



# 专家论丛

## 浅谈云控制系统

夏元清 北京理工大学

### 一、引言

网络化控制系统是过去二十年的研究热点方向，许多理论和技术成果喷薄而出，在社会和工业中发挥了很大的作用。如今，随着物联网、大数据等技术的发展和普及，极大地增加系统的通信、存储与计算负担。在这种情况下，传统的网络化控制技术面临着控制系统复杂化、计算能力和存储空间受限和传统控制架构自身限制的挑战。

随着云计算、大数据等新一代信息技术交叉融合发展，控制系统需要更加智能、具备更加强大的功能、有更好的信息交互和处理能力。在此背景下，智能决策与闭环控制已成为各国战略的关键要素，如美国国家制造业创新网络、德国工业 4.0、欧盟地平线 2020、中国制造 2025 等。国务院《新一代人工智能发展规划》也指出，新一代控制系统应具有智能计算、优化决策与控制能力。

以控制为核心，以云计算、物联网技术为技

术工具，以网络化控制、信息物理系统、复杂大系统理论为依托，云控制系统（Cloud Control Systems）应运而生，实现高度自主和高度智能的控制。在云控制系统中，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，同大数据处理技术、网络化预测控制、数据驱动控制等关键技术相结合，可以使得云控制系统具有相当的智能自主控制能力。最终，可将控制封装成随取随用的服务形式，也就是“控制即服务”（Control as a Service, CaaS）。

### 二、云控制系统与云网边端架构

云控制系统概念首先由我国提出<sup>[1-3]</sup>，在理论和应用方面都取得了较为丰富的成果。并且，于 2017 年 5 月成立中国指挥与控制学会云控制与决策专业委员会。笔者团队于 2018 年 4 月获批国家重点研发计划“云计算与大数据”重点专项“数据驱动的云数据中心智能管理技术与平台”项目（批准号 2018YFB1003700）。团队基于商业云服务

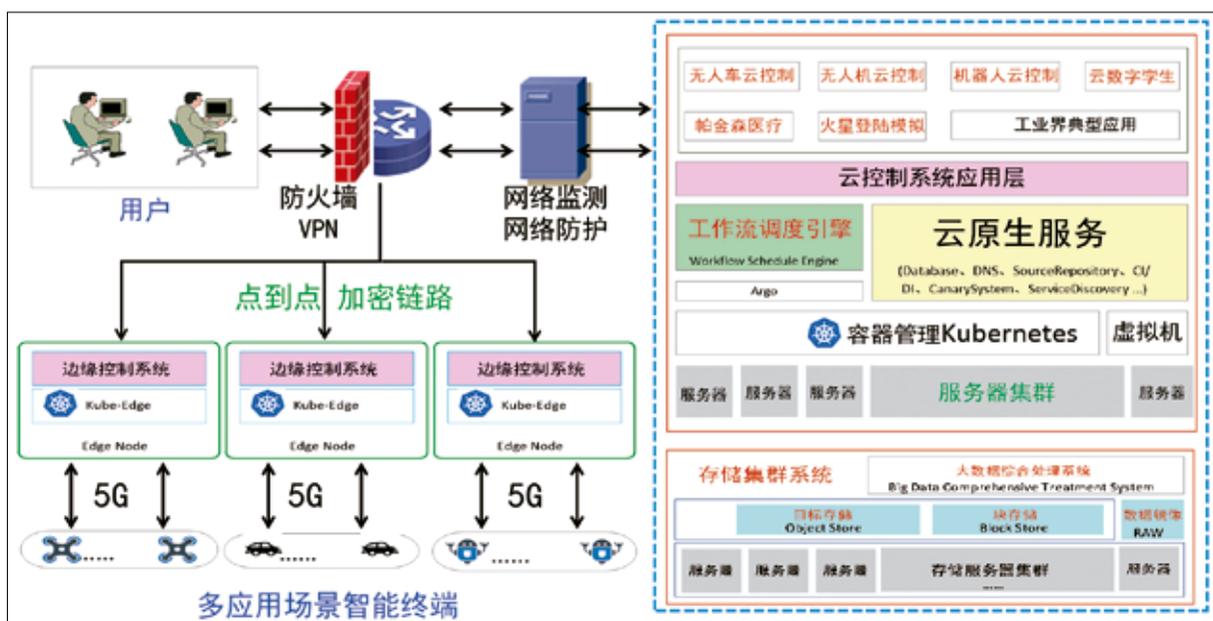


图1 云控制系统架构

器,成功搭建了首个云控制系统实验平台,解决了局域网与公网之间的通信问题,包括网关协议、数据转发、网络时延等,建立云控制与协同实验平台技术框架体系,完成了理论成果的实验验证。如图1所示,云服务器可以根据应用的实际需求,通过提供按需和可扩展的存储和计算资源,为终端提供服务。然而,将数据传输到云并将控制信号返回到执行器会出现延迟,破坏终端的控制性能。此外,因为网络带宽饱和,终端也难以将海量数据发送到云中进行存储和处理。

目前,控制系统结构日益复杂、规模日益扩大,需要采集、存储和管理的数据越来越多,控制系统必须能够处理这些海量数据。将云计算技术融入现有控制系统中逐渐成为当前业界的主流认知,由云平台负责系统的数据分析和控制逻辑功能。但是,传感器和边缘处理技术飞速发展,大量传感器产生了海量原始数据,边缘处理器也产生了海量的中间数据,将这些数据全部上传并

交由云平台处理将产生巨大的通信开销,给云计算平台增加不必要的计算负担,而且平台难以满足边缘控制系统实时性和稳定性的要求。所有数据都上传,也就涉及到数据的安全性问题。同时,“边缘计算”正在工业领域兴起,其在边缘节点上部署,旨在帮助工业生产中的设备,在数据不上传云端的情况下,也能够具有基本的处理和决策能力,完成部分数据分析和控制逻辑功能。这种处理方式在物理上更加靠近数据源。

针对云控制系统难以保证复杂任务实时控制的难题,研究人员提出在控制系统中引入边缘控制结构,设计了云网边端协同控制策略<sup>[4-5]</sup>。在边缘利用离散分布式的计算资源,对终端设备直接进行基础性分析和控制,保证基本实时性功能和设备安全。将边缘筛选、预处理后的关键数据上传至云端,由云端完成上层决策的复杂任务或边缘难以处理的任务的计算和处理,并将指令结果返回边缘和终端。借助网络,云端和边缘、终端

进行必要通信,协作完成多种层次、复杂度,不同粒度、实时性和服务质量需求任务的计划、规划、调度、预测、优化、决策和控制等。在未来特别是5G时代,实现边缘算力上移、云端算力下沉,最优化整体系统的控制质量和经济开销。

如图2所示,云控制系统云网边端架构与人体控制系统有很好的对应关系。云端部署高性能计算机、数据中心等,相当于人的大脑和小脑,执行全局宏观任务的计算、调度、决策与控制等;网络相当于人的脊髓、神经等,串联起整个控制系统,起到传递信息的作用;边缘控制系统为具体的分立系统,有一定的独立控制能力,相当于人的局部运动控制系统;而终端和传感器则分别相当于人的手足和感知器官。

未来物联网无处不在,与信息物理系统一样,

集通信、计算和控制于一体,边缘计算和云计算的结合保障了数据的安全性和计算的实时性。云控制用于分析控制复杂的应用系统,但由于实时性的要求,借鉴边缘计算的概念,边缘控制也成为云控制的补充。基本思想是云平台实现复杂功能,对实时性要求相对较低,而边缘终端部署简单的控制功能,面向较高实时性的任务功能。例如在多无人机编队或协同控制中,边缘终端只需要完成基本的姿态控制即可,如果是带有视觉或其他复杂感知的无人机,还可以对感知数据进行基本的滤波、数据集提取和过滤等操作,而云端则可以执行多机编队或者路径规划等上层决策意义的复杂功能算法,还可以进行视觉计算、运动建模等复杂的数据运算和处理功能。

云网边端协同依层次和内容又可分为多云协

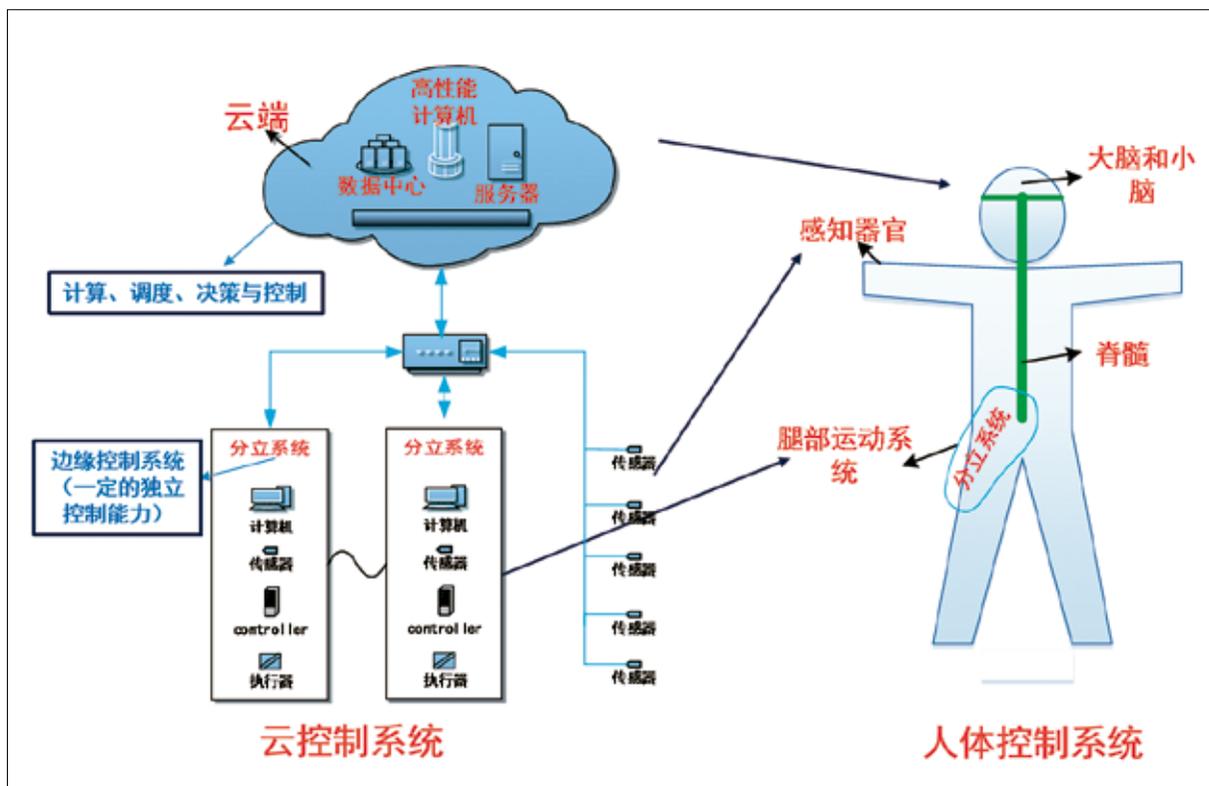


图2 云控制系统与人体控制系统构成对照



同、决策协同、控制协同和资源调度协同等。当前，随着产业规模的扩大，各行业、各地区对算力的需求也不断提高。但云数据中心的建设需遵从经济性的原则，简单扩建大规模云数据中心是不现实的。因此，为应对本地云数据中心资源受限，满足远距离算力共享的需求，多云协同的概念被提了出来。在不同地区设置中心云和边缘云，其中中心云体量较大，设在计算需求密集地区，边缘云体量较小，分布式配置计算资源。对于计算需求较大的任务，可通过网络通信将需求传递至其他云数据中心，保证各云数据中心的负载均衡，形成多云协同。

决策协同和控制协同主要发生在云端和边缘、设备的交互层面。决策协同面向高层次的计划、规划、调度、决策等指令，针对复杂场景和任务，整合全局需求和信息，将指令发给边缘。边缘更接近数据来源，依据局部具体需求和信息，作出贴合实际需求的决策，交由终端设备执行，同时保证决策的全局最优性和边缘实时性。

控制协同面向基础性应用，设备基本的实时性、稳定性控制由边缘控制器直接完成，但存在计算量较大、需要全局信息等自身不易完成的任务，则需提交云平台，由云平台统一决策、控制。同时，各边缘场站之间也须考虑控制协同，在自身实时、稳定控制的同时，不能影响其他边缘的控制性能。云网边端协作，实现整体系统的全局优化、局部实时、稳定决策和控制。

资源调度协同是云网边端协同充分利用云平台计算能力的关键，为计算任务最优化分配CPU、内存、网络等资源。云数据中心资源通过Kubernetes、Hypervisor等工具统一集群化管理，伸缩式管理新加入资源，将所有资源抽象为同构性的计算节点，按需为业务应用分配计算资源。当离散或由一定依赖关系组成的工作流任务到来

时，通过考虑任务优先级、截止时间/能耗约束、关键路径分析、深度强化学习等算法实现最优调度策略的选取，将任务匹配给资源池中的计算节点，从而缩短任务完成时间，提高资源利用率，高效、低成本地完成业务场景中的云端计算任务。

基于云网边端协同控制策略，云控制系统形成三个闭环。一是底层终端边缘控制闭环，核心是基于对终端操作数据、生产环境数据的实时感知和边缘洞察计算，实现终端的动态优化调整和精确控制。二是中层决策闭环，核心是基于信息系统数据、制造执行系统数据、控制系统数据的集成与云端大数据分析，借助容器技术、存储和网络相关优势，实现调度决策的动态优化调整，支持多场景智能生产模式。三是顶层全链协同闭环，核心是基于民用、军用、工业全链结构，连接控制、计算、分析、感应技术与网络为一体，形成跨设备、跨系统、跨部分、跨厂区、跨地区的互联互通，从而提高效率、提升智能化水平，推动复杂系统中各种要素资源充分共享。云网边端协同提高了控制系统实时性和可用性，实现“控制即服务”的功能。

### 三、云控制系统理论与技术

#### 1. 数据驱动云控制系统

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；同时对于云控制系统，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，我们可以利用的只是通过传感技术测得的系统状态或者输出，因此传统的控制方法已经不再适用，提出了数据驱动控制。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云控制系统。

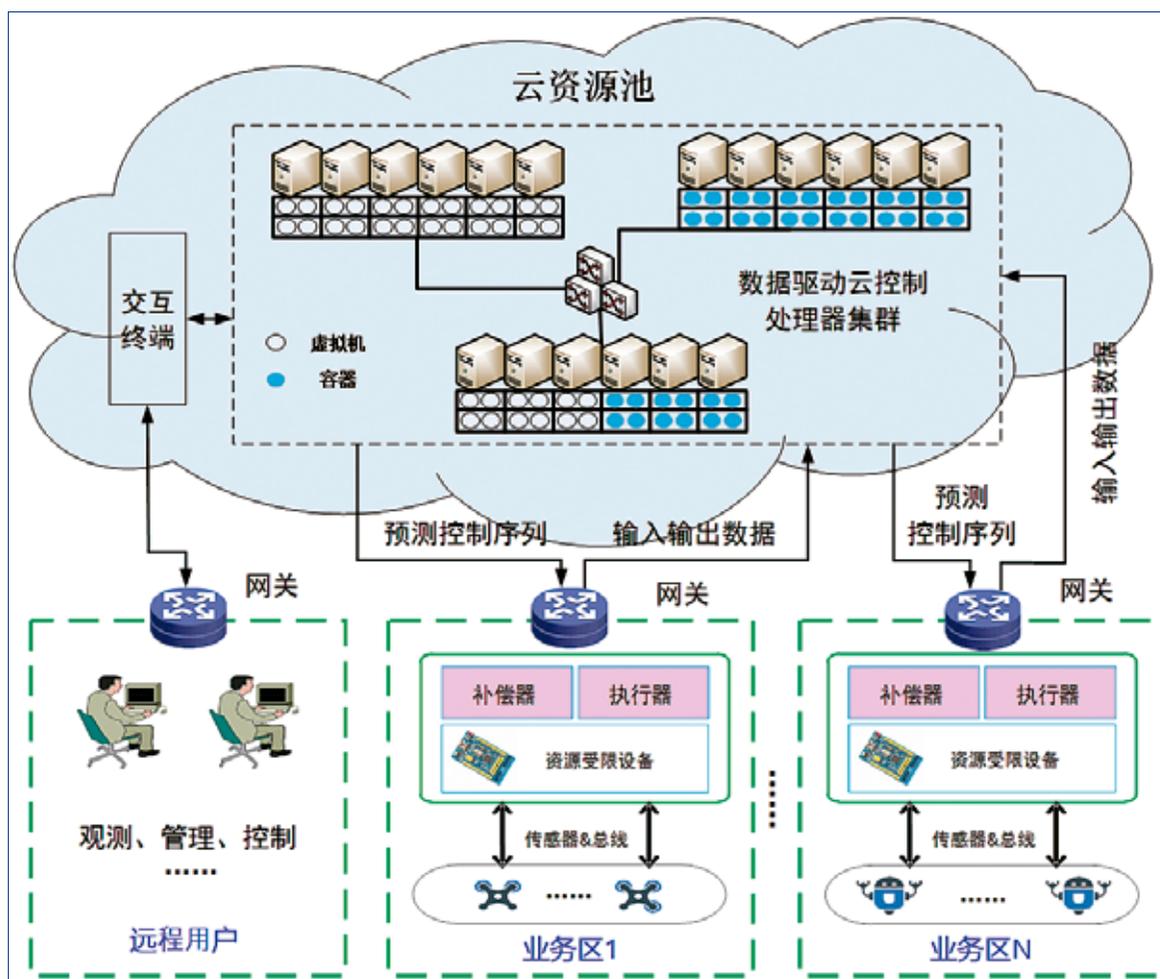


图3 数据驱动云控制系统结构

数据驱动云控制系统结构如图3所示。在数据驱动云控制系统中，传感器通过网络将数据发送到控制器，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补偿器上。最后，根据预测控制方法，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。

## 2. 空地协同云控制系统

基于智能云服务技术，以大规模无人机一

人车空地协同控制问题为例，将各控制任务上传至云端，利用先进的容器化弹性云计算技术对各控制计算任务工作流程进行调度执行，最小化执行时间，同时考虑云服务安全防护与安全通信问题，设计高性能控制算法，保证多无人机—无人车系统控制的稳定性。平台架构如图4所示。

## 3. 基于智能云数据中心的复杂控制任务工作流程调度理论

在云计算中，云 workflow 调度是一种高效处理复杂任务的重要方法，其将复杂任务拆分为具有

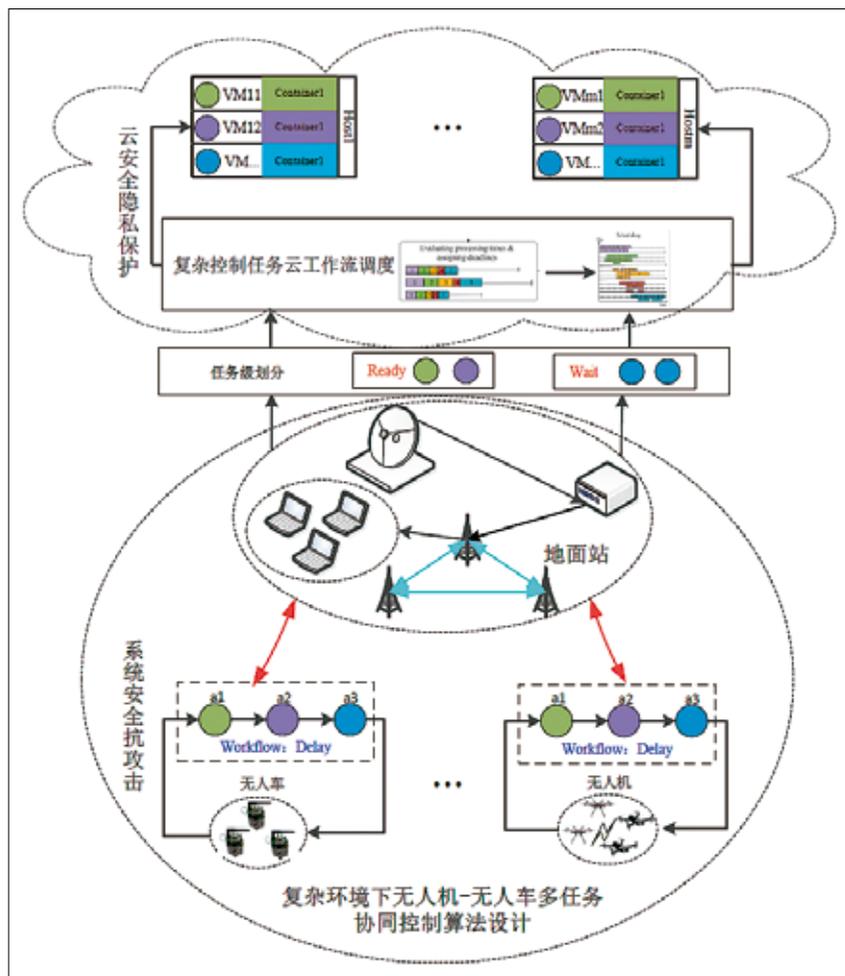


图4 空地协同云控制平台架构

前后依赖关系的有向无环图，调度子任务到分布式计算节点中，从而提高任务的处理效率。首先，对云 workflow 任务多方面的特征综合分析确定优先级参数，综合考虑云 workflow 任务价值和用户任务执行紧迫度两种属性，建立云 workflow 任务权重，提出一种基于动态优先级和任务权重的任务调度策略，使任务集按照最佳顺序调度，确保任务尽可能在最佳调度时间内执行。第二，建立支持云 workflow 任务优先级和权重的多任务并行云 workflow 调度架构。针对现有云 workflow 管理体系架构系统复

杂、容纳数据量少、响应时间长、性能差的问题，研究支持用户定制的云 workflow 架构，设计可定制的云 workflow 系统整体架构。主要包括建模工具、迁移工具、表单工具、监控平台、云 workflow 引擎、数据库访问层、缓存层、组织机构建模等。

#### 4. 云控制系统安全管控机制与技术

相较传统网络化控制系统，云控制系统结构更复杂，规模更庞大，不确定因素也更多。因此，云控制系统存在更多的安全隐患且安全问题造成的损失也更为严重。云计算为云控制系统的实时

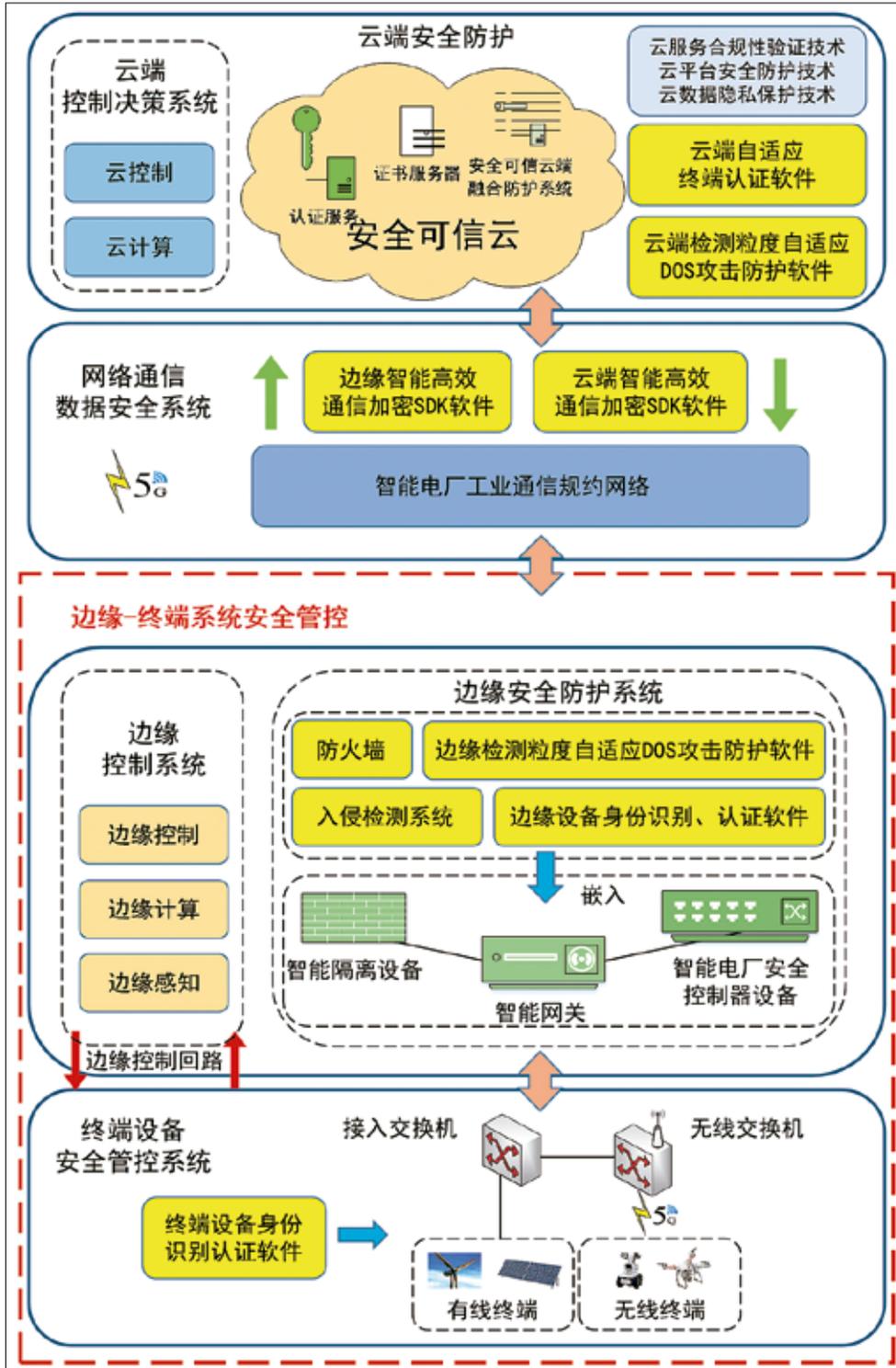
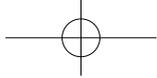


图5 云控制系统云网边端安全管控机制



运行提供了保障,对云服务安全问题的研究是十分重要的。如图5所示,依据被攻击对象以及安全隐患发生阶段的不同,云控制系统安全问题可被划分为云、网、边、端四个层面来考虑。

在云端面临的主要风险来自云平台,包括云平台自身的可靠性、外部信号对云平台的恶意攻击,以及客户隐私数据对云服务商的透明性问题等。针对这些问题,在云平台层面,智能电厂云控制系统设计了安全可信云技术机制,实现云服务合规性验证、云平台安全防护,以及云数据隐私保护等保障功能,保障云端控制决策系统安全、稳定运行。在网络传输层面,面临的则是从云到端的通信故障以及数据隐私泄露的风险,采用云端和边缘双向智能高效通信加密 SDK 技术保证通信安全。

边缘控制系统和终端设备进行实时边缘控制的交互,在边缘、终端双层安全系统的保护下,形成边缘—终端系统安全管控体系。具体而言,边缘安全防护系统采用软硬件相结合的方式,在软件方面使用边缘身份认证和自适应攻击防护等算法,在硬件层面则设计智能网关、安全控制器、隔离装置等安全防护设备,同时配套防火墙、入侵检测等系统,将以上软件嵌入其中,规避边缘设备管控的安全隐患。在终端设备侧,主要考虑的是操作者或者上层信号的真伪性问题,在这里针对种类不同、智能程度不同、重要性不同的各类底层设备,使用差异化的身份终端认证方法,保障云端调度优化指令、边缘控制命令等准确无误地执行下去。云控制系统通过云网边端四层安全管控机制,实现对云控制系统各层级软硬件及网络的可靠支持 and 保护。

#### 四、云控制系统的应用

云控制系统具有广泛的应用背景,基于提出

的云控制系统架构,研究者针对具体对象的现有情况和特征,分别设计提出了智能电厂云控制系统、智能交通云控制系统、军事云控制与协同系统、无人车大数据云控制系统等多个典型应用实例<sup>[6-10]</sup>。下面以智能电厂云控制系统为例作详细介绍。

如图6所示,智能电厂根据网络结构和物理分区,自上而下分为集控层、场站层和现地层,分别对应云控制系统中云端、边缘和终端设备。现地层部署电厂具体功能和业务,包括升压控制系统、机组监控系统、巡检安防系统和功率预测系统等,通过 WiFi、5G 等通信方式连接、集成到分属场站上。场站层设有边缘控制器(Edge Controller),利用边缘计算易于部署、实时性和可靠性高的特点,对该场站终端设备进行监视以及精准、稳定的实时管控。场站层获取到终端设备的原始数据后,根据任务类型,对数据进行分类和预处理。例如在风光绿色能源互补发电滚动优化中,各场站采集到站内所有机组的原始数据后,先挑选出风光输出功率预测所需数据,再在场站对其进行预测,最后将各场站机组输出功率预测结果发往云控制平台。将部分任务放置在边缘,既能充分利用场站的边缘算力,也可避免所有终端数据直接发往云端,导致通信成本和云端计算负担成倍增加。

智能电厂云控制平台部署有云控制与决策、云存储、规则库和算法库以及数字孪生电厂等模块。云控制与决策,即数据计算和控制决策功能被部署在云端的服务器中,其中涉及到的优化、管理、调度和控制等算法被集成为算法库;电厂终端设备在物理空间遵守的规则被封装为规则库;场站层关键业务、运维数据通过网络传到云端,形成云存储。规则库和云存储分别对应模型和数据,通过二者融合和迭代更新,在云控制与

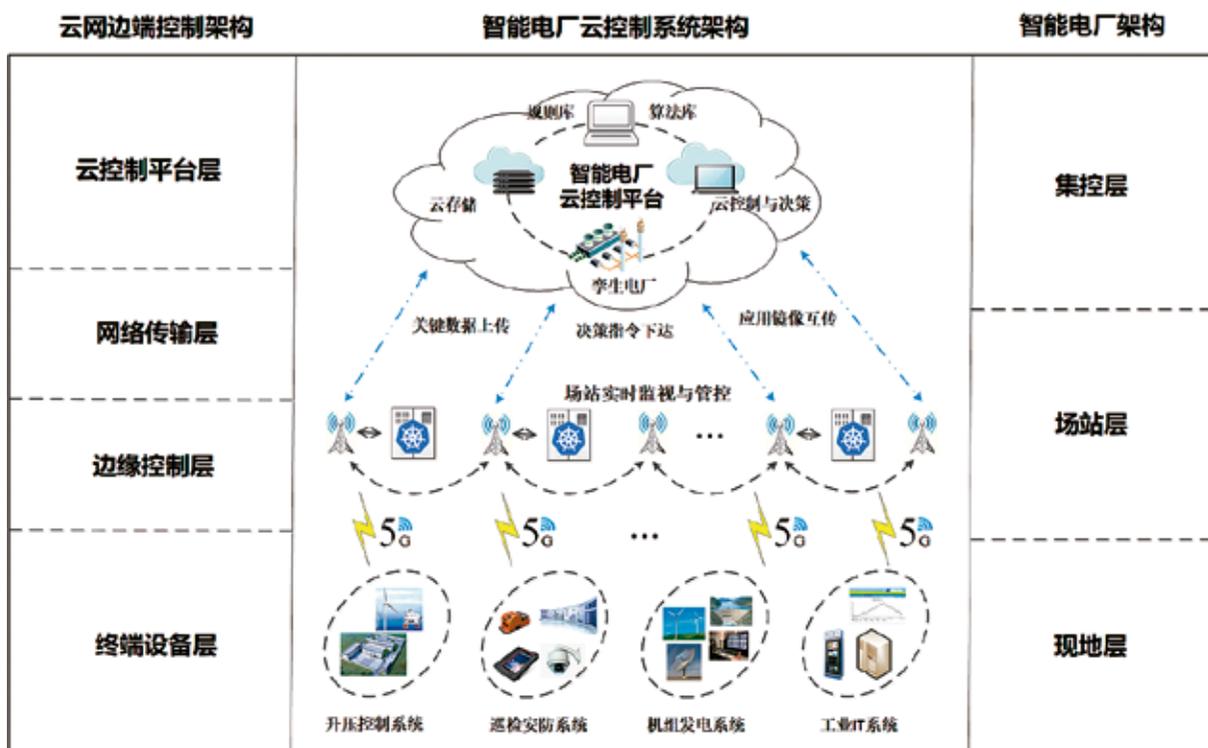


图6 智能电厂云控制云网边端协作架构

决策服务器中调用算法库中的方法，一方面在数字孪生电厂中模拟运行结果、进行态势演判，另一方面将得到的全局最优优化调度方案、指令发给各场站以至终端设备。场站在上层指令指导与约束下，对终端设备完成边缘控制，经由云网边端四个层面协作互补，形成对整个智能电网系统的统一优化、管理、调度和控制。

### 五、云控制系统发展趋势及展望

尽管云控制系统具有很多优势，但在当前，云控制系统的发展还处在起始阶段，面临着许多挑战，同时也是未来可期的发展方向。主要表现在以下几个方面：

- (1) 云控制系统信息传输与处理；
- (2) 基于物理、通信和计算机理进行云控制系

统模型设计与构建；

- (3) 基于数据或知识的云控制系统分析与综合；
- (4) 云控制系统成本优化；
- (5) 云控制系统的安全性保证；
- (6) 云控制的智能自主决策；
- (7) 面向工业互联网的智能云端协作；
- (8) 云控制系统并行任务分配优化与协同控制。

综上所述，利用云计算强大的数据计算和存储能力，云控制可满足复杂控制任务的实时智能计算、优化、计划、调度、预测、决策与控制。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多复杂场景实际应用起到积极推动作用。



## 参考文献

- [1] Xia Y. From networked control systems to cloud control systems[C]. Proceedings of the 31st Control Conference. 2012:5878–5883.
- [2] Xia Y. Cloud control systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(2):134–142.
- [3] 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.
- [4] Xia Y, Qin Y, Zhai D H, Chai S. Further results on cloud control systems[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(7): 073201:1–073201:5.
- [5] 夏元清, Mahmoud M S, 李慧芳, 张金会. 控制与计算理论的交互: 云控制[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(2): 99–118.
- [6] 任延明. 新能源集控中心网络设计及云控制实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [7] 夏元清, 闫策, 王笑京, 宋向辉. 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.
- [8] 赵国宏. 作战云体系结构研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(3):292–295.
- [9] 夏元清, 高润泽, 林敏, 任延明, 闫策. 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(09):1844–1868.
- [10] 倪俊, 姜旭, 熊周兵, 周波. 无人车大数据与云控制技术综述[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2021, 41(1):1–8.

