

云网边端协同云控制研究进展及挑战

夏元清^{1,2}, 王 晔¹, 高润泽¹, 詹玉峰¹, 孙中奇¹, 戴 荔¹, 翟弟华¹

1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081;

2. 中原工学院, 河南 郑州 450007

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61836001); 国家自然科学基金面上项目(62173035)

通信作者: 夏元清, xia_yuanqing@bit.edu.cn 收稿/录用/修回: 2024-01-09/2024-04-03/2024-04-20

摘要

针对网络化控制系统通信与计算资源不足、云控制系统难以完全保证复杂任务实时控制的问题, 在云控制系统研究基础上, 云网边端协同云控制利用云控制平台层、网络传输层、边缘控制层、终端设备层各自优势, 实现互联互通、相互协作、优化运行, 是复杂智能系统控制问题的理想解决方案。鉴于此, 本文详细阐述了云网边端协同云控制的研究进展。首先, 简要介绍了云网边端协同云控制的构成要素; 其次, 整理了云控制系统各方面的研究成果; 最后, 详细介绍云网边端协同云控制及其应用研究, 并对未来的研究方向进行展望与讨论。

关键词

云网边端协同云控制

云控制系统

云计算

动态云控制系统

中图法分类号: TP273

文献标志码: A

Progress and Challenges of Cloud-network-edge-end Collaborative Cloud Control

XIA Yuanqing^{1,2}, WANG Chao¹, GAO Runze¹, ZHAN Yufeng¹, SUN Zhongqi¹, DAI Li¹, ZHAI Dihua¹

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China

Abstract

To address the limitations of communication and computing resources in networked control systems and the challenge of ensuring real-time control of complex tasks through cloud control systems, the cloud-network-edge-end collaborative cloud control utilizes the capabilities of the cloud control layer, edge control layer, network layer, and device layer. This methodology enables interconnection, collaboration, and optimization, making it an ideal solution for controlling complex intelligent systems. In this regard, we provide comprehensive research on the cloud-network-edge-end collaborative cloud control architecture. First, we provide a brief introduction to the architecture components, followed by a summary of research on the cloud control system. Lastly, we introduce the cloud-network-edge-end collaborative cloud control architecture and its application, along with a discussion and prospect for future research.

Keywords

cloud-network-edge-end col-

laborative cloud control;

cloud control system;

cloud computing;

dynamic cloud control system

0 引言

过去 20 年, 网络技术快速发展, 越来越多的网

络技术被应用到控制系统中。通过网络通信形成闭环的控制系统称为网络化控制系统(networked control system, NCS), 在实践中的广泛应用产生了大

量的设计研究与系统性能分析案例^[1-8]。控制任务日益复杂,采集和存储的数据增多,控制系统的通信与计算负担增加,网络化控制系统在面对上述变化时,难以满足高品质与实时控制的需求。为了解决这些问题,云控制系统(cloud control system, CCS)被提出^[9-10]。云控制系统引入了云计算、大数据处理技术以及深度学习等智能算法,将各种传感器感知汇聚的大数据存储在云端;在云端利用先进算法实现系统的在线辨识与建模,应用任务的计划、规划、调度、预测、优化、决策和控制,结合模型预测控制、数据驱动预测控制等方法,实现系统的自主智能控制,即云控制^[11]。

在云控制系统中,传感器、执行器与控制器之间通过网络连接,通信本身存在时延、丢包等问题,传感器原始数据全部上传至云将产生较大的通信开销,难以完全保证复杂任务实时控制。同时,5G时代云端算力下沉,边缘计算在各个领域内都

逐步发展起来^[12-13],其拥有基本的数据分析处理能力,有部署灵活、计算实时等特点。在云控制系统中引入边缘计算,借助网络交互信息,可以形成云网边端协同云控制,这为规模庞大、种类复杂、对控制品质需求很高的复杂智能系统提供了可行的解决方案。云网边端协同云控制在智能电网、智能交通、工业智能制造以及天空地多运动体系统等复杂系统中开展了应用与分析工作^[14-17]。

本文旨在综述了云网边端协同云控制的基本组成,云控制系统及云网边端协同云控制的研究进展及挑战。

1 云网边端协同云控制架构简介

云网边端协同云控制共有4层组成,如图1所示,分别为:云控制平台层、网络传输层、边缘控制层及终端设备层。下面分别对协同控制的4个层级进行简要介绍。

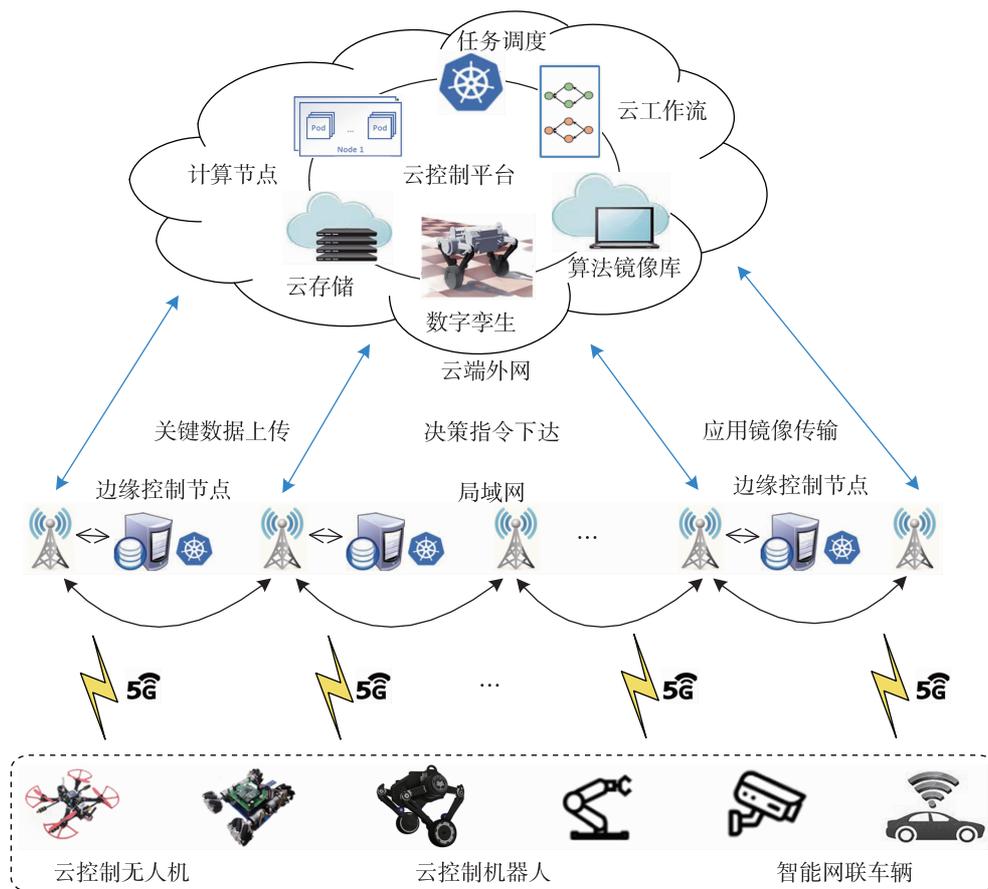


图1 云网边端协同云控制架构

Fig.1 Cloud-network-edge-end collaborative cloud control architecture

1.1 云控制平台层

云控制平台层结合了云计算和控制,具有丰富

的计算资源,将多种控制算法与云端分布式架构紧密融合,实现自主智能规划控制等功能^[12, 17]。云

控制平台层可细分为核心层与应用层。在云端核心层中, 云控制系统利用虚拟化技术形成可动态配置的资源池, 包含计算、控制、存储等服务, 可快速实例化执行^[18-20]。云端应用层包含通信、数据预处理与数字孪生等应用模块^[21-22], 实现与受控对象交互。

1.2 网络传输层

网络传输层是层与层之间的重要链路, 其由局域网、云端外网和多种通信协议组成, 向下连接被控对象和终端设备, 支撑设备传感数据上云, 向上连接云端应用层, 实时传输控制信号至被控平台。

1.3 边缘控制层

边缘控制层利用边缘节点集群进行计算, 降低云端的计算和通信负担, 在本地对终端设备进行监视、管控, 既可实现数据在向上传输前的预处理, 也可实现被控平台在独立条件下稳定运行, 保证控制的可用性、实时性、经济性。

1.4 终端设备层

终端设备层主要包括基础控制器、多类型传感器及执行器, 保证终端基础功能, 也可发送、接收信息, 接受上层控制指令。云网边端协同云控制架构中各层协作互补, 是复杂智能系统的控制问题较为理想的解决方案。

2 云控制系统

云控制系统是云网边端协同云控制中的基础与重要组成部分, 本节从云控制系统出发, 针对云控制系统理论方法、结构、隐私与安全问题, 分别综述了云控制算法、云 workflow、隐私保护与安全防护等方面的研究进展。

2.1 云控制系统概念

在云控制系统提出之前, 一些工作尝试将云计算与控制系统进行结合: 卡耐基·梅隆大学机器人研究所 KUFFNER 教授提出了“云机器人”的概念^[23], 让机器人具备访问云端信息资料的能力, 并成功应用于 RoboEarth、RoboBrain 等移动、医疗、服务机器人领域^[24]。美国国家航空航天局与无人机系统应用开发企业 Airware 建立合作, 将无人机空中交通管制系统部署在云端, 从而拥有实时通信、导航和监控能力, 并协同规划航线, 在飞行中躲避障碍。2012 年, 夏元清教授提出了“云控制系统”概念^[9], 并逐渐深入研究, 建立了云控制系统的初步结构和算法, 总结面临的挑战^[10, 16, 25]。云控制系统的经典结构如图 2 所示, 被控平台、执行

器、传感器部署在本地局域网中, 控制器部署在云端, 处在公网环境下, 控制器与执行器、被控平台、传感器通过网络连接。在云端利用先进算法, 实现系统自主智能控制。

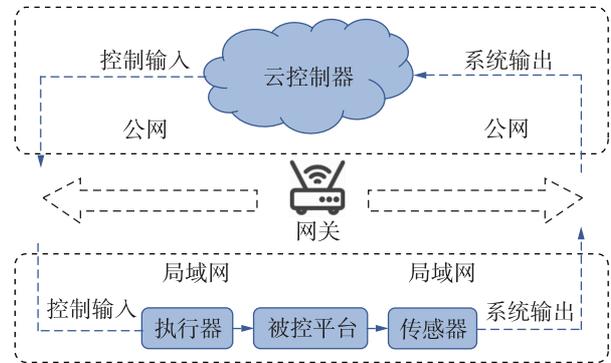


图2 云控制系统经典结构

Fig.2 The classic structure of cloud control system

2.2 云控制算法

2.2.1 数据驱动云控制

在一般的控制方法中, 被控对象的数学模型是控制的前提, 但对于复杂系统往往无法建立精确的数学模型, 可以利用的是通过传感技术得到的系统输出, 这些数据往往包含有用的信息。研究人员为此提出了数据驱动控制方法, 并进一步提出了数据驱动云控制, 即由云服务器直接根据输入输出数据对系统进行控制。GAO 等^[26-27]设计了一种数据驱动云控制系统, 基于真实球杆系统进行云控制实验, 验证了所提系统的有效性。TAN 等^[28]补偿网络延迟, 研究多智能体系统稳定性和输出一致性问题, 推导稳定性和输出一致性条件^[29], 在此基础上研究了低能耗多智能体的协调控制问题^[30]。在应用方面, XU 等^[31]针对自然灾害情况下救援车队供给与需求问题, 设计了一种数据驱动云控制算法, 可以根据救援需求动态地分配不同类型的车辆; WANG 等^[32-35]利用数据驱动控制器, 实现了车联网和非车联网的协同控制, 并在实验平台上进行了验证。

2.2.2 模型预测云控制

模型预测控制是最为广泛使用的控制范式之一, 是一种基于模型的开环最优控制策略, 通过优化某一涉及到系统未来行为的性能指标、满足约束, 从而确定控制策略。在模型预测控制与云控制结合方面, JIANG 等^[36]基于经典云控制结构, 针对时延和丢包工况, 提出一种切换网络预测控制方法; SKARIN 等^[37]解决多个模型预测控制并行处理

问题,实现可变时域模型预测控制,并提出支持速率切换的模型预测云控制^[38],其由云中的高速率控制器和本地设备上的低速率控制器组成,提高了控制性能。刘国平教授^[20, 39-40]提出多智能体系统的模型预测云控制方案,利用网络化预测控制策略主动补偿云边通信时延,实现控制系统的一致性和稳定性;在此基础上,文^[39]提出一种新型多步状态预测器和控制协调优化的机制,协调优化不同智能体之间的成本函数;进一步,文^[40]将“云、雾”协同控制引入多智能体系统控制当中,进一步降低了各节点之间的通信时延。

一些模型预测云控制的工作针对特定应用进行研究。ESEN 等^[41]设计了基于云的软件架构的车辆控制。VICK 等^[42]针对云机器人控制问题,建立了一个模型预测反馈控制系统的体系结构,实验中表明了模型预测控制作为服务的可能性。BIYIK 等^[43]利用模型预测云控制解决商业建筑恒温器控制问题。交通系统中,HEILIG 等^[44]针对利用模型预测云控制为智能交通提供了新颖的计算和控制架构,ZHANG 等^[45]提出了一种基于模型预测控制的交通流量控制并行计算方案。智能电网领域,为充分消纳风能和太阳能进行发电,文^[14]提出经济模型预测云控制算法,提供电源水轮机预测调度策略^[14]。

2.3 基于工作流的云控制系统研究

云控制系统结合云计算和控制,从云计算的角度分析,云计算利用虚拟化技术,具有天然的分布式结构,可在虚拟资源池中按需启动并行的容器或虚拟机。云计算任务可建模为分布式云工作流形式,如图 3 所示,有向无环图(directed acyclic graph, DAG)是云工作流最常见的表示方式,其节点表示计算任务,有向边表示任务之间的依赖关系。将分布式云工作流任务部署至并行云计算处理环境可有效提高科学任务处理效率,例如深度学习^[46]、基因计算^[47]、电子商务^[48]、地震波分析^[49]等。上述研究为云计算领域的研究要点与应用,而控制可被视作一种计算任务。由 2.2 节分析,以往的模型预测云控制与数据驱动云控制将控制器直接部署在云服务器上,没有针对云计算的并行化特点进行设计优化。而云工作流将复杂的数据密集型应用程序分解为较小的任务进而并行执行,可显著提高控制任务的处理效率。目前,基于工作流的云控制系统的研究分为两类,分别为基于工作流的数据驱动云控制和基于工作流的模型预测云控制,下面分别综述其研究进展。

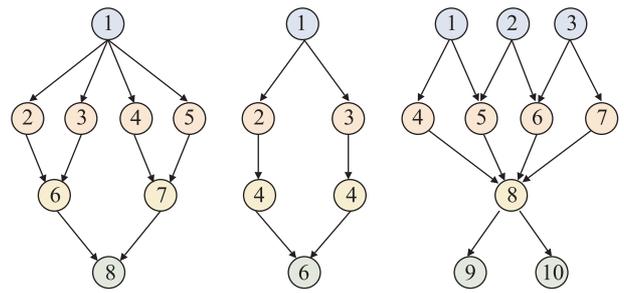


图 3 工作流示例

Fig.3 Example of the workflow

2.3.1 基于工作流的数据驱动云控制

子空间辨识(Subspace Identification, SID)是数据驱动控制方法的基础,仅依靠输入和输出数据就能估计系统模型,因此被广泛应用于系统识别和控制问题中。为了将数据驱动云控制与分布式云环境相匹配,GAO 等^[50]提出了一种基于云工作流和容器的快速子空间辨识方法,利用分布式奇异值分解算法,将子空间辨识任务构建为云工作流形式,并基于容器建立工作流处理系统,执行子空间辨识任务,降低 91.6% 云端计算时延。

基于上述工作,GAO 等^[51]进一步研究了基于工作流的数据驱动云控制方法,将具有集中计算模式的数据驱动控制方法重构为工作流形式,并基于容器、Redis 等技术,设计工作流云控制系统实验平台,基于车辆轨迹跟踪、高阶配电网模型分别进行验证,降低 74.4%、85.1% 云端计算时延;针对云工作流处理环节的内生不确定性,设计了云边协同架构下的工作流云控制方法,利用数据驱动控制中的云端中间参数,在边缘建立数据驱动扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)对内生扰动进行跟踪,生成计算代价低补偿量,补偿云端产生的不确定性,实现快速精准控制。

考虑未知线性系统的数据驱动最优控制问题,DAI 等^[52]利用多块交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)设计数据驱动控制的云工作流,加速求解优化问题;设计一种在线反馈 Cloud DeePC 方法,允许实时数据更新控制器参数,提供针对时变参数的矩阵求逆算法,进一步提高求解效率,并在云平台上仿真验证了算法性能。

2.3.2 基于工作流的模型预测云控制

除数据驱动云控制外,某些被控系统可获得较为准确的数学模型,可采用模型预测云控制算法,进一步工作采用工作流对模型预测云控制的计算进

可靠性约束的分解策略,降低执行能耗;进一步提出 workflow 成本感知调度,考虑 workflow 到达时间和执行时间的不确定性,将调度问题建模为调度成本的优化问题,设计截止时间约束的分解策略,保证多 workflow 执行成功率,降低 workflow 执行花费^[58]。

在云 workflow 任务分配给处理节点后,各处理节点可对计算资源进行动态调整,即垂向伸缩(vertical scaling)。针对动态云 workflow 负载,YU 等^[59]提出 Microscaler 系统,用于识别需要扩展的服务,可实现满足质量要求的最佳服务规模。QIU 等^[60]研究跨微服务的计算资源共享,提出一种细粒度资源管理框架,降低 Web 服务响应时延。MA 等^[61]设计了一个名为 Sonnet 的端到端在线资源分配系统,使用无模型自适应控制构建延迟服务水平目标与资源间的动态映射模型,优化资源成本,并在 Docker Swarm 上实现。

2.5 隐私保护与安全防护

云控制系统将私有数据的计算外包给第三方云平台,引入了云计算的隐私和安全性问题。

2.5.1 隐私保护策略

控制系统隐私保护方法可分为差分隐私^[62-63]和加密控制^[64]。差分隐私在控制输入数据中引入随机扰动,使得云平台无法获得被控对象的准确信息,但隐私保护和控制性能之间存在天然的权衡关系,即为保护数据隐私,需引入额外的随机扰动,影响控制性能^[65]。基于云的控制工作大都依赖加密技术解决隐私保护问题^[64, 66-68]。加密技术已被用于网络化控制系统的隐私保护^[69],传感器向控制器发送加密数据,控制器使用私钥对数据进行解密,计算得到控制信号后再次加密、传输,并在执行器处解密。上述方案可以防止数据传输过程中的窃听,但云服务商有能力获取云控制器中的用户数据,存在信息泄露隐患,无法保证数据在平台中的隐私安全。

将云服务商考虑为半诚实(semi-honest)的实体,即云服务商恪守保护用户隐私的规定,但仍有兴趣且有获取有价值的用户数据。对不安全的云控制器,加密云控制保护隐私的关键是令云控制器能够根据加密数据进行计算而无法访问真实完整的系统参数和数据^[70-71],实现云平台中的密态计算。在此结构基础上,一些工作进一步研究加密云控制,DARU 和 JAGER^[71]使用两个非协作的云平台,提出一种加密云控制方案,云平台之间不存在数据交换,均无真实、完整的系统状态信息。同态

加密(homomorphic encryption, HE)是一种特殊的加密方式,对加密数据进行计算处理得到密文计算结果再解密,等同于对原始数据直接进行相同的计算操作,此种特性允许控制器直接在加密数据上执行数学计算^[72-73],可通过这种加密形式将数据外包给云进行计算和处理^[70, 74]。在终端设备获取到传感器数据后,进行同态加密处理,将加密数据上传至云进行计算,得到密文计算结果发送至终端设备,在终端设备进行解密得到真实控制信号,保证数据在传输过程与云平台中的隐私安全。与文[71]方案不同,ALEXANDRU 等^[75]使用两个可进行数据交换的云平台,设计同态加密模型预测云控制隐私保护方案,证明隐私保护的安全性,并分析得出加密引入的误差上界;其另一项工作^[76]提出同态加密设计数据驱动控制的隐私保护方案,并进一步改进数据驱动线性二次调节(linear quadratic regulator, LQR)算法,提高效率和精度^[77];进一步将 LQR 算法重新表述为拉索问题,用 \mathcal{L}_1 正则化限制行为复杂性,使用 ADMM 提出更高效的加密解决方案^[78]。基于多方同态加密的数据驱动云控制,LI 等^[79]使用分布式同态加密方案,利用参数服务器架构实现多方安全性并加速密文控制策略求解;可信边缘端基于云端计算结果进行控制输入生成,并应用 DOB 对同态加密方案和系统噪声引起的不确定性进行估计和补偿,实现云边协同下的同态加密隐私保护控制方案。

2.5.2 安全防护

除隐私保护外,另一类问题是安全防护,常见的安全威胁包括拒绝服务(Denial of Service, DoS)攻击与高级持续性攻击(advanced persistent threat, APT),可能造成传输信息丢失,降低系统性能,导致系统不稳定。

针对网络化控制系统,YUAN 等^[80]采用分层建模方法,将网络层和物理层建模为零和博弈,在动态网络环境下设计能量传输策略,采用值迭代和 Q-learning 方法求解并进行比较,并进一步构建传感器多通道传输下系统模型,降低系统信号被攻击的概率^[81]。从网络化控制发展到云控制,DoS 攻击的危害并未减弱,在云控制系统通信遭受 DoS 攻击的情况下,ALI 等^[67]为保证系统在遭受攻击时的安全性,设计一种切换控制的机制,当检测到攻击对系统稳定性影响超过设定阈值时,切换至本地控制模式以保证安全;考虑 DoS 攻击对通信时延的影响,YUAN 等^[82]将传输者与攻击者建模为 Stackelberg

博弈, 设计一种评估系统性能的价格调整机制, 在信息约束和时变网络情况下, 传输者可以调整价格策略, 使系统满足期望性能; 考虑云控制系统中的防御资源分配问题, 其另一项工作^[83]提出防御者安全资源分配模型, 采用混合整数规划求解不同预算约束下的最优解; YANG 等^[84]针对云控制系统中具有量化信号的网络多代理系统, 研究抗 DoS 攻击的控制问题。CHEN 等^[85]从系统机制方面研究, 针对无人机的容器控制器的 DoS 攻击, 通过切换安全控制器以减轻攻击。

3 云网边端协同云控制

云控制系统提供了强大的计算能力, 可以按需提供计算资源和存储资源, 但将海量终端数据都传输至云将造成网络拥塞、传输时间长, 也涉及数据的安全问题, 所以在云控制系统中引入边缘控制等, 进一步发展形成了云网边端协同云控制架构, 提高复杂智能系统的实时性和可用性。下面对云网边端协同云控制技术要点与研究进展进行整理。

云控制平台包括数据交互、云存储、容器化云控制平台、算法库以及数字孪生等模块。数据交互模块与边缘、终端建立连接, 将终端、边缘的数据存储在云端形成云存储, 云存储通过网络集合各种不同类型的存储设备, 通过存储虚拟化、Ceph、Kafka、HBase、Redis 等分布式数据存储系统及其他技术, 将物理存储资源整合形成统一的云存储资源池, 提供数据存储与访问服务; 容器化云控制平台负责创建控制任务云工作流容器, 其中涉及的优化、管理、调度和控制等算法被集成为算法库; 数字孪生模块可拉取传感器数据并进行滤波与数据融合处理, 产生被控对象的数字孪生模型, 对模型和数据进行更新, 调取算法镜像, 驱动数字孪生模型在容器中模拟运行、演判态势, 得到优化管控方案, 再将控制调度指令、数据、模型下发至边缘控制系统及终端设备。

网络传输层是整体架构的重要组成部分, 云端与边缘、边缘与终端设备通过 WiFi、5G、缆线等多种灵活的方式连接, 与 TCP、UDP 等协议共同组成网络互连、数据互通体系, 作为云控制系统各层深度互联的基础。在网络传输层, 一些工作针对不同场景的通信问题进行研究。REIHER 等^[86]针对自动驾驶车辆与外部服务器、智能基础设施及其他车辆间的通信问题, 提出了一种通信接口, 通过消息队列遥测传输 (message queuing telemetry transport,

MQTT) 协议来连接多个机器人操作系统 (robot operating system, ROS) 代理。HE 等^[87]针对路测设备与车辆协同感知的通信问题, 提出了一个支持蜂窝车联网 (cellular-vehicle to everything, C-V2X) 的协同自动驾驶框架并搭建平台进行验证。GU 等^[88]针对云机器人场景, 利用 5G 通信技术, 将机器人的导航模块卸载到移动边缘服务器, 并通过实验验证机器人避障性能。在云控制机器人平台实现方面, WANG 等^[89]基于云控制架构, 设计了一套水面机器人编队的远程监控与控制系统, 利用 ROS 系统开发了一系列软件接口, 实现云端与机器人编队通信, 完成任务规划与控制、状态监控、数据采集与可视化等功能。

边缘控制层主要利用边缘计算资源, 边缘计算主要应用于实时数据分析, 支持低时延、位置感知、高移动性的应用服务, 但边缘计算单元可能没有充足的计算资源和存储资源来满足海量数据的计算和存储, 服务的质量与可靠性会受到影响。所以边缘与云控制相互协同, 可有效地提高系统性能^[90-92]。那么云边资源的管理成为问题, 在云上利用 Docker 和 Kubernetes 进行管理是现在较为主流的管理方式^[93], 在边缘的管理上, 由华为云开源的 KubeEdge 是将 Kubernetes 应用至边缘的解决方案之一^[91]。KubeEdge 对 Kubernetes 模块化精简解耦, 降低最低运行内存, 将容器化应用编排和管理功能扩展到边缘端设备。云边协同方式主要分为两种情况:

- 1) 当终端设备产生数据或任务请求后, 将数据上传至边缘控制系统, 计算量较大、复杂度较高的计算任务将由边缘控制系统迁移至云控制平台。云控制平台采用控制即服务 (control as a service, CaaS) 的服务化软件架构, 利用容器技术形成一个可动态配置、获取计算资源与数据的镜像池, 只需拉取镜像便可实例化执行云工作流控制任务; 由边缘控制系统向下将计算结果传输至终端设备。

- 2) 若由云端下发命令, 边缘控制系统在边缘服务器中申请资源执行边缘计算任务, 终端设备保持自稳运转, 接收到上层指令后执行动作完成边缘控制, 提高被控系统整体管控的实时性和可用性。云端任务与资源匹配技术与边缘控制技术配合, 通过合理分工, 信息、控制指令和应用镜像的传输, 共同协作, 优化系统整体运行。

基于云边协同架构, SASAKI 等^[94]针对网络延迟问题, 提出了基于基础设施的车辆控制系统, 实

现车辆控制器在云、边服务器之间的自动切换,平衡计算负载,减少延迟对行驶稳定性的影响。KANEKO 等^[95]提出了一种多接入边缘计算与 5G 网络集成的云边计算机制,降低网络延迟对工业控制系统稳定性的影响。SCHAFHALTER 等^[96]设计了一种综合利用云计算与车载算力的协同系统,用于提高自动驾驶决策的准确性和可靠性。基于云边计算资源不同进行任务分工,ZHANG 等^[97]提出了一种云边协同的配电网调节与运行控制架构,云端建立多目标优化模型,并给出最优解决方案,边缘通过模型预测控制调节发电与存储功率,提高经济性;HE 等^[98]设计了一种云边协同故障诊断方案,在云中利用深度学习将两个网络相互训练,“大网络”用于提升“小网络”的诊断准确性与泛化能力,将“小网络”迁移至边缘,提高诊断鲁棒性和准确性;LI 等^[99]设计了一种云边协同模型预测控制方法,云端部署非线性控制器,边缘部署简化的线性控制器,并且设计一种基于切换的融合策略,有效提高控制性能。

终端设备具有基础控制器,保证在离线状况下基础功能的安全稳定运行,一般具备多传感器,能够利用多传感数据融合形成一定的感知能力,并利用网络将原始或预处理后的数据上传至边缘控制系统,同时接受上层的控制指令。终端设备层对于控制系统架构的演变需求可从两个方面考虑:从传感器获取数据的角度分析,终端设备的功能更加丰富,出现了智能制造工厂、车路云协同智能交通系统、天空地多运动体系统等,这些系统都具有规模庞大、采集数据量大的特点,对信息传输的需求更高,更难保证实时控制^[12, 14-15, 17]。另一方面,从执行器的角度分析,执行机构的效率提升成为趋势,例如:在车辆领域,线控技术让控制信号可通过电路传输至末端执行机构,提升了执行器的响应速率及动态执行效率^[100]。

云网边端协同云控制架构在多个领域有着广泛的应用,例如车辆交通、智能制造和工业生产等。在车辆交通行业,李克强院士团队^[101-103]总结了智能网联汽车架构,将“车、路、云、网、图”融为一体,划分中心云、区域云、边缘云三层云控制平台,将部分感知、计算功能由车辆本地迁移至路侧设施与云端,开发了基于边缘云的融合感知与协同决策控制等技术,提升道路交通系统的效率与安全,并在此基础上开展进一步研究^[104-105]。2024 年 1 月,工业和信息化部等共五部委联合开展智能网联汽车

“车路云一体化”应用试点工作,推动智能化路侧基础设施和云控基础平台建设,开展智能网联汽车系统架构设计和多种场景应用^[106]。结合上述研究与云网边端协同云控制架构,总结车路云网融合系统如图 5 所示,其由智能网联汽车、路侧基础设施、云控制平台、通信网络与地图、交管等资源组成。车、路、云之间由蜂窝车联网(C-V2X)等通信技术形成互联,部分感知、计算功能部署于边缘路侧设备,形成融合感知,并规划行驶轨迹,云控制平台进行高效计算调度,实现全局性能优化。此架构可有效解决道路交通运行环境中存在的常见问题,也是推动智能网联汽车产业化应用的关键。在智能制造方向,王耀南院士团队^[107]提出将机器人感知控制技术应用于智能制造,设计“云-边-端”架构的机器人制造系统,以实现网络化、智能化、柔性化生产。在工业生产领域,柴天佑院士团队针对氧化铝生产^[108]、电熔镁铝^[109]、选矿^[110]等问题,提出了端边云协同控制架构,基于物理实体与数字孪生模型的相互映射,实现过程控制系统的安全、可靠运行。KANEKO^[111]设计了一个工业容错云控制系统,用于应对网络故障和控制器故障风险。

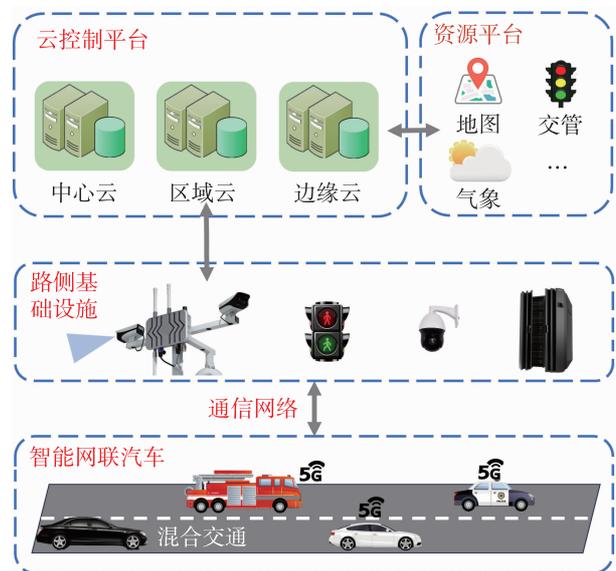


图 5 车路云网融合系统

Fig.5 The coordinated system of vehicle-road-cloud-network integration

4 未来展望

云控制系统的发展研究逐渐深入,云网边端协同云控制架构的研究尚处于起步阶段,需要更多的研究保证性能、安全等指标。这里,将已展开思考

的问题归纳整理, 讨论未来可能的发展方向:

1) 云控制系统结合控制、计算、通信的联合建模与研究

控制系统设计的首要问题是建立合理的模型, 云控制系统结合先进控制算法、云计算与网络通信, 各部分相互协同形成控制闭环, 但难以对通信时延等不确定因素进行建模, 未来可构建控制、云计算、通信与物理对象的综合模型, 分析时延、丢包、舍入误差、系统中各模块频率不一致等引起的不确定性, 并结合控制系统理论与方法, 确保云控制系统稳定性及满足其他多种性能指标。

2) 动态云控制系统的设计与实现

基于单个或多个固定计算集群, 可构成算力资源充足的静态云(static cloud), 如数据中心和智算中心等, 其具备数据和计算密集型复杂任务高效处理能力。然而, 在航天航空、远洋渔业、环境能源等民用领域, 以及战场侦查、远程打击、通信中继等军事应用, 传统静态云难以满足多维度、全要素、跨域协同任务复杂需求。鉴此, 基于动态的计算、存储、网络等资源的运动计算节点集群, 通过动态资源虚拟化, 实现态势感知、决策、优化调度、信息共享、交互协作, 形成拓扑结构变化的动态云(dynamic cloud)及其云控制系统, 成为关键技术体系及重要解决方案。在天空地海一体化跨域协同系统中, 以动态云及其云控制系统为核心, 通过信息共享与融合、行为交互与协调、任务协同与合作实现功能互补、能效倍增, 提升面对复杂任务和使命的应对能力。动态云集群管理方面, 出现了资源弹性管理、服务请求的自适应调配、多维异构的网络接入问题; 感知方面, 如何通过信息融合获得更广的探测范围、更高的探测精度, 形成动态环境下的协同感知问题; 控制方面, 结合云网边端协同云控制架构, 如何利用分布式控制算法实现协同控制, 这些都是困难且重要的研究方向。

3) 基于工作流的云控制系统研究

与仅使用单计算节点来解决云服务器上的计算任务不同, 基于云的控制方案需要根据云边计算模式和云的多计算节点特性进行定制, 目前缺乏更多控制方法的云控制器设计工作。未来, 可针对更多控制领域先进算法, 将集中式的控制算法分解为工作流, 并提出相应的并行分布式计算方案, 以充分利用云计算的潜力; 将控制算法引入云工作流后存在新的不确定性, 如容器节点偶发崩溃、云工作流执行结果误差等, 如何估计这些不确定性的大小, 设计合适的云网边端协同机制进行精准安全的控制, 并在理论上保证收敛性与稳定性, 这些是潜在的研究方向。

4) 云控制系统与资源调度的联合设计

在云网边端协同云控制架构中, 云平台、边缘设备、终端设备在系统中形成闭环, 云工作流提升了云控制系统计算效率, 如何精细化调度云资源、云工作流, 实现云控制与云工作流调度的联合设计, 根据控制需求设定云工作流截止时间约束, 同时为控制算法设置约束条件与参数, 进一步提升资源利用效率, 是一类很有实际意义和价值的研究课题。

5) 云控制系统隐私保护与安全防护

云控制系统将控制器迁移至云, 现有的隐私保护与安全防护策略还存在不足: 加密对系统性能的影响缺乏系统分析; 加密、解密过程需要较大的计算工作量和通信开销, 不适合实时控制; 除针对网络的 DoS 攻击外, 缺乏对控制信号、传感信号攻击的相关研究。因此, 需要更多综合控制、通信和云计算的研究, 从理论与实验研究加密对具体控制对象的性能影响, 利用工作流或其他有效方法提高加密解密效率, 针对具体的感知、通信信号及云边计算平台展开攻防对抗研究, 开发更高效、更实时的隐私保护与安全防护方案。

参考文献

- [1] PARK H S, KIM Y H, KIM D S, et al. A scheduling method for network-based control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 318-330.
- [2] GAO H, CHEN T. Network-based output tracking control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53: 655-667.
- [3] ZHIVOGLYADOV P V, MIDDLETON R H. Networked control design for linear systems[J]. Automatica, 2003, 39(4): 743-750.
- [4] LIU K E, FRIDMAN K, JOHANSSON H. Networked control with stochastic scheduling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(11): 3071-3076.
- [5] LIU K, FRIDMAN E. Networked-based stabilization via discontinuous Lyapunov functionals[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(4): 420-436.
- [6] YUE D, HAN Q L, PENG C. State feedback controller design of networked control systems[J]. IEEE Transactions on Circuits

- and Systems II: Express Briefs, 2004, 51(11): 640 – 644.
- [7] LIU K, FRIDMAN E. Wirtinger's inequality and Lyapunov-based sampled-data stabilization[J]. Automatica, 2012, 48: 102 – 108.
- [8] GAO H, CHEN T. A new approach to quantized feedback control systems[J]. Automatica, 2008, 44(2): 534 – 542.
- [9] XIA Y Q. From networked control systems to cloud control systems[C]//31st Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 5878 – 5883.
- [10] XIA Y Q. Cloud control systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(2): 134 – 142.
- [11] MAHMOUD M S, XIA Y Q. Networked control systems: Cloud control and secure control[M]. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [12] HU L, MIAO Y, WU G, et al. iRobot-factory: An intelligent robot factory based on cognitive manufacturing and edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 90: 569 – 577.
- [13] QIN Q, POULARAKIS K, IOSIFIDIS G, et al. SDN controller placement at the edge: Optimizing delay and overheads[C]//IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 684 – 692.
- [14] 夏元清, 高润泽, 林敏, 等. 绿色能源互补智能电厂云控制系统研究[J]. 自动化学报, 2020, 46(9): 1844 – 1868.
XIA Y Q, GAO R Z, LIN M, et al. Green energy complementary based on intelligent power plant cloud control system[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(9): 1844 – 1868.
- [15] 夏元清, 谢超, 高寒, 等. 天空地一体化网络环境下多运动体系统跨域协同控制与智能决策[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1176 – 1199.
XIA Y Q, XIE C, GAO H, et al. Cross-domain cooperative control and intelligent decision-making of multi-dynamic agents in space-air-ground integrated network environment: A review[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1176 – 1199.
- [16] 夏元清. 云控制系统及其面临的挑战[J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 1 – 12.
XIA Y Q. Cloud control systems and their challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(1): 1 – 12.
- [17] 夏元清, 闫策, 王笑京, 等. 智能交通信息物理融合云控制系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 132 – 142.
XIA Y Q, YAN C, WANG X J, et al. Intelligent transportation cyber-physical cloud control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 132 – 142.
- [18] ALEB T, SAMDANIS K, MADA B E, et al. On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge architecture & orchestration[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1657 – 1681.
- [19] XAVIER M, NEVES M, ROSSI F, et al. Performance evaluation of container-based virtualization for high performance computing environments[C]//21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 233 – 240.
- [20] LIU G P. Predictive control of networked multiagent systems via cloud computing[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8): 1852 – 1859.
- [21] LI L, WANG X, XIA Y, et al. Predictive cloud control for multiagent systems with stochastic event-triggered schedule[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 70 – 79.
- [22] PEINL R, HOLZSCHUHER F, PFITZER F. Docker cluster management for the cloud-survey results and own solution[J]. Journal of Grid Computing, 2016, 14(2): 265 – 282.
- [23] KUFFNER J. Cloud-enabled robots[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2010.
- [24] KEHOE B, PATIL S, ABBEEL P, et al. A survey of research on cloud robotics and automation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2): 398 – 409.
- [25] XIA Y Q, QIN Y, ZHAI D H, et al. Further results on cloud control systems[J/OL]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2016[2023-10-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&filename=JFXG201607019>. DOI: 10.1007/s11432-016-5586-9.
- [26] GAO R Z, XIA Y Q, MA L. A new approach of cloud control systems: CCSs based on data-driven predictive control[C]//2017 Chinese Automation Congress. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 3419 – 3422.
- [27] GAO R, XIA Y, DAI L, et al. Design and implementation of data-driven predictive cloud control system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(6): 1258 – 1268.
- [28] TAN H, HUANG Z, WU M. Data-based predictive control for networked non-linear multi-agent systems consensus tracking via cloud computing[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(5): 683 – 692.
- [29] TAN H, MIAO Z, WANG Y, et al. Data-driven distributed coordinated control for cloud-based model-free multiagent systems with communication constraints[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(9): 3187 – 3198.

- [30] TAN H, WANG Y, ZHONG H, et al. Coordination of low-power nonlinear multi-agent systems using cloud computing and a data-driven hybrid predictive control method[J/OL]. *Control Engineering Practice*, 2021[2023-10-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5524228&tag=1>. DOI: 10.1016/j.conengprac.2020.104722.
- [31] XU G Y, WANG J W, HUANG G Q, et al. Data-driven resilient fleet management for cloud asset-enabled urban flood control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(6): 1-12.
- [32] WANG J, ZHENG Y, XU Q, et al. Data-driven predictive control for connected and autonomous vehicles in mixed traffic[C]//2022 American Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 4739-4745.
- [33] WANG J, ZHENG Y, LI K, et al. Deep-LCC: Data-enabled predictive leading cruise control in mixed traffic flow[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 31(6): 2760-2776.
- [34] WANG J, ZHENG Y, DONG J, et al. Implementation and experimental validation of data-driven predictive control for dissipating stop-and-go waves in mixed traffic[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 11(3): 4570-4585.
- [35] WANG J, LIAN Y, JIANG Y, et al. Distributed data-driven predictive control for cooperatively smoothing mixed traffic flow[J/OL]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023[2023-10-15]. <http://www.globalauthorid.com/WebPortal/ArticleView?wd=2CEA46907F0A57C3780023B5C6B68388F43D5DA8351302A3>. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104274.
- [36] JIANG T, ZHANG Y, PARK J H, et al. Finite-time boundedness of networked control systems via hybrid predictive control based on cloud storage method[J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 1092-1108.
- [37] SKARIN P, EKER J, ÁRZÉN K E. Cloud-based model predictive control with variable horizon[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2020, 53(2): 6993-7000.
- [38] SKARIN P, EKER J, ÁRZÉN K E. A cloud-enabled rate-switching MPC architecture[C]//59th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 3151-3158.
- [39] LIU G P. Coordinated control of networked multiagent systems via distributed cloud computing using multistep state predictors [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(2): 810-820.
- [40] LIU G P. Coordinated control of networked nonlinear multiagent systems using variable horizon learning predictors via cloud edge computing[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2022, 9(4): 1975-1986.
- [41] ESEN H, ADACHI M, BERNARDINI D, et al. Control as a service (CaaS): Cloud-based software architecture for automotive control applications[C]//The Second International Workshop on the Swarm at the Edge of the Cloud. New York, USA: ACM, 2015: 13-18.
- [42] VICK A, GUHL J, KRÜGER J. Model predictive control as a service-Concept and architecture for use in cloud-based robot control [C]//21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 607-612.
- [43] BIYIK E, BROOKS J D, SEHGAL H, et al. Cloud-based model predictive building thermostatic controls of commercial buildings: Algorithm and implementation[C]//2015 American Control Conference. New York, USA: ACM, 2015: 1683-1688.
- [44] HEILIG L, NEGENBORN R R, VOSS S. Cloud-based intelligent transportation systems using model predictive control[C]//6th International Conference on Computational Logistics. Berlin, Germany: Springer, 2015: 464-477.
- [45] ZHANG Y, ZHOU Y, LU H, et al. Spark cloud-based parallel computing for traffic network flow predictive control using non-analytical predictive model[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 7708-7720.
- [46] CHEN J, LI K, TANG Z, et al. A parallel random forest algorithm for big data in a spark cloud computing environment[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(4): 919-933.
- [47] LIU B, MADDURI R K, SOTOMAYOR B, et al. Cloud-based bioinformatics workflow platform for large-scale next-generation sequencing analyses[J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2014, 49: 119-133.
- [48] LIU L, ZHANG M, LIN Y, et al. A survey on workflow management and scheduling in cloud computing[C]//14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 837-846.
- [49] WEIQIANG Z, HOU A, YANG R, et al. QuakeFlow: A scalable machine-learning-based earthquake monitoring workflow with cloud computing [J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 232(1): 684-693.
- [50] GAO R Z, XIA Y Q, WANG G, et al. Fast subspace identification method based on containerised cloud workflow processing system[J/OL]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023[2023-09-23]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021arXiv211214349G/abstract>. DOI: 10.1109/TASE.2023.3316287.
- [51] GAO R Z, LI Q W, DAI L, et al. Workflow-based fast data-driven predictive control with disturbance observer in cloud-edge collaborative architecture[J/OL]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023[2023-10-08]. <https://>

- ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10114624. DOI: 10.1109/TASE.2023.3270203.
- [52] DAI L, MA Y, GAO R, et al. Cloud-based computational model predictive control using a parallel multiblock ADMM approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(12): 10326 – 10343.
- [53] ZHOU T, GAO R, SUN Z, et al. Workflow-based fast model predictive cloud control method for vehicle kinematics trajectory tracking problem[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 15365 – 15374.
- [54] WANG G, ZHAN Y, XIA Y, et al. Distributed point-to-point routing method for tasks in cloud control systems[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(4): 792 – 804.
- [55] SHAN C, WANG G, XIA Y, et al. Containerized workflow builder for kubernetes[C]//*IEEE International Conference on High Performance Computing & Communications*. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 685 – 692.
- [56] YE L, XIA Y, YANG L, et al. SHWS: Stochastic hybrid workflows dynamic scheduling in cloud container services[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 2620 – 2636.
- [57] YE L, XIA Y, TAO S, et al. Reliability-aware and energy-efficient workflow scheduling in IaaS clouds[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, 20(3): 2156 – 2169.
- [58] YE L, XIA Y, YANG L, et al. Dynamic scheduling stochastic multiworkflows with deadline constraints in clouds[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, 20(4): 2594 – 2606.
- [59] YU G, CHEN P, ZHENG Z. Microscaler: Cost-effective scaling for microservice applications in the cloud with an online learning approach[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2022, 10(2): 1100 – 1116.
- [60] QIU H, BANERJEE S S, JHA S, et al. FIRM: An intelligent fine-grained resource management framework for SLO-oriented microservices[C]//*14th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. Berkeley, USA: USENIX Association, 2020: 805 – 825.
- [61] MA R, ZHAN Y, XIA Y, et al. Sonnet: A control-theoretic approach for resource allocation in cluster management[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2024, 153: 169 – 181.
- [62] MO Y, MURRAY R M. Privacy preserving average consensus[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(2): 753 – 765.
- [63] LU Y. Privacy preserving control and optimization for cyber-physical systems[D]. Pennsylvania, USA: Pennsylvania State University, 2020.
- [64] SCHULZE D M, ALEXANDRU A B, QUEVEDO D E, et al. Encrypted control for networked systems: An illustrative introduction and current challenges[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2021, 41(3): 58 – 78.
- [65] SULTANGAZIN A, TABUADA P. Symmetries and isomorphisms for privacy in control over the cloud[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 66(2): 538 – 549.
- [66] XU Z, ZHU Q. Secure and resilient control design for cloud enabled networked control systems [C]//*The First ACM Workshop on Cyber-physical Systems-security and/or Privacy*. New York, USA: ACM, 2015: 31 – 42.
- [67] ALI Y, XIA Y, MA L, et al. Secure design for cloud control system against distributed denial of service attack[J]. *Control Theory and Technology*, 2018, 16: 14 – 24.
- [68] SUN Q, SHI Y. Model predictive control as a secure service for cyber-physical systems: A cloud-edge framework[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(22): 22194 – 22203.
- [69] TSIAMIS A, GATSIS K, PAPPAS G J. State-secrecy codes for networked linear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(5): 2001 – 2015.
- [70] KOGISO K, FUJITA T. Cyber-security enhancement of networked control systems using homomorphic encryption[C]//*54th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 6836 – 6843.
- [71] SCHULZE D M, JAGER T. Encrypted cloud-based control using secret sharing with one-time pads[C]//*58th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 7215 – 7221.
- [72] YAO A C. Protocols for secure computations[C]//*23rd Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. Piscataway, USA: IEEE, 1982: 160 – 164.
- [73] ELGAMAL T. A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1985, 31(4): 469 – 472.
- [74] MURGUIA C, FAROKHI F, SHAMES I. Secure and private implementation of dynamic controllers using semihomomorphic Encryption[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(9): 3950 – 3957.
- [75] ALEXANDRU A B, MORARI M, PAPPAS G H. Cloud-based MPC with encrypted data[C]//*2018 IEEE Conference on Deci-*

- sion and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2018; 5014 – 5019.
- [76] ALEXANDRU A B, TSIAMIS A, PAPPAS G J. Towards private data-driven control[C]//59th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2020; 5449 – 5456.
- [77] ALEXANDRU A B, TSIAMIS A, PAPPAS G J. Data-driven control on encrypted data[EB/OL]. (2020 – 06 – 21) [2024 – 04 – 19]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.12671>.
- [78] ALEXANDRU A B, TSIAMIS A, PAPPAS G J. Encrypted distributed lasso for sparse data predictive control[C]//60th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2021; 4901 – 4906.
- [79] LI Q W, GAO R Z, XIA Y Q. Encrypted data-driven predictive cloud control with disturbance observer[EB/OL]. (2023 – 02 – 06) [2024 – 04 – 19]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.00322>.
- [80] YUAN Y, YUAN H, GUO L, et al. Resilient control of networked control system under DoS attacks: A unified game approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1786 – 1794.
- [81] YUAN H, XIA Y. Resilient strategy design for cyber-physical system under DoS attack over a multi-channel framework[J]. *Information Sciences*, 2018, 454 – 455: 312 – 327.
- [82] YUAN H, XIA Y, LIN M, et al. Dynamic pricing-based resilient strategy design for cloud control system under jamming attack [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(1): 111 – 122.
- [83] YUAN H, XIA Y, ZHANG J, et al. Stackelberg-game-based defense analysis against advanced persistent threats on cloud control system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1571 – 1580.
- [84] YANG H, JU S, XIA Y, et al. Predictive cloud control for networked multiagent systems with quantized signals under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 1345 – 1353.
- [85] CHEN J, FENG Z, WEN J Y, et al. A container-based DoS attack-resilient control framework for real-time UAV systems [C]//2019 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Piscataway, USA: IEEE, 2019; 1222 – 1227.
- [86] REIHER L, LAMPE B, WOOPEN T, et al. Enabling connectivity for automated mobility: A novel MQTT-based interface evaluated in a 5G case study on edge-cloud lidar object detection[C]//2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2022; 1 – 9.
- [87] HE Y, WU B, DONG Z, et al. Towards C-V2X enabled collaborative autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 15450 – 15462.
- [88] GU S, KANG S, JEONG W, et al. Validation of cloud robotics system in 5G MEC for remote execution of robot engines[J]. *Journal of Korea Robotics Society*, 2022, 17: 118 – 123.
- [89] WANG Z, YANG S, XIANG X, et al. Cloud-based mission control of USV fleet: Architecture, implementation and experiments[J/OL]. *Control Engineering Practice*, 2021 [2023 – 06 – 18]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066120302276>. DOI: 10.1016/j.conengprac.2020.104.657.
- [90] ABDUL M A, KILPATRICK P, SPENCE I, et al. Performance estimation of container-based cloud-to-fog offloading[C]//12th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion. New York, NY, USA: ACM, 2019; 151 – 156.
- [91] XIONG Y, SUN Y, XING L, et al. Extend cloud to edge with KubeEdge[C]//2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2018; 373 – 377.
- [92] HAJA D, SZALAY M, SONKOLY B, et al. Sharpening Kubernetes for the edge[C]//ACM SIGCOMM 2019 Conference Posters and Demos. New York, USA: ACM, 2019; 136 – 137.
- [93] SHAH J, DUBARIA D. Building modern clouds: Using docker, Kubernetes & Google cloud platform [C]//9th IEEE Annual Computing and Communication Workshop and Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2019; 184 – 189.
- [94] SASAKI K, SUZUKI N, MAKIDO S, et al. Vehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing[C]//55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan. Piscataway, USA: IEEE, 2016; 1122 – 1127.
- [95] KANEKO Y, YOKOYAMA Y, MONMA N, et al. A microservice-based industrial control system architecture using cloud and MEC[C]//4th International Conference on Edge Computing-EDG. Berlin, Germany: Springer, 2020; 18 – 32.
- [96] SCHAFHALTER P, KALRA S, XU L, et al. Leveraging cloud computing to make autonomous vehicles safer[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2023; 5559 – 5566.
- [97] ZHANG Z, ZHANG Y, YUE D, et al. Economic-driven hierarchical voltage regulation of incremental distribution networks: A cloud-edge collaboration based perspective[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(3): 1746 – 1757.
- [98] HE Z, LIANG D, YANG Y. Fault diagnosis scheme for the rotary machine group: A deep mutual learning-based approach with cloud-edge-end collaboration[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(8): 3209 – 3213.

- [99] LI N, ZHANG K, LI Z, et al. Cloud-assisted nonlinear model predictive control for finite-duration tasks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 68(9): 5287–5300.
- [100] 郭耀华, 丁金全, 王长新. 商用车底盘线控技术研究现状及应用进展[J]. *汽车工程学报*, 2022, 12(6): 695–714.
GUO Y H, DING J Q, WANG C X, et al. Research status and application progress of X-by-wire chassis technology for commercial vehicles[J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2022, 12(6): 695–714.
- [101] 崔明阳, 黄荷叶, 许庆, 等. 智能网联汽车架构、功能与应用关键技术[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(3): 493–508.
CUI M Y, HUANG H Y, XU Q, et al. Survey of intelligent and connected vehicle technologies: Architectures, functions and applications[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(3): 493–508.
- [102] 李克强, 李家文, 常雪阳, 等. 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用[J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(3): 261–275.
LI K Q, LI J W, CHANG X Y, et al. Principles and typical applications of cloud control system for intelligent and connected vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2020, 11(3): 261–275.
- [103] 李克强, 常雪阳, 李家文, 等. 智能网联汽车云控系统及其实现[J]. *汽车工程*, 2020, 42(12): 1595–1605.
LI K Q, CHANG X Y, LI J Q, et al. Cloud control system for intelligent and connected vehicles and its application[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(12): 1595–1605.
- [104] LI S, WAN K, GAO B, et al. Predictive cruise control for heavy trucks based on slope information under cloud control system[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(4): 812–826.
- [105] GAO B, CHEN Q, LIU Y, et al. Predictive cruise control under cloud control system for urban bus considering queue dissipation time[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(4): 2639–2649.
- [106] 工业和信息化部, 公安部, 自然资源部, 住房和城乡建设部, 交通运输部. 关于开展智能网联汽车“车路云一体化”应用试点工作的通知[EB/OL]. (2024-01-15)[2024-03-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6926711.htm.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Public Security, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Transport. Notice of carrying out the pilot application of “vehicle-road-cloud integration” for intelligent connected vehicles[EB/OL]. (2024-01-15)[2024-03-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6926711.htm.
- [107] 王耀南, 江一鸣, 姜娇, 等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 494–513.
WANG Y N, JIANG Y M, JIANG J, et al. Key technologies of robot perception and control and its intelligent manufacturing applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 494–513.
- [108] 高慷婷, 柴天佑. 端边云协同的氧化铝生产过程苛性碱浓度智能预报方法[J]. *自动化学报*, 2023, 49(5): 964–973.
GAO S T, CHAI T Y. Intelligent forecasting method of caustic concentration in alumina production process based on end-edge-cloud coordination[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(5): 964–973.
- [109] 柴天佑, 周正, 郑锐, 等. 端边云协同的PID整定智能系统[J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 514–527.
CHAI T Y, ZHOU Z, ZHENG R, et al. PID tuning intelligent system based on end-edge-cloud collaboration[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 514–527.
- [110] 柴天佑, 程思宇, 李平, 等. 端边云协同的复杂工业过程运行控制智能系统[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2051–2062.
CHAI T Y, CHENG S Y, LI P, et al. Intelligent system for operational control of complex industrial process based on end-edge-cloud collaboration[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2051–2062.
- [111] KANEKO Y, ITO T. A reliable cloud-based feedback control system[C]//9th IEEE International Conference on Cloud Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 880–883.

作者简介

夏元清(1971–), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域为云控制技术, 天空地海一体化网络跨域协同控制, 模型预测控制, 自抗扰控制等。

王 晁(1999–), 男, 博士生。研究领域为云控制系统, 车云平台设计与开发, 软硬件一体化等。

高润泽(1996–), 男, 博士生。研究领域为基于工作流的云控制系统, 云边协同控制, 数据驱动控制, 模型预测控制等。