma Ping, Liu Shengwang, Su Panjie, et al. Application and research of distributed clock mechanism of IGh EtherCAT master station [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2022(1): 262-265, 270.

[7] Luo X J, Yang S Q, Xu H. Cooperative manipulator control based on IgH Ethercat master[C]//2023 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation(WRC SARA): New York: IEEE, 2023: 109-114.

[8] Lee S Y, Sung M. Design and implementation of an ethernet-based linear motor drive for industrial transport systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 33061-33074.

[9] 荣锋, 孙亚硕. EtherCAT 分布时钟同步算法的研究与优化[J]. 仪表技术与传感器, 2022(12): 113-118.  
Rong Feng, Sun Yashuo. Research and optimization of EtherCAT distributed clock synchronization algorithm [J]. Instrument Technology and Sensors, 2022(12): 113-118.

[10] 刘策越, 郭宏, 张先国. 时间触发以太网时钟同步协议攻击行为的性能评估方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11698-11705.  
Liu Ceyue, Guo Hong, Zhang Xianguo. Performance evaluation method of time-triggered Ethernet clock synchronization protocol attack behavior [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11698-11705.

[11] Zhou N, Li D. Cyber-physical codesign of field-level reconfigurations in networked motion controllers[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 26(4): 2092-2103.

[12] Akpınar K O, Özcelik I. Methodology to determine the device-level periodicity for anomaly detection in EtherCAT-based industrial control network[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 18(2): 2308-2319.

[13] 袁俊杰, 刘海涛, 潘国庆, 等. 基于 EtherCAT 和 TwinCAT3 的协作机器人控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3159-3168.  
Yuan Junjie, Liu Haitao, Pan Guoqing, et al. Design of collaborative robot control system based on EtherCAT and TwinCAT3 [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 3159-3168.

[14] Ahn J, Park S, Sim J, et al. Dual channel ethercat control system for 33-dof humanoid robot tocabi[J]. IEEE Access, 2023, 11: 44278-44286.

[15] 李灿, 韩先虎, 程法勇, 等. 基于 ATE 的传输延迟测试方法优化[J]. 现代电子技术, 2023, 46(20): 39-43.  
Li Can, Han Xianhu, Cheng Fayong, et al. Optimization of transmission delay test method based on ATE [J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(20): 39-43.