



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

车载时间敏感网络（TSN）

白皮书

（2021 年）

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟（AII）

2023 年 09 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

编写说明

2019年，以“电动化，智能化，网联化，共享化”为核心的汽车“新四化”进入发展的深水区，我国汽车工业也正在经历着第三次造车浪潮。世界经济论坛预测，2030年左右，汽车行业的数字化变革将带动3.1万亿美元的社会效益。从政策层面，美国、欧洲、日本及我国分别制定了自动驾驶相关规划；从产业角度，除传统主机厂积极布局之外，华为、百度、谷歌、苹果等ICT巨头纷纷开展自动驾驶相关的研究，自动驾驶已经成为跨界融合的“明珠”。

时间敏感网络基于标准以太网，在数据链路层提供一整套保障网络QoS的机制，例如时钟同步，门控队列，帧抢占，报文复制/丢弃等。随着高等级自动驾驶所需部署的传感器数量激增，车载时间敏感网络已经成为学术界、产业界研究的热点，并成为一种公认的下一代车载网络通信技术。

本白皮书首先研究车载网络的内涵、现状、发展趋势和车载时间敏感网络的驱动力，并分析车载时间敏感网络的技术体系与关键特征，展示车载时间敏感网络的生态与产业影响，最后结合典型场景，旨在对车载时间敏感网络的产业落地提供参考和指引，并对我国车载时间敏感网络的发展做初步展望。该白皮书是1.0版本，随着后续研究的深入，将持续对该白皮书升级。

牵头编写单位：北京邮电大学、中国信息通信研究院、网络通信与安全紫金山实验室；

参与编写单位：中汽研（天津）汽车工程研究院有限公司、中汽创智科技有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所、深圳市三旺通信股份有限公司、长城汽车股份有限公司、江淮汽车股份有限公

司、中国联合网络通信股份有限公司、清华大学深圳国际研究生院、
摩莎科技（上海）有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

北京邮电大学：朱海龙、黄韬、汪硕

中国信息通信研究院：张恒升、朱瑾瑜

网络通信与安全紫金山实验室：白钰、严园园、彭开来

中汽研（天津）汽车工程研究院有限公司：韩东省、郝晶晶

中汽创智科技有限公司：袁云康

中国科学院沈阳自动化研究所：李栋、俞雪婷

深圳市三旺通信股份有限公司：徐龙

长城汽车股份有限公司：傅强

江淮汽车股份有限公司：孙涛

中国联合网络通信股份有限公司：李建飞

清华大学深圳国际研究生院：李志恒

摩莎科技（上海）有限公司：潘鹏、王宝山

目 录

一、 车载时间敏感网络内涵	1
(一) 车载网络定义	1
(二) 车载网络现状及发展趋势	1
二、 车载时间敏感网络技术体系	7
(一) 车载时间敏感网络标准态势	7
(二) 车载时间敏感网络关键技术特征	11
(三) 车载时间敏感网络参考架构	17
(四) 车载时间敏感网络与 DDS 融合	19
(五) 车载时间敏感网络与 SDN 融合	20
(六) 车载时间敏感网络与无线网络融合	22
三、 车载时间敏感网络产业发展态势	22
(一) 丰富车载时间敏感网络生态链	22
(二) 加速高级别自动驾驶技术发展	24
(三) 促进 ICT 产业与汽车产业融合	27
四、 车载时间敏感网络典型应用场景及展望	28
(一) 车载时间敏感网络典型场景	29
(二) 我国车载时间敏感网络展望	30

一、车载时间敏感网络内涵

本章节从车载网络的定义、现状与发展趋势、驱动力等角度阐述车载时间敏感网络的内涵。

（一）车载网络定义

车载网络是指用于连接 ECU 等车内电子电气设备的数据通信系统。

（二）车载网络现状及发展趋势

1. 车载网络现状

随着电控系统的日益复杂，以及汽车内部控制功能电控单元相互之间通信需求的日益增长，采用点对点的连接会使得车内线束增多，如图 1 所示，同时考虑内部通讯的可靠性、安全性以及重量等因素，会给汽车设计和制造带来了很大的困扰。因此，为了减少车内连线，并且实现数据的共享和快速交换，同时提高可靠性等，以总线或以太网方式连接的汽车网络系统称为车载网络，如图 2 所示。

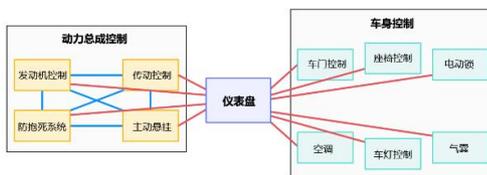


图 1 点对点通信

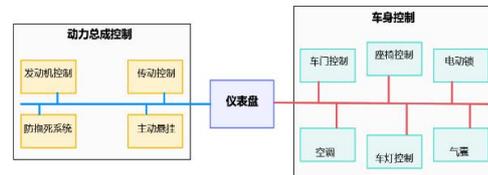


图 2 总线/网络通信

20 世纪 80 年代初，汽车总线雏形就已基本出现，诸多 OEM、组织机构和大型供应商都纷纷研究自己的网络总线标准，期盼能一统

车载网络的天下，迄今为止已经有超过 40 种的网络总线，车载网络演进路线如图 3 所示。

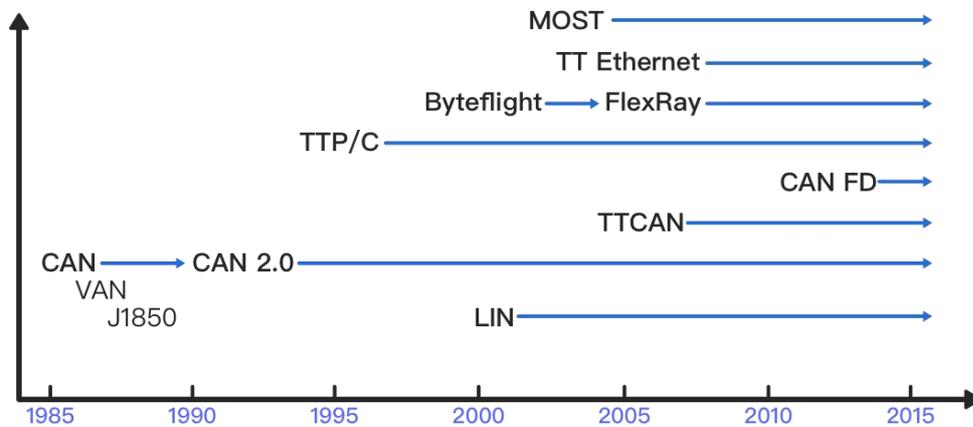


图 3 车载网络演进路线图

通过实际应用的检验，大多数总线逐渐退出历史舞台，仍在使用的几个主流总线为 CAN、LIN、MOST、FlexRay、LVDS 等。除了 LVDS，其他网络标准基本上都是面向汽车行业制定，所有这些网络总线中，CAN 总线份额最大，从芯片生产，软件工具支持，人才队伍，应用范围等各个环节在产业链中都是最为完备的。

CAN (Controller Area Network) 总线协议是由 BOSCH 发明的一种基于消息广播模式的串行通信总线，1991 年，Bosch 发布 CAN 2.0 标准，CAN2.0 最高传输速率只有 1Mbps，对于汽车自动驾驶应用的数据传输，或者视频音频传输带宽不足。2012 年，BOSCH 发布 CAN FD 1.0 标准 (CAN with Flexible Data-Rate)，CAN FD 定义了仲裁后确定使用不同的数据帧结构，从而达到最高 12Mbps 数据传输速率。

LIN 是 Local Interconnect Network 的缩写，LIN 总线标准是由 LIN 协会制定的专门用于低速网络的低成本网络解决方案，最高通信速率为 19.2kb/s。LIN 总线硬件接口采用 UART/SCI (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter/ Serial Communication

Interface, 通用异步收发器/串行通信接口), 其成本低廉, 配置灵活, 因而在传感器, 执行器等领域得到广泛使用。

MOST (Media Oriented System Transmit) 总线是宝马公司、戴姆勒克莱斯勒公司、Harman/Becker 公司和 Oasis Silicon Systems 公司之间的一个联合项目, 于 1998 年成立自主的实体, 及 MOST 公司。

MOST 总线主要是为车载多媒体数据服务的, 从传输速率看, MOST 总线的规范有 MOST REV1 (MOST25), 即 25Mbps; MOST REV2 (MOST50), 即 50Mbps; 总线规范为 MOST REV3 (MOST150), 即 150Mbps。

FlexRay 是戴姆勒克莱斯勒公司的注册商标。FlexRay 联盟 (FlexRay Consortium) 推进 FlexRay 的标准化, 使之成为了新一代汽车内部网络通讯协议。FlexRay 是专为车内局域网设计的一种具备故障容错的高速可确定性车载总线系统, 采用了基于时间触发的机制且具有高带宽、容错性好等特点, 在实时性、可靠性及灵活性方面都有很大的优势, 非常适用于安全性要求较高的线控场合及带宽要求高的场合。

LVDS (Low Voltage Differential Signal) 是一种电气数字信号通信协议, 通过铜缆双绞线传输高速数据 (最高可达 850 Mb/s, 最长传输距离 10 m), 是计算机总线的一部分。在汽车领域, LVDS 主要用于主控板和摄像头之间, 显示屏与摄像头之间等短距离数据传输。

传统以太网使用 CSMA/CD (载波监听多路访问及冲突检测) 技术, 带宽通常是由多个设备共享的, 并没有考虑实时信息的传输问题。随着音视频娱乐大量进入汽车座舱, IEEE 开始着手开发用于音

视频传输的以太网协议，成立了 IEEE 802.1 AVB (Audio Video Bridging) 工作组。AVB 标准体系主要包括 802.1AS (精确时间同步)，802.1Qat (流预留)，802.1Qav (队列及转发)，AVB 只能提供 2ms 和 10ms 两个延时等级 (over 7 hops)，导致其在车内应用的局限性，常用于车内后座娱乐系统。

当前主流车载网络协议对比如表 1 所示。

协议	最高带宽	传输介质	最大载荷	拓扑	实时	成本
CAN	1 Mb/s	双绞线	8	多主	否	低
LIN	19.2 Kb/s	单缆	8	单主	否	低
FlexRay	10 Mb/s	双绞线/光纤	254	单主	是	中
LVDS	850 Mb/s	双绞线串/并行		多主	否	低
MOST	150 Mb/s	双绞线/光纤	3072	多主 单主	否	高
AVB	100 Mb/s	非屏蔽双绞线	1500		否	高
Ethernet	1 Gb/s	非屏蔽双绞线	1500		否	低

表 1 主流车载总线对比

2. 车载网络发展趋势

以太网具有技术成熟、高度标准化、带宽高以及低成本等优势。随着近年来汽车电子化的快速发展，车内电子产品数量逐年增加，连接和互通的复杂性日益提高，以太网所具有的技术优势可以很好地满足汽车制造商对车内网络连接的需求。

从物理层角度出发，减少线缆重量和提升通信速率是车载以太网演进的方向。美国博通公司的 BroadR-Reach 技术，采用单对非屏蔽双绞线作为传输介质，既符合车载 EMI/EMC 规范，其在 IEEE 802.3 已经完成 100BASE-T1 的标准化，即将完成 1000BASE-T1 的标

准化；另外，Molex 已经推出支持 20Gbit/s 速率的车载以太传输电缆 HSAutoGig，Continental 已经提出 50Gbit/s 的带宽需求。由于铜线介质的以太网传输线缆在带宽大于 1Gbit/s 情况下，EMC/EMI 性能急剧下降，所以，高速率场景下的光纤传输也是热点，例如，OFS (A Furukawa Company)，IEEE802.3 CFI 正在进行基于塑料光纤传输的高速以太网研究和标准化工作。

从数据链路层角度出发，为了提升 AVB 的性能，IEEE 802.1 TSN (Time Sensitive Network) 在 AVB 的基础上进行了扩充，增加了多种基于队列的流量整形 (shaper) 机制，结合门控，实现流级别的调度，成为车载网络学术界和产业界研究和跟踪的热点技术。TTEthernet 是一种基于 802.3 以太网之上的面向汽车或工业领域的实时通信网络，在单一网络中可以同时满足不同实时和安全等级的应用需要。TTEthernet 支持三种不同的消息类型，时间触发 (TT)、速率约束 (RC) 和尽力而为 (BE)，TT 消息优先于所有其他类型，而 RC 帧是保证预留的带宽，用于不太严格的确定性和实时要求的应用，BE 帧可以看做是标准以太网 TTEthernet (Time Triggered Ethernet)。当 TT 消息未发送完成之前，RC 和 BE 消息都将在缓存中等待发送，由于设备缓存优先，TTEthernet 更适用于流量不大的场景。图 4 是 TSN 和 TTEthernet 工作机制的对比。

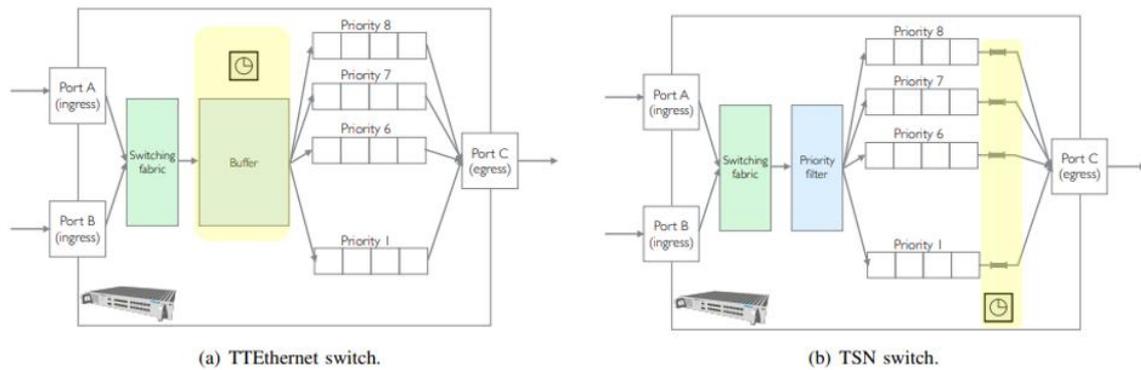


图 4 TSN 与 TTEthernet 工作机制对比

3. 车载时间敏感网络驱动力

(1) 高质量通信需求激增

为了实现更精确的自动操控功能，需要实时采集和处理传感器数据，尤其是多传感器原始数据融合，其对网络延时、抖动、带宽、可靠性等提出新的挑战。另外，ECU 跨域通信及车与车、车与人、车与云等实时通信的需求增多，导致车载网络的流量模型彻底改变，最终驱动车载网络架构的变革。

(2) 简化布线、减轻重量

高度自动驾驶（Level 4），尤其是完全自动驾驶（Level 5），需要部署大量传感器。除传统传感器外，还需要部署高清摄像头、激光雷达、轮胎轨迹跟踪、语音识别等传感器，导致车内物理连接增多、布线复杂，且通信协议复杂、不统一。

对于中央网关架构的汽车而言，线束的重量和成本在整车中占比仅次于发动机和底盘之后，名列第三。例如一辆高端汽车，线束系统长度会达到 6000 米，包含约 1500 根线束，近 4000 个连接点，重量约为 70 公斤，若按照目前方式推算，无人驾驶汽车的线束重量将超过 100 公斤。由此带来的布线和人力成本也十分高昂，以安波

福的奔驰 E-Class 项目为例，这一单一线束设计生产项目就动用了安波福全球超过 200 位工程师合作完成。另外，据估算，对于燃油车，重量每减少 100 公斤，每百公里的油耗可降低 0.3-0.5 升，对应减少二氧化碳排放 8-11 克。

时间敏感网络（TSN）技术作为新一代交换网络技术，因其符合标准的以太网架构，具有精准的流量调度能力，可以保证多种业务流量的共网高质量传输，兼具技术及成本优势，成为车载网络技术的重要演进方向之一。

二、车载时间敏感网络技术体系

本章节从标准、参考架构、关键技术特征、配置管理、车联网等角度阐述车载时间敏感网络技术体系。

（一）车载时间敏感网络标准态势

本白皮书所指车载时间敏感网络的基础共性标准由 IEEE 802.1 TSN (Time-Sensitive Networking) 工作组制定，包括流量整形机制、配置管理方法、安全性、可靠性等，同时面向垂直行业制定相关的 profile。随着 TSN 向汽车行业不断渗透，与汽车相关的国内外标准组织或产业联盟纷纷着手制定相关标准。

1. 国外标准动态

2012 年，AVB 任务组在其章程中扩大了时间确定性以太网的应用需求和适用范围，覆盖音频视频以外的更多领域：工业、汽车、制造、运输和过程控制，以及航空航天、移动通信网络等，并成立

了工业互联网的实时性工作组，称为 IEEE 802.1 TSN。2015 年，Interworking TG 与 TSN TG 合并成为新的 TSN 任务组。（参考 TSN 白皮书）。截至 2019 年 7 月，TSN 已经发布和正在推进的标准项目如图 5 所示，同时，TSN 工作组面向音视频网桥、移动前传、工业自动化、车载网络、（互联网）服务提供商等典型场景制定 profile，如图 6 所示，其中，车载网络 profile 首先从需求及场景出发，逐步适配与其对应的 TSN 的标准。注：标准编号中包含 P 的项目表示正在推进中。（IEEE 802.1 TSN – An Introduction-201907）

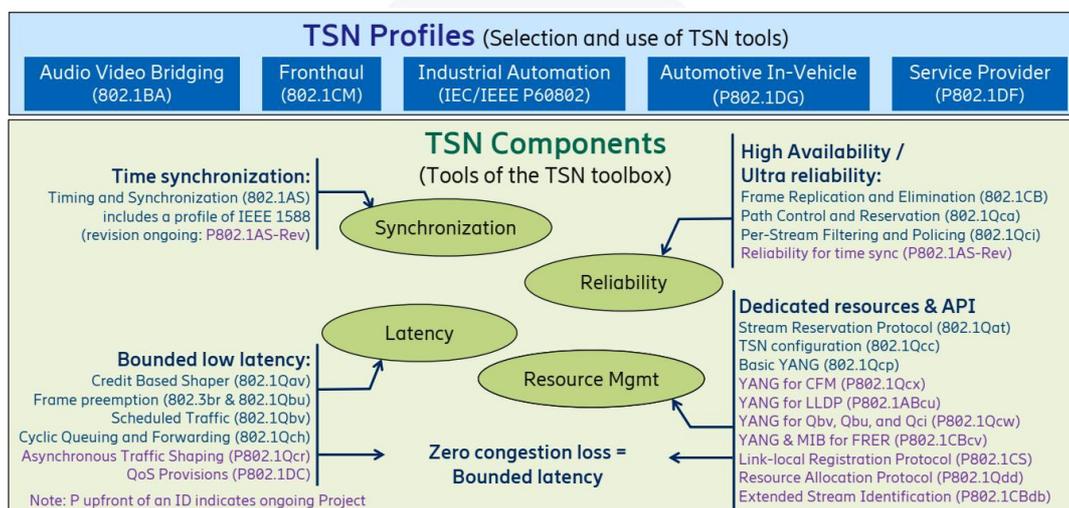


图 5 IEEE 802.1 TSN 标准项目进展



图 6 TSN 面向垂直行业 profile 的进展

AVNU 面向车载，专业影音，工控等领域研制 AVB/TSN 的测试方法及其测试工具。针对车载 AVB 的测试方法已经比较完善，如图 7 所示，针对车载 TSN 的标准正在制定中。

Avnu Automotive End Device Testing & Specifications		
This suite of test plans tests for conformance for the Avnu Automotive profile specification for AVB and TSN automotive devices and bridges.		
Test Plan or Specification Name:	Description	Last Update
Automotive gPTP	Test plan for Automotive general Precision Time Protocol (gPTP), a common clock for all devices based on the 802.1AS standard	Sept 2015
Automotive Network Startup	Test plan for Automotive Network & Device startup	June 2015
Automotive FQTS (Bridge)	Bridge Test Plan for Automotive SR Classes; Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams	April 2016
Automotive End-Station	End-station test plan for Automotive media formats and SR classes	March 2016
Automotive Exceptions	Test plan for Automotive Exception Handling	Sept 2015
Automotive Diagnostics	Test plan for Automotive Diagnostic Counters	Aug 2015
Automotive Ethernet AVB Functional and Interoperability Specification	Interoperability baseline specification document for Ethernet AVB functionality on automotive devices.	Sept 2016

图 7 AVNU 关于车载 AVB 终端的测试规范

AUTOSAR 是由全球汽车制造商、零部件供应商及其他电子、半导体和软件系统公司联合建立，致力于为汽车工业开发一个开放的、标准化的软件架构。AUTOSAR 共有两种架构，Adaptive AUTOSAR 和 Classic AUTOSAR 的升级替换，Adaptive AUTOSAR 的出现主要面向汽车更复杂的需求，包括自动驾驶、车联网以及域控制器等，而传统的 ECU 依然采用 Classic AUTOSAR 进行开发。Adaptive AUTOSAR 架构如图 8 所示，其中定义了多种 API，且具备一定扩展性，通用汽车提出了一种可行的支持 TSN 的通信 API，如图 9 所示。

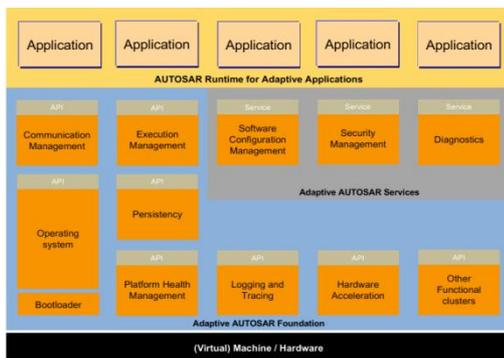


图 8 Adaptive AUTOSAR 架构

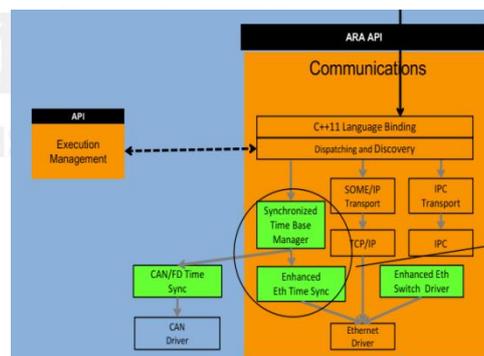


图 9 通信 API 中加入 TSN

OPEN Alliance 是非盈利性的汽车行业和技术联盟，由博世、宝马等发起，旨在利用以太网的可扩展性和灵活性实现车联网低成本通信，减少通讯复杂性。自建立以来，OPEN Alliance 的成员单

位已增至 340 家。Open Alliance 共计 12 个工作组，如图 10 所示，其中 TC11 正在制定车载 TSN 芯片的需求及测试规范。



图 10 OPEN Alliance 组织架构

JasPar 是日系 OEM 主导的旨在对车在网络的软件及电子控制系统标准化的组织，其 Next Generation High-Speed Networking WG 正在制定车载 TSN 的场景及需求，且与 IEEE P802.1DG 结盟。

2. 国内标准动态

我国工业互联网产业联盟 (AII) 于 2019 年 10 月发布时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书 (征求意见稿)，其中将车载网络作为重要的应用场景之一。

中国智能网联汽车产业创新联盟 (CAICV) 的新型车载高速网络工作组，旨在充分发挥联盟的平台效应，促进国内新型车载高速网络的生态系统建设，推动新型车载高速网络技术发展、标准化和产业化等，拟研制车载 TSN 的技术要求及测试规范等。

(二) 车载时间敏感网络关键技术特征

TSN 的核心组件包括精确时间同步、流量调度、高可靠保障、配置管理等。

1. 时间同步

TSN 网络中的时间同步过程是从一个中央时间源 (Grand Master) 直接通过网络向所有网络设备和终端设备发送同步时间报文, 然后通过 IEEE 1588v2 协议, 计算得到各个设备的时间与中央时间源的偏差 (offset), 并存储在设备中, 作为其报文发送的时间参考, 如图 11 所示。除此之外, 为了提高时间同步的可靠性, IEEE 802.1AS-Rev 也在制定中, 如图 12 所示, 一个 GM (Grand Master) 发送两份相同的同步报文至终端 (N) 和交换机 (B), 甚至可以采用 2 个 GM 发送 4 份同样的同步报文。自动驾驶需要多传感器数据融合, 为了提升检测精度, 一般需要各个传感器与网络设备、控制器等同步, 可靠性是车载系统的第一要素, 所以 802.1AS-Rev 更符合车载应用, 802.1AS-Rev 于 2020 年 6 月合并至 IEEE P802.1ASdm-Hot Standby 中, 进一步提升时钟热备份与跨域时间同步的能力。

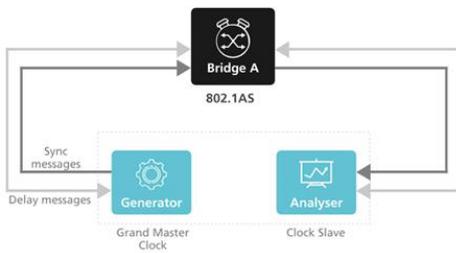


图 11 802.1AS 原理

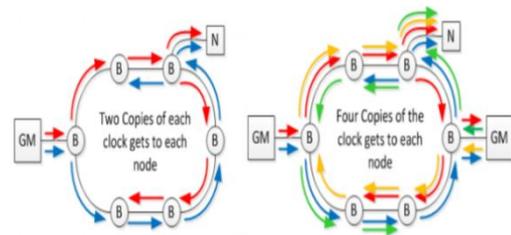


图 12 802.1AS-Rev 原理

2. 流量调度

(1) IEEE 802.1Qav (Credit-Based Shaper)

CBS 的工作原理如图 13 所示。对于需要被转发的以太网报文应遵循如下规则：

- 当队列中没有报文传输是，且其所在队列的 Credit 的值大等于 0，可以开始传输 AVB 报文，同时 Credit 值以 sendslope 速率减小；
- 上述报文发送完毕，且队列中没有等待传输报文，当 Credit 值为负数时，Credit 值以 idleSlope 速率累加，直到 Credit 值为 0；
- 当 credit 值以 idle slope 增加的过程中，可以传输普通以太网报文（如 Best Efforts），在此过程中，若 credit 值大于 0，且 Best Efforts 流量没有完成传输，则继续传输。在这种情况下 Credit 的值不再以 0 为上界。

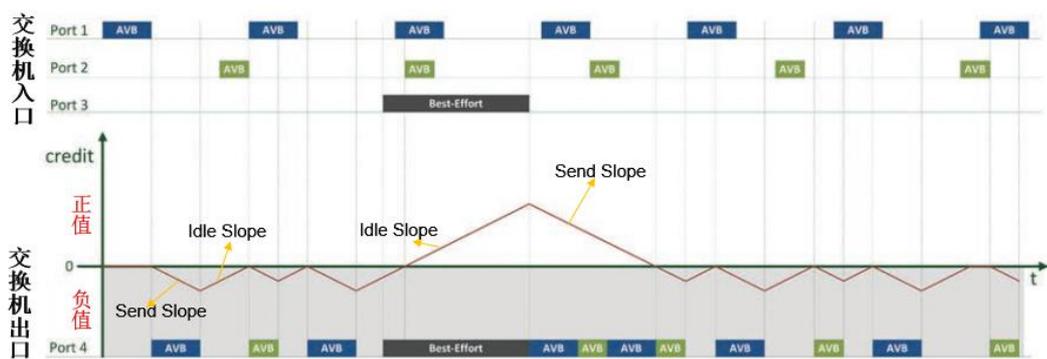


图 13 CBS 工作原理

CBS 机制是 AVB 的核心，在车载通信领域已经有初步应用，可满足娱乐系统的音视频传输，由于其技术成熟，配置简单，当前国外厂商（如 Volvo 等）研究将其用于车载控制信号的传输的可行性。

(2) IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper)

TAS 基于门控的思想，且需严格的时间同步，其工作原理如图 14 所示。门有“开”、“关”两个状态，通过预先规划，计算得到每条流对应的门的开关时间，终端与网络设备严格遵守发包时刻，并配合帧抢占机制，严格保障每条流的延时和抖动。但是某些情况下，带宽利用率可能不高。

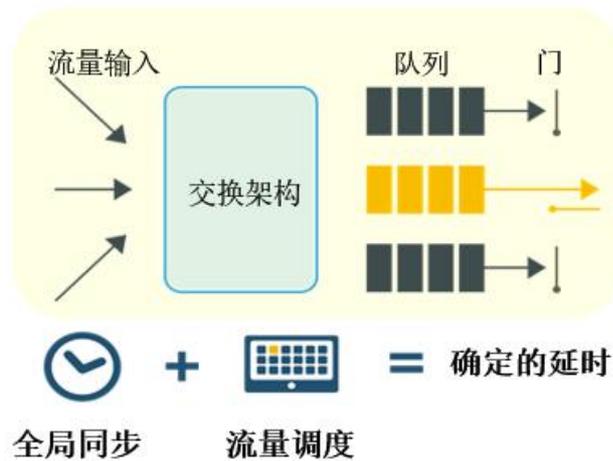


图 14 TAS 工作原理

TAS 机制适用于周期性信号，可提供 100us 以下（over 7 hop）的延时，且抖动小于 1% 的控制周期，一般用于有超低延时、超低抖动要求的控制信号传输，且其配置极其复杂，在车载通信的应用尚存争议。

(3) IEEE 802.1Qch (Peristaltic Shaper)

Peristaltic Shaper (PS), 即 802.1Qch, 也称 cyclic queuing and forwarding (CQF)。其工作机制如图 15 所示，将时间片或周期分为相等的奇 (odd) 偶 (even) 间隔 (interval)。在偶间隔接收

报文，并在奇间隔发送。这种方式对时间同步要求没有 TAS 高。从实现方式角度出发，PS 的奇偶间隔也可作为 TAS 的两个队列。CQF 在车载领域的应用讨论的比较少。

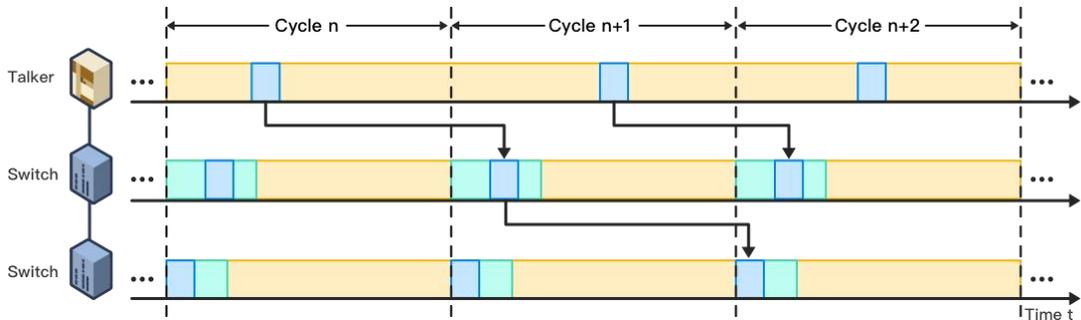


图 15 CQF 工作原理

(4) IEEE 802.1Qcr (Asynchronous Traffic Shaper)

ATS 源于 Urgent-Based Shaper，该技术不再依赖于时间同步协议，利用交换机本地的时间变量，提前计算并为每条流量分配本地合格时间 (Eligibility time)，合格时间在队列中生效，在达到每条流对应的合格时间时开始发送对应的报文，ATS 队列转发基于令牌桶算，如图 16 所示。



图 16 ATS 工作原理

由于 ATS 机制不依赖时间同步，更适合非周期性流量传输，同时对于周期性流量也能满足一定的延时、抖动需求。2019 年以来，ATS 机制在车载领域应用的研究逐渐升温，通用汽车是 ATS 的主要支持者。

综上，每种机制的性能各异，如下进行总结和对比，如表 2 和图 17 所示。

TSN Tool	Engineering Complexity	Worst Case Latency for the Examples
Time Aware Shaper	Hard(>1 TC) Medium(1 TC)	15.7 uSec FE Hop 2.0 uSec GE Hop
Credit Based Shaper	Easy	249 uSec FE Hop 138 uSec GE Hop
Cyclic Queueing	Medium	500 uSec FE Hop 250 uSec GE Hop

表 2 TAS\CBS\CQF 性能对比

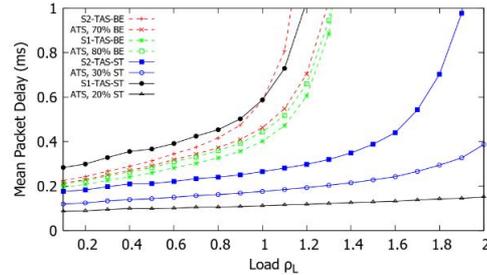


图 17 TAS\ATS 性能对比

3. 高可靠

安全可靠永远是汽车最重要的属性，ISO 26262 严格规定了汽车各功能的安全等级，分别为 ASIL-A、ASIL-B、ASIL-C、ASIL-D。TSN 关于网络高可靠保障的协议是 IEEE 802.1CB，如图 18 所示。其核心机制是报文复制与报文丢弃，即在发送端发送两份一样的报文，若在接收端同时收到，则丢弃一份，接收一份。针对车载应用，可能需要对现有 TSN 可靠性机制进行完善和补充。

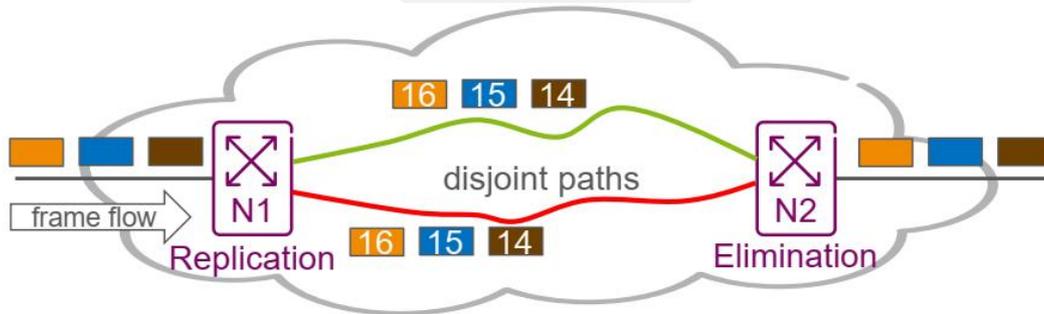


图 18 TSN 可靠性工作原理

4. 配置管理

TSN 的配置方法适用于 IEEE 802.1Qcc，从架构上，分为完全分布式（如图 19）、分布式用户/集中式网络（如图 20）、完全集中式（如图 21）。由于车载网络节点多，流量种类多，集中式的配置管理是首选。

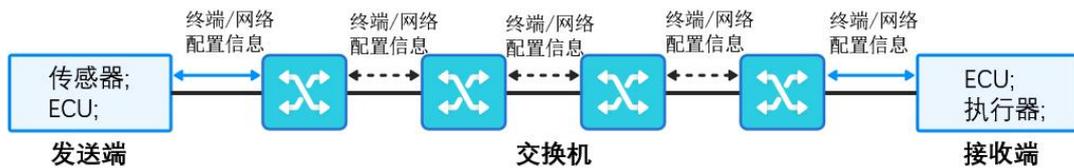


图 19 完全分布式配置模型

完全分布式配置的基本原理是与发送端设备临近的边缘交换机获取用户需求，计算跳所提供的网络资源（如 TAS 的门控），再将本网络节点计算结果作为下一个网络节点的输入，逐级传递并完成全网的配置。该方法更适用于规模较小的场景。

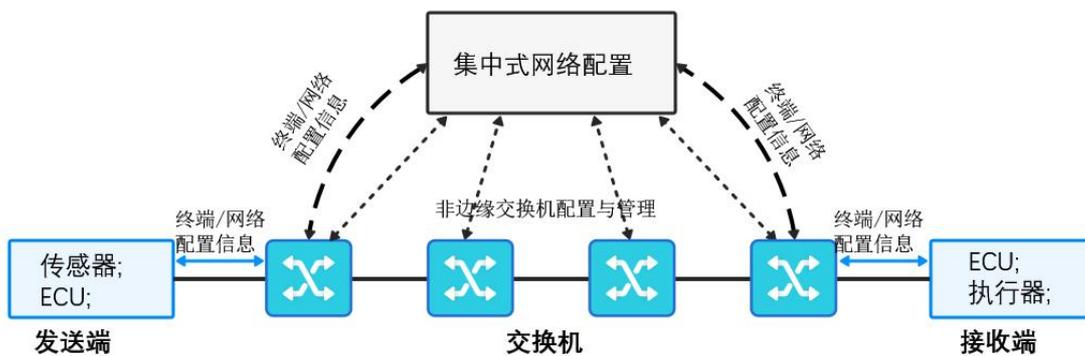


图 20 分布式用户/集中式网络配置模型

分布式用户/集中式网络配置模型的原理是与用户临近的边缘交换机负责用户信息搜集与用户设备的时隙配置。所有交换机由中央网络计算单元（CNC）配置。

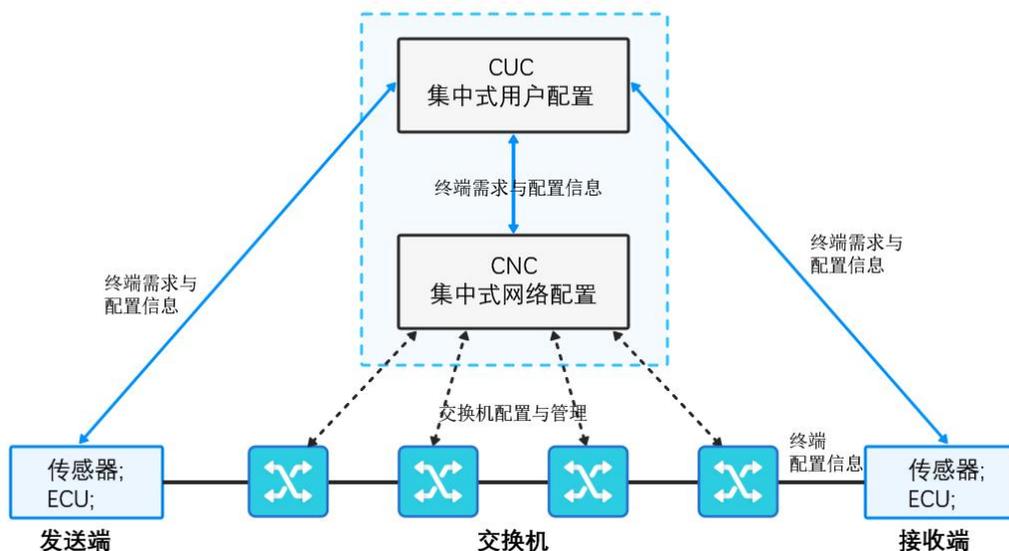


图 21 完全集中式配置

以 IEEE 802.1Qbv 为例,完全集中式配置的原理是 CUC 负责搜集用户需求并将需求发送至 CNC, CNC 结合交换机资源、拓扑等计算得到交换机和终端设备的时隙并完成配置。

(三) 车载时间敏感网络参考架构

根据国标 GB/T 40429-2021 和美国 SAE J3106, 自动驾驶等级分为 0 级到 5 级, 我国与美国的分级主要区别在于 0 级, 我国把 0 级列为应急辅助, SAE 将 0 级定义为无驾驶自动化。其他等级的定义类似, 部分驾驶辅助 (1 级)、组合驾驶辅助 (2 级)、有条件自动驾驶 (3 级)、高度自动驾驶 (4 级)、完全自动驾驶 (5 级)。完全自动驾驶的核心是不需要人参与, 在任何地方能够完成任何有经验的人类驾驶员可以完成的操控, 同时提供丰富的人车互动, 将汽车打造成新的移动生活空间, 全自动驾驶汽车预计将在 2035 年左右开始普及。作为智能交通系统的重要组成部分, 全自自动驾驶车辆在复杂的场景中, 需要采集和处理海量数据, 同时完成车-车, 车-人, 车-网等之间的大规模数据交换。时间敏感网络可有效满足上述需求, 同时, 车载网络架构将会发生巨大变革, 且需分阶段实施, 最终满足全自动驾驶。

1. 车载时间敏感网络参考模型

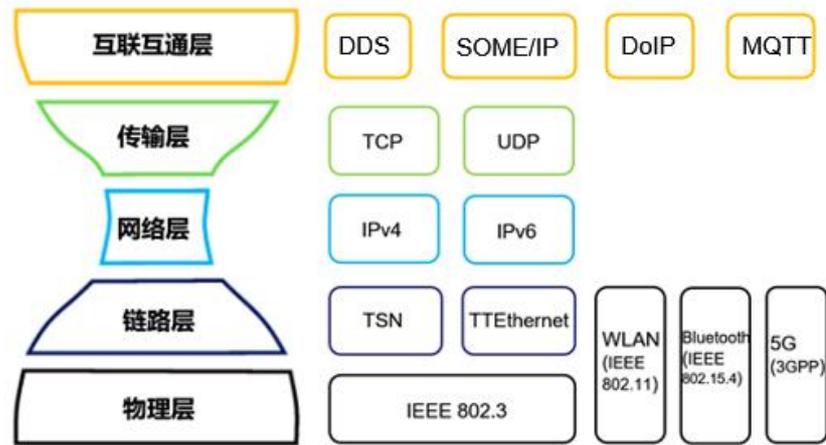


图 22 车载网络参考架构

参照 OSI 网络分层的定义，图 22 为车载网络各层潜在的通信协议，其中，传输层以上统一归类为互联互通层，本白皮书重点关注 TSN 技术。如下对各层协议的适用范围做简单说明。

(1) 物理层：

以太网的基础协议主要有 IEEE 802.3 制定，车载领域相关的主要有 IEEE 802.3bw, IEEE 802.3CFI 等。关于车载无线技术，当前主要使用 IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 也有小范围尝试，5G 主要面向未来车载通信的应用。

(2) 链路层：

为满足确定性低延时要求，链路层可使用 TSN、TTEthernet 等技术；由于无线技术基于竞争机制，为满足确定性低延时，未来需考虑 TSN over WLAN, TSN over 5G 的可行性。

(3) 网络层：

当前 IPv4 是主流，未来随着智能网联汽车的纵深展, IPv6 是趋势。在车内，对于某些“硬实时”通信需求的车载应用，可能会精简 IP 协议栈，采用应用层直达数据链路层的通信模式。

(4) 传输层:

目前车载通信主要采用的网络层技术为 UDP, 为了进一步提升实时性, 可能会精简 TCP/UDP 协议栈。

(5) 互联互通层:

DDS 和 SOME/IP 均是一种车内系统间通信的中间件, SOME / IP 专为汽车行业设计, 其作为 AUTOSAR 的一部分开发的规范集合, 描述了其序列化协议, 服务发现和用于与 Classic AUTOSAR 集成的变换器; DDS (数据分发服务) 针对更广泛的工业物联网域, 它是由 Object Management Group (OMG) 发布的一系列开放标准, 它专为分布式实时系统而设计, DDS 在应用层的服务质量 (QoS) 保障方面具有优势, DDS 支持 Adaptive Autosar。DoIP 常用于诊断和升级等; 车与云互通的协议一般为 MQTT 等。

(四) 车载时间敏感网络与 DDS 融合

数据分发服务 (Data Distribution Service) 是新一代分布式通信中间件协议, 提供丰富的 QoS 服务质量策略, 以保障数据进行高效、灵活地分发, 可满足各种分布式通信应用需求。在实时性方面, DDS 也提出 DDS-RTPS 等协议标准来确保实时性, 期望通过协议交互控制来确保应用数据传输的实时性。在实际应用中, RTPS 协议在一定程度上能确保尽力而为的, 具有一定的实时性, 但是不能与数据转发面映射, 无法满足设备内部、系统间端到端的实时性要求。

当前, OMG 组织正在制定如何通过 DDS 将应用层的 QoS 策略映射至 TSN 的相关标准, 从而简化 TSN 的配置、甚至直接通过 DDS 配置 TSN。DDS 与 TSN 融合架构如图 23 所示。

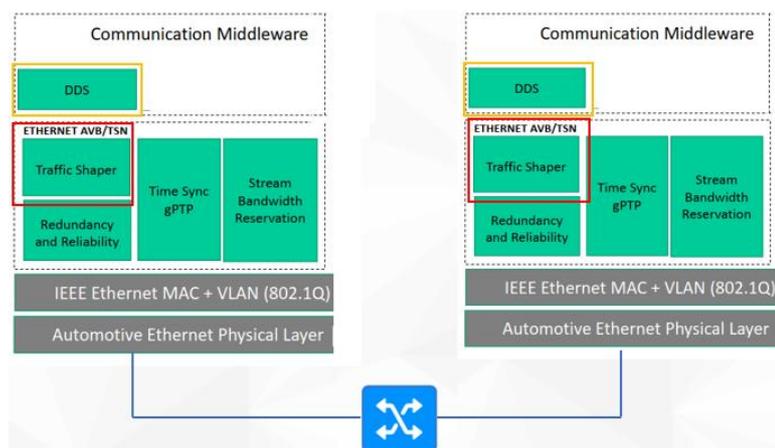


图 23 DDS 与 TSN 融合架构

（五）车载时间敏感网络与 SDN 融合

当前车载网络流量模型属于静态模式，BOSCH 认为，未来车载网络的动态流量将增多，主要需求如下：

- 面向服务的 OTA(over the air) 升级，新增或改变现有流量；
- 不断变化的用户需求，后期（出厂后）增加功能或应用（app）；
- 针对特定场景的流量突变，如采集用于验证的现场数据，特定情况的通信等；

软件定义网络（Software Defined Network, SDN）通过将网络设备的控制面与数据面分离开来，从而实现了网络流量的灵活控制，使网络作为管道变得更加智能。时间敏感网络可遵循 SDN 体系架构，通过引入 SDN 控制器，满足车载时间敏感网络的动态、可扩展等需求。车载 SDN 的参考模型如图 24 所示。

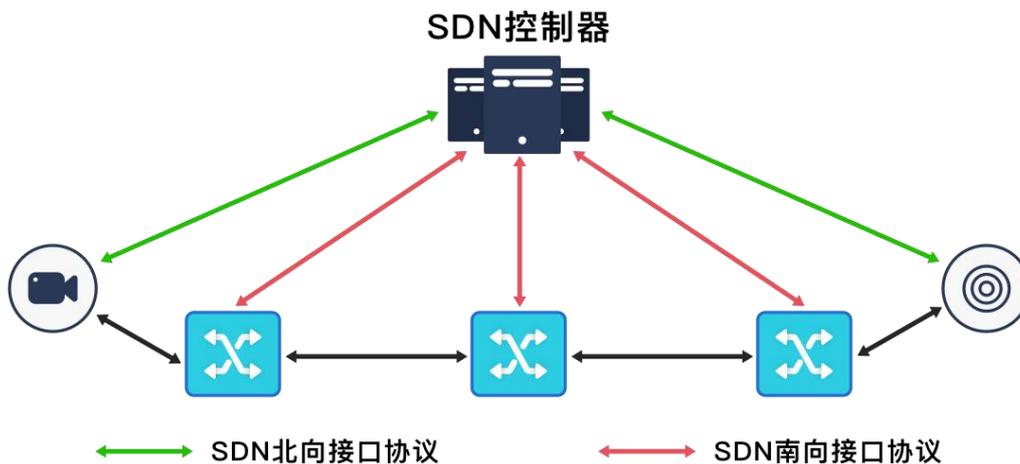


图 24 车载 SDN 参考模型

通过 SDN 控制器配置车载时间敏感网络一般包括如下步骤：

- 获取每个 SWC (software component) 对应的流量信息；
- SDN 控制器对 SWC 认证：一般通过北向接口完成；
- SWC 与流 (flow) 直接的映射
- 主动映射首次注册的新增或被更改的 SWC；

为了提升全生命周期的用户体验和维护效率，TTTech 提出将车载网络控制器 CNC 部署在 4S 店等服务商或直接部署在车内，用户需求反馈时间将从数年至数天完成。



图 25 主机厂根据用户需求更改车辆配置：数年

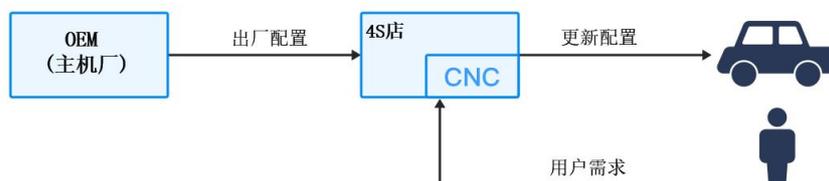


图 26 4S 店根据用户需求更改车辆配置：数月/周

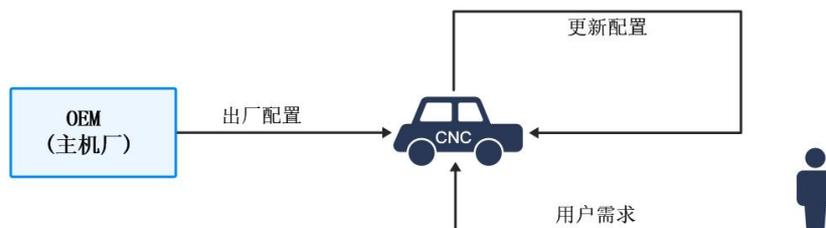


图 27 用户自行更改车辆配置：数天

（六）车载时间敏感网络与无线网络融合

随着自动化、智能化程度的提高，车与外部通信的无线需求增多，如车与车实时交互速度和位置信息、实时监测道路基础设施（红绿灯）状态等、云游戏、甚至基于云的控制等场景。这些场景需端到端的确定的低延时通信保障，无线 TSN 技术成为研究的热点，如 WLAN over TSN 或 5G over TSN 等。当前日本 JASPAR 产业联盟正在研究车内 TSN 网络与 5G 融合的技术，如图 28 所示。

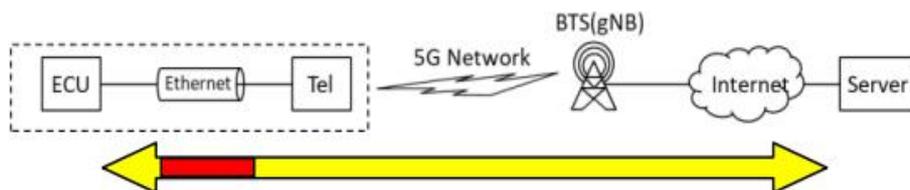


图 28 车内 TSN 与 5G 融合架构示意图

三、车载时间敏感网络产业发展态势

（一）丰富车载时间敏感网络生态链

国内，在工业互联网产业联盟（AII）的指导下，中国信息通信研究院正牵头制定《时间敏感网络（TSN）产业链名录》，该目录从交换机、网关、芯片、模组、垂直行业等维度出发，面向产业提供

可用的 TSN 产品目录与主要技术指标，车载领域是其中重要的组成部分。

国外，表 3 是当前已经商用的 TSN 芯片和交换设备等（数据截至 2020 年 2 月）。

Manufacturer	Device	Device Type	No. Ports	comment
Analog Devices	FIDO5100	End system	2	
Analog Devices	FIDO5200	End system	2	
Broadcom	BCM53570	Switch	up to 48	Switching capacity up to 50 Gbit/s
Cisco	4000 Series	Switch	up to 20	Switching capacity up to 16 Gbit/s
Hirschmann	BOBCAT	Switch	up to 8	Switching capacity up to 2.5 Gbit/s
Infineon	Aurix	End system	1	ASIL-D capabilities
Kontron	KBox C-102	Switched end system	up to 4	
Kontron	ESC1600-PTP	Switch	up to 24	only support for AVB
Kontron	ESC2404-PTP	Switch	up to 24	only support for AVB
Marvell	88EA6321	Switch	7	
Marvell	88Q5050	Switch	8	
Marvell	88E6341	Switch	11	Switching capacity up to 2.5 Gbit
Mircochip	SAM V 71®	End system	1	
NXP	SJA1105TEL	Switch	5	
Renesas	RH580	End system	1	only support for AVB
Texas Instruments	Sitara™	End system	up to 6	
TTTech	MFN100	Switched end system	4	

表 3 国外 TSN 产品动态

另外，国内外主流主机厂（如 BMW、一汽、上汽、长城等）均在积极探索车载时间敏感网络技术。汽车产业具有产业链长、供应商数量多、层级多等特点，供应商的质量直接影响 OEM 产品的质量。自动驾驶会引入更多的电子设备、通信设备，Tier 1 对这些设备做系统集成，作为独立的功能模块交付至 OEM，OEM 将不同功能模块组装厂整车，然后由特定的使用者进行相关的自动驾驶车辆的路测，路测的结果驱动设计环节逐步迭代完善。从图 29 中可以看出，主流 OEM 均与 Tier 1、技术服务商、出行服务商等组成联盟，推动各具特色的自动驾驶汽车生态链。

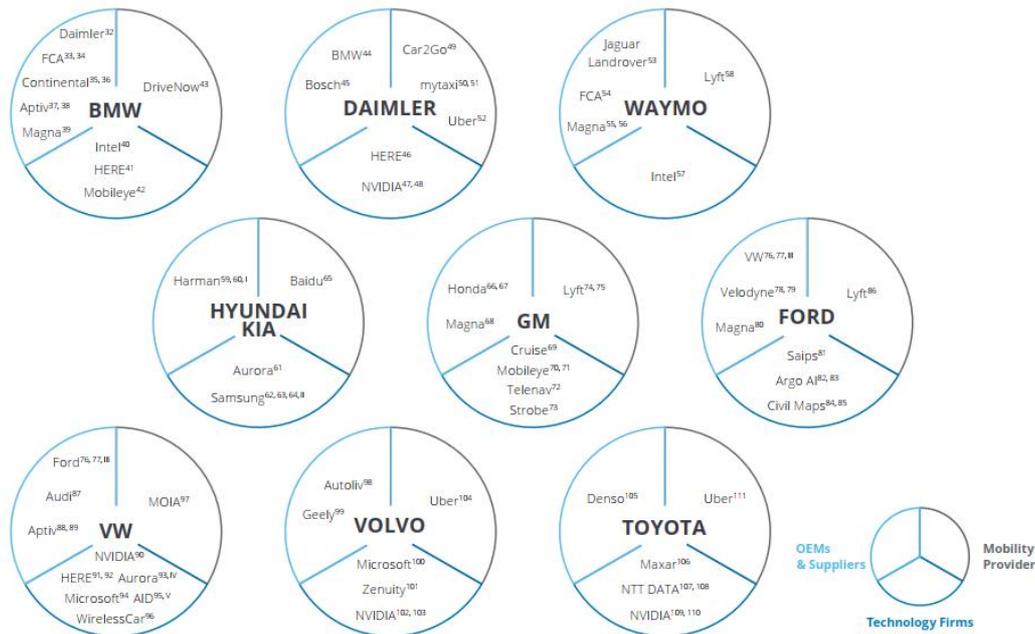


图 29 自动驾驶产业布局与结盟

车规级传感器、车规级终端、ECU、域控制器等设备将会获得极大的丰富，支持 TSN 技术的车载网络设备得到应用，异构通信协议的适配兼容将会得到妥善解决，以支持车载通信网络的进一步发展，助力高级别自动驾驶的实现。

（二）加速高级别自动驾驶技术发展

1. 加速智能驾驶舱发展

智能驾驶舱的发展大致分为四个阶段，如图 30 所示。从中不难看出，随着智能驾驶舱的发展，智能化程度越来越高，需要感知和处理的数据也越来越多，为了提升服务质量，数据处理速度也越来越快，对车载网络架构和车载网络技术提出新的挑战。



图 30 智能驾驶舱发展阶段

车载时间敏感网络所具备的低时延、低抖动、高可靠、高带宽等传输特性，将加速智能驾驶舱的发展，支持未来汽车使用场景的丰富化和生活化，且保障关键信息的实时可靠传输。

2. 加速数据实时融合技术发展

多传感器数据融合分为三种，分别是：

(1) 数据级 (raw data level) 融合，如图 31：

将多个传感器的原始数据直接进行融合，然后再从融合数据中提取特征向量进行判断识别，数据级融合不存在数据丢失的问题，得到的结果也作为准确。

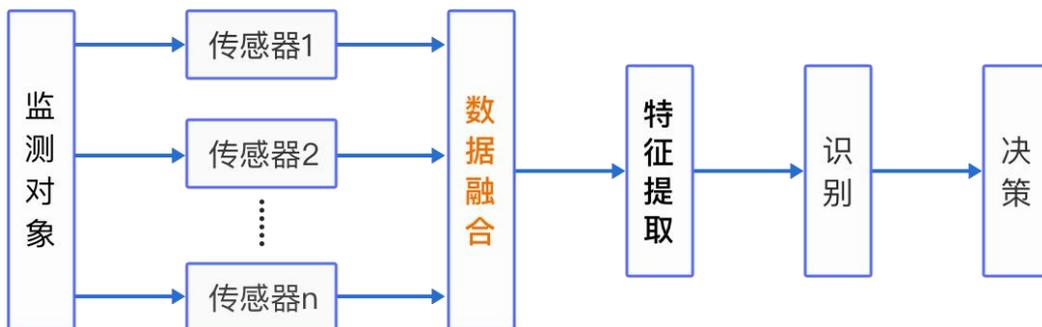


图 31 数据级融合流程图

(2) 特征或目标级 (feature or object level) 融合，如图

32:

先从每个传感器提供的原始观测数据中提取代表性的特征，再把这些特征融合成单一的特征向量；其中选择合适的特征进行融合是关键；特征信息包括边缘、方向、速度、形状等。

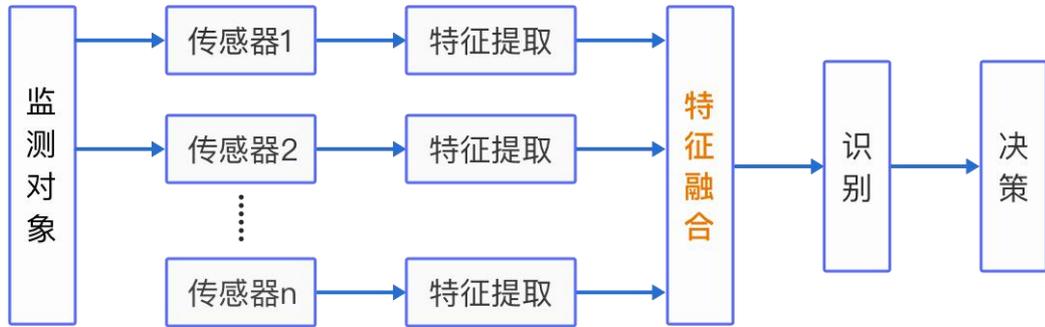


图 32 特征级融合流程图

(3) 决策级 (decision level) 融合, 如图 33:

属于高层次级融合, 是对数据高层次级的抽象, 输出是一个联合决策结果。

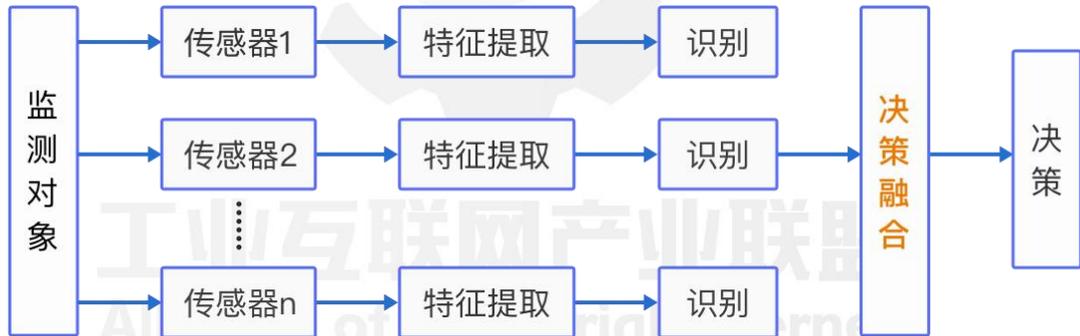


图 33 决策级融合流程图

各种传感器融合方式的优劣对比如表 4 所示:

融合方式	优势	不足
数据级	<ul style="list-style-type: none"> • 精度高; • 数据不丢失; • 易于AI训练; • 适合高度/完全自动驾驶场景; 	<ul style="list-style-type: none"> • 带宽需求高; • 严格时间同步; • 计算能力要求高;
特征/目标级	<ul style="list-style-type: none"> • 数据处理简单; • 带宽/算力要求适中; • 普及率高; 	<ul style="list-style-type: none"> • 数据有丢失; • 需背景知识辅助识别; • 不满足高度/完全自动驾驶需求;
决策级	<ul style="list-style-type: none"> • 数据处理简单; • 无需同步 	<ul style="list-style-type: none"> • 只能从预先存储的特征中匹配; • 动态响应比较差;

表 4 不同融合方式的对比

(三) 促进 ICT 产业与汽车产业融合

汽车行业传统的 EE 架构，采用的是总线加分散控制的架构，随着车辆电子化程度增加，车内 ECU 数量迎来爆发式的增长。豪华车内 ECU 超过了 100 个，其不同的 ECU 由不同的供应商提供，导致计算资源不能协同、互相冗余；不同 ECU 使用不同的嵌入式 OS 和应用程序，导致无法统一维护和 OTA 升级，第三方开发者更无法与硬件进行便捷编程；ECU 数量的急速增加，增加了内部通信需求导致线束成本和装配成本增加。

上述痛点必将导致车载通信和计算的需求增多，最终带来汽车 E/E（电子电气）架构的变革，如图 34 所示，华为提出未来的汽车电子架构是基于 C/C（计算+通信）的架构，如图 35 所示。



图 34 E/E 架构

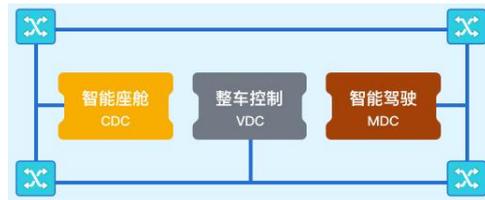


图 35 C/C 架构

随着自动驾驶的逐渐普及，预测到 2035 年，汽车产业供应链也将发生实质变革，华为、Cisco、Google、Apple 等 ICT 厂商将成为车载网络通信系统提供商、车载应用、服务提供商。



图 36 ICT 厂商融入汽车供应链

时间敏感网络技术车载领域广泛应用后，ICT 厂商与汽车零部件厂商将会紧密合作，在汽车供应链上形成深度融合。

四、车载时间敏感网络典型应用场景及展望

(一) 车载时间敏感网络典型场景

1. 自动驾驶域内

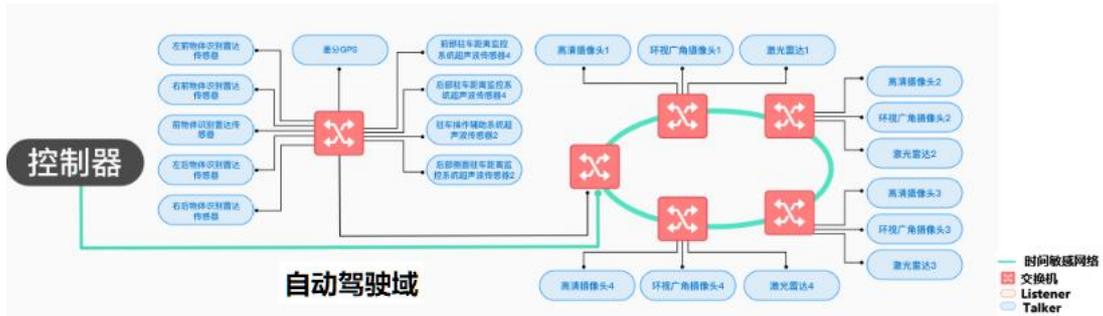


图 37 自动驾驶域内 TSN 架构

将时间敏感网络用于自动驾驶内可有效提升多传感器数据采集的实时性，并可支持原始数据采集。同时针对高清摄像头、激光雷达、毫米波雷达等融合处理场景，采用环网的方式提升可靠性。

2. 域控制器之间

车载时间敏感网络可应用于域控制器之间的骨干网。

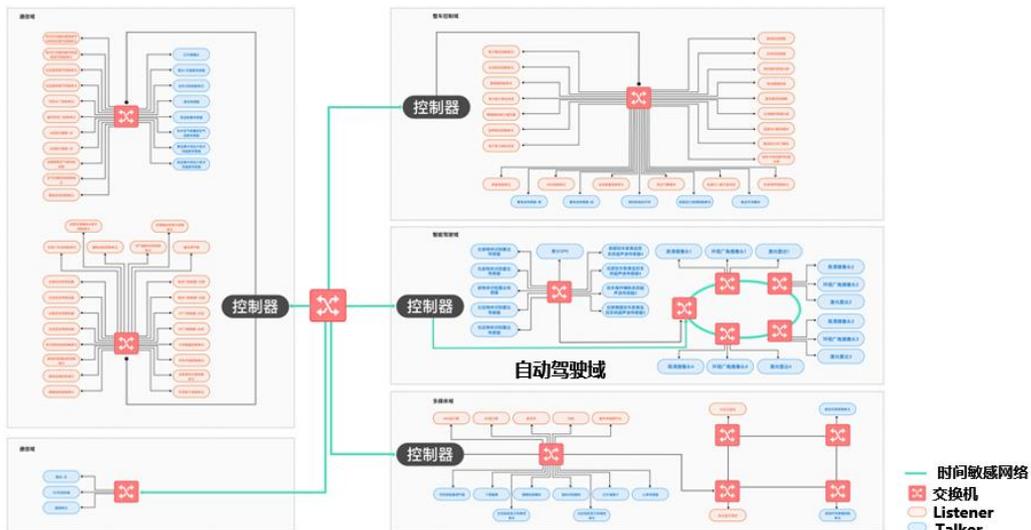


图 38 域控制器间 TSN 架构

当前汽车电子电气架构正在向基于域控制器架构演进，一般分为自动驾驶域、车身电子域、整车控制域、多媒体域、信息域等。域之间需要更多信息传输以完成协同工作，车载时间敏感网络可有效满足这种新需求。

（二）我国车载时间敏感网络展望

1. 政策驱动、网络引领

美国正在制定汽车安全指导原则，以帮助制定相关标准，并且推动自动驾驶立法；欧盟将于 2020 年代在城市地区实现低速自动驾驶，到 2030 年代步入以完全自动驾驶为标准的社会；日本《道路运输车辆法》修正案已于 2019 年 5 月 17 日通过，该法为实现自动驾驶实用化规定了安全标准。我国分别于 2019 年 5 月提出全面开展自动驾驶相关标准研制，2020 年 3 月 9 日发布《汽车驾驶自动化分级》推荐性国家标准报批公式。由此可见，为实现自动驾驶，尤其是最高等级的全自动驾驶，离不开国家层面的政策支持、法律支持等。

我国汽车市场需求巨大且相关产业链完备，但汽车领域的“硬科技”尚有欠缺。车载时间敏感网络是智能网联汽车车内网络的核心关键技术之一，我国网络通信技术发展迅猛，已经接近或达到世界领先水平，通过网络通信技术赋能智能网联汽车高质量发展，将是实现我国汽车工业“弯道超车”的历史性机遇。

2. 架构先行、引领未来

汽车的设计流程一般是架构先行，具有前瞻性、通用性、可扩展性的平台架构可极大加速整车上市时间，降低开发成本等。根据调研国内外车载网络架构，从先进性、扩展性、成本等角度考虑，建议采用如下架构作为面向高度自动驾驶、完全自动驾驶场景的车载网络参考架构。

(1) 基于中央计算与管理平台的车载时间敏感网络参考架构

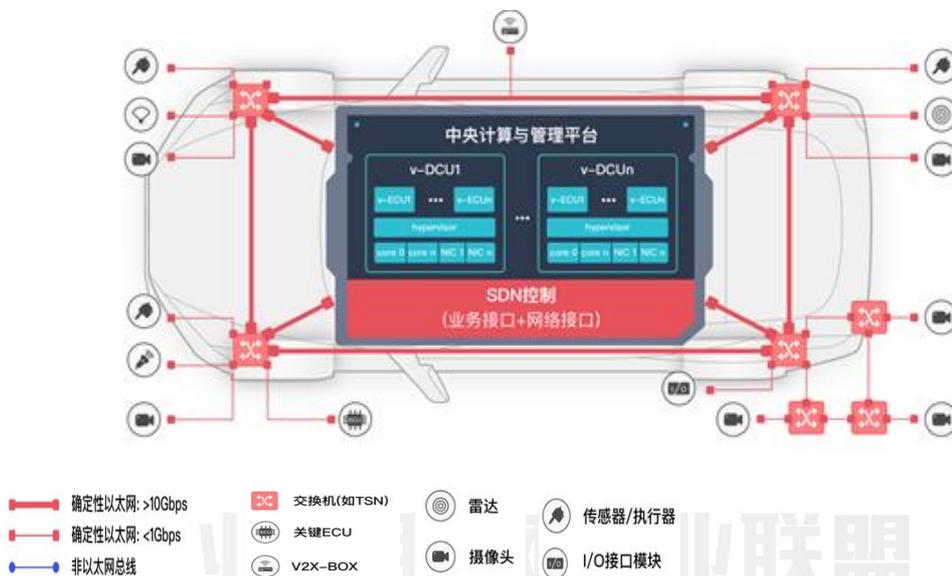


图 39 基于中央计算平台 TSN 参考架构示意图

该阶段参考架构具有如下特征：

- 按位置组网，简化布线；
- 通过虚拟化技术减少 ECU 数量；
- 通过 SDN 简化网络管理配置，提升网络的灵活性和扩展性；

(2) 基于分布式计算的车载时间敏感网络参考架构

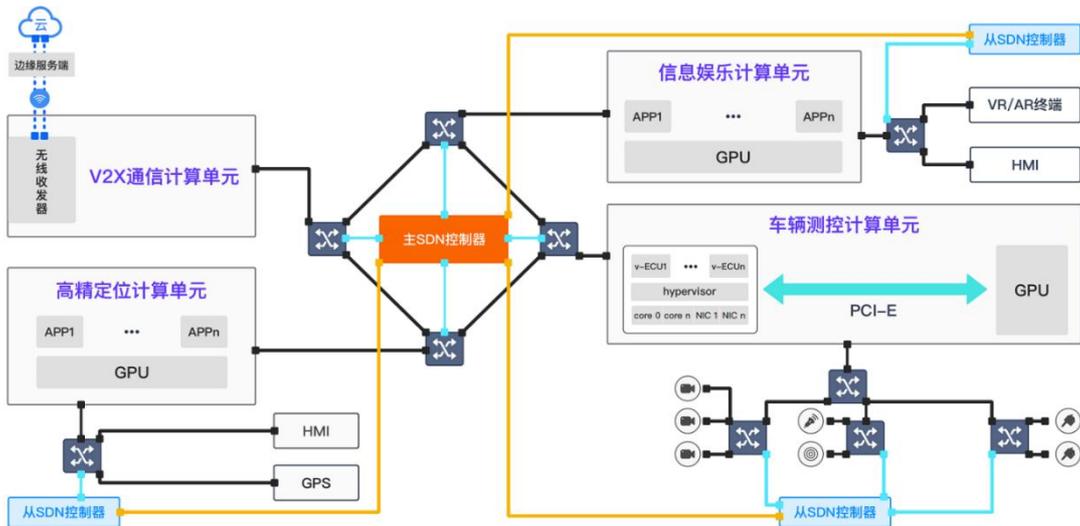


图 40 基于分布式计算的车载 TSN 架构示意图

该阶段参考架构具有如下特征：

- 海量设备接入；
- 多业务灵活部署；
- 全场景实时决策；