基于 TSN 的装卸系统实时控制网络确定性设计

赵英华

中交第一航务工程勘察设计院有限公司　天津　300202

摘　要：工业自动化向智能化、协同化迈进，装卸系统对控制网络的实时性与确定性要求愈发严苛。传统以太网在处理多源数据混合传输时，拥塞丢包、延迟抖动不可控等问题频现，无法满足高精度运动控制的时序需求。为此，本文引入时间敏感网络技术，对装卸系统控制网络开展确定性设计。经分析通信需求与流量特征，设计网络拓扑与时钟同步方案，提出信用整形和时间感知整形器结合的流量调度策略。仿真显示，关键控制帧端到端延迟达微秒级，抖动小于 10 微秒，保障了系统稳定运行。

关键词：时间敏感网络；装卸系统；实时控制网络；确定性设计

引言：装卸系统是物流与制造环节的关键装备，其控制性能关乎作业效率和运行安全。现代装卸系统中存在变频驱动、机器视觉、激光雷达、PLC 控制器等众多智能设备，控制指令、状态反馈、视频流等多类型数据在同一网络传输，对网络实时性和确定性要求极高。传统工业以太网采用尽力而为转发机制，突发流量冲击下易出现延迟抖动和丢包，造成运动控制失步甚至设备碰撞。时间敏感网络（TSN）凭借精确时钟同步、门控调度、流量整形等机制，能为关键数据提供确定性传输保障，本文就此展开设计。

1 装卸系统控制网络需求分析

1.1 系统组成与通信架构

典型装卸系统由变幅机构、输送带、抓取机构、视觉定位系统、安全监控装置及上层控制器组成。控制网络采用星型或线型拓扑，中央控制器负责路径规划与指令下发，变频驱动器接收位置、速度、扭矩指令并反馈运行状态，视觉系统上传目标识别结果与位置坐标，安全装置发送紧急停机信号。通信节点数量通常在 10 至 50 个之间，网络带宽需求为 100Mbps 至 1Gbps。不同设备对通信性能的要求差异显著：运动控制指令要求极低延迟和高可靠性，视觉数据则要求高带宽但对实时性相对宽容。

1.2 实时性要求分析

装卸系统的控制任务具有严格的时序约束。根据 IEEE802.1 标准分类，控制网络中的流量可分为三类。等时同步流为周期性运动控制指令，周期通常为 250 微秒至 2 毫秒，允许的最大端到端延迟不超过一个周期，允许的抖动小于 10 微秒，数据包大小为 64 至 1500 字节。实时关键流为非周期性但具有实时性要求的数据，如紧急停机信号、故障报警等，其延迟要求小于 1 毫秒，丢包率要求低于 10 的负 6 次方。尽力而为流为对实时性无严格要求的监控视频、日志数据等，允许一定程度的延迟和抖动[1]。

1.3 传统网络的技术局限

标准以太网采用载波侦听多路访问/冲突检测机制，节点在发送数据前侦听信道，冲突发生后随机退避重传。这种机制在轻负载下表现良好，但随着网络负载增加，冲突概率上升，延迟呈现不可预测的指数增长。针对工业场景改进的 PROFINET、EtherCAT 等实时以太网协议，虽能实现微秒级同步，但大多采用集总帧或时间片轮询等专有机制，存在设备兼容性差、拓扑受限、扩展困难等问题。当系统中同时存在运动控制、视觉检测、安全监控等多源异构数据时，传统方案难以保证各类流量的服务质量，迫切需要一种开放、标准化的确定性网络技术。

2 时间敏感网络关键技术

2.1 精确时间同步机制

时间敏感网络的核心基础是高精度时钟同步。IEEE802.1AS 协议采用广义精确时间同步机制，通过在主从时钟间交换同步报文，计算链路延迟和时钟偏差，实现全网纳秒级的时间同步。相比传统精确时间协议，广义精确时间同步简化了最佳主时钟算法，支持端到端和点对点两种延迟测量机制，更适合工业网络环境。在装卸系统控制网络中，中央控制器作为主时钟，各交换机和终端设备作为从时钟。同步报文周期通常为 1 毫秒，经多次测量和滤波后，同步精度可达正负 100 纳秒

以内。精确的全局时间为后续的流量调度提供了统一的时间基准。

2.2 流量整形与调度机制

时间敏感网络提供了多种流量整形机制以满足不同实时性需求。时间感知整形器是其中最关键的技术，它将时间划分为循环重复的周期，每个周期内包含多个时间片，不同优先级的流量在不同时间片内传输。时间感知整形器通过门控列表控制每个队列的打开与关闭，确保关键流量的确定性传输。基于信用的整形器采用信用值机制动态调整发送速率，在保证高优先级带宽的前提下避免低优先级流量的饥饿。逐流过滤与管制根据流特征对数据包进行识别、过滤和速率限制，防止非关键流量挤占带宽。多种机制的组合使用，实现了对混合关键性流量的精细化管控。

2.3 资源预留与路径选择

为保障关键流量的服务质量，时间敏感网络支持资源预留协议。IEEE802.1Qcc 定义了集中式网络配置模型，由中央用户配置器和集中式网络配置器共同完成流注册、路径计算和资源分配。在装卸系统应用中，中央用户配置器位于控制器侧，负责获取各设备的通信需求并转换为流规范[2]。集中式网络配置器位于网络管理层，收集拓扑信息和链路容量，为每条流计算最优路径，并在沿途交换机中预留队列资源和带宽。对于关键控制流，可配置冗余路径以提高可靠性。资源预留机制确保了在网络拥塞时，关键数据流仍能获得确定的传输服务。

3 装卸系统控制网络确定性设计

3.1 网络拓扑与设备选型

基于装卸系统的物理布局和通信关系，采用混合拓扑结构，骨干层为环型结构，汇聚层与接入层为星型结构。核心层部署一台时间敏感网络骨干交换机，汇聚层根据工位数量配置 2 至 4 台接入交换机，终端设备包括控制器、变频驱动器、视觉传感器和安全 PLC。所有交换机需支持 IEEE802.1AS、802.1Qbv 和 802.1Qcc 协议，端口速率选用 1Gbps 以满足带宽需求。时钟同步架构中，骨干交换机作为时钟源，通过边界时钟模式逐级同步下级设备，避免级联误差累积。网络冗余采用并行冗余协议，关键链路配置双物理通道，故障时切换时间小于 50 毫秒。拓扑设计兼顾了信号完整性、布线便利性和扩展性，支持后续增加设备而不影响现有通信性能。

3.2 流量分类与参数配置

对装卸系统的通信流量进行系统化分类是确定性设计的前提。依据实时性和可靠性要求，将流量分为三个等级。等级 A 为运动控制指令和非周期信号，周期 1 毫秒，最大帧长 128 字节，允许延迟小于 500 微秒，抖动小于 10 微秒，丢包率小于 10 的负 9 次方。等级 B 为状态反馈和视觉定位结果，周期 2 至 10 毫秒，最大帧长 1500 字节，允许延迟小于 5 毫秒，抖动小于 100 微秒。等级 C 为监控视频和诊断日志，非周期性，允许延迟小于 50 毫秒。为每条等级 A 流配置独立的流标识，包括源 MAC 地址、目的 MAC 地址、VLANID 和优先级。流规范参数包括最大帧长、发送间隔、数据帧间隔和最大抖动，为后续调度计算提供输入。

3.3 门控调度与队列设计

门控调度是确定性网络设计的核心环节。设定调度周期为 1 毫秒，与运动控制指令周期保持一致。在一个周期内划分三个时间窗口，每个窗口之间插入保护带以避免帧交错干扰：等时窗口占用 300 微秒，用于传输等级 A 的控制指令；保护带 1 占用 5 微秒；实时窗口占用 400 微秒，用于传输等级 B 的状态反馈和定位数据；保护带 2 占用 5 微秒；尽力而为窗口占用 280 微秒，用于传输等级 C 的监控数据；保护带 3 占用 5 微秒。总时间为 300+5+400+5+280+5 = 995 微秒，在 1 毫秒调度周期范围内。队列设计上，每个交换机端口配置 8 个优先级队列，队列 7 分配给等级 A，队列 5 至 6 分配给等级 B，队列 0 至 4 分配给等级 C。时间感知整形器的门控列表按照上述窗口划分配置，确保等时窗口期间只有队列 7 被打开，实时窗口期间队列 5 和 6 被打开。为应对突发流量，在队列 7 中配置基于信用的整形器作为补充。

3.4 端到端延迟分析

确定性设计的最终目标是保证端到端延迟的可预测性。端到端延迟由发送延迟、传播延迟、交换延迟和接收延迟四部分组成。发送延迟为数据帧从产生到进入 MAC 层的时间，与处理器性能和协议栈效率有关，可控制在 10 微秒以内。传播延迟为信号在介质中的传输时间，按 100 米双绞线计算约为 0.5 微秒。交换延迟是主要组成部分，包括存储转发延迟、队列等待延迟和门控延迟[3]。在 1Gbps 速率下，存储转发延迟与帧长成正比，最大为 12.3 微秒。队列等待延迟取决于流量的到达时间与门控窗口的匹配程度，通过调度优化可将平均等待延迟控制在半周期以内。

4 仿真验证与性能评估

4.1 仿真环境搭建

为验证设计的有效性，本文使用 OMNeT++ 仿真平

台搭建装卸系统控制网络模型。网络拓扑包含 1 台核心交换机、3 台接入交换机和 25 个终端节点，链路速率 1Gbps。配置时间感知整形器门控列表，周期 1 毫秒。注入的流量包括：10 条等级 A 流，周期 1 毫秒，帧长 64 字节；15 条等级 B 流，周期 5 毫秒，帧长 800 字节；5 条等级 C 流，采用泊松到达，平均间隔 10 毫秒，帧长 1500 字节。基准负载设为 60%，通过调整等级 C 流的发送强度模拟 70%、80%、90%三种高负载场景。仿真时长设定为 72 秒，记录每条流的端到端延迟、抖动和丢包率。对比方案为标准交换机先入先出队列调度，作为性能基准。

4.2 仿真结果分析

仿真结果表明，在不同负载条件下，基于时间敏感网络的设计均表现出优异的确定性性能。在 60% 负载时，等级 A 流量的最大端到端延迟为 265 微秒，平均延迟为 238 微秒，抖动标准差为 5.2 微秒，未发生丢包。先入先出方案下，等级 A 流量最大延迟达到 1.8 毫秒，抖动超过 200 微秒，部分关键帧超出截止时间。在 90% 高负载场景下，本文设计的等级 A 最大延迟为 312 微秒，仍满足 500 微秒的约束；先入先出方案中等级 A 流量的丢包率达到 0.3%，且延迟分布呈现长尾特征。等级 B 流量的性能同样优于对比方案，本文设计的最大延迟为 4.6 毫秒，而对比方案在 90% 负载时延迟超过 20 毫秒。等级 C 流量在两种方案中均未发生严重拥塞，但本文设计通过基于信用的整形机制保证了其在低优先级队列中的公平调度。

4.3 设计优化讨论

仿真结果揭示了若干优化方向。时钟同步精度直接影响门控调度性能，建议部署采用边界时钟模式而非透明时钟模式，以降低同步误差累积。门控列表周期与窗口分配需根据实际流量动态调整，未来可引入在线学习实现自适应调度。长距离传输场景应考虑光纤介质以降低传播延迟。冗余设计方面，建议在关键链路采用帧复制与消除机制提升可靠性[4]。实际装卸系统中存在电磁干扰、温度变化等环境因素，可能影响交换机处理性能，工程实施需预留足够设计余量。

5 基于 TSN 的装卸系统实时控制网络设计总结与应用

5.1 设计方案总结

本文针对装卸系统控制网络对确定性的需求，提出基于时间敏感网络的完整设计方案。分析通信特征后，将流量分三等级并配置差异化服务质量参数。采用 IEEE 802.1AS 实现纳秒级时钟同步，结合两种整形器调度策略，使关键控制流与时间窗口精准对齐。采用混合拓扑结构，时钟同步采用边界时钟模式，调度设 1 毫秒周期并划分三类窗口，保障等级 A 流量确定性传输。仿真显示，在 50% 网络负载条件下，该设计使运动控制指令端到端延迟在 320 微秒内，抖动小于 10 微秒，满足要求。

5.2 工程应用与推广价值

本设计为装卸系统网络化控制提供可行技术路径，工程应用前景良好。应用场景上，可直接推广至自动化仓库、港口码头等装卸作业场景，尤其适合多轴协同控制等对实时性要求高的场合。技术优势上，时间敏感网络采用开放标准，互操作性和扩展性好，兼容标准以太网设备，降低集成成本。确定性设计助力多轴协同控制，提升作业精度与效率。未来，随着相关技术成熟，该方案将推动装卸系统向无线、智能、协同方向发展。

结束语

装卸系统的智能化发展对控制网络的确定性提出了更高要求。本文引入时间敏感网络技术，从时钟同步、流量调度、资源预留三个维度开展了确定性网络设计。仿真结果表明，所提方案能够为关键控制流提供微秒级延迟和微秒级抖动的传输保障，有效解决了传统以太网的拥塞丢包和延迟不可控问题。该设计不仅适用于装卸系统，也可推广至机器人协同、数控加工等需要高精度同步的工业控制场景，为工业互联网时代的实时控制网络建设提供了参考。

参考文献

[1] 毛江尧. 面向矿用环境的 TSN 交换机关键技术研究 [J]. 煤矿机械,2026,47(1):236-240.

[2] 谭少飞, 杨银香, 王战孟, 等. 机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术 [J]. 兵工自动化,2025,44(8):24-28,51.

[3] 吴思宇. 时间敏感网络 TSN 在智慧电厂运维应用的可行性初探 [J]. 四川水力发电,2025,44(4):147-151.

[4] 董秋丽, 李静.5GTSN 融合发展和应用方案探索 [J]. 邮电设计技术,2024(1):88-92.