

时间敏感网络标准、关键技术及在工业中的应用

魏 旻

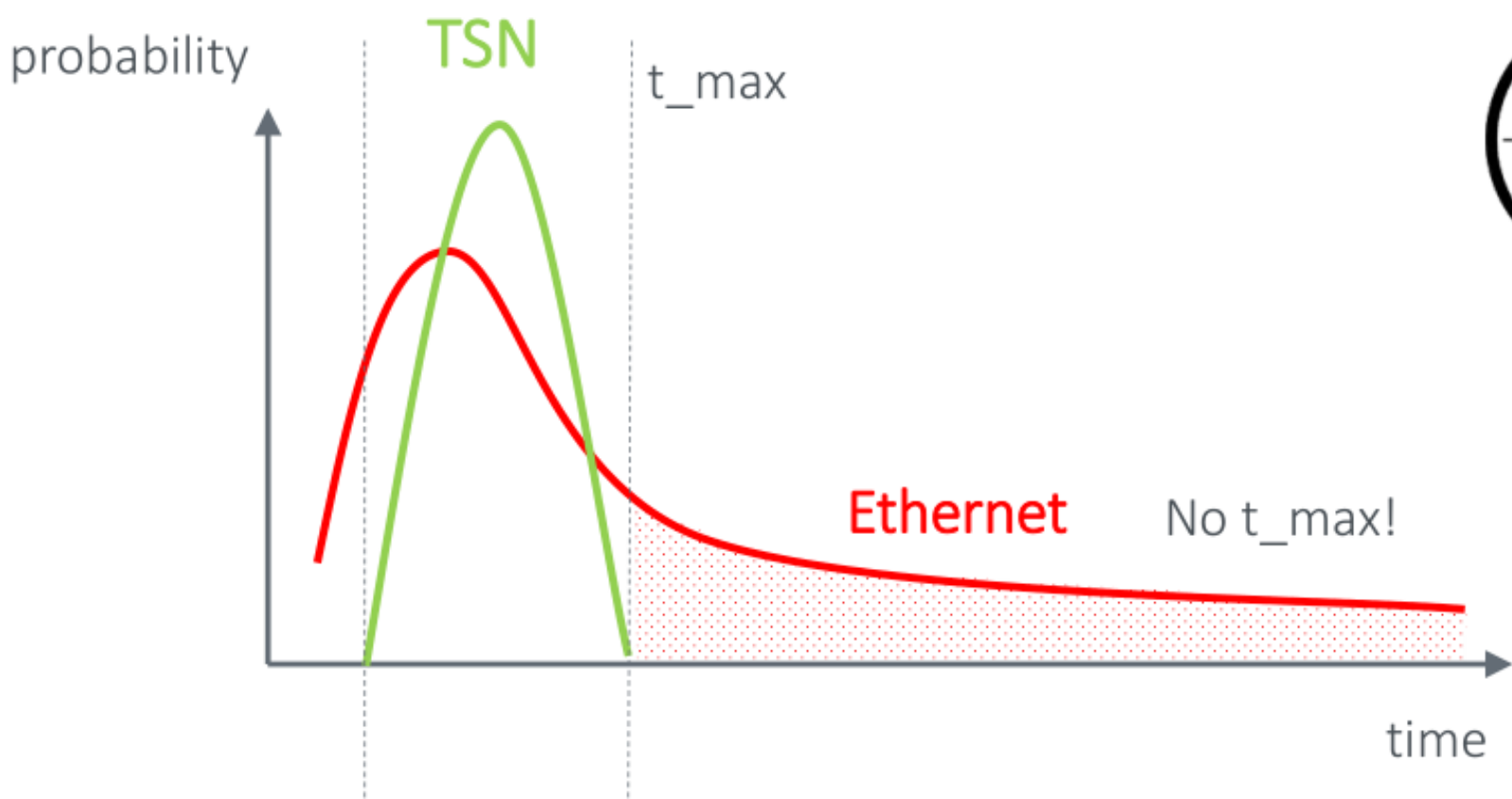
重庆邮电大学

2019.11.16

目录

- ① TSN发展背景及介绍
- ② TSN关键技术
- ③ TSN在智能制造中的应用
- ④ 重邮在TSN领域的研究进展

什么是TSN?



什么是TSN？



- 工业网络的“时间敏感”已经实现
 - 上世纪末开始各自动化厂商开发各自的实时**工业以太网协议**→现场总线大战
- “同一”网络的确定性与实时性
 - 周期数据和非周期数据
- 实时性优（贝加莱测试）
 - 抖动**50ns**
 - 最快周期**10 μ s**级
 - 千兆测试数据性能提升**18**倍

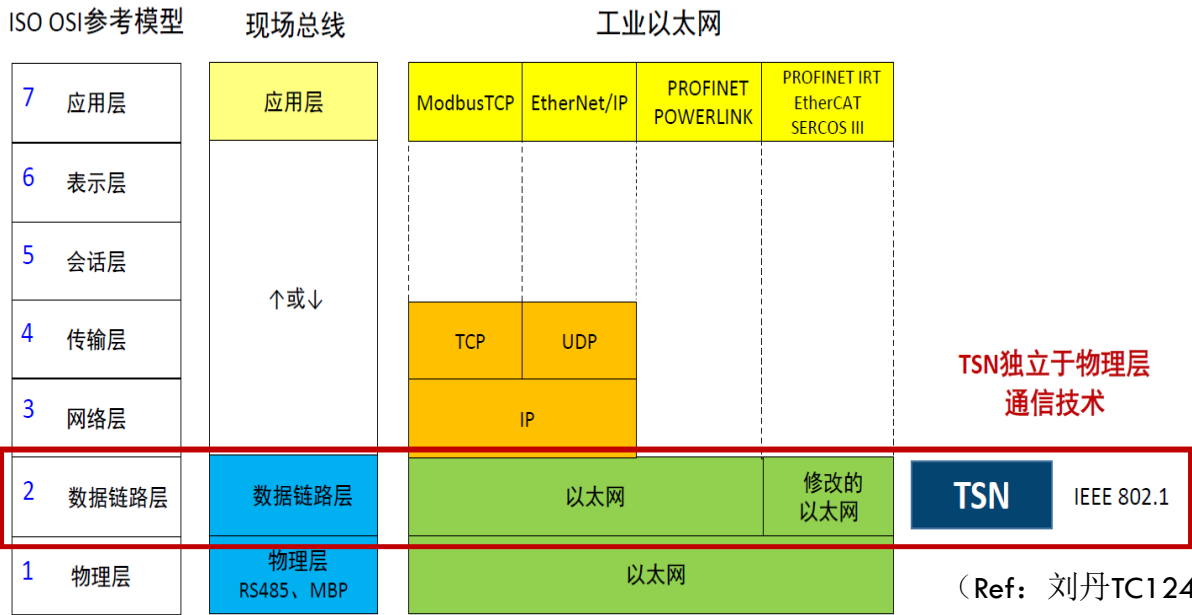


TSN是哪一层标准？

历史：

2006年IEEE 802.1工作组成立AVB音频视频桥接任务组

2012年更名为TSN，在以太网（IEEE 802.1和802.3）上增加各种功能和性能，确保网络数据传输的时间确定性，确保低延迟、低抖动、低丢包率。



（Ref：刘丹TC124年会TSN技术在智能制造中的应用
2018.11）

TSN标准协议族



时间敏感网络标准主要包括应用行规、配置标准和基础技术三类标准，通过这些标准的组合，时间敏感网络可以完成对网络的调度管理，并提供优良的调度结果。

应用行规:

802.1BA
Audio Video Bridging

802.1CM
Fronthaul (for cellular)

IEC/IEEE 60802
Industrial Automation

etc.

配置标准:

802.1Qcp
YANG
Data Model

802.1Qcc
TSN
Configuration

P802.1ABcu
YANG for
LLDP

P802.1Qcw
YANG for
Qbv, Qbu, & Qci

P802.1CBcv
YANG & MIB
for 802.1CB

etc.

基础技术标准:

802.1AS
Timing &
Synch

802.1Qat
Stream
Rsv. Prot.

802.1Qau
Credit Based
Shaper

802.1Qbu
Frame
Preemption

802.1Qbv
Scheduled
Traffic

802.1Qci
Per-Stream
Filtering

802.1CB
Frame
Repl. & Elim.

P802.1Qcr
Async. Traffic
Shaping

P802.1CS
Link-local
Rsv. Prot.

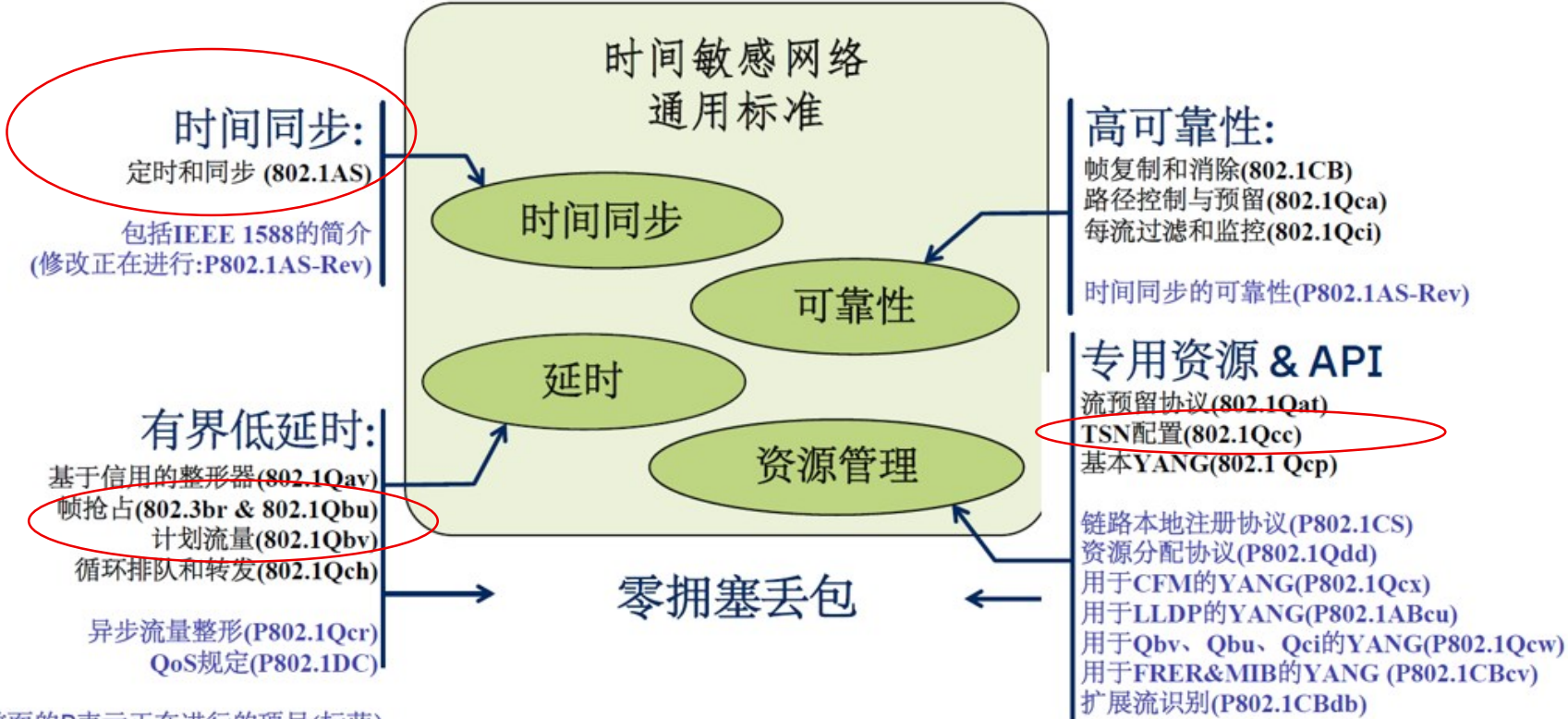
etc.

time



TSN标准协议族

TSN标准按功能分为时间同步、可靠性、低延迟、资源管理4类



注意:ID前面的P表示正在进行的项目(标蓝)

IEC SC65C/MT9和IEEE 802组成联合工作组，定义TSN工业应用行规 IEC 60802

- 选择适用于构建工业自动化网络的网桥/交换机、终端站和LAN的特性features、可选项options、配置configurations、缺省值defaults、协议protocols --- 通信行规
- 指导用户和制造商来选择和使用IEEE 802标准和特性，以实现同时支持OT通信和其他通信的融合的网络

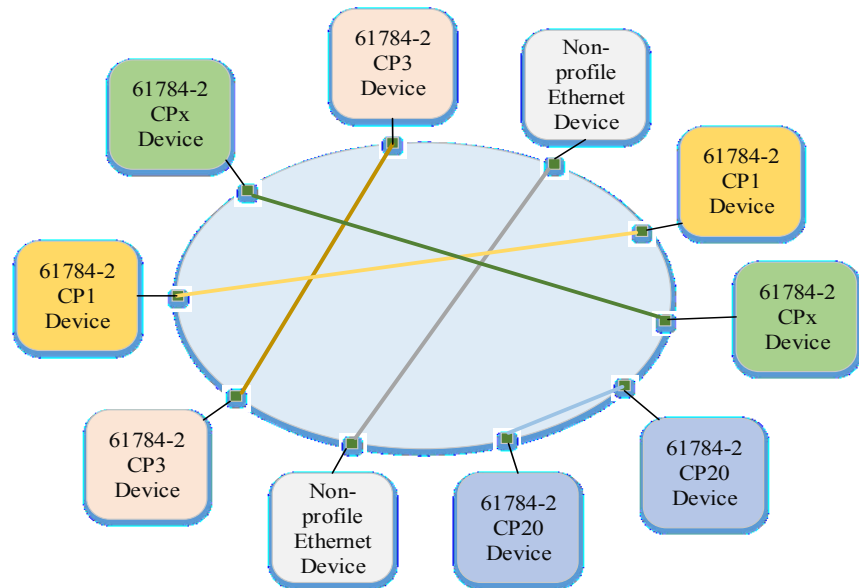


图 TSN与IEC 61784-2定义的通信行规融合示意

❑ 时间敏感型网络是一整套802.1特性，用于通过以太网传输**时间敏感数据**，这些数据是可以“混合和匹配的”

- 特性的使用取决于设备性能需求
- 设备广告其功能，网络被设为相应的配置

❑ 特性面向的是工业、汽车和AVB应用

以工业为核心的特性

- 时间同步，IEEE 802.1 AS-Rev
- 计划流量，IEEE 802.1 Qbv
- 帧抢占，IEEE 802.1 Qbu/ IEEE 802.3 br
- 逐流过滤和监管，IEEE 802.1 Qci
- 帧复制和帧消除，IEEE 802.1 CB
- 流预留，IEEE 802.1 Qcc

以AVB为核心的特性

- 时间同步，IEEE 802.1 AS-Rev
- 转发和队列，IEEE 802.1 Qav
- 流预留，IEEE 802.1 Qcc
- AVB系统，IEEE802.1BA

● 开放性

- TSN为实现IT和OT的融合提供了一个架构：缺乏**统一、标准、开放接**
- TSN通过标准化实现单一、开放的协议保障，支持互操作（OPC UA）。

● 可扩展性

● 确定性实时通信

- 平衡网络**实时性和异构数据传输**需求，支持**实时控制**和同步。

● 经济性

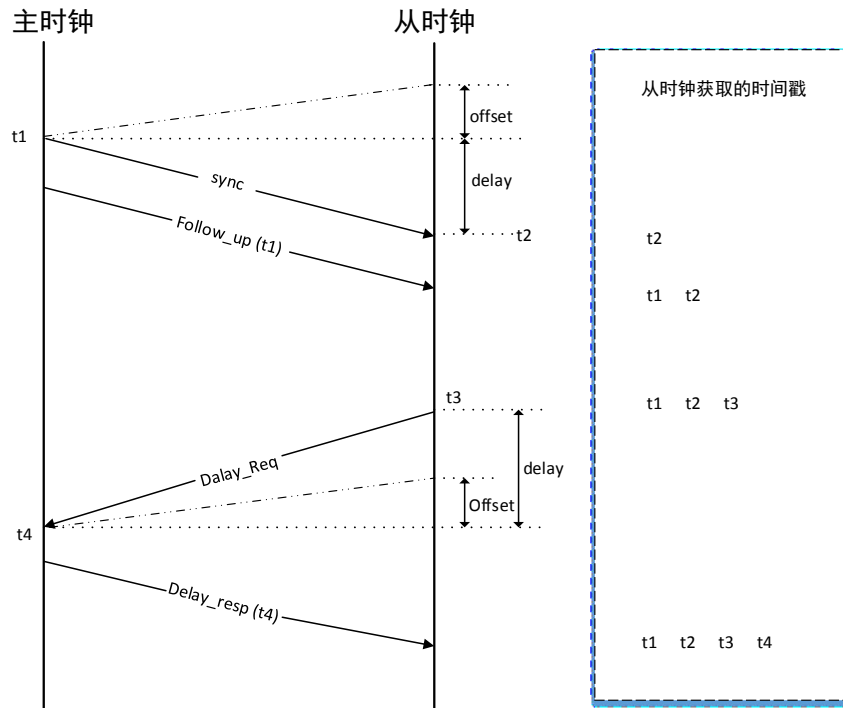
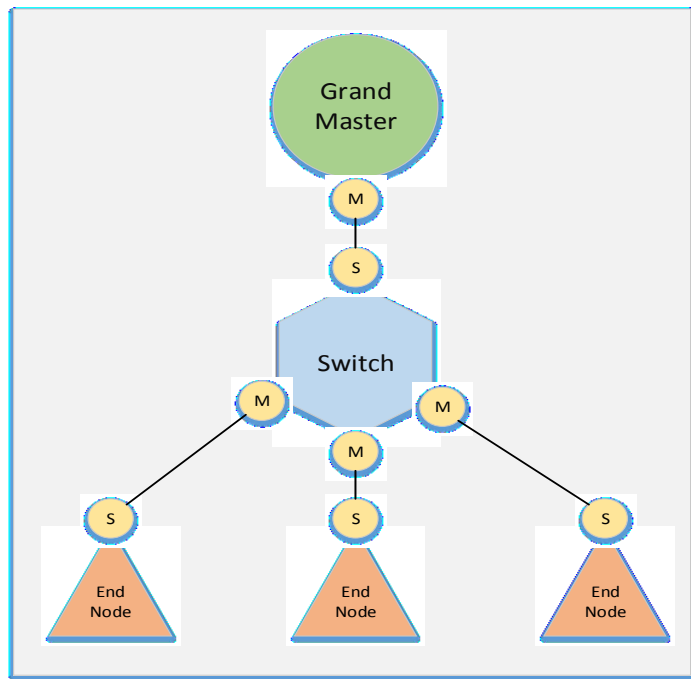
- 现有的工业协议众多，需要更多的转换接口和配置工具，TSN提供了经济的一网到底的解决方案。
- 工业协议标准壁垒严重,专利费用高，TSN通用芯片**成本很低**（0.5美元）。

目录

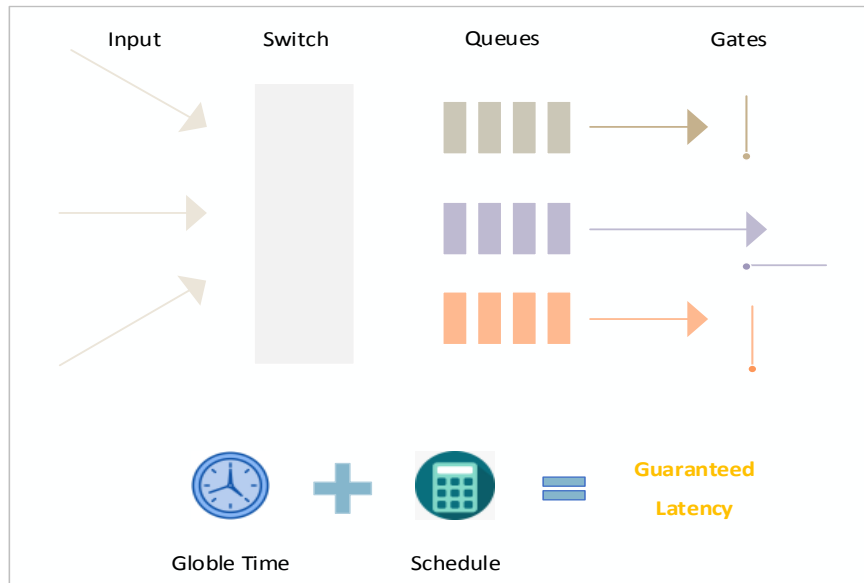
- ① TSN发展背景及介绍
- ② **TSN关键技术**
- ③ TSN在智能制造中的应用
- ④ 重邮在TSN领域的研究进展



时间在TSN网络中起着重要的作用。TSN网络中的时间通常从一个**中央时间源**直接通过网络本身分配，确保连接在网络中各个设备节点的时钟同步，并达到**微秒级甚至纳秒级**的精度误差。



IEEE802.1Qav(采用FQTSS-为时间敏感数据流进行转发和队列排序)，即为时间敏感型数据提供“Shaping”-整形，除了其它Best Effort外，有两个队列被赋予较高的优先级，这两个队列依据Credit进行数据的交替传输。



(Ref: 宋振华,TSN关键技术-整形器。2019.04)

流量调度增强(IEEE 802.1Qbv) 将以太网数据流量划分为不同的类型，每一种类型均保留至特定的时间存取网络，从而创造类型特定(class-specific)的保护“通道”。

- 实时数据流优先传输
- Reserved traffic

表1-TSN网络的PCP优先级代码定义

优先级	传输类型
0 (最低)	基础
1	最大努力
2	卓越努力
3	严苛应用
4	延迟和抖动小于100mS的视频
5	延迟和抖动小于10mS的音频
6	内部网络控制
7 (最高)	网络控制

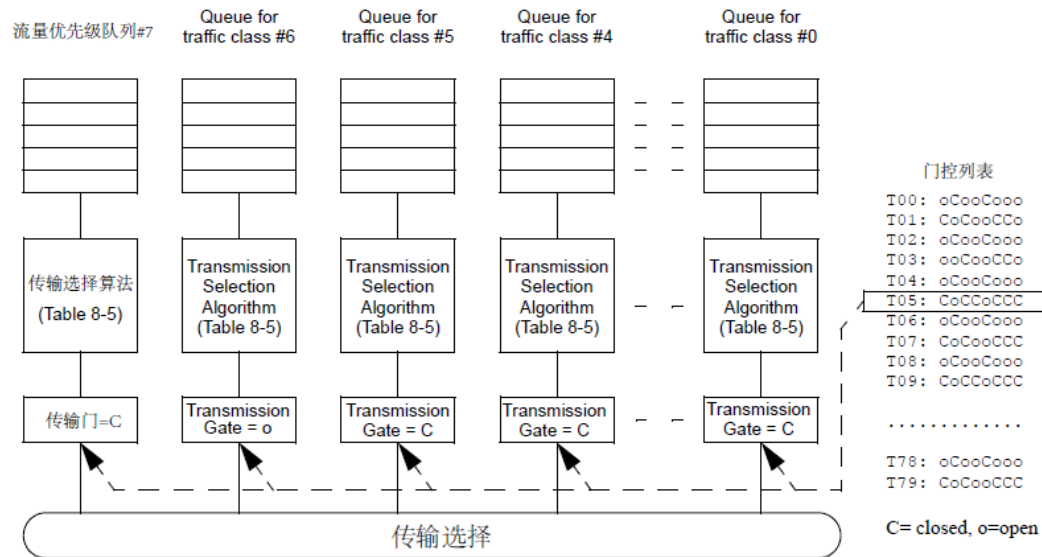
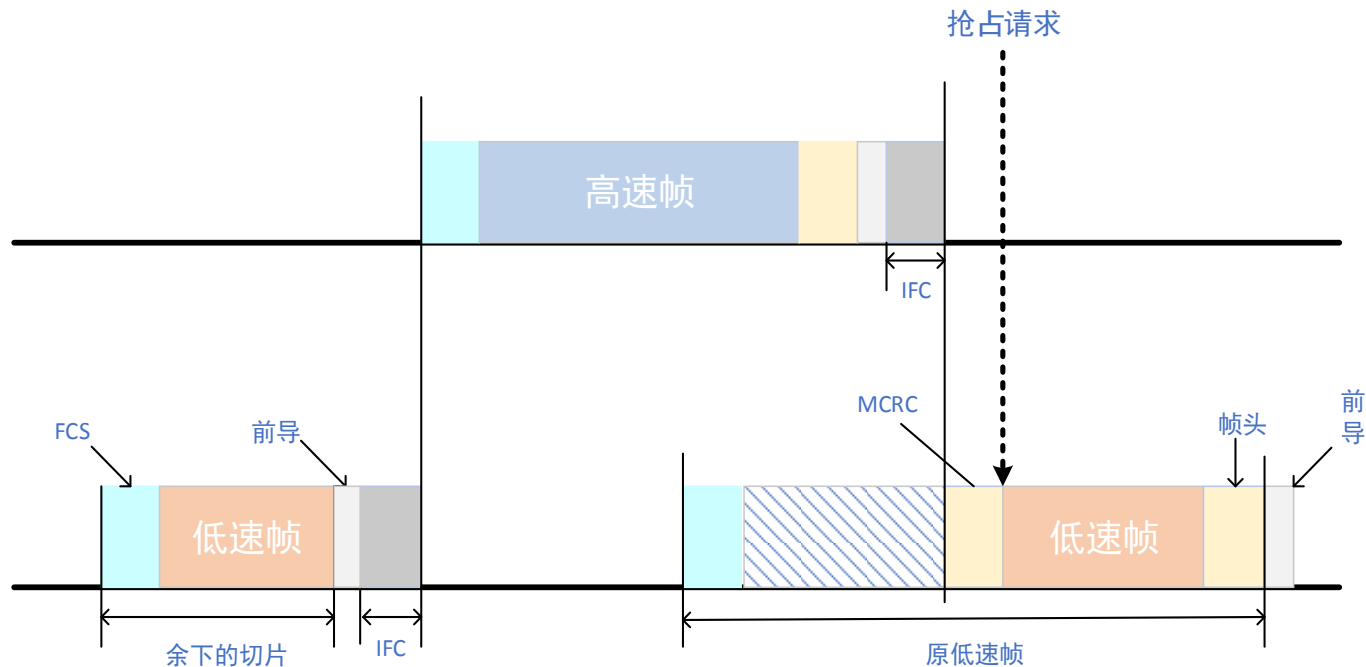


图 门控制调度机制

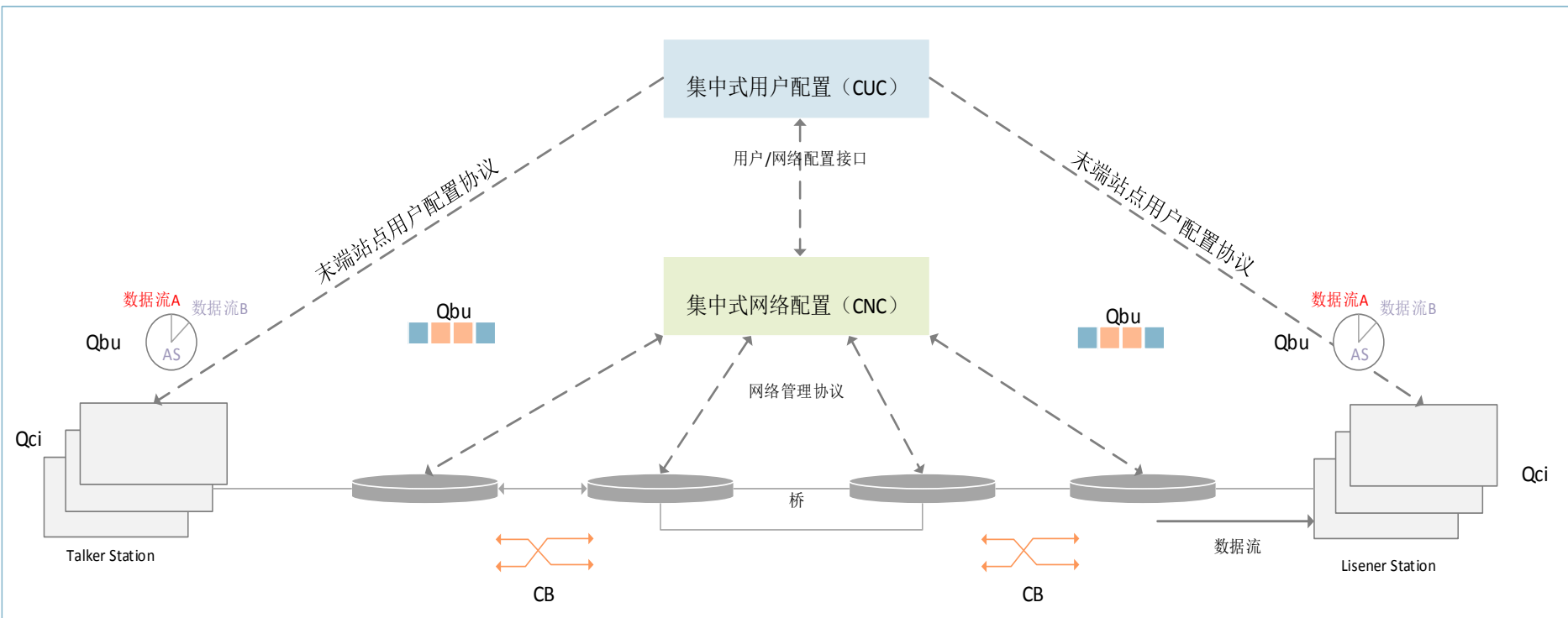


时间敏感网络（TSN）中**优先级越高的流**会被认作为“**更紧急**”，对时延的大小也越敏感。为了让诸多业务流量中优先级高的流能够更快速的送出，提出了**帧抢占机制**。帧抢占机制可以中断标准以太网或巨型帧的传输，以允许高优先级帧的传输，同时**不丢弃之前传输被中断的消息**。



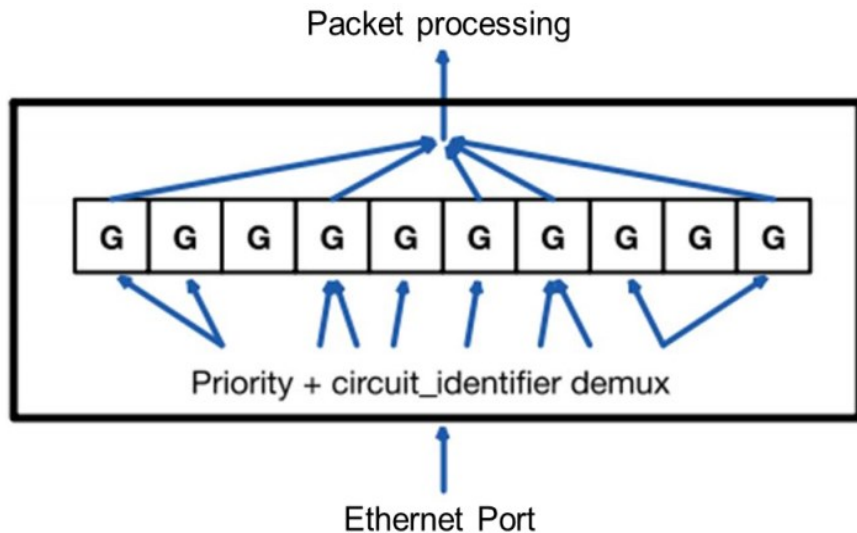


IEEE 802.1Qcc则是针对**网络与用户配置**的标准，由图中可以看到分为**集中式用户配置**与**网络配置**，可以实现Qbu、Qbv等多种机制下的网络参数的动态配置，满足设备节点和数据需求的各种变化。



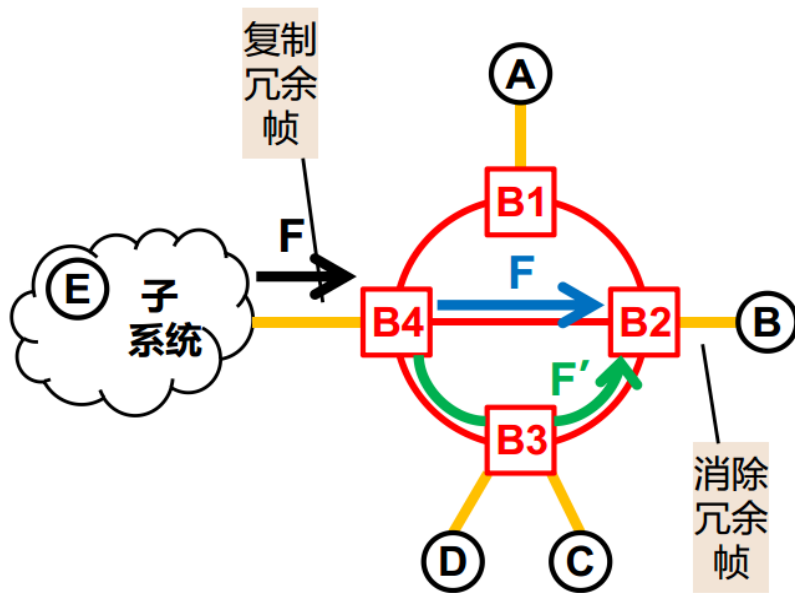


IEEE 802.1Qci (帧检测过滤和报错) 主要为防止网络攻击和流量过载设计，它对每个流量都进行过滤和管理，数据流滤波器包括数据ID、优先权、滤波值、Meter(计量)ID、计数器。802.1Qci可以抵抗DDoS攻击，ARP欺骗攻击，阻止错误信息的发送





IEEE P802.1CB（帧复制和消除）通过在网络的源端系统和中继系统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，通过帧复制和帧消除过程为以太网提供无缝冗余特性，提高可靠性。



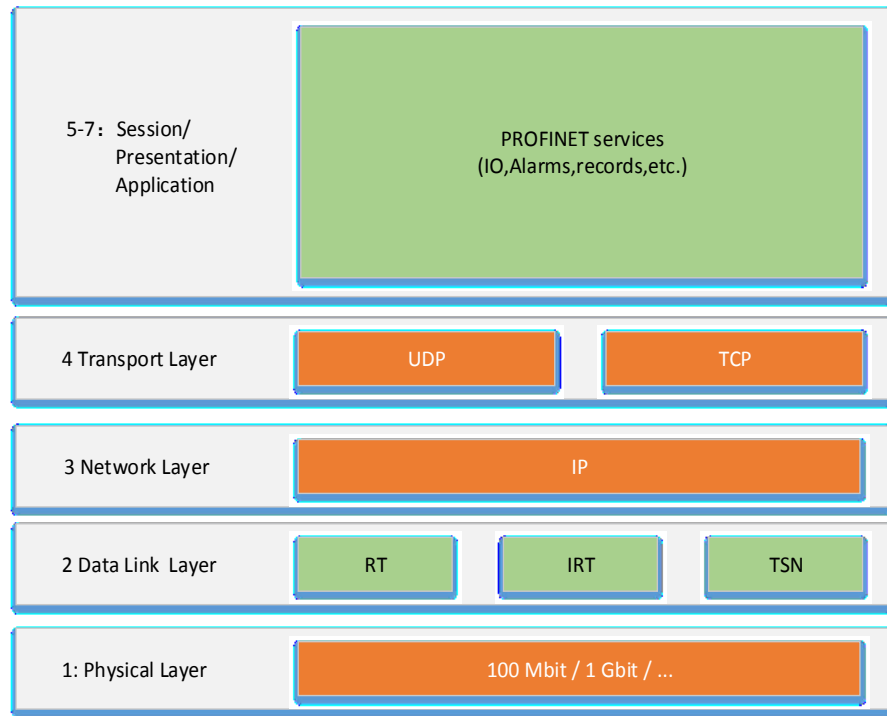
目录

- ① TSN发展背景及介绍
- ② TSN关键技术
- ③ **TSN在智能制造中的应用**
- ④ 重邮在TSN领域的研究进展

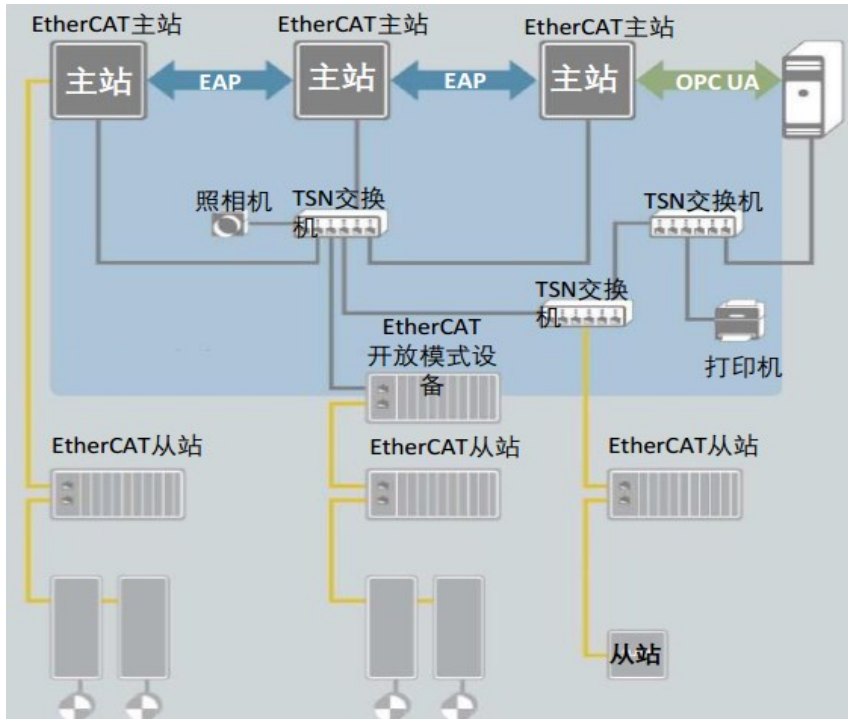
TSN与工业融合



工业通讯中目前最常用的协议有：**PROFINET**、**EtherNet IP**、**CC-Link IE**、**EtherCAT**等等，并且这些绝顶高手都已经开始或已经**融合TSN技术**，以顺应工业4.0数字化时代彻底互联互通的重大趋势。



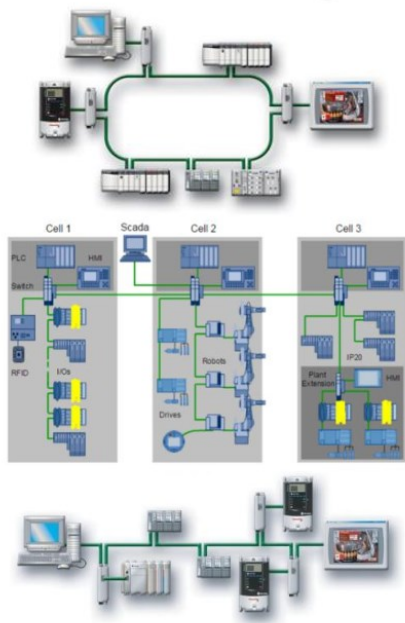
PROFINET和TSN技术融合架构



EtherCAT与TSN技术融合实体架构

达到工厂车间设备的性能要求

工厂车间



- 100Mb和1Gb网络
- 周期时间低至 $125\mu\text{s}$
- $<1\mu\text{s}$ 延迟, $<100\text{ns}$ 抖动
- 10x-100x更多设备
- 可靠传输数据
- 无流量过载或干扰

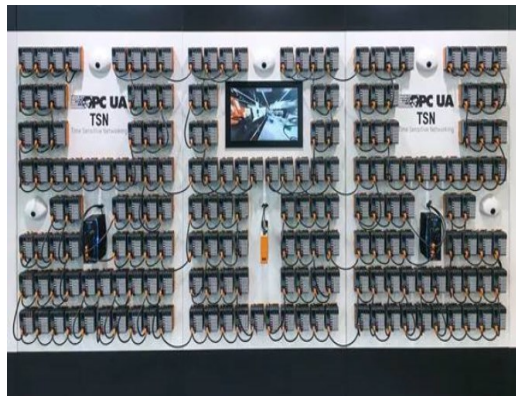
互联OT (工厂)
和IT (企业) 网络

企业



TSN应用案例

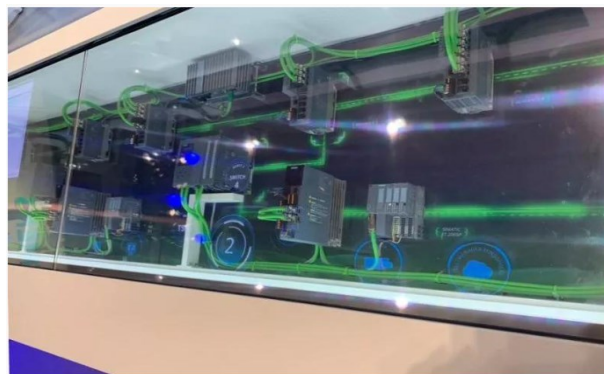
- 2016年德国SPS展上，贝加莱发布了基于OPC UA TSN的测试系统，在该系统中，由200个I/O节点和5个高清视频所构成的OPC UA TSN网络，对数据进行一次刷新的响应达到 $100\mu\text{S}$ 。
- 2018年汉诺威工业博览会上，西门子展示了一个模型来演示时间敏感型联网（TSN）的优势：即使在高网络负载条件下，TSN也能在机器和工厂之间实现更加强大和可靠的以太网通信。
- 2019年诺威工业博览会上，更新了2018年的展示方案，西门子将OPC UA与TSN一起用于M2M通信，以连接多个机器人（1个主机 + 2个从机 + 1个软件监控终端），每个机器人通过Profinet与SIMATIC控制器通信。



2016年德国SPS展



2018年汉诺威西门子展台



2019年汉诺威西门子展台

2017下半年以来，不少厂商开始就其产品在TSN技术上的进展发表声明，甚至直接演示或发布了一些有关TSN技术的产品和解决方案。例如：

- **工信部**在工业互联网、智能制造综合标准化项目中设置了专门项目支持，**科技部**重点研发计划也有对于工业互联网架构的研究
- **EtherCAT**组织发表了关于TSN技术的白皮书；
- **Beckhoff**发布了其首款TSN桥接通讯模块EK1000；
- **NI**发布了多款集成TSN技术的控制器，如：CompactDAQ、CompactRIO...等；
- **PI**组织宣布将会在新的PROFINET协议中使用TSN技术，并计划在2019年中发布该协议或相关产品；



全球推进TSN应用



- **SERCOS**在SPS IPCDrive上展示了由TSN交换机桥接组成的Rexroth运动控制系统；
- **SIEMENS**在2018年的汉诺威展上演示基于TSN的OPC UA Pub/Sub技术在控制层（如机器人）上的应用；
- **B&R**等自动化公司共同推动 OPC UA + TSN 作为工业控制器与云之间的统一通信解决方案；
- **CLPA**即将发布支持TSN的新一代CC-LINK IE支持TSN；
- 包括**ADI**、**瑞萨**、**TI**等在内的芯片厂商，和包括**华为**、**CISCO**、**BELDEN**等在内的网络设备提供商，都在不同场合演示说明TSN发展状况及其在该技术上的能力；
-





- 需求？
- 动机？
- 观望？
- 用户选择？
- TSN+5G应用？

TSN未必能一统江湖， 目前看来聚焦于工业级IoT应用

目录

- ① TSN发展背景及介绍
- ② TSN关键技术
- ③ TSN在智能制造中的应用
- ④ 重邮在TSN领域的研究进展



重邮在TSN领域的研究进展

团队依托智能仪器仪表网络化技术国家地方联合实验室、国家工业物联网国际科技合作示范基地等科研平台，牵头承担和参与了一批TSN相关的项目：

◆ 国家重点研发计划：

◆ 基于工业物联网和信息物理融合的机器人数字化车间智能制造关键技术研发及其应用示范（项目编号：2017YFE0123000）

◆ 工信部2018年工业互联网创新发展工程项目：

◆ 时间敏感网络关键技术标准研究与试验验证（财建2018[281]号）

◆ 工信部2019年项目：

◆ 时间敏感网络× × × ×

◆ 时间敏感网络× × × ×

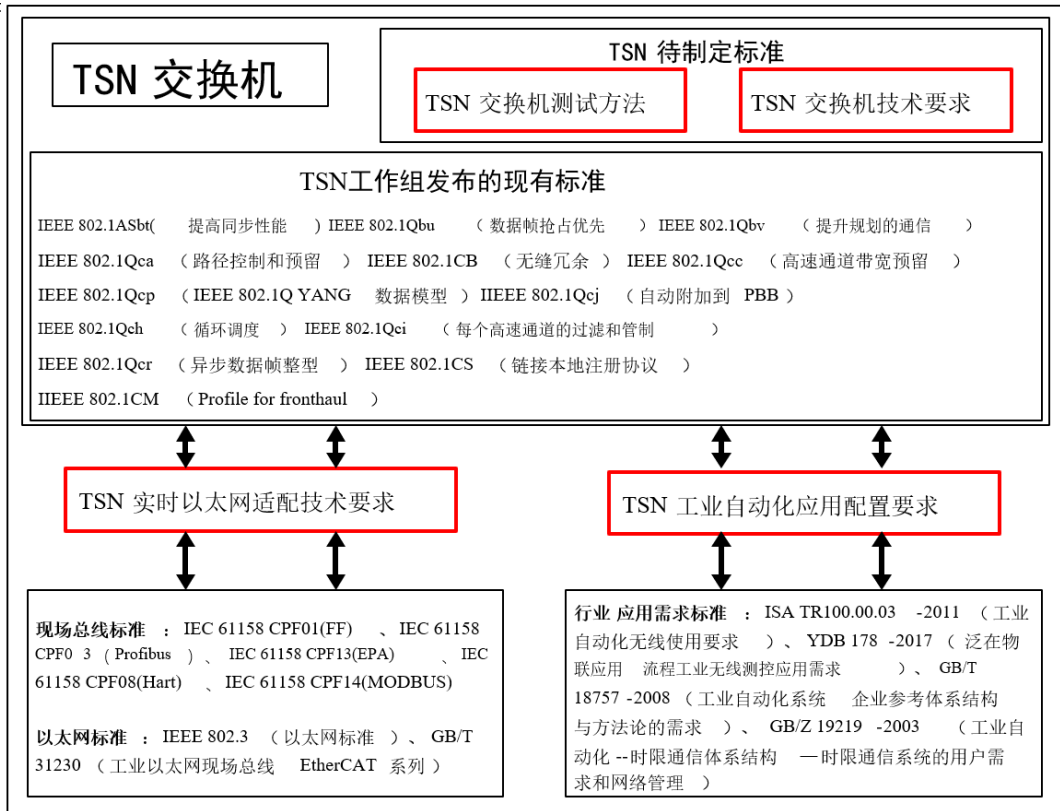
◆ 2019年重庆市产业重大项目

◆ 时间敏感网络核心设备技术研发及其应用



重邮在TSN领域的研究进展

重庆邮电大学研究团队研究TSN国际标准和相关技术，针对**TSN验证平台**、**TSN与多协议互联**等方面开展了一系列研究工作。



TSN 标准草案



重庆邮电大学在研究和梳理SC 65C ISO/IEC JTC 1、ITU-T、IEC、IEEE、IETF 等国际标准化组织时间敏感网络相关标准的基础上，结合我国工业互联网总体要求及部署和实施基于工业互联网的实际应用，自主制定《时间敏感网络工业 自动化应用配置管理要求》、《时间敏感网络 实时以太网适配技术要求》、《时间敏感网络 TSN 交换机技术要求》、《时间敏感网络 TSN 交换机测试方法》4项标准草案。

ICS 35.110
L 79

GB

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

信息技术 系统间远程通信和信息交换
时间敏感网络 第1部分：
工业自动化应用配置管理要求

Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Time sensitive networking—Part 1: Industrial automation application configuration management requirements

(草案)

(在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。)

XXXX—XX—XX 发布 XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

ICS 35.110
L 79

GB

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

信息技术 系统间远程通信和信息交换
时间敏感网络 第2部分：
实时以太网适配技术要求

Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Time sensitive networking—Part 2: Real-time Ethernet adaptation technical requirements

(草案)

(在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。)

XXXX—XX—XX 发布 XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

ICS 35.110
L 79

GB

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

信息技术 系统间远程通信和信息交换
时间敏感网络 第3部分：
TSN 交换机技术要求

Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Time sensitive networking—Part 3: TSN switch technical requirements

(草案)

(在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。)

XXXX—XX—XX 发布 XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

ICS 35.110
L 79

GB

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

信息技术 系统间远程通信和信息交换
时间敏感网络 第4部分：
TSN 交换机测试方法

Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Time sensitive networking—Part 4: TSN switch test methods

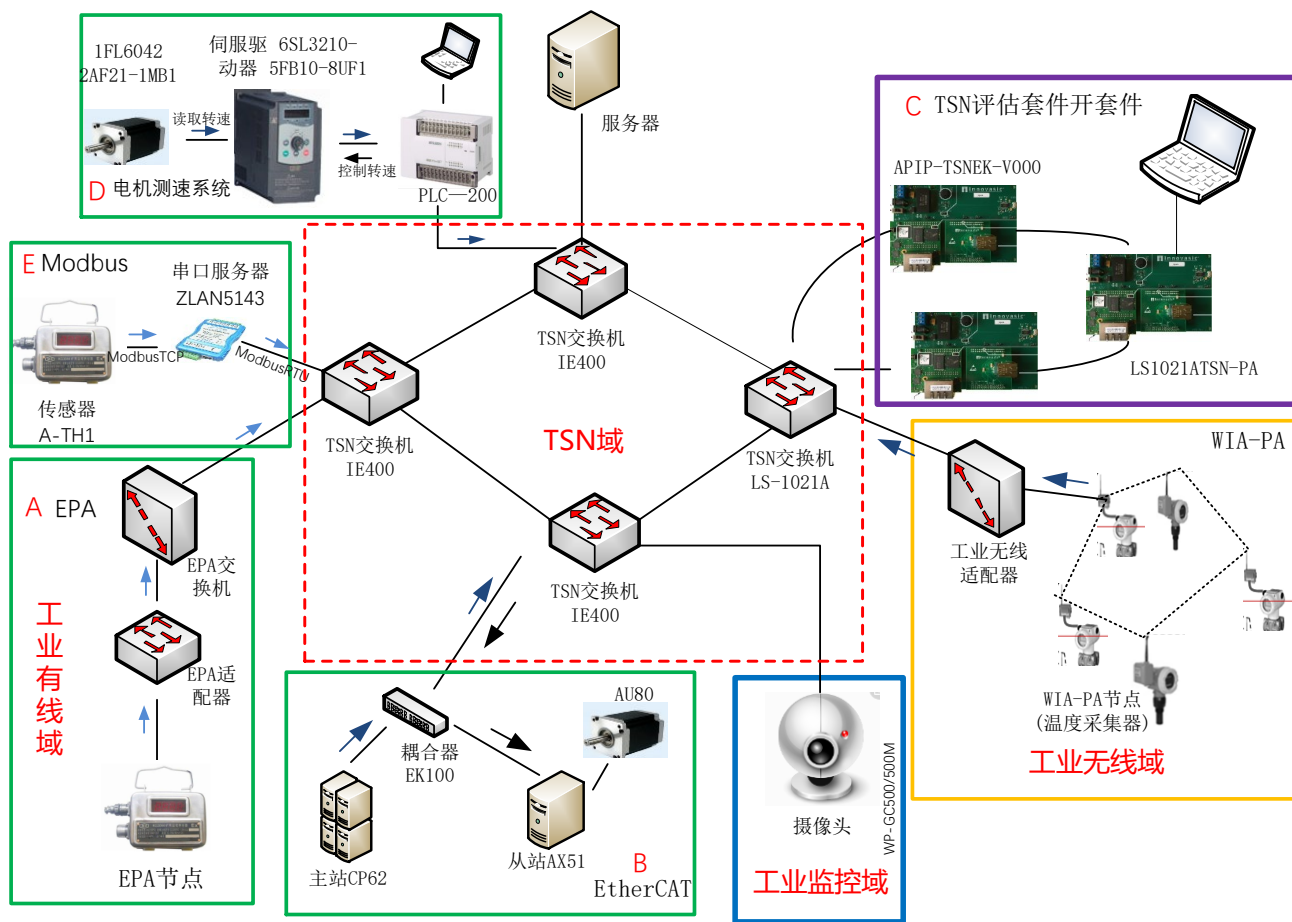
(草案)

(在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。)

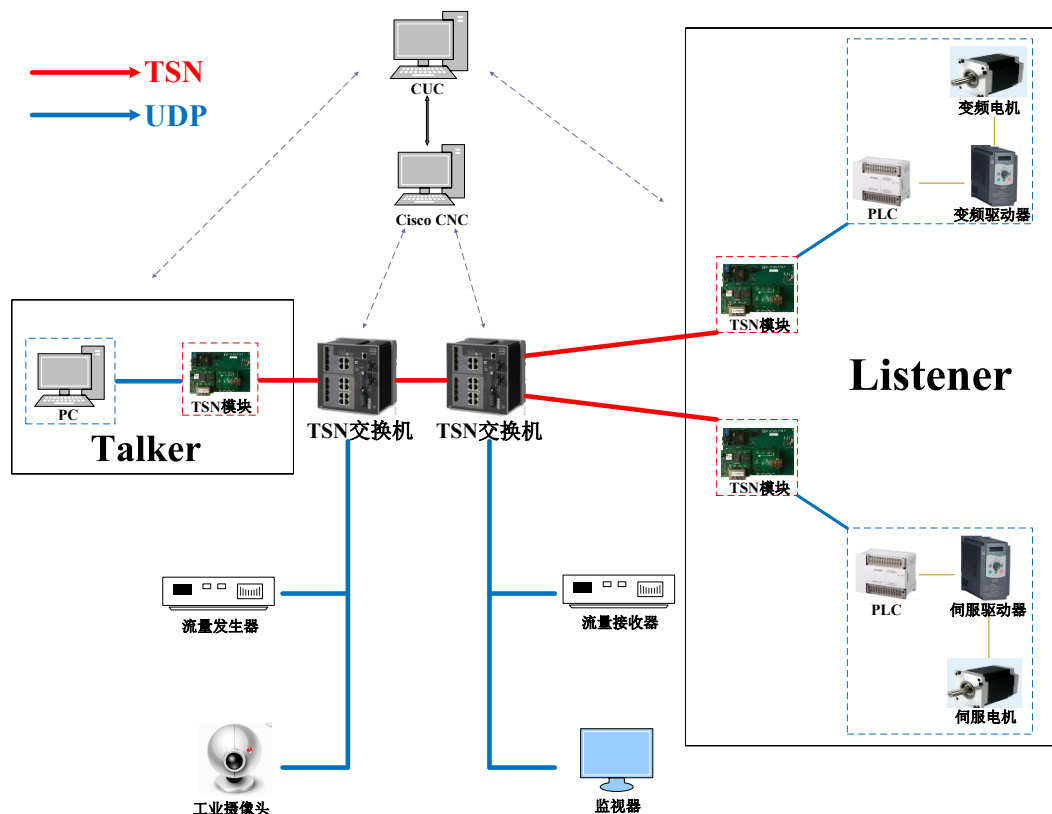
XXXX—XX—XX 发布 XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

TSN测试平台

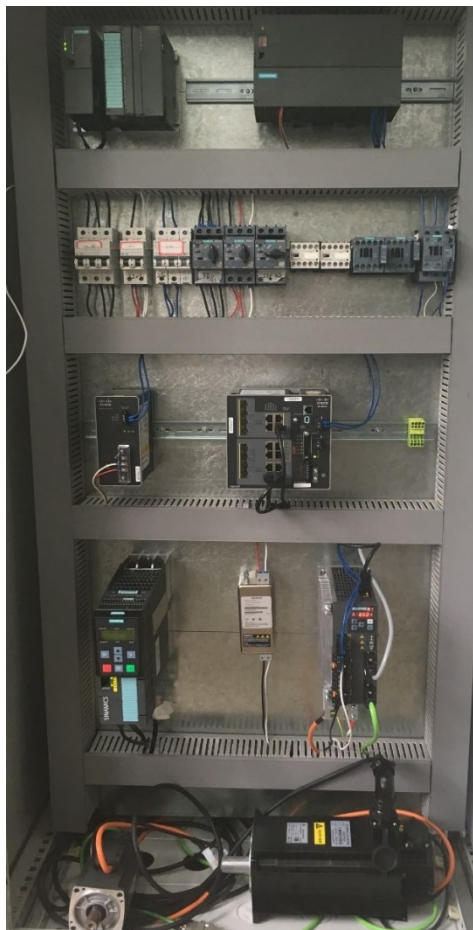


TSN测试平台



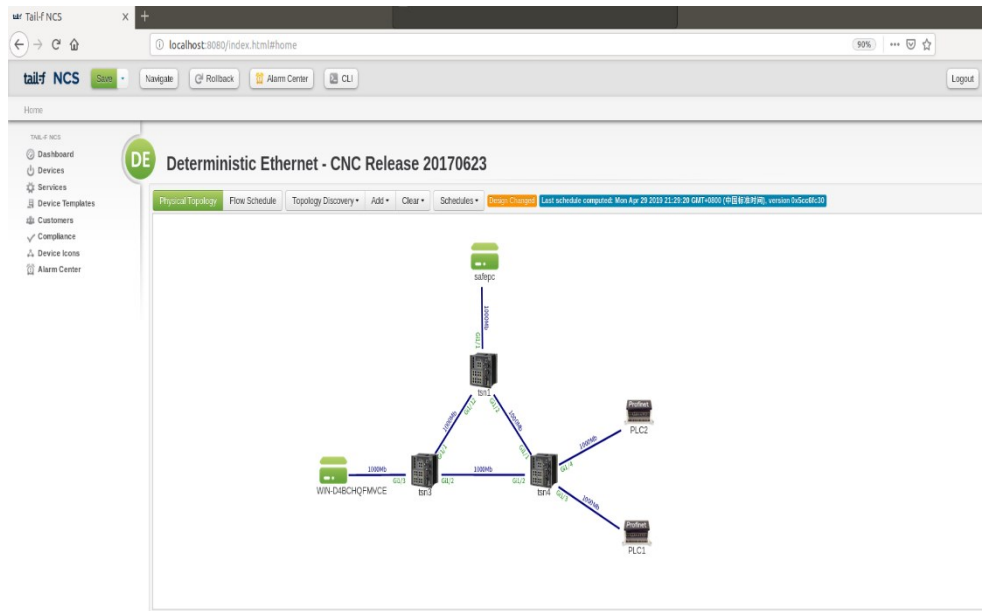
设备名称	数量	厂商
TSN交换机	3	Cisco
TSN开发板	3	ADI
工业摄像机	1	WP
PLC	3	Siemens
伺服驱动器	1	Siemens
伺服电机	1	Siemens
变频驱动器	1	Siemens
变频电机	1	Siemens
CNC	1	
CUC	1	

TSN测试平台

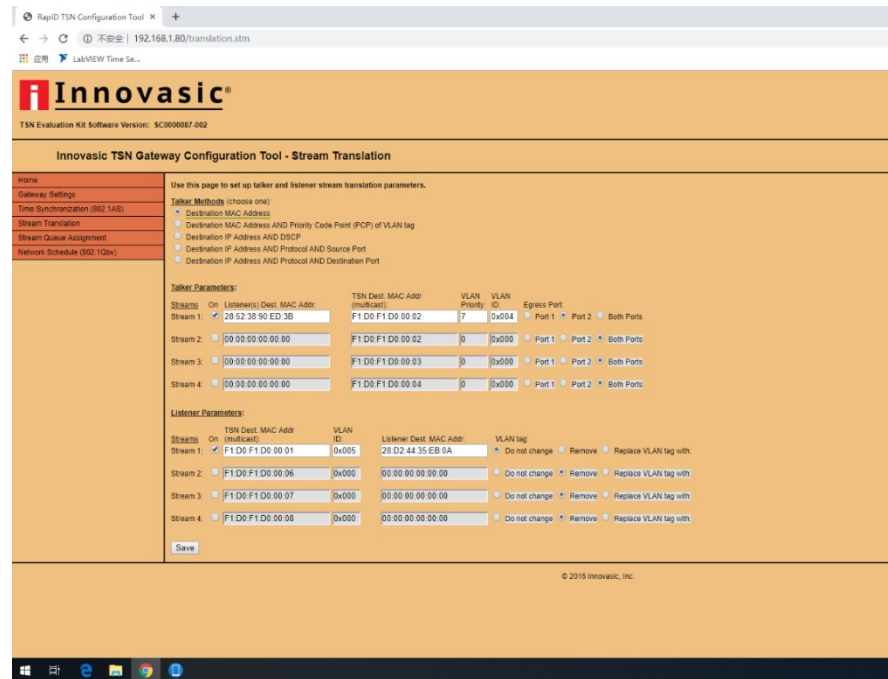


通过将工业监控域和支持Profinet异构网络的变频、伺服控制系统等接入TSN网络，搭建低时延、高可靠性工业现场环境。

TSN 测试平台

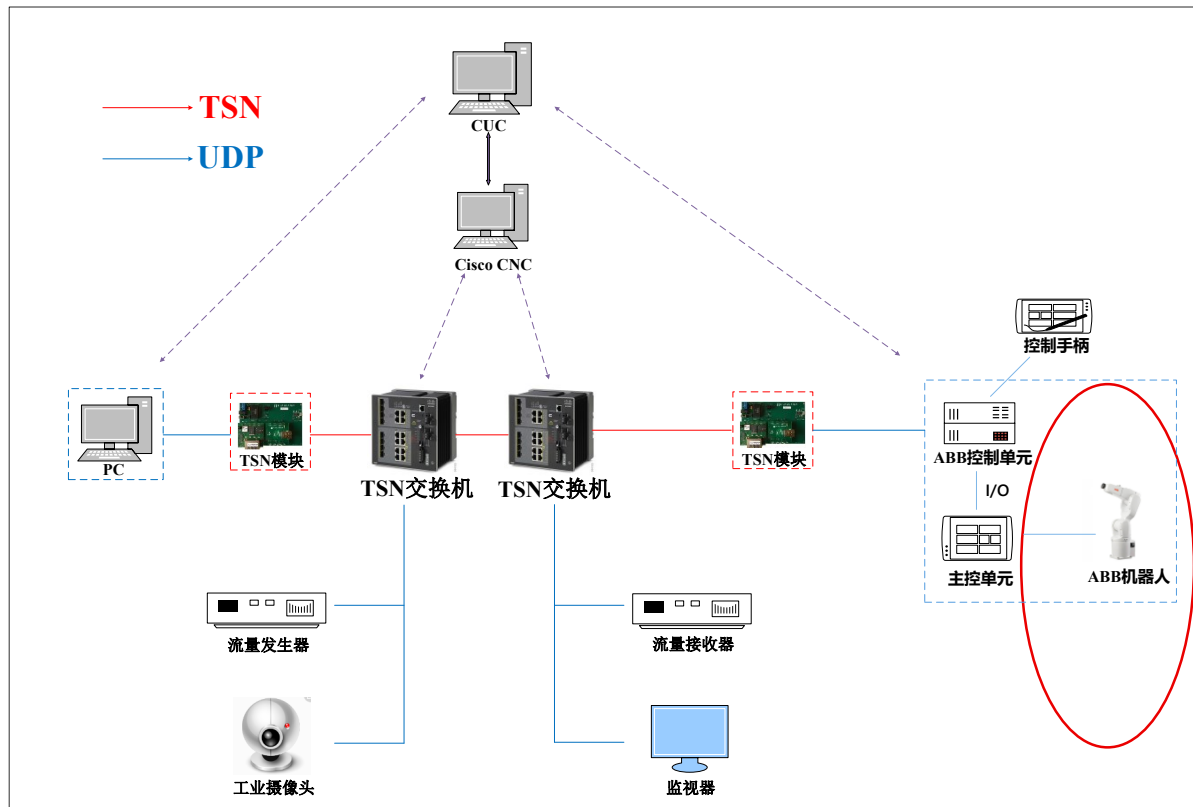


Cisco CNC调试界面



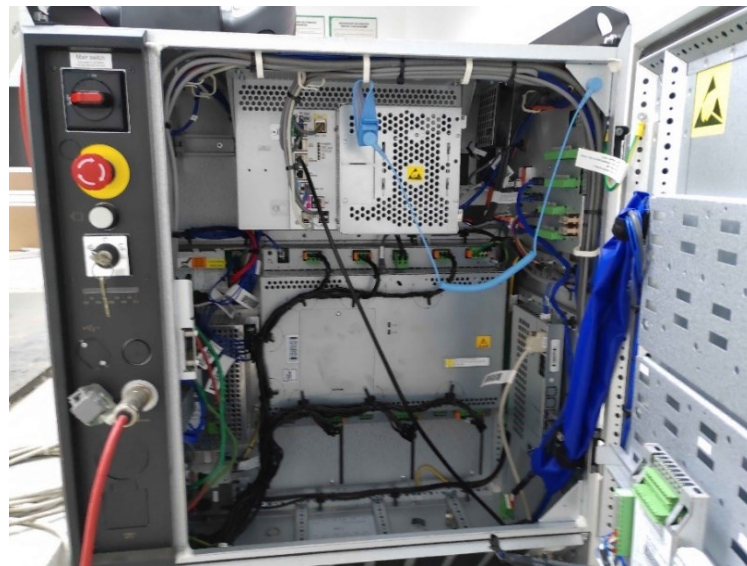
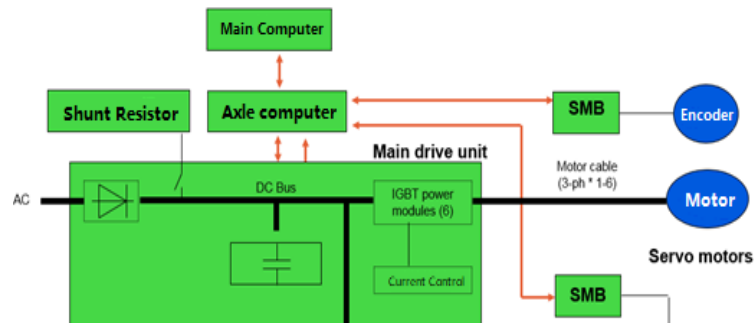
TSN 开发板调试界面

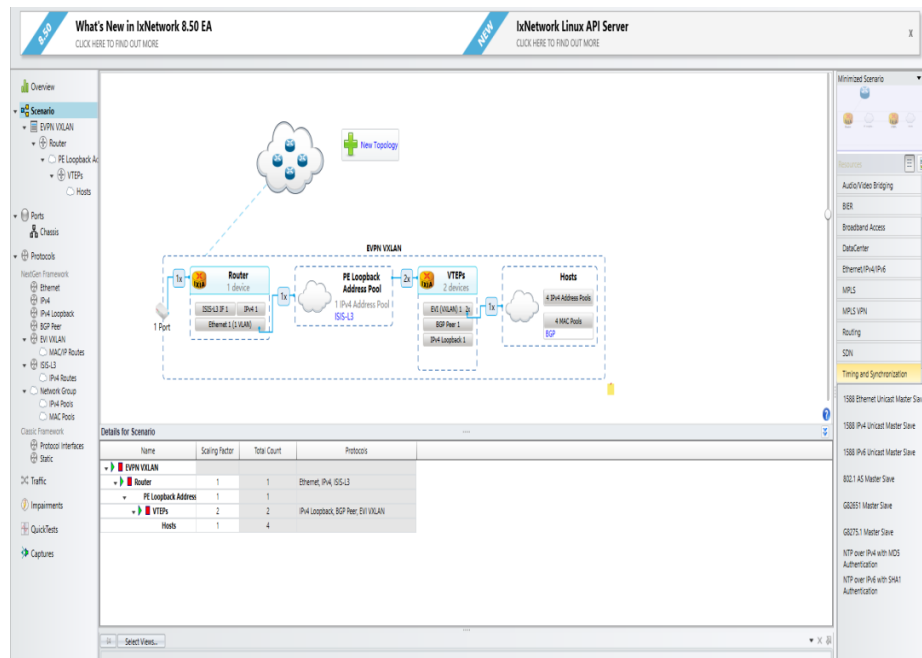
TSN测试平台



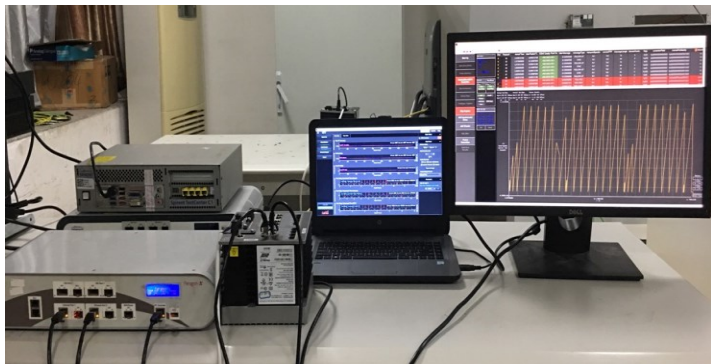
设备名称	数量	厂商
TSN交换机	3	Cisco
ABB机器人	1	ABB
工业摄像头	1	WP
CNC	1	
CUC	1	

TSN 测试平台

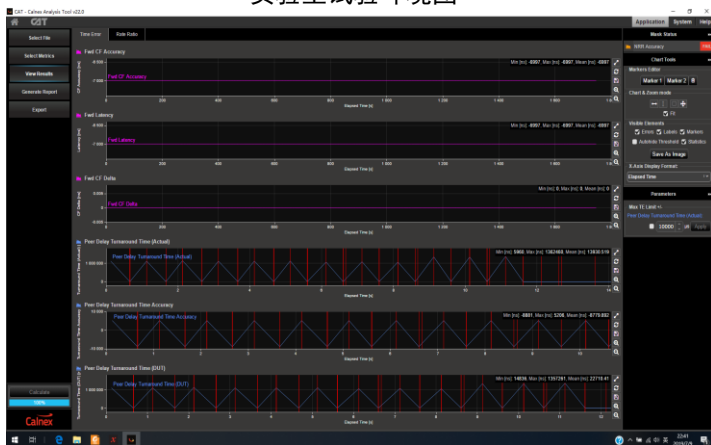
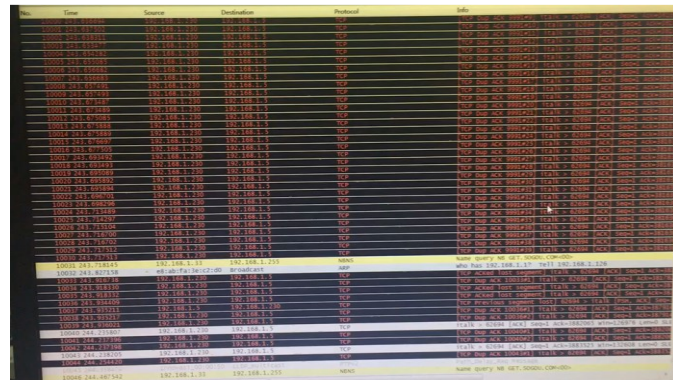




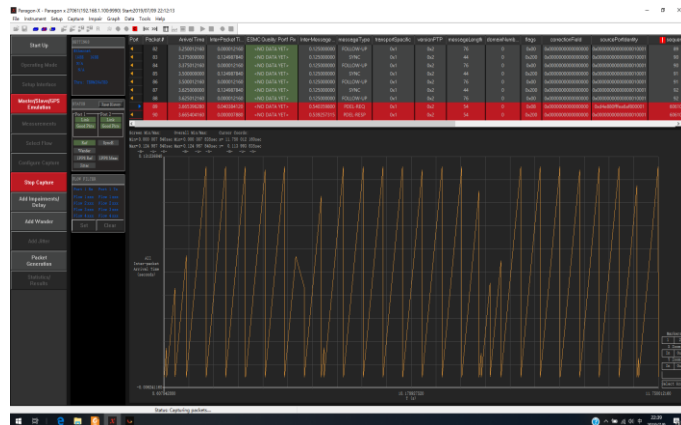
TSN 测试方法



实验室试验环境图

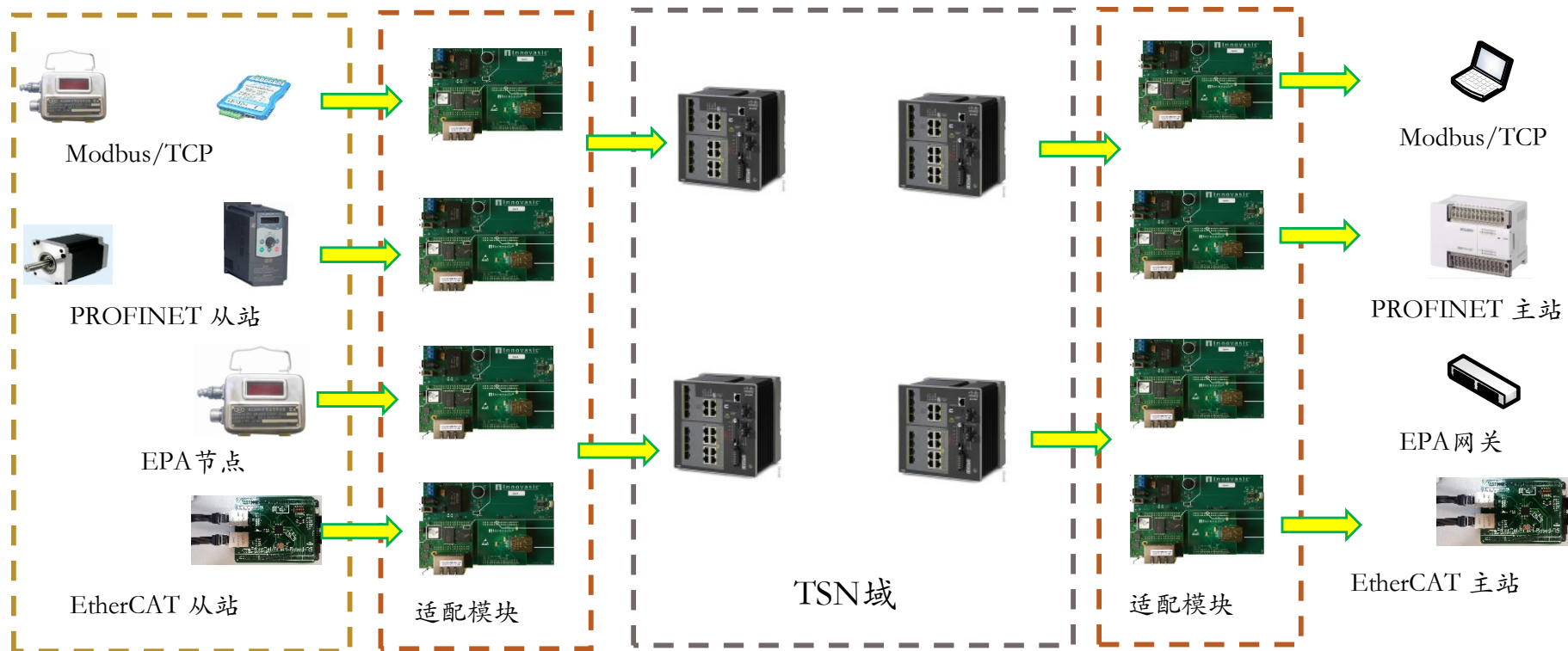


实验室所测量的时间同步波形图



实验室所测量的时间同步波形图

TSN 测试方法



时间敏感网络TSN应用场景及实践技术交流



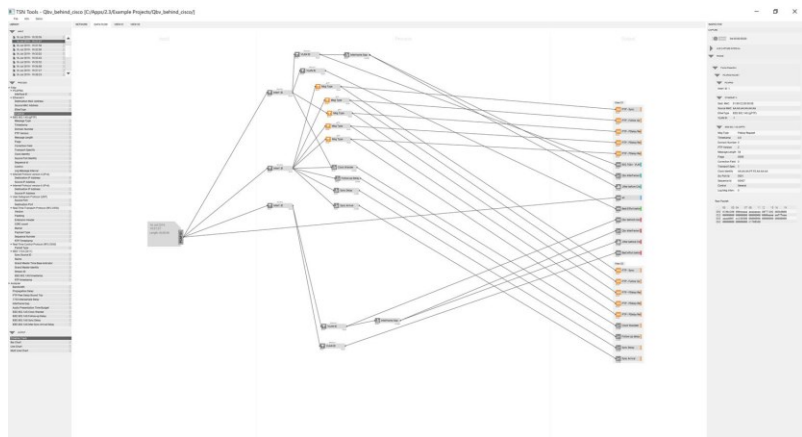
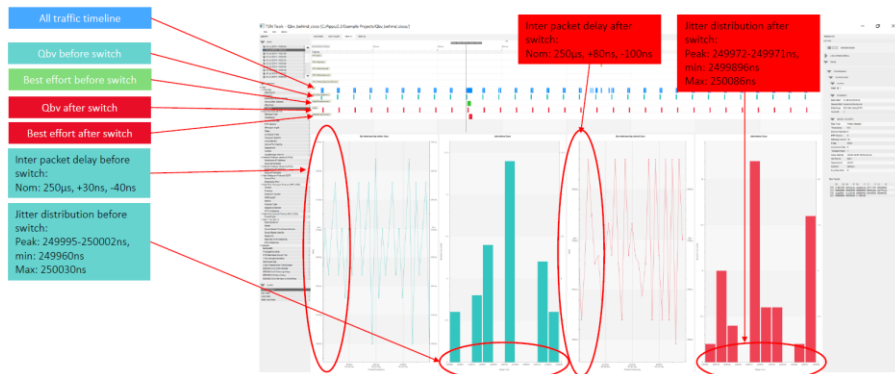
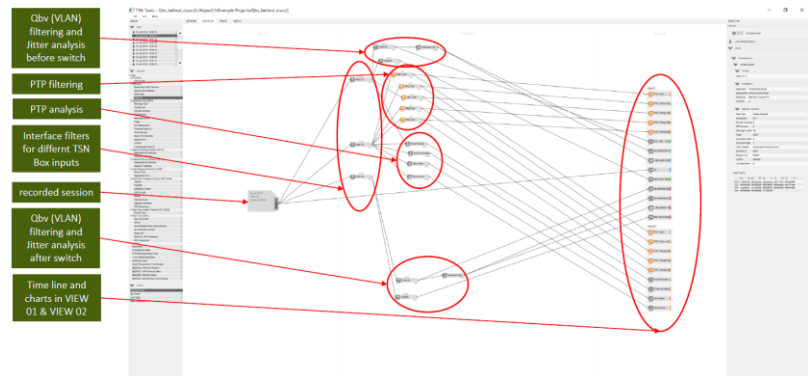
2019年7月，重庆邮电大学联合北汇信息在重邮电举办了为期3天的“时间敏感网络TSN应用场景及实践”技术交流会，会议聚集了30多名来自重庆邮电大学、重庆长安汽车、陕西重型汽车等专业技术人员及研究人员，共同探讨时间敏感网络TSN专业技术，分享TSN在汽车和工业领域的应用场景和实践经验。



时间敏感网络TSN应用场景及实践技术交流



时间敏感网络TSN应用场景及实践技术交流



时间敏感网络TSN应用场景及实践技术交流

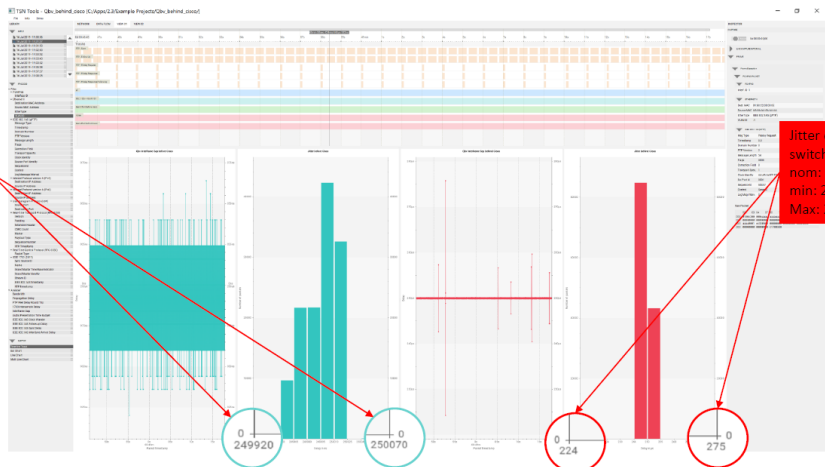


gPTP analysis: all good



Long Term Jitter Distribution 32s

Jitter distribution before switch :
Nom: 250 000ns
min: 249 920ns
Max: 250 070ns



Jitter distribution after switch :
nom: 250 000ns
min: 224 000ns
Max: 275 000



谢谢大家!

