

云控制系统研究现状综述*

吕书玉^{1,2}, 马中^{1,2}, 戴新发², 高毅², 胡哲琨²

(1. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001; 2. 武汉数字工程研究所, 武汉 430074)

摘要: 云控制系统是软件定义的云计算基础理论和方法在自动控制领域中的延伸和应用,然而其研究尚处于起步阶段,其概念内涵、体系架构、理论方法和关键技术还需进一步明确。通过对体系结构和构成要素的分析,归纳总结了云控制系统的典型特征;综合分析了云控制系统与相关技术的支撑关系;基于云控制系统的理论特点引申出五项关键技术,并对各关键技术的研究现状进行了详细阐述;最后提出了云控制系统未来发展所面临的问题与挑战。

关键词: 云控制系统; 网络化控制系统; 云计算; 工业物联网; 数据驱动控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2021)05-002-1287-07

doi:10.19734/j.issn.1001-3695.2020.06.0158

Survey on cloud control systems

Lyu Shuyu^{1,2}, Ma Zhong^{1,2}, Dai Xinfu², Gao Yi², Hu Zhekun²

(1. College of Computer Science & Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Cloud control systems are the extension and application of the basic theory and method of cloud computing defined by software in the field of automatic control. However, the research of cloud control system is still in its infancy, and its concept, architecture, theoretical methods and key technologies need to be further clarified. Firstly, this paper summarized the typical characteristics of the cloud control systems through the analysis of the system structure and components. Then, it comprehensively analyzed the supporting relationship between the cloud control systems and related technologies. Further, it derived five key technologies based on the theoretical characteristics of cloud control systems, and described the research status of each key technology in detail. Finally, this paper proposed the problems and challenges faced by the future development of cloud control systems.

Key words: cloud control systems; network control system; cloud computing; industrial Internet of Things; data-driven control

工业物联网(IIOT)作为第四次工业革命的外在表现形式,在各国战略发展布局中受到高度重视,智能制造、工业4.0、工业互联网、制造业创新3.0等孪生概念被相继提出^[1,2]。工业物联网是一种数据驱动的系统范式^[3],海量现场数据需实时处理并输出控制指令,数据驱动控制模型需混合使用在线/离线数据^[4],泛在连接使控制系统架构高度复杂,这些都要求控制系统具备大容量网络带宽、高性能计算资源、自适应软件架构以及智能计算框架,显然传统的网络化控制系统难以满足这些要求^[5,6]。将云计算技术与网络化控制系统相融合形成基于云的控制系统,即云控制系统(cloud control systems, CCS)^[7],是满足上述要求的一种理想方法,也为控制科学和信息科学的融合提供了新契机。如图1所示:a)云平台为先进控制理论的研究和应用提供丰富充足的计算资源^[2],有效缩小控制理论与工程实践之间的差距;b)开放式体系架构为ISA-95控制系统集成规范模型^[8]L₀-L₂过程控制层的软硬解耦提供了先决条件;c)基于海量数据的统计学规律分析,为解决难以机理建模的复杂非线性控制问题提供了可能。近年来云控制系统在业界已成为研究热点,但其概念还比较抽象,理论体系尚未形成,使得研究方向比较发散,因此云控制系统的基础理论和技术应用研究还面临着诸多挑战。

本文以云计算、工业自动化、网络化控制系统(NCS)、信息物

理系统(CPS)、云制造等关键词组合搜索,在IEEE、ACM、Elsevier、Springer-Verlag、知网等数据库中检索筛选出国内外相关文献70余篇,通过对文献的归纳分析,梳理云控制系统的研究脉络,提出云控制系统的关键技术,为后续研究提供有益指导。

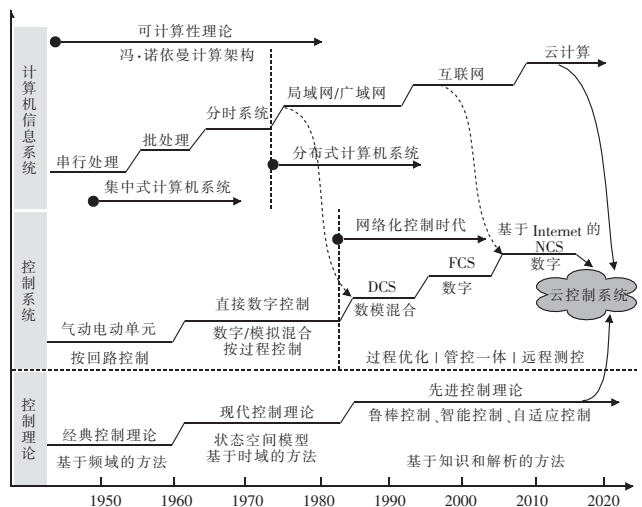


图1 控制系统历史演变与发展趋势

Fig. 1 Historical evolution and development trend of control system

收稿日期: 2020-06-07; 修回日期: 2020-07-21 基金项目: 军队科研资助项目; 热能动力技术重点实验室开放基金资助项目(TPL2019C01)

作者简介: 吕书玉(1985-),男,湖北枣阳人,工程师,博士研究生,主要研究方向为工业物联网(lvsy709@126.com); 马中(1962-),男,湖北武汉人,研究员,博导,博士,主要研究方向为分布式计算、容错计算; 戴新发(1974-),男,湖北石首人,研究员,博导,博士,主要研究方向为虚拟化技术、分布式计算; 高毅(1984-),男,湖北鄂州人,高级工程师,博士,主要研究方向为云计算、虚拟化技术; 胡哲琨(1986-),男,湖南常德人,高级工程师,博士,主要研究方向为容错计算、人工智能。

1 云控制系统概述

1.1 云控制系统的体系结构

云控制系统的体系结构还没有形成一致规范描述,大多数研究都是基于特定的应用场景进行表述,具有不同的构成要素和特点,表 1 对几种典型的云控制系统体系架构进行了对比分析。

表 1 云控制系统体系架构比较
Tab.1 Comparison of cloud control system architecture

文献	架构	控制要素构成	特点
文献[7]	CCS	云控制器、互联网、现场设备	云端智能控制
文献[9,10]	AFAA	云控制器、雾控制器、TSN/互联网、现场设备	云雾协同控制
文献[11~13]	CSaaS	云控制器、本地控制器、互联网、数控机床	实时与非实时控制任务分离
文献[14]	CaaS	虚拟 PLC 控制器、实时以太网、现场设备	私有云/虚拟 soft-PLC
文献[15]	IAaaS	冗余云控制器、互联网、现场设备	延时预测补偿、容错设计

文献[7]指出在云控制系统中,大数据存储在云端,云控制器通过深度学习等智能算法生成控制信号,实现系统的自主智能控制。文献[10]提出了一种敏捷工厂自动化即服务架构(AFAA),在雾控制节点采用基于容器的虚拟控制单元并通过时间敏感网络(TSN)与现场设备连接,保证控制信号的可靠传输。文献[11,12]将机床控制系统的实时任务与非实时任务分离,定义一种控制系统即服务(CSaaS)的架构,将各类非关键控制参数汇聚到云参数池中,并以服务的形式提供给控制系统。文献[14]提出了一种控制即服务(CaaS)的工业自动化架构,在私有云虚拟机中部署 soft-PLC 实例,通过使能高速通信接口 VMCI 使虚拟交换支持实时以太网 PROFINET,进而将控制作为服务传递到现场设备。文献[15]提出了一种基于云的自动化控制体系结构,将工业自动化作为云服务(IAaaS),重点解决反馈控制层(L₁)云化后的实时性和可靠性问题。

综合来看,云控制系统的构成要素包括云基础设施、云控制器、泛在网络、传感器/执行器以及受控对象,如图 2 所示。其中,云基础设施包括中心云和边缘云,云与边一体化协同,是云控制器的运行载体;云控制器以控制即服务的形式位于云端或边缘侧;通信网络包括各类异构泛在网络;传感器和执行器可通过边缘网关或直接接入云计算平台;受控对象与传统网络化控制系统相比更加广泛。

1.2 云控制系统的典型特征

云控制系统是网络化控制系统在云环境下的延伸^[5,16],同时还涉及到信息物理系统(CPS)、多智能体系统以及复杂系统优化控制^[5,7,17]。因此,云控制系统具备以下典型特征:a)云控制系统本身也是一种网络化大规模复杂系统;b)采用控制即服务(CaaS)的服务化软件架构,控制功能单元可灵活复用;c)异构泛在网络环境下支持设备语义互操作,实现控制设备的即插即“控”;d)基于开放式体系架构设计,控制设备与控制软件实现标准化和通用化;e)数据驱动的控制理论使云控制模型更加精准、鲁棒;f)具备大规模复杂控制系统快速部署与柔性重构能力;g)云边协同控制架构使云控制系统兼具实时性、可靠性与高性能等特点;h)面临的安全威胁更加复杂多样。

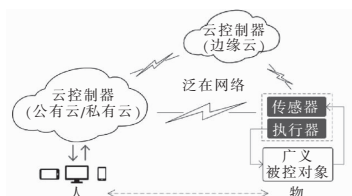


图 2 云控制系统体系结构示意图
Fig.2 Architecture of cloud control system

2 云控制系统的相关技术

2.1 云控制系统与网络化控制系统

网络化控制系统是一种空间分布式系统,被控对象、控制器、传感器、执行器由带宽受限的通信网络连接组成闭环反馈控制系统^[18],网络诱导时延是影响网络化控制系统稳定性的关键因素^[13]。云计算的应用进一步增加了传输时延和处理时延的不确定性,主要原因是云平台负载动态变化^[19]、任务的非实时性调度、虚拟化效率影响、数据长距离传输等。在网络化控制系统中,为揭示通信网络对控制的影响,通常使用马尔可夫线性跳跃系统(MJLS)^[20]建模来补偿可能导致系统性能退化和不稳定的随机延迟,这些理论方法在云控制系统中仍然适用^[21],如图 3 所示。当被控对象状态的采样周期 h 满足 $\tau^{cloud} = \tau_{sc}^{cloud} + \tau_c^{cloud} + \tau_{ca}^{cloud} \leq h$ 时,那么该系统是稳定的,文献[14]中的对比实验表明,当采样率较高时基于云的控制场景性能有所下降,但仍可以满足软实时控制系统的应用需求。

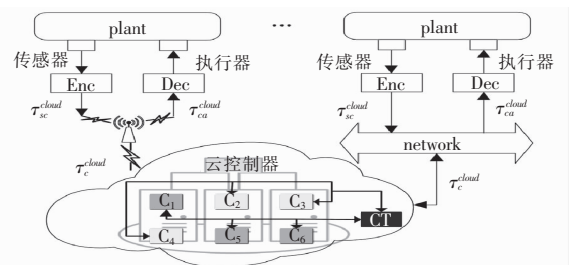


图 3 网络化控制系统与云控制系统的继承和发展
Fig.3 Inheritance and development between networked control system and cloud control systems

2.2 云控制系统与边缘计算技术

边缘计算^[22]是云计算的延伸,可以弥补其在实时性、可靠性和安全性等方面的不足,主要体现在:a)靠近设备侧,增强控制系统的实时响应能力;b)大部分原始数据在边缘侧处理,可有效缓解云中心的网络带宽和计算压力;c)安全关键任务和敏感数据限制在边缘侧,降低控制系统的攻击面。云边协同的关键在于控制任务的迁移与调度。文献[9]综合考虑能源消耗、计算成本、调度成本,设计一种计算卸载方法,将时间敏感的关键控制任务调度到边缘控制器节点;文献[10,23]采用 TSN 连接南向的工业现场设备,通过优先级流量调度机制保证实时数据流在确定性时间内优先传输,进而将关键控制任务迁移到边缘计算节点;文献[24]提出一种基于软件定义网络(SDN)的云边协同机制,采用切比雪夫分解的多目标进化算法处理 IIOT 边缘设备和云设备之间流式大数据的流量调度问题。

2.3 云控制系统与信息物理系统

信息物理系统通过在信息世界和物理世界之间形成闭环反馈控制,对外界环境具有良好的认知能力和控制能力^[25-27]。信息物理生产系统(cyber-physical production systems, CPPS)是应用于工业控制领域的 CPS, CPPS 的功能结构松散耦合,包括上、下两个层次:向下从物理世界实时获取数据,并从信息空间向物理世界反馈信息;向上构建虚拟信息空间,集成智能数据管理、分析和计算能力^[28]。CPPS 的上层信息空间是多智能体系统、SOA 和云计算的集成应用,各智能体中嵌入的智能控制逻辑以服务化的形式封装,云或边缘计算平台为服务化多智能体系统的流程编排和持续集成、部署提供基础设施,通过群体智能实现工业控制系统的自适应动态重构^[29]。欧洲、美国和亚洲各国也开展了工业 CPS 原型系统的研究,其中,由欧盟委员会资助的创新项目 SOCRADES、IMC-AESOP、GRACE、ARUM 利用云计算和 SOA 来探索工业 CPS 技术发展,它们分别解决了分布式智能嵌入式设备、工业多智能体技术、服务化的监测

与控制、自适应生产管理等关键问题,其中 IMC-AESOP 视图下的工业 CPS 具有鲜明的云控制特性,如图 4 所示。

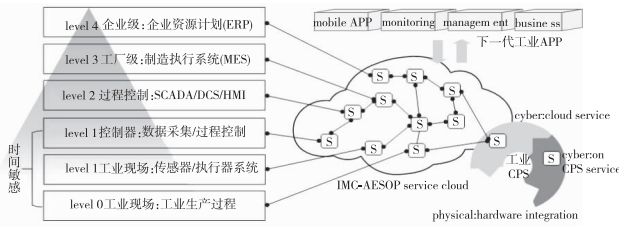


图 4 MC-AESOP 视图下基于云的工业 CPS 架构迁移
Fig. 4 Cloud-based industrial CPS architecture migration in MC-AESOP view

2.4 云控制系统与 OPC UA over TSN

时间敏感网络(TSN)通过流量整形机制为高优先级数据流提供确定的传输时隙,保证时间敏感数据有一条确定的传输路径^[30]。OPC UA 是跨平台的工业数据访问规范^[31],其采用面向对象的设计思想对各类设备实体进行信息模型,允许分布式系统组件在异构网络上互操作^[32]。OPC UA 规范与 TSN 相结合(OPC UA over TSN),将信息模型的语义描述从云端延伸至现场层,为云控制系统提供一种全局开放式的数据交换模式。文献[33]将 TSN 的控制平面和数据平面分离,通过 SDN 与 IEEE 802.1Qcc、OPC UA over TSN 的集成应用实现从 OPC UA 发布/订阅模式的 QoS 配置到 TSN 的映射。如图 5 所示^[33],OPC UA 传感器连接到工业现场网络,基于云的控制程序直接通过 OPC UA 订阅传感器数据,从传感器到云的通信链路则由分布式 SDN 控制器配置。

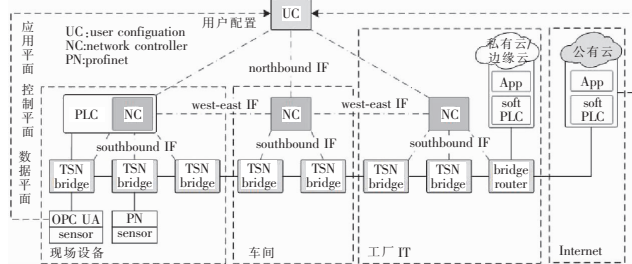


图 5 面向 OPC UA over TSN 的分布式 SDN 控制器
Fig. 5 Distributed SDN controller for OPC UA over TSN

2.5 云控制系统与工业云平台

工业云平台为工业企业提供各类工业应用服务^[34],与通用云平台相似,其服务模式包括工业 IaaS、工业 PaaS 和工业 SaaS^[35,36]。工业云平台对云控制系统的运行支撑主要体现在四个方面:a)通过实时虚拟化、实时轻量级容器、Unikernel 和实时操作系统等技术^[37-39],在中心云或边缘云的 IaaS 层为云控制器或智能体^[29]提供弹性可扩展的虚拟资源池,确保关键控制任务的实时调度与空间隔离;b)在信息建模和控制模型方面,一方面提供自上而下和自下而上的信息模型构建工具,在云控制系统中形成一致的工业控制设备抽象语义描述,另一方面通过持续优化模型驱动和数据驱动的云控制模型构建可复用的高质量控制算法库,提升云控制系统的控制服务能力;c)在数据管理和可视化方面,工业云平台为海量时序数据提供高性能读写和强计算能力的分布式数据库服务^[40],通过集成丰富的数据建模分析和工业云组态服务组件支持云控制系统的高效数据可视化和在线实时控制;d)为云控制系统提供敏捷的集成开发和运维管理平台^[10,38,41],基于微服务架构将云控制任务封装成细粒度、松散耦合和可复用的控制服务^[29],结合容器的编排与调度实现云控制工作流的灵活重组和快速部署。

3 云控制系统的关键技术分析

云控制系统是上述相关技术的综合运用,理论上应兼具实

时性、高性能、可靠性、安全性、智能化等特点。本文从如何继承这些特点的角度引申出若干关键技术,如图 6 所示。

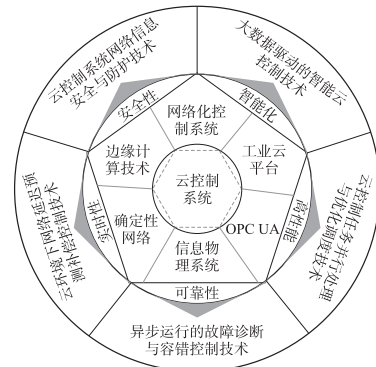


图 6 云控制系统技术体系结构
Fig. 6 Technical architecture of cloud control systems

3.1 实时性:云环境下网络延迟预测补偿控制技术

在互联网环境下,非对称路由和信道多路复用使得网络延时和抖动的波动性更大,严重影响了控制系统稳定性,特别是在长距离网络传输环境下表现尤为明显。文献[13]以基于云控制的五轴铣床和三轴铣床为例,分别在德国与新西兰、欧洲谷歌云中心之间部署了云控制系统,实测表明 TCP 并不适合 CSaaS,UDP 仅适合低时钟周期的控制系统,难以满足高性能连接的控制需求,如表 2 所示(数据自文献[13])。因此,云控制系统需要更多的组件来补偿云环境下网络延迟的不确定性^[5,42]。

表 2 云控制系统模式下的网络传输延时对比
Tab. 2 Comparison of network transmission delay under cloud control system

云控制器部署	测试场景	传输协议	数据包	丢包率/%	平均 RTT/s	峰值 RTT/s
斯图加特(德国) ↔ 奥克兰(新西兰)	五轴铣床	UDP	85 752 629	2.9	0.317 4	17
	三轴铣床	TCP	-	0	-	3 500
	三轴铣床	UDP	27 015 516	2.6	0.346 6	20
	三轴铣床	TCP	27 000 269	0	≈ 10	85
斯图加特(德国) ↔ 谷歌欧洲云中心	五轴铣床	UDP	59 795 451	-	0.042 9	0.150
	三轴铣床	UDP	19 290 892	-	0.047 1	3.500

工业自动化体系的实时性要求主要集中在反馈控制层(L₁),文献[16]将云控制系统简化为带死区时间的反馈控制系统,提出一种自适应史密斯预测补偿控制方法,云控制器包含带延迟补偿器的控制器和通信延迟估计器,在无须更改原始控制器和受控过程的情况下可将云控制器部署到云端。与此类似,文献[43]在轮询和非轮询两种模式下,应用延迟缓解机制来处理当 PI 控制器迁移到雾或云时的网络延迟与抖动。文献[44]将云控制系统建模为不确定线性离散时滞系统,不确定系统矩阵反映了时变时滞的特性,提出一种鲁棒控制方法来解决系统的镇定问题。以上研究只能解决短暂随机时延导致的不确定性问题,适合采样率不高的非关键控制系统,对于长时延和时间敏感的安全关键控制系统,应结合边缘计算、容错技术和确定性网络等^[30]来解决云控制系统网络传输的不确定性问题。

3.2 高性能:云控制任务并行处理与优化调度技术

云控制系统将各种控制与优化算法部署在云端构成云控制器^[42],与之相关的各类数据处理、传输、调度、存储等也都在云中心完成^[19];传统的控制系统软件通常采用单体结构^[41],难以适应云原生应用的并行化和分布式的开发模式。

从云控制任务的并行化设计来看,文献[7]提出了一种协同云控制系统雏形,控制任务由多个云控制器协作完成,如图 3 所示,任务管理服务器(CT)基于可用计算资源,利用分布式算法对全局任务进行分割,并将子任务分配给各云控制器(C₁ ~ C₆)。文献[45]采用类似的架构设计,由一个调度服务器和多

个处理服务器构成,云控制程序使用 IEC61131-3 ST 编程语言,调度服务器根据 POU(程序组织单元)的处理依赖关系将其划分为多个能够并行处理的子任务,并采用负载均衡算法将子任务调度到多个处理服务器中,调度服务器负责采集信号与控制信号的集中分发。文献[46]通过求解一类最优控制问题,设计了云控制系统的并行任务分配优化方案,并结合极大—加代数方法分析和优化了云控制系统的并行处理性能。以上研究仅从架构和理论层面对单体结构控制任务的并行化设计和调度机制进行了初步研究,并没有考虑到云计算的部署模式以及分布式控制系统的一致性问题。

微服务是云原生应用的一种重要软件架构模式,它将微服务架构与云控制任务的并行化设计相结合,很容易在分布式和可伸缩的基础设施上部署云控制系统。文献[41]设计了一种基于微服务的云机器人体系结构,以容器为载体将各任务分解为一组相互协作的微服务,控制请求通过调度模块路由到相应的微服务实例。文献[47]将过程自动化的各模块功能要素映射为微服务,每个模块内部可以提供一个或多个服务,服务的监测和编排由高级控制系统集中执行。

3.3 可靠性:异步运行的故障诊断与容错控制技术

云控制器对运行环境不作任何假定,由运行在多个虚拟节点上的控制服务组件协同构成,这些虚拟主机可能位于不同的云中心或边缘云节点,并可能采用不同的虚拟化技术或来自于不同的云服务提供商^[16]。云控制系统的这种分布式和异构性^[48]特点消除了专用控制设备的软硬件依赖性,从资源扩展性和部署灵活性的角度来看,云控制系统的可靠性将得到显著提升,但系统的复杂性对容错机制的设计带来了巨大挑战。云环境中的失效已经成为一种常态^[49],目前,云平台主要是从系统层面提供少量的通用容错机制^[48],以提供不间断的服务为主要目标,针对高可靠工业云平台的研究还比较少^[34]。

文献[50]针对可变网络环境下的云数控系统(cloud-based CNC,C-CNC)设计了一种三层冗余架构:a)保留本地控制器(local controller,LC),在紧急情况下由活动 LC 接管云控制器(cloud controller,CC)对机床的控制;b)在云端部署多个冗余 CC,根据性能指标确定各 CC 的控制服务等级,C-CNC 在控制切换时选择服务等级最高的 CC,以最小化性能损失;c)将各 CC 部署到地理位置分散的虚拟机(VM)中,当网络 QoS 不可接受或连接断开时平滑切换至备份服务器。为实现云反馈控制服务的可靠性,文献[16]提出一种在冗余虚拟控制器上异步运行的分布式容错算法,考虑包括控制器软件、虚拟机、物理机、网络交换机和网络链路的 fail-stop 故障模型,支持双重和更高安全级别的冗余,当主控制器失效时可平滑切换到备份控制器,并保证一致的超调量和稳态误差。文献[51]将容错作为未来自动化系统体系结构的一个集成特性,容错功能以服务的形式提供给控制应用程序,工程师可以灵活配置各类容错模式(如 M -out-of- N 和备用冗余),控制系统根据配置自动创建冗余运行实例,并自动部署到分布式云控制系统中。文献[52]研究云环境下直流电机系统的容错控制问题,考虑有限通信容量下的丢包问题及执行器故障,通过最小二乘滤波估计故障设计一种容错控制器,以保证直流电机系统的稳定性和控制性能。

综合来看,关于云控制系统容错机制的研究主要集中在两个层面:a)容错体系层面,遵循云计算的分层体系架构,任一层的故障都会影响其上层^[53],针对每一层的故障诊断如瞬时性故障、fail-stop 故障和拜占庭故障等^[48,54],研究相应的容错方法来消除或最小化对系统的影响,使控制服务满足可交付的标准;b)容错控制层面,针对云控制系统的特征,利用系统动力学模型设计云容错控制器,如鲁棒自适应容错控制、非线性容错控制等,在全局范围内对未知动态非线性系统进行故障补

偿,当任一控制组件出现故障时,允许通过一定程度地降低系统性能来保证稳定性和安全性^[55]。

3.4 安全性:云控制系统网络信息安全与防护技术

与云计算的融合使得控制系统的受攻击面呈指数级增长,云控制系统的基础设施、敏感数据、设备资产、核心软件等暴露在开放的网络环境中,因此需构建全面的云控制系统信息安全防护体系^[56],包括云数据中心安全、闭环云控制安全以及网络数据传输安全^[34]。综合分析相关文献,现有的研究主要集中在授权与访问控制、数据完整性保护、网络攻击防护等方面,以及如何在安全攻击场景下保持云闭环反馈控制的稳定性。

避免未经授权的访问是安全防护的重要方面,云控制系统的开放性、动态性和灵活性需要一种细粒度的动态访问控制机制来约束各控制实体的行为。文献[26]针对基于云的新型工业体系架构评估了多种访问控制模型,如基于属性的访问控制、基于任务角色的访问控制、基于能力的访问控制、基于隐私感知角色的访问控制等,并分析了各模型对异构云控制场景的适应性,期望在安全和效率之间达到平衡,但是各种模型的实际解决方案还处于起步阶段。考虑到基于云的 CPS 的设备移动性,文献[57]设计了一种位置敏感的安全数据共享方法,实现了基于身份和位置的双因素授权和访问控制。

为保证数据的机密性和完整性,文献[58]采用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件对来自云服务器的数据包进行验证,防止从云端发送到设备现场的控制信息被攻击者截获篡改;文献[59]使用基于 RSA 算法和数字签名的消息完整性认证机制来保证云服务器和机器人之间的数据传输安全性;文献[60]采用模型预测控制形式化定义 CE-NCS(cloud-enabled NCS)的控制问题,基于矩阵变换方法设计了一种加密机制,在数据上传到云中心之前对 MPC 的二次型问题进行加密,并在本地进行合法性校验,当数据校验不通过或者云服务中断时,为保持云控制系统的稳定性,基于事件触发型 MPC 和 H_∞ 最优控制设计了一种包含云模式(云控制器)、缓冲模式(复用上一周期控制输入)和安全模式(本地控制器)三种工作模式的切换机制。

国家互联网中心(CNCERT)最新监测数据表明,2019 年工业云平台持续遭受漏洞利用、拒绝服务、暴力破解等网络攻击,在主流云平台上遭遇 DDoS 攻击次数占境内目标被攻击次数的 69.6%,如何在高频次网络攻击下保持云控制服务的稳定性成为云控制系统研究的重要内容。文献[61]针对通信网络,将发送者和攻击者的交互行为建模为 Stackelberg 博弈模型,在攻击诱导丢包的影响下对切换系统的 H_∞ 性能进行分析,解决云控制系统的时滞问题。文献[62,63]针对云控制系统中的 DDoS 攻击设计一种攻击检测与缓解方法,采用协方差矩阵检测方法监测 DDoS 攻击,进一步通过身份认证技术过滤 IP 欺骗数据包,以保持控制系统的稳定性,当系统错误率 R_{error} 超过阈值时,控制模式由云控制器切换到本地控制器。

3.5 智能化:大数据驱动的智能云控制技术

云控制系统作为一种网络化复杂系统,进一步强化了数据驱动控制理论^[4,64]的发展基础,主要表现在:a)系统更复杂,云控制系统由大量的非线性模块耦合组成,涉及众多不可测变量且控制关系复杂^[65],更加难以建立能够逼近实际系统的精确机理模型^[7,66];b)数据更丰富,来自传感设备、控制反馈、过程监控以及业务流程的海量多源异构数据中蕴涵着丰富的知识^[55],可以通过智能分析方法拟合被控对象的系统动力学模型以及运行规律和模式;c)算力更强大,云平台提供了丰富的智能计算框架和可重构的硬件加速计算能力,使智能控制中各种复杂、非线性控制与决策问题的快速运算求解成为可能^[67]。因此,在数据、模型和算力的支持下,利用大数据驱动的智能云控制技术来解决复杂系统的优化控制问题^[68]具备理论研究和工程实践上的可行性,一方面,从海量数据中挖掘复

杂控制系统的内在运行规律,通过智能学习与优化方法指导云控制器的设计;另一方面,基于大数据体系架构设计云控制系统,包括全生命周期的数据采集、处理以及智能控制信号的分发。

在智能学习与优化控制方面,文献[69]采用近似模式匹配方法来解决无模型的估计和控制问题,在训练过程中维护一组代表轨迹的在线训练集,通过更新以适应不断变化的过程和不可测量的干扰。文献[70]通过动作捕捉系统准确探测无人船位置,根据位置信息采用模型预测控制器控制无人船避障,收集由传感器数据和位置信息构成的大量标记训练样本,进而使用强化学习生成基于数据的预测控制器来控制无人船的运动。这实际上是利用深度神经网络的拟合和泛化能力,在面临未知样本数据时也能保证控制系统的收敛性、稳定性和鲁棒性。在云智能控制架构设计方面,文献[71]利用 Spark 大数据计算引擎构建了一种基于机器学习的实时闭环优化控制架构,通过 Apache Kafka 实现数据流和控制信号的实时分发,以应用于工业过程控制领域的驱动建模和最优控制,如图7所示。采用类似的架构,文献[72]提出了一种用于实时交通控制系统的大数据分析体系结构。数据驱动的控制方法往往依赖于在线学习^[64],复杂的学习和优化过程带来了较大的处理延时^[19],难以保证闭环系统的稳定性。针对该问题主要有两种研究思路:a)将智能控制中计算密集型的学习训练阶段和时间敏感型的预测控制阶段分开^[73];b)通过分析数据挖掘算法与所需计算资源之间的关系,利用弹性扩展的云计算资源实现智能控制算法的并行计算以缩短在线计算时间^[74,75]。

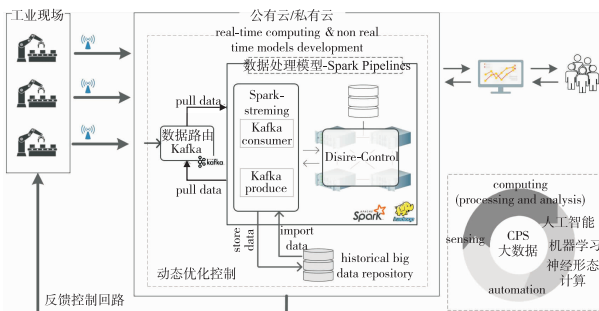


图7 数据驱动的智能云控制系统架构

Fig.7 Architecture of data driven intelligent cloud control systems

4 云控制系统发展面临的问题与挑战

目前,关于云控制系统的研究以概述介绍、架构设计、构思验证和初步应用为主,云控制系统是多种学科交叉发展的产物,涉及到的技术领域和应用场景非常宽泛,难以设计一种普适性的模型框架来满足所有的应用需求。复杂性和泛在化是云控制系统的理论方法在短期内无法聚焦的内在原因,因此,云控制系统的发展还面临着诸多问题与挑战。

a)异构泛在网络环境下的数据确定性传输问题。云控制系统面临的是由各类有线/无线网络、实时/非实时网络、窄带通信/宽带通信等构成的异构泛在网络环境,实现的是人、机、物的全面互连,在这种复杂网络环境下,数据的确定性传输问题应定义为在确定的时间内将有效的信息传递到正确的地方,并不一定要求所有的数据都要非常快速地实时传输,因此如何在各种网络条件下兼顾成本和性能之间的平衡,满足控制系统所需的控制质量和闭环系统的稳定性,这是云控制系统面临的一个重要挑战。虽然部分学者在短暂随机网络延迟条件下对简化云控制环境下的网络延迟预测控制方法进行了研究,但并未考虑到异构网络空间的多变性和多样性问题。

b)机理模型和数据模型混合的复杂性控制问题。对于复杂云控制系统,没有任何一种控制方法能够适用于所有场景,控制模型的选择和设计应建立在深入理解、把握被控对象和应用场景的基础上,基于模型的控制系统和数据驱动的控制系

各有优缺点,可以通过优势互补将两者结合使用。在基于模型的控制方法中,可以利用数据模型来处理难以建模部分或未知干扰;在数据驱动的控制方法中,可以利用机理模型产生的数据作为数据驱动控制器的初始样本训练集,或对数据驱动控制器的输出控制信号进行修正。控制系统的时变性和不确定性在机理模型中是显式表达的,而在数据模型中则是非显式或蕴涵的。鲁棒性的定义在基于模型的控制理论中已经比较完备,但在数据驱动的控制理论中以及两种模型混合使用时,如何界定云控制系统的鲁棒性问题还需进一步深入研究。

c)与云计算服务模式融合的工程化设计问题。以工业云控制系统为例,传统的工业自动化系统无论是在数据流向还是在体系结构方面都具有明显的层次化特征,且位于底部的控制层与各厂商的软硬件紧密耦合,因此现有的工业控制系统体系架构与云计算的服务模式背道而驰,无法将各功能模块直接迁移部署到云平台。云计算服务模式的实质是软件定义,软件定义的核心技术途径是硬件资源虚拟化和功能可编程,为解决云控制系统与云计算服务模式融合的工程化设计问题,(a)需要将控制设备的硬件资源抽象为虚拟资源,并将其部署到云端或边缘侧,实现核心控制层的软硬件解耦合;(b)将云控制系统的高可靠设计与云计算的容错和高可用技术有机结合,如虚拟机在线迁移、动态可扩展、故障自恢复等,提出满足云控制系统要求的服务质量指标与SLA;(c)需对本地控制任务进行重构设计,除控制任务并行处理与优化调度设计外,重构设计还包括数据存储、智能算法库、监控显示等内容,并构建合适的云控制系统部署模式组合与选择机制。

5 结束语

近年来,我国积极推进新型基础设施建设(即新基建),确定了我国科技创新和产业经济发展的未来走向。新基建的本质是建设信息数字化的基础设施,实质是通过5G、人工智能、工业互联网、物联网等技术,在数据全生命周期流动过程中构建数据驱动的价值链,形成纵横交错的物理空间网和信息空间网,在二者之间实现虚实交互和以虚实控的平行管控,解决各类社会复杂系统的全局协调和优化控制问题。云控制系统则是解决物理世界映射到信息空间“最后一公里”问题的关键技术,基于云控制系统的方法论、物理世界的系统动力学模型和运行规律可以在信息空间中精确地建模表示,实现物理实体和数字虚体之间的虚实映射。目前,关于云控制系统的研究仍处于起步阶段,还有许多关键的理论和实践问题需要发现并解决,但各种技术的融合发展为云控制系统的研究提供了清晰的思路 and 有效的手段,也将促进控制理论与方法的进一步发展。

参考文献:

- [1] 柴天佑. 自动化科学与技术发展方向[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 1923-1930. (Chai Tianyou. Development directions of automation science and technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 1923-1930.)
- [2] Zawra L M, Mansour H A, Eldin A T, et al. Utilizing the Internet of things (IoT) technologies in the implementation of industry 4.0 [C]//Proc of International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics. Cham: Springer, 2017: 798-808.
- [3] Klingenberg CkO, Borges M A V, Jr Antunes J A V. Industry 4.0 as a data-driven paradigm: a systematic literature review on technologies [J/OL]. Journal of Manufacturing Technology Management. (2019). <http://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>.
- [4] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667. (Hou Zhongsheng, Xu Jianxin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.)
- [5] Mahmoud M S, Xia Yuanqing. The interaction between control and computing theories: new approaches [J]. International Journal of Automation and Computing, 2017, 14(3): 254-274.

- [6] Xia Yuanqing, Qin Yongming, Zhai Dihua, *et al.* Further results on cloud control systems[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(7):073201.
- [7] 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 Yuanqing. Cloud control systems and their challenges[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(1):1-12.)
- [8] Răileanu S, Anton F, Borangiu T, *et al.* A cloud-based manufacturing control system with data integration from multiple autonomous agents[J]. *Computers in Industry*, 2018, 102(11):50-61.
- [9] Zhan Yufeng, Xia Yuanqing, Vasilakos A V. Future directions of networked control systems: a combination of cloud control and fog control approach[J]. *Computer Networks*, 2019, 161(10):235-248.
- [10] Lee J, Um C, Shin J, *et al.* Design and applications of agile factory AaaS architecture based on container-based virtualized automation control unit[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 151:622-629.
- [11] 黄莹, 卢秉恒, 赵万华. 云计算在智能机床控制体系中的应用探析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(8):210-216. (Huang Ying, Lu Bingheng, Zhao Wanhua. Application of cloud computing in intelligent machine tool control system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8):210-216.)
- [12] Sang Zhiqian, Xu Xun. Framework of a cloud-based CNC system[J]. *Procedia Cirp*, 2017, 63:82-88.
- [13] Schlechtendahl J, Kretschmer F, Sang Zhiqian, *et al.* Extended study of network capability for cloud based control systems[J]. *Robotics & Computer- Integrated Manufacturing*, 2017, 43(2):89-95.
- [14] Givechi O, Imtiaz J, Trsek H, *et al.* Control-as-a-service from the cloud: a case study for using virtualized PLCs[C]//Proc of the 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems. 2014.
- [15] Hegazy T, Hefeeda M. Industrial automation as a cloud service[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2015, 26(10):2750-2763.
- [16] Mahmoud M S. Networked control systems analysis and design: an overview[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41(3):711-758.
- [17] Kajti E, Papcun P, Liu Chao, *et al.* Cloud based cyber-physical systems: network evaluation study[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 42(10):100988.
- [18] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Yonggang. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1):138-162.
- [19] 关守平, 王梁. 云控制系统不确定性分析与控制器设计方法[J/OL]. *自动化学报*. [2019-10-16]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190529>. (Guan Shouping, Wang Liang. Uncertainty analysis of clouded control system with its controller design[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*. (2019-10-16). <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190529>.)
- [20] Lee K, Bhattacharya R. Stability analysis of large-scale distributed networked control systems with random communication delays: a switched system approach[J]. *Systems & Control Letters*, 85(11):77-83.
- [21] Popović N, Naumović M. Networked and cloud control systems-modern challenges in control engineering[J]. *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, 2018, 2(2):91-100.
- [22] Satyanarayanan M. The emergence of edge computing[J]. *Computer*, 2017, 50(1):30-39.
- [23] Pop P, Raagaard M L, Gutierrez M, *et al.* Enabling fog computing for industrial automation through time-sensitive networking(TSN)[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2):55-61.
- [24] Kaur K, Garg S, Aujla G S, *et al.* Edge computing in the industrial Internet of things environment: software-defined-networks-based edge-cloud interplay[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(2):44-51.
- [25] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息—物理融合系统若干关键问题综述[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(6):1149-1161. (Li Renfa, Xie Yong, Li Rui, *et al.* Survey of cyber-physical systems[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(6):1149-1161.)
- [26] Lopez J, Rubio J E. Access control for cyber-physical systems interconnected to the cloud[J]. *Computer Networks*, 2018, 134(4):46-54.
- [27] Wang Lihui, Törngren M, Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 37(10):517-527.
- [28] Monostori L, Kádár B, Bauernhansl T, *et al.* Cyber-physical systems in manufacturing[J]. *Cirp Annals Manufacturing Technology*, 2016, 65(2):621-641.
- [29] Leitão P, Colombo A W, Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: prototype implementations and challenges[J]. *Computers in Industry*, 2015, 81(9):11-25.
- [30] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. *通信学报*, 2019, 40(6):160-176. (Huang Tao, Wang Shuo, Huang Yudong, *et al.* Survey of the deterministic network[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(6):160-176.)
- [31] Kim W, Sung M. Standalone OPC UA wrapper for industrial monitoring and control systems[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:36557-36570.
- [32] Dürkop L, Imtiaz J, Trsek H, *et al.* Using OPC-UA for the autoconfiguration of real-time Ethernet systems[C]//Proc of the 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics. 2013:248-253.
- [33] Schriegel S, Kobzan T, Jasperneite J. Investigation on a distributed SDN control plane architecture for heterogeneous time sensitive networks[C]//Proc of the 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018:1-10.
- [34] 徐泉, 王良勇, 刘长鑫. 工业云应用与技术综述[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(8):1887-1901. (Xu Quan, Wang Liangyong, Liu Changxin. Industrial applications, technologies, challenges and trends for industrial cloud[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(8):1887-1901.)
- [35] Wu Dazhong, Rosen D W, Wang Lihui, *et al.* Cloud-based design and manufacturing: a new paradigm in digital manufacturing and design innovation[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 59(2):1-14.
- [36] Wu Dazhong, Gree M J, Rosen D W, *et al.* Cloud manufacturing: strategic vision and state-of-the-art[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(4):564-579.
- [37] Horn C, Krüger J. Feasibility of connecting machinery and robots to industrial control services in the cloud[C]//Proc of the 21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016:1-4.
- [38] Goldschmidt T, Hauck-Stattelmann S, Malakuti S, *et al.* Container-based architecture for flexible industrial control applications[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2018, 84(3):28-36.
- [39] Xavier B, Ferreto T, Jersak L. Time provisioning evaluation of kvm, docker and unikernels in a cloud platform[C]//Proc of the 16th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2016:277-280.
- [40] Xue Yingfei. TideDB: a distributed, scalable time series database[J]. *Internet of Things and Cloud Computing*, 2017, 5(3):59-63.
- [41] Xia Chongkun, Zhang Yunzhou, Wang Lei, *et al.* Microservice-based cloud robotics system for intelligent space[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 110(11):139-150.
- [42] Ma Liang, Xia Yuanqing, Ali Y, *et al.* Engineering problems in initial phase of cloud control system[C]//Proc of the 36th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:7892-7896.
- [43] Mubeen S, Nikolaidis P, Didic A, *et al.* Delay mitigation in offloaded cloud controllers in industrial IoT[J]. *IEEE Access*, 2017, 5:4418-4430.
- [44] Sun Wei, Lyu Yunfeng, Hu Mengyun. Robust controller design for the cloud-based robotic visual servo system with time-delay uncertainty[C]//Proc of the 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015:2384-2389.
- [45] Ohnishi N, Takanaka T, Nakatani H. Load balancing of processing servers for cloud control system[J]. *Electronics and communications in Japan*, 2016, 99(10):71-80.
- [46] 王彩璐, 陶跃钢, 杨鹏, 等. 云控制系统并行任务分配优化算法与并联控制[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11):1973-1983. (Wang Cailu, Tao Yuegang, Yang Peng, *et al.* Parallel task assignment optimization algorithm and parallel control for cloud control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11):1973-1983.)
- [47] Bloch H, Hoernicke M, Hensel S, *et al.* A microservice-based architecture approach for the automation of modular process plants[C]//Proc of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:1-8.
- [48] 武义涵, 黄翌, 张颖, 等. 一种基于模型的云计算容错机制开发方法[J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(1):138-154. (Wu Yihan,

- Huang Gang, Zhang Ying, *et al.* A model-based fault tolerance mechanism development approach for cloud computing [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(1):138-154.)
- [49] 杨娜,刘靖. 面向云应用系统的容错即服务优化提供方法[J]. *软件学报*, 2019, 30(4):1191-1202. (Yang Na, Liu Jing. Optimized fault tolerance as services provisioning for cloud applications[J]. *Journal of Software*, 2019, 30(4):1191-1202.)
- [50] Okwudire C E, Lu Xiang, Kumaravelu G, *et al.* A three-tier redundant architecture for safe and reliable cloud-based CNC over public internet networks[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 62(4):101880.
- [51] Wahler M, Gamer T, Kumar A, *et al.* FASA: a software architecture and runtime framework for flexible distributed automation systems[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2015, 61(2):82-111.
- [52] He Xiao, Ju Yamei, Liu Yang, *et al.* Cloud-based fault tolerant control for a DC motor system[J]. *Journal of Control Science and Engineering*, 2017(3):1-10.
- [53] Ali M, Khan S U, Vasilakos A V. Security in cloud computing: opportunities and challenges[J]. *Information Sciences*, 2015, 305(6):357-383.
- [54] Hasan M, Goraya M S. Fault tolerance in cloud computing environment: a systematic survey [J]. *Computers in Industry*, 2018, 99(8):156-172.
- [55] 刘强,卓浩,郎自强,等. 数据驱动的工业过程运行监控与自优化研究展望[J]. *自动化学报*, 2018, 44(11):1944-1956. (Liu Qiang, Zhuo Jie, Lang Ziqiang, *et al.* Perspectives on data-driven operation monitoring and self-optimization of industrial processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11):1944-1956.)
- [56] 黄爽,黄必清. 云制造平台安全体系架构[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4):851-861. (Huang Shuang, Huang Bqing. Security architecture for cloud manufacturing platform [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4):851-861.)
- [57] Zhang Zhiwei, Chen Xiaofeng, Ma Jianfeng, *et al.* SLDS: secure and location-sensitive data sharing scheme for cloud-assisted cyber-physical systems[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 108(7):1338-1349.
- [58] Ali Y, Zhen Shen, Zhu Fenghua, *et al.* Solutions verification for cloud-based networked control system using Karush-Kuhn-Tucker conditions [C]//Proc of Chinese Automation Congress. 2018:1385-1389.
- [59] Cai Huili, Liu Xiaofeng, Cangelosi A. Security of cloud intelligent robot based on RSA algorithm and digital signature[C]//Proc of IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. 2019:1453-1456.
- [60] Xu Zhiheng, Zhu Quanyan. Secure and resilient control design for cloud enabled networked control systems[C]//Proc of the 1st ACM Workshop on Cyber-Physical Systems-Security and/or Privacy. New York: ACM Press, 2015:31-42.
- [61] Yuan Huanhuan, Xia Yuanqing, Lin Min, *et al.* Dynamic pricing-based resilient strategy design for cloud control system under jamming attack [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(1):111-122.
- [62] Ali Y, Xia Yuanqing, Liang Ma, *et al.* Secure design for cloud control system against distributed denial of service attack[J]. *Control Theory and Technology*, 2018, 16(2):14-24.
- [63] Ali Y, Xia Yuanqing, Liang Ma. A stabilizing architecture for cloud control system against distributed denial of service (DDoS) attack [C]//Proc of Chinese Automation Congress. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:3423-3428.
- [64] Ortiz J S, Ramirez D R, Alamo T, *et al.* Offset free data driven control: application to a process control trainer[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2019, 13(18):3096-3106.
- [65] Krumeich J, Werth D, Loos P. Prescriptive control of business processes[J]. *Business & Information Systems Engineering*, 2016, 58(8):261-280.
- [66] 池荣虎,侯忠生,黄彪. 间歇过程最优迭代学习控制的发展:从基于模型到数据驱动[J]. *自动化学报*, 2017, 43(6):917-932. (Chi Ronghu, Hou Zhongsheng, Huang Biao. Optimal iterative learning control of batch processes: from model-based to data-driven[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(6):917-932.)
- [67] 王飞跃,魏庆来. 智能控制:从学习控制到平行控制[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(7):939-948. (Wang Feiyue, Wei Qinglai. Intelligent control: from learning control to parallel control[J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(7):939-948.)
- [68] 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 Yuanqing, Yan Ce, Wang Xiaojing, *et al.* Intelligent transportation cyber-physical cloud control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1):132-142.)
- [69] Stanley G M. Big data approximating control (BDAC): a new model-free estimation and control paradigm based on pattern matching and approximation[J]. *Journal of Process Control*, 2018, 67(7):141-159.
- [70] Moe S, Rustad A M, Hanssen K G. Machine learning in control systems: an overview of the state of the art [C]//Proc of the 38th International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence. Cham: Springer, 2018:250-265.
- [71] Goldin E, Feldman D, Georgoulas G, *et al.* Cloud computing for big data analytics in the process control industry [C]//Proc of the 25th Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:1373-1378.
- [72] Amini S, Gerostathopoulos I, Prehofer C. Big data analytics architecture for real-time traffic control [C]//Proc of the 5th IEEE International Conference on Models & Technologies for Intelligent Transportation Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:710-715.
- [73] 景轩,姚锡凡. 大数据驱动的云雾制造体系架构[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(9):2119-2139. (Jing Xuan, Yao Xifan. Big data driven cloud-fog manufacturing architecture [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(9):2119-2139.)
- [74] Khan A R, Schioler H, Kulahci M. Big data analytics for industrial process control [C]//Proc of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:1-8.
- [75] Xia Dawen, Li Huaqing, Wang Binfeng, *et al.* A MapReduce-based nearest neighbor approach for big-data-driven traffic flow prediction [J]. *IEEE Access*, 2016, 4:2920-2934.

(上接第 页)

- [39] Jenkinson G, Abante J, Feinberg A P, *et al.* An information-theoretic approach to the modeling and analysis of whole-genome bisulfite sequencing data[J]. *BMC Bioinformatics*, 2018, 19(1): article No. 87.
- [40] Warden C D, Heehyoung L, Tompkins J D, *et al.* COHCAP: an integrative genomic pipeline for single-nucleotide resolution DNA methylation analysis[J]. *Nucleic Acids Research*, 2013, 41(11): e117.
- [41] Wang Zhen, Li Xianfeng, Jiang Yi, *et al.* swDMR: a sliding window approach to identify differentially methylated regions based on whole genome bisulfite sequencing[J]. *Plos One*, 2015, 10(7): e0132866.
- [42] Jühling F, Kretzmer H, Bernhart S H, *et al.* Metilene: fast and sensitive calling of differentially methylated regions from bisulfite sequencing data[J]. *Genome Research*, 2016, 26(2):256-262.
- [43] Chen Yunshun, Pal B, Visvader J E, *et al.* Differential methylation analysis of reduced representation bisulfite sequencing experiments using edgeR[J]. *F1000res*, 2018, 6:2055.
- [44] Pedersen B S, Schwartz D A, Yang I V, *et al.* Comb-p: software for combining, analyzing, grouping and correcting spatially correlated P-values[J]. *Bioinformatics*, 2012, 28(22):2986-2988.
- [45] Robinson M D, Kahraman A, Law C W, *et al.* Statistical methods for detecting differentially methylated loci and regions[J]. *Front Genet*, 2014, 5: article No. 324.
- [46] Blume M, Emery V J, Griffiths R B. Ising model for the λ transition and phase separation in He³-He⁴ mixtures[J]. *Physical Review A*, 1971, 4(3):1071-1077.
- [47] Jenkinson G, Pujadas E, Goutsias J, *et al.* Potential energy landscapes identify the information-theoretic nature of the epigenome [J]. *Nat Genet*, 2017, 49(5):719-729.
- [48] Krueger F, Andrews S R. Bismark: a flexible aligner and methylation caller for bisulfite-seq applications [J]. *Bioinformatics*, 2011, 27(11):1571-1572.