



时间敏感网络中的冗余机制研究综述

彭紫梅^{1,2,3}, 寿国础^{1,2,3}, 郭梦杰^{1,2,3}, 刘雅琼^{1,2,3}, 胡怡红^{1,2,3}

- (1. 先进信息网络北京实验室, 北京 100876;
2. 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876;
3. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 许多网络应用, 如工业控制、自动驾驶等对网络的可靠性要求很高, 时间敏感网络(TSN)是基于标准以太网架构演进的新一代网络技术, 包含了可靠性的帧复制和消除(FRER)的冗余机制。首先对 TSN 标准中的冗余机制进行阐述, 包括发展过程、相关标准和研究现状, 然后对 TSN 中的空间冗余与时间冗余机制进行分类阐述与分析, 最后对时间敏感网络的冗余机制的未来发展和应用场景做出展望, 提出一些启发性的研究方向和思路。

关键词: 时间敏感网络; 可靠性的帧复制与消除; 复制帧的主动传输; 可靠性; 工业互联网

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023159

A survey on redundancy mechanisms in time-sensitive networking

PENG Zimei^{1,2,3}, SHOU Guochu^{1,2,3}, GUO Mengjie^{1,2,3}, LIU Yaqiong^{1,2,3}, HU Yihong^{1,2,3}

1. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing 100876, China
2. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing 100876, China
3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Many network applications, such as industrial control and automatic driving, have high requirements for network reliability. Time-sensitive networking (TSN) is a new generation of network technology based on the evolution of standard Ethernet architecture, including the frame replication and elimination for reliability (FRER). Firstly, the redundancy mechanism in TSN standard was described, including the development process, relevant standards and research status. Secondly, the spatial redundancy and time redundancy mechanisms in TSN were classified and analyzed. Finally, the future development and application scenarios of the redundancy mechanism in TSN were prospected, and some inspiring research directions and ideas were put forward.

Key words: TSN, FRER, PTRF, reliability, industrial Internet

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-08-08

通信作者: 彭紫梅, zmpeng@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.92067102)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.92067102)



0 引言

从工业控制到自动驾驶,现代安全关键系统由众多互连组件组成,如传感器、执行器和控制器,这些组件分布在系统中,需要可靠、高效且对时间敏感的通信服务才能协同运行。在传统行业应用领域中,通过定制的网络设备和专用协议来满足上述要求,由于缺乏通用网络设备和协议,不同的网络之间难以相互通信^[1]。为了解决这个问题,IEEE 802.1 工作组提出了时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN),使得标准以太网具有确定性传输的能力与互操作性优势^[2-5]。TSN 由一系列技术标准构成,引入了多种新的功能组件,如时间同步、流量调度、系统配置等^[6-9]。为了提高网络可靠性,在 TSN 系列标准中,引入了可靠性的帧复制和消除(frame replication and elimination for reliability, FRER)机制^[10]。

本文对 TSN 中提供高可靠无缝冗余能力的机制进行研究,旨在从可靠性方面为从事时间敏感网络与确定性网络的研发人员提供参考。本文介绍了冗余机制的发展,并对 TSN 中的冗余机制原理和相关标准及其研究现状进行了详细阐述,对冗余相关机制按照分类进行叙述,分析了不同的冗余机制的优缺点,以及冗余机制的发展挑战,最后对时间敏感网络的冗余机制的未来发展和应用场景做出展望,包括一些启发性的研究方向和思路。

1 TSN 标准中的冗余机制

本节主要围绕 TSN 中的 FRER 机制进行阐述。

1.1 FRER 发展过程

传统上,信道中的临时故障通过时间冗余解决^[11],即通过消息重传来解决。在数据网络的特殊情况下,重传通常基于自动重传请求(automatic repeat request, ARQ)技术^[12],它依赖于肯定应答/否定应答(acknowledgement/negative acknowledgement, ACK/NACK)消息,以便在帧丢

失时触发帧的重新传输。然而,这种技术并不适合实时(real time, RT)高可靠性工业网络。首先,由于临时故障^[13]的随机性,ARQ 解决方案在端到端时延和带宽消耗方面是不确定的。其次,当网络中的数据需要重传时,帧的端到端时延会显著增加,这会导致通信中引入很高抖动。再次,因为临时故障也会影响 ACK/NACK,所以 ARQ 解决方案还可能会引入额外导致故障的场景^[14],最后,当网络传输时间触发(time trigger, TT)流量^[15-16]时,调度必须处理涉及临时故障的最坏情况,从而会导致更多的资源消耗,因为除了帧重传,还必须调度 ACK/NACK,ARQ 解决方案进一步恶化了带宽的利用效率。

当前存在着大量的冗余协议,如生成树协议(spanning tree protocol, STP)、快速生成树协议(rapid spanning tree protocol, RSTP)、媒体冗余协议(media redundancy protocol, MRP)等冗余协议是专门为工业应用领域设计的。这些冗余协议有一个共同的原则,即网络中的冗余是通过增加额外的物理连接来实现的,从而导致物理网络拓扑结构中存在环路。对于以太网来说,由于其固有的广播特性,这些环路可能导致网络风暴等问题,从而影响网络性能。冗余协议的原理是通过在逻辑上阻塞冗余路径来消除物理网络拓扑中的环路,从而得到一个物理拓扑存在环路但逻辑上无环路的逻辑网络拓扑。如果网络中发生错误,冗余协议检测到错误后,会通过打开先前阻塞的端口启用备用路径,从而实现传输路径的切换,达到通过备用冗余链路实现网络容错的目的。这种方法的固有特点是在问题发生和切换到备用路径之间,通信将会中断一段时间。而对于时间敏感的关键型任务应用来说,必须要消除故障情况下引起的通信中断,即实现无缝冗余。并行冗余协议(parallel redundancy protocol, PRP)是一种静态网络冗余机制^[17-18],可以补偿任何单个网络故障。作为一种主动冗余方案,它不需要重新

配置网络,并提供无缝故障转移。它通过在两个并行运行的独立网络上复制数据包来实现主动网络冗余,专为工业网络而设计,可满足最高可用性要求,可以在单个网络故障的情况下,为连接到两个网络的 PRP 节点之间的数据通信提供无缝冗余。高可用性无缝冗余 (high availability seamless redundancy, HSR) 协议^[19]遵循在不同路径上进行帧复制的 PRP 原则,通过使用环形拓扑应用帧复制原理进行无缝冗余,每个 HSR 设备的两个局域网端口将所有设备互连到环形网络,每个端口将同一帧的两个副本在环中双向发送,两个帧以相反的方向传输,环中除了接收节点,每个节点都转发帧。在环的无故障状态下,每个目标节点接收两个相同的帧,将先到达的第一个帧传递到其上层并丢弃之后到达副本,如果由于链路或节点故障而丢失帧,仍然会有另一个副本帧到达目标节点,目标节点上的应用程序能够保持无缝运行。

2017 年 10 月,IEEE 802.1CB-2017 标准正式发布,标准中规定了网桥和端系统的程序、管理对象和协议,为冗余传输提供数据包的识别、复制和消除功能。IEEE 802.1CB 是 TSN 协议族中唯一通过冗余路径发送相同数据包来提高网络可靠性的协议,可防止链路或节点故障导致的数据包丢失。标准中定义了 FRER,FRER 能够兼容工业容错架构,如 HSR 协议和 PRP,并且对于那些对数据传输时间敏感的应用,如工业自动化系统、自动驾驶等,由于这些应用对网络的可靠性和实时性要求非常高,即在网络级别,消息必须按时传递,故障不得影响通信;在节点级别,任务必须在截止日期之前完成^[20],并且故障不得影响执行。对于这些应用,仅仅容忍通信子系统中的故障是不够的,还必须容忍节点故障^[21-22]。传统的冗余解决办法^[23]已经难以满足需求,时间敏感网络中的 FRER 机制可以实现对时间敏感的应用程序的无缝冗余。

1.2 FRER 相关标准

FRER 作为 TSN 容忍链路和节点故障的主要解决方案,是时间敏感网络中提高可靠性的一种关键技术。在 IEEE 802.1CB 标准中,通过在网络的源端系统和中继系统中对每个包进行序列编号和复制,并在目标端系统和其他中继系统中消除这些复制帧,为以太网提供无缝冗余特性,从而提高可靠性。其中可靠性是指从系统启动到特定时间点的正确操作概率^[24],它从空间冗余方面提供了可靠性和容错性的保证,可用于遏制网络中的桥接错误,并创建冗余路径以容忍可能出现的链路失效等永久性故障。FRER 的标准化进程如图 1 所示。

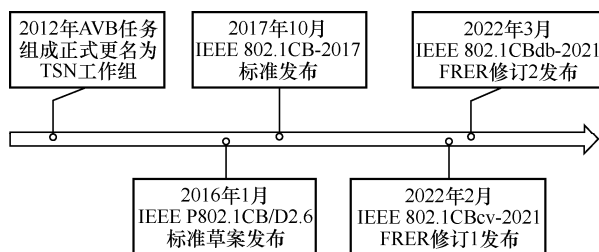


图1 FRER 的标准化进程

FRER 的主要工作过程:通过源节点(即 TSN talker)的不同路径复制流;消除中继节点或目标节点(即 TSN listener)上每个流的副本数据包。FRER 的工作原理如图 2 所示,3 条路径用来传输成员流,其中两条用于冗余。在图 2 中,目标节点和转发两个成员流的中继节点都可以丢弃复制数据包。

通常,源节点执行以下几种功能。

(1) 序列生成:对于流的每个数据包,将生成一个序列号,并在同一流中的每个数据包之后递增。

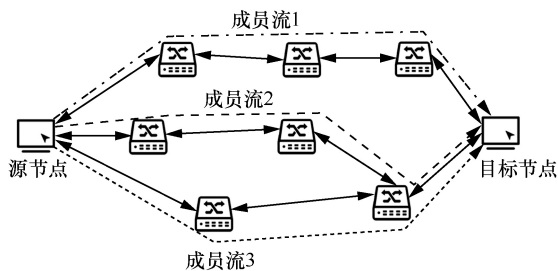


图2 FRER 的工作原理



(2) 流拆分: 为流中的每个数据包生成 k 个副本, 然后通过 k 个不同的路径转发, 即划分为成员流。

(3) 序列编码: 生成的序列号将分配给每个数据包, 以便对每 k 个副本使用相同的编号, 它存储在以太网帧的冗余标签 (R-TAG) 中。

目标节点或中继节点执行以下几种功能。

(1) 流识别: 它标识收到的数据包属于哪个流, 以便使用与该流关联的排序信息, 可以使用空流识别方法 (使用目标 MAC 地址和虚拟局域网 (virtual local area network, VLAN) ID 来区分流)。

(2) 序列解码: 在解码中, 提取接收数据包中的序列号, 以便与流识别的序列信息进行比较。

(3) 序列恢复: 使用排序信息和解码编号, 目标节点或中继节点选择丢弃或接收数据包。

通过这些操作, 数据包可以在网络中进行复制传输, 并且在目标节点的接收端进行消除。

IEEE 802.1Qca 路径控制与保留 (path control and reservation, PCR) 是一种中间系统到中间系统 (intermediate system to intermediate system, IS-IS) 协议, IEEE 802.1Qca 通过在网络中配置多条路径的方式, 允许 IS-IS 协议扩展支持最短路径桥接功能的网络^[25]。IEEE 802.1Qca 旨在为数据流提供明确转发路径控制所需要的控制协议, 即预先为每个流设置了预定义的保护路径、带宽预留、数据流冗余 (包括保护和恢复) 以及流同步和流控制消息的控制参数分布, 结合 IS-IS 协议和最短路径路由 (shortest path routing, SPR) 方法计算数据传输路径^[26]。结合 IEEE 802.1Qca 和 IEEE 802.1CB 协议, 即使当网络连接中发生端到端链路故障时, 也能不造成任何重大中断, 文献[27-28]比较了两种方法: 解耦流保留和冗余、协调流保留和冗余。在解耦方法中, 流保留协议和独立于冗余协议, 即允许使用任意的冗余协议来实现转发路径的控制; 而协调方法中则集成了流保留协议和冗余协议, 即 IEEE 802.1Qca 和 IEEE 802.1CB

协议相耦合。

IEEE 802.1Qcc 协议描述了 3 种不同的用户/网络配置模型, 从而对网络资源进行合理的配置和管理, 以保证网络中的数据包能够按照预期正常运行。

在 TSN 中, 每个标准定义一个服务, 不同的标准所能实现的功能不同, 这些标准可以组合在一起, 以创建满足各种应用要求的定制网络。IEEE 802.1Qca 标准允许建立多个冗余逻辑路径连接想要通信的节点, IEEE 802.1CB 允许在 IEEE 802.1Qca 创建的逻辑路径之上创建冗余流。此外, IEEE 802.1Qca 还允许在网络设备发生故障时建立新的逻辑路径, 从而减少冗余损耗。并且当存在多个活动路径时, 这种重新配置将会无缝完成。换句话说, TSN 标准中的冗余机制主要通过信息冗余 (帧副本) 和路径冗余 (多路径) 来实现无缝冗余^[29]。

1.3 FRER 相关研究

FRER 协议本身通过空间冗余的方法能够提高网络容错能力, 但是大多数与 FRER 冗余路由规定相关的文献和标准都考虑在源节点复制 MAC 帧并在目标节点上消除它们, 这相当于端到端保护, 对于整个网络而言, 仅考虑端到端保护是不够的。许多相关研究考虑了其他方面, 文献[30]提出了一种路由模型和启发式方法, 用于计算每个复制流的源和目标之间的不相交路由路径, 以避免数据包丢失, 但它没有考虑资源效率, 这导致了大量带宽和路由器端口的浪费。文献[31]首先联合考虑了 FRER 路由的可靠性和资源效率, 提出了多目标路由优化的扩展。但是, 由于端到端保护, 仍然存在一定的资源浪费。文献[32]中首先提出了一个可靠性评估模型来描述一个流的可靠性, 然后设计基于分段帧复制与消除可靠性 (segment frame replication and elimination for reliability, S-FRER) 的冗余路由方案, 在满足可靠性要求的前提下压缩网络冗余, 文中考虑为流提供分段冗余路径, 而不是端到端路径, 其中“分段保护”是通过选择复制和消除节点并在它们之

间计算冗余路由获得的。文献[33]提出了一种称为多级联预配置周期 (multiple cascaded preconfigured cycle, FRER-MPC) 的方法, 为 TSN 中的 FRER 机制找到两条优化路径, 用于传输时间敏感网络中的重复帧。所提出的 FRER-MPC 机制由 3 个部分组成: 基于链路优先级模型的工作路径计算、基于多级联预配置周期 (pre-configured cycles, P-Cycles)^[34]的冗余路径计算以及选择 FRER 节点进行帧复制和消除, 仿真结果显示, 所提出的 FRER-MPC 机制在增加带宽消耗的同时提高了路径可靠性。文献[35]提出了 FRER 的云化问题, 即将 FRER 与云基础架构集成, 从而使 FRER 的功能可通过云支持系统进行完全编排、管理和自动化, 以及通过与现有云构建块的无缝操作组合和扩展 FRER。文献[36]指出了 FRER 的数据消除机制存在的缺陷, 当使用非不相交冗余路径时, 可能会导致目的地丢失数据包, 文中提出了一种新的图形度量, 用于在给定的端点之间找到最大化故障容错的冗余路径。此外, 它还提出了一种增强 FRER 序列恢复的方法, 以防止与实验场景无关的意外数据包被错误消除。文献[37]提出了利用河床仿真框架评估同时支持时间特性和冗余管理的 TSN 仿真模型, 此外, 还引入了故障注入模型来评估基于 FRER 和不同故障的 TT 通信的可靠性 (如违反端到端截止时间和丢包), 并且评估 FRER 模块对不同场景下每个流的可靠性的影响。这些都是对 TSN 的冗余机制进行更进一步的研究, 以提高网络可靠性的同时, 对网络资源进行合理利用。

对于冗余机制应用的相关研究, 文献[38]提出音频视频桥接 (audio video bridging, AVB) 技术已被设想用于其他应用领域, 如家庭娱乐系统, 但是 AVB 在工业自动化解决方案中的潜在用途所需的几个方面未包含在标准中, 其中一个重要方面是使用冗余通信路径提高容错能力, 文中提出一种利用 AVB 实现冗余的方法以应用于工业自动

化网络; 文献[39]提出一种在舵系统存在未知故障情况下潜艇半物理仿真系统的故障诊断与主动容错控制一体化设计, 针对未知的方向舵系统故障设计一个主动容错控制器, 并且通过仿真实验结果验证了所提容错控制方法的有效性。还有一些为了满足车载网络中的高可靠性要求的研究, 例如, 为了解决车载网络 (in-vehicle network, IVN) 中的单路径^[40]及其扩展到多路径 (即容错) 的数据包调度和路由问题, 文献[41]提出同时考虑 FRER 标准和时间感知整形器 (time-aware shaper, TAS) 的基于容错的动态调度和路由启发式方法。文献[42]为了实现基于以太网的 IVN 的可靠性, 开发了静态应用的容错联合调度和路由, 容错调度和路由问题被表述为混合整数规划模型, 并使用 CPLEX 优化器求解。此外, 还开发了一种基于布谷鸟搜索的元启发式方法, 以实现可扩展的调度解决方案。文献[43]提出一种面向车载网络的集成 FRER 的小规模网络拓扑和大规模流量模型的启发式调度算法, 算法中引入 FRER 机制, 以确保关键数据流的可靠传输。将时间敏感网络中的 FRER 方案与 5G 无线通信集成在一起, 有助于提高整体 5G 可靠性性能。文献[44]在边缘控制自主移动机器人用例中验证了 FRER 用于 5G 通信的性能优势。文献[45]提出一种新的调度器, 称为可靠作业分配调度器 (reliable job allocation scheduler, RJA), 通过将 FRER 技术应用于调度程序中, 例如在无线系统中的作业分配问题中, 调度程序使用 FRER 方法, 通过冗余路由复制通信流, 以提高实时无线系统的可靠性, 并将 RJA 与最先进的 TT 调度程序进行了比较, 实验结果表明, RJA 的系统可靠性优于其他调度器, 并且同时保证了网络设计的可扩展性和时效性。

2 空间冗余与时间冗余

本节主要对 TSN 中的冗余机制进行分类阐述, 分别是空间冗余、时间冗余以及混合冗余,



即将空间冗余和时间冗余同时应用于网络中。TSN 标准中提供了空间冗余机制以提高网络可靠性,并且有关 TSN 中时间冗余机制研究的文章也已经被陆续发表。

2.1 空间冗余

空间冗余机制通过在网络中增加额外的链接,使得网络中从源端到目的端之间可以存在多条路径,提高了网络的复杂度,但是网络可靠性得到了保证,TSN 中的 IEEE 802.1CB-FERE 协议描述了空间冗余机制,其中包括对关键流进行复制,然后通过不同的物理路径并行传输每个副本,IEEE 802.1Qca 协议描述了如何在通信的节点之间创建多条路径。

FRER 是一种数据包传输机制,它通过在网络中对数据包进行多次复制和传输,以提高数据包的传输成功率。具体来说,当一台设备发送数据包时,数据包会被多次复制,并且每一份复制包都会被发送到网络中的不同节点。这些节点包括交换机、路由器等网络设备。每个节点都会根据自己的转发表,将数据包转发到接收方设备。当接收方设备收到多个数据包时,它会进行数据包的去重,只留下其中一份。这样可以保证在网络中的某些节点出现问题时,仍然有数据包能够到达接收方设备。

需要注意的是,帧复制和消除技术并不是简单地对数据包进行复制,而是需要进行一定的控制和调节,以保证网络的正常运行。例如,对于同一个数据包的多份复制品,需要对它们进行编号和时间戳等信息的添加,以保证接收方设备可以正确地去重和重组数据包。同时,需要对复制的数量进行控制,避免网络中出现过多的冗余数据包,导致网络拥堵和带宽浪费。

2.2 时间冗余

TSN 中的时间冗余是通过复制帧的主动传输(proactive transmission of replicated frame, PTRF)实现的,PTRF 并不是在 TSN 标准中定义的时间冗

余机制,实现 PTRF 的方法在文献[46]中被提出,对于关键流的每个帧通过同一路径主动重传,即一个帧的多个副本的主动传输,副本是指复制的帧,主动帧冗余发送多个消息的副本,以确保即使在存在暂时性故障的情况下也至少有一个副本能够传递给接收端。要传输的副本数量在很大程度上取决于帧丢失概率、可靠性要求和所选的实现冗余的方法。与空间冗余不同,PTRF 不需要额外的链路,并且 PTRF 比 ARQ 解决方案更适合工业网络,首先,PTRF 在时间和带宽消耗方面是确定的,这对于 TT、RT 流量特别重要;其次,主动复制引入较少的抖动,这是因为帧副本之间的时间间隔与帧间间隙一样短;最后,在最坏的情况下,端到端时延和所需的带宽比 ARQ 更低,这是因为 PTRF 不依赖于额外的消息(ACK/NACK)来触发重传。依赖于主动帧复制来容忍链路中临时故障的协议和系统的例子有:面向通用对象变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)传感器协议^[47]、多元自适应回归样条(multivariate adaptive regression spline, MARS)方法^[48]和灵活时间触发复制星(flexible time-triggered replicated star, FTTRS)网络架构^[49]等。

在 TSN 标准中,一般采用空间冗余方式来容忍链路故障。事实上,由于电磁干扰等外在原因,通信信道更容易发生临时故障。一般来说,空间冗余适合容忍永久性故障,但并不是容忍临时故障的好的解决方案^[50]。时间冗余机制则更适合于容忍链路临时故障,实现时间冗余通常有 3 种方法^[51-52],它们在执行复制的设备(终端、网桥)以及处理副本的方式上彼此不同,下面将详细描述 3 种方法的设计原理。

2.2.1 方法一:端到端估计与复制

只有终端系统实现 PTRF,即只有终端系统在传输过程中复制帧,并在接收时消除多余的副本。网桥是标准 TSN 网桥,只需转发它们接收的所有正确帧。终端系统需要传输的复制副本数量是使

用帧丢失概率的端到端最坏情况估计来决定的, 对于整个路径, 副本的数量是确定的, 终端系统负责复制和发送所有帧, 而网桥只转发它们接收到的每一个副本。就带宽而言, 这种方法的效率比较低, 因为需要传输的副本数量比直接传输多。

PTRF 机制在链路出现临时故障时的端到端估计与复制示意图如图 3 所示, 有一个发送端、一个接收端和两个 TSN 网桥, 它们由 3 条链路 (Link1、Link2、Link3) 连接, 形成网络传输拓扑。发送端传输某个帧的 3 个副本 (R 、 R' 、 R'')。第一个 TSN 网桥接收并转发了该帧的 3 个副本, 然而, 副本 R'' 受到链路 Link2 临时故障的影响, 导致副本 R'' 丢失。因此, 第二个 TSN 网桥只转发正确接收到的副本 R 和 R' 。在此之后, 一个临时故障影响链路 Link3 中的副本 R' , 导致副本 R' 丢失, 但最后仍有该帧的一个副本 R 能够正确地到达接收端, 并将其交付给应用程序。

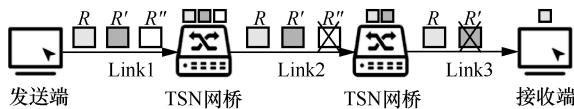


图3 PTRF 机制在链路出现临时故障时的端到端估计与复制示意图

2.2.2 方法二: 端到端估计与链路复制

终端系统和网桥都实现了 PTRF, 即所有网络设备在传输过程中都复制帧, 并在接收时消除多余的副本。与方法一相同, 此方法也使用帧丢失概率的端到端最坏情况估计来决定整个网络的副本数量 K 。但是与基于端到端复制不同, 使用基于链路的方法, 只要有一个副本到达网桥, 每个网桥就会传输 K 个副本, 这种复制机制需要在网络中的所有网桥和终端节点中实现, 当接收到一个正确的副本时, 网桥将丢弃所有其他副本, 并通过相应的端口传输 K 个新的副本。

PTRF 机制在链路出现临时故障时的端到端估计与链路复制示意图如图 4 所示, 网络拓扑与图 3 所示相同, 但是网络的行为不同。具体来说,

即使 R'' 在链路 Link2 上因为故障丢失, 网桥也会通过链路 Link3 传输 3 个新的副本。这是因为网桥只保留它们接收到的第一个正确副本, 然后会丢弃剩余的副本, 并且在传输过程中重新创建一组新的副本。同样, 副本 R' 受到链路 Link3 中故障的影响而丢失, 接收端仍然可以接收到两个副本, 并且接收端会先接收副本 R'' , 将其传递给应用程序, 并丢弃副本 R 。

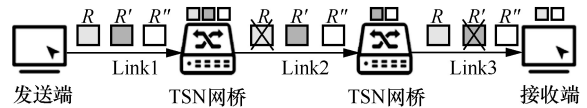


图4 PTRF 机制在链路出现临时故障时的端到端估计与链路复制示意图

2.2.3 方法三: 链路估计与复制

终端系统和网桥也都实现了 PTRF, 与方法二相同, 即终端站和网桥都在传输过程中复制帧, 并在接收时消除副本。但是, 传输过程中所经过的网桥需要传输的副本数量并不是固定的, 网桥转发的帧数量需要根据转发链路的帧丢失概率而变化。因此, 每个设备可以传输不同数量的副本。

PTRF 机制在链路出现临时故障时的链路估计与复制示意图如图 5 所示, 场景和图 3、图 4 相同, 但是网桥传输的副本数量是不同的, 发送端通过链路 Link1 传输了 3 个副本, 此时即使网桥正确接收了所有副本, 它也只通过链路 Link2 传输两个副本, 因为需要传输的副本数量是基于链路估计的, 并不是固定的。同样, 副本 R' 受到链接 Link2 中的故障的影响而丢失, 但是网桥会再次基于链路计算应该传输的副本数量, 图 5 中显示会重新传输 3 个副本, 这样即使副本 R'' 受到故障影响, 接收端仍然可以接收副本 R 和 R' , 接收端将 R' 传递给应用程序, 并丢弃 R 。

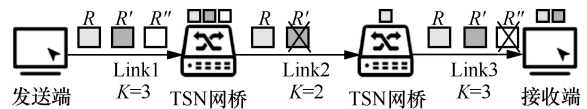


图5 PTRF 机制在链路出现临时故障时的链路估计与复制示意图



2.3 混合冗余

FRER 通过空间冗余机制更适用于容忍链路中的永久性故障, PTRF 机制则旨在容忍链路中的临时故障。当一起使用时, 时间冗余允许减少要使用的空间冗余路径的数量, 因为时间冗余不需要提供额外的路径容忍临时故障, 所以将 TSN 提供的空间冗余与复制帧主动传输机制的时间冗余结合, 可以更好地应对并发永久性故障和临时故障, 同时减少资源消耗^[53]。

时间冗余和空间冗余混合模型如图 6 所示, 在具有空间冗余的网络中, 使用一条链路将终端站连接到网桥, 例如, 图 6 中终端 1、终端 3 和终端 4 仅通过一条链路连接到一个网桥, 此时只需要实现终端节点和边缘网桥之间的时间冗余, 终端节点发送每个关键帧的多个副本, 当第一个边缘网桥收到副本时, 它会通过冗余路径转发第一个副本, 并删除其余副本, 当网络另一端的边缘网桥接收到关键帧时, 网桥会合并通过不同路径接收的副本并创建新的副本, 并通过一条链路将它们发送到接收方。若在终端 2 和终端 4 之间传输信息, 此时终端 2 到网桥 4 之间存在冗余路径, 网桥 4 到终端 4 则只存在一条路径, 此时可以通过分离空间冗余和时间冗余的节点, 即在终端 2 到网桥 4 之间采用空间冗余, 网桥 4 到终端 4 之间则采用时间冗余来保证当网络中出现故障时, 仍然有副本帧传输到接收端。

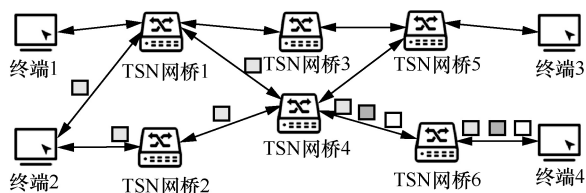


图6 时间冗余和空间冗余混合模型

文献[54]提出了一种有效的启发式算法, 扩展了 FRER 的静态离线方法, 以实现在线增量重新路由和重新调度, 并且通过结合空间和时间冗余来处理永久性和暂时性故障, 以便在不相交路径

或同一路径上传输冗余消息副本, 它是离线路由和调度算法的补充, 可以与离线路由和调度算法结合使用, 以实现基于 FRER 的容错。文献[55]利用了时间冗余, 并提出了 AVB 流量的可靠性感知路由。该问题被表述为整数线性规划 (integer linear programming, ILP) 问题, 目的是在瞬态误差下实现最大的传输可靠性。目前关于空间冗余和时间冗余结合的研究还在继续发展, 这是 TSN 中的冗余机制研究的重要关注点。

3 冗余机制分析与展望

本节对时间敏感网络的冗余机制进行分析, 主要是对 FRER 的局限性和实现 PTRF 的方法进行比较, 并且对时间敏感网络中的冗余机制的发展挑战进行阐述, 最后提出未来展望。

3.1 冗余机制分析

3.1.1 空间冗余分析

FRER 是一个独立的标准, 用于对不能容忍数据包丢失的应用程序使用主动措施确保稳健可靠的通信, 以额外的网络资源为代价, 有效地提供无缝的主动冗余。为了最大限度地减少网络拥塞, 可以根据流量类别和通过 TSN 流识别获取的路径信息选择数据包复制, 并通过序列生成功能为复制的帧生成识别号, 以确定丢弃哪些帧, 传递哪些帧, 从而确保正确的帧消除和恢复。其中帧冗余信息包含在冗余标签中, 网络中的不同流量类别可以采用不同的传输方式, 例如, FRER 可能只用于关键流量, 而尽力而为 (best effort, BE) 流量和其他可容忍损失的流量则正常传输, 从而使网络既可以实现无缝冗余, 又可以提高网络资源利用率。但是, 该标准仍然存在一些局限性, 第一, 它可能会对时间敏感网络中的时延保证产生影响, 因为复制可能会导致沿复制路径的突发性增加, 以及数据包排序错误, 这可能会增加交叉网桥或路由器中的时延, 导致数据包错误排序, 还可能对冗余和调度机制之间的交互产生负面影

响。第二,它缺乏针对不适当配置的保护机制,这可能会使预期的可靠性无效。第三,虽然其核心功能由标准定义,但其有效使用主要取决于实际部署场景和路径选择策略,所以当场景和路径选择不当时,也可能会引发部署场景的意外数据包消除或者资源浪费^[56]。在使用非不相交冗余路径的情况下,该机制会导致目的地的数据包丢失。在理想的情况下,一个流被复制在 k 个不相交的路径上,这样中继节点就不会接收到同一数据包的多个副本。即使FRER承诺无缝集成,也需要一个具有足够数量的不相交路径的网络。如果网络中缺少这样的路径,序列恢复功能(sequence recovery function, SRF)可能会由于位于多条路径交叉的节点上的包消除而出现意外的丢包。为了在不存在不相交路径的情况下有效使用FRER,应考虑3个要点:冗余路径数量、连接节点数量、连接节点的位置。

(1) 冗余路径数量

在没有不相交路径的情况下,可以使用多于 k 条路径来容忍 $k-1$ 个故障,并补偿连接节点可能造成的效率低下。因此,评估冗余程度以获得所需的容错级别是很重要的。

(2) 连接节点数量

当两条路径相交时,可能会出现成员流的意外消除,因此,最小化所选路径之间的节点数量是至关重要的。

(3) 连接节点的位置

两条路径的早期交叉,在最初的几跳内,会对冗余造成更严重的影响,因为复制的数据包会很快被消除,流在剩下的路径中容易受到其他故障的影响。

数据包意外消除的主要原因是中继系统不知道它们是否为连接节点,从而丢弃冗余包。当中继可以推断出它作为连接节点的位置时,它可以转发一定数量的副本,而不是立即删除它们。所以需要检测交换机是否为连接节点,以及节点所

处的网络位置,获得网络范围的视图,从而获得发送者和接收者之间端到端的路径。一个连接节点可以通过连接度精确地评估流的每个包应该有多少个副本,并消除过多的数据包,从而最小化副本的数量,以避免意外的消除。

3.1.2 时间冗余分析

与其他冗余机制一样,PTRF对网络性能也有一定的影响。这是因为副本的传输意味着交换单个消息所需的资源的增加,如时间或带宽。第2.2节介绍了3种实现PTRF的方法,3种方法的不同点主要在执行复制的设备(终端、网桥)以及处理副本的方式上,但是每种方法都有各自的优缺点。一方面,端到端估计与复制方法允许使用商业现成产品——商用部件法(commodity-off-the-shelf, COTS)TSN网桥,可以显著降低网络成本。但是与其他两种方法相比,该方法在丢失信息之前可以容忍的故障场景数量较低。其次,端到端估计与链路复制方法可容忍的场景数量随着链路数量的增加而增加,它可以容忍每条链路中有副本丢失,因为下一跳设备将再次创建一组完整的副本,但是网络的所有设备都必须修改以支持PTRF,这可能导致网络成本增加,还可能导致网络带宽的低效使用,因为每条链路中要传输的副本数量是使用整个网络的最坏情况估计来计算的,因此即使网络中某些部分的帧丢失概率较低,复制水平也必须足够高,以容忍条件较差的区域的故障。链路估计与复制方法则是其他两个方法之间的折中,网络中的设备也必须支持PTRF,它也可以容忍大量的故障场景。然而,与端到端估计与链路复制不同,链路估计与复制允许根据每条链路的帧丢失概率调整传输的副本数量,从而减少了用于容错的带宽消耗,同时保证了足够的容错水平,最后,该方法特别适用于支持动态容错和在同一网络中集成时间和空间冗余。一方面,灵活性是自适应系统的关键,能够根据链路的脆弱性调整复制级别,为容错提供了高度的灵活性;另一方



面, 为了有效地结合空间冗余和时间冗余, 重要的是根据网络中空间冗余的可用性调整时间冗余的水平。也就是说, 只要空间冗余足够处理网络中的故障, 就可以取消时间冗余以节省资源。

3.1.3 冗余机制的发展挑战

时间敏感网络要求低时延和高带宽的传输, 时间敏感网络中的冗余机制需要在满足这些要求的同时保持高效性和可靠性。将冗余机制应用于网络中可能会增加数据包传输在最坏情况下的端到端时延, 并且会引入大量开销, 因为它需要至少两倍的带宽来传输冗余数据包以实现容错, 而且由于并非所有的数据包传输都可能出现错误, 对没有出现错误的数据包的副本进行传输, 浪费了网络资源。首先, 由于冗余可能增加传输时延和消耗额外的带宽, 所以如何设计高效的冗余策略是需要考虑的问题; 其次, 在时间敏感应用中, 数据一致性非常重要, 当网络中引入冗余机制时, 确保冗余数据的一致性和同步性会变得复杂, 需要设计和实现适当的同步策略, 以确保冗余数据的准确性和一致性; 再次, 冗余机制可能需要额外的计算、存储和网络资源来支持冗余数据的生成、传输和管理, 这可能增加系统的资源消耗和复杂性, 需要仔细平衡资源的利用和性能需求; 最后, 引入冗余机制可能会增加网络的成本, 包括设备、带宽和维护等方面, 所以在设计和部署冗余机制时, 需要仔细评估成本和效益之间的平衡, 确保冗余机制的效益能够超过其成本。面对这些挑战, 研究人员需要综合考虑系统的要求、资源限制和技术限制, 以设计出高效可靠的冗余网络。

3.2 未来展望

3.2.1 工业网络

利用冗余机制可以解决工业网络中的可靠性问题, 但会导致网络复杂度增加, 同时网络中的网络资源利用率也是需要考虑的, 将 FRER 技术与流量调度结合可以提高网络的可靠性和资源利

用率。时间敏感网络中的流量调度是一种用于控制网络流量的技术^[57]。它的主要作用是通过对数据包的发送时间和带宽进行控制, 确保网络中的时间敏感应用程序能够及时地接收到数据, 从而保证网络的实时性和可靠性。在工业网络中, 存在多个应用程序同时使用网络资源的情况。如果不进行流量调度, 则网络中的数据传输可能会发生冲突, 从而导致关键数据丢失、时延和抖动等问题。流量调度可以通过控制数据包的发送时间和带宽, 避免这些问题的发生, 同时还可以提高网络的带宽利用率^[58]。关于 TSN 流量调度的研究有很多, 例如, TSN 中的时间感知整形器的调度时间表合成是一个非确定性多项式 NP 困难 (NP-hard) 问题^[59], 如何将流量调度和 FRER 技术结合起来, 既保证网络中的流量可调度性, 又不降低网络的可靠性, 仍然是未来发展的关注点。

3.2.2 自动驾驶

自动驾驶汽车的发展给汽车电子和车载网络设计带来了新的挑战, 对车内数据传输的带宽和确定性提出了更高的要求, 功能安全是未来汽车的最高要求, 这需要通过车载网络交换大量的安全关键数据。作为时间敏感网络的重要标准, IEEE 802.1Qbv 提供了在车载网络中实现不同流量类别混合传输的可能性, 但是车载网络中的故障随时可能发生, 这可能导致关键安全数据丢失。因此, 网络必须可靠, 以保证安全关键数据的成功交付, 为满足未来车载网络应用的高可靠性要求, 将 FRER 容错机制引入车载网络, 使得车载网络能够提供足够的保证, 并且为基于 TSN 的 IVN 设计基于容错的动态调度和路由启发式方法, 以满足自动驾驶汽车应用的高可靠性要求也是未来发展的关注点之一。

3.2.3 云化应用

边缘云计算^[60]是一种分布式计算架构, 它在边缘设备 (如传感器、摄像头、智能手机等) 和云服务器之间建立了一种连接。由于边缘设备通

常位于网络边缘, 离云服务器较远, 因此边缘计算可以将计算任务从云端迁移到边缘设备上, 从而提高计算速度和减少网络时延。在各种基于 TSN 的行业中采用网络功能虚拟化^[61]和云计算模型, 使 TSN 云就绪, 并实现端到端的确定性通信, 当 TSN 云就绪功能与 5G 超可靠低时延无线功能和时间敏感通信组件相结合或集成时, 各行各业将获得前所未有的网络可能性^[35]。在边缘云计算中, 可靠性是至关重要的。由于边缘设备数量众多, 且通常部署在复杂和恶劣的环境中, 可能会产生各种故障和错误, 因此数据传输可能会面临许多挑战, 如网络时延、带宽限制和安全问题等。如何提高边缘云计算的可靠性是不得不关注的重点。在云中部署 TSN, 将 TSN 可靠性扩展到云对时间敏感应用程序的可靠性, 从而从云生态系统提供的优势中获益是至关重要的。TSN 标准的云化是一个广泛的主题, 其中 FRER 协议的云化为云计算的可靠性提供了潜在的解决方案, 例如将 FRER 功能作为服务集成到云平台中, 从而提高云平台可靠性。

4 结束语

本文主要围绕时间敏感网络中的冗余机制进行研究, 介绍了冗余机制的发展, 并介绍了不同冗余协议的相关原理和特点, 明确了时间敏感网络中的冗余协议具备的无缝冗余特点, 详细介绍了 FRER 的工作原理, 并描述了时间敏感网络中可以与 FRER 结合, 从而提高网络可靠性的其他相关标准, 概述了目前 FRER 的相关研究现状, 为研究时间敏感网络的相关人员在提高可靠性方面提供参考。

参考文献:

- [1] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17-27.
- [2] 宋华振. 时间敏感型网络技术综述[J]. 自动化仪表, 2020, 41(2): 1-9.
SONG H Z. Summary on time sensitive network technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(2): 1-9.
- [3] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [4] BELLO L L, STEINER W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1094-1120.
- [5] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(7): 1378-1397.
CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [6] 朱瑾瑜, 段世惠, 张恒升, 等. 时间敏感网络技术在工业互联网领域应用必要性分析[J]. 电信科学, 2020, 36(5): 115-124.
ZHU J Y, DUAN S H, ZHANG H S, et al. Analysis on the application necessity of time-sensitive network technology in the field of industrial interconnection[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(5): 115-124.
- [7] STANTON K B. Distributing deterministic, accurate time for tightly coordinated network and software applications: IEEE 802.1as, the TSN profile of PTP[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 34-40.
- [8] 张彤, 冯佳琦, 马延滢, 等. 时间敏感网络流量调度综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(4): 747-764.
ZHANG T, FENG J Q, MA Y Y, et al. Survey on traffic scheduling in time-sensitive networking[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(4): 747-764.
- [9] 田硕. 时间敏感网络系统配置方案研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
TIAN S. Research and design of time-sensitive network system configuration scheme[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [10] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks: frame replication and elimination for reliability: IEEE Std 802.1 CB-2017[S]. 2017.
- [11] ÁLVAREZ I, BALLESTEROS A, BARRANCO M, et al. Fault tolerance in highly reliable Ethernet-based industrial systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 977-1010.
- [12] LIN S, COSTELLO D J, MILLER M J. Automatic-repeat-request error-control schemes[J]. IEEE Communications Magazine, 1984, 22(12): 5-17.
- [13] LAPRIE J C. Dependability: basic concepts and terminology



- gy[M]/LAPRIE JC. Dependability: basic concepts and terminology. Vienna: Springer, 1992: 3-245.
- [14] HA N V, NGUYEN T T T, TSURU M. TCP with network coding enhanced in Bi-directional loss tolerance[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(3): 520-524.
- [15] POLEDNA S. Fault-tolerant real-time systems: the problem of replica determinism[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [16] BANIABDELGHANY H, OBERMAISSER R, KHALIFEH A. Time triggered scheduling algorithm for real-time wireless systems[C]//Proceedings of 2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 265-272.
- [17] KIRRMANN H, HANSSON M, MURI P. IEC 62439 PRP: bumpless recovery for highly available, hard real-time industrial networks[C]//Proceedings of 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007). Piscataway: IEEE Press, 2008: 1396-1399.
- [18] RENTSCHLER M, HEINE H. The parallel redundancy protocol for industrial IP networks[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1404-1409.
- [19] KIRRMANN H, WEBER K, KLEINEBERG O, et al. HSR: zero recovery time and low-cost redundancy for industrial Ethernet (high availability seamless redundancy, IEC 62439-3)[C]//Proceedings of 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [20] BURNS A, WELLINGS A J. Real-time systems and programming languages (third edition): Ada 95, real-time Java, and real-time POSIX[M]. New York: Addison-Wesley, 2001.
- [21] BARRANCO M, PROENZA J, ALMEIDA L. Reliability improvement achievable in CAN-based systems by means of the ReCANcentrate replicated star topology[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2010: 99-108.
- [22] BARRANCO M, PROENZA J, ALMEIDA L. Quantitative comparison of the error-containment capabilities of a bus and a star topology in CAN networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(3): 802-813.
- [23] PRADHAN D K. Fault-tolerant computer system design[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1996.
- [24] AVIZIENIS A, LAPRIE J C, RANDELL B, et al. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2004, 1(1): 11-33.
- [25] FEDYK D, ASHWOOD-SMITH P, ALLAN D, et al. IS-IS extensions supporting IEEE 802.1 aq shortest path bridging[R]. 2012.
- [26] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [27] KEHRER S, KLEINEBERG O, HEFFERNAN D. A comparison of fault-tolerance concepts for IEEE 802.1 time sensitive networks (TSN)[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [28] KLEINEBERG O, FRÖHLICH P, HEFFERNAN D. Fault-tolerant audio and video bridging (AVB) Ethernet: a novel method for redundant stream registration configuration[C]//Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-8.
- [29] DENG L B, XIE G Q, LIU H, et al. A survey of real-time Ethernet modeling and design methodologies: from AVB to TSN[J]. ACM Computing Surveys, 55(2): 1-36.
- [30] OJEWALE M A, YOMSI P M. Routing heuristics for load-balanced transmission in TSN-based networks[J]. ACM SIGBED Review, 2020, 16(4): 20-25.
- [31] SMIRNOV F, REIMANN F, TEICH J, et al. Automatic optimization of redundant message routings in automotive networks[C]//Proceedings of the 21st International Workshop on Software and Compilers for Embedded Systems. New York: ACM Press, 2018: 90-99.
- [32] WU K X, ZHANG J W, JI Y F. Redundant routing provision in a FlexE-over-WDM network based on segment frame replication and elimination[C]//Proceedings of 2021 17th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [33] YAO Z C, CAI Y P, LI T C. Multiple cascaded preconfigured cycles for the FRER mechanism in time-sensitive networking[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [34] CHEN X L, ZHOU M Q, ZHU S L, et al. Optimizing FIPP-p-cycle protection design to realize availability-aware elastic optical networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 65-68.
- [35] ABUIBAID M, GHORAB A H, ST-HILAIRE M, et al. Cloudification of time-sensitive networking reliability functions: challenges and potential solution directions[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(4): 30-37.
- [36] ERGENÇ D, FISCHER M. On the reliability of IEEE 802.1CB FRER[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [37] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Redundancy management for safety-critical applications with time sensitive networking[C]//Proceedings of 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.

- [38] KLEINEBERG O, FRÖHLICH P, HEFFERNAN D. Fault-tolerant Ethernet networks with audio and video bridging[C]//Proceedings of ETFA. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [39] LIU L J, YU W, YU Z. Active fault-tolerant control design for a submarine semi-physical simulation system[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(5): 2363-2372.
- [40] SYED A A, AYAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Dynamic scheduling and routing for TSN based In-vehicle networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [41] SYED A A, AYAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Fault-tolerant dynamic scheduling and routing for TSN based In-vehicle networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 72-75.
- [42] SYED A A, AYAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Fault-tolerant static scheduling and routing for In-vehicle networks[C]//Proceedings of 2022 32nd International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 273-279.
- [43] HUANG Z Q, ZHU H L, ZHANG H Y, et al. A scalable heuristic time-sensitive traffic scheduling algorithm for in-vehicle network[C]//Proceedings of 2022 5th International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 111-118.
- [44] ANSARI J, HSIAO T S, JAFARI M H, et al. 5G enabled flexible lineless assembly systems with edge cloud controlled mobile robots[C]//Proceedings of 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1419-1424.
- [45] BANIABDELGHANY H, OBERMAISSER R, KHALIFEH A. A reliable job allocation scheduler for time-triggered wireless networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE 24th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [46] ÁLVAREZ I, PROENZA J, BARRANCO M, et al. Towards a time redundancy mechanism for critical frames in time-sensitive networking[C]//Proceedings of 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [47] CODE P, PRIX C. Communication networks and systems for power utility automation—part 8-1: specific communication service mapping (SCSM)—mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3: UNE-EN 61850-8-1-2011[S]. 2011.
- [48] KOPETZ H, DAMM A, KOZA C, et al. Distributed fault-tolerant real-time systems: the Mars approach[J]. IEEE Micro, 1989, 9(1): 25-40.
- [49] GESSNER D, PROENZA J, BARRANCO M, et al. A fault-tolerant Ethernet for hard real-time adaptive systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 2980-2991.
- [50] AVIZIENS A. Fault-tolerant systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 1976, C-25(12): 1304-1312.
- [51] ÁLVAREZ I, ČAVKA D, PROENZA J, et al. Simulation of the proactive transmission of replicated frames mechanism over TSN[C]//Proceedings of 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1375-1378.
- [52] ÁLVAREZ I, FURIÓ I, PROENZA J, et al. Design and experimental evaluation of the proactive transmission of replicated frames mechanism over time-sensitive networking[J]. Sensors, 2021, 21(3): 756.
- [53] ÁLVAREZ I, PROENZA J, BARRANCO M. Mixing time and spatial redundancy over time sensitive networking[C]//Proceedings of 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W). Piscataway: IEEE Press, 2018: 63-64.
- [54] FENG Z W, GU Z H, YU H C, et al. Online rerouting and rescheduling of time-triggered flows for fault tolerance in time-sensitive networking[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022, 41(11): 4253-4264.
- [55] ATALLAH A A, BANY HAMAD G, AIT MOHAMED O. Reliability-aware routing of AVB streams in TSN networks[C]//Proceedings of International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems. Cham: Springer, 2018: 697-708.
- [56] HOFMANN R, NIKOLIĆ B, ERNST R. Challenges and limitations of IEEE 802.1CB-2017[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2020, 12(4): 105-108.
- [57] HELLMANNS D, GLAVACKIJ A, FALK J, et al. Scaling TSN scheduling for factory automation networks[C]//Proceedings of 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [58] LI Q, LI D, JIN X, et al. A simple and efficient time-sensitive networking traffic scheduling method for industrial scenarios[J]. Electronics, 2020, 9: 2131.
- [59] DÜRR F, NAYAK N G. No-wait packet scheduling for IEEE time-sensitive networks (TSN)[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 203-212.
- [60] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
- SHI W S, SUN H, CAO J, et al. Edge computing—an emerging computing model for the Internet of everything era[J].



Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.

- [61] HAN B, GOPALAKRISHNAN V, JI L S, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 90-97.

[作者简介]



彭紫梅（1997-），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为时间敏感网络、可靠性网络传输和网络性能监测等。



寿国础（1965-），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院教授，主要研究方向为接入网络与边缘计算、光纤与无线网络虚拟化、网络构建与路由、移动互联网与应用等。



郭梦杰（1994-），男，北京邮电大学博士生，主要研究方向为时间敏感网络、流量调度与软件定义网络。



刘雅琼（1988-），女，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授，主要研究方向为边缘计算、车联网和边缘智能。



胡怡红（1961-），女，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授，主要研究方向为光纤与无线网络技术、网络监控与管理、软件定义网络架构与技术等。