



面向边缘计算的工业互联网工厂内 网络架构及关键技术

李庆^{1,2,3,4}, 刘金娣^{1,2,3}, 李栋^{1,2,3}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了适用于工业网络的通用边缘计算计算模型, 分析了工厂内网络需求。基于软件定义网络集中管理能力与时间敏感网络的实时可靠性, 提出了一种基于软件定义网络和时间敏感网络的工业互联网工厂内网络架构, 该架构以其开放性、灵活性、实时性、高效集中管控的特点普适于工业互联网工厂内的各种业务需求, 并对其中的主要功能进行了分析。

关键词: 边缘计算; 软件定义网络; 时间敏感网络; 工业网络

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019248

Network architecture and key technologies in industrial internet factory oriented to edge computing

LI Qing^{1,2,3,4}, LIU Jindi^{1,2,3}, LI Dong^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
2. Key Laboratory of Networked Control System, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A general edge computing model for industrial networks was proposed, and the network requirements in factories was analyzed. Based on the centralized management ability of software defined network and the real-time reliable of time sensitive network, a network architecture in industrial Internet factory based on software defined network and time sensitive network was proposed. The architecture is suitable for all kinds of business requirements in industrial internet factory because of its openness, flexibility, real-time and efficient centralized control and the main functions were analyzed.

Key words: edge calculation, software definition network, time sensitive network, industrial network

1 引言

互联网和大数据的兴起推动了云计算的广泛应用与快速发展,然而随着近年来移动互联网和物联网应用的蓬勃发展,智能终端设备不断泛在普及,感知能力不断增强。据思科的云指数预测^[1]到2021年,全球移动数据流量将达到每年587 EB,产生的总数据将达到每年847 ZB,数据中心计算性能正逐渐达到“瓶颈”。考虑到庞大的物联网设备产生的数据,如何来应对处理这些普遍的、无处不在的海量实时数据已经成为关键挑战^[2]。将所有数据发送到集中式云中进行计算和存储可能会导致数据拥塞、高时延和差的服务质量(quality of service, QoS)。因此,基于“中心交付方式”的云计算服务模式已经难以适应当前网络的发展需求。

为了缓解数据中心处理压力、消除计算与通信“瓶颈”、提升系统服务质量,业界基于“将计算交付到数据感知源,就近提供智能服务”的思想,边缘计算应运而生^[3]。边缘计算摆脱了原来云计算的集中式处理模式,将计算中心移动到网络的边缘,位于用户所在的位置的附近。边缘计算的特点是,通过非常低的时延来提高用户的体验,并且能通过边缘服务来减少数据流量。然而,边缘终端设备的快速普及使得云端融合环境呈现出边缘设备数量庞大化、类型异构化、网络拓扑动态化、数据海量增长化、应用多样化等特征,对基于边缘计算的云端融合带来新的挑战^[4]。当前工业网络中IT网络和OT网络是分离的,构建IT和OT融合的全互联、扁平化、灵活化的工业网络体系结构是工业网络发展的必然趋势^[5]。面向智能化生产、网络化协同、个性化定制、服务化转型等典型边缘计算场景,设计实现具有数据分析、机器学习和实时控制等边缘计算模型及体系结构是产业界和学术界共同面临的挑战。

软件定义网络(software defined network,

SDN)将控制平面与数据平面分离,将逻辑集中在基于软件的控制器^[6]。SDN能够随时监视网络的状态,方便动态环境中的及时决策。时间敏感网络(time sensitive networking, TSN)能够提供具有有界低延时、低抖动、极低数据丢失率的能力^[7]。SDN与TSN具有显著改善工业互联网许多计算和网络场景的真正潜力,将SDN与TSN的发展与实际的服务需求保持一致至关重要。

2 面向制造业高质量发展的边缘计算运行模式和网络需求

2.1 面向工控网络的统一边缘计算模型

工业互联网中边缘计算环境存在计算、网络和存储等资源且具有异构性、动态性、分布式和零散化的特性^[8]。工业互联网中边缘计算可应用在不同场景,而不同的场景对计算能力需求不同,包括流式数据分析、数据挖掘、智能计算和实时控制等,因此需要研究设计不同的数据处理模型和统一的边缘计算架构。本文提出的面向工控网络不同计算需求的统一的边缘计算模型主要包括离散事件计算模型、连续时间计算模型,以及数据流计算模型。

(1) 离散事件计算模型

系统模型中的所有执行器共享一个全局时间,而执行器的通信关系及顺序则是由在这一全局时间轴上排布的事件来表征。事件被按照时间顺序进行排序,其调度器保证队列中的第一个事件开始执行并触发相应的执行器,而执行器的执行只听从于事件。

(2) 连续时间计算模型

计算系统中的动态物理特性及连续控制过程可以使用常微分方程进行描述,而连续时间计算模型则可用于描述这类使用常微分方程进行描述的边缘控制系统。系统异构建模中,在不同层次的模型间组合使用连续时间计算模型及基于事件的其他计算模型,如离散事件及有限状态机计算



模型等。

(3) 基于同步数据流计算模型

模型的边缘控制系统由控制器和滤波器组成, 反馈控制所需的状态估计数据由滤波器实时计算。内部模型利用系统辨识技术获得。控制器结构模型是层次性异构模型, 模型使用同步数据流计算模型、描述数据流动、同步数据流计算模型的机制可确保控制器模型及产生的代码的同步性。

在面向工控网络不同计算需求的统一的边缘计算模型的系统模型中, 由于每个执行器的执行顺序在模型执行前就已通过静态调度算法确定, 因而这类系统模型在确定性、静态调度及时间安全性等方面有保障。在模型执行过程中, 每个组件在每次迭代中, 固定消耗一定数目的数据单元, 这些固定数目的数据单元在模型初始化时就被确定。模型在进行仿真及运行时, 各执行器接收和发送数据的速率保持不变。

2.2 高并发计算任务的实时调度技术

对具有线性复杂度的低开销、高可调度性的混合关键性计算任务调度技术进行了研究。通过优先级被动性时延更新来降低发生抢占时优先级重复计算次数, 以此降低系统时间开销; 通过建立作业数量与忙碌周期的定量关系来设定更为精确的忙碌周期上界, 以此降低系统空间开销并提高可调度性。

混合关键性系统要解决的根本问题是如何以规范的方式来平衡应用在不同模式下割裂的正确性需求与有效地充分利用资源之间的矛盾。该问题涉及建模和验证等理论问题以及与软硬件设计与实现相关的系统问题。在传统的单处理器系统中, 性能优异的调度算法已被证实不能直接用于混合关键性系统中。因为在混合关键性系统中, 这些算法表现出很差的可调度性能, 因此面向混合关键性系统的调度算法研究是全新的挑战。而多核、多处理器平台中的混合关键性系统调度也

面临着同样的问题, 并且调度算法的设计与分析更为复杂。首先, 将研究低系统时间开销的调度算法。现有调度算法在作业发生抢占时优先级重复计算的次数过多, 通过对此情况改善来有效降低系统时间开销, 目标是将系统的时间复杂度降到线性。其次, 将研究低系统空间开销调度算法。传统调度算法利用的忙碌周期上界过于悲观, 将通过研究更为精确的上界计算方法来降低系统空间开销。计算得到的上界越小, 需要存储的忙碌周期内作业优先级的数量也就越小。对高可调度性算法进行了研究, 在调度算法中利用悲观的忙碌周期上界使得系统的可调度性降低, 通过重新求该上界来提高可调度性。

2.3 自适应计算任务迁移技术

针对智能工厂边缘设备数量多、异构性、资源有限性以及动态性对计算模式带来的挑战, 本文提出了资源有限条件下的云—边缘融合可编程边缘计算模型的构建方法。包括以下几个方面。

(1) 可编程边缘计算框架

设计了在云边缘融合环境中, 计算资源存在动态性和分布不均衡情况下, 高效的计算任务分解和分布式协同计算框架, 建立了快速的计算任务分片和映射方法; 设计了基于网络带宽和计算资源的自适应计算任务分片检索和组合方法, 以及高效的分布式计算结果聚合方法, 实现高效的云—边缘分布式协同计算, 为云边缘融合环境下的边缘计算提供参考计算模型。

(2) 可编程边缘计算异构设备互联

边缘计算现场设备由于需求不同, 采用了不同的通信协议, 不同协议的设备无法直接互联, 目前主要使用相应协议主站配合 OPC 的软件转换方式进行互联, OPC 服务使用的 C/S 模式效率低, 无法应对大规模设备互联需求。针对工业现场中不同传感器终端信息异构的问题而无法直接关联的问题, 研究了基于软件定义网络异构终端协议

软件化适配和转换以及多终端协作的语义化关联模型, 以实现异构感知终端全生命周期信息统一表征及语义化关联。

(3) 可编程边缘计算数据实时可靠传输和控制

重点解决工业环境下设备无线接入的可靠性问题和异构工业互联网终端的统一互联带来的实时性问题。借鉴互联网和云数据中心中的成熟技术和架构, 通过扁平化的网络架构打破层次化工业网络壁垒、IP 化实现工业现场设备的统一和高效互联以及集中式的管理模式对工业业务进行统一管理和调度, 为扁平化的网络上的各种工业业务提供实时性保障。通过对工业环境时间、空间、频谱资源的综合感知, 构建面向动态干扰的自适应跳频和动态功率调整机制, 将最终实现工业环境下数据实时可靠传输和控制。

2.4 存在的问题与网络需求

边缘计算从提出到具体的落地应用仍然有着很多问题与挑战, 因为在网络边缘部署额外的计算资源并建立这种互补性, 同时可以随时随地访问并不是一种简单的尝试。具体包括以下几个方面。

(1) 资源管理问题

边缘计算服务器通常需要服务大量工业设备, 边缘计算服务器资源分配可能由于大量设备争取有限的资源而导致死锁, 消除死锁是提高系统可靠性的关键。Ugwuanyi 等^[9]提出了一种可靠性资源配置的方法, 利用 SDN 来降低通信开销, 结合银行家资源请求算法来避免死锁, 仿真验证该算法可以有效地防止系统死锁, 实现可靠性交互。Mishra 等^[10]提出了一种可持续服务分配的方案, 服务分配主要通过客服端请求虚拟机来完成, 文章以能耗和截止时间为 QoS 约束, 将服务请求问题归为一个双目标最小化问题。

(2) 传输时延优化问题

控制系统对于时延尤其敏感, 通常, 工业控制器都有专有的硬件去完成, 但是随着应用逻辑控制

器 (App logic controller) 和虚拟 PLC (vPLC) 等技术的提出, 软件实现特定硬件功能的方案越来越得到重视。控制器通过网络实现控制过程, 时延是最大的挑战。Mubeen 等^[11]提出一种时延缓解的策略, 用于缓解云端控制器在任意时延的情况 (大于小于控制周期) 下网络引起的抖动和时延。

(3) 查询存储问题

边缘计算涉及云、边、端等多个结构, 数据和服务的查询存储比单纯的云计算更为复杂, 尤其面对高吞吐量计算时, 高效的存储策略将会极大地提高系统效率。Lin 等^[12]提出了一种时间驱动的数据存储策略, 结合云端和边缘端, 提出了一种基于遗传算法算子的自适应离散粒子群优化算法, 降低了数据的传输时间。

同时, 由于边缘计算系统中往往有大量工业无线设备, 尤其是对于移动节点而言, 从移动网络或远程服务器下载大量数据对无线网络来讲是巨大的挑战。Li 等^[13]提出了一种利用边缘计算进行主动缓存的存储策略, 缓存通过云、边、端 3 层缓存结构, 根据移动节点的驻留时间、服务器和其他节点的容量, 提出了一种考虑位置和移动轨迹的主动缓存策略。实验验证了该策略具有较高的实时性和良好的性能。

因此, 工厂内的边缘计算网络目前急需一种既实时可靠, 又具有灵活性及可重构, 又可以同时集中管理多个管理域的网络体系架构。为了实现所设想的普适计算场景, 必须想出一种解决方案, 将所有内部复杂因素都隐藏在用户面前, 特别是对应用程序开发人员和提供者。为此, 软件定义网络以其网络编程能力脱颖而出, 通过向终端用户隐藏这种异构环境的复杂性, 自然成为编排网络、服务和设备的最佳选择。但是, 工业网络中对时间敏感性具有非常严格要求, 时间敏感网络具有低时延、小抖动、低丢分组率、有保证的数据分组传输等优点, 能够保证数据在网络中传输的确定性时延^[14]。



3 基于 SDN 与 TSN 的工业互联网工厂内网络架构

3.1 网络整体架构

为了满足工厂内边缘计算服务对网络的实时可靠及灵活可重构的要求,本文基于 SDN 与 TSN 技术搭建了工业互联网工厂内网络架构,该架构共分为 3 层,分别是现场层、网络层、应用层,如图 1 所示。

(1) 现场层包括传统工业生产网和边缘计算服务设备两部分。传统工业生产网由工业现场设备构成,包括工控机、智能终端、机器人、可编程逻辑器件、数控机床等。边缘计算服务设备包括处理用户请求的边缘服务器和寻求服务的边缘设备。

(2) 网络层由运行 SDN 协议的 SDN 交换机和 SDN 控制器构成。SDN 交换机用于实现数据转

发传递。控制器负责制定交换机配置转发规则、生成优先级队列调度策略及带宽分配策略等。为了满足边缘计算服务需求 SDN 控制器还安装了移动逻辑,以便在移动用户更改附加的边缘服务器时处理与移动相关的信号。它还维护一个绑定缓存条目(BCE)表,用于移动用户的位置跟踪。SDN 交换机维护流表,流表控制交换机在数据平面上转发数据分组的方式^[15]。

(3) 应用层包含不同 QoS 需求的应用,应用层中的应用请求通过尚未标准化的北界 API 转发给 SDN 控制器。然后,SDN 控制器将这些命令转换为低层 OpenFlow 消息,下发流表配置 TSN 规则,然后发送到数据平面,进而传递到工业现场层。

该架构的核心是 SDN 控制器,具有集中式管理控制能力,对全网资源进行全局调度分配,以满足不同工业应用的不同 QoS 要求。

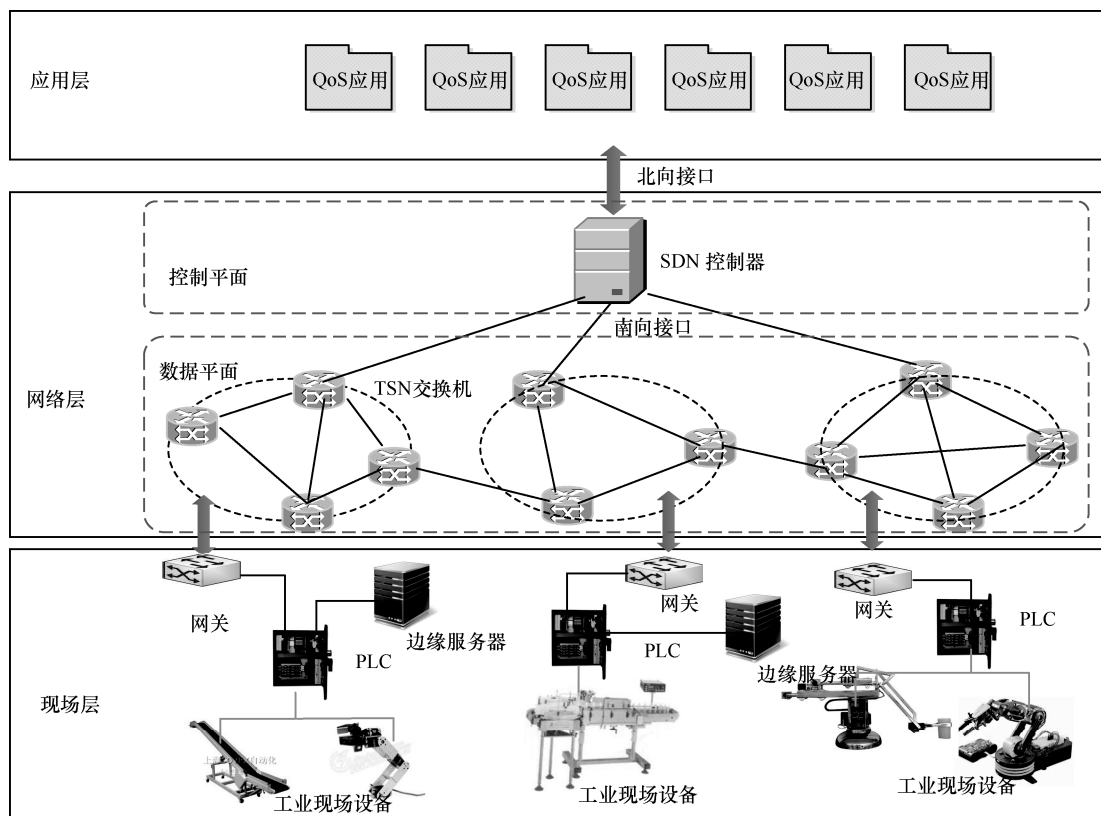


图 1 基于 SDN 与 TSN 的工业互联网工厂内网络架构

3.2 全局资源可重构功能

针对个性化生产等新型制造生产模式对工业网络提出的动态变化的需求,基于业务分离的思想构建工业互联网工厂内网络的全局资源可重构功能,功能结构如图2所示。传输任务在入网前需要将传输需求和流量特征按照业务模型提交到工业软件定义网络管理器,管理器将按照资源模型进行资源预留,并在业务退网时进行资源回收,通过集中的在线全网资源管理支持车间内网络的灵活重组和按需重构。

基于SDN与TSN的工业互联网架构中采用网络虚拟化和按需资源动态分配技术实现全局资源动态可重构功能,快速实现不同服务需求在同一物理网络上搭建多重虚拟网络。该功能采用逻辑集中控制思想,通过资源感知技术对网络资源的精细划分,提升网络资源的利用率。通过资源抽象化和组件化技术对网络资源进行重构并统一管理,为网络重构与虚拟化灵活地提供重构资源。通过控制与转发分离技术将网络资源动态分配至实体网络,灵活支持工业服务的多样性和定制性,实现针对应用场景和业务需求的按需组网和动态调整。

3.3 数据平面可编程功能

基于SDN与TSN的工业互联网架构中的数据平面可编程,数据平面的SDN交换机采用基于可编程流水线结构的交换机模型,如图3所示。通过“匹配-动作”结构进行多种工业协议和标准协议的适配,在动作单元设计基于时间触发的细粒度操作模块和多队列处理队列,支持混合业务流的高效传输。

为支持多种工业协议数据转发,本文设计了基于解析表的分组头匹配机制,使交换机设备根据解析表的匹配内容即可实现数据分组的解析和数据分组任意位置信息的提取(包括数据分组头及其应用数据内容)。基于FPGA的快速分组头解析技术,支撑解析器高速解析能力的实现;结合南向接口协议,研究解析器的动态配置管理方式,能够根据管理器的解析策略动态调整解析器的解析内容。

为支持对不同类型混合数据业务的传输需求,研究常用交换机队列调度算法和符合TSN标准的队列调度基础算法,抽象出调度器模型,设计流水线式的调度方法及其组合;使用基于FPGA的调度器并行处理调度技术,以实现高速、并发的队列调

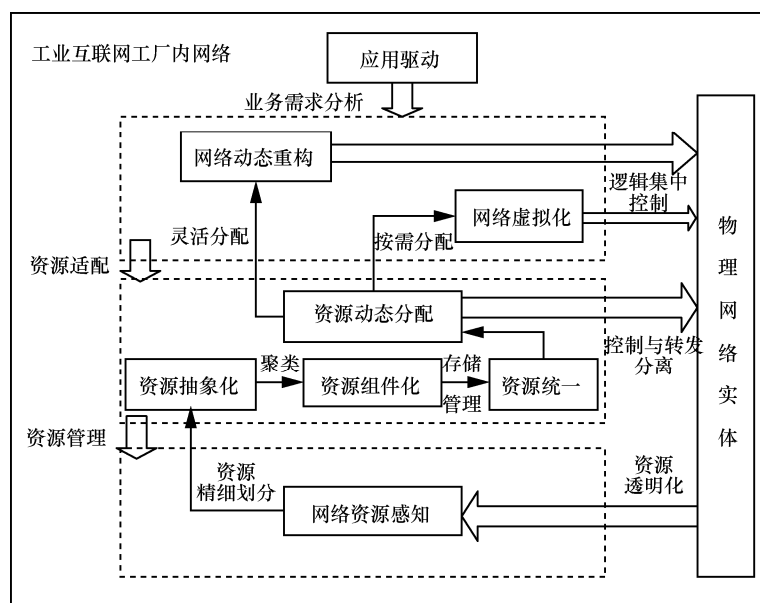


图2 全网资源统一动态重构功能结构

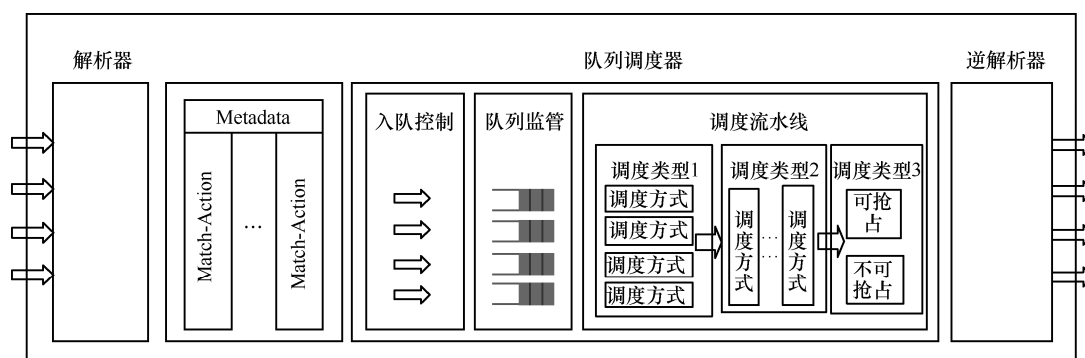


图3 交换机转发模型

度；设计队列调度器的动态配置管理方式，能够根据管理器的策略对调度器进行灵活配置。

3.4 TSN 调度功能

基于SDN与TSN的工业互联网架构是一种集中控制数据流的混合优先级队列调度架构，如图4所示。在该架构中，所有具有实时性要求的业务的调度都将由网络管理器统一计算和分配。数据流在进入网络之前，需要先向管理器提出该业务流的实时性要求，即该业务流中的任何一个数据分组的传输时延都必须小于某一确定的值。接下来网络管理器一方面随时获取交换机各接口的流量情况，感知网络状态，另一方面根据该数据流的实时性要求，结合当前的网络状况，计算在转发路径中每一个交换机执行该数据流的队列，并下发到交换机中。当数据流中的数据分组进入交换机时，交换机无需再向管理器请求，直接进行转发和按优先级队列进行调度，这种功能被称为TSN调度。TSN调度方法更为复杂，精度更高，可实现更有效率的业务流混

合优先级队列调度方法。

本文设计了一种面向增量业务流的TSN调度方法，该方法的特点是根据网络资源和现有数据流的调度方案，设计新增数据流 $M+1$ 的调度方案。调度方案的约束是最大时延小于时延要求。整个调度策略的最终目标是希望在确定性保证所有具有实时性要求的数据流的前提下，尽可能多地承载业务。因为是增量业务流的调度方法，在为第 $M+1$ 条业务流制定调度策略的时候，并不知道第 $M+2$ 条及以后的业务流的任何特征，因为这些都是来自于环境和订单变化，很难进行预测。因此，在第 $M+1$ 条业务流在进行调度的时候，需要很有限地使用网络资源，并尽可能使资源的使用尽量均衡。为了有限地使用网络资源，对于实时性要求不高的业务流，尽可能选用低一些的优先级队列，将高优先级队列留给未来有可能出现的高实时性业务；为了使资源使用尽量均衡，选择队列时应尽量选择剩余带宽更多的队列。基于此

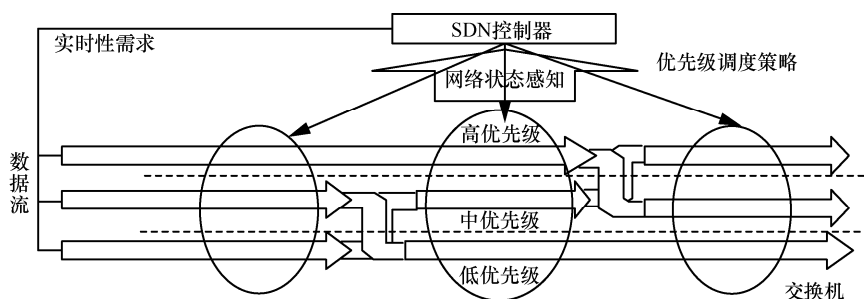


图4 集中控制 OPC UA 数据流的实时保障架构

分析设计合理的目标函数和约束条件以实现最优调度方案。

4 结束语

本文提出了适用于工业网络的通用边缘计算模型,对计算任务实时调度技术以及计算任务迁移技术进行了分析,旨在解决计算资源分布不平衡条件下的自适应计算任务迁移问题,为边缘计算任务的高效运行提供保障。并尝试采用一种新颖的方法,将SDN的能力、TSN的时间敏感性与边缘计算的不足进行技术上的结合,提出了一种应用于工业互联网工厂内网络架构,以提高动态环境中的服务质量,加速实际部署和联合边缘资源,并对其中的主要功能进行了分析。

下一步的工作首先是评估提出的架构与方法,验证所提出的工业网络架构的可行性,查找方法中的不足之处,然后加以改进优化。将从以下几个方面对架构进行优化:(1)实现无线网络与SDN;(2)互操作性接口的标准化;(3)增强现有标准和接口的可编程性;(4)SDN平面的可扩展性。将不断探索、研究边缘计算测试验证方法,搭建工业互联网边缘计算系统验证平台,对工业互联网工厂内网络体系结构、边缘计算模型、边缘计算节点等技术做进一步研究。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco global cloud index: forecast and methodology, 2016–2021[R]. 2016.
- [2] OKAY F Y, OZDEMIR S. Routing in fog-enabled IoT platforms: a survey and an SDN-based solution[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 4871-4889.
- [3] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
SHI W S, SUN H, CAO J, et al. Edge computing—an emerging computing model for the Internet of everything era[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [4] 周悦, 张迪. 近端云计算: 后云计算时代的机遇与挑战[J]. 计算机学报, 2019, 42(4): 677-700.
- ZHOU Y, ZHANG D. Near-end cloud computing: opportunities and challenges in the post-cloud computing era[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4): 677-700.
- [5] SAMANTA M M. Industry X.0-digital disruption and smart manufacturing IT &OT transformation journey[C]//2018 IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), May 17-19, 2018, Timisoara, Piscataway: IEEE Press, 2018: 105-106.
- [6] 柳林, 周建涛. 软件定义网络控制平面的研究综述[J]. 计算机科学, 2017, 44(2): 75-81.
LIU L, ZHOU J T. Review for research of control plane in software-defined network[J]. Computer Science, 2017, 44(2): 75-81.
- [7] NAYAK N G, DURR F, ROTHERMEL K. Incremental flow scheduling and routing in time-sensitive software-defined networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(5): 2066-2075.
- [8] CHEN B T, WAN J F, CELESTI A, et al. Edge computing in IoT-based manufacturing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 103-109.
- [9] UGWUANYI E E, GHOSH S, IQPAL M, et al. Reliable resource provisioning using bankers deadlock avoidance algorithm in MEC for industrialist[J]. IEEE Access, 2018(6): 43327-43335.
- [10] MISHRA S K, PUTHAL D, RODRIGUES J J P C, et al. Sustainable service allocation using metaheuristic technique in fog server for industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4497-4506.
- [11] MUBEEN S, NIKOLAIDIS P, DIDIC A, et al. Delay mitigation in offloaded cloud Controllers in industrial IoT[J]. IEEE Access, 2017(5): 4418-4430.
- [12] LIN B, ZHU F, ZHANG J, et al. A time-driven data placement strategy for a scientific workflow combining edge computing and cloud computing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019.
- [13] LI X M, WAN J F. Proactive caching for edge computing-enabled industrial mobile wireless networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2018(89): 89-97.
- [14] 徐骁麟. 时间敏感网络技术及其在工业互联网中的应用[J]. 电信网技术, 2018, 287(5): 8-12.
XU X L. Time-sensitive network technology and its application in industrial Internet[J]. Telecommunication Network Technology, 2018, 287(5): 8-12.
- [15] LI X, LI D, WAN J, et al. Adaptive transmission optimization in SDN-based industrial Internet of things with edge computing[J].



IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1351-1360.

[作者简介]

李庆（1992-），女，中国科学院大学硕士生，主要研究方向为工业网络相关技术。

刘金娣（1988-），女，中科院沈阳自动化研究所助理研究员，主要研究方向为工业网络相关技术。

李栋（1986-），男，博士，中科院沈阳自动化研究所副研究员，主要从事工业网络相关技术研究及工业网络标准制定方面的工作。