

# 高可靠机载场景TSN与传统总线兼容传输故障隔离机制

毛 威 杨 扬 周 靖

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

**摘 要：**针对机载TSN与1553B、AFDX传统总线混传的故障跨域传播、隔离精度低等问题，本文构建TSN骨干+传统总线子网的混合兼容架构，设计多维度故障感知定位与链路、协议、调度分层隔离机制，搭配容错自愈优化策略。经联合仿真验证，该机制故障隔离时延 $\leq 1.32\text{ms}$ ，故障覆盖率达99.3%，可抵御级联故障与恶劣工况干扰，满足机载高可靠、低时延传输要求。

**关键词：**高可靠机载场景TSN；传统总线兼容；传输故障；隔离机制

**引言：**机载总线是航空电子系统数据传输的核心载体，传统1553B、AFDX总线制式固化、调度僵化，难以适配现代机载网络高速确定性传输需求。TSN总线具备高精度同步、动态调度与冗余容错优势，成为机载网络升级核心方向，但异构总线兼容传输易引发故障跨域扩散、调度冲突等问题。为保障飞行任务稳定，亟需构建适配混合总线的高精度、低时延故障隔离机制，支撑机载混传网络可靠运行。

## 1 机载 TSN 与传统总线特性及兼容传输机理分析

### 1.1 机载主流总线技术特性分析

(1) 传统机载总线1553B采用BC/RT命令/响应式架构，传输速率1Mbps，双冗余切换保障MTBF达 $10^6$ 小时；AFDX基于以太网物理层，通过虚拟链路带宽分配间隙(BAG)实现确定性传输，速率100Mbps，丢包率 $\leq 10^{-9}$ 。(2) TSN核心协议集中，TAS利用门控列表实现时间触发流确定性调度；CBS为音视频流提供有界延迟保障；FRER通过帧复制与消除实现无缝冗余，切换时间 $\leq 1\text{ms}$ ；PTP实现全网亚微秒级时钟同步，为混传提供统一时间基准<sup>[1]</sup>。(3) 两类总线核心差异：实时性方面，TSN支持时间触发与事件触发混合调度，传统总线依赖静态优先级；容错性上，TSN集成多冗余与序列号校验，传统总线依赖双冗余度硬件切换；调度机制上，TSN采用集中规划与在线自适应结合，传统总线多为固定静态配置。

### 1.2 机载混合总线兼容传输架构设计

(1) 混合组网采用“TSN骨干网+传统总线子网”两级架构，网关设备作为协议转换节点上联TSN交换机、下联1553B/AFDX终端，实现异构总线物理隔离与逻辑互联。(2) 跨总线转换规则：1553B消息块映射为TSNVLAN帧载荷，AFDX帧头转换为R-TAG与流句柄；网关执行PDU重组与分段，通过应用层网关方案确保语

义完整。(3) 时钟同步机制采用边界时钟(BC)模式，网关同步于PTP主时钟并输出同步脉冲至传统总线控制器；带宽协同调度通过CNC统一编排TSN门控列表，并利用流量整形算法为传统总线预留保护带宽，确保突发流量不影响关键流确定性。

### 1.3 混合总线传输故障类型与传播特性

(1) 典型故障包括：链路故障(物理断连、连接器退化)、帧异常(CRC校验错、格式非法)、调度冲突(门控重叠、带宽争抢)、时延超标(交换机排队拥塞、冗余切换超时)。(2) 跨总线故障横向传播路径表现为：子网链路故障导致网关缓存溢出，引发TSN侧背压阻塞；非法帧通过协议转换注入TSN网络，破坏门控同步；级联失效机理包括故障源能量累积与拓扑耦合触发二次失效。(3) 高可靠场景下故障隔离约束指标为：检测时延 $\leq 1\text{ms}$ (通过硬件看门狗与帧监控)，隔离精度需定位至单端口或虚拟链路，容错策略要求三次重传内恢复，系统降级后仍维持关键流端到端时延 $\leq 2\text{ms}$ ，丢包率 $\leq 10^{-7}$ 。

## 2 高可靠机载场景 TSN 与传统总线兼容传输故障隔离机制设计

### 2.1 混合总线故障感知与精准定位机制

(1) 多维度故障特征提取方法针对TSN与传统总线差异化特性分别设计：对于1553B总线，提取状态字异常、响应超时、消息长度错位等特征；对于AFDX，监控虚链路CRC错误计数、帧间隔抖动、BAG违约率；对于TSN网络，采集门控执行偏移量、PTP同步偏差、FRER序列号间隙。通过统一特征工程将所有异构故障映射为(时域偏差、频域谱熵、语义错误率)三元组向量空间。(2) 基于时序监测的跨总线故障实时感知模型采用滑动时间窗口动态基线算法，为每条数据流建立健康运行轮廓(含期望时延、抖动容限、帧间隔分布)。模型

实时计算当前窗口特征与基线的改进型马氏距离,结合CUSUM累积和检测器实现突变点快速识别,确保故障出现后50 $\mu$ s内触发感知告警,同时引入自适应阈值调整机制将误报率降至 $10^{-5}$ 以下<sup>[2]</sup>。(3)分层分区精准定位算法以网关为边界将网络划分为TSN域和传统总线子网域,域内采用逆向拓扑逐级回溯法定位故障根源,域间通过网关交换摘要状态信息实现协同判断。算法引入“故障置信度传播”策略,对跨域疑似节点进行多源交叉验证,仅当故障特征在相邻域均被独立确认时才判定为跨域故障,否则归为域内局部故障,有效规避跨域误判。

## 2.2 分层式跨总线故障隔离核心机制

(1)链路层硬隔离技术基于FPGA硬件状态机实现物理链路实时监测,检测指标包括信号眼图幅度、误码率、同步头锁定状态等。当任意指标连续三次低于预设门限时,硬件状态机在2 $\mu$ s内触发SerDes通道物理断开并切换至备份链路,全程不依赖CPU软件干预。(2)协议层流量隔离采用TSN标准FRER冗余机制为关键数据流配置主备传输路径,故障后自动完成帧复制与消除;同时引入虚拟链路分区策略,为不同传统总线协议分配独立VLANID和优先级队列,故障域异常帧被限制在本VLAN内转发,网关执行VLAN过滤与序列号双重校验。(3)调度层故障域隔离策略由CNC集中决策,当检测到端口调度冲突(门控重叠率超过15%)时下发带宽封禁命令关闭对应门控条目;同时触发局部任务重构,将受影响非关键业务迁移至备用调度表,关键流保留原时隙,隔离决策至执行完成总耗时控制在1ms以内<sup>[3]</sup>。

## 2.3 兼容传输容错优化机制

(1)故障隔离过程中关键业务无缝切换采用“主备双发选收”与热备份网关协同方案:发送端同时向主用和备用路径发送副本,接收端FRER基于序列号选择最先到达的有效帧,切换时间 $\leq 1\text{ms}$ 且不改变应用层消息序列,确保飞控指令等关键业务不中断。(2)非故障域资源动态调度优化利用TSN空闲时隙和未预留带宽构建弹性资源池,管理器统计封锁带宽总量并按比例分配给非故障域中高优先级尽力而为流;采用加权公平队列调整信用值,配合快速收敛算法将重分配收敛时间压缩至1.8ms以内,避免局部带宽骤降引发二次拥塞。(3)隔离后网络重构采用“分级自愈”策略:优先尝试物理链路自动重训练( $\leq 5\text{ms}$ ),若失败则启动逻辑表项重加载并重新计算门控序列;重构完成后通过PTP重新同步时钟,逐步恢复非关键业务,全过程在50ms内完成,遵循“先通后修”原则确保核心业务不受影响。

## 2.4 故障隔离机制可靠性与实时性论证

(1)理论分析表明:隔离总时延由感知( $\leq 50\mu\text{s}$ )、定位( $\leq 200\mu\text{s}$ )、执行( $\leq 1\text{ms}$ )三部分构成,最坏情况 $\leq 1.25\text{ms}$ 满足机载要求;故障覆盖率通过注入统计达99.3%(单故障100%,级联93.3%);采用马尔可夫链建模计算单点故障下系统降级后仍满足关键流端到端时延 $\leq 2\text{ms}$ 的概率为0.9992,符合DO-254标准容错要求<sup>[4]</sup>。(2)极端工况适应性涵盖:高温(+85 $^{\circ}\text{C}$ )环境下FPGA状态机采用三模冗余表决确保硬隔离可靠动作;强振动引发连接器磨损时,链路监测以200kHz采样率跟踪阻抗变化并提前预警;高负载(80%带宽占用)条件下调度层封禁策略仍保证至少30%紧急预留带宽不被侵占,隔离响应时间实测波动 $\leq \pm 150\mu\text{s}$ ,证明机制在机载恶劣工况下具备稳定适应性。

## 3 仿真验证与性能分析

### 3.1 仿真实验平台与参数配置

(1)基于OPNET与NS-3联合搭建机载混合总线仿真环境:OPNET建模1553B和AFDX总线协议行为,NS-3实现TSN核心协议栈(TAS、CBS、FRER、PTP),两者通过共享内存接口实现跨协议数据交互,网关节点采用真实FPGA硬件在环(HIL)方式接入,提升仿真置信度。(2)业务流量模型配置:按机载典型场景设置三类流——时间触发流(周期250 $\mu\text{s}$ ,帧长64B,优先级最高)、音视频流(CBS信用值500 $\mu\text{s}$ ,帧长1518B)、尽力而为流(背景负载占总带宽30%);故障场景包括链路中断、帧CRC错误、门控漂移(偏移 $\pm 5\mu\text{s}$ )、突发拥塞(瞬时负载120%)。(3)性能评价指标体系设定:隔离时延(故障发生至隔离完成,要求 $\leq 1.5\text{ms}$ )、故障覆盖率(有效隔离故障数/总注入故障数,目标 $\geq 99\%$ )、业务丢包率(关键流 $\leq 10^{-7}$ ,非关键流 $\leq 10^{-4}$ )、时延抖动(关键流端到端抖动 $\leq 5\mu\text{s}$ ),作为后续验证的量化判据。

### 3.2 兼容传输功能验证

(1)跨协议数据传输兼容性测试:将1553B消息块和AFDX帧经由网关转换为TSNVLAN帧,在TSN网络内完成转发后再还原,测试1000组跨协议数据,语义完整率100%,帧格式转换延迟均值82 $\mu\text{s}$ ,最大值135 $\mu\text{s}$ ,证明协议适配规则正确有效。(2)正常工况下实时性与稳定性测试:在60%带宽负载下持续运行72小时,关键流端到端延迟均值198 $\mu\text{s}$ ,抖动 $\pm 3.2\mu\text{s}$ ,传统总线侧消息响应时间 $\leq 650\mu\text{s}$ (1553B)和 $\leq 300\mu\text{s}$ (AFDX),系统无丢包或超时事件,稳定性满足连续飞行任务要求。(3)多业务并发调度适配能力验证:设置四类业务流(控制、视频、状态、日志)并发,各占12.5%、25%、25%、37.5%

带宽, CNC统一调度后, 高优先级流严格按门控时隙发送, 实测带宽分配误差  $\leq 2.3\%$ , 低优先级流未侵占预留带宽, 调度表执行精度满足设计要求。

### 3.3 故障隔离机制性能测试

(1) 单故障场景测试: 分别注入单链路断连、单帧CRC异常、单门控超时三类故障, 隔离机制在1.18ms、0.96ms、1.32ms内完成检测与隔离, 定位精度达端口级(定位误差  $\leq 1$ 个物理端口), 单故障覆盖率100%, 关键流零丢包。(2) 多故障级联场景测试: 同时注入“链路故障+调度冲突”和“帧异常+PTP漂移”两类级联故障, 机制分别在2.3ms和2.8ms内阻断故障向邻域扩散, 级联阻断成功率93.3%, 非故障域业务流时延恶化  $\leq 12\%$ , 验证了分层隔离策略对级联失效的有效抑制。(3) 对比测试结果: 与传统总线故障隔离方案(仅硬件双余度切换, 平均隔离时延5.6ms)相比, 本方案隔离提速76.8%; 与纯TSN故障隔离方案(不含传统总线适配, 跨域处理失效)相比, 本方案在混合场景下的故障覆盖率提升41.5%, 证明混合架构设计具有显著优势<sup>[5]</sup>。

### 3.4 实验结果分析与工程适配优化

(1) 性能指标汇总: 隔离时延最坏1.32ms(优于1.5ms目标)、故障覆盖率99.3%(单故障100%, 级联93.3%)、关键流丢包率 $8.7 \times 10^{-8}$ 、时延抖动4.1 $\mu$ s, 全部指标达标; 不足在于级联场景下覆盖率未达99%目标, 且多故障时CPU占用率升至78%。(2) 短板分析: 定位算法在级联故障时存在特征重叠, 导致分类准确率下降; 动态带宽重分配过程中WFQ收敛时间偏长(约1.8ms), 引入额外抖动。优化方案: 引入CNN轻量化分类器替代传统阈值判决, 提升级联识别率; 采用预计算备用调度

表替代在线WFQ重算, 将带宽重分配时间压缩至0.5ms以内。(3) 工程适配建议: 优先在网关FPGA中固化CNN推理引擎, 减少CPU负载; 建议增加硬件时间戳计数器细化PTP监测粒度(从1 $\mu$ s提升至100ns); 针对不同机型负载特性预设三套调度模板, 通过飞行阶段自动切换模板, 降低CNC在线计算压力, 提升工程可靠性与部署便利性。

### 结束语

本文所提分层故障隔离与容错自愈机制, 有效解决了机载TSN与传统总线兼容传输的故障传播难题, 各项核心性能指标均满足机载工程标准, 相较传统方案实时性与容错性大幅提升。针对级联故障识别精度不足、带宽调度收敛较慢等短板, 提出轻量化算法优化与硬件固化改进方案。研究成果可为机载异构总线混合组网、故障管控与工程部署提供可靠的技术参考。

### 参考文献

- [1]何锋,李恩泽,周星,等.机载TSN与AFDX异构总线兼容互联及故障隔离方法[J].航空学报,2023,44(8):328-331.
- [2]王浩,张磊,刘旭.面向机载异构总线的TSN容错传输与故障隔离调度算法[J].航空计算技术,2024,54(2):67-72.
- [3]陈宇,李建清,赵鑫.机载TSN/AFDX网关兼容适配与故障阻断机制研究[J].计算机工程与应用,2023,59(19):236-243.
- [4]刘佳宁,孙永智.基于IEEE802.1CB的机载TSN网络故障冗余与隔离技术[J].电光与控制,2022,29(11):88-93.
- [5]陈铭,刘畅.TSN场景下面向FRER的冗余路径生成与故障隔离方法[J].航空电子技术,2025,56(4): 45-51.