



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

TSN 网络控制系统白皮书

(2022 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 6 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：aii@caict.ac.cn

前　　言

时间敏感网络（TSN）作为助力工业互联网实现的关键技术体系，提供了高带宽、低延时、低抖动和高可靠性的通信联网能力，制定一系列标准协议簇支持工业网络和以太网高度融合。但当前在产业应用方面，时间敏感网络还存在协议体系复杂，使用困难的突出问题。时间敏感网络网络控制系统的主要任务就是能够自动化的、智能化的管理控制该网络，保障具体的实现标准协议的技术体系能够高效协调运作，为实际的工业网络使用人员提供一套简单易用，高效可靠的工具。

《时间敏感网络网络控制系统白皮书》以网络控制系统的内涵出发，从标准、技术体系、参考架构、系统原理和应用场景及案例等方面进行了较为系统性的梳理和阐述，期待为时间敏感网络进入行业应用，加速产业发展提供一定的启示作用。时间敏感网络可以应用的产业众多，技术发展日新月异，该控制系统白皮书将会根据业界意见和最新技术、产业信息进行及时的更新和补充。

编写组成员（排名不分先后）：

朱海龙、黄韬、汪硕、张恒升、朱瑾瑜、张华宇、赵荣淳、
彭开来、刘赞、许文雨、吴晓佳、刘勇、池颖英、郑哲、王
连忠、熊伟、徐龙、李栋、李研、何非、闵爱佳、白钰、杨
冬、李宗辉、全巍、魏亮、程远、朱明星、朱浩、薛强、卢
华、邱铁、王红春

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：

新华三技术有限公司
北京智芯微电子科技有限公司
深圳市三旺通信股份有限公司
中国科学院沈阳自动化所
联通数字科技有限公司
中国联通物联网研究院
北京交通大学
国防科技大学
江苏省未来网络创新研究院
东土科技
航天新通科技有限公司
中国工业互联网研究院
广东省新一代通信与网络创新研究院
天津大学
西安云维智联科技有限公司



工业互联网产业联盟公众号

目 录

一、 TSN 网络控制系统内涵	1
(一) 网络控制系统定义	1
(二) 网络控制系统现状	2
二、 TSN 网络控制系统技术体系	13
(一) TSN 网络控制系统标准态势	13
(二) TSN 网络控制系统关键技术原理	16
三、 TSN 网络控制系统应用场景	31
(一) 工业控制	31
(二) 智能网联汽车	33
(三) 电力厂站	34
(四) 航空航天	36
四、 我国 TSN 控制系统产业发展对策及趋势展望	39
(一) 产业发展对策	39
(二) 趋势展望	40
附录： TSN 网络控制系统应用案例	42

一、 TSN 网络控制系统内涵

本章节从 TSN (Time-Sensitive Networking) 控制系统的定义、现状与发展趋势、驱动力等角度阐述 TSN 控制系统的内涵。

(一) 网络控制系统定义

NCS(Networked control systems)，最早出现于 1998 年马里兰大学 G.C.Walsh 等人的论著中，但当时并没有给出“网络控制系统”明确的概念定义。目前，“网络控制”的含义有两种解释：一种是对网络的控制（control of network）；另一种是通过网络实施的控制（control through network）。两种含义中都离不开“控制”和“网络”，只是两者所侧重的对象不同。前者指对网络路由、网络流量等的调度与控制，是对网络自身的控制；后者是指控制系统的各个节点（传感器、执行器和控制器）之间的数据传输不是传统的点对点方式，而且是通过网络来传输的。

本白皮书阐述的 TSN 网络控制系统的定义属于第一种，即对 TSN 的网络控制。包括 TSN 网络资源管理和控制，流量调度参数生成与配置，网络运维与监控。

网络资源管理和控制是指对 TSN 网络中的网关，TSN 交换机，普通交换机，网卡，防火墙，接入设备等物理资源进行一定程度的纳管，具备网络设备发现，网络连通性探测的功能。支持纯 TSN 网络，TSN 网络和普通以太网混合组网模式下的管控，能自主学习，构建交换设备转发表。

流量调度参数生成与配置是指根据业务或用户需求构建传输路径，

生成门控列表并下发配置到 TSN 交换机。门控列表生成依赖于具体的流量调度算法，其算法复杂度主要由 TSN 网络规模、网络拓扑、流量规模和流量的异构性特征决定，在大多数情况下是时间复杂度 NP 问题，一般采用专门求解器生成或者采用启发式算法进行求解。门控生成算法一般内嵌在 TSN 网络控制系统内部，构成控制系统的计算引擎，也可以独立于控制系统存在，由控制系统采用调用的方式使用。

网络运维与监控是 TSN 控制系统对 TSN 网络工作过程的运行与维护，主要是针对异常进行告警，对故障进行数据保护和系统恢复。实时收集 TSN 网络系统的带宽等资源状态，给出业务时延、抖动等性能指标，并支持可视化操作。

TSN 网络控制系统的主要作用是建立确定性的以太网络，助力工业互联网数字化提升。TSN 网络控制系统在对传统以太网络控制的基础上，还深入融合各个工业场景的工业网络信息传输需求，建立一套既通用又面向垂直行业应用的网络管理系统。如在工厂内网，基于 Profinet，Ethercat 等协议的工业通讯协议都有被 TSN 替代的可能性，并使得工业 OT 和 IT 的融合成为可能。在汽车领域，TSN 基于高带宽以太网支持车内信息融合传输，减少布线。

（二）网络控制系统现状

1. 传统网络控制系统现状

SDN 的架构中，控制器可以说是 SDN 的核心。它是连接底层交互设备与上层应用桥梁。一方面，控制器通过南向接口协议对底层网络交换设备进行集中管理，状态监测、转发决策以及处理和调度数据平面的流量；另一方面，控制器通过北向接口向上层应用开放多个层次的可编程能力，允许网络用户根据特定的应用场景灵活地制定各种网络策略。

随着移动设备的不断普及，OTT 服务和内容分发的兴起导致服务提供商网络迫切的需要一次网络变革。为了应对日益增长的带宽需求，服务提供商希望网络可以更加敏捷高效，且能从创新型服务和新型业务模式中分一杯羹得到更好的发展，至此 SDN 的呼声越来越高。而 SDN 中控制器占重要部分，是兵家必争之地，Openflow 是使用比较广泛的 SDN 控制器使用的南向通信协议，随着 Open daylight 和 ONOS 的出现，SDN 控制器的架构及所支持的南向、北向通信协议日益丰富。

1.1 Open Daylight 控制器技术现状

Open Daylight 项目的发展目标在于推出一个通用的 SDN 控制平台、网络操作系统，从而管理不同的网络设备，正如 Linux 和 Windows 等操作系统可以在不同的底层设备上运行一样。Open Daylight 支持多种南向协议，是一个广义的 SDN 控制平台。架构如图所示，可分为南向接口层、控制平面层、北向接口层和网络应用层。南向接口层中包含了如 Open Flow、NET-CONF 和 SNMP 等多种南向协议的实现。控制平面层是 Open Daylight 的核心，包括 MD-SALI、基础的网络功能模块、网络服务和网络抽象等模块，其中 MD-SAL 是 Open Daylight 最具特色的设计，也是 Open Daylight 架构中最重要的核心模块。无论是南向模块还是北向模块，或者其他模块，都需要在 MD-SAL 中注册才能正常工作。MD-SAL 也是逻辑上的信息容器，是 Open Daylight 控制器的管理中心，负责数据存储、请求路由、消息的订阅和发布等内容。北向接口层包含了开放的 REST API 接口及 AAA 认证部分。应用层是基于 Open Daylight 北向接口层的接口所开发出的应用集合。

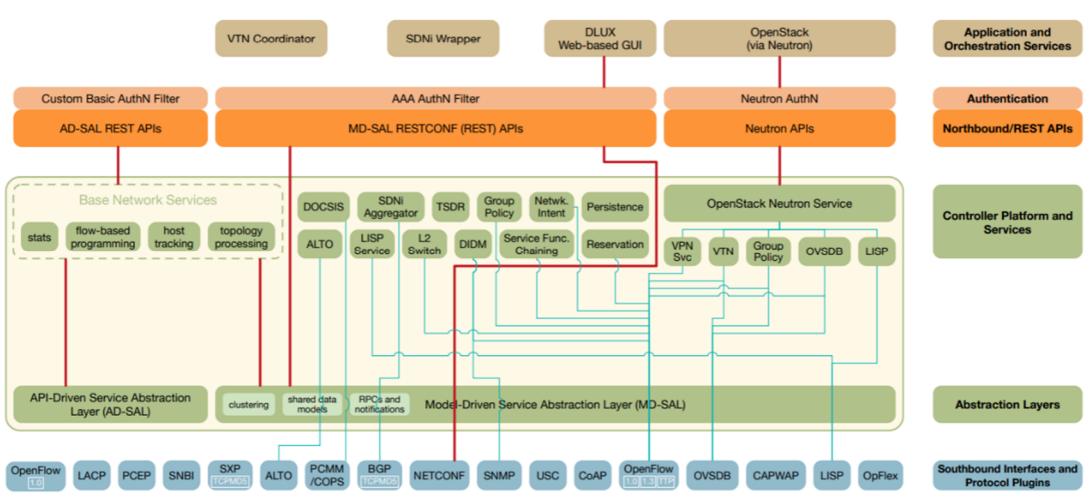


图 1-1 OpenDaylight 参考架构

此外，Open Daylight 还正在大力开展 NFV 的研发。正如之前提到的，Open Daylight 不仅仅是一个 SDN 控制器，Open Daylight 是一个网络操作系统。除了 SDN 控制器的基础功能以外，还包括 NFV 等其他应用服务，可见其旨在打造一个通用的 SDN 操作系统。

1.2 ONOS 控制器技术现状

Open Daylight 是由设备商主导的一个开源控制器，虽然打着开放的旗号，但是 Open Daylight 一直排斥基于开放的协议方案，而是想采用折中的方案，即以开放专用接口的方式保留传统设备，采取以退为进的方式维护自己的利益。于是，运营商推出了开放网络操作系统 ONOS(Open Network Operating System)。ONOS 是一款同样采用 Java 语言编写，采用 OSGi 架构，同样分布式的控制平台产品。其目标是打造一个开放的 SDN 网络操作系统，市场定位在运营商级别网络市场。



图 1-2 ONOS 控制平台

ONOS 是首款开源的 SDN 网络操作系统，主要面向服务提供商和企业骨干网。ONOS 的设计宗旨是满足网络需求实现可靠性强、性能好、灵活度高。此外，ONOS 的北向接口抽象层和 API 支持简单的应用开发，而通过南向接口抽象层和接口则可以管控 OpenFlow 或者传统设备。目前 ONOS 在全球的部署基本都在教育和科研网络，主要部署的应用是 SDN-IP，在天津联通有部署 ONOS 第一个商用局点敏捷 VPN，另外欧洲的 GEANT 和 Aarnet 在没有厂商参与的情况下基于 ONOS 开发了适用于自己的 SDX-L2/L3 和 Castor 应用并部署，意义重大。

2. 工业网络控制系统/工业组态软件现状

组态软件起源于集散控制系统（Distributed Control System，简称 DCS），发展壮大于可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，简称 PLC）。

目前国外的组态软件有将近一百多种，在国际上比较有名的组态软件有 Wonderware 公司的 Intouch、美国通用汽车公司的 implicity、德国西门子公司的 Wincc 和以色列的 WizCo 等，国外的组态软件长期占领市场的大部分份额。监控组态软件在 DCS 操作站软件中所占比重日益提高。继 FOXBORO 之后，Euro therm（欧陆）、Delta V、PCS7 等 DCS 系统纷纷使用通用监控组态软件作为操作站。在 20 世纪 80 年代末，国

外的一些组态软件开始进入中国市场。进入之初，国内市场没有很好的理解组态软件的重要作用。到 20 世纪 90 年代的时候，国人越来越意识到组态软件的作用，慢慢改变了对组态软件的观念。目前我国的组态软件主要以中低端市场为主，随着国内技术的发展，我国组态软件在一定程度上占领了一定的高端市场，但是由于国内软件的不稳定性和产品的发展、通用性等原因，很多客户往往会选择国外的高端产品。

从国内自动化行业学术期刊来看，以组态软件及与其密切相关的新兴技术为核心的研究课题呈上升趋势，众多研究人员的存在，是组态软件技术发展及创新的重要活跃因素，也一定能够积累很多技术成果。从软件规模上看，大多数监控组态软件的代码规模超过 100 万行，已经不属于小型软件的范畴了。从其功能来看，数据的加工与处理、数据管理、统计分析等功能越来越强。

3. TSN 网络控制系统现状

TSN 技术提供确定性传输的特性可被广泛应用于工厂内网等场景，拓扑变化、新设备接入、新业务流量需求部署所需的快速响应能力是当前线下仿真、配置的 TSN 网络所不具备的，并随着网络规模的扩大所带来的线下工作量也是巨大的。同样随着工业互联网的发展，不论是工厂内部两级三层架构，还是工厂之间局域互联，传统的网络架构已经不能满足智能化的需要。面向未来工业互联网网络互联互通、动态扩展的需求，时间敏感网络控制系统应具备灵活、开放、高效、全局管控等特征。

工业互联网时间敏感网络控制器的功能架构可以遵循 SDN 技术思路，IEEE 802.1Qcc 中定义的时间敏感网络的配置模型分为全集中式配置模型、混合式配置模型以及全分布式配置模型三种：全集中式配置模型，使用集中式网络配置控制器（CNC，Centralized Network

Configuration controller) 与集中式用户配置控制器 (CUC , Centralized User Configuration) ; 混合式配置模型，使用集中式网络配置控制器与分布式用户配置控制器；全分布式配置模型，使用分布式网络配置控制器。其中集中式架构与 SDN 的思想较为接近，因此，一般采用全集中式配置模型，如图 1-3 所示。

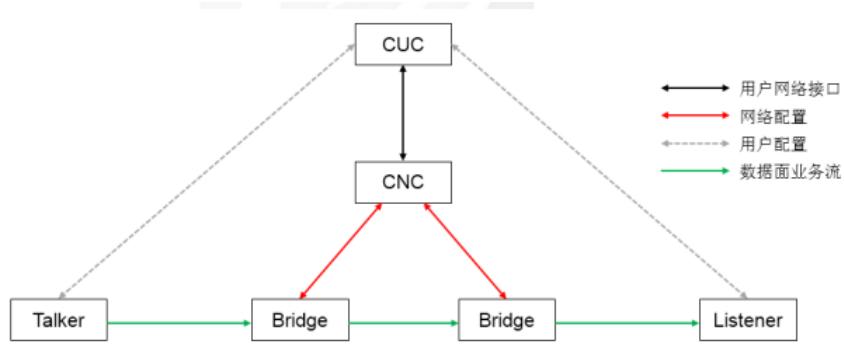


图 1-3 时间敏感网控制器架构

图中 Talker、Listener 分别是数据流的发送方和接收方，即工业设备或者应用系统；Bridge 可以是不同形态的二层桥接设备，如工业交换机、具有二层交换网口的工业设备；集中式网络配置控制器 (CNC) 与集中式用户配置控制器(CUC)可作为软件功能模块融合部署于专用服务器上，也可以采用嵌入式系统，集中式配置模型的控制面工作流程如下：新增数据流时，CUC 代表 Talker、Listener 将用户需求信息告知 CNC，即图 3-5 中黑色实线（代表用户网络接口）；CNC 根据获得的信息，进行相应的运算，并将得到的网络配置参数分别下发给网络中相关的各个 Bridge，即图 3-5 中红色实线（代表网络配置）；图 3-5 中的灰色虚线代表 CUC 收集用户信息、接收用户对网络的资源申请，并对用户进行配置的过程，一般认为该过程不属于 TSN 技术的范畴。

从学术界、产业界角度，当前基于 SDN 的 TSN 控制器技术现状如

下：

(一) 思科 CNC

思科按 IEEE 802.1Qcc 标准的集中式架构模型开发商用的集中式网络控制产品，其架构如图 1-4 所示。

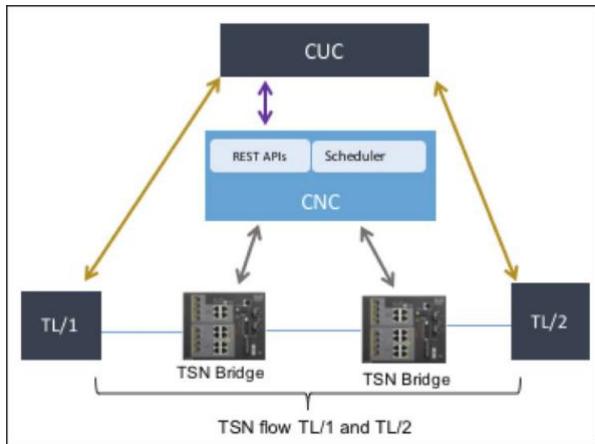


图 1-4 思科集中式控制架构

思科 CNC 模块实现对 TSN 转发层面的配置管理，CNC 提供北向的 REST API，提供应用层面的调用，其内置 WEBUI，提供可视化的配置和管理界面，通过 REST API 和 CNC 进行交互，配置的拓扑和流量需求在 CNC 内部进行保存和计算，CNC 具有全局的视图，以及全局的配置需求，在控制层面进行计算和调度，自动下发配置，简化了静态配置的繁琐。CUC 应用层面可以运行 OPC UA 传输协议并通过 REST API 下发到 CUC 中。CNC 和 TSN 交换机之间直接交互，TSN 交换机中运行 IOX 的容器组件，该容器组件作为转发层面的 agent 代理，该模块作为中间层，负责和 TSN 核心 IOS 模块以及 CNC 直接交互，CNC 和 agent 之间通过 telnet 使用用户名和密码进行登录和操作，IOS 目前并不支持标准的 NETCONF 和 OPENFLOW 协议。

(二) TTTECH Slate XNS

TTTECH 公司的 Slate XNS 是一种 TSN 纳管产品方案，基于浏览器拓扑模型的 TSN 网络调度器（TSN Network Scheduler with Browser-based Topology Modeling）。

Slate XNS 是基于浏览器的，具有友好界面，能方便构建 TSN 网络拓扑并创建调度和部署的平台。通过 GUI 提供的拓扑视图、图表编辑器管理设备和流量，一键式触发调度计算，并通过标准、开放的 YANG 模型下发配置。可以看出，图形和图标化的拓扑及流量配置，一键式自动化的配置下发以及标准 YANG 模型下发，这些和思科 CNC 具有相同的功能，只是提供了更加标准的南向配置协议。TTTECH 公司关注点同样在于直观的视图感受，自动化的配置以及提供增量的业务模式，通过全局的网络拓扑和流量配置，在全局层面上进行计算和配置，可以轻松的实现这样的设定。

上述为产业界对 TSN 和 SDN 融合技术的方案研究，下面对国内外的一些科研机构的研究活动进行研究。

（三）萨克雷大学 NEON

法国的萨克雷大学提出在工业或者车载领域，对 TSN 网络复杂性配置的研究是个热门的领域，新增一个器件或者流量需求需要大量的配置操作，并且需要仿真工具和线下配置来完成，传统的静态和手动配置方式已经不再适用。认为 SDN 是解决这个问题的研究方向，SDN 在保证服务 OQS 质量上是有效的，甚至在一个变化的拓扑环境中。通过 SDN 的方法可以轻松的完成添加器件和流量需求业务，并且不影响正在运行的业务，其架构和逻辑拓扑模型如图 1-5 和图 1-6 所示：

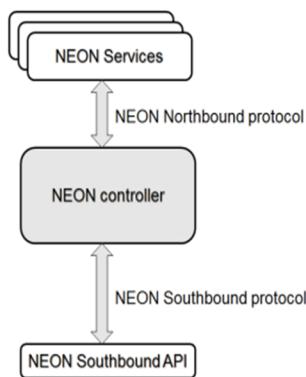


图 1-5 架构模型

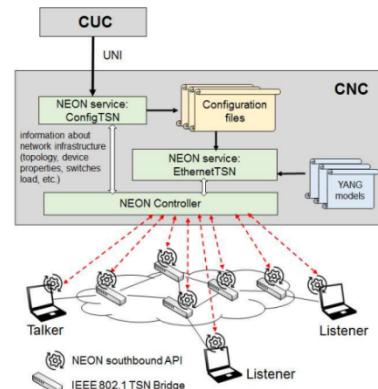


图 1-6 逻辑模型

架构模型如图 1-5 示，分为 Service、controller 以及转发层面。控制器提供北向接口同 service 交互，并通过南向接口协议下发配置。文章基于 NEON 这样的软件平台去开发控制器。在图 1-6 所示的逻辑模型中，ConfigTSN 模块完成配置数据的生成，初始状态有个配置文件，包括名称和 UUID 的映射关系，以及初始配置的文件，在设备初次接入时，读取配置文件下发配置，后面由事件触发，新设备接入、新流量需求等，ConfigTSN 计算生成配置数据，并通过 EthernetTSN 下发。EthernetTSN 模块是下发配置模块，屏蔽厂商差异化，基于 YANG 模型下发。controller 模块主要负责感知转发层面，作为中继模块协调 ConfigTSN、EthernetTSN 以及设备的运行。可以看出，ConfigTSN 作为配置调度模块，EthernetTSN 作为南向配置模块，controller 感知及中继调度模块，实现整个系统的运行。

（四）奥斯特法利亚科技应用大学 TSSDN

奥斯特法利亚科技应用大学针对工业网络和 5G 结合时，分别管理 TSN fronthaul 网络和 5G 核心网问题，提出一套基于 SDN 的统一管理方案 TSSDN，通过 TSSDN 统一管理 TSN fronthaul 网络和 5G 核心网络，

功能架构如图 3-11 所示，包含全局的拓扑管理、路径规划管理、以及策略管理，其中 TSN 和 5G 核心网在控制层面分别通过 CNC 和 SDN 管理。控制层面具有全局的拓扑和规划调度，TSN 和 5G 核心网的控制仍然是独立的控制通道，对工业网络中 Fronthaul 网络和 5G 核心网配置分离的问题，提出了 TSN 和 5G 核心网统一的配置管理平台，该平台具有全局视角，包含全局网络拓扑，全局的路径规划和配置，控制器内部 TSN 和 5G 核心网部分仍然是相对的独立的配置通道，各部分采用独立的机制实现，最终通过 Floodlight 云平台实现功能落地。

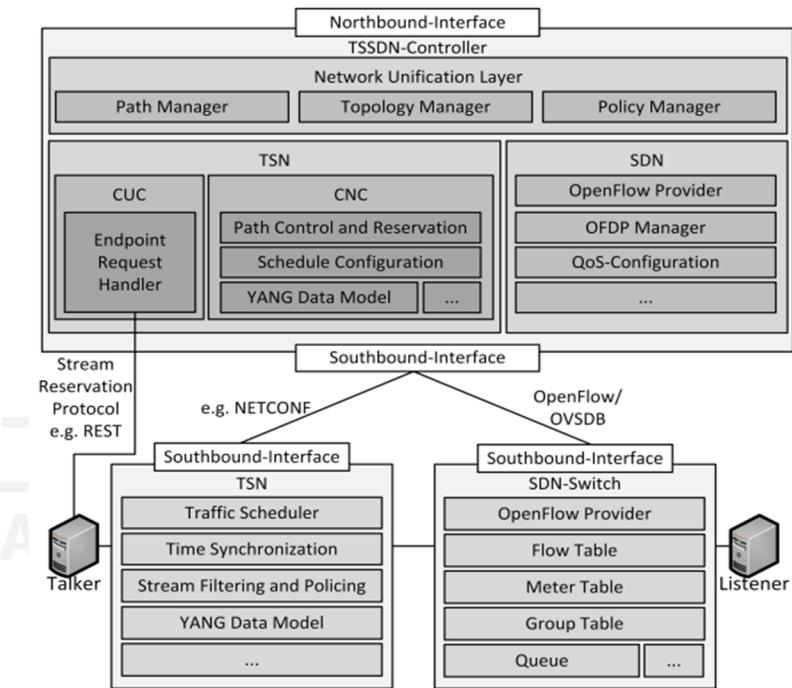


图 1-7 TSSDN 架构

(五) 斯图加特大学 MAPE

斯图加特大学为可重构生产环境提出了一套软件定义环境（SDE）的架构，并且提供实时性保证。架构如图 1-8 所示。

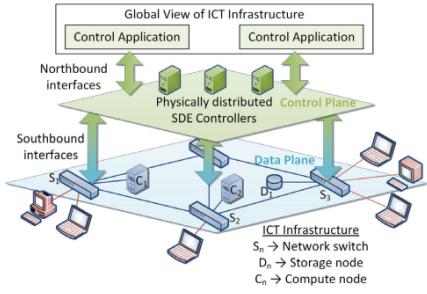


图 1-8 SDE 架构

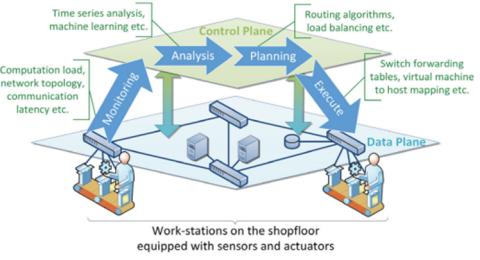


图 1-9 MAPE 模型

认为工业网络中，车间中新增传感器、执行器等对整个系统重新配置复杂，所以针对这一问题提出图 1-8 所示的 SDE 架构，其核心思想包含两个方面，数据平面和转发平面分离，逻辑上的集中控制。把生产系统的控制权集中到一个逻辑的控制器中，控制器具有全局视角，包含传感器、控制器、网络交换机、计算资源、存储资源。提出了 MAPE 循环控制模式，如图 1-9，Monitor、Analysis、Planning、Execution，控制器收集系统状态，分析数据，计算，执行，通过这样一个循环方式完成配置。工业环境中，转发接入侧变化多，拓扑变化大，基于 SDE 这样的架构可以方便控制，提出了 SDE 的架构和 MAPE 的工作模型，但并对具体实现并没有过多的介绍，局限于仿真验证路径算法的有效性。但从文章中可以看出，SDE 的架构基于集中式控制，得益于全局的资源视角，路径算法才能实现。

综合对产业界以及国内外学术界的当前研究进展，不难发现，鉴于工业网络以及车载网络的实时性需求，离线配置复杂，并随着工业 4.0、智能化的发展，多网融合、跨域跨层互联互通、可视化配置及维护等需求的提出，SDN 是解决问题的热门研究方向。TSN 协议自身仍处于发展阶段，TSN 与 SDN 的融合，大多数停留在单点的概念验证阶段，面向整个应用场景解决方案，TSN 标准尚有不足，需推动完善。基于 SDN

的实时性网络控制的研究，偏向于静态配置层面，以及偏向于引入 SDN 后所带来工作模式的研究，对 SDN 自身实时性调度，实时性监控等没有提及。基于 SDN 的实时性网络控制系统，SDN 遵从应用、控制及转发三层架构，控制器内部模块包含南北向接口、链路发现、拓扑维护、数据监控以及调度计算。

二、TSN 网络控制系统技术体系

本章节从 TSN 网络控制系统标准、参考架构和关键计算原理三个角度阐述 TSN 控制系统技术体系。

(一) TSN 网络控制系统标准态势

1. 国外标准动态

TSN 标准簇目前包含时间同步，有界延迟，可靠性和资源管理四个大方向共约 30 项标准。TSN 数据转发协议标准基本制定完成，当前正在制定 TSN 控制面标准，SDN 控制器架构被认为是时间敏感网络控制面的理想选择。当前 TSN 网络控制系统遵循的标准主要是网络管理方向，使用的标准包括 IEEE 802.1Qcc、802.1CS、Qcx、Qat，Qcp 等。

IEEE 802.1Qcc 描述了三种用户/网络配置模型，这些模型为后续规范提供了体系结构。每个模型规范都显示了网络中不同实体之间的用户/网络配置信息的逻辑流。

IEEE 802.1CS-2020 规定了链路本地注册协议（LRP）的协议、过程和托管对象，用于将注册数据库从点对点链路的一端复制到另一端，并将更改复制到该数据库的某些部分。

IEEE 802.1Qcx-2020 规定了 YANG 数据模型支持对两端口 MAC 中

继、客户 VLAN 网桥和提供商网桥的连接故障管理 (CFM) 进行配置、状态报告和监控。

IEEE 802.1Qat-2010 规定了现有高层机制可用的协议、过程和管理对象，允许为通过桥接局域网的特定业务流保留网络资源。

IEEE 802.1Qcp-2018 修正案提供了一个 YANG 数据模型，以支持桥接功能子集的配置和操作状态信息。

P802.1ASdn 修正案指定了一个基于统一建模语言 (UML) 的图形来解释托管对象和相关的 YANG 数据模型，该模型允许对基本标准的所有管理对象进行配置和状态报告。

P802.1Qcw 修正案规定了基于统一建模语言 (UML) 的信息模型和 YANG 数据模型，这些模型允许桥接器的配置和状态报告，具有用于规划流量、帧抢占以及每流过滤和监管的 YANG 数据模型。它进一步定义了信息和数据模型与本标准规定的其他管理能力模型之间的关系。

IEEE P802.1DC 标准规定了 IEEE Std 802.1Q 中规定的服务质量 (QoS) 特性的程序和管理对象，例如在非网桥的网络系统中按流过滤和监管、排队、传输选择、流控制和抢占。

IEEE P802.1DF 标准定义了 IEEE Std 802.1Q 和 IEEE Std 802.1CB 的配置文件，为非前传共享服务提供商网络提供 TSN 服务质量特性。该标准还提供用例，并为网络运营商提供有关如何为这些用例配置网络的信息指导。该标准为配置 QoS 功能提供了指导，以提供可靠的带宽和有限的延迟，具有更严格 QoS 要求的下一代传输网络将受益于 TSN QoS 功能。

在面向行业应用方向，结合行业特征制定了应用的规范。IEEE P802.1DG 规定了基于 IEEE 802.1 时间敏感网络标准和 IEEE 802.1 安全

标准的安全、高度可靠、确定性延迟的汽车车载桥接 IEEE 802.3 以太网的配置文件。该标准为确定性 IEEE 802.3 以太网的设计者和实施者提供了配置文件，这些网络支持整个车载应用范围，包括那些需要安全性、高可用性和可靠性、可维护性和有限延迟的应用。

IEEE P802.1DP/SAE AS6675 是 IEEE 802 和 SAE Avionics Networks AS-1 A2 的联合项目，用于定义航空航天的 TSN 配置文件。这项联合工作将提供一个联合开发的标准，它既是 SAE 标准，也是 IEEE 标准。该标准规定了航空航天机载桥接 IEEE 802.3 以太网网络的 IEEE 802.1 时间敏感网络和 IEEE 802.1 安全标准的配置文件。该标准规定了确定性 IEEE 802.3 以太网网络的设计者、实施者、集成商和认证机构的配置文件，这些网络支持广泛的航空航天应用，包括那些需要安全性、高可用性和可靠性、可维护性和有限延迟的应用。

2. 国内标准动态

2020 年 11 月，中国电子技术标准化研究院组织业内相关单位编写了《时间敏感网络白皮书》，重点围绕时间敏感网络技术的发展背景、关键技术与新兴技术融合、标准化进展、产业应用等方面展开论述，给出了技术和应用趋势展望。旨在为相关研究机构、高校、芯片设备厂商、解决方案提供商、测试厂商等提供参考。

2020 年 8 月 30 日，在 2020 工业互联网大会“工业互联网网络”主题论坛上，《时间敏感网络（TSN）产业白皮书》正式发布。中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师朱瑾瑜在大会上对 2021 年 9 月 28 日，“2021 工业互联网网络创新大会”在中国国际信息通信展览会期间举办，会上发布了“时间敏感网络（TSN）产业链名录计划”（以下简称名录计划）第一批评测通过的产品名单，并为企业代表颁发了证书。

2020 年 10 月，工业互联网产业联盟正式启动了名录计划。2021 年 5 月，首批 TSN 交换机、TSN 网关产品评测正式启动，共收到 15 家企业共 21 款产品的报名，首批 9 款产品评测通过。白皮书进行了详尽解读。

2020 年 12 月，根据《国家标准化管理委员会关于下达 2020 年第三批推荐性国家标准计划的通知》（国标委发[2020]48 号）的安排，有两项时间敏感网络（TSN）国家标准项目正式立项，分别为：《信息技术 系统间远程通信和信息交换 时间敏感网络应用配置管理》和《信息技术 系统间远程通信和信息交换 时间敏感网络与用于过程控制的对象连接与嵌入统一架构融合 信息模型映射》。

当前，国内 TSN 控制系统标准仍然以遵守 IEEE 标准协议为主，主要采纳 IEEE 802.1Qcc 完全集中式架构作为控制器架构设计。针对遵从 IEEE 802.1AS，IEEE 802.1Qbv，IEEE 802.1Qci，IEEE 802.1Qch 等标准的 TSN 交换机、TSN 网关产品进行纳管。在实际具体应用中的标准还存在空白。

（二）TSN 网络控制系统关键技术原理

1. TSN 网络控制系统参考架构

TSN 网络控制系统建议采用集中式配置模型，TSN 控制器负责全网策略控制，配置管理，同时实现协同防护。提供统一的策略引擎，网络内实施统一的访问策略，实现基于管理员，设备类型、接入时间、接入地点、接入方式多维度的认证和授权。提供全生命流程的访问人员管理，设备状态管理和网络资源管理。其功能模块主要包括：CUC 集中式用户配置模块、CNC 集中式网络配置模块、调度规划引擎模块、安全及可靠性模块以及相关扩展功能模块。

2. CUC(集中式用户配置)

CUC 集中式用户管理部分实现对用户配置数据的收集及 TSN 特性的配置。CUC 支持通过多种方式实现用户需求的感知及配置。

2.1 OPC UA 服务

OPC UA 是当前工业领域应用广泛的网络通信协议，可以实现不同设备的互通和互操作，在工业应用领域，时间敏感网络控制系统通过 OPC UA 协议实现对端设备的感知及配置。时间敏感网络控制系统实现 OPC UA server 功能，实现同端设备之间的互通和互操作，网络控制系统 OPC UA server 端获取端设备数据解析后，通过 CNC 北向 API 接口下发到 CNC 模块，从而实现端设备数据的配置导入。

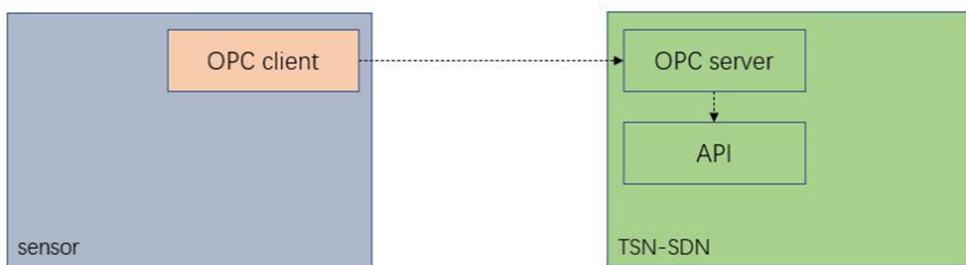


图 2-1 OPC UA 互通管理与控制

2.2 MQTT 服务

消息队列遥测传输协议，是一种基于“轻量级”代理的发布/订阅模式的消息传输协议，能够提供有序、可靠的双向网络连接。MQTT 目前在工业互联网领域，智能家居、医疗医护、智慧城市等领域已广泛使用。

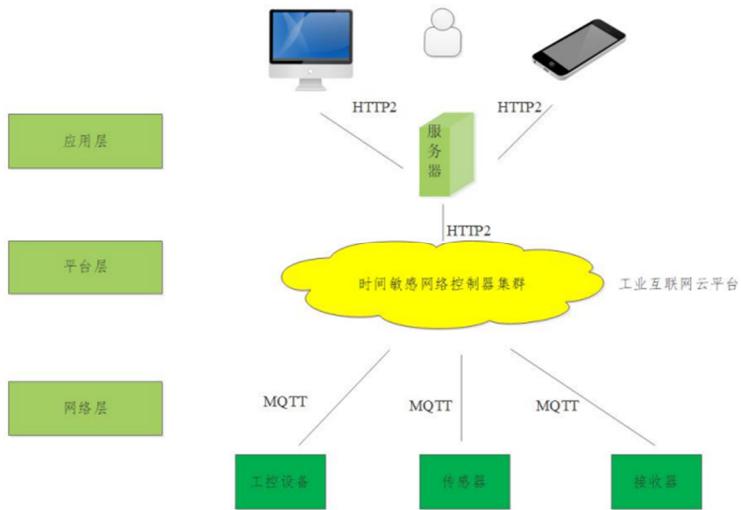


图 2-2 支持 MQTT 接入

2.3 用户交互界面服务

用户交互界面采用 Web-Server 方式，致力于为用户提供稳定的、可视化的用户交互界面，使用户对系统中的配置管理，网络状态监控、数据分析与资源预留，时钟同步等功能的操作更方便，更有效。

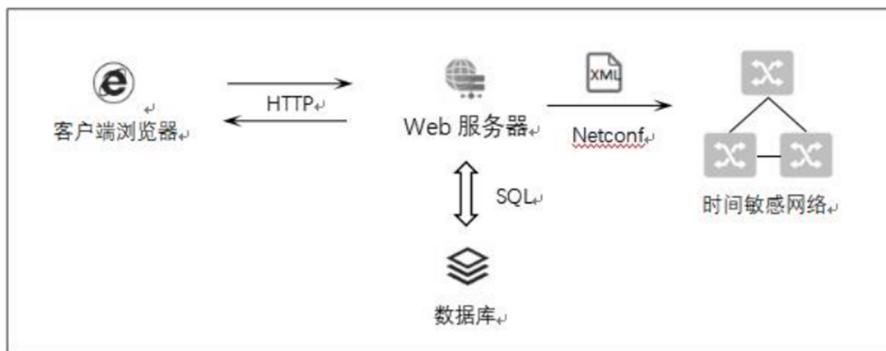


图 2-3 用户交互界面

用户通过客户端浏览器输入 URL 网址访问 Web 服务器，Web 服务器接收到 Web 页面请求后，将时间敏感网络控制器页面传送给客户端浏览器，用户可通过控制器配置页面实现时间敏感网络系统的拓扑创建、

流量导入等操作，客户端浏览器通过 API 接口将用户配置信息发送给 Web 服务器，Web 服务器再将用户配置信息发送给控制器，控制器将用户配置信息构造成相应的配置文档通过 NETCONF 等机制完成相关配置下发到交换机上，最终实现用户定制的时间敏感网络。

3. CNC(集中式网络配置)

TSN 流的所有网桥配置都是由 CNC 使用远程网络管理协议来完成。CNC 对网络的物理拓扑和每个网桥的能力有一个完整的视图。这使得 CNC 可以集中复杂的计算。CNC 可以存在于端站或桥上。

3.1 北向接口

CNC 北向接口实现 CUC 业务感知到 CNC 网络调度的传输，北向接口是时间敏感网络控制器 CNC 上层业务应用开放的接口，其目标是能够和 CUC 进行消息通信，使得业务应用能够便利地调用底层网络资源和能力。

北向接口 API 因需要密切联系业务的应用需求，同时具有多样化的特征，目前已经成为时间敏感网络领域竞争的焦点，业界不同的参与者分别从不同的角度提出北向接口方案，实现了不同的北向 API 接口导致当前北向接口标准很难达成共识，但是可以预测后续的 CNC 北向接口将会朝着标准化和开源两个方向同时发展。基于接口标准化角度拟采用 RESTCONF 协议实现北向接口。

RESTCONF 协议使用 HTTP 方法来分辨对特定资源的 CRUD 操作，包括 OPTIONS、HEAD、GET、POST、PUT、PATCH、DELETE 等。在时间敏感网络控制系统北向接口开发的过程中，主要涉及拓扑规划、时钟同步、流量转发三大类型业务，同时包括了对网络资源的集中管理控制。

3.2 南向接口

时间敏感网络控制器对网络设备的配置、管理和控制，离不开南向接口的重要作用。只有通过南向接口与网络设备进行更好的通信，才能更好的发挥控制器的控制管理作用。

由于 SNMP 协议已经被广泛地应用于工业自动化控制产品中，在工厂的现代化管理中发挥着重要的作用，SNMP 协议是一整套的符合国际标准的网络设备管理规范，凡是遵循 SNMP 协议的设备，均可以通过网管软件来管理。只需要在网管工作站上安装一套 SNMP 网络管理软件，通过局域网就可以很方便地管理网络上的工业以太网交换机、路由器、服务器等，从而提高网络管理的效率，简化网络管理员的工作。为了兼容已有的工业网络设备，CNC 需支持 SNMP 的南向接口协议，支持通过 SNMP 协议实现转发设备南向配置管理。

SNMP 协议接口在生态成熟度上较为成熟，但各厂商大多才有私有 MIB 节点实现网络配置，从异构设备统一纳管的角度来说具有较大的缺陷。从南向接口标准化的角度出发，CNC 网络配置模块需支持 NETCONF 协议配置。

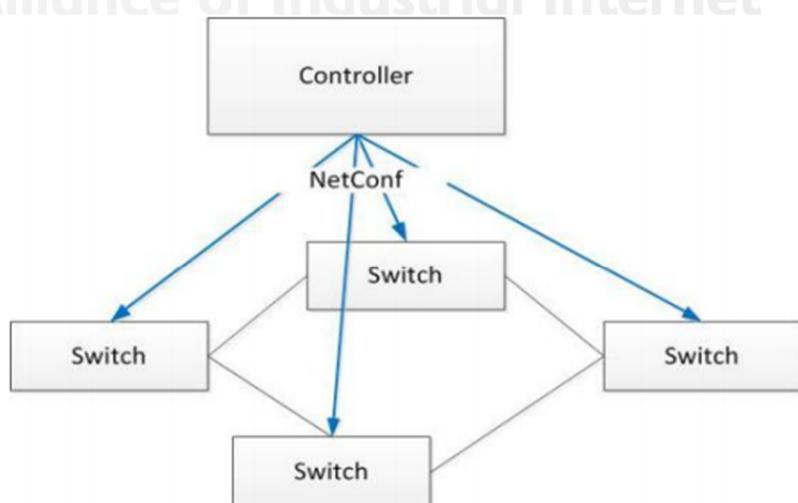


图 2-4 NetConf 下发配置

NETCONF 协议定义了一个简单的机制，通过它可以管理网络设备，可以检索配置数据信息，并且可以上传和操作新的配置数据。该协议允许设备公开一个完整的，正式的应用程序编程接口（API）。应用程序可以使用这个直接的 API 来发送和接收完整的和部分的配置数据集。YANG 模型被用作 NETCONF 上的数据建模语言可用于配置各种交换机功能。采用 NETCONF 协议+标准 YANG 模型实现 TSN 交换设备的配置及管理功能。

4. 路径控制与资源预留

4.1 面向预约带宽流量的资源管理

时间敏感网络控制器的路径控制和资源预留功能采用流资源预约协议 SRP (802.1Qat) 动态的预约网络资源。802.1Qat 定义的 SRP 协议类似互联网中的 RSVP，发送方首先定义流量的规范 Tspec，包括最大分组尺寸和带宽等信息，然后计算流路径，制定转发规则，为流分配贷款从发送方开始向接收方发送预约资源的消息（包含流 ID，流规范 Tspec，分组 MAC 地址，VLAN ID 和优先级等信息）。

TSN 交换机在数据平面为预约带宽流量提供基于信用的整形器 CBS (Credit based shape) 机制。CBS 机制限制每个整形器流量类别 不超过预先配置带宽限制，并保证高优先级的消息尽快发送，以防止形成突发的高优先级流量，并且采用 CBS 与 SRP 结合可以降低桥接网络延迟。

4.2 面向周期性时间敏感流量的资源管理

时间敏感流量主要针对周期性产生的关键控制信息，时间敏感网络控制系统除了可以支持更多数目的流资源预约外，还支持 CNC 通过集中计算（交换路径、资源需求和调度参数）和配置交换设备，以便支持周期性调度的时间敏感流量。

数据平面通过循环队列转发 CQF (802.1Qch) 以及基于时间的门控逻辑 (802.1Qbv) 等机制来保证端到端信息传递的确定性延时。

5. 调度引擎

时间敏感网络控制系统负责全网的策略控制，为了满足工业互联网不同场景下不同流量的端到端带宽、时延和抖动以及可靠性传输的要求，需要设计时间敏感网络控制器调度引擎。时间敏感网络控制器系统的调度引擎主要是根据网络连接特征和业务特征计算出业务传输控制参数，主要包含业务传输路径，数据发送时间、转发时隙、接收时间等。调度引擎中包括以下几种调度算法。

5.1 严格优先级算法

严格优先级 (Strict Priority, SP) 算法，即严格按照队列的优先级顺序进行调度。只有当高优先级队列为空时，低优先级队列中的数据帧才能开始传输。这样将关键数据流放入高优先级队列，将非关键数据流放入较低优先级队列，就可以保证高优先级数据帧的优先传输。适合使用固定采样周期的传感器或需要在给定时间间隔内输入命令的执行器，像 IEEE 802.1Q (VLAN) 或差分服务 (DiffServ) 这样的机制可用于此目的。采用严格优先级算法存在“饿死”现象，它使用全部的带宽资源保证高优先级数据流的服务质量，如果高优先级队列中长时间有数据帧存在，那么低优先级队列中的数据帧将长时间得不到服务。

5.2 CBS 算法

CBS 整形器在 IEEE 802.1Qav-2009 《IEEE 标准局域网和城域网虚拟桥接局域网修正 12：时效性流的转发和队列增强》中规定，它可以通过对不同队列赋予一个“信用值”来进行数据传输的调度，不同传输队列的“信用值”会随着数据传输的过程而自动更改，这样就会保证优先级较低

的数据也会得到数据传输的机会。另外，又由于在 CBS 算法中，时间敏感的业务流优先级高，所以其在队列中的等待时间有限，可以保证其服务质量。CBS 整形器主要在汽车工业得到应用，但相对工业应用而言还是具有较大的平均延迟。

5.3 SP 和 CBS 结合的算法

基本思想是：首先，使用 CBS 算法从不同队列选择帧进行传输，若存在“信用值”大于 0 且队列不为空的队列，则按照 FIFO (FirstInFirstOut) 规则从该队列取出数据帧传输；否则，使用 SP 算法从 BE 队列中选择。

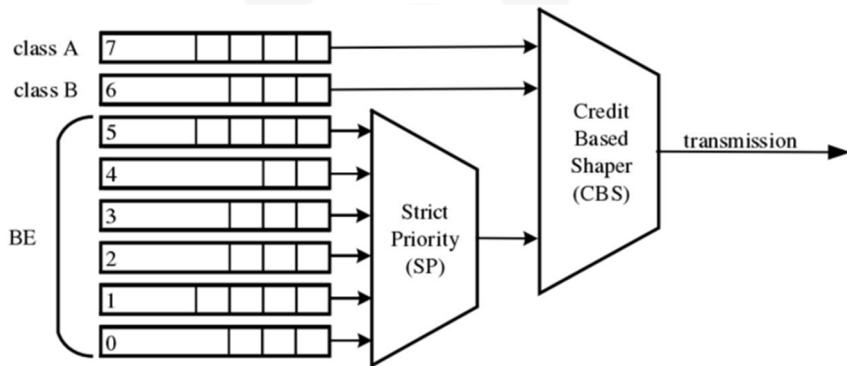


图 2-5 SP 和 CBS 结合的算法示意图

5.4 流量整形 (TAS) 算法

IEEE 802.1Qbv 定义了 TAS (Time Awareness Shaper)，TAS 一般分为两种：抢占式和非抢占式。非抢占式基于 IEEE 802.1Qbv，通过门控制列表 (Gate Control List, GCL) 周期性的控制门的开/关，TAS 需要从发送方 (Talker) 到接收方 (Listener) 中间的所有网桥进行时钟同步，对于网桥中的每个端口，TAS 根据已知且商定的时钟表进行开关驱动动作，而数据调度则可以根据每个节点及队列的优先级进行定义，在 IEEE 802.1Qbv 的实现中，那些需要实时传输的数据流通常被第一个安

排进行传输，需要在时间调度配置时预先予以确定，而与此同时，还需要为非周期性的数据预留一个通道。TAS可以和CBS整形器结合使用，在这个机制下，除了原定计划的周期性的调度和非周期性的预留调度外，还可以增加一个CBS整形器对其队列内部的数据进行按照信用的排序调度。

在 IEEE802.1Qbv 中所采用的 TAS 整形器存在一个问题，就是带宽保护，也就是无论是周期性的数据还是非周期性的预留数据，都需要预留通道。但是，TSN 网络中还存在一些其他的数据，这些数据也是非周期性的，但是没有足够的预留通道，那么这时的数据传输就是“Best-effort”的数据调度。尽管这些数据是非周期性的，但是可能他们的优先级很高，因此，为了确保严格时间要求的数据传输，IEEE802.1Qbv 给每个周期预留了一个“标准以太网”帧作为保护带宽。

而为了节省带宽，IEEE802.1Qbu-2016《IEEE 标准局域网和城域网网桥和桥接网络修正 26:框架优先》规定了抢占式的 TAS 整形器，在保证时间敏感任务数据可调度的前提下，尽可能的节省带宽。抢占式策略的原理是暂停非时间敏感型数据的传输过程，转而传输时间敏感型数据，时间敏感型数据传输完成后，再继续传输非时间敏感型数据，主要解决低优先级队列对于高优先级队列传输的影响。需要注意的是，抢占式机制需要网桥节点和终端节点支持 LLDP。

5.5 循环排队转发 CQF 算法

CQF 整形器基于 IEEE 802.1Qch-2017《IEEE 标准局域网和城域网网桥和桥接网络修正 29:循环排队和转发》。在 CQF 调度方式中，数据帧经过一个网桥的时延范围是确定的，与网络拓扑无关。这使得端到端时延很容易计算，只与源终端到目的终端的跳数有关，且时延抖动很小。

CQF 的实现是入队和出队两种机制的结合，首先，CQF 的实现需要精确时钟同步的支持，也就是说，对于一个时刻，网络中所有设备的认知是相同的。在此基础上，CQF 通过在 PSFP 中定义的门控制原理和在 Qbv 中定义的业务调度原理的结合，提出了双队列的调度机制，当一个队列接收时，另外一个队列进行传输。

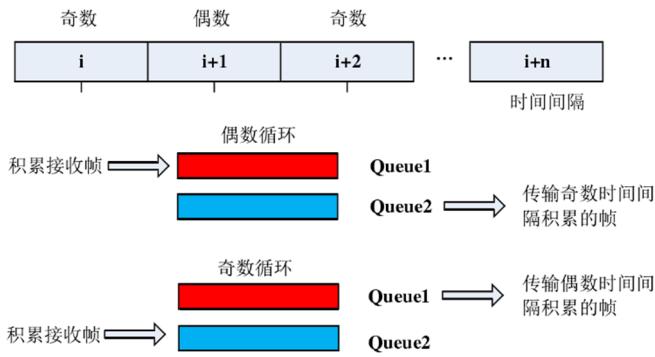


图 2-6 CQF 调度机制

6. 系统可靠

时间敏感网络控制器实现对 TSN 网络的配置和管理，提供业务流量的低时延可靠性传输，主要应用在工业控制、智能驾驶等对可靠性有较高要求的领域。因此，时间敏感网路控制器的可靠性也有较高的要求。

时间敏感网络控制器集中化控制、转发控制分离特性使得在业务部署时具有灵活柔性的优点，但单台的集中式的网络部署存在较大风险；控制转发分离意味着时间敏感网络控制器需要更加稳固。如果时间敏感网络控制器出现单点故障，这样整个网络系统都会失去控制，甚至会带来不可逆的灾难。时间敏感网络可靠性子系统提供时间敏感网络控制器运行可靠性保障机制，解决单台控制器节点部署时，存在单点故障及可扩展性差等问题、没有容灾机制，任何单点故障，直接将导致控制器功能失效。时间敏感网络可靠性子系统提供一种分布式去中心化的部署机制，当存在单点故障时，仍能确保时间敏感网络控制器整体功能的正常

运行。分布式系统是相对集中式系统来说的，分布式系统由一组通过网络进行通信、为了完成共同的任务而协调工作的计算机节点组成的系统，分布式系统具有高度的可扩展性及可靠性。去中心化系统是相对于中心化系统，中心化系统的运行依赖中心节点，中心节点故障将直接导致系统瘫痪；去中心化系统存在多个节点，系统的运行不会依赖单一的节点，单个节点的故障也不会导致系统的崩溃，各节点存在对等关系或者主备关系，各节点通过协同运作完成整体功能的运行。实际实现中，包含节点多活和节点主从两种工作模式，即节点同时处于运行状态，通过负载均衡选择其中的节点进行运行，以及节点存在主从关系，当主节点故障时，备节点感知后升主，从而保障系统的可靠运行。时间敏感网络可靠性子系统控制器冗余功能需提供去中心分布式的集群部署模式，解决单点集中式部署在系统可靠性上存在的问题。

7. 系统安全

时间敏感网络技术为以太网协议的 MAC 层提供了一套通用的时间敏感机制，在确保以太网数据通讯的时间确定性的同时，为不同协议网络之间的互操作提供了可能。近年来，随着时间敏感网络技术在各个应用领域受到更为广泛和高度的关注，因此对设备安全、网络安全、数据安全、应用安全都提出了很大的挑战。本项目计划研究时间敏感网络控制器安全防护机制，为不同设备厂家提供一个安全、可靠、高效协作的系统环境，满足工业应用的各种安全防御需求。常见的系统安全主要分为身份认证服务、安全防御服务、数据加解密三个方面：

7.1 身份认证服务

身份认证是使用用户提供的凭证来识别用户。身份认证技术是在计算机网络中确认操作者身份的过程而产生的有效解决方法，实现了验证

用户身份的真实性,有效的阻止未授权的用户访问网络资源。计算机网络世界中一切信息包括用户的身份信息都是用一组特定的数据来表示的,计算机只能识别用户的数字身份,所有对用户的授权也是针对用户数字身份的授权。如何保证以数字身份进行操作的操作者就是这个数字身份合法拥有者,也就是说保证操作者的物理身份与数字身份相对应,身份认证技术就是为了解决这个问题,作为防护网络资产的第一道关口,身份认证有着举足轻重的作用。

7.2 安全防御服务

安全防御是一种网络安全技术,指致力于解决诸如如何有效进行介入控制,以及如何保证数据传输的安全性的技术手段,主要包括物理安全分析技术,网络结构安全分析技术,系统安全分析技术,管理安全分析技术,及其它的安全服务和安全机制策略。此服务根据网络环境的变化动态,持续调整威胁安全检测策略,协同大数据情报展开对未知安全威胁、异常活动行为等高效率、准确性的检测,在预警事件触发后,及时采取措施并加以反制,保证关键应用服务的持续运转,整体上降低威胁攻击的影响及损失,提高弹性收缩的安全防御能力。

7.3 数据加解密

数据加密技术是网络中最基本的安全技术,主要是通过对网络中传输的信息进行数据加密来保障其安全性,这是一种主动安全防御策略,用很小的代价即可为信息提供相当大的安全保护。数据加密是确保计算机网络安全的一种重要机制,由于成本、技术和管理上的复杂性等原因,目前尚未在网络中普及,但数据加密的确是实现分布式系统和网络环境下数据安全的重要手段之一。

8. 系统扩展

8.1 跨域分层

时间敏感网络控制器在大规模网络组网场景下，单一控制器纳管上千接入设备带来的复杂的调度和计算，带来额外的大量的计算开销，受限于计算能力，需要采用分层分域的网络架构实现时间敏感网络控制器的扩展。层次化分域的软件定义网络控制架构，如图所示，将时间敏感网络的控制平面分为管理层和 Domain 层，并将整块网络划分为多个域（Domain）。其中，管理层运行管理控制器(管理控制器)，Domain 层运行域控制器(Domain 控制器)。Domain 层的每个 Domain 控制器负责一块时间敏感网络域内的网络管理和控制。而上层的管理控制器则负责 Domain 控制器间的协同，完成时间敏感网络域间的网络管理和控制工作。Domain 控制器与管理控制器之间运行东西向通信协议进行通信。

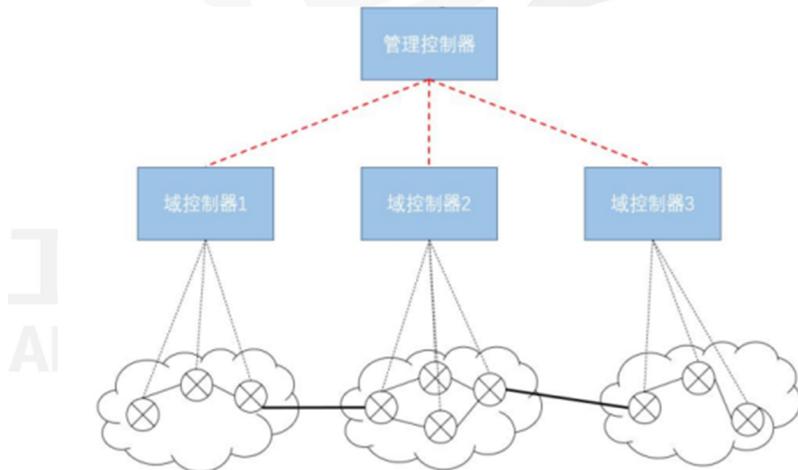


图 2-7 分层分域控制示意图

网络中的每个域由相应的一个 Domain 控制器管理，在一个域的边缘交换机上既有域内链路也有域间链路。为了保证 SDN 域的安全性、私有性以及域间通信的高效性，Domain 控制器将其控制的域抽象为一个隐藏了域内细节网络信息的逻辑交换机，域内的路径可以看作逻辑交换机的内部交换逻辑，而抽象后每个域对其他域暴露的端口包含对外端

口和边缘端口。那么管理控制器的全网视图包含每个域的边缘端口和对外端口，并按域 ID 区分不通域，相当于一个普通控制器的角色。管理控制器拥有全局的拓扑视图，当存在域内的业务时，普通交换机下发到对应的域控制器，仅由 Domain 控制器处理即可。当有跨域的业务需求时，管理控制器会将请求分别发送到对应的域控制器。域控制器收到请求，会根据掌握的域内信息进行处理请求，接收到业务的域控制器在业务处理结果后，域控制器会将其翻译为南向协议消息并下发到所有交换机上。这样，通过管理控制器的协调，实现了多异构控制器之间的编排和协同工作。

8.2 TSN 网络控制系统与 5G 融合

5G 接入同 TSN 网络相结合，实现了将传感器、执行器等工业设备接入到 TSN 网络中，从而实现生产设备的实时性及可靠性生产需求。5G 的低时延无线传输特性，在工业控制等领域具有很高的要求，因此，时间敏感网络控制器需要支持 5G 核心网策略交互子系统，研究和探索 5G 核心网子系统实现 5G+TSN 联合传输时（5G over TSN、TSN over 5G）的联合调度机制，并完成 TSN 网络控制和 5G 控制系统联合调度机制的实现。

在 TSN 控制器与 5G 核心网控制面策略交互的应用场景中，在基于标准的业务之上，重点研究 3GPP R16 和 TSN 协议，研究满足统一端到端的控制方案，采用切片技术满足多业务融合接入，采用 5G 服务质量特性（5QI）来实现降低延时的要求。在控制面实现 TSN 控制器联动控制 5G 网络和 TSN 网络的策略交互，搭建一个基于 5G 核心网和 TSN 控制器的融合性网络，实现 TSN 控制器将策略通过 5G 核心网映射到 5G 网络中，实现 TSN 域到 5G 域的策略交互。

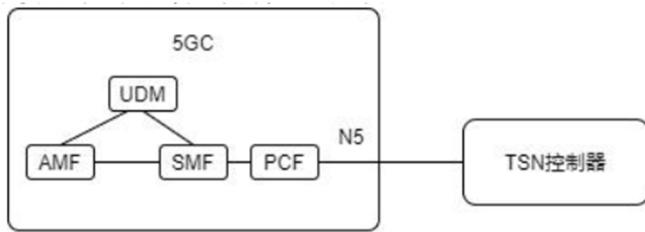


图 2-8 TSN 控制器和 5G 核心网交互示意图

如上图所示，TSN 控制器将对 5G 接入网的策略通过 N5 接口与 PCF 交互，将策略更新到 5G 网络中，而 5GC 通过 N5 接口将策略上传到 TSN 控制器。

时间敏感网络 5G 核心网络策略交互子系统重点研究 5G 核心网络和 TSN 控制器间的策略交互方式，如图所示。实现 TSN 控制器联动控制 5G 网络和 TSN 网络的策略，策略主要体现在带宽和优先级等在 5G 网络中的映射。具体的 TSN 控制器和 5G 核心网络控制面策略交互实现的组网计划按照上图所示搭建，搭建的网络环境包括 TSN 控制器和 5G 整个网络包括终端、无线、回传网络和核心网，核心网络的主要网络单元包括 PCF、SMF、AMF 和 UDM。TSN 控制器和 5GCFN5 接口交互，TSN 控制器在端到端的策略控制中，将 TSN 的策略分解到 5G 网络和回传网络中，完成时间敏感网络控制系统和 5G 控制系统之间的策略交互，并下发到各自的转发面上，最终实现 TSN 流量的全流程下发。

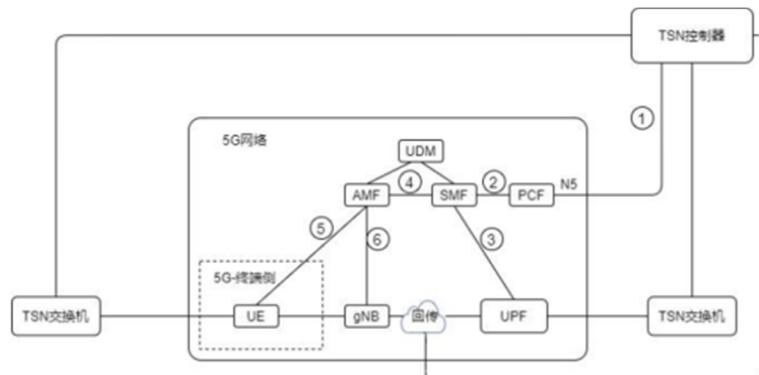


图 2-9 5G 核心网策略交互子系统

在 TSN 控制器与 5G 核心网控制面策略交互中，对于高隔离、低时延的工业互联网业务，可以采用无线侧采用物理资源承载（PRB）预留的切片，传输可以采用硬隔离的方式，而核心网采用专用 UPF 来实现如控制信令的转发要求，其他业务流量从另外的 UPF 转发。研究 TSN 业务在 5G 中传输的策略控制映射和关系，拟对于同步实时流的工业互联网业务，例如控制信令、运动控制，采用专门的 5G 服务质量特性（5QI）表示需要高质量的同步实时流的工业互联网业务，来提高工业互联网业务在无线侧调度的优先级，降低传输的时延。任务将实现支持策略交互的 5G 核心网，其中最主要的部分包括 PCF 的 N5 接口实现。核心网通过 N5 接口和控制器对接，接受控制器的管控，通过 PCF 接口向核心网内终端、基站和 UPF 传递控制信息，实现高优先级流量的切片控制和服务质量控制。通过 TSCAI 来传递工业互联网业务的流量特征，包括通信模式（周期、非周期）、流量方向（上行、下行）、流量到达的时间；具体执行将由用户面根据业务流量的特征信息和流量调度策略，采用保持和转发的调度机制，以减少时延抖动，具体用户面的执行不在本任务的范围内。搭建 TSN 控制器与 5G 核心网控制面策略交互验证系统，验证交互方式，验证用户面流量切片控制和优先级控制正常。

三、TSN 网络控制系统应用场景

（一）工业控制

工业互联网网络总体发展趋势就是工厂内网组网扁平化，IP 化及无线化。网络扁平化就是要改变现在的分层结构，使智能设备之间横向互联，另外整个工厂智能控制系统扁平化。IP 化就是用工业以太网取代现

场总线，用标准的工业以太网协议取代私有以太网协议，OT 层设备全部实现 IP 化。为了使信息流和控制流彻底分离，使网络的逻辑组网更加灵活，SDN（软件定义的网络）技术也将在工业互联网中得到广泛的应用。下图是未来的工业互联网内网组网模式。

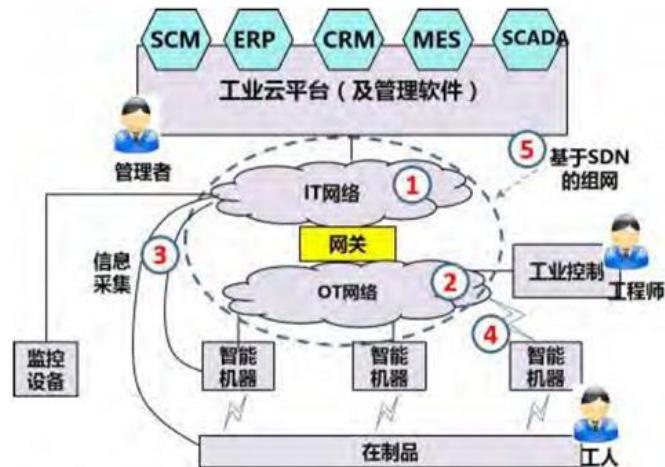


图 3-1 基于 SDN 的工业网络架构

图 3-1 给出了基于 SDN 的工业异构网络架构，SDN 控制器进行逻辑抽象和集中管理，将不同应用的服务质量（QoS）映射到网络基础设施上，从而形成支持 TSN 分时操作的工业 SDN 统一管控架构。

目前，在工业领域，包括贝加莱、三菱、西门子、施耐德、罗克韦尔等主流厂商已经推出其基于 TSN 的产品。贝加莱推出新的 TSN 交换机、PLC，而三菱则采用了 TSN 技术的伺服驱动器。未来，TSN 将成为工业控制现场的主流总线。

TSN 时间敏感网络能够保持控制类、实时运维类等时间敏感数据的优先传输，从而实现实时性和确定性。同时其大带宽高精度调度又可以保证各类业务流量共网混合传输，可以更好地将工厂内部现场存量工业以太网，物联网及新型工业应用连接起来，根据业务需要实现各种流量

模型下的高质量承载和互联互通。同时 TSN 基于 SDN 的管理架构将极大提升工厂网络的智能化灵活组网的能力，以满足工业互联网时代的多业务海量数据共网传输的要求。

TSN 的意义对于工业而言并非仅仅是实时性，而在于通过 TSN 实现了从控制到整个工厂的连接。TSN 是 IEEE 的标准，更具有“中立性”，因而得到了广泛的支持。未来，TSN 将会成为工业通信的共同选择。

（二）智能网联汽车

在软件定义汽车的大背景下，无论是自动驾驶还是智能座舱领域，电子电气架构集中化，软件硬件解耦，软件 SOA 已然成为行业发展趋势。随着传感器数据的增加，各大模块直接的数据交互，传统的车载技术已经无法满足智能网联汽车的要求，车载以太网具有大带宽、低延时、低电磁干扰、低成本等优点，成为智能网联汽车应用的关键选择。

车载以太网网络架构主要包括网关、交换机、域控制器、连接器、双绞线缆等，各个域控制器均通过车载以太网总线连接网关的交换机，车载以太网交换机用于实现各个域控制器之间的信息交互，网关将通讯协议转换后的执行请求通过交换机转发给域控制器，实现各个域控制器之间信号的高效交互。

控制器将地址学习和路由等常见 SDN 功能，与 TSN 流预留等附加功能相结合进行全网调度。SDN 控制器实现应用程序通过使用 OpenFlow 或 NETCONF 的来控制网络行为。当消息从数据平面到达时，控制器更新其网络状态，即主机地址和网络拓扑。网络应用程序可以对传入的消息和状态更改做出反应，并根据需要将更新推送到数据平面。因此，网络应用程序可以利用控制器提供的抽象网络视图，以及通信矩

阵和安全策略给出的有关车载网络的详细知识。

数据平面通过将 SDN 转发管道与 TSN 实时控制集成在一起的交换机连接 TSN 端点。每个交换机包含一个流表、一个流预留(SR)表、和门控表 (GCL)。TSN 入口应用过滤器和时间检查控制帧到达。当帧通过入口控制时，SDN 交换结构在流表中执行查找。如果不存在匹配的转发规则，则默认丢弃该报文。然而，大多数控制器都会安装一个规则来接收这些数据包。当找到匹配的条目时，将执行预定义的操作并将数据包转发到指定的端口，然后端口的 TSN 出口控制会调整出站流量。

(三) 电力厂站

1. 传统电力通信网络的局限性

传统电力通信网架构存在一定的局限性，可总结为以下几点：

1) 交换方式：电力通信网在信息安全方面高度重视，所以采用的是基于专网模式的点对点通信通道，业务在传输时对相应的通道具有唯一使用权，这种方式能够确保部分要求高可靠性的业务的安全传输，但是也造成了一定的网络资源浪费以及网络灵活性低等问题。

2) 物理拓扑结构：目前电力通信网主要是依据 P2P 的模式来进行规划。这种方式没有对整个网络的资源进行综合考量和规划，导致网络难以实现更好的信息化建设。这就造成传统电力通信网络“不可控”和“不可知”问题。

2. 通信资源集中管控的必要性

随着能源互联网、电力物联网等的兴起，传感、边缘计算、大数据处理等技术蓬勃发展，电力通信网中电力设备呈现多样化，不同设备对通信需求各具差异。例如，FTU 设备，经常安装在配电室内，需实现数据采集，与远端子站通信等功能，对通信带宽要求较低，但却需要较高

的可靠性支持；DTU设备，常部署于户外或环网柜，需完成开关设施功率、位置、电量等信息的采集和处理，对实时性要求较高；IED设备，主要安装与变电站，需实现故障诊断等功能，对实时性可靠性均要求较高。

由此可见，日益复杂多样的电力通信网设备对通信系统的要求也越来越高，配电网中的电力设备，型号各异，协议与制式互不兼容，且拥有独立的通信接口。对电力物联网资源管控、统一部署带来巨大挑战。此外，传统控制系统采用人为的方式按需逐个配置电力设备，随着新型电力业务切换频率加快，需频繁更新部署方案时，会造成庞大的人力资源浪费，且故障率上升，设备运行得不到实时监测，配网安全无法保障，系统管控与维护存在很大的局限性。因此，亟待解决通信资源高效、统一管控的问题，以促进电力通信网络管控智能化发展。

将TSN集中式控制技术应用到当前电力通信网络运维管控中的思路如图3-2所示。

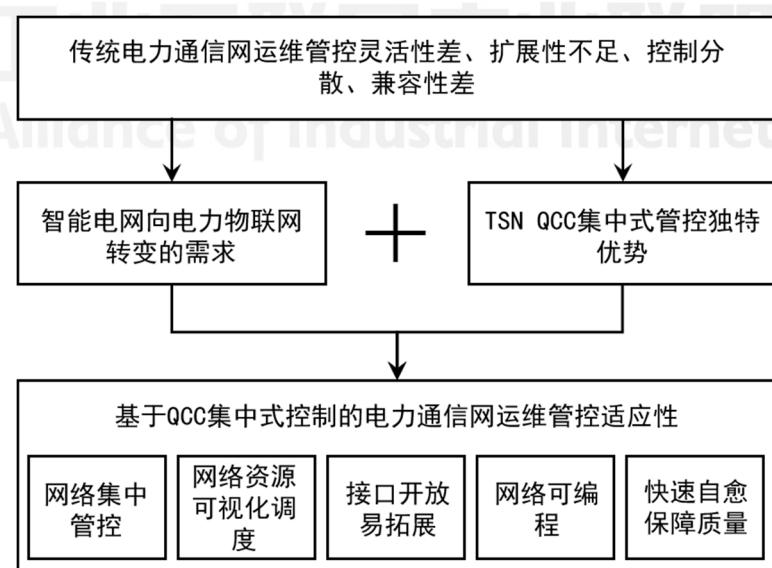


图3-2 基于QCC集中式控制技术的电力网络运维管控

在智能变电站中，其主要特点是通信平台网络化、全站信息数字化和信息平台共享化。智能变电站提供数据的传输平台网络化、共享化的同时，也给智能变电站的运行安全带来了一定的隐患，如会导致网络拥塞、网络风暴、时延抖动加剧等问题的出现，不仅影响数据传输的实时性和可靠性，甚至还会给智能变电站的间隔层和过程层内的组网设备造成破坏，从而给智能变电站带来安全事故。

智能变电站网络的集中控制能力有利于从宏观的角度调配智能变电站传输带宽等网络资源，提高智能变电站网络资源的利用效率，与新一代智能变电站扁平化网络设计相符，TSN 控制器可直接借助自身网络操作系统实现对全站通信网络流量的监控，展现全站通信网络实时状态，在变电场景引入 TSN 控制技术有望提升变电站通信网络以下性能：（1）保证重要信息传输的确定性和可靠性。（2）实现变电站通信网络的智能运维管理，提升网络的运行可靠性。（3）支撑变电站通信网逐步升级到融合网络，支持设备灵活扩展、满足设备即插即用；支持智能传感器、视频终端等异构信息安全无缝的接入；实现多业务数据的安全、可靠、实时、高效的共网传输。

（四）航空航天

航空航天业专用协议包括 AFDX、ARINC 等，这些协议带宽较低且供应商稀少，而又由于多网络的平行传输，因此没有一个特定的协议能够适用于一架飞机的所有子系统，组网成本高昂，系统布线也很复杂。航空航天网络需要一个通用的网络架构，布线简单、供应商多、组网成本相对较低，同时满足确定性传输、低延时、低抖动、冗余机制和高带宽的要求。TSN 控制系统的应用解决火箭系统及其他航天器的大容量带宽需求。

关于 TSN 在航空航天领域的应用，2019 年，国际自动机工程师学会负责航电系统网络规范制定的 SAE AS-1A 工作组开始寻求与 IEEE 802.1 TSN 工作组联合，共同制定 TSN 在航空航天领域应用的规范 AS6675,标志着航空航天领域可能成为未来 TSN 重要的应用场景。2020 年 1 月，美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 负责的星载网络项目也启动了时间敏感网络的研究工作。J.C.Pierre 等人从支持终端数、数据速率、配置和管理难易程度和低时延等方面分析了 TSN 应用在卫星内部对服务质量(Quality of Service, QoS)的支持，并且参考 SAVOIR(Space AVionics Open Interface Architecture)架构给出了一种基于以太网的星内网络拓扑连接图。

卫星网络是由分布在不同轨道高度的卫星、各类空间飞行器以及地面信关站等设备共同构成的层次化、立体化的复杂网络，这给卫星通信网络带来了一系列的挑战。卫星网络的规模庞大、结构复杂，对网络管理与资源配置提出了严峻的挑战。此外，由于天地一体化网络系统由天、空、地不同类型的多种网络构成，彼此间相互独立、复杂异构，因此，天地一体化网络存在着明显的异构性，在跨域互操作性方面有着。

国内外对天地一体化网络展开了多层次、多角度的研究。多家国外公司均推出了自己的天地一体化网络架构，其中有的已经在部署阶段。最具代表性的是 SpaceX 的 Starlink 计划，打造低轨宽带卫星互联网巨型星座，截至 2020 年 5 月 5 日在轨运行卫星已有 420 颗;亚马逊的 Kuiper 计划明确提出用软件定义的系统架构实现高速、低延迟的卫星宽带服务。在学术界，欧盟委员会于 2015 年通过 Horizon-2020 框架发起 VITAL 项目，该项目将 NFV 引入卫星-地面结合的网络，用 SDN 实现联合资源管理；同年，欧盟也发起了 SANSA 项目，研究利用卫星提供地面网络高

效弹性的无线回传链路;2017年,Horizon-2020也支持了Sat5G项目,用于支持研究卫星网络与新一代5G通信网络的融合。

我国也十分重视卫星互联网的发展。“天地一体化信息网络”已被列入“十三五”规划的100个重大工程项目。中国航天科技和中国航天科工两大集团都启动了各自的低轨通信项目“鸿雁星座”和“虹云工程”,两大工程的首颗试验卫星均在2018年12月发射升空。目前正依托卫星互联网项目构建更大规模的自主低轨卫星网络。

利用SDN的逻辑来设计卫星通信网络,具有以下几点优势:

①控制与转发分离,降低单星负载将软件定义网络中控制与转发分离的思想应用到卫星网络中,卫星节点仅需完成简单的数据转发和硬件配置功能,而较为复杂的资源分配、路由策略和网络管理等操作则放在控制中心,并向计算力强的高层卫星或地面转移,从而减少星上处理的压力,很好地解决了星上资源有限的问题。

②集中式控制,实现全局网络管控卫星网络环境复杂多变,与地面网络相比配置更加困难,随着卫星节点的数量逐渐增加,卫星网络的管理难度也大大提高。SDN逻辑上集中的控制平面可以获得网络的全局视图,随时监测网络设备状态,掌握全网的用户接入、节点故障、网络拥塞、链路延迟等事件,并及时进行动态调整,实现细粒度的网络管控,优化路由决策,从而提供业务的服务质量保障,提升全网的管理能力,进行高效的资源配置和网络管理。

③软硬件解耦,解除硬件厂商锁定软件定义网络将软件和硬件解耦,对底层设备进行抽象,将设备和功能分离,利用开放的编程接口可以方便的进行软件功能的远程维护和升级,解决了卫星设备更新和维护困难的问题,降低部署成本和升级成本,消除了由于硬件设备而带来的网络

异构问题，实现可控的跨域协同资源调度，同时提升了网络的可编程能力，支持网络运行时的在线优化调度。

④控制器模块化，便于网络功能扩展 SDN 控制器负责对底层转发设备进行统一控制，并为上层应用业务层提供调控接口，很多 SDN 控制器采用模块化的设计思想，可以根据具体的架构设计和业务需求增减相应模块，其控制模块实现基础的网络服务，应用模块调用控制器模块的 API，提供开放的编程接口可以应用到不同的网络中，具有很好的系统扩展性。

四、我国 TSN 控制系统产业发展对策及趋势展望

(一) 产业发展对策

1. 产业政策

构建安全、可靠、灵活、通用的时间敏感网络控制系统，对于开展创新型应用示范、构建新型产业生态、解决行业重大瓶颈，引领未来工业互联网发展具有重要的意义。目前，需要进一步丰富时间敏感网络控制系统的应用场景，加快智能网联汽车、智慧电网、工业互联网等领域与 TSN 网络控制系统相关应用示范的创建进程。推进 TSN 网络控制系统技术攻关与典型应用相融合，建立包括研究、生产、测试、应用等全周期的产业链计划名录。

此外，进一步加大对 TSN 网络控制系统研究的支持力度，鼓励更多科研机构、设备厂商、应用厂商参与到 TSN 网络控制系统的应用研究中，加快产品落地进程。鼓励各地建立 TSN 网络控制系统与本地特色行业、特色企业融合应用示范，形成典型应用和特色应用相结合的部署方

式。

2. 标准引领

标准方面，继续依托工业互联网产业联盟、SAC、CCSA 等标准组织，开展 TSN 网络控制系统关键技术及 TSN 网络控制系统在智能网联汽车、智慧电网、工业互联网等领域应用标准的制定工作。此外，加快 TSN 网络控制系统测试相关标准的研制工作。完善 TSN 网络控制系统的标准体系，建立从关键技术到应用示范、系统测试等全周期的标准规范。

加强和 IEEE、IETF 等国际标准组织的沟通交流，加强国家标准和国际标准之间的相关转化，标准规范在国内、国际都能够保持领先水平。注重工业互联网产业联盟、SAC、CCSA 等不同标准组织之间的协调和沟通，保障 TSN 网络控制系统相关标准规范的协调一致性。

（二）趋势展望

TSN 网络控制系统在技术研究、应用落地、标准研制等方面均已得到良好发展，自动化设备厂商、网络设备厂商纷纷推出符合相关标准的 TSN 交换机及终端等网络设备，加快推进了 TSN 网络控制系统技术标准的落地。TSN 网络控制系统技术日趋完善，许多设备厂商、科研组织正在进行不同信息技术之间的融合研究，以拓宽 TSN 网络控制系统的应用领域。总体来说，TSN 网络控制系统正处于技术攻关和产业落地的关键时期，需要深化在以下几个方面的研究。

1. 互操作性

增强 TSN 网络控制系统的互操作性。随着网络设备的不断增加、技术标准的不断成熟、垂直行业应用的不断丰富，TSN 网络控制系统需要为不同的设备芯片制造商和网络设备制造商、不同的行业解决方案集成

商提供控制面支撑。需要增强 TSN 网络控制系统的互操作性，以支持多厂商设备互联互通、多业务混合传输、多行业应用灵活适配。

2. 轻量化

TSN 技术在智能制造、智能网联汽车等领域的应用前景可期，TSN 网络控制系统所要支撑的网络规模不断增长。为简化系统部署、方便系统移植、灵活适配应用，需要研究轻量化的 TSN 网络控制系统，以支持垂直行业应用的快速验证。

3. 模块化

随着工业应用场景信息模型的精细化和标准化，各个行业可以制定工业应用场景模板，如业务流模型。

4. 与工业软件融合

加速 IT 与 OT 融合进程，推动 TSN 网络控制系统与工业软件融合，打通工业现场数据到生产管理、供应链的自由流动，推动大规模个性化定制等新型工业互联网场景加速落地，进一步推动制造业转型升级和经济高质量发展。

5. 行业应用推广

加快 TSN 网络控制系统行业应用推广，建设应用试点。虽然 TSN 网络控制系统的标准不断成熟，但目前实际应用仍然较少，需要加大推广力度。建议政府设立相关资金支持，鼓励企业，尤其是龙头企业联合上下游企业建设 TSN 网络控制系统典型或特色的行业应用试点，为大规模推广做好示范。

附录：TSN 网络控制系统应用案例

1. 海尔智能工厂案例

为了适应工厂数字化、网络化、智能化的业务发展需求，海尔拟在新建工业园区网络中引入 TSN、IPv6、SDN 等新型网络技术，构建一张灵活定义、多维可视、质量保障、安全可靠的园区网络，实现工业场景下人员、设备、物料、产品各生产要素的互联，为工厂实现智能生产、协同制造和柔性制造提供网络支撑，为 M2M、安全巡检、设备监测、视频监控等业务应用提供支撑，并形成针对典型工业场景化园区网络的基线标准。

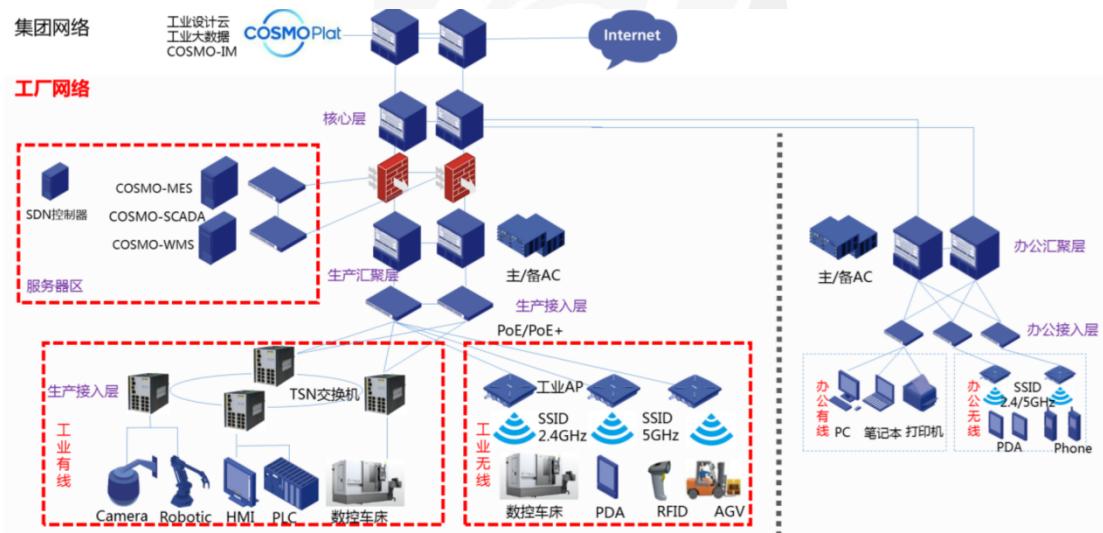


图 3-3 海尔智能工厂基于 SDN+TSN 融合网络测试床

上图是海尔新建工厂网络的整体部署架构，测试床的重点在上图左下角的产线 TSN 交换机环网上，根据产线信息点的点位情况，TSN 交换机的数量、布放位置、组网会有微调。在厂区建设一个小型弱电机房，除了部署海尔自有的 Cosmo-MES、Cosmo-SCADA 等软件外，部署 SDN 控制器软件，SDN 组网方案选择 EVPN+VxLAN 的方式，核心交换机和

汇聚交换机应支持 VxLAN 特性。同时为了满足厂区大量 IP 终端的管理需要，部署相应的终端管理软件。

2. 南京优倍电气 SMT 生产线案例

南京优倍电气为生产工业电气设备制造商，产品包括安全栅、隔离器、温度变送器、电涌保护器等工业信号接口仪表。优倍电气南京江宁新工厂，SMT 生产车间参照原有示范工厂，考虑加入新的技术 TSN 时间敏感网络技术（网络部分），建设一条 SMT 的工业 4.0 示范车间生产线。

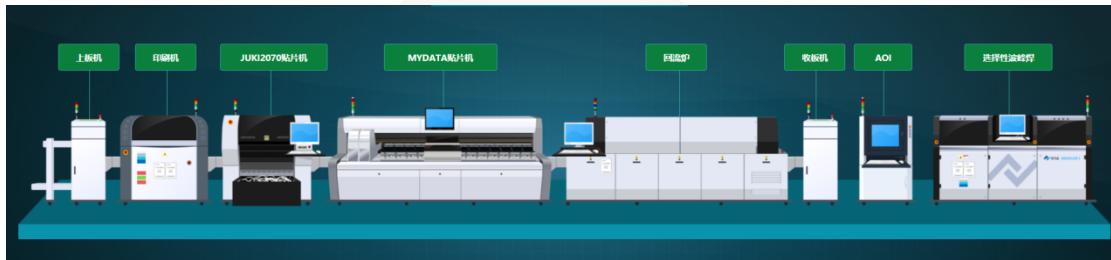


图 3-4 优倍电气 SMT 生产线示图

SMT 生产车间网络部分包括：

(1) OT 网络：SMT 产线设备之间、设备与 SCADA、MES 系统的互联。包括：外购的生产设备：贴片机、上料机、回流焊机、波峰焊机、打标机等；自研的生产设备：接驳台、物料塔（线边库）、智能立库；自研的 MES 系统；外购的 SCADA 系统。

(2) IT 网络：动力环境、视频监控与后台的互联。

温度、湿度传感器与 SCADA 系统互联；电量（每台设备额外加装）与 SCADA 系统互联；监控摄像头与中心监控系统的互联。

车间的骨干 ETH 交换机使用 TSN 交换机代替，除了 VLAN 外，对工业设备的控制业务、工业设备监控业务、动力环境监控、视频业务进行 TSN 的带宽隔离，保证相互之间不会影响，确保安全。接入交换机为

轻载，且业务主要考虑实时性而不是确定性，因此接入交换机、自研设备终端、工业网关保持不动，仍使用普通以太网方式。本次改造具体实施方案如图 3 所示。

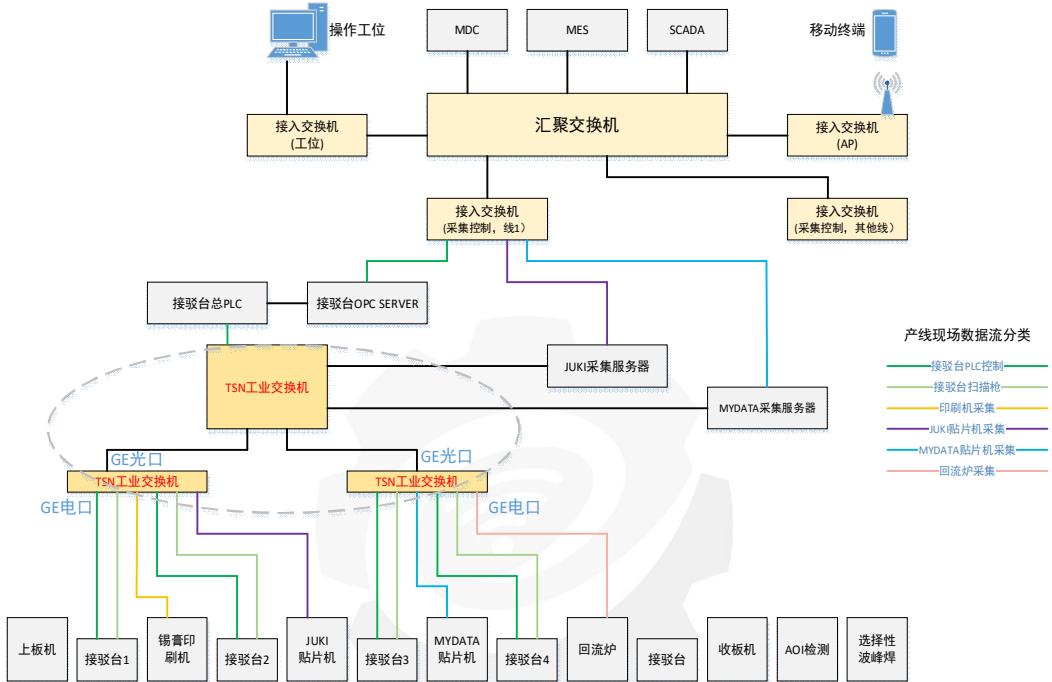


图 3-5 优倍电气 SMT 新生产线 TSN 交换机部署方案示图

新工厂 SMT 生产线现场网络升级，使用 3 台 TSN 工业交换机替代原有的 5 台现场工业交换机，扁平型网络：

- 按照物理区域分减少布线和设备；
- 所有现场业务共网传送，使用 TSN 进行业务之间的隔离，保证各业务确定性和实时性；
- 共网传送利于后续功能扩展，如增加机器视觉功能；

提供同步授时功能，可满足未来数据采集的精确同步需求，便于定位分析问题，实现预测性维护。