

工业以太网 EtherCAT 在高速高精度运动控制系统中的实时性提升效果分析

陈晓雯

(四川烟叶复烤有限责任公司会东复烤厂, 四川 凉山 615200)

摘要 随着智能制造与高端装备的发展, 高速高精运动控制系统对通信实时性和同步精度提出了更高要求。EtherCAT 作为一种基于以太网的现场总线技术, 凭借其独特的报文处理机制和确定性通信特性, 在多轴高速高精控制领域得到了广泛应用。本文围绕高速高精运动控制系统的实时性瓶颈, 系统分析了 EtherCAT 技术特性与控制系统实时性需求之间的内在关系, 在此基础上从通信层和同步与控制层两个维度提出针对性的实时性优化方法。通过构建实验平台并开展对比测试, 对优化方案在通信延迟、同步误差及运动控制性能方面的提升效果进行了验证。研究结果表明, 所提出的实时性优化策略能够有效改善系统动态响应能力和控制精度, 为 EtherCAT 在高端运动控制系统中的工程应用提供参考。

关键词 EtherCAT; 工业以太网; 高速高精运动控制; 实时性优化; 多轴同步

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.012

0 引言

高速高精运动控制系统在数控机床、半导体生产、工业机器人以及精密组装中得到广泛应用, 其主要特性是快速响应、高定位精度以及多个轴之间的协调控制。此类系统中控制器性能的好坏不但取决于算法本身, 而且对底层通信网络的实时性和确定性有着极高的要求。传统的现场总线技术已经不能满足新一代设备的宽频带、同步能力和可扩充性的需求。EtherCAT 技术是以太网方法深层次优化之后的一种新的实时控制方案。但是, 对于高速高精度的场合来说, 通信延时、抖动和同步误差等问题还可能影响整个系统的性能。针对这些问题, 本文围绕 EtherCAT 在运动控制系统中的实时性优化进行了深入研究, 以期为提高其实用价值提供借鉴。

1 EtherCAT 技术及高速高精运动控制系统的实时性需求分析

1.1 EtherCAT 工业以太网的技术原理与通信特性

EtherCAT 是由 Beckhoff 公司提出的一种高效的工业以太网技术, 它的基本理念是对传统以太网通信体制加以改造, 应用于严格的实时控制场合。它不同于基于 TCP/IP 或 UDP 工业以太网协议采用的方式, 而是以主站集中调度、从站依次处理的方法来进行通信。

主站周期性发送一个以太网帧, 帧在环网上按物理顺序经过各个从站, 从站在数据帧经过的过程中直接完成数据的读写工作, 不需要先接收再转发。即所谓的“on-the-fly”处理方法, 大大减小了网络延时并减少协议处理造成的时延抖动。

在通信性能上, EtherCAT 可以实现非常小的通信周期以及较高的带宽利用率。在现场实际应用中, 当以一百兆以太网的物理层条件为前提时可以实现高达 90% 的有效数据传输带宽利用率; 一个通信周期可以达到百微秒级别。EtherCAT 使用的是主站集中时钟模式对网络内的所有从站进行精准的时间同步, 为多轴联动打下基础, 相比于 CANopen 等传统现场总线来讲, EtherCAT 在节点数的增加以及通信速度以及同步精度上有明显的提高^[1]。

EtherCAT 在系统结构扩展性及网络稳定性上也有一定优势。EtherCAT 支持线型、树型或环型等不同类型的网络连接方式, 在实际工程项目布线时比较方便。另外, 由于对通信报文进行集中控制, 所以有利于监控整个网络工作情况并及时发现出现的问题以加快维修速度。而在一些复杂的工业场合下, 这就可以大大增强通信性能, 从而保障了高速高精度运动控制系统正常工作。

作者简介: 陈晓雯 (1977-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: PLC 与变频器控制、工业以太网通信。

1.2 高速高精运动控制系统的实时性与同步性要求

高速高精运动控制系统性能指标主要反映在其动态响应速度、位置与速度控制精度及多轴同步协调性方面,在该类系统中,控制系统周期一般为毫秒乃至亚毫秒范围内,通信系统必须在严格的时限要求下完成控制命令的发出和检测数据的获取。过大的传输时延或者时延抖动都会造成控制环路内等效采样周期不稳定,进而致使跟踪误差变大乃至系统失稳。

同步性也是高速高精运动控制的又一个重要指标。对于多轴系统而言,在做插补运动或者协同轨迹的时候,各个执行轴之间的时间误差会直接影响到轨迹的平滑度及空间精度。实验与现场测试发现轴间的同步误差一旦超过几十微秒就会在高速下产生可见轨迹偏离和机械振动等问题。特别是在电子凸轮、龙门架、并联机构等应用场景中同步精度已经成为影响系统性能的关键因素^[2]。

2 基于 EtherCAT 的高速高精运动控制系统实时性优化方法

2.1 通信层实时性优化策略

高速高效传动系统中的通信层实时性能直接影响命令以及反馈信息传输速度。对于 EtherCAT 网络通信层优化,首先要考虑的是网络拓扑和通信周期的设计。通过实际项目发现线型拓扑结构在网络节点数目较大的情况下会导致累积传播延时较长,而分支数较少的树形网络能够加快关键控制线路通信速度。文中提出的方法是根据从站分布的功能分区,把需要高实时性的伺服驱动节点都安排到离主机最近的位置,这样关键控制轴的通信延时可以减少约 15%。

通信周期配置也是实时性的一个重要因素。太大的通信周期会制约控制系统的快速跟踪性能,太小的周期又会增大主站压力以及产生资源冲突。通过将控制周期与通信周期进行整合规划,将 EtherCAT 通信周期设置为控制周期的整数分频,则可以使得数据更新同控制运算保持同步节拍,显著减少周期性抖动情况的发生。实验证明,在 1 kHz 的控制频率下,适当搭配好通信周期就可以把周期性抖动抑制于 $\pm 2 \mu\text{s}$ 的范围内。

报文的内容以及长短都会对实时性产生较大影响,在保证控制的同时减少不必要的过程数据的传输,不在同一帧内掺杂低级别的诊断信息等可以降低帧处理的时间;简化过程数据对象映射减少单帧报文长度约 20%,通信链路上的负荷大幅减轻。EtherCAT 主站的任务调度策略的优化也起到了重要的作用。把 EtherCAT 主站任务作为实时优先级,不再和其他非实时任务争夺 CPU 资源,通信延时的确定性有了明显的提升^[3]。

在实际工程项目中,还需根据网络负载情况对通信资源进行检测,通过对各个从站的数据刷新时间以及带宽占用情况进行统计分析,找到通信存在的问题进而对其进行改进。在此过程中,部署网络监控软件可以在一定程度上实现对通信帧丢失率、时延分布、带宽等进行实时监测以供参考。经过长时间的实验验证,在以上方法的共同作用下,通信网络的鲁棒性和实时确定性得到了很大的改善,从而有利于提高高速高精度运动控制系统的工作效率。

2.2 同步与控制层实时性提升措施

针对 EtherCAT 网络,在同步控制层面的优化主要是在充分利用其分布式时钟的基础上,与运动控制算法相结合。EtherCAT 分布式时钟系统采用网络中选择参考时钟的方法来进行纳秒级的时间对齐,能够提供用于多轴同步的时间参考。对于工程而言,周期调整从站时钟误差可将轴间时间偏差稳定维持在 $1 \mu\text{s}$ 以下,为精确度极高的协同动作提供了先决条件。

针对控制层的设计,对同步触发机制进行优化可继续提高系统的实时性能。将控制命令下达、采集触发以及驱动器刷新等环节与分布式时钟同步事件关联起来,防止由于软件层面的调用不确定性造成的延时。在多轴联动插补上,使用带时间戳的方式进行插补操作,在一阶逻辑时刻让各个轴同时进行位置刷新的操作,从而解决了高速情况下轨迹同步的问题。

控制器算法及通信周期联合优化亦不容小觑,在高速、高精度场合下控制器的算法运算量大,而且通信时隙分配不合理易造成计算延时挤占通信的时间。通过算法运行步骤优化并提前部分运算至上一周期内完结,使得控制输出与通信调度呈流水线形式。实验测试表明该种方式能降低每个周期的整体延迟大约 12%,系统输出更为平稳。

为了检验优化效果,在多轴伺服系统上增加了实时性的监控手段,对其进行同步错误、控制延时以及动作抖动进行在线的统计数据,相关数据可以作为后期工程调校的量化参考,同时也对于实时性优化措施是否切实有效起到了一定客观的佐证作用。保持长期连续运行,同步和控制层实时性优化对系统整体可靠性的影响同样要重视,测试系统连续运行时长不低于 72 h,全程覆盖实验环节,优化后的系统运行在高频启停、高速插补工况时,未出现通信超时或同步失锁现象,控制周期的波动区间显著收窄,同步误差和控制延时的统计分布逐步稳定,说明系统应对负载变化和外界扰动的适应能力有所提升。从工程应用层面考量,该优化方案不仅能提升瞬态控制性能,也能为高

速高精运动控制系统长期稳定运行提供技术支撑, 适合大范围工程推广^[4]。

3 实时性优化方案的工程应用与效果分析

3.1 系统架构设计与实验平台构建

为了检验本文提出的实时性优化方案在工程中是否具有应用价值, 设计了一个基于 EtherCAT 实时以太网协议的高速高精度运动控制实验平台, 整个系统的硬件结构包括上位机、EtherCAT 主站卡、多轴伺服驱动模块和高分辨率编码器。主站端安装有实时操作系统, 其控制周期设置为 1 ms, 并且通信周期与控制周期同步配置。实验平台总共配置了六个伺服轴, 其中包含线性轴和回转轴两类典型的运动轴, 能够仿真复杂设备的实际工作环境。

而针对硬件设置上则是选择带有分布式脉冲功能的伺服驱动器以及相应的编码器并实现其时间同步; 网络架构使用改良的树形结构, 核心的运动轴位于主要的通信线路之中, 次要的运动轴由旁支连接, 减少主要线路上的时间延迟。该系统在未经调整及已经调整的两种不同状态下进行测试工作, 以此来建立对照实验环境。

表 1 EtherCAT 实时性优化前后高速高精运动控制系统关键性能指标对比

指标类别	未优化系统	优化后系统	改善幅度	测试条件
平均通信延迟 (μs)	210	172	18.10%	1 kHz 控制周期
周期抖动峰值 (μs)	± 6.5	± 2.1	—	恒速运行
轴间同步误差 (μs)	4.8	0.9	—	六轴联动
最大跟踪误差 (μm)	12.4	7.6	38.70%	高速插补
系统稳定运行时间 (h)	72	120	—	连续运行

就工程应用而言, 实时性的改善不仅提高了控制精度, 并且提升了系统的长时间稳定运行能力, 在连续的运行测试过程中没有发生通信超时及同步丢失的情况, 具备良好的工程实用性。由此可见, 采取合理的方式对通信、控制系统进行协同优化可以使得 EtherCAT 更加适用于高速高精运动控制应用场合。

4 结论

本文基于高速高精运动控制系统对实时性以及同步方面的要求, 对 EtherCAT 工业以太网进行实时性优化研究。针对 EtherCAT 通信特点及控制系统的需要, 提出了一种以通信层、同步与控制层为基础的综合优化方式, 在实验平台上实施了工程验证。结果显示: 基于本文提出的优化方案可以有效地减少通信延时与抖动现象, 使得多轴同步更加精确, 运动控制更加优秀, 具有较强的工程实用性。结论为: EtherCAT 技术在高

在试验期间, 使用高分辨率的时间分析模块测量了通信延时、周期偏移以及各轴间的同步误差等性能参数; 并且在不同的负载及速度情况下执行了多个轴联动插补运动来考查系统的实时特性。为了提高测试数据的准确性, 对于每组实验都要重复做若干次并对其数据进行统计处理, 尽量避免随机误差的存在, 同时结合均值与离散度指标对测试结果的稳定性进行综合评估。

3.2 实时性与控制性能测试结果分析

实验结果显示, 对 EtherCAT 实时性进行优化后, 在高速、高精度运动控制的应用背景下, EtherCAT 网络的性能有了较大的提高。通信延时平均值相较未经优化的状态减少了约 18%, 周期抖动也大幅减小, 多个轴之间的同步误差也能够保持在一个比较低的程度上^[5]。针对高速插补运动轨迹条件下, EtherCAT 运动控制测试表明系统的位置跟随误差及速度偏差都有所减少, 轨迹曲线更为流畅。

表 1 列出了某些重要的性能对比值来具体说明优化程度。表格中的数据源于实验环境反复测量的数据汇总, 不同于文中所列举的分析性能指标项。

端装备中的应用为相关研究提供了实践基础, 对于提高整个工业控制系统的性能有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 胡召阳. 工业以太网在煤矿自动化监控系统中的应用研究 [J]. 煤炭新视界, 2025(02):10-12.
- [2] 蔡杰. 基于 433 MHz 无线和工业以太网的能耗监测平台设计 [J]. 数字技术与应用, 2025, 43(11):174-176.
- [3] 王志远, 杨明川, 游祖南, 等. 基于工业以太网的车间自动拧紧设备数字化改造 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(19):170-174.
- [4] 樊帅, 蒋毅, 江晨松, 等. 基于 EtherCAT 的嵌入式多核电火花小孔机床数控系统研究 [J]. 电加工与模具, 2025(02):26-31.
- [5] 杨鸣, 刘远正. 基于工业以太网的轮胎成型机变频器控制方法 [J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(04):69-72.