

## 信息物理系统技术现状分析与趋势综述

杨挺<sup>\*①②</sup> 刘亚闯<sup>②</sup> 刘宇哲<sup>②</sup> 王成山<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(天津大学智能电网教育部重点实验室 天津市 300072)

<sup>②</sup>(天津大学电气自动化与信息工程学院 天津市 300072)

**摘要:** 随着国民经济中各个产业信息化程度的提升和产业间深度交叉融合,信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)正成为支撑这一发展的关键技术,也被誉为是引领全球新一轮产业技术变革的核心体系。通过将客观物理世界中实体、行为以及交互环境等精准映射至信息空间,进行实时处理并反馈回物理空间,CPS能够从系统视角和不同层面解决复杂系统的分析建模、决策优化、不确定处理等难题。该文从CPS的体系架构和设计开发流程分析了其关键技术和难点瓶颈,探讨了CPS与边云协同计算、数字孪生、人工智能和区块链等前沿技术间相互支撑关系,综述了CPS在工业生产、能源电力、交通驾驶和医疗健康4个应用领域研究现状。最后,对CPS未来的技术发展进行了展望。以希望为信息物理系统及相关研究领域的专家和学者提供参考,为我国产业科技变革和智能化转型提供技术支持。

**关键词:** 信息物理系统; 技术综述; 智能感知; 分布式控制; 人工智能; 形式化验证

**中图分类号:** TP29

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2021)12-3393-14

**DOI:** 10.11999/JEIT211135

## Review on Cyber-Physical System: Technology Analysis and Trends

YANG Ting<sup>①②</sup> LIU Yachuang<sup>②</sup> LIU Yuzhe<sup>②</sup> WANG Chengshan<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Grids, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

<sup>②</sup>(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the improvement of the informatization degree of various industries in the national economy and the deep cross integration between industries, the Cyber-Physical System (CPS) is becoming the key technology to support this development. It is also known as the core system leading a new round of industrial technology reform in the world. By accurately mapping the entities, behaviors and interactive environment in the objective physical world to the information space, real-time processing and feedback back to the physical space, CPS can solve the problems of analysis and modeling, decision optimization and uncertainty processing of complex systems from a system perspective and different levels. This paper analyzes the key technologies and difficult bottlenecks of CPS from its architecture, design and development process, discusses the supportive relationship between CPS and cutting-edge technologies such as edge cloud collaborative computing, digital twins, artificial intelligence and blockchain, and summarizes the research status of CPS in four application fields: industrial production, energy and electricity, traffic and medical health. Finally, the future technical development of CPS is prospected. It is hoped to provide reference for experts and scholars in CPS fields, and provide technical support for China's industrial scientific and technological revolution and intelligence transformation.

**Key words:** Cyber-Physical System (CPS); Review; Intelligent perception; Distributed control; Artificial Intelligence (AI); Formal verification

收稿日期: 2021-10-01; 改回日期: 2021-10-15; 网络出版: 2021-10-20

\*通信作者: 杨挺 yangting@tju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0132100), 国家自然科学基金(61971305)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China(2017YFE0132100), The National Natural Science Foundation of China (61971305)

## 1 引言

随着泛在传感、可靠通信、高性能数据处理及智能控制等技术的迅速发展,物理系统逐步向着数字化、网络化和智能化方向发展,分散独立的物理实体逐步互联互通,并与自身状态数据、运动执行过程数据相融合,形成信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)。与此同时,CPS系统及相关技术又从新的融合空间视角实现对基础客观世界的可观和能控,提升人类认识世界、控制世界和改造世界的能力<sup>[1]</sup>。

从技术层面分析,CPS是基于5C层级架构(智能感知层Connection、信息挖掘层Conversion、网络层Cyber、认知层Cognition和配置执行层Configuration)的高度复杂系统,能够实现物理资源与网络空间信息资源的高度融合。正因如此,近年来各国学术界和产业界都予以了极高的关注度:美国通过NAS(美国国家科学院)发布《美国竞争力计划》,明确将CPS列为重点支持计划<sup>[2]</sup>,随后美国国家标准与技术研究院(NIST)专门组建了CPS公共工作组部署制定CPS系列标准<sup>[3]</sup>。我国也在2016年由国务院发布了《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》,明确提出“构建信息物理系统参考模型和综合技术标准体系,建设测试验证平台和综合验证试验床,支持开展兼容适配、互联互通和互操作测试验证”<sup>[4]</sup>。随着研究的深入,世界各国达成了普遍共识,CPS已然成为支撑信息、通信、环境、社会与物理实体深度融合的综合技术体系,将对工业、能源、交通、医疗、航空航天等诸多领域的发展变革产生无可估量的深远影响。

然而随着CPS自身理论的延展和在多领域的应用深入,其已由浅层信息密集系统演化升级为深层知识密集系统。更多CPS技术和发展层面的问题值得深入思考:现阶段不同领域对CPS的认知差异的原因是什么?能否通过完善的体系架构和方法论加以统一?5G/6G通信、人工智能等新一代信息技术会给CPS系统带来哪些突破和变革?未来CPS技术的变革又能为产业应用带来哪些新契机?

针对这些问题,本文简述了CPS的基本概念,梳理了CPS的技术特征,并从体系架构、设计和前沿技术对CPS的支撑等3个维度进行了详细分析;随后以工业制造、能源电力、智能交通和医疗健康4个实际应用领域对CPS应用研究现状进行了阐述,并对CPS技术未来发展进行了展望,期望能给相关研究者提供有益的参考和启示。

## 2 CPS概述

### 2.1 CPS基本概念

在过去几年中,不同的国家或科研团体定义了不同的信息物理系统概念,在此梳理总结了几个典型代表性定义,如表1所示。

基于上述定义,我们认为信息物理系统是集成泛在感知、可靠通信、嵌入式计算和智能化控制于一体的新一代智能系统,是物理实体与信息空间的融合统一体。CPS注重信息资源与物理资源的紧密结合与深度协作,实现对物理系统智能化提升,使其具有状态感知、实时分析、科学决策、最优控制等计算、通信、自治和协作功能。一个简易明晰的CPS闭环技术体系架构图如图1所示。

正是有了CPS技术,可将物理实体、运动行为、复杂环境等要素精准映射到信息空间并进行实时处理反馈,实现从信息-物理融合的双维度视角解决复杂系统的模型构建、决策优化、不确定处理等难题。由于CPS极具产业融合性,在其不断发展演进过程中,衍生形成多种不同形态,如:信息物理生产制造系统<sup>[5]</sup>、电力信息物理系统<sup>[6]</sup>、信息物理智能交通系统<sup>[7]</sup>、医疗信息物理系统<sup>[8]</sup>、社会信息物理系统<sup>[9]</sup>等。

### 2.2 CPS的技术特征

与独立的信息系统或物理系统相比,CPS具有下列几个重要且显著的技术特征:

**(1) 异构集成:**由CPS的定义可清晰看出,它是由信息系统和物理系统异构集成而产生的,且每个子系统包含了多种结构和功能各异的单元模块或设备装置。异构的硬件、软件、数据等集成连通使

表1 CPS概念列举

组织	概念
中国科学院	CPS是在环境感知的基础上,深度融合计算、通信和控制能力的可控可信可扩展的网络化物理系统。通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实时交互来增加或扩展新的功能,以安全、可靠、高效和实时的方式监测或控制物理实体。
美国国家科学基金会	CPS是基于嵌入式的计算核心实现感知、控制、集成的工程系统,信息被“深度嵌入”到每一个互联物理组件(甚至物料)中,其功能由信息和物理空间交互实现。
欧盟第七框架计划	CPS主要具有计算、通信和控制功能,并将这些功能与不同物理过程(如机械、电子和化学)深度融合。
德国国家科学与工程院	CPS是指使用传感器直接获取物理数据和执行器作用物理过程的嵌入式系统,使用来自各地的数据和服务,通过数字网络将物流、在线服务、协调与管理过程连接,其开放的技术系统使整个系统的功能、服务远远超出了当前的嵌入式系统。

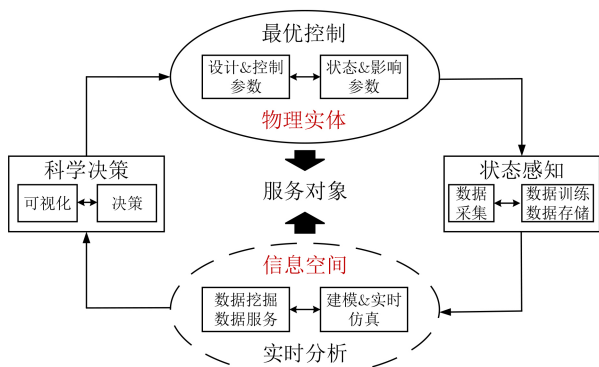


图1 CPS闭环技术体系

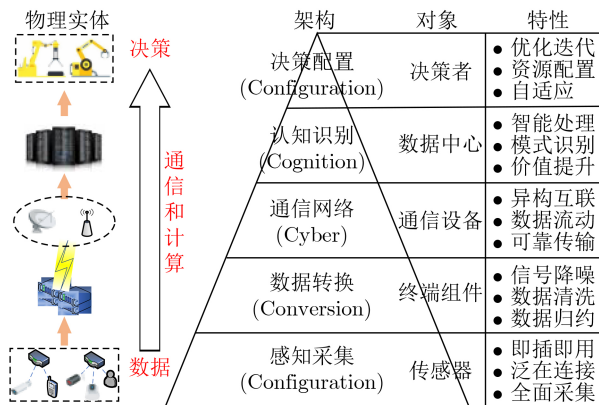


图2 CPS系统的体系架构

得CPS能够实现物理实体与信息虚体之间的交互联动、虚实映射、协同控制等功能。

(2) **深度融合**：CPS本质就是以信息子系统与物理子系统相互嵌套、深度融合形态存在。信息数据的产生、传输、处理及其价值产生均源于物理系统；而物理系统也只有与信息结合之后才能可靠、高效且智能运行，进而产生更大价值。

(3) **数据驱动**：跨设备、跨区域、跨系统的互联互通使得CPS系统表现出基于数据的泛在强交互特性。数据的流动转化也使得物理隐性形态转化为信息显性形态，因此数据驱动成为CPS系统运行的核心载体和源动力。

(4) **系统自治**：多模块、多单元异构集成的CPS系统必然需要有效的分层、分区自感知和自主调控，而系统自治能够使得CPS自配置形成不同层级的知识库、模型库和资源库，使其能够不断自我优化和演进提升。

### 2.3 CPS体系架构

体系架构是复杂系统模块化集成的重要基础。本文根据5C层级<sup>[10]</sup>构建了CPS的“感知采集-数据转换-通信网络-识别认知-决策配置”体系架构，如图2所示。基于各类传感器对终端的量测，CPS能够实现对物理系统的智能感知和模型映射，并将决策控制信息反馈到物理控制执行系统。数据从感知采集层经过清洗降噪、协议转换、分析与计算实现数据信息对物理系统的价值提升。

## 3 CPS关键技术

本文从3个维度归纳总结了CPS诸多关键技术，如图3所示。

(1)从体系架构剖析，CPS主要包括采集、信息处理、通信、控制决策以及贯穿始终的安全技术等。

(2)从设计开发流程分析，主要包括机理分析、模型建立、系统设计、仿真验证、集成实现等。

(3)从前沿技术对CPS的支撑关系梳理，先进

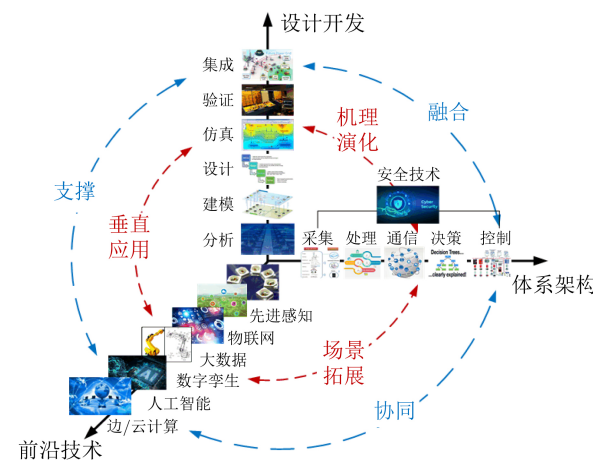


图3 CPS的技术体系

传感技术、物联网技术、边云协同计算、大数据处理、人工智能、数字孪生、区块链等技术均与CPS不断融合，再创新形成“CPS+”技术体系。

以下从上述3个维度详细分析CPS的关键技术。

### 3.1 面向CPS体系架构的关键技术

本节基于CPS体系架构详细阐述CPS系统中智能感知、可靠通信、信息处理、控制与决策以及安全技术等关键技术。

#### 3.1.1 智能感知技术

感知技术是物理系统实现智能化、信息化的首要基础，CPS智能感知技术由智能传感和状态感知两层组成，并通过物联网(Internet of Things, IoT)技术集成实现。而CPS的异构集成性、分布分散性以及控制的实时性需求又对传统的感知技术提出了更高的要求。

目前，随着IC设计制造技术的发展以及高密度集成化程度的提升，传感器已将数据采集、预处理、存储和逻辑判断等功能高度集成，形成功能更强，功耗更低的智能传感器<sup>[11]</sup>。其也根据组成结构和变换原理的不同形成各类型传感器。以电流传感器为例，就可分为霍尔电流传感器、光纤电流传感

器、TMR/GMR电流传感器等类型。图4展示了一种新型的闭环TMR电流传感器<sup>[12]</sup>，其具备计量精度高和误差自校正的优点。面向未来，传感器正朝着集成化、系统化、低功耗化、网络化等方向发展。

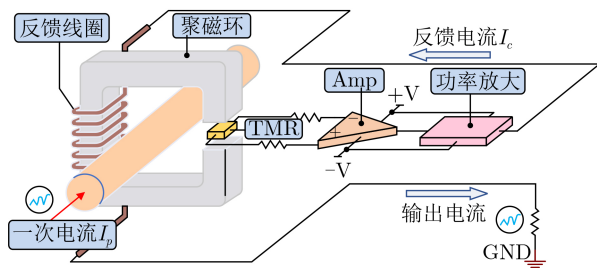


图4 闭环TMR电流传感器

状态感知是基于各类“感知器件”，即传感器，完成不同时间尺度下对系统运行状态、行程位移等观测并进行分析辨识。进而为优化、决策、控制提供正确的输入、输出、甚至当前扰动等状态数据。可以说状态感知是实现系统智能的首要条件。目前，CPS状态感知的分析方法主要有两类：一类是基于模型驱动的方法，通过对CPS系统进行感知模型建立，实现对系统运行状态辨识，其具有较好的理论可解释性<sup>[13]</sup>；第2类是基于数据驱动的方法，对于受多物理场影响的复杂CPS系统难以一次精确建模，则可通过数据学习训练同样获得状态感知辨识能力<sup>[14]</sup>。

### 3.1.2 CPS通信技术

CPS系统的异构终端分散分布以及协同控制的特性决定了其需要多类型通信技术实现不同应用场景中的可靠信息交互。例如，在近物理设备侧可采用蓝牙，WiFi，Zigbee等近场通信技术和Ad-Hoc组网方式，而远程大数据量的传输或控制指令的低延时下发则需要采用光纤通信或5G无线通信方式<sup>[15]</sup>。随着B5G/6G、量子通信等新一代通信技术的出现，将为解决CPS网络管理、通信服务质量提升和安全保密通信问题提供新的解决方案。

不仅是通信方式的选择，CPS信息传输的服务质量是由通信组网、通信协议及通信资源调度等多种技术的优劣共同决定。例如，在电力领域应用的电力CPS终端呈现设备类型多元化，既有电压、电流、功率、相角、开关状态等各类量测终端，又有各种控制终端，分布分散且广泛(广泛安装应用于发电、输电、变电、配电、用电各环节)的特点。不同的信息传输需求和运行工况决定了CPS网络通信介质的多样性，涵盖了电力载波通信<sup>[16]</sup>、微波通信、RS485总线、光纤、4G/5G等。并且CPS网络承载的信息具有不同的通信QoS需求，例如有面向

故障告警和处理的时间敏感特性业务，也有视频监控类高带宽需求业务。因此需要针对不同数据传输QoS需求，进行合理的通信组网规划、通信协议选取以及网络资源调配才能实现最优CPS通信。其中如无线自组网技术，OpenFlow软件定义网络标准协议，以及5G网络切片技术等都是CPS通信关键技术<sup>[17]</sup>。

### 3.1.3 信息处理技术

CPS中信息处理技术主要指数据采集过程中的前端预处理技术、在传输过程中的数据压缩技术、以及在控制决策过程中的数据融合及数据挖掘技术等。

在前端传感器数据采集过程的数据预处理主要包括数据清洗<sup>[18]</sup>、数据补全、数据归约转换<sup>[19]</sup>等。通过数据预处理，实现原始采样数据降噪、异常数据辨识和修复，提升数据质量。目前，对数据预处理方法的研究有较多成果，例如，在激光测高领域，采用经验模态分解EMD方法实现对高分七号全波形激光测高数据的降噪处理，提升数据信噪比<sup>[20]</sup>；再如基于数据本身内在结构特性，采用插值法<sup>[21]</sup>、生成对抗网络<sup>[22]</sup>、低秩矩阵<sup>[23]</sup>等方法进行高精度的缺失数据恢复，保障数据完整性、提升数据可用性。

随着CPS运行和控制的细粒度化需求，前端数据采集频率越来越高，海量高密度采样数据对传输通道和后端信息处理都造成了巨大压力。通过数据压缩实现在保证辨识精度的情况下对数据量的有效削减，缓解系统信息载荷，常用的方法包括基于数字编码、矩阵转换、张量分解等的压缩方法<sup>[24,25]</sup>。此外，还有研究将数据压缩与前端采样紧密结合，在智能配用电领域提出了基于压缩感知的基波滤除谱投影梯度算法，实现了对电能质量高频谐波/间谐波的采样压缩<sup>[26]</sup>。与数据压缩不同，数据融合则是将多源数据经过数学方法进行整合处理，提取特征信息，并在推理决策作用下将特征数据与知识库匹配，进而做出决策判断。其广泛用于CPS目标检测、状态监视、故障辨识与定位、决策支撑等<sup>[27]</sup>。随着数据源的扩充，面向CPS的数据融合已经由结构化量值数据转向包含非结构化、不确定性数据在内的软硬信息融合。

### 3.1.4 分布式协同优化控制技术

CPS系统的异构性和自治性决定了其控制器设计和控制方法必然从传统集中式向分布式协同优化控制演进<sup>[28]</sup>。其中，本地控制器由于靠近物理设备侧，因此能够快速低延时获取现场信息，进行实时控制。而CPS强大的信息通信系统又能够实现分布式控制器间的互联互通，从而通过通信网络信息交

互完成高层级次的区域间协同控制。最上层云端中央控制平台则可根据所获取的全面信息做出系统级时空全局优化决策。

需要指出的是，在CPS系统中，信息与物理紧耦合使得通信网络状态和信息不确定性直接影响系统的可控性和稳定性能，即CPS系统控制已不再是传统单一物理控制系统，演化成为新型网络控制系统(Network Control System, NCS)<sup>[29]</sup>。网络拥塞造成的传输时滞、抖动或丢包都将直接影响预设控制器的性能，使得原来已标定的物理系统性能衰退，甚至破坏系统的稳定性。针对这一CPS网络控制新问题，现有方法多是在限定网络状态前提下，进行控制器设计。如基于排队论预估通信网络不确定测度<sup>[30]</sup>，或在构建目标函数中将信息不确定性简化为确定量并进行补偿，进而在此基础上实现系统稳定控制<sup>[31]</sup>，显然，其有效性极大程度依赖于这种简化与实际的吻合度。此外，文献<sup>[32]</sup>基于网络演算方法准确计算了分布式CPS系统的通信时延的上下界，进而采用切换控制策略实现网络控制，其为分布式信息不确定的CPS控制提供了一个较为新颖的思路。

### 3.1.5 信息物理系统安全及系统防御技术

与传统物理系统相比，由于物理与信息两子系统的紧耦合性，系统服务的开放性和自治性，使得CPS系统更容易受到入侵或网络攻击。如通过身份伪造、虚假数据注入、拒绝服务(DoS)等欺骗或攻击方法从CPS信息层跳转入侵到物理层，实现扰乱系统安全稳定运行甚至破坏设备实体<sup>[33]</sup>。因此，信息物理系统的安全防御技术更加重要，且难度更大。主要的CPS安全技术包括可信接入认证、网络攻击检测和安全防御体系与方法等。

开放性和异构集成体系特征使得CPS系统必然存在零信任/弱信任环境下各类终端或用户的随时接入需求，因此可信网络接入技术(Trust Network

Connection, TNC)就成为了CPS系统安全的第1道防线。在此给出典型的TNC架构<sup>[34]</sup>，如图5所示，主要包括访问请求者、访问控制器和策略管理器3个实体，并由下至上分为网络访问控制层、可信平台评估层与完整性度量层3层级，此外，架构中还定义了若干接口组件使不同实体间完成互操作。TNC通过网络访问控制、安全消息传输、数据加解密、密钥分发管理和身份认证等技术隔离大部分的网络入侵和攻击。

攻击检测是利用攻击者留下的痕迹，快速判断并有效寻找非法攻击来源的技术，它是系统规避或处理安全事件的前提。CPS攻击检测技术通常可分为基于知识的攻击检测和基于数据驱动的攻击检测。残差生成法是一种代表性的基于知识攻击的检测方法<sup>[35]</sup>，其通过将网络行为观测量与系统的分析模型进行残差计算，并与先验知识所设定的阈值进行比较，以判断是否存在攻击。基于数据驱动的方法则是使用启发式算法、深度学习等机器学习方法从数据中挖掘出隐藏攻击行为<sup>[36]</sup>，如DDoS攻击等。随着研究的深入，也有将两者融合的攻击检测新方法提出，如文献<sup>[37]</sup>基于先验FARIMA流量模型，提取电力信息流时-频域特征，进而提出了采用支持向量机(SVM)的智能变电站CPS系统异常行为检测新方法，其具有更低的误判和漏检率。攻击检测方法除上述分类外，还可按照检测时间点分为实时攻击检测和事后攻击检测等。

最后是CPS安全防御体系，其作为系统全面架构，可分为3层面：(1)安全阻断技术，即分别在物理设备接入、身份认证、操作授权、互联网访问和数据传输各环节设置相应的阻断机制，实现对入侵攻击行为快速阻断，防止破坏的扩大化。(2)主动免疫技术，即基于内生安全机制，通过不断的安全事件分析或攻防与反制模拟演化，从而生成新的安全策略，通过主动全系统更新，达到对病毒或攻击

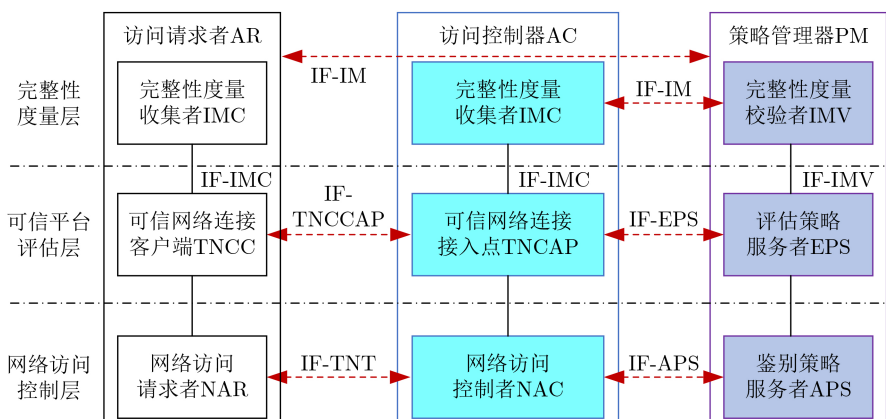


图5 分布式网络系统可信接入架构

行为的免疫效果。(3)信息-物理融合安全防御,其是针对CPS特有的信息与物理子系统融合特性,将信息子系统数据(如网络流量等)和物理子系统数据(如设备状态数据等)进行事件触发关联,发现隐匿安全事件,从信息或物理两维度选择最优的防御策略完成CPS立体安全防御<sup>[38]</sup>。

### 3.2 CPS设计开发关键技术

信息物理系统概念本身即是从生产中提出的,因此其具有强产业应用特征,设计开发高效CPS系统以满足不同应用需求是根本目标。本节从CPS的开发流程维度梳理系统设计开发中的关键技术,主要包括信息物理耦合建模技术、异构系统设计集成技术、仿真以及形式化验证技术。

#### 3.2.1 信息-物理融合建模技术

在CPS系统设计伊始,首先面对的难题就是信息-物理融合建模问题。物理系统中虽然被控对象及其属性各不同,但多是连续系统,其状态以模拟量来表述,因此可以统一在连续时域坐标系内建模分析,主要关注控制对象的时域特点。

而信息系统则多是以事件驱动的,关注报文到达时间、事件的执行次序等,采用概率分布描述数据累计到达或事件发生特性,再通过离散事件间的相互作用描述系统动态演进过程,因此是在离散的事件轴坐标系建模。其触发方式包括:定时触发(如传感器固定周期采样)和随机触发(如故障告警报文的上传),其主要针对系统中的随机性事件,发生时间难以准确预测。

因此,如何将CPS系统中连续的物理子系统与离散事件触发信息子系统统一建模,成为CPS融合建模的首要技术难点。针对该问题通常采用将通信信息的作用效果作为输入量或增益考虑到物理过程中进行建模与分析<sup>[39]</sup>;或是将物理连续系统离散化,进而统一到信息离散坐标系中分析的方法<sup>[40]</sup>。

#### 3.2.2 异构组件的集成设计技术

由于CPS规模庞大,如何设计顶层架构并将各类设备、软件、网络集成起来实现整个系统的高效可靠安全运行是CPS另一关键技术。孤立的硬件、嵌入式程序与通信模块集成实现单元级CPS的功能,实现设备级的资源优化(如优化运动路径等);多个单元级CPS汇聚到统一网络(如CPS数据总线),能够实现系统级CPS资源优化,如自动生产线的智能配置等;系统级CPS与智能平台的集成,能够促进“硬件+软件+网络+平台”多层级的资源配置,如企业级远程监测诊断、园区级综合能源管理功能等<sup>[41]</sup>。

在这中间,由于CPS的高度分散性和开放性,

CPS硬件集成将通过统一的硬件接口规范既确保物理及电气上的连接又保证通信上能够实现即插即用<sup>[42]</sup>。CPS软件则通过更高层级的架构优化和中间件的合理应用,打通不同的应用及管理服务之间的壁垒,解决异构数据(如模拟量/数字量、结构化数据/非结构化数据)间高效流动交互问题,实现物理实体之间的软连接。

#### 3.2.3 仿真及形式化验证技术

在CPS仿真技术研究方面,考虑信息系统的影响,传统只侧重于物理系统或通信网络的仿真软件无法胜任,需要开展适合CPS的协同仿真技术研究。目前CPS仿真技术主要采用功能扩展或联合仿真的方式,例如隆德大学的TrueTime通过拓展MATLAB的功能,添加网络协议模型和事件触发函数,实现分布式实时控制系统的模拟仿真<sup>[43]</sup>。但是模型过度简化将使系统缺失精确模拟动态过程。联合仿真则是针对物理系统和通信系统分别采用专业仿真工具进行仿真,具有较高的精确度。然而如何实现两者的同步以及数据交互则是关键,非实时联合仿真不用高精度同步,通过同步模块进行数据交互将物理子系统和信息子系统关联到同一时域内;实时混合仿真则是建立两套或多套并行仿真工具实现时间轴的同步<sup>[44]</sup>。当前大型并行式高速仿真器的出现有效解决了并行仿真中同步协调难题,极大地推进了CPS实时混合仿真技术的发展<sup>[45]</sup>。

虽然仿真能够从数值上反映系统的运行情况,但都是限定于某一种或某一类场景,并不能对整个真实CPS运行场景全覆盖。而某些关键应用领域如航空航天,核工业等却需要对任何偶发不可预测场景的全检测,保证百分百正确。形式化验证就是用数学方法去证明系统的完备性和正确性,能够从理论上验证CPS系统的安全可靠性,有效解决了传统仿真验证方法无法穷举所有场景以及某些极端场景难以验证的固有难题<sup>[46]</sup>。因此,通过形式化验证是对CPS的模型、算法、控制及软硬件运行系统进行校验和修正的不可或缺工具。也正是由于没有进行系统的形式化验证,波音737MAX型客机存在的自动失速控制系统设计隐患无法被及时发现,从而导致在2018年10月、2019年3月短短半年间以相同原因造成两起空难346人遇难的惨痛事故<sup>[47]</sup>。

### 3.3 前沿新技术支撑CPS系统

近年来,云边协同、数字孪生、人工智能以及区块链等前沿新技术的发展极大程度促进了CPS技术的演进和应用。

由CPS技术特征分析可知,信息物理系统本身即是分布式异构集成系统,先进的雾计算<sup>[48]</sup>、边缘

计算和云计算(图6)<sup>[49]</sup>为CPS在不同层级提供了增强的计算能力,使得CPS系统可以个性化、专业化的配置智能服务,以满足不同应用需求。

数字孪生(Digital Twin, DT)即是物理实体的虚拟数字映射系统,如图7给出了工业机械臂和它的数字孪生体<sup>[50]</sup>。通过DT技术,客观复杂物理实体或难以细观测变化过程被数字化全息展示,因此可以说DT技术为CPS提供了在线全景动态演化途径。

新一代人工智能(Artificial Intelligence, AI)算法在海量大数据处理和分析方面具有显著优势<sup>[51]</sup>,应用在CPS系统中可实现状态估计、故障分析诊断和自驱优控制等<sup>[52]</sup>。此外,人工智能的发展并与信息物理系统的融合也促使CPS进一步发展形成人-信息-物理三元融合智能体,将人类智慧与机器强大计算力有机结合,并通过CPS贯穿作用于客观物理世界<sup>[53]</sup>,如图8所示,其为CPS的未来发展提供了更广阔的空间。

区块链技术具备的去中心性、不可篡改性、可溯源性、分布式共识及最终一致性等特征,使得其在CPS数据管理特别是分布式数据存储与评估、身份认证、线上交易等具备广泛应用前景<sup>[54]</sup>。CPS中的大量分布式终端能够通过“上链”实现身份信任认证、操作行为可追溯、数据安全存储与可靠传递

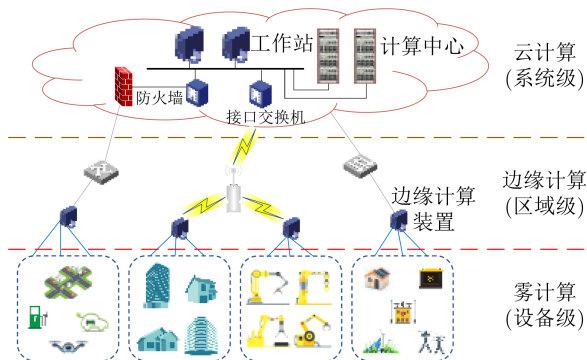


图6 CPS与雾-边-云计算

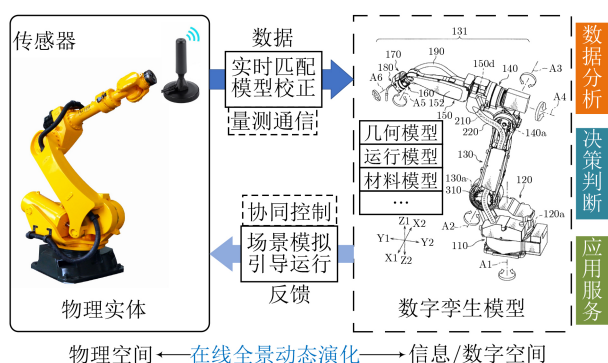


图7 CPS与数字孪生

等;CPS则以其丰富的应用场景使得区块链技术从传统的数据管理拓展到物理系统应用,如图9所示。

## 4 CPS应用研究综述

目前,随着CPS技术和应用的快速发展,CPS已经在工业制造、能源电力、交通运输、医疗健康等诸多领域得到广泛应用。

### 4.1 CPS在工业制造领域应用

CPS的概念最早即是在工业领域,特别是制造业中提出的。如著名的德国“工业4.0”概念,其核心就是信息物理制造系统(Cyber-Physical Production Systems, CPPS)<sup>[55]</sup>。工业CPS的应用场景现在已经涵盖了设计、生产、服务、应用等全周期。物理实体、生产环境和制造过程通过CPS技术可精准映射到信息空间,从而实现实时控制和优化决策,全面提升工业制造全过程、全产业链、全生命周期的智能化和高效性。

具体来讲,CPS能够将产品开发伊始的设计理念、试制、工艺和试验等有效映射到虚拟空间中仿真、迭代、优化和形式化验证,使得在后续产品研发全周期的不同阶段及不同开发者之间实现友好的信息共享复用,如通过数字孪生有效提升设计研发效率<sup>[56]</sup>。

而CPS与工业制造的深度融合,有效打破生产过程中各组件间的信息孤岛。通过CPS建立由底层装置硬件到上层柔性管理平台,实现对工序的实时优化控制和柔性组织配置,提供智能服务,并合理管理和调度各种生产资源,实现从“制造”到“智造”的升级。图10给出一个典型的工业制造CPS架构。

### 4.2 CPS在能源电力领域应用

能源系统和CPS技术的深度融合使得传统分散的不同能源系统向互联互通、共源共网、多能互补的方向转变,通过对电力、热力、天然气等融合互济,能够最大程度地提升能源的综合利用效率,为用户提提供安全、经济、便捷的综合能源服务,符合

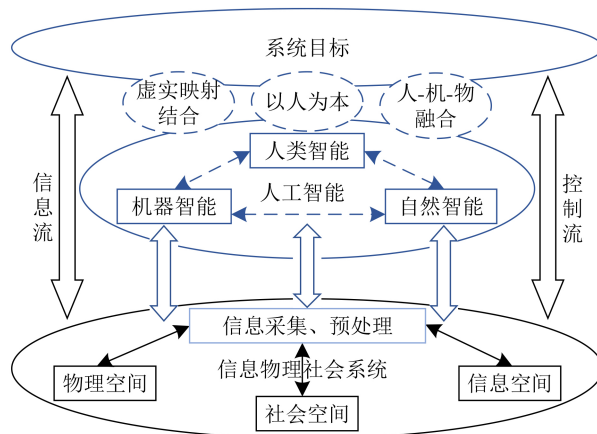


图8 基于人工智能的信息物理社会系统模型

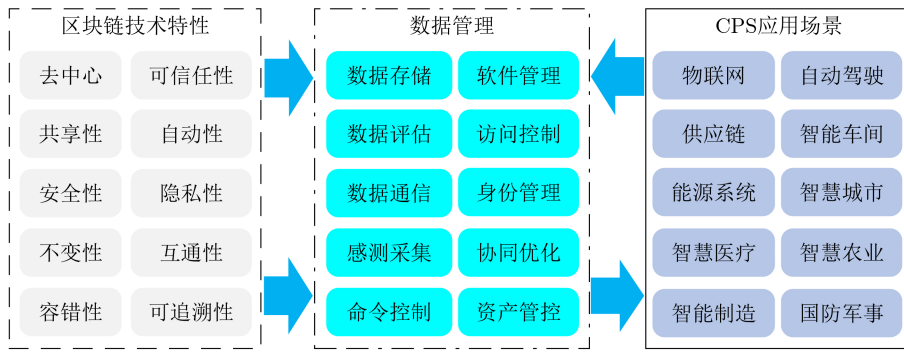


图9 区块链技术对CPS的支撑

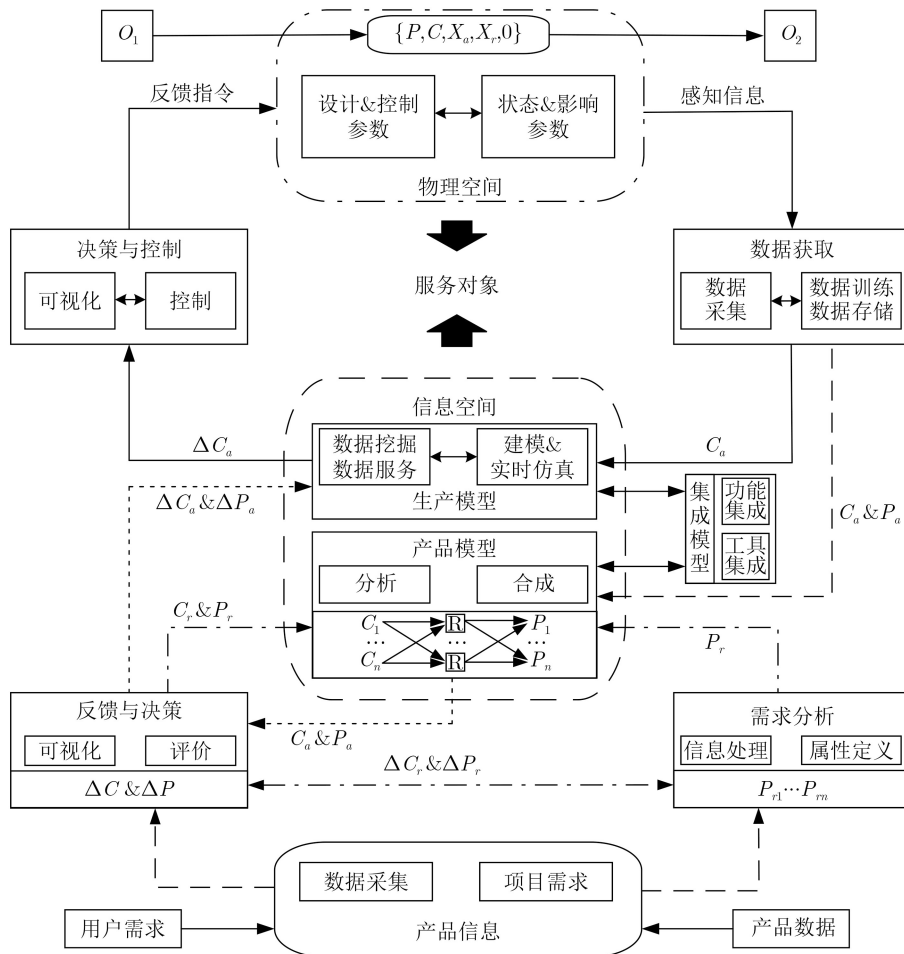


图10 典型的工业制造CPS系统架构

国家碳达峰、碳中和“双碳”目标和能源结构改革战略<sup>[57]</sup>。

在能源电力生产环节，CPS能够协助打通煤炭原油开采和发电系统，实现集约化生产以及热电联产联供。与此同时，以风电、光伏为代表的可再生清洁能源并网通过CPS系统与传统发电单元相融通，以促进分布式新能源就地消纳，提高能源生产和发电过程中的资源配署能力<sup>[58]</sup>。在能源电力输配环节，CPS助力电力系统实现全景感知、数据高效

传输和信息交互以及边云协同优化控制，保障系统的安全、可靠、稳定运行，进而提供清洁、安全、高效的能源电力向用户侧的供给服务<sup>[59]</sup>。在能源电力消费环节，CPS技术以物联网形式将海量用户终端接入能源系统，通过获取用户的用能行为信息，对海量数据加以分析，实现精准负荷预测<sup>[60]</sup>，从而实现能源电力供应侧与消费者间的双向互动，提升用户参与需求响应的积极性，进一步促进能源电力消费市场化水平。

与此同时, CPS系统也将电、水、气、热多种能源形式在物理侧和信息侧连接, 发展成为现代综合能源系统。该系统比以往任何一种单一的能源子系统都复杂, 在能源生产单元、传输单元、转换单元和消费单元都存在着关联耦合关系, 如冷-热-电三联供等<sup>[61]</sup>。如何基于CPS技术体系, 充分发挥信息通信技术对综合能源系统的规划、运行及协同控制是研究热点。在该领域, 部分学者已经开展了初步探索研究: 文献<sup>[62]</sup>采用CPS和数据孪生技术建立了多物理-信息混杂系统的综合模型, 有效支撑智慧城市综合能源系统的建设。文献<sup>[63]</sup>构建了基于有向多物网络流模型的信息物理耦合电-气综合能源系统韧性优化分析模型, 并以失负荷量最小为优化目标进行了网络重构分析和经济性运行优化, 以实现电力和天然气综合能源系统的韧性提升。

### 4.3 CPS与智能交通

人类活动的日益频繁密集, 对通畅便捷的交通提出了更高的要求, 促进了智能交通、新能源汽车、无人驾驶、城市轨道交通等新技术不断涌现。而CPS与交通运输系统的深度融合, 将人、车、路等物理实体与信息、应用融为一体, 使得传统的交通系统具有了感知、判断、控制和决策, 促进了车辆行驶、交通运行安全和效率等性能的综合提升。

在公路交通、铁路运输的规划层面, 部分学者运用CPS技术与交通系统各构件融合, 有效提升了交通基础设施的规划和建设效益。例如, 文献<sup>[64]</sup>基于智能交通信息物理系统架构, 研究了计及系统安全和运营风险的智慧城市车-路协同规划问题。文献<sup>[65]</sup>则将CPS技术应用于智能高铁规划设计中, 面向智能高铁的4个组成部分(智能高铁大脑平台、智能建造、智能装备和智能运营), 提出6维关联分析方法, 进行了基于CPS的智能高铁蓝图设计和发展战略规划。

在运输优化引导方面, 面向交通的CPS系统能够更精细化实时监管并引导车辆、轨道交通、甚至是飞行器, 并与管控平台形成高效数据交互, 通过分布式协同调控, 实现最优化调度, 提升智能交通动态运输性能及效率。在该研究领域, 文献<sup>[66]</sup>设计了智能交通信息物理融合云控制系统, 用于解决拥堵路段交通流分配问题。文献<sup>[67]</sup>同样针对交通拥堵问题, 基于CPS的边缘分区自治体系, 将传统的云计算中心管控分解到边缘设备, 提出了基于边缘深度学习的交通流检测方法, 并在边缘设备Jetson TX2平台部署, 有效提升了平均处理速度和准确率。

此外, 随着CPS技术与交通系统的融合及数字化应用, 信息安全、隐私保护等问题也日益凸显,

其直接关系到个人生命安全。针对交通数字化安全问题, Hatzivasilis等人构建了依赖于CPS技术的铁路运营系统信息安全、隐私和可靠性安全管理框架<sup>[68]</sup>。Kavallieratos等人则针对船舶海事CPS系统, 分析了AIS自动识别系统、电子海图信息系统和全球海上遇险和安全系统, 进而建立了C-ES安全生态体系<sup>[69]</sup>。

### 4.4 CPS与医疗健康

CPS技术与医疗健康的深度融合使得传统的健康监测、医疗救治、疫病防控等应用极大拓展, 医疗健康步入了“医疗保健4.0”时代<sup>[70]</sup>。

首先, 基于CPS体系架构建立的健康监测系统能够有效汇聚患者和医疗机构的各类数据(如电子健康记录、药品购买记录等), 通过对时空分散无序的健康数据挖掘分析, 实现精准个性化、定制化的医疗或保健服务。在该领域, Guo等人<sup>[71]</sup>基于CPS技术提出了未来智能家庭保健架构。Jiang等人<sup>[72]</sup>提出了基于CPS的心血管慢性疾病健康监视设备与医疗中心的互联互通技术。

远程医疗及远程紧急救助则是CPS与医疗健康结合最显著的产物之一。远程医疗实现了稀缺医疗资源的公平共享和救助生命过程的全球协同。学者Bayanbay等人<sup>[73]</sup>将配备医疗机械手和特殊设备的无人机操控系统引入到远程医疗综合体系中, 显著增加了在紧急情况下“黄金时段”紧急医疗救助效率。而在我国, 解放军总医院建立了远程辅助手术机器人CPS系统, 并早在2019年就成功完成了2例远程辅助全髋关节置换手术<sup>[74]</sup>。在新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州基于“互联网+”技术, 建立了涵盖州-市-县-乡各级人民医院、卫生院的初级远程医疗系统, 有效促进了医联体各成员单位之间的信息交流和医疗资源整合, 实现了优质医疗资源下沉<sup>[75]</sup>。

从2003年的SARS、2009年的H1N1到2019年的COVID-19, 全球范围的重大疫情导致上亿人次感染, 数百万人死亡, 疫病防控已成为世界各国共同面临的首要问题。CPS技术的应用可以有效提升疾病筛检、病毒溯源、疫情预测以及病人跟踪效率。Xu等人<sup>[76]</sup>基于信息物理系统建立了流行病传播的动力学模型, 监测传染病的传播, 预测传染病的传播范围。Mones等人<sup>[77]</sup>基于流行病学模型与CPS技术, 建立了网络定向疫苗接种优化模型, 协助医护人员和政府更加有效地进行传染病的阻断和“群体免疫”。此外, Dimitrov等人<sup>[78]</sup>针对埃博拉疫情的诊疗隔断问题, 搭建了基于医疗CPS的智能病房, 从疫病防控硬件方面极大程度地减少了工作人员与病毒的接触。

在此次COVID-19新冠疫情防控处理中, CPS与大数据、信息通信等技术的融合应用使得我国在疫情防控方面走在了世界的前列, 也进一步拓展了新技术在医疗卫生领域的应用范围。文献[79]研究并设计了边云结合物联网平台, 以期提升新冠肺炎防控多个环节(包括新冠肺炎爆发预测、新冠肺炎症状诊断、检疫监测、接触者以及SARS-CoV-2突变追踪)的系统化、智能化水平。在具体的技术方面, 文献[80]评估了基于5G的机器人辅助远程超声系统在检测COVID-19患者中的可行性, 建立了远程机器人超声扫描的检查方案, 并成功地对23名患者进行了远程心肺检查。此外, 通过“互联网+”迅速开发部署的健康码和行程卡系统也在我国疫情防控中发挥了重要作用<sup>[81]</sup>。

## 5 CPS发展展望

作为支撑和引领全球新一轮产业技术变革的核心技术之一, 加强CPS研究, 并面向产业推广将对推进“中国制造2025”战略以及“2035远景目标”的实现具有重大的现实意义。当前CPS正朝着体系化、层次化、复杂化方向发展。但同时CPS自身理论和技术难点, 以及面向不同产业的垂直纵深应用需求发展, 都面临着诸多挑战。在本文最后部分, 对CPS发展方向进行展望, 希望能够对后续研究提供参考。

### (1) 信息物理耦合机理解析及CPS智能控制。

由于CPS是物理子系统与信息子系统耦合作用而形成的复杂系统, 其中既包含众多物理构件也包含不同的信息通信网络组件, 物理和信息的耦合、作用与反作用关系极其复杂, 且呈现动态微扰关系。因此亟需解析信息-物理耦合机理, 并在此基础上依靠自主认知与学习能力形成全新的CPS智能控制理论与技术体系。

### (2) CPS安全状态评估及综合防御技术。

CPS在助力物理系统智能化的同时, 也因其多元开放性, 为入侵提供了更多的可能性, 使得其更容易受到恶意攻击。如何在开放共享的空间中, 构建CPS安全状态评估及综合安全防御技术, 通过系统自诊断、自发现、自修复和自免疫实现综合立体安全防御成为决定CPS技术能否在核心领域应用的关键, 研究意义重大且任重而道远。

### (3) CPS领域垂直应用及产业拓展。

CPS技术在工业生产、能源电力、交通驾驶、医疗健康、航空航天等领域的应用研究尚处于初级阶段。如何有效结合领域前沿技术, 并综合先进感知技术、下一代通信网络、云边高性能计算、人工智能、区块链等新技术, 实现对CPS技术的迭代升级, 进而实现

应用场景与“CPS+”深度融合, 拓展其应用将具有更加显性和重要的现实意义。

## 参考文献

- [1] 中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统白皮书(2017)[EB/OL]. <http://www.cesi.cn/201703/2251.html>, 2017.  
China Electronics Standardization Institute. White paper: Cyber-physical system[EB/OL]. <http://www.cesi.cn/201703/2251.html>, 2017.
- [2] The White House. American Competitiveness Initiative[EB/OL]. <http://georgewbush-whitehouse.archives.gov/stateoftheunion/2006/aci/>, 2006.
- [3] CPS Week[EB/OL]. <https://cpsweek2017.ece.cmu.edu/index.php/events/>.
- [4] 国务院. 国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见: 国发(2016)28号[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/20/content\\_5075099.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/20/content_5075099.htm), 2016.
- [5] MONOSTORI L, KÁDÁR B, BAUERNHANS L T, et al. Cyber-physical systems in manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2): 621–641. doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [6] YU Xinghuo and XUE Yusheng. Smart grids: A cyber-physical systems perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(5): 1058–1070. doi: 10.1109/JPROC.2015.2503119.
- [7] WEI Guo, YI Zhang, and LI Li. The integration of CPS, CPSS, and ITS: A focus on data[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, 20(4): 327–335.
- [8] GU Lin, ZENG Deze, GUO Song, et al. Cost efficient resource management in fog computing supported medical cyber-physical system[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, 5(1): 108–119. doi: 10.1109/TETC.2015.2508382.
- [9] YAN Wang. Probabilistic modeling of information dynamics in networked cyber-physical-social systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(19): 14947.
- [10] LEE J, BAGHERI B, and KAO H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [11] OZTEMEL E and GURSEV S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31(1): 127–182. doi: 10.1007/s10845-018-1433-8.
- [12] 杨挺, 张卓凡, 刘亚闯, 等. 基于改进深度信念网络的TMR电流传感器温漂与地磁场校正方法[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2021, 54(8): 875–880.  
YANG Ting, ZHANG Zhuofan, LIU Yachuang, et al. Correction method for temperature drift and geomagnetic field of TMR current sensor based on improved deep belief

- network[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2021, 54(8): 875–880.
- [13] CHOUDHARY G, ASTILLO P V, YOU I, *et al.* Lightweight misbehavior detection management of embedded IoT devices in medical cyber physical systems[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2020, 17(4): 2496–2510. doi: [10.1109/TNSM.2020.3007535](https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3007535).
- [14] HUSSAIN F, HASSAN S A, HUSSAIN R, *et al.* Machine learning for resource management in cellular and IoT networks: Potentials, current solutions, and open challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 1251–1275.
- [15] BURG A, CHATTOPADHYAY A, and LAM K Y. Wireless communication and security issues for cyber-physical systems and the Internet-of-things[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(1): 38–60. doi: [10.1109/JPROC.2017.2780172](https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2780172).
- [16] 杨挺, 刘佳林, 张亚健, 等. 电力线载波通信时频混合降噪方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3153–3160.  
YANG Ting, LIU Jialin, ZHANG Yajian, *et al.* Noise reduction method for lv power line carrier communication[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3153–3160.
- [17] BARAKABITZE A A, AHMAD A, MIJUMBI R, *et al.* 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges[J]. *Computer Networks*, 2020, 167: 106984. doi: [10.1016/j.comnet.2019.106984](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984).
- [18] WANG Tian, KE Haoxiong, ZHENG Xi, *et al.* Big data cleaning based on mobile edge computing in industrial sensor-cloud[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 1321–1329. doi: [10.1109/TII.2019.2938861](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2938861).
- [19] SCHIZAS I D. Online data dimensionality reduction and reconstruction using graph filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3871–3886. doi: [10.1109/TSP.2020.3003423](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3003423).
- [20] 刘向锋, 黄庚华, 张志杰, 等. 高分七号激光测高中全波形回波数据的EMD降噪[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(11): 20200261. doi: [10.3788/IRLA20200261](https://doi.org/10.3788/IRLA20200261).  
LIU Xiangfeng, HUANG Genghua, ZHANG Zhijie, *et al.* Noise reduction based on empirical mode decomposition for full waveforms data of GaoFen-7 laser altimetry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200261. doi: [10.3788/IRLA20200261](https://doi.org/10.3788/IRLA20200261).
- [21] ZHOU Huibin, ZHANG Dafang, and XIE Kun. Accurate traffic matrix completion based on multi-Gaussian models[J]. *Computer Communications*, 2017, 102: 165–176. doi: [10.1016/j.comcom.2016.11.011](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.11.011).
- [22] 杨挺, 何周泽, 赵东艳, 等. 基于FSOM神经网络的电能质量数据缺失修复算法[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1941–1949.  
YANG Ting, HE Zhouze, ZHAO Dongyan, *et al.* Power quality data loss repair algorithm based on FSOM neural network[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1941–1949.
- [23] 杨挺, 李扬, 何周泽, 等. 基于矩阵填充的泛在电力物联网电能质量数据修复算法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 13–21. doi: [10.7500/AEPS20190814007](https://doi.org/10.7500/AEPS20190814007).  
YANG Ting, LI Yang, HE Zhouze, *et al.* Matrix completion theory based recovery algorithm for power quality data in ubiquitous power internet of things[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 13–21. doi: [10.7500/AEPS20190814007](https://doi.org/10.7500/AEPS20190814007).
- [24] ZHANG Linxia, NIU Dunbiao, SONG Enbin, *et al.* Joint optimization of dimension assignment and compression in distributed estimation fusion[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(9): 2453–2468. doi: [10.1109/TSP.2019.2904935](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2904935).
- [25] ZHAO Hongshan and MA Libo. Power distribution system stream data compression based on incremental tensor decomposition[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(4): 2469–2476. doi: [10.1109/TII.2019.2934766](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2934766).
- [26] 杨挺, 武金成, 袁博. 谐波和间谐波检测的压缩感知恢复算法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5475–5482.  
YANG Ting, WU Jincheng, and YUAN Bo. The restoration algorithm of compressed sensing to detect harmonic and inter-harmonic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5475–5482.
- [27] ALAM F, MEHMOOD R, KATIB I, *et al.* Data fusion and IoT for smart ubiquitous environments: A survey[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 9533–9554. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2697839](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2697839).
- [28] YIN Xiuxing and ZHAO Xiaowei. Deep neural learning based distributed predictive control for offshore wind farm using high-fidelity LES data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(4): 3251–3261. doi: [10.1109/TIE.2020.2979560](https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2979560).
- [29] LAI Jingang, LU Xiaoqing, YU Xinghuo, *et al.* Distributed voltage regulation for cyber-physical microgrids with coupling delays and slow switching topologies[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(1): 100–110. doi: [10.1109/TSMC.2019.2924612](https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2924612).
- [30] YATES R D and KAUL S K. The age of information: Real-time status updating by multiple sources[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, 65(3): 1807–1827. doi: [10.1109/TIT.2018.2871079](https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2871079).
- [31] HUANG Xin and DONG Jiuxiang. Reliable control policy

- of cyber-physical systems against a class of frequency-constrained sensor and actuator attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(12): 3432–3439. doi: [10.1109/TCYB.2018.2815758](https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2815758).
- [32] YANG Ting, ZHANG Yajian, LI Wei, *et al.* Decentralized networked load frequency control in interconnected power systems based on stochastic jump system theory[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4427–4439. doi: [10.1109/TSG.2020.2978029](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2978029).
- [33] FARIVAR F, HAGHIGHI M S, JOLFAEI A, *et al.* Artificial intelligence for detection, estimation, and compensation of malicious attacks in nonlinear cyber-physical systems and industrial IoT[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(4): 2716–2725. doi: [10.1109/TII.2019.2956474](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2956474).
- [34] 赖英旭, 刘岩, 刘静. 一种网络间可信连接协议[J]. *软件学报*, 2019, 30(12): 3730–3749.  
LAI Yingxu, LIU Yan, and LIU Jing. Trusted connection protocol between networks[J]. *Journal of Software*, 2019, 30(12): 3730–3749.
- [35] 王星, 杜伟, 陈吉, 等. 基于深度残差生成式对抗网络的样本生成方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1887–1894.  
WANG Xing, DU Wei, CHEN Ji, *et al.* Sample generation based on residual generative adversarial network[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 1887–1894.
- [36] JIANG Yuchen, YIN Shen, and KAYNAK O. Data-driven monitoring and safety control of industrial cyber-physical systems: Basics and beyond[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 47374–47384. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2866403](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866403).
- [37] 杨挺, 侯昱丞, 赵黎媛, 等. 基于时-频域混合特征的变电站通信网异常流量检测方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 79–86.  
YANG Ting, HOU Yucheng, ZHAO Liyuan, *et al.* Abnormal traffic detection method of substation communication network based on time-frequency domain mixed features[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 79–86.
- [38] DING Derui, HAN Qinglong, GE Xiaohua, *et al.* Secure state estimation and control of cyber-physical systems: A survey[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(1): 176–190. doi: [10.1109/TSMC.2020.3041121](https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3041121).
- [39] HUANG Jiangshuai, WANG Wei, WEN Changyun, *et al.* Adaptive event-triggered control of nonlinear systems with controller and parameter estimator triggering[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(1): 318–324. doi: [10.1109/TAC.2019.2912517](https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2912517).
- [40] HU Songlin, YUE Dong, XIE Xiangpeng, *et al.* Resilient Event-triggered controller synthesis of networked control systems under periodic DoS Jamming attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(12): 4271–4281. doi: [10.1109/TCYB.2018.2861834](https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2861834).
- [41] 王晓辉, 季知祥, 周扬, 等. 城市能源互联网综合服务平台架构及关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2310–2320.  
WANG Xiaohui, JI Zhixiang, ZHOU Yang, *et al.* Comprehensive service platform architecture and key technologies of urban energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2310–2320.
- [42] BORDEL B, DE RIVERA D S, and ALCARRIA R. Plug-and-Play transducers in cyber-physical systems for device-driven applications[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, Fukuoka, Japan, 2016.
- [43] BALASUBRAMANIYAN S, SUBATHRA B, HEMESH R C, *et al.* On simulating processor schedules and network protocols within CPS using TrueTime[C]. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Madurai, India, 2015.
- [44] KHALED A B, GAID M B, PERNET N, *et al.* Fast multi-core co-simulation of cyber-physical systems: Application to internal combustion engines[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, 47: 79–91. doi: [10.1016/j.simpat.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.05.002).
- [45] 汤奕, 王琦, 郜伟, 等. 基于OPAL-RT和OPNET的电力信息物理系统实时仿真[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(23): 15–21,92. doi: [10.7500/AEPS20160515020](https://doi.org/10.7500/AEPS20160515020).  
TANG Yi, WANG Qi, TAI Wei, *et al.* Real-time simulation of cyber-physical power system based on OPAL-RT and OPNET[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(23): 15–21,92. doi: [10.7500/AEPS20160515020](https://doi.org/10.7500/AEPS20160515020).
- [46] VICENTINI F, ASKARPOUR M, ROSSI M G, *et al.* Safety assessment of collaborative robotics through automated formal verification[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(1): 42–61. doi: [10.1109/TRO.2019.2937471](https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2937471).
- [47] BRAT G, BUSHNELL D, DAVIES M, *et al.* Verifying the safety of a flight-critical system[C]. Proceedings of the 20th International Symposium on Formal Methods, Oslo, Norway, 2015.
- [48] 唐伦, 肖娇, 魏延南, 等. 基于云雾混合计算的车联网联合资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(8): 1926–1933. doi: [10.11999/JEIT190306](https://doi.org/10.11999/JEIT190306).  
TANG Lun, XIAO Jiao, WEI Yannan, *et al.* Joint resource allocation algorithms based on mixed cloud/fog computing in vehicular network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 1926–1933. doi: [10.11999/JEIT190306](https://doi.org/10.11999/JEIT190306).
- [49] WANG Xiaokang, YANG L T, XIE Xia, *et al.* A cloud-edge computing framework for cyber-physical-social services[J].

- IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(11): 80–85. doi: [10.1109/MCOM.2017.1700360](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700360).
- [50] DING Kai, CHAN F T S, ZHANG Xudong, *et al.* Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smart shop floors[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(20): 6315–6334. doi: [10.1080/00207543.2019.1566661](https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661).
- [51] LI Wei, YANG Ting, DELICATO F C, *et al.* On enabling sustainable edge computing with renewable energy resources[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(5): 94–101. doi: [10.1109/MCOM.2018.1700888](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700888).
- [52] 李杰, 李响, 许元铭, 等. 工业人工智能及应用研究现状及展望[J]. *自动化学报*, 2020, 46(10): 2031–2044.
- LEE J, LI Xiang, XU Yuanming, *et al.* Recent advances and prospects in industrial AI and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(10): 2031–2044.
- [53] KIM H and BEN-OTHTMAN J. Toward integrated virtual emotion system with AI applicability for secure CPS-enabled smart cities: AI-based research challenges and security issues[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 30–36. doi: [10.1109/MNET.011.1900299](https://doi.org/10.1109/MNET.011.1900299).
- [54] ZHAO Wenbing, JIANG Congfeng, GAO Honghao, *et al.* Blockchain-enabled cyber-physical systems: A review[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4023–4034. doi: [10.1109/JIOT.2020.3014864](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3014864).
- [55] ZHENG Pai, WANG Honghui, SANG Zhiqian, *et al.* Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13(2): 137–150. doi: [10.1007/s11465-018-0499-5](https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5).
- [56] TAO Fei, ZHANG He, LIU Ang, *et al.* Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405–2415. doi: [10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186).
- [57] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 3–12.
- CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, *et al.* Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: Multi-energy flow coordination technology[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 3–12.
- [58] MONESS M and MOUSTAFA A M. A survey of cyber-physical advances and challenges of wind energy conversion systems: Prospects for internet of energy[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(2): 134–145. doi: [10.1109/JIOT.2015.2478381](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2478381).
- [59] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(23): 6791–6803.
- WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, *et al.* Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6791–6803.
- [60] KONG Weicong, DONG Zhaoyang, JIA Youwei, *et al.* Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 841–851. doi: [10.1109/TSG.2017.2753802](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2753802).
- [61] HERRANDO M, PANTALEO A M, WANG Kai, *et al.* Solar combined cooling, heating and power systems based on hybrid PVT, PV or solar-thermal collectors for building applications[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 637–647. doi: [10.1016/j.renene.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.004).
- [62] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1597–1607.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, *et al.* Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1597–1607.
- [63] 陈健, 林咨良, 赵浩然, 等. 考虑信息耦合的电-气综合能源系统韧性优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 6854–6863.
- CHEN Jian, LIN Ziliang, ZHAO Haoran, *et al.* Optimization method for resilience of integrated electric-gas system with consideration of cyber coupling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6854–6863.
- [64] TOKODY D, ALBINI A, ADY L, *et al.* Safety and security through the design of autonomous intelligent vehicle systems and intelligent infrastructure in the smart city[J]. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 2018, 16(3): 384–396. doi: [10.7906/indecs.16.3.11](https://doi.org/10.7906/indecs.16.3.11).
- [65] 王同军. 中国智能高铁发展战略研究[J]. *中国铁路*, 2019(1): 9–14.
- WANG Tongjun. Study on the development strategy of China intelligent high speed railway[J]. *China Railway*, 2019(1): 9–14.
- [66] 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.
- [67] CHEN Chen, LIU Bin, WAN Shaohua, *et al.* An edge traffic flow detection scheme based on deep learning in an intelligent transportation system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(3): 1840–1852. doi: [10.1109/TITS.2020.3025687](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3025687).
- [68] HATZIVASILIS G, FYSARAKIS K, IOANNIDIS S, *et al.* SPD-Safe: Secure administration of railway intelligent transportation systems[J]. *Electronics*, 2021, 10(1): 92. doi: [10.3390/electronics10010092](https://doi.org/10.3390/electronics10010092).

- [69] KAVALLIERATOS G, DIAMANTOPOULOU V, and KATSIKAS S. Shipping 4.0: Security requirements for the cyber-enabled ship[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(10): 6617–6625. doi: [10.1109/TII.2020.2976840](https://doi.org/10.1109/TII.2020.2976840).
- [70] YANG Geng, PANG Zhibo, DEEN M J, *et al.* Homecare robotic systems for healthcare 4.0: Visions and enabling technologies[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(9): 2535–2549. doi: [10.1109/JBHI.2020.2990529](https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.2990529).
- [71] GUO Jiuchuan, TIAN Shulin, XIAN Hong, *et al.* Cyber-physical healthcare system with blood test module on broadcast television network for remote cardiovascular disease (CVD) management[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(5): 3363–3670.
- [72] JIANG Yu, SONG Houbing, WANG Rui, *et al.* Data-centered runtime verification of wireless medical cyber-physical system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 1900–1909. doi: [10.1109/TII.2016.2573762](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2573762).
- [73] BAYANBAY N A, BEISEMBETOV I K, OZHIKENOV K A, *et al.* The use of unmanned aerial vehicle for emergency medical assistance[C]. Proceedings of the 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia, 2019.
- [74] 孔祥朋, 付君, 陈继营, 等. 5G通信技术远程指导机器人辅助全髋关节置换术两例[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2020, 34(11): 1492–1493.  
KONG Xiangpeng, FU Jun, CHEN Jiying, *et al.* Two cases of robot assisted total HIP arthroplasty guided by 5G communication technology[J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2020, 34(11): 1492–1493.
- [75] 王婷, 钱东福, 张成, 等. 基于史密斯模型的新疆克州远程医疗建设效果分析[J]. *中国卫生事业管理*, 2021, 38(8): 582–586.  
WANG Ting, QIAN Dongfu, ZHANG Cheng, *et al.* Analysis of the effect of telemedicine construction in Kezhou of Xinjiang province based on Smith model[J]. *Chinese Health Service Management*, 2021, 38(8): 582–586.
- [76] XU Qichao, SU Zhou, and YU Shui. Green social CPS based E-healthcare systems to control the spread of infectious diseases[C]. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC 2018), Kansas City, USA, 2018.
- [77] MONES E, STOPCZYNSKI A, PENTLAND A S, *et al.* Optimizing targeted vaccination across cyber-physical networks: An empirically based mathematical simulation study[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2018, 15(138): 20170783. doi: [10.1098/rsif.2017.0783](https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0783).
- [78] DIMITROV V, JAGTAP V, SKORINKO J, *et al.* Human-centered design of a cyber-physical system for advanced response to Ebola (CARE)[C]. Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, Italy, 2015: 6856–6859.
- [79] DONG Yudi and YAO Yudong. IoT platform for COVID-19 prevention and control: A survey[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 49929–49941. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3068276](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068276).
- [80] YE Ruizhong, ZHOU Xianlong, SHAO Fei, *et al.* Feasibility of a 5G-based robot-assisted remote ultrasound system for cardiopulmonary assessment of patients with coronavirus disease 2019[J]. *Chest*, 2021, 159(1): 270–281. doi: [10.1016/j.chest.2020.06.068](https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.06.068).
- [81] YE Qing, ZHOU Jin, and WU Hong. Using information technology to manage the COVID-19 pandemic: Development of a technical framework based on practical experience in China[J]. *JMIR Medical Informatics*, 2020, 8(6): e19515. doi: [10.2196/19515](https://doi.org/10.2196/19515).
- 杨挺: 男, 1979年生, 博士, 教授, 主要研究方向为电力信息物理系统、智能配用电、人工智能与大数据等。
- 刘亚闯: 男, 1989年生, 博士生, 主要研究方向为电力信息物理系统、智能配用电控制等。
- 刘宇哲: 男, 1998年生, 硕士生, 主要研究方向为电力信息物理系统、智能配用电控制等。
- 王成山: 男, 1962年生, 博士, 中国工程院院士, 主要从事配电系统规划与运行、电网安全性与稳定性、分布式能源与微电网等。

责任编辑: 陈倩