

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209893

车载时间敏感网络链路冗余调度性能分析*

罗峰¹, 马逸飞¹, 郭怡¹, 王子通¹, 吴名芝²

(1. 同济大学汽车学院 上海 201804; 2. 同济大学南昌智能新能源汽车研究院 南昌 330052)

摘要:TSN协议中802.1CB协议是保障车载以太网网络可靠性的重要角色,其通过链路冗余确保报文的稳定传输,而不同冗余链路间的传输特性不一致可能会对后续流量调度产生影响,因而需要探讨链路冗余对调度性能影响。本文从汽车网络拓扑冗余结构出发,分析了冗余协议和调度协议的关联性,并探讨了链路冗余对802.1Qbv分时调度机制以及802.1Qch循环队列与转发机制的影响。最后本文构建了链路冗余调度性能评价模型,并基于OMNeT++平台和实物验证平台,对上述影响进行仿真验证。结果表明链路冗余产生的冗余流量到达间隔和链路跳数差异分别对802.1Qbv和802.1Qch有显著影响,另外需要关注冗余拓扑中网桥端口速率变化所带来的影响。

关键词:时间敏感网络;车载以太网;链路冗余;分时调度;循环队列与转发

中图分类号: TH701 U463.67 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.50

Analysis of time-sensitive network link redundancy scheduling performance

Luo Feng¹, Ma Yifei¹, Guo Yi¹, Wang Zitong¹, Wu Mingzhi²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Nanchang Automotive Institute of Intelligence and New Energy, Tongji University, Nanchang 330052, China)

Abstract:The 802.1CB protocol in the TSN protocol plays an important role in ensuring the reliability of the in-vehicle Ethernet network. It ensures the stable transmission of packets through link redundancy, and the inconsistency of transmission characteristics between different redundant links may affect subsequent traffic scheduling. Therefore, it is necessary to explore the impact of link redundancy on scheduling performance. This article starts from the topology redundancy structure of automobile network, analyzes the correlation between redundancy protocol and scheduling protocol, and discusses the influence of link redundancy on 802.1Qbv time-aware shaper mechanism and 802.1Qch cyclic queuing and forwarding mechanism. Finally, we establish a link redundancy scheduling performance evaluation model, based on OMNeT++ and hardware verification platform. We simulate and verify the above effects. The results show that the difference in the arrival interval of redundant traffic and the number of link hops caused by link redundancy has a significant impact on 802.1Qbv and 802.1Qch, respectively. In addition, it is necessary to pay attention to the impact of changes in the rate of bridge ports in redundant topology.

Keywords:time-sensitive network; automotive ethernet; link redundancy; time-aware shaper; cyclic queuing and forwarding

0 引言

随着汽车智能化与网联化的发展,各类高带宽传感器被装入汽车空间,以应对复杂场景下的环境感知需求,对汽车网络造成了越来越大的负载压力。另一方面,汽车自

身的电子电气架构(electrical/electronic architecture, EEA)正从传统分布式架构逐步向域集中式架构发展,并有向中央集中式架构发展的趋势^[1],同样增加了主干网的带宽需求。在这一背景下,车载以太网逐渐地被认为是未来车载主干网络的主要组成部分^[2]。为了弥补传统以太网在确定性延时和稳定性方面的缺陷,由以太网音视频

收稿日期:2022-06-01 Received Date: 2022-06-01

* 基金项目:上海汽车工业科技发展基金会项目(1806)、同济大学南昌智能新能源汽车研究院前瞻课题(TPD-TC202110-14, TPD-TC202211-06)项目资助

桥接(audio video bridging, AVB)协议演化而来的时间敏感网络(time-sensitive network, TSN)协议簇^[3],是车载以太网能够成为车载主干网络的重要技术支撑。

车辆电子器件潜在的老化^[4]增加了车载场景的可靠性要求,因而车载以太网需要具备冗余属性。除开保障网络实时性基础的同步冗余^[5-6],冗余传输也是其重要的一部分。冗余传输的形式可以有空间域冗余和时间域冗余两种,前者主要通过链路冗余实现,车载网络较常见的链路冗余形式是环形冗余结构^[7],其配合 TSN 下的冗余协议 802.1CB,保障关键流量传输;后者主要通过单链路多帧副本报文的形式,实现对临时故障的通信冗余^[8],通过仿真证明其可配合 TSN 链路冗余,共同提升传输可靠性^[9-10]。

就车载以太网链路冗余而言,其核心是 802.1CB 帧复制和消除机制(frame replication and elimination for reliability, FRER),通过副本报文在多链路中传输的方式实现冗余。但就协议本身而言,不少研究指出其应用存在潜在问题,例如协议可能产生乱序传输问题^[11],在冗余链路相交的情况下,还可能导致冗余数据包丢失^[12]。此外还有研究指出协议自身缺乏冗余动态规划,会产生带宽浪费^[13],并且如果配置不当,链路冗余还会产生网络风暴^[14]。另一方面,链路冗余下不同链路转发延迟差异也会对无缝冗余效果产生影响^[15],可能会对后续流量

调度产生影响^[16],而网络流量调度是保证端到端时延的重要一环^[17]。因此综合来看,探讨基于 TSN 下 802.1CB 协议提到的链路冗余对调度性能的具体影响是有必要的,且目前这方面的论述较少。

本文以车载以太网链路冗余为切入点,讨论了汽车 EEA 链路冗余的特征,分析了帧复制和消除机制与 802.1Qbv 分时调度机制(time-aware shaper, TAS)和 802.1Qch 循环队列与转发机制(cyclic queuing and forwarding, CQF)在网桥转发流程上的关联性,研究在关键影响节点上链路冗余对于分时调度机制以及循环队列与转发机制的性能影响,提出了冗余调度性能评价模型,并通过 OMNet++ 仿真平台和实物验证平台,对上述影响进行软硬件仿真验证,对汽车 EEA 链路冗余设计及流量调度设计提出参考意见。

1 汽车 EEA 链路冗余

汽车 EEA 链路冗余主要形式是环形冗余结构,也有通过增加信道数实现的星型冗余结构,下图 1 展示了一种基于域集中式 EEA 的主干网环形冗余结构,其主干网采用车载以太网,应用 802.1CB 协议,子网则依据需求接入 CAN 总线、车载以太网或者其他通信总线。

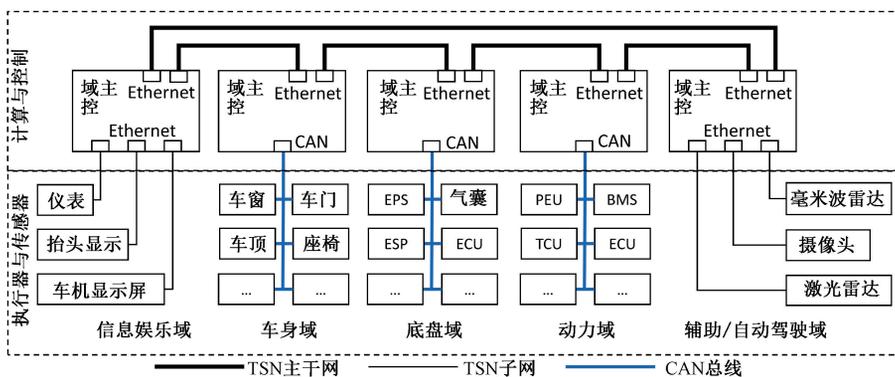


图 1 汽车主干网环形冗余

Fig. 1 Ring redundancy of automotive backbone network

另一方面,在车载网络中,对于 TSN 子网下的端系统,往往不具备 FRER 能力,且链路速率可能低于主干网,因此 EEA 中端节点的 FRER 功能常由网络中的网桥代理实现,图 1 中的域控制器便是 FRER 代理网桥。从图 1 中可以看出,环形冗余链路在借助 802.1CB 协议实现链路冗余的同时,也会产生冗余报文传输时延不一致的情况。例如图 1 摄像头数据意图通过辅助/自动驾驶域主控,向信息娱乐域控制器传递数据时,其一条冗余链路直连信息娱乐域控制器,而另一条链路则需要跨越 3 个域控制器才能抵达。这个过程中会产生明显的转发时延差

异,这一差异进而会对冗余报文消除节点的后续端口输出产生较大影响,需要加以关注。因而本文关于 TSN 下链路冗余对于调度性能的讨论,主要针对 FRER 代理网桥展开,并着重分析帧消除流程对调度性能的影响。

2 TSN 冗余与调度机制

在进行 TSN 链路冗余与调度协议之间影响分析前,需要明确各协议自身的特点以及在 FRER 代理转发流程上的作用关系。

2.1 冗余协议

802.1CB 作为 TSN 协议簇下,通过链路冗余提升网络可靠性的协议,其基本逻辑是通过将初始数据流分为多个成员流,各成员流在相应的冗余链路内,朝目标地址转发,并在终端进行冗余流量的消除,而重新汇聚为初始数据流,从而实现传输冗余。协议功能可以分为序列功能、流分裂功能、独立恢复功能、序列编解码功能以及流识别功能,其中序列功能又可以分为序列生成功能、潜在错误检测功能以及序列恢复功能。

需要注意的是独立恢复功能和序列恢复功能,虽然两者均属于恢复功能,但是服务对象不同。对于独立恢复功能,其面向单一链路上的成员流,目的是消除因发送故障导致的成员流重复发送情况;而序列恢复功能是面向多个成员流,目的是依据去重算法,丢弃冗余链路下的冗余数据,只保留最先到的成员流。

2.2 调度机制

TSN 协议簇包括多种保障传输延迟的调度协议,这里主要讨论 802.1Qbv 分时调度机制以及 802.1Qch 循环队列与转发机制。

1) 分时调度

802.1Qbv 是一种增强转发机制,其目的是为了实现在关键流量的低延迟传输,机制部署于设备端口。机制核心是为每个输出端口部署 8 个优先级队列,同时每个优先级队列都有一个队列门控,并配备队列门控列表,用于控制当前队列出口的开关状态,实现不同优先级流量依据时间窗进行调度。如果流量在当前队列出口关闭时到达队列,则会依据到达先后顺序,在相应优先级队列中排队,直至当前队列进入发送窗口期。当出现多个优先级队列同时打开的情况,则会依据传输选择算法,分配各队列发送顺序。

在传输选择算法上,其常规选择是配合严格优先级算法使用,但是也可以选择例如信用值整形算法或者增强传输选择算法来控制传输。不同传输选择算法间的优先级关系存在相应限定条件,具体可以参考 802.1Q-2018 中的内容。

2) 循环队列与转发

802.1Qch 是一种为流量提供可预期延迟范围的调度机制,协议本身属于周期性调度协议,由两个发送队列构成循环队列,在一个周期内,其中一个队列作为缓冲队列,另一个队列作为发送队列,并且在该周期内新抵达的报文统一进入缓冲队列,仅发送队列中的报文可以被发出,两个队列的属性会在下一个周期对换,从而构成一组循环队列,进行报文的转发工作。其机制核心是依托队列交替传输和交替存储,来保障流量的时延有界。

当采用 CQF 机制时,报文的端到端时延在特定范围内,即时延在区间 $[(h-1)T_{CQF}, (h+1)T_{CQF}]$ 内,其中 h 为当前传输链路下的跳数, T_{CQF} 为每个 CQF 时间窗的长度。需要注意时延处于上述范围的前提是时间窗长度 T_{CQF} 的大小需要尽可能大于最大干扰报文的传输时长,否则会因为干扰报文产生传输延迟的劣化。

2.3 冗余与调度的关联性

对于代理 FRER 功能的网桥而言,其内部的 FRER 机制与 TAS 机制和 CQF 机制之前存在着关联性。由于 FRER 机制在处理流程上先于报文进入优先级队列,而 CQF 和 TAS 均依赖于优先级队列门控管理,所以 802.1CB 的帧复制和消除机制会对两者产生影响,并且这种影响主要集中在网桥转发过程以及网桥帧消除流程中。

这里将影响归纳为以下两点:1) 报文丢弃:由于冗余标签的添加会增加报文的长度,在转发过程中,如果超过优先级队列允许通过最大报文长度,可能会导致报文的意外丢弃,这取决于芯片内部运行逻辑,但其不会影响后续调度;2) 报文时延干扰:在冗余机制下,会有多帧相同的冗余报文从冗余链路抵达 FRER 代理的网桥进行帧消除,由于存在抵达间隔,可能会对网桥输出端口产生干扰,影响端到端时延。

3 链路冗余对调度的影响

在明确冗余与调度的关联性后,需要分析链路冗余对于调度性能的具体影响。由于转发过程不影响后续调度,此处不做讨论。这里主要针对网桥 FRER 帧消除流程展开,从链路冗余时延对网桥端口输入的影响出发,探讨链路冗余对 TAS 机制以及 CQF 机制的具体影响。

3.1 链路冗余对网桥输入的影响

在采用以 FRER 机制为基础的链路冗余时,冗余链路之间的时延差异会对 802.1CB 帧消除流程带来不同程度的影响,同时这种影响主要由冗余链路中的低时延链路发生数据丢失引起。图 2 中罗列了周期报文在正常情况下的帧消除后输出情况,以及不同抵达间隔下,低时延链路数据丢失的影响。在正常情况下,对于周期发送的冗余数据流,序列恢复功能会采纳低时延链路上的报文,而高时延链路上的数据流会因序列重复被序列恢复功能丢弃。而图 2 中低时延链路的报文 2 发生了丢失情况时,依据冗余链路之间的报文抵达间隔 ΔT 与报文发送周期 T 关系,会产生两种情况。

当 $\Delta T < T$ 时,高时延链路中的报文 2' 会为作为冗余备份接替丢失的报文 2,但是此时会因为低时延链路和高时延链路存在转发时延差值,从而导致在报文 2' 被

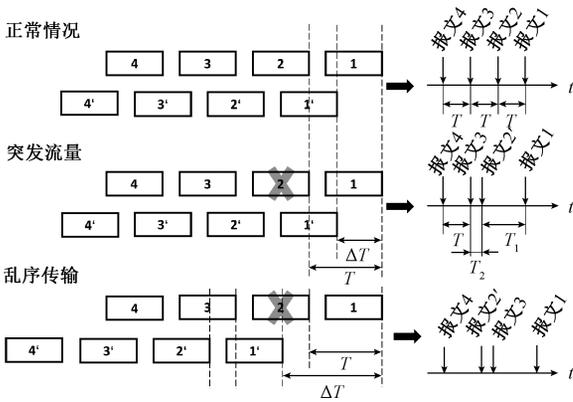


图 2 低时延链路数据丢失影响

Fig. 2 The impact of data loss on low-latency links

序列恢复功能接受后, 会立刻接收到报文 3, 两者的间隔时长为 T_2 , 并且 $T_2 + T_1 = 2T$, 同时 $T_2 < T$, 从而在网桥内产生了突发流量, 并对后续输出端口的流量调度产生影响。

当 $\Delta T \geq T$ 时, 由于低时延链路报文 3 比作为冗余备份的高时延链路 2' 提前抵达 FRER 帧消除节点, 在不做缓冲正序处理的情况下, 会造成接收的报文顺序变为报文 1、报文 3、报文 2'、报文 4, 产生乱序传输的情况, 并且随着 ΔT 变化, 同样可能导致突发流量, 干扰后续输出端口调度。

由于在 $\Delta T \geq T$ 的情况下, 其突发流量的诱因和 $\Delta T < T$ 时一致, 且考虑到车载场景下的周期报文的广泛性, 故在后续针对链路冗余对 TAS 机制以及 CQF 机制影响讨论中, 主要针对 $\Delta T < T$ 下的周期报文调度进行探讨。

3.2 链路冗余对 TAS 机制的影响

分时调度机制是基于优先级队列门控管理来实现对于关键流量的优先调度, 保障关键流量低延迟特性以及其他流量的延迟有界性。对于代理接收端 FRER 功能的网桥, 其最理想情况是冗余流量都在同一个调度时间窗内到达, 但是这要求调度时间窗的长度至少为冗余流量最大抵达间隔, 而这可能会导致调度时间窗长度过大, 影响其他流量的调度。除此之外, 当存在输入链路速率高于输出端口速率的情况时, 还可能会因为链路时延的增长导致预期外的调度结果。

图 3 罗列了代理 FRER 功能网桥的帧消除端口在数据丢失情况下, 流量抵达间隔和端口速率变化对输出调度的不同影响, 图中偶数周期队列开启, 奇数周期队列关闭。

在正常情况下, 低时延链路的冗余流量先于高时延链路到达, 网桥中的序列恢复功能会丢弃后到的冗余报文, 并且只转发低时延链路冗余报文; 在低时延链路发生

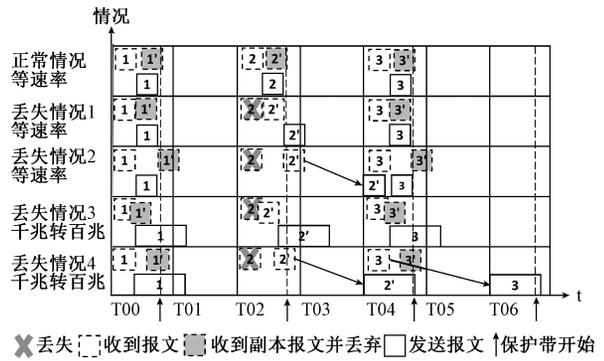


图 3 对 TAS 影响分析

Fig. 3 Analysis of the impact on TAS

报文丢失时, 若冗余链路时延差异较小且输入输出端口等速率, 则如图 3 中丢失情况 1 所示, 高时延链路的冗余报文会替代低时延链路的冗余报文, 并在当前时间窗转发出去, 实现冗余; 但当冗余链路时延差异较大时, 即如图 3 中丢失情况 2 所示, 冗余报文在 T03 内才完全抵达, 则需要其在 T04 才会和报文 3 一同被转发。

而当网桥输入输出端口速率不对等时, 如图 3 中丢失情况 3 所示, 输出端口报文占用时间窗的时长会明显增加, 同时会在一定程度上侵占其他时间窗的发送窗口。若网桥输入输出端口速率不对等且冗余流量抵达间隔较大时, 则会发生图 3 中丢失情况 4 所示, 冗余报文 2' 由于保护带无法在 T02 完成转发, 被推迟到 T04 转发, 同时, 由于时间窗长度限制, 在 T04 内只能转发一帧报文 2', 而报文 3 会被推迟到 T06 转发, 以此往复, 产生了分时调度时延的持续劣化情况。

整体来看, 链路冗余对 TAS 机制的影响主要集中于冗余流量抵达间隔对调度效果的影响, 以及由 FRER 代理网桥输入端口速率大于输出端口导致的调度时延持续劣化情况。

3.3 链路冗余对 CQF 机制的影响

CQF 机制也是依托于时间窗来管理报文的发送和接收, 从而实现流量的可预期延迟。但不同于 TAS 机制, CQF 机制的可预期时延范围特性取决于链路跳数以及时间窗长度, 在时间窗一致的情况下, 链路跳数越多, 即经过的网桥节点越多, 最终得到的端到端时延就越大。因此, 链路冗余对 CQF 端到端时延特性的影响主要取决于不同冗余链路中的网桥节点个数的差异, 而非冗余链路之间最优转发延迟的差别。

图 4 中列举了 CQF 机制下发生链路失效的情况, 从图中可以看出, 网桥 1 和网桥 3 之间的链路跳数在冗余链路 1 中为 1, 而在冗余链路 2 中为 3。当链路跳数差值大于 2 时, 则低跳数链路报文一定会先于高跳数链路报文抵达, 故正常情况下冗余链路 1 中报文先于冗余链路 2

中报文抵达作为 FRER 帧消除节点的网桥 3。当发生链路 $L_{1,3}$ 失效的情况时,冗余链路 2 中的冗余报文会替代冗余链路 1 中的报文,但会产生因链路切换导致的端到端时延暂时性增加,并且端到端时延的增加大致等于两链路间的节点数差异与时间窗的乘积。

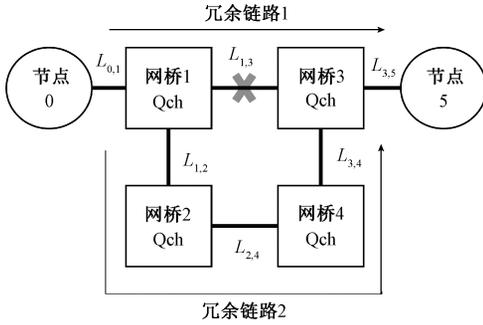


图 4 对 CQF 影响分析

Fig. 4 Analysis of the impact on CQF

故在链路冗余下,数据丢失导致的突发流量情况对于 CQF 的影响是暂时的,而时延的改变范围主要由冗余链路间的节点数差异决定。

4 冗余调度性能评价模型及仿真分析

为了验证上述关于链路冗余对上述两个调度协议的影响,本章将先构建冗余调度性能评价模型,然后对冗余条件下的 TAS 机制和 CQF 机制,通过冗余调度性能评价模型进行分析,并在 OMNet++ 软件仿真平台和实物验证平台进行了软硬件仿真实验。

4.1 冗余调度性能评价模型

根据第 3 章的分析内容,链路冗余结合 TSN 调度协议一同使用时,冗余报文抵达间隔会在报文丢失情况下,对 TSN 调度性能产生影响,其影响的核心体现是报文最终的转发时延的增加。其次,由于抵达间隔是在时间维度影响后续调度性能,因此在 TSN 调度机制层面,其主要影响的是周期性调度机制,例如 802.1Qbv 分时调度机制以及 802.1Qch 循环队列转发机制,而对于 802.1Qbu 帧抢占机制和 802.1Qav 中的信用值整形机制这种非周期性调度机制,抵达间隔不会对后续调度产生影响。所以,这里主要分析冗余条件下的 TSN 周期性调度机制,通过在冗余拓扑下帧消除节点的端到端时延增加量,评价网络拓扑的冗余调度性能。

首先,周期性调度机制会伴随着周期性的发送窗口,并且乱序传输时还会产生冗余报文间的相互干扰,影响高时延冗余链路冗余报文的发送。这里将上述时延总结为下图 5 所示内容,端到端时延的增加量整体由三部分构成,分别为冗余时延、调度时延和干扰时延。

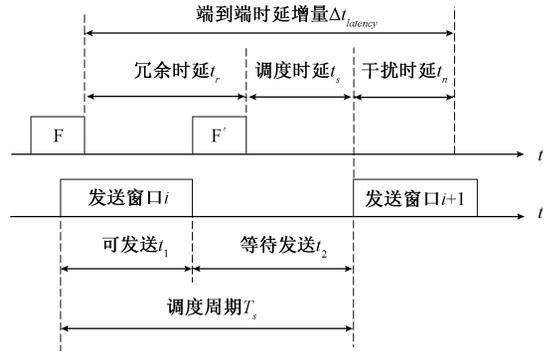


图 5 冗余调度时延构成

Fig. 5 Redundant scheduling latency composition

其中,冗余时延是由冗余链路的链路差异和链路调度机制作用产生的,调度时延则是源于发送窗口间隔,干扰时延则是由冗余报文抵达间隔内的其余传输报文导致。综合上述内容,端到端时延增加量如式(1)所示。

$$\Delta t_{latency} = t_r + t_s + t_n \quad (1)$$

式中: $\Delta t_{latency}$ 为端到端时延增量,单位为 μs ; t_r 为冗余时延,单位为 μs ; t_s 为调度时延,单位为 μs ; t_n 为干扰时延,单位为 μs 。

为了更好地分析时延增加量,这里首先分析单一冗余链路端到端转发延迟,此处简化了冗余流量在网桥内的调度时延,只考虑其最优转发延迟,故可用式(2)描述各冗余链路端到端最优转发延迟。

$$t_{p_i} = \sum_{j=1}^{n+1} t_{L_j, p_i} + \sum_{j=1}^n t_{B_j, p_i} \quad (2)$$

式中: t_{p_i} 为冗余链路 i 下的端到端最优转发延迟,单位为 μs ; t_{L_j, p_i} 为冗余链路 i 下的子链路 j 的链路延迟,单位为 μs ; t_{B_j, p_i} 为冗余链路 i 下的网桥 j 中的最优驻留时长,单位为 μs 。

因此冗余链路端到端最优转发延迟差的最大值可以用式(3)描述。

$$\Delta t_{p, \max} = \max_i t_{p_i} - \min_i t_{p_i}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

式中: $\Delta t_{p, \max}$ 为冗余链路端到端最优转发延迟差的最大值,单位为 μs ; t_{p_i} 为冗余链路 i 下的端到端最优转发延迟,单位为 μs 。

而在考虑冗余链路调度因素时,链路中采用的调度机制也会导致冗余报文的抵达间隔增加,且增加量取决于采用的调度机制及调度参数。综合上述因素,冗余时延如式(4)所示。

$$t_r = \Delta t_{p, \max} + \Delta t_{p, shaper} \quad (4)$$

式中: t_r 为冗余时延,单位为 μs ; $\Delta t_{p, \max}$ 为冗余链路端到端最优转发延迟差的最大值,单位为 μs ; $\Delta t_{p, shaper}$ 为冗余链路中因调度机制产生的冗余报文抵达间隔,单位为 μs 。

对于调度时延, 帧消除节点中采用的调度机制也会对其产生影响, 其最大值从图 5 中可以看出, 由时间窗长度和发送周期两个因素共同决定, 如式(5)所示。

$$t_{s,max} = \left\lfloor \frac{8 \left(\sum_{i=1}^{N+1} (l_{max} + 26) \right)}{R_{max} \cdot t_1 \cdot 10^{-6}} \right\rfloor \cdot (T - t_1) \quad (5)$$

式中: $t_{s,max}$ 为调度时延最大值, 单位为 μs ; l_{max} 是当前发送时间窗传输的最大报文字节数, 单位为 byte; N 是冗余报文抵达间隔内的传输报文数; R_{max} 是当前发送端口的端口速率, 单位为 bps; T_s 为周期性调度机制所用的调度周期, 单位为 μs ; t_1 为发送窗口大小, 单位为 μs 。

对于干扰时延, 其大小主要由发送窗口可传最大报文数和冗余报文抵达间隔内的传输报文数决定, 如果发送窗口可传最大报文数小于冗余报文抵达间隔内的传输报文数, 则会导致高时延冗余链路冗余报文的进一步延迟。所以, 干扰时延的最大值可以通过式(6)表示。

$$t_{n,max} = \left\lfloor \frac{8 \left(\sum_{i=1}^N (l_{max} + 26) \right)}{R_{max} \times t_1 \times 10^{-6}} \right\rfloor \times t_1 \quad (6)$$

式中: $t_{n,max}$ 为干扰时延最大值, 单位为 μs ; l_{max} 是当前发送时间窗传输的最大报文字节数, 单位为 byte; N 是冗余报文抵达间隔内的传输报文数; R_{max} 是当前发送端口的端口速率, 单位为 bps; t_1 为发送窗口大小, 单位为 μs 。

而最终得到的时延增加量并非是单纯几个时延最大值的相加, 需要结合实际冗余拓扑中采用的调度机制, 综合分析最坏情况下的端到端时延增加量。

4.2 仿真拓扑构建

这里构建了如图 6 所示的网络拓扑, 用于模仿汽车 EEA 环形冗余情况下的流量调度情况。FRER 机制由 switch1 和 switch4 代理实现, host1、2、3 节点分别发送不同优先级报文, 中央环形网络内采用千兆以太网链路, 与端节点的连接采用百兆以太网链路。

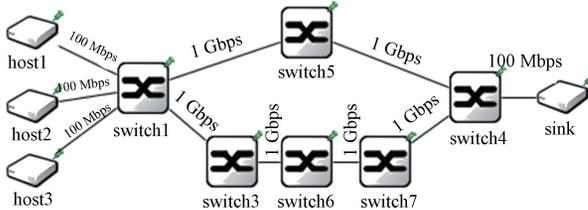


图 6 冗余仿真拓扑

Fig. 6 Redundant simulation topology

另外, 由于仿真平台中不支持可控链路通断, 故此处通过在 switch5 中控制流门控开闭来模拟报文临时丢失的情况, 且 switch5 的硬件转发延迟忽略。

仿真网络中的发送关系和数据格式如表 1 所示。其中报文 1 代表关键控制报文, 报文 2 代表传感器数据流, 报文 3 代表尽力而为 (best effort, BE) 报文。

表 1 仿真流量表

Table 1 Emulated traffic list

序号	发送节点	接收节点	数据字段 /bytes	发送周期 / μs	开始时刻 / μs	优先级
1	host1	sink	64	500	0	7
2	host2	sink	1 500	500	0	4
3	host3	sink	512	250	0	1

4.3 TAS 机制下的冗余调度仿真分析

关于 TAS 机制的配置如表 2 所示, 将分时调度周期设置为 $500 \mu\text{s}$, 前 3 个时间范围分别为报文 1、2、3 服务, 最后一个时间范围是保护带, 用于防止报文影响到下一个发送周期。

表 2 门控列表

Table 2 Gate control list

时间范围/ μs	队列门控状态(C:关闭 O:开启)
0~100	C,C,C,C,C,C,C,O
100~200	C,C,C,C,O,O,O,C
200~450	O,O,O,O,C,C,C,C
450~500	C,C,C,C,C,C,C,C

报文 2 的 1 500 byte 在百兆链路上的链路时延约为 $114 \mu\text{s}$, 表 2 中将报文 2 的发送窗口设为 $100 \mu\text{s}$ 的目的是验证图 3 中丢失情况 4 中的延迟持续劣化情况。同时考虑到 TAS 机制对冗余报文抵达时间间隔较为敏感, 一般网桥的硬件转发延迟均设为 $2.5 \mu\text{s}$, switch6 中的硬件转发延迟设为 $25 \mu\text{s}$, 以增大两个冗余链路上的冗余流量抵达间隔。

依据上述参数内容以及 TAS 调度自身特点, 该冗余拓扑的报文 2 的冗余时延部分中, 由于两条冗余链路中报文, 均被设计在同一时间窗内传输, 故 $\Delta t_{p,shaper}$ 约等于 $0 \mu\text{s}$; 而冗余链路的最优转发时延差 $\Delta t_{p,max}$ 为 $50 \mu\text{s}$ 。最终得到冗余时延 t_r 约为 $50 \mu\text{s}$ 。

对于调度时延 t_s , 由于高时延链路较于低时延链路更易受到发送窗口影响, 根据式(5)的内容, 此处取最大值为 $400 \mu\text{s}$ 。而干扰时延依据式(6)计算为 $0 \mu\text{s}$ 。综合下来, 该冗余拓扑下采用 TAS 机制的报文 2 的端到端时延增加量理论值为 $450 \mu\text{s}$ 。

根据上述参数, 得到了如下的仿真结果, 如图 7 所示, 其中低时延链路断开时间区间为 $94 \sim 96 \text{ ms}$ 。可以看

出当低时延链路发生报文丢失的情况时,由于链路切换,64 byte 的报文 1 会产生短暂的时延增加,而后恢复,而 1 500 byte 的报文 2 则因输出端口链路速率改变以及分时调度表为报文 2 提供的时间窗由于保护带的缘故,无法满足两帧报文在同一时间窗传递,继而导致报文 2 的端到端时延劣化了约 450 μs ,即大致为一个调度周期,并使得端到端时延持续劣化。

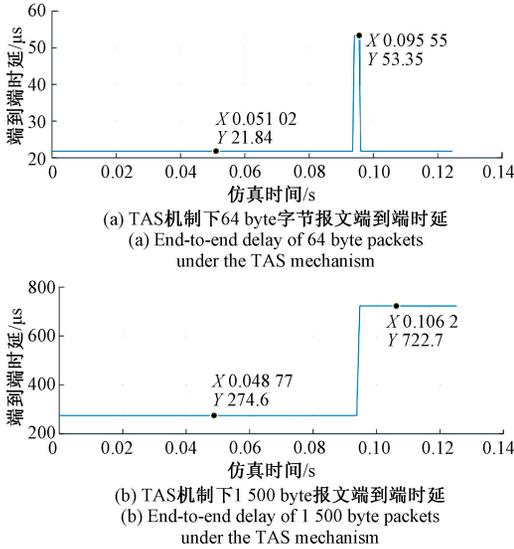


图7 TAS 仿真结果

Fig. 7 TAS simulation results

为了修正上述问题,现将报文 2 的发送窗口设为 120 μs ,保证在该时间窗内能够发送完成一帧报文,同时在保护带前开始发送下一帧报文,得到图 8 所示结果。从图 8 中可以看出由于在同一时间窗内可以发送两帧,而不会将报文推迟至下一个可发送时间窗发送,虽然会暂时性侵占后续报文发送时间窗,但是其可有效避免端到端时延持续劣化的情况发生。此时,依据冗余调度性能评价模型,调度时延 t_s 变更为 0 μs ,时延最大增加量变为 50 μs ,而从图 8 中可知,实际时延增加量为 50 μs ,主要由冗余时延 t_r 产生。

故在环形冗余结构中运用 TAS 机制时,需要关注链路冗余引起的冗余流量抵达间隔,以及负责帧消除的网桥输入输出端口的速率变化。如果配置不当,则可能引发端到端时延的持续性劣化。为此,需要将低速率端口的最长转发报文的发送时长纳入考量,确保报文调度时间窗除保护带区域长度可以至少完整通过一帧最长转发报文,并减小小链路间的转发时延差异。

4.4 CQF 机制下的冗余调度仿真分析

为验证链路冗余对于 CQF 机制的影响,这里 CQF 机制的配置,仅针对表 1 中的报文 2,对于报文 1 和报文 3 不采用调度策略。

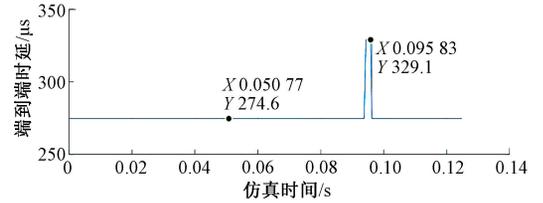
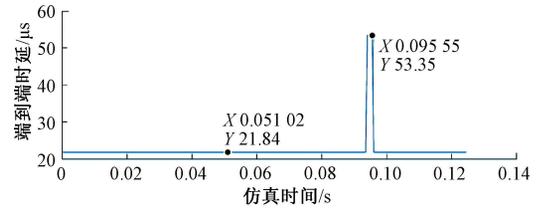


图8 优化后 TAS 仿真结果

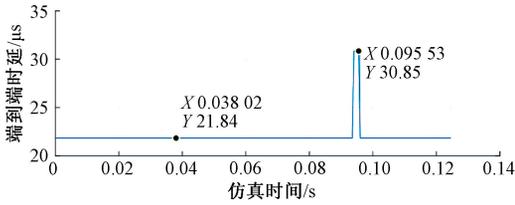
Fig. 8 TAS simulation results after optimization

考虑到报文 2 在百兆链路上的链路时延约为 114 μs ,故将 CQF 时间窗长度设置为 125 μs ,其余优先级队列均处于常开状态。

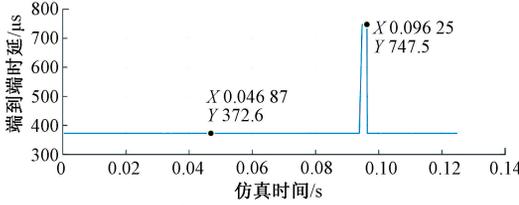
依据上述参数内容以及 CQF 调度自身特点,该冗余拓扑的报文 2 的冗余时延部分,链路最优时延差 Δt_p 约为 50 μs ,而其 $\Delta t_{p,shaper}$ 取决于链路跳数差,此处为三跳,故为 375 μs ,同时根据第 2 章对 CQF 机制的分析,链路无法达到最优时延转发状态,因此需要减去当前链路最优时延差 Δt_p 的 50 μs 。最后得到冗余时延 t_r 约为 375 μs 。对于调度时延 t_s ,由于所有的冗余报文均是在下一个相邻时间窗发送,故调度时延 $t_s = 0$ μs 。最后由于 CQF 机制设计时排除了最大干扰报文的因素,所以干扰时延 $t_n = 0$ μs 。综合下来,该冗余拓扑下采用 CQF 机制的报文 2 的端到端时延增加量理论值为 375 μs 。

通过仿真得到了如图 9 所示的端到端时延结果,低跳数链路断开区间和 TAS 仿真中一致,为 94~96 ms。通过对比 64 byte 报文和 1 500 byte 报文在低时延链路报文丢失时的时延增加情况可知,CQF 机制本身和冗余流量抵达间隔无直接关联,其主要取决于冗余链路节点数以及时间窗长度。图 9(b)中 1 500 byte 报文的时延增量 375 μs ,恰好为时间窗 125 μs 的 3 倍,对应于高时延链路上增加的 3 个网桥。

由上述内容可知链路冗余对 CQF 机制的主要影响在于不同冗余链路跳数不同,引发的传输时延暂时性突变,且突变程度与跳数差异有关。为避免时延变化过大,需要减小冗余链路间的链路跳数差异。在环形冗余中,当节点个数大于等于 4 个时,需要考虑链路失效情况导致的时延突变是否在可接受范围内。



(a) CQF 机制下 64 byte 报文端到端时延
(a) End-to-end delay of 64 byte packets under the CQF mechanism



(b) CQF 机制下 1 500 byte 报文端到端时延
(b) End-to-end delay of 1 500 byte packets under the CQF mechanism

图 9 CQF 仿真结果

Fig. 9 CQF simulation results

4.5 实物验证

为了验证本文提出的冗余调度性能评价模型,这里借助硬件平台对上述影响进行分析。

图 10 所示是使用的实物验证平台,网络拓扑部分采用了和软件仿真中相类似的拓扑,采用了 5 个硬件节点构成环形网络,并分析节点#1 和#4 之间的冗余链路对调度性能的影响。实物验证平台硬件是由英飞凌 TC3E7 和恩智浦 SJA1110 交换机构成的硬件节点,支持的 TSN 协议包括 802.1AS、802.1Qbv、802.1Qci、802.1CB,同时支持三路 1000Base-T1 和六路 100Base-T1。网络中数据流量的生成可通过 TC3E7 或者 VN5650 实现,网络的 QoS 性能分析通过 VN5650 及分析脚本共同实现。

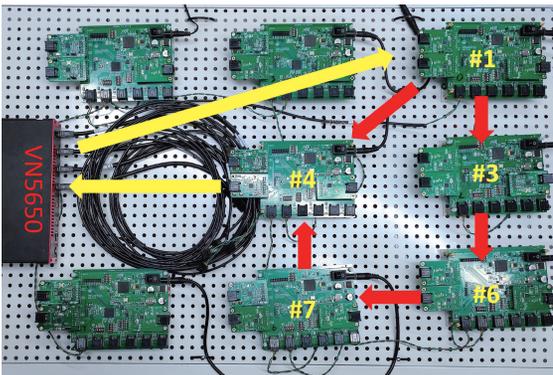
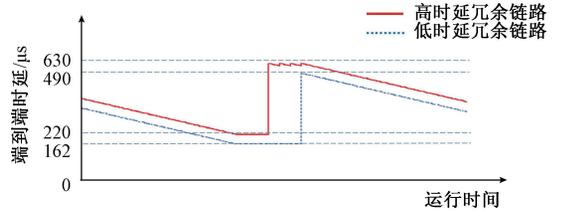


图 10 实物验证平台

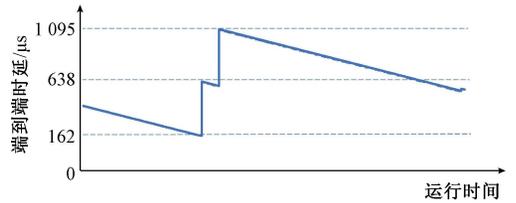
Fig. 10 Hardware evaluation platform

由于所用的硬件节点在 TSN 协议方面暂不支持 802.1Qch,这里主要针对 802.1Qbv 的冗余调度性能进行

验证分析。各节点以太网输出端口的 TAS 分时调度表配置和表 2 中保持一致, VN5650 发送的流量类型及周期和表 1 中保持一致,采用自发自收的形式,测量网络的端到端时延情况。依据上述内容得到了图 11 所示的实验测量结果。



(a) 不同冗余链路时延情况
(a) Latency of different redundant links



(b) 冗余网络低时延链路断开
(b) Redundant network low-latency link disconnection

图 11 TAS 实物验证结果

Fig. 11 TAS hardware evaluation results

图 11 中绘制了 1 500 byte 报文在实物网络中的端到端时延情况,其中由于 TAS 机制需要各硬件节点保持同步,而 VN5650 没有与 TSN 网络进行时间同步,因此这里由于时钟偏差产生了周期性变化的时延曲线。图 11(a) 呈现了网络中低时延冗余链路和高时延冗余链路下, 1 500 byte 报文的时延情况,可以看出,在最终的时延增量上,低时延链路相较于高时延链路增加了约 60 μs 左右的时延。

图 11(b) 展示了在低时延链路发生链路断开情况时,流量整体的端到端时延改变。可以看出,流量在切换到高时延链路的过程中,产生了因冗余时延 t_r 导致的端到端时延增加情况,而随着系统运行,又继而产生了约 457 μs 的时延增量,其主要是由于调度时延 t_s 导致的。在低时延链路恢复后,产生了持续性的时延增加,最大的时延增量为 517 μs,与此前分析的端到端时延增加量理论值 450 μs 吻合,证明了评价模型正确性。

5 总 结

本文探讨了汽车 EEA 链路冗余下的潜在问题,并从冗余与调度的机制关联性角度出发,理论分析了在 FRER 代理网桥中 FRER 机制对于 TAS 机制以及 CQF 机

制的影响,并构建了冗余调度性能评价模型,分析了 TAS 机制和 CQF 机制在冗余加持下的性能表现,同时配合 OMNet++软件仿真平台和实物平台验证了这一影响。

整体而言,链路冗余对于 TAS 机制的影响主要源于冗余流量抵达间隔,而对 CQF 机制的影响主要源于链路跳数差异。当 FRER 代理网桥的帧消除端口速率小于输入端口时,对于 TAS 机制还可能诱发时延持续劣化的情况。故为了缓解上述问题,需要在设计冗余链路时,采用 TAS 机制应尽可能减少冗余链路之间的抵达间隔,分时调度表设计着重考虑网桥端口速率变化情况;采用 CQF 机制应尽可能减少冗余链路间的节点数差异,以减小时延变化程度。

参考文献

- [1] BANDUR V, SELIM G, PANTELIC V, et al. Making the case for centralized automotive E/E architectures[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(2): 1230-1245.
- [2] SAMII S, ZINNER H. Level 5 by layer 2: Time-sensitive networking for autonomous vehicles [J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 62-68.
- [3] DENG L, XIE G, LIU H, et al. A survey of real-time ethernet modeling and design methodologies: From AVB to TSN[J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2022, 55(2): 1-36.
- [4] 陈佳楠, 马永涛, 李松, 等. 嵌入式存储器动态故障诊断数据压缩设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(7): 203-209.
CHEN J N, MA Y T, LI S, et al. Design of embedded memory dynamic fault diagnosis data compression [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(7): 203-209.
- [5] 罗峰, 徐金鹏. 基于车载环境的时间同步协议优化[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 96-104.
LUO F, XU J P. Time synchronization protocol optimization for automotive environment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(2): 96-104.
- [6] HU L, SHOU G, ZHANG X, et al. Multi-domain time synchronization model and performance evaluation in TSN[C]. 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC), IEEE, 2021: 2028-2032.
- [7] KOSTREZEWA A, ERNST R. Achieving safety and performance with reconfiguration protocol for ethernet TSN in automotive systems [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2021, 118: 102208.
- [8] ÁLVAREZ I, PROENZA J, BARRANCO M, et al. Towards a time redundancy mechanism for critical frames in time-sensitive networking [C]. 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2017: 1-4.
- [9] ÁLVAREZ I, ČAVKA D, PROENZA J, et al. Simulation of the proactive transmission of replicated frames mechanism over TSN[C]. 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2019: 1375-1378.
- [10] 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.
- [11] HOFMANN R, NIKOLIĆ B, ERNST R. Challenges and limitations of IEEE 802.1 CB-2017[J]. *IEEE Embedded Systems Letters*, 2019, 12(4): 105-108.
- [12] ERGENÇ D, FISCHER M. On the reliability of IEEE 802.1CB FRER [C]. IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications, IEEE, 2021: 1-10.
- [13] DESAI N, PUNNEKKAT S. Enhancing fault detection in time sensitive networks using machine learning [C]. 2020 International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), IEEE, 2020: 714-719.
- [14] ALGHAMDI S A. Cellular V2X with D2D communications for emergency message dissemination and QoS assured routing in 5G environment [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 56049-56065.
- [15] PRINZ F, SCHOEFFLER M, LECHLER A, et al. End-to-end redundancy between real-time I4. 0 components based on time-sensitive networking[C]. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2018, 1: 1083-1086.
- [16] THOMAS L, MIFDAOUI A, BOUDEC J Y L. Worst-case delay bounds in time-sensitive networks with packet replication and elimination[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2022, 30(6): 2701-2715.

- [17] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESHTALAB M, et al. Synthesizing schedules to improve QoS of best-effort traffic in TSN networks [C]. 29th International Conference on Real-Time Networks and Systems, 2021: 68-77.

作者简介



罗峰, 2000年于西北工业大学获得博士学位, 现为同济大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为车载网络总线和车载信息安全。

E-mail: luo_feng@tongji.edu.cn

Luo Feng received his Ph. D. degree from Northwestern

Polytechnical University in 2000. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Tongji University. His main research interests include in-vehicle networks and automotive cybersecurity.



马逸飞(通信作者), 2020年于同济大学获得学士学位, 现为同济大学硕士研究生, 主要研究方向是车载时间敏感网络技术。

E-mail: 2033531@tongji.edu.cn

Ma Yifei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tongji University in 2020. He is currently a master student at Tongji University. His main research field is time-sensitive network under automotive ethernet.

《仪器仪表学报》征稿启事

《仪器仪表学报》(中文刊)创刊于1980年,由中国科学技术协会主管、中国仪器仪表学会主办,是中国仪器仪表领域的顶级学术刊物。中国标准连续出版物号 ISSN 0254-3087,国内统一连续出版物号 CN 11-2179/TH。本刊已被列入 EI 工程索引(美)期刊、北京大学《中文核心期刊要目总览》来源期刊、CSCD 中国科学引文数据库来源期刊、WJCI 科技期刊世界影响力指数报告(2021)来源期刊、CA 化学文摘(美)收录期刊、JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)收录期刊。并入选中国科技期刊卓越行动计划、中国百种杰出学术期刊。

本刊入选仪器仪表领域高质量科技期刊分级目录 T1 级别期刊、机械工程领域高质量科技期刊分级目录 T1 级别期刊。主要报道仪器仪表领域及其交叉学科具有创新性的基础理论研究、工程技术应用的优秀科研成果。

一、投稿方式

请投稿作者登录:<http://www.etmchina.com>,进行注册并网上提交稿件,或者直接登录到新投稿系统:<http://yqyb.etmchina.com/yqyb/reader/login>。以上方式为《仪器仪表学报》唯一投稿方式,不接受邮箱投稿。

二、投稿须知

本刊刊登仪器科学与技术及其交叉学科的优秀科研论文。主要包括信息处理技术、精密仪器与测量、传感器技术、自动控制技术、电子测量仪器、检测技术、无损检测技术、视觉测量与图像处理、基于网络的测量技术、生物信息检测、交叉与前沿、单/多相流测试技术与仪器、集成电路测试、人机融合与人工智能、智能系统与人工智能、先进感知与损伤评估等栏目。主要收录研究性和综述性论文,要求主题明确、突出创新、论证严密、数据可靠、实验真实、语言简明。

本刊要求来稿应具有创新性、科学性、实用性,内容应未发表过或未被其他公开出版物刊载过,请勿一稿多投。研究综述一般应为 8000~10000 字,研究论文、技术应用类文章一般应为 5000~8000 字。具体征稿范围、格式规范、版权转让等要求可登录《仪器仪表学报》官网(<http://yqyb.etmchina.com/yqyb/home>)下载并阅读《〈仪器仪表学报〉投稿须知》。

三、联系方式

通信地址:北京市东城区建国门南大街 5 号 1 号楼二层 1213 室

邮 编:100009

联系电话:010-64044400

邮 箱:cjsi@cis.org.cn

注:此邮箱为编辑部发布收费信息、录用通知唯一指定邮箱。