

云控制系统及其面临的挑战

夏元清¹

摘要 本文提出的云控制系统 (Cloud control systems, CCSs) 是对之前的网络化控制系统 (Networked control systems, NCSs) 的进一步扩展. 目前, 物联网 (Internet of things, IOT) 已经成功应用于实际中, 网络化控制技术在其中发挥了关键作用. 与此同时, 云计算的迅速发展为大数据存储与处理、控制器设计和控制系统性能优化提供了一个完美的平台. 可以预见, 虽然当前云控制技术的研究和应用还存在许多挑战, 但在不久的将来, 云控制系统的深入研究将对控制理论的发展和各种实际应用起到积极推动作用.

关键词 云控制系统, 网络化控制系统, 云计算, 信息物理系统, 大数据

引用格式 夏元清. 云控制系统及其面临的挑战. 自动化学报, 2016, 42(1): 1–12

DOI 10.16383/j.aas.2016.c150541

Cloud Control Systems and Their Challenges

XIA Yuan-Qing¹

Abstract This paper proposes the concept of cloud control systems (CCSs), which is an extension of networked control systems (NCSs). Internet of things (IOT) has been applied successfully in practice and the technology of NCSs has played a key role in IOT. At the same time, cloud computing is developing rapidly, which provides a perfect platform for big data storage and processing, controller design and performance optimization. Though there are still lots of challenges to be solved, the research on cloud control systems will give new contributions to both the control theory and applications in the near future.

Key words Cloud control systems, networked control systems, cloud computing, cyber-physical systems, big data

Citation Xia Yuan-Qing. Cloud control systems and their challenges. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(1): 1–12

在过去十年中, 网络技术取得显著发展, 越来越多的网络技术应用于控制系统^[1–9]. 这种通过网络通信信道形成闭环的控制系统被称为网络化控制系统 (Networked control systems, NCSs), 它是控制理论的一个新领域. 一般而言, 被控对象、控制器、传感器和执行器通过网络连接, 从而使得被控对象能够通过通信信道被远程监控和调整. 例如, 在基于因特网的控制系统中, 控制系统能随时随地获取被控对象的数据, 并对系统变化做出响应. 其框图如图 1 所示. 目前, 网络化控制系统已经在实际中得以广泛应用, 如文献 [9–16] 及其参考文献所述.

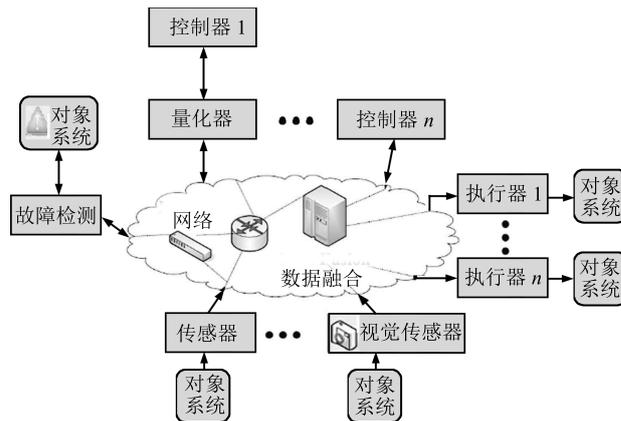


图 1 网络化控制系统

Fig. 1 Networked control systems

网络化控制理论在物联网技术的快速发展中发挥了关键作用. 物联网利用网络化控制技术来实现物物互联、互通、互控, 进而建立了高度交互和实时响应的网络环境. 图 2 给出了物联网的应用示例. 一般情况下, 数据的采集处理在物联网中处于非常重要的地位, 因为设计者要获得物联网中每个对象的精确物理模型是困难的, 甚至是不可能的. 我们可以通过传感器技术, 检测对象物理状态的变化, 获取

收稿日期 2015-08-26 录用日期 2015-10-10
Manuscript received August 26, 2015; accepted October 10, 2015
国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB720000), 国家自然科学基金 (61225015, 61321002) 资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB720000), National Natural Science Foundation of China (61225015, 61321002)
本文责任编辑 王飞跃
Recommended by Associate Editor WANG Fei-Yue
1. 北京理工大学自动化学院复杂系统智能控制与决策重点实验室 北京 100081
1. School of Automation, Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

各种测量值, 最终产生需要储存的海量数据. 随着计算机科学 (特别是在精确检测、可靠存储以及快速计算等方面) 的发展, 有效获取并处理海量数据的技术在不断提高. 同时, 物联网中的对象和设备通常与相应的数据库和网络 (例如互联网) 连接. 信息通过这些网络进行传输, 但传递过程中可能会遭受间歇性丢失或延迟、带宽限制、异步和其他不可预知因素的影响. 这些因素会导致系统性能恶化, 甚至导致闭环系统不稳定. 近年来, 控制理论在相关方面得到了突破并在实际中得到了应用^[3-18].

伴随着物联网的发展, 能够获取到的数据将会越来越多, 控制系统必须能够处理这些海量数据. 这些数据来自移动设备、视觉传感器、射频识别阅读器和无线网络传感器等传感装置感知到的广泛存在的信息. 控制系统中的海量数据将会增加网络的通信负担和系统的计算负担. 因此, 在这种情况下传统的网络化控制技术难以满足高品质和实时控制的要求. 为了解决这个问题, 本文提出一个新概念——云控制系统 (Cloud control systems, CCSs), 它结合了网络化控制系统和云计算技术的优点. 在这个新的控制拓扑结构中, 控制的实时性因为云计算的引入得到保证, 在云端利用深度学习等智能算法, 结合

网络化预测控制、数据驱动控制等方法实现系统的自主智能控制.

目前, 基于云计算的控制系统在一些领域得到了初步应用. 2010 年, 在由电气和电子工程师协会主办的 Humanoids 机器人大会上, Google 的机器人科学家兼卡内基梅隆大学机器人研究所的兼职教授 Kuffner 提出了“云机器人”的概念: 将信息资料存储在云端的服务器上, 并让机器人在必要时通过联网的方式从云端获得这些资料^[19]. 其应用范围包括自主移动机器人、云医疗机器人、服务机器人、工业机器人等, 成功的应用案例有 RoboEarth、KnowRob、RoboBrain、“可佳”智能服务机器人. Ericson 等提出运用云计算技术 Granules 分析脑电信号来与计算机进行交互, 进而允许用户进行操作, 如键盘输入或是控制轮椅移动等^[20]. 实验结果表明, 在脑电图数据流分类上, 应用云计算技术的方法可以得到更好的分类效果, 并能够满足实时性要求. 特别地, 近年来无人机技术受到人们越来越多的关注, 随着颠覆未来的无人机大量涌现, 如何确保无人机在空域的安全以及空域本身的安全是现在面临的一个难题, 就像在地面上一样, 交通管制不可避免. 最近, 美国国家航空航天局与无人机系统应用开发平台

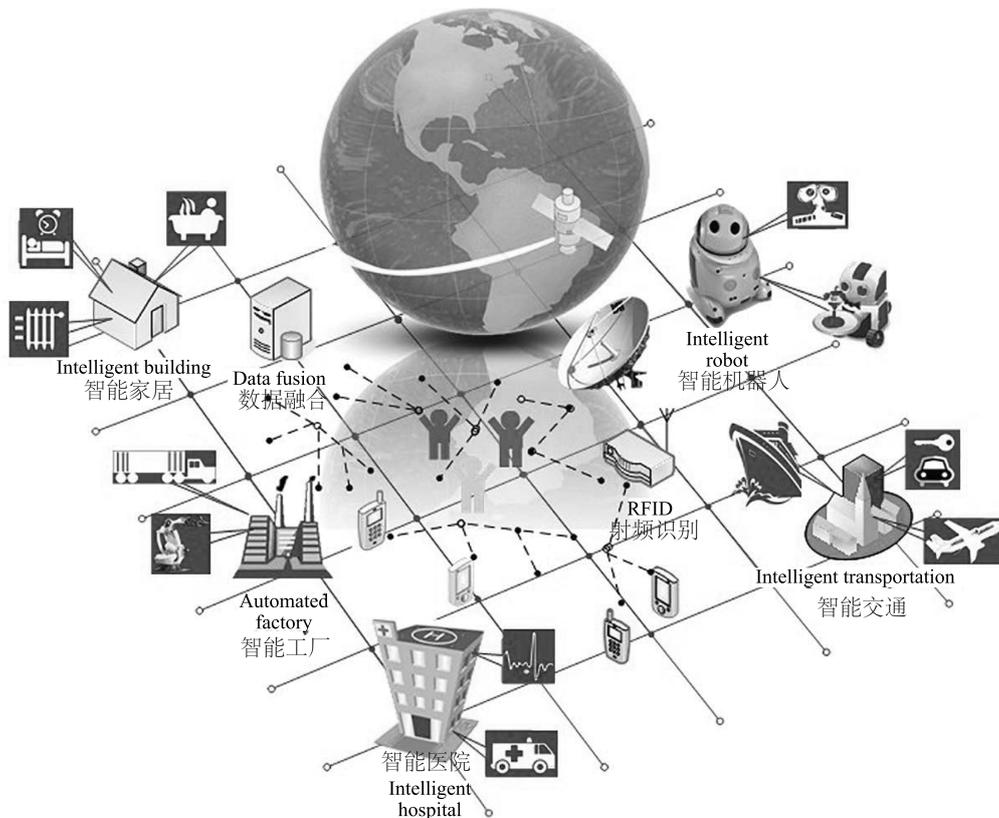


图 2 物联网

Fig. 2 Internet of things

初创企业 Airware 建立了合作关系, 准备用四年的时间开发无人机空中交通管制系统. 由于无人机数量巨大, 个体之间、个体与环境之间交互复杂, 对无人机的控制不仅需要强大的信息存储和处理能力, 还需要统筹管理, 研究人员将这套管制系统布置在云端, 智能无人机通过互联网与云端相连, 从而拥有实时通讯、导航和监控能力, 无人机可以相互协同规划航线, 还能在飞行中躲避障碍, 这也是云控制系统潜在的应用前景. 总的来说, 云计算的引入使得控制系统的结构越来越复杂, 功能越来越强大, 但面临的问题也越来越多, 这给云控制系统的研究与应用带来了新的挑战.

本文的其余部分安排如下: 首先, 给出一个重要的理论基础—网络化控制系统的简要概述及其应用, 包括基于模型的网络化控制系统、基于数据驱动的网络化控制系统、网络化多智能体系统和复杂系统的控制; 然后, 提出云控制系统的一个雏形和协同云控制的框架; 接下来阐述了云控制系统的优势; 最后给出了云控制系统面临的挑战.

1 基于模型的网络化控制系统

目前, 基于模型的网络化控制系统研究 (特别是线性时不变系统的研究) 已经取得了丰富的研究成果. 考虑下面的离散动态系统 S :

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), w(k)) \quad (1)$$

$$y(k) = g(x(k), u(k), v(k)) \quad (2)$$

其中, $x(k)$ 是系统状态, $u(k)$ 是系统输入, $y(k)$ 是系统输出, $x(k)$, $u(k)$ 和 $y(k)$ 对应相应的有限维数; $f(x(k), u(k), w(k))$ 和 $g(x(k), u(k), v(k))$ 分别表示被控对象的动力学模型和输出模型 (线性或非线性). $w(k)$ 是未知的过程干扰, $v(k)$ 是未知的测量噪声.

研究人员提出了很多方法来解决与网络化控制系统相关的问题, 已经证明了网络化预测方法对具有网络诱导时延和数据丢包的网络化控制系统是非常有效的^[3-4]. 图 3 为针对式 (1) 和式 (2) 组成的系统设计的反馈控制方案. 值得注意的是, 一方面, 为了按顺序测量数据, 需要在各控制器的节点处设置缓存器; 另一方面, 通过使用卡尔曼滤波器, 可以获得控制器节点的状态估计和状态预测:

$$\hat{x}(k|k) = KF(S, \hat{u}(k-1|k-1), y(k)) \quad (3)$$

$$\hat{x}(k+i|k) = KF(S, \hat{u}(k|k), y(k)), \quad i = 1, 2, \dots, N_1 \quad (4)$$

$$\hat{u}(k+i|k) = K(k+i)\hat{x}(k+i|k), \quad i = 1, 2, \dots, N_1 \quad (5)$$

其中, N_1 表示有限时域, KF 表示卡尔曼滤波表达式的紧凑形式, $K(k+i)$ 是时变的卡尔曼滤波器增益^[4]. 考虑到未知的网络传输延时不可避免地存在于前向信道 (从控制器到执行器, CAC) 和反馈信道 (从传感器到控制器, SCC), 为此, 文献 [3-4] 提出了一种包括预测发生器和网络延迟补偿器的网络化预测控制方法. 前者用来产生一组未来时刻的控制预测值, 后者用来补偿未知的随机网络延迟. 假设该网络可以在同一时间传送一组数据, 在 k 时刻将预测控制序列打包并通过网络发送到执行器端. 然后, 补偿器会从执行器端收到的控制序列中选择最新的控制值.

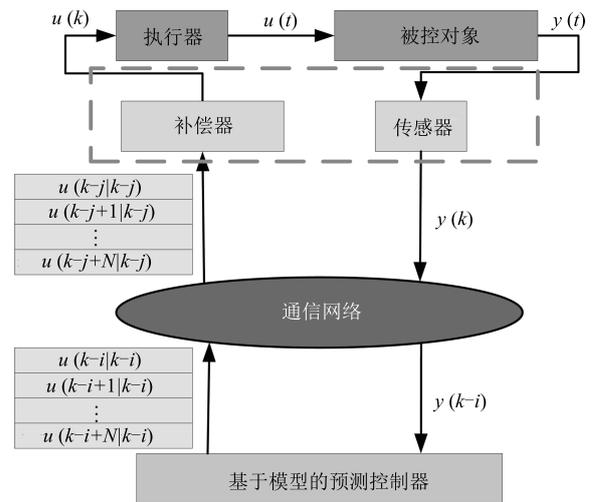


图 3 基于模型的网络化控制系统

Fig. 3 Model-based networked control systems

例如, 当 SCC 和 CAC 中的时间延迟分别为 0 和 k_i 时, 执行器端接收到的预测控制序列如下:

$$\begin{aligned} & [u_{t-k_1|t-k_1}^T, u_{t-k_1+1|t-k_1}^T, \dots, u_{t|t-k_1}^T, \dots, u_{t+N-k_1|t-k_1}^T]^T \\ & [u_{t-k_2|t-k_2}^T, u_{t-k_2+1|t-k_2}^T, \dots, u_{t|t-k_2}^T, \dots, u_{t+N-k_2|t-k_2}^T]^T \\ & \vdots \\ & [u_{t-k_t|t-k_t}^T, u_{t-k_t+1|t-k_t}^T, \dots, u_{t|t-k_t}^T, \dots, u_{t+N-k_t|t-k_t}^T]^T \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 在 t 时刻选择控制序列 $u_{t|t-k_i}$, $i = 1, 2, \dots, t$, 作为对象的控制输入, 而网络延迟补偿器的输出, 即执行器的输入为

$$u_t = u_{t-\min\{k_1, k_2, \dots, k_t\}} \quad (7)$$

实际上, 使用本节所提出的网络化预测控制方

法, 可以使得具有网络延迟的闭环系统与无网络延迟的闭环系统有着相类似的控制性能.

控制信号的传输过程也可以描述如下, 控制器将数据包发送到执行器端:

$$\{u(k+i|k)|i=0,1,\dots,N_1\} \quad (8)$$

在 k 时刻, 执行器选择一个合适的控制信号作为被控动态系统的实际输入:

$$u(k) = u(k|k-i) \quad (9)$$

其中, $i = \arg \min_i \{u(k|k-i)\}$ 是可获取的. 文献 [3-4] 给出了更详细的稳定性证明.

2 基于数据驱动的网络化控制系统

在传统的控制系统框架中, 被控对象的数学模型是控制和监控的前提. 然而系统建模过程中将不可避免地引入建模误差; 对于复杂的系统, 由于过程复杂或者涉及变量多, 往往无法建立精确的数学模型甚至无法建模, 我们可以利用的是通过传感技术测得的系统状态或者输出, 这些数据往往包含有用的信息. 与传统的控制方法不同, 研究人员为此提出了数据驱动控制方法, 目前, 该方法已成功地应用在工业过程控制领域以及复杂系统中. 由于在大部分实际应用中, 只有数据可以通过网络传输并被控制器和执行器接收, 所以数据驱动的方法特别适用于网络化控制系统.

下面, 我们将介绍基于数据驱动的网络化控制系统的主要思想. 基于数据驱动的网络化控制系统的典型控制流程图如图 4 所示. 在该控制系统中, 应用子空间投影方法生成了预测控制信号. 一般来说, 基于数据驱动的网络化控制系统和基于模型的控制系统之间的唯一区别就是控制器的不同. 在基于数据驱动的网络化控制系统中, 传感器通过网络将数据 (包括之前的输入和输出) 发送到控制器, 然后控制器将应用如上描述的数据驱动预测控制算法产生一个预测控制输入序列, 将这些控制序列通过网络传输到执行器端的缓存器上. 最后, 根据式 (8) 和式 (9) 中所描述的网络化预测控制方法, 执行器将选择合适的控制输入. 由此可知, 在基于数据驱动的控制结构中, 控制输入可以直接获得, 与模型无关, 这显然与文献 [21] 中基于模型的网络化控制方法是不同的.

一些实验已经表明了该算法的有效性. 但是, 在这个新的领域中, 这种算法还存在许多问题, 例如, 在数据驱动的控制方法下, 如何根据已接收到的数据来区分线性系统和非线性系统? 如何分析基于数据驱动的非线性系统的稳定性? 如果有数据丢失或时间延迟发生, 如何计算间歇性观测的子空间? 关

于基于数据驱动的网络化预测控制系统的更多细节, 可参见文献 [22].

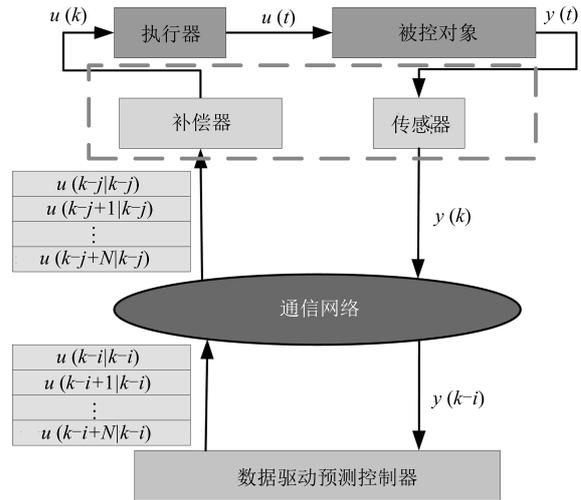


图 4 基于数据驱动的网络化控制系统

Fig. 4 Data-driven networked control systems

3 网络化多智能体系统

在网络化控制系统研究初期, 人们关注的主要是网络连接存在于系统内部的单个对象. 近年来, 关于通过网络连接的多对象的研究也取得了丰硕成果, 特别是网络化多智能体控制系统, 它更注重一般化的模型设计, 其中每个智能体都有自己独特的动力学模型, 而这对其他的智能体是未知的^[23]. 网络中的智能体根据它们之间的信息交换来更新它们的状态. 如图 5 所示, 在网络化多智能体系统中有许多值得关注的问题, 例如, 聚合、集群、协调、一致性和编队等. 如果每个智能体在相同的状态下运行, 就意味着多智能体系统达成一致. 计算机科学中一致性问题的研究有着很长的历史, 相关成果已经成为了分布式计算和分布式控制的基础^[24]. 一致性协议是基于相邻状态反馈的分布式控制策略, 该反馈使多智能体系统状态达到一致性. 根据一致性的一般意义, 系统状态分量必须在有限时间内收敛或渐近到达一个平衡点. 在平衡点处, 所有智能体都有相同的状态值, 该值处于初始值的最小值和最大值之间. 近年来, 有关一致性问题的研究已经取得了大量成果^[25-27].

协同控制是目前一个活跃的研究领域, 它具有更实际的意义^[28]. 例如, 在我们吃食物的时候, 会用眼睛帮助定位食物, 用鼻子嗅食物, 用手把食物放到嘴里, 用下颌肌肉帮助牙齿咀嚼食物. 这些活动都是在协同的方式下进行的, 如果这些活动中任何一个动作出现失误, 那么身体将得不到营养. 现在, 更多研究者致力于多机器人系统的研究, 它可以用来提

高系统效率. 相比于单个自主机器人或一组无协作的机器人, 多机器人系统具有更广的空间分布、功能分布和时间分布. 多智能体系统的协同控制方法还包括领航者-跟随者方法、基于行为的方法和虚拟结构的方法等; 在领航者-跟随者方法中, 一个或多个智能体被选作领航者而其他智能体作为跟随者.

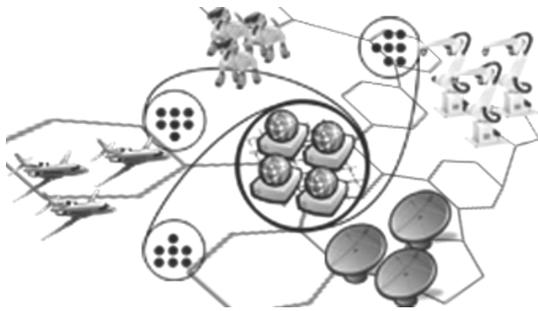


图 5 多智能体系统的控制

Fig. 5 Control of multi-agent systems

协同控制中, 智能体编队控制问题也是一个热门的研究课题^[29]. 在多机器人、航天器、无人飞行器的编队控制中, 移动的自主智能体常常被看作刚体或质点. 多智能体的编队控制已经得到越来越多的关注, 可应用于例如搜索和救援任务、侦察行动、森林火灾探测、监视和多导弹攻击^[30]. 除此之外, 基于智能体的智能交通控制研究也取得了重要进展^[31-33].

随着软件、硬件和其他先进技术的发展, 一种通过计算元素的协作来实现物理实体控制的系统——信息物理系统 (Cyber-physical systems, CPSs) 应运而生, 如图 6 所示, 该系统连接了物理和数字世界模型. 目前, 有关信息物理系统的研究旨在整合物理和计算模型, 使得整体系统的性能优于两个分离模型的性能^[34]. 在反馈控制系统的背景下, 物理系统的



图 6 信息物理系统

Fig. 6 Cyber-physical systems

目标 (如抗干扰性、跟踪精度等) 被转换为执行器命令, 从而使物理空间的参考轨迹和实际轨迹之间的误差最小化.

4 复杂系统的控制

到目前为止, 无论是对复杂系统中复杂性的精确定义还是基本的概念认识, 都没有达成共识. 从不同出发点, 不同机构或学者提出了不同的复杂系统的定义. 例如, 一个复杂系统可以指由相互关联的部分组成的系统, 它可以作为一个整体表现出一个或多个属性 (在可能属性间的行为), 而它各个部分的属性却不明显^[35]. 在文献 [36] 中, 复杂系统被认为是由大量的非线性模块组成的自然或社会系统. 简单地说, 许多复杂系统的模型难以用公式表达且状态不确定, 这也是复杂系统的主要特征之一. 其他特征还包括非线性、组件本身的复杂性、组件之间的强耦合、正反馈和负反馈共存等等. 复杂系统可能是开环的, 它们可以与外界环境交换信息, 在此过程中, 它们可以自主地修改其内部结构和活动模式, 这都使得该系统变得灵活, 并且很容易适应外部条件的变化. 然而, 复杂系统最显著的特点是, 人们不能仅从已知的系统结构和各个元素之间的相互作用获得或预测控制输入. 因此, 通常需要从不同角度来描述复杂系统. 系统结构和行为的一些特征属性通常被称为复杂性, 即幂次法则、自组织、集体效应和噪声的共存、可变性和适应性、层次结构、尺度不变性、自组织临界性和高度最优化容差.

图 7 展示了复杂系统的组成. 如图所示, 许多实际系统可以被称为复杂系统, 例如气候系统、蚁群、人类的经济和社会结构, 甚至是生物, 包括人类以及现代能源或电信基础设施等等. 此外, 多智能体网络化控制系统也可以被看作是一个典型的复杂系统, 每个智能体是复杂系统的一个元素. 对于这类复杂系统, 由于其结构复杂, 机理复杂, 所需处理的信息量巨大, 传统的控制系统理论与方法已经无法对其进行有效的分析与控制.

然而, 一般来说, 现有的稳定性理论仅限于反馈控制, 完成局部调节和全局行为. 在当前阶段, 现有的方法无法直接应用于复杂系统的稳定性中, 特别是互联系统. 众所周知, 基于李雅普诺夫的稳定性理论和它的许多扩展已经成功地应用在各种各样的闭环系统当中, 如连续、离散、脉冲、混合和时滞系统. 而工程科学采取了另一种观点, 强调外部因素的影响 (如输入、干扰和互联) 和交叉联系. 这种观点把系统看作是具有输入和输出的开环系统, 其将输入、输出和其他信号在扩展的函数空间中进行分析. 对于数学家和物理学家而言, 大量关于开环系统的理论研究仍然是他们的主要兴趣所在^[37].

与李雅普诺夫理论相关的稳定性分析技术(或称为能量函数方法)已经得到了很好的发展,当系统受到外界扰动后这种方法依然可以给出相应的稳定区域^[38].更高层次的复杂系统仍然迫切需要新的稳定性分析方法与技术.在电路理论中,一个更前沿的方法——利用函数分析来表述输入输出行为,这种方法在电子工程领域取得了一定的结果^[39].近期有关复杂系统更加严格的结果主要是利用李雅普诺夫理论^[40-41].然而,仍然存在许多复杂系统的现象不能用李雅普诺夫理论进行分析或证明.

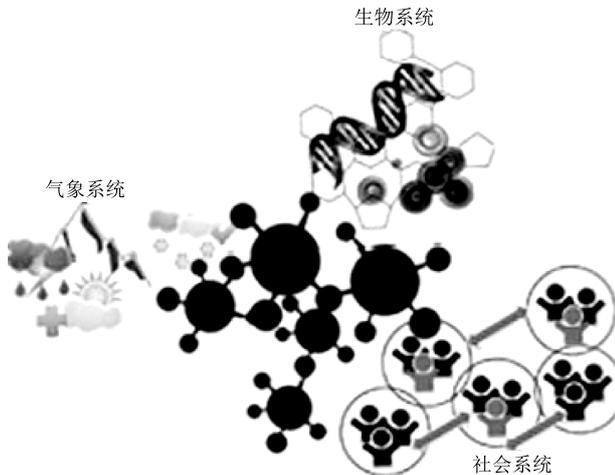


图 7 复杂系统的组成

Fig. 7 Control of complex systems

5 云控制系统

在搜索引擎中检索 Cloud control (云控制)一词,可以发现 Cloud control 最早被澳大利亚悉尼蓝山的一个摇滚乐队用作自己的名称.本文提出的新概念也采用了这个名称^[1],这与乐队的名称的意义完全不同.新技术的发展,特别是软硬件的巨大创新,为提高计算性能和实现分布式计算提供了基础.云计算在互联网中的应用就是一个例证.如今,云计算与其说是一种产品,不如说是一种服务方式.一般来说,云计算可以看作是访问互联网上远端计算站点渐趋便捷的衍生物,在互联网协议下,为互联网服务提供了一种新的补充、消费和交付模型^[42],通常包括动态可扩展的虚拟化资源^[43-44].在实际系统中,云计算系统提供了一个可配置资源的共享池,其中包括计算、软件、数据访问和存储的服务,终端用户无需知道服务提供者的物理位置和具体配置就能进行使用^[45].在这个系统中,电脑和其他设备通过网络提供了一种服务,使用户能够通过网络访问和使用,进行资源共享、软件使用和信息读取等,就如同这些设备安装在本地^[46].云计算系统的处理能力不断提高,可以减少用户终端的处理负担,最终使用

户终端简化成一个单纯的输入输出设备,并能够按需购买云计算系统的强大计算能力.

云控制系统综合了云计算的优势、网络控制系统的先进理论和其他近期发展的相关结果,为解决复杂系统的控制问题提供了可能,它将会在工业领域和其他相关领域展现出巨大的应用价值.图 8 描述了云控制系统的结构.



图 8 云控制系统

Fig. 8 Cloud control systems

在云控制系统中,随着系统规模的增大,广泛存在的感知移动设备、测量工具(遥感观测)、软件日志、音视频输入设备、射频识别器和无线网络传感器等都将带来越来越多的数据^[47].为了描述这类海量数据,出现了一个新的概念——大数据,其指的是数据集的集合^[48].然而,现有的传统数据库管理或处理工具难以直接应用于这个庞大复杂的集合.从随机的观点来看,根据大数定律,当有足够多的随机数据时,会出现一些有用的确定性结论.然而,对大数据的获取、存储、检索、共享、传输、分析和可视化仍然存在许多的挑战.在云控制系统中,大数据存储在云端,云计算系统利用深度学习等智能算法进行处理,生成云控制系统的控制信号,如调度计划、预测控制序列及其他有用的信息,从而使得系统实现自主智能控制.由于人们对复杂系统的内部关系了解不深,同时缺乏有效的工具,因此很难实现有效的控制.云控制系统将为我们提供强大的工具来控制之前难以处理的复杂系统.

5.1 云控制系统的雏形

本节中,我们提出了一个云控制系统的雏形,这个雏形的基本假设如下:

假设 1. 采用广播域模型,其中所有的节点都可以在数据链路层相互发送信息.

假设 2. 广播域中所有节点都是智能的,足以承担云控制任务,假定它们的计算能力是相当的,可用的计算资源也会发生不可预知的变化.

假设 3. 网络传输是不理想的,在传输过程中存在有界时延和数据丢失.

假设 4. 任何两个特定节点之间的网络时延和丢包规律可以通过分析获得.

假设 5. 位于节点 P 的被控对象可以是各种物理装置. 位于节点 CT 的控制器既是云控制任务的起始点, 也是云控制的任务管理节点.

虽然被控对象 P 可以是任何类型的装置, 在这里它被假定成线性离散时间动态系统, 从而容易利用现有的网络化控制系统知识对云控制系统的稳定性进行分析. 另外, 假定执行器和传感器的时间步长相同, 记为 T . 这里所提出的云控制系统雏形可以分为两个阶段: 初始阶段 (NCS 阶段) 和云控制阶段.

在云控制任务的初始阶段, 控制系统被初始化为网络化控制系统, 包括控制器 CT 和被控对象 P . 在这个云控制雏形中, 应用于控制器 CT 的网络化控制方法可以是任意的, 这里假设和第 1 节中提到的方法是相同的, 因为这种方法很容易从网络化控制系统扩展到云控制系统, 并且扩展后的云控制系统的稳定性也满足系统要求. 传感器测量对象 P 的输出并传给控制器 CT , 控制器 CT 根据基于模型的预测控制算法生成控制信号的集合, 然后将控制序列发送到执行器端, 类似地, 补偿器用来消除网络引起的时延. 在初始阶段, 云控制系统只涉及预定义广播域中的两个节点, 它实际上是一个网络化控制系统.

初始阶段保持后, 系统转换到第二阶段, 即云控制阶段. 在这个阶段, 节点 CT 不仅作为一个控制器同时也作为一个任务管理节点运行. 节点 CT 开始以预定义的频率在域中广播要求. 这个要求可以被广播域中的所有节点接收, 它必须至少包括以下信息:

- 1) 对象节点 P 的 IP 地址;
- 2) 应用的控制算法及其相应的参数;
- 3) 对象的数学模型;
- 4) 估计的计算负担.

在云控制阶段初期, CT 节点承担两项任务, 其一是应用预定义的控制算法, 产生控制信号, 然后将打包好的预测控制信号发送到节点 P ; 其二是在域内不断广播要求. 需要强调的是第一个任务, 即控制任务, 它不是由节点 CT 永久承担的, 节点 CT 广播要求的原因就是要找到“合适的继任者”来代替自身承担控制任务.

当有一个节点, 例如 C_i , 从 CT 接收到要求后拥有充足的计算资源或者有能力承担当下的本地任务和潜在的云控制任务, 就会发送确认信息来响应节点 CT . 类似地, 确认信息至少包括以下信息:

- 1) 节点 C_i 和节点 P 之间网络的时间延迟和数据丢失规律 (例如传输时延上界 N_i 和最大连续丢包 D_i);

- 2) 可用的计算能力 (被量化为正数 CCA_i).

当 C_i 的确认信息到达 CT 后, 节点 CT 将评估节点 C_i 的优先级. 这里假定该优先级为传输时延上界 N_i , 最大连续丢包 D_i 和可用计算能力 CCA_i 的加权函数

$$S_i = \alpha f(N_i) + \beta g(D_i) + \gamma h(CCA_i) \quad (10)$$

其中, S_i 表示节点 C_i 的优先级, 函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 单调递减, 函数 $h(\cdot)$ 单调递增. 正权重系数 α 、 β 和 γ 要根据工程实践进行设计. 优先级越高, 节点 C_i 就越适合. 同时, 节点 CT 知道自身的优先级是 S_{CT} . 节点 CT 接收优先级高于自身的节点发送的确认信息, 忽略那些优先级低于自身的节点的确认信息. 优先级高于节点 CT 的节点将被保存于愿意节点的列表之中. 愿意节点的列表见表 1, 其中动态列表长度是 k_{CT} , 表示存在的愿意节点数. 所有的愿意节点都排在列表中, 节点 CT 是最后一个, 它的优先级是所有愿意节点中最低的. 如果没有愿意节点可用, 节点 CT 则排在第一, 并且该列表的长度为 1. 建议设置列表的最大长度为 k_{MAX} , 以避免不必要的存储成本和计算负担. 当有很多愿意节点可用时, 节点 CT 建立的愿意节点列表将舍弃多余节点而只包含前面的 $k_{MAX} - 1$ 个节点.

表 1 愿意节点列表

Table 1 The list of willing nodes

Node	IP Address	Superiority	Ranking
C_{i1}	Add_{i1}	S_{i1}	1
C_{i2}	Add_{i2}	S_{i2}	2
C_{i3}	Add_{i3}	S_{i3}	3
C_{i4}	Add_{i4}	S_{i4}	4
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
CT	Add_{CT}	S_{CT}	k_{CT}

节点 CT 的下一步工作是从列出的备选者中选择一些继任者. 继任者的数量 l_{MAX} 是预先定义的. 节点 CT 选择前面 l_{MAX} 个节点作为对节点 P 的云控制器. 如果列出备选者的数量小于 l_{MAX} , 则节点 CT 可以使用所有可用的愿意节点作为云控制器.

如图 9 所示, \star 是节点 CT , Δ 是节点 P . 在这个单元中, 有 5 个按照优先级顺序排列的可用的愿意节点 $C_{i1} \sim C_{i5}$. 如果我们定义 l_{MAX} 为 3, 可以用 \square 表示激活的云控制节点 $C_{i1} \sim C_{i3}$, \blacksquare 表示闲置的愿意节点 $C_{i4} \sim C_{i5}$.

在选择好云控制器节点后, 节点 CT 发送信息到这些节点, 包括:

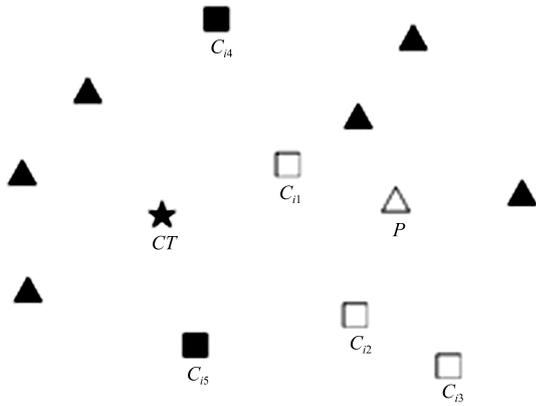


图 9 云控制系统的原理图

Fig. 9 The schematic diagram of the cloud control systems

- 1) 对象的数学模型;
- 2) 当前时刻对象的估计状态和控制信号;
- 3) 控制器参数.

如上所述, 第 1 节中介绍的基于卡尔曼滤波器的预测控制方法可以应用到这个雏形. 控制信息中的第 2 项可以表示如下:

$$\{\hat{x}_0, \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_t\} \quad (11)$$

$$\{u_0, u_1, \dots, u_t\} \quad (12)$$

其中, t 表示当前时刻. 与此同时, 节点 CT 发送当前云控制节点列表的副本到对象节点 P , 节点 P 接收到这个列表后, 开始向云控制节点发送历史测量值以及当下开始的测量值. 一旦所有的云控制节点接收到节点 CT 的控制信息和节点 P 的测量值, 它们将应用指定的控制方法计算出控制信号, 并发送数据包到节点 P .

为了保持云控制系统的良好运行, 在每个采样时刻, 所有活动的云控制节点向节点 CT 发送反馈, 如果节点 CT 在一个预定时间内没有收到某个云控制节点的反馈, 那么这个云控制节点应该从列表中移除, 并且节点 CT 将指示所有闲置愿意节点中的第一个节点来代替移除节点. 与此同时, 将这种替换告知节点 P . 云控制系统的管理是一个动态的过程, 节点 CT 不断寻找愿意节点, 删除并替换失效节点和发送当前云控制节点的信息到节点 P . 节点 P 可以接收来自不同云控制节点的控制信号数据包, 补偿器选择最新的控制输入作为被控对象的实际输入. 控制流程图如图 10 所示, 图中的 C_2 , C_3 和 C_6 都是云控制节点, C_6 是当前阶段中活跃的云控制节点.

5.2 协同云控制系统

在云控制系统中, 大多数大型云设施/服务通常由企业提供, 包括亚马逊、Salesforce、谷歌、微软

等. 在一般情况下, 终端用户需要花费高额的费用来购买这项服务. 对于大多数终端用户, 他们更倾向于获得低成本的服务, 这是云控制工业的初衷之一. 然而, 具有足够计算资源或计算能力的单个云控制器往往价格昂贵. 本节提出了协同云控制理论, 旨在低成本条件下保留云控制的优点.

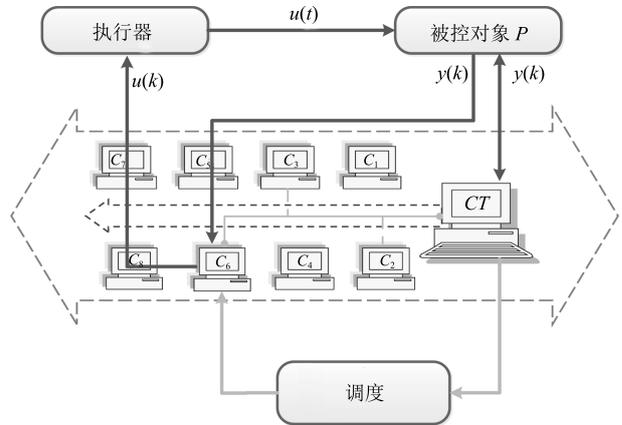


图 10 协同云控制系统的框架图

Fig. 10 The framework of cooperative cloud control systems

协同云控制系统的主要原理类似于经典云控制, 其区别如下: 控制任务将由多个 (两个或更多) 云控制器以合作形式来完成, 如图 10 所示. 一般来说, CT 不仅是一个控制器, 也是一个任务管理服务器, 而 $C_1 \sim C_8$ 是具有相同时间步长的云控制器, 与图 11 中的云控制器具有相同的定义. 在任务的初始阶段, CT 节点必须根据任务的规模从列出的备选云控制器中选择多个合适的云控制器, 例如选择 C_2 , C_3 和 C_6 为云控制器, 然后利用分布式算法, CT 根据当前的计算资源, 对总体任务进行分割, 并将不同的部分分配给相应的云控制器. 同时, 节点 CT 还将发送当前云控制节点列表的副本到对象节点 P . 对象 P 发送其当前时刻以及之前的测量值到云控制节点, 例如 C_2 , C_3 和 C_6 . 在此之后的每一步, 所有云控制器将发送反馈到 CT , 在同一时间, CT 将根据当前任务分配算法计算出最终的控制信号, 并把它发送到执行器. 值得注意的是, 在每个采样时刻, 活动的云控制器和备选云控制器也需要发送它们的状态到服务器 CT , 其中包括当前的计算资源. 然后, CT 会列出新的备选名单. 为了保持云控制系统良好运行, CT 将在下一个采样时刻根据云节点的最新状态重新分配任务. 协同云控制系统的其他技术细节类似于前述的基本云控制系统.

以上提出的云控制系统雏形为研究人员提供了一个简单的平台, 研究人员可以在其基础上开发或测试关于云控制系统理论的新算法. 在这个雏形中,

虽然没有考虑云控制系统的许多潜在特点,但它确实涉及云控制系统的最基本原则,利用可用的计算资源,并采用能够利用所有可能节点的这种拓扑结构来满足给定的控制任务.云控制系统是将信息领域计算资源体现出的整合趋势与控制系统相结合,或者说把这种趋势引入控制系统,形成的新型控制系统.针对相对缺乏计算能力的个体、相当数量的多智能体以及复杂大系统的控制,可以有选择地整合系统中的控制部分并放到“云端”.

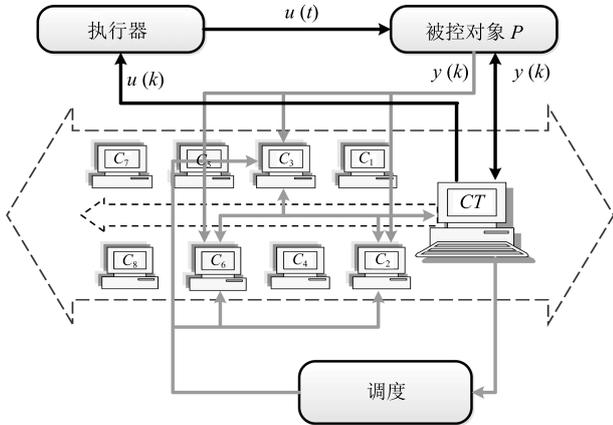


图 11 云控制系统的控制流程图
Fig. 11 The control flow diagram of cloud control systems

云控制系统的初级阶段主要体现为利用云计算

为传统控制算法服务、存储海量测量数据汇聚成大数据,从而使系统逐渐发展为具有一定自主控制能力的分立系统,然后在云控制阶段利用“云端”进行复杂计算、统筹协调、系统决策,利用深度学习等智能方法实现一定的自主智能控制.云控制系统结构上主要表现为云计算与信息物理系统的深度融合,主要涉及云计算、网络化控制系统、信息物理系统和复杂大系统控制的知识,急需相匹配的理论和算法.

如图 12 所示,通过与人体控制系统的比较可以形象地认识云控制系统,云控制系统中各分立的小系统可以比作人体各个器官以及与之对应的脊髓神经,将系统中的传感器比作人体的感觉器官,将互联网比作信号传输经过的神经网络.正如膝跳反射的中枢在腰部脊髓,分立的小系统有自己独立的控制能力.将云端比作脊椎以上的大脑和小脑,提供大部分或者高级的控制能力.正如大脑和脊髓神经的计算运行方式不同,云计算的方式和分立小系统的计算方式也不同,特殊的设计和组成能够提供更强大或更优化的计算能力,使系统更加智能化,功能更强.

5.3 云控制系统的优势

从上述云控制系统的雏形的定义可以看到,与传统的网络化控制系统相比,云控制系统除上文中所述的优点外,在应用上还有以下几点优势:

- 1) 系统硬件可靠性高,硬件冗余,自动的故障切换

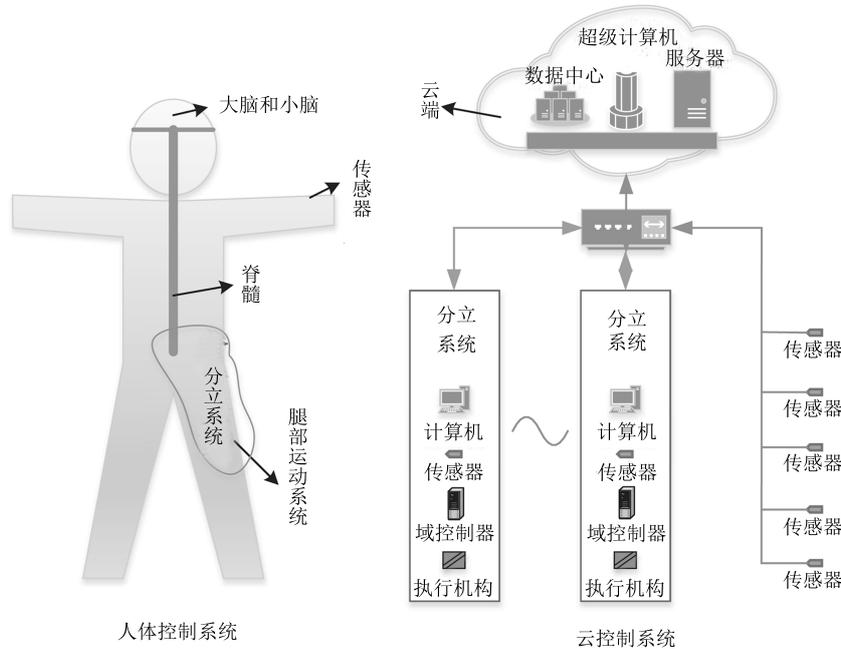


图 12 人体控制系统与云控制系统

Fig. 12 Body control systems and cloud control systems

很多种原因的硬件损坏会导致服务的停止, 例如硬盘、主板、电源、网卡等, 虽然针对这些弱点, 管理人员可以找到替代方案, 例如建立一个全冗余的环境(电源、网络、盘阵等), 但是这样的成本太高而且工作非常繁重. 云存储通过将系统映射到不同的服务器, 解决了这个潜在的硬件损坏的难题. 在硬件发生损坏时, 系统会自动将服务运行在另一台服务器上, 保持服务的继续.

2) 系统设备升级不会导致服务中断

传统系统升级时, 需要把旧系统停机, 换上新的设备, 这会导致服务的停止. 云控制并不单独依赖一台服务器, 因此服务器硬件的更新、升级并不会影响服务的提供.

3) 不受物理硬件的限制, 及时提供性能的扩展

随着功能和算法复杂度的增长, 可能导致提前采购的浪费. 当采用云控制时, 可以根据具体需求动态调整, 硬件和运行环境配置, 避免不必要的浪费, 节约用户资本.

4) 发挥系统的最大效能

实际应用中, 常常出现工作量过度集中, 而用户没有能力或者比较困难进行工作量分配, 造成系统整体负载不均的现象, 有些系统没有在使用, 有些则负载过量, 这会导致整体系统效能受限, 云控制系统充分利用云计算按需分配的能力, 突破这一难题.

5) 减少 IT 支持

对于控制工程师, 更多关注于整个系统的控制性能指标, 而对系统的安全防护和 IT 管理则较为陌生, 而这些却是保证控制系统正常运行的基础. 云控制系统的引入可以较好的调配人力资源, 最大程度上提升控制工程师的效率.

6) 有利于共享与协作

由于控制系统对于相同的控制对象具有较大的相似度, 云控制系统的引入为控制工程师提供了一个交换控制算法与经验的平台. 当遇到较为复杂的控制任务时, 云控制平台也可以完成使用者之间的协作.

5.4 云控制系统面临的挑战

尽管云控制系统具有很多优势, 但在当前阶段, 云控制系统的发展还处在起始阶段, 面临着许多挑战. 主要表现在以下几个方面:

1) 云控制系统信息传输与处理的挑战

云控制系统与一般信息物理系统的不同之处在于云控制系统将其控制部分有选择地整合进而采用云计算处理. 系统中存在着海量数据汇聚而成的大数据, 如何有效地获取、传输、存储和处理这些数据? 如何在大延迟(主要包括服务时间以及对对象与云控制器之间的通信延迟)下保证控制质量和闭环

系统的稳定性? 同时如何保证控制性能, 如实时性、鲁棒性等? 采用何种原则对本地控制部分进行分拆? 与云端进行哪些信息的交流? 采用何种云计算方式? 云计算中如何合理利用分布式计算单元, 合理地给计算单元分配适当的任务? 这些都是不同于一般信息物理系统的问题, 其中如何进行控制部分整合和云端计算是设计的关键.

2) 基于物理、通信和计算机理建立云控制系统模型的挑战

控制系统设计的首要问题是建立合理的模型, 云控制系统是计算、通信与控制的融合, 计算模式、通信网络的复杂性, 以及数据的混杂性等为云控制系统的建模工作带来了前所未有的挑战. 尤其是云计算作为控制系统的一部分, 与传统网络化控制系统中控制器的形式有很大不同, 如何构建云计算、物理对象、(计算) 软件与(通信) 网络的综合模型, 以及如何应用基于模型的现有控制理论是一大挑战. 在建模过程中, 计算模型和通信模型需要包含物理概念, 如时间; 而建立物理对象的模型需要提取包含平台的不确定性, 如网络延时、有限字节长度、舍入误差等. 同时, 需要为描述物理过程、计算和通信逻辑的异质模型及其模型语言的合成发展新的设计方法.

3) 基于数据或知识的云控制系统分析与综合的挑战

作为多学科交叉的领域, 云控制系统必然存在一些新特性, 除了包含云计算、网络化控制、信息物理系统和复杂大系统控制的一般通性, 还有自身的特性. 针对这些特性, 需探究和创建合适的控制理论. 云控制系统作为复杂系统, 其模型建立困难, 或者所建模型与实际相差过大, 需要探究不依靠模型而基于数据或知识的控制方法. 同时, 云控制系统必然存在一定的性能指标, 合理提炼并进行指标分析和优化, 对于设计和理解云控制系统具有指导意义.

4) 优化云控制系统成本的挑战

将云服务运用于控制系统减少了硬件和软件的花费. 但是在运用云计算过程中, 需要进行控制任务的分配与调度, 本地部分功能向云端虚拟服务器的迁移, 以及云控制系统的维护与维持等, 如何优化云控制系统的成本是一个更为复杂的问题.

5) 保证云控制系统安全性的挑战

云控制系统的安全问题是最重要的问题. 针对云控制系统的攻击形式多种多样, 除了针对传输网络的 DOS 攻击, 还有攻击控制信号和传感信号本身的欺骗式攻击和重放攻击等. 对于云控制系统而言, 设计的目标不仅仅要抵御物理层的随机干扰和不确定性, 更要抵御网络层有策略有目的的攻击. 因此, 研究云控制系统的安全性对我们提出了更高的

要求, 研究者需要综合控制、通信和云计算研究. 目前的网络化控制系统要求控制算法和硬件结构具有更好的“自适应性”和“弹性”以便适应复杂的网络环境, 云控制系统的架构具有更好的分布性和冗余性, 因此能够更好的适应现代网络化控制系统安全性的需要.

6 结论

本文给出了网络化控制系统的简要概述, 描述了网络化控制系统的新趋势. 随着云计算、大数据处理技术和深度学习等智能算法的发展, 云控制系统迎来了发展的曙光. 本文提出了云控制系统的初步结构和算法, 并详细总结了云控制系统面临的挑战. 我们将继续深入研究云控制系统中存在的问题, 并致力于将相关理论应用到实际中. 我们相信, 这一新的研究领域具有更广泛的应用前景, 同时在此领域中将会诞生更多重要的研究成果.

注. 应本刊邀约, 特将 2015 年发表在本刊英文版的文章^[2] 翻译为中文, 并做了相应的修改和补充.

References

- Xia Y Q. From networked control systems to cloud control systems. In: Proceedings of the 31th Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2012. 5878–5883
- Xia Y Q. Cloud control systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, **2**(2): 134–142
- Xia Y Q, Fu M Y, Shi P. *Analysis and Synthesis of Dynamical Systems with Time-delays*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- Xia Y Q, Fu M Y, Liu G P. *Analysis and Synthesis of Networked Control Systems*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- Xia Y Q, Gao Y L, Yan L P, Fu M Y. Recent progress in networked control systems — a survey. *International Journal of Automation and Computing*, 2015, **12**(4): 343–367
- Wang F Y, Liu D R. *Networked Control Systems: Theory and Applications*. London: Springer, 2008.
- Liu K, Fridman E, Hetel L. Stability and L_2 -gain analysis of networked control systems under Round-Robin scheduling: a time-delay approach. *Systems and Control Letters*, 2012, **61**(5): 666–675
- Liu K, Fridman E, Johansson K H. Dynamic quantization of uncertain linear networked control systems. *Automatica*, 2015, **59**: 248–255
- Park H S, Kim Y H, Kim D S, Kwon W H. A scheduling method for network-based control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, **10**(3): 318–330
- Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems. *Automatica*, 2003, **39**(4): 743–750
- Yue D, Han Q L, Peng C. State feedback controller design of networked control systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2004, **51**(11): 640–644
- Liu K, Fridman E. Wirtinger’s inequality and Lyapunov-based sampled-data stabilization. *Automatica*, 2012, **48**(1): 102–108
- Liu K, Fridman E. Networked-based stabilization via discontinuous Lyapunov functionals. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, **22**(4): 420–436
- Gao H J, Chen T W. A new approach to quantized feedback control systems. *Automatica*, 2008, **44**(2): 534–542
- Gao H J, Chen T W. Network-based H_∞ output tracking control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, **53**(3): 655–667
- Liu K, Fridman E, Johansson K H. Networked control with stochastic scheduling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, **60**(11): 3071–3076
- Liu K, Fridman E. Discrete-time network-based control under scheduling and actuator constraints. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, **25**(12): 1816–1830
- Liu K, Fridman E, Hetel L. Networked control systems in the presence of scheduling protocols and communication delays. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2015, **53**(4): 1768–1788
- Kehoe B, Patil S, Abbeel P, Goldberg K. A survey of research on cloud robotics and automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(2): 398–409
- Ericson K, Pallickara S, Anderson C W. Analyzing electroencephalograms using cloud computing techniques. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). Indianapolis, IN, USA: IEEE, 2010: 185–192
- Xia Y Q, Liu G P, Fu M Y, Rees D. Predictive control of networked systems with random delay and data dropout. *IET Control Theory and Applications*, 2008, **3**(11): 1476–1486
- Xia Y Q, Xie W, Liu B, Wang X Y. Data-driven predictive control for networked control systems. *Information Sciences*, 2013, **235**: 45–54
- Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(1): 215–233
- Yan G P, Wang L, Xie G M, Wu B. Consensus of multi-agent systems based on sampled-data control. *International Journal of Control*, 2009, **82**(12): 2193–2205
- Ren W, Beard R W. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*. London: Springer, 2008.
- Meng D, Jia Y. Finite-time consensus for multi-agent systems via terminal feedback iterative learning. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(8): 2098–2110
- Ren W, Beard R W, Atkins E M. A survey of consensus problems in multi-agent coordination. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2005. 1859–1864
- Park D J, Delima P, Toussaint G J, York G. Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, **39**(4): 959–970

- 29 Xiao F, Wang L, Chen J, Gao Y P. Finite-time formation control for multi-agent systems. *Automatica*, 2011, **45**(11): 2605–2611
- 30 Xia Y Q, Fu M Y. *Compound Control Methodology for Flight Vehicles*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- 31 Wang F Y. Agent-based control for networked traffic management systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2005, **20**(5): 92–96
- 32 Li Z J, Chen C, Wang K. Cloud computing for agent-based urban transportation systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, **26**(1): 73–79
- 33 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 34 Bradley J M, Atkins E M. Toward continuous state-space regulation of coupled cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 60–74
- 35 Joslyn C, Rocha L M. Towards semiotic agent-based models of socio-technical organizations. In: Proceedings of the 2000 AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems Conference. Tucson, Arizona, USA, 2000. 70–79
- 36 Kwapień J, Drożdż S. Physical approach to complex systems. *Physics Report*, 2012, **515**(3–4): 115–226
- 37 Willems J C. In control, almost from the beginning until the day after tomorrow. *European Journal of Control*, 2007, **13**(1): 71–81
- 38 Hill D J. Advances in stability theory for complex systems and networks. In: Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming, China: IEEE, 2008. 13–17
- 39 Desoer C A. *Feedback Systems: Input-Output Properties*. New York: Academic Press, 1975.
- 40 Wang X F, Chen G R. Synchronization in scale-free dynamical networks: robustness and fragility. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2002, **49**(1): 54–62
- 41 Wu C W. *Synchronization in Complex Networks of Nonlinear Dynamical Systems*. New Jersey: World Scientific, 2007.
- 42 The Economist. Cloud computing: clash of the clouds [Online], available: <http://www.economist.com/node/14637206>, November 3, 2009
- 43 Galen G. What cloud computing really means [Online], available: <http://www.infoworld.com/d/cloud-computing/what-cloud-computing-really-means-031>, June 6, 2009
- 44 Gartner says cloud computing will be as influential as e-business [Online], available: <http://www.gartner.com/newsroom/id/707508>, August 22, 2010
- 45 Cloud computing [Online], available: http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing, November 27, 2011
- 46 Cloud computing [Online], available: <http://www.cloud-computingdefined.com/>, July 17, 2010
- 47 Segaran T, Hammerbacher J. *Beautiful Data: the Stories Behind Elegant Data Solutions*. Sebastopol: O'Reilly, 2009.
- 48 White T. *Hadoop: the Definitive Guide* (2nd edited). Sebastopol: O'Reilly, 2012.



夏元清 北京理工大学自动化学院教授。主要研究方向为网络化控制, 鲁棒控制, 信号处理, 自抗扰控制, 飞行器控制和空地一体化网络协同控制。

E-mail: xia_yuanqing@bit.edu.cn

(XIA Yuan-Qing Professor at the College of Automation, Beijing Institute of Technology. His research interest covers fields of networked control systems, robust control and signal processing, active disturbance rejection control, flight control and networked cooperative control for integration of space, air and earth.)