

平行电池：智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程

王飞跃¹, 蒋怀光²

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;

2. 国家可再生能源实验室, 美国 戈尔登 80401)

摘要: 从虚实两方面概述了平行电池的概念、框架、方法与应用。平行电池是基于 ACP 方法的平行智能在电池与相关能源领域中的应用。实际电池系统和与之对应的虚拟空间中的人工电池系统平行运行、虚实互动, 物理空间映射于虚拟空间, 人工电池系统描述、预测、引导实际电池系统, 虚实闭环, 迭代优化, 实现智能生态电池与能源系统管理新模式。

关键词: 平行智能; ACP 方法; 计算实验; 平行电池; 能源系统; 平行系统

中图分类号: TP29

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202152

Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services

WANG Fei-Yue¹, JIANG Huaiguang²

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. National Renewable Energy Laboratory, Golden 80401, America

Abstract: The concept, framework, process methodology and applications of parallel battery were proposed from both virtual and real aspects. The parallel battery was an application of ACP-based parallel intelligence in battery and related energy system areas. The real battery system was running with its equivalent, and the artificial battery system was in a virtual space, in a parallel and interactive manner. The artificial battery system contained the descriptive, predictive, and prescriptive functions on the real battery and related energy systems. There was a closed-loop workflow between the real battery system and the artificial battery system, which iteratively optimizes the battery and related energy systems, leading to a new paradigm of intelligent and ecological parallel battery system management.

Key words: parallel intelligence, ACP approach, computational experiment, parallel battery, energy system, parallel system

1 引言

1.1 人类能源的回顾

能源一直是人类生存与发展的关键因素之一。从历史上看, 既有由能源引发的多次能源危机, 给人类社会造成巨大的动荡, 也有由能源问题引发的一系列合作, 促进人类社会的可持续发展, 例如《京

都议定书》与《巴黎协定》。人类能源与储能的发展历程如图 1 所示, 在前工业社会, 由于生产力水平的制约, 对能源的需求较小, 主要能源来自地表附近, 例如植物与浅层的化石能源等。工业革命之后, 随着生产力的初步解放, 人类对能源的需求大幅增加。同时, 对能源的采集能力也迅速增强, 人类可以大量采集地表下深层的能源, 例如煤、石油、

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-07-22

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61533019)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61533019)

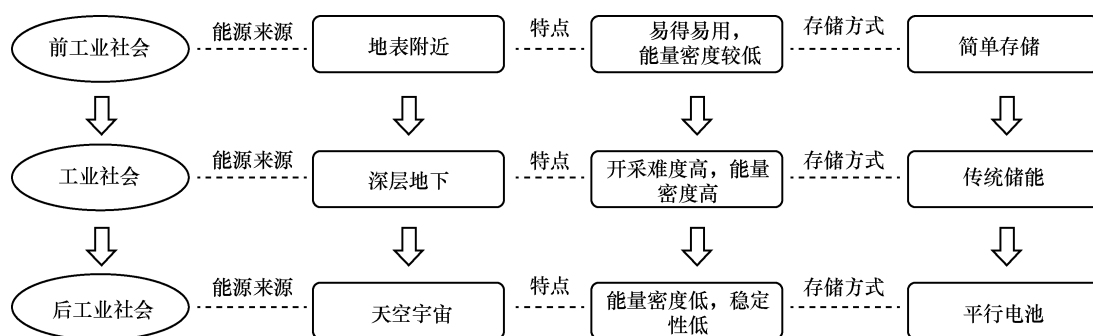


图1 人类能源与储能的发展历程

天然气等。在后工业社会，随着化石能源日渐减少和污染问题日益严重，人类逐渐开发利用更先进的能源技术，将目光投向天空宇宙。大规模可再生能源（太阳能、风能等）的利用，为人类未来的可持续发展奠定了基础。可以说，人类的历史就是一部人类不断探索利用能源的历史。

1.2 人类储能的回顾

如图1所示，工业革命之前，由于人类对能源的需求量较小，同时所需求的能源原材料比较稳定且易获得，此时的储能方式采取简单、小规模存储方式即可。工业革命之后，电能这种具有代表性的二次能源以其清洁、方便、高效和转化利用灵活而得到了大范围的应用。但是，不同于其他形式的能源（例如天然气和石油中的化学能），电能的存储问题，尤其是如何高效、安全和大规模可控地存储电能一直是人类社会发展与工业发展面临的一个核心问题。历史上，对于电能的存储，代表性方法有抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等，但是这些方法均受制于地域、能量损耗、响应时间、使用灵活性等不能被广泛而便捷地使用^[1]。1800年，意大利科学家亚历山德罗·伏特（Alessandro Volta）发明了最初的电池，自此拉开了人类百年来灵活、高效、方便地利用电池存储电能的序幕。由于能量密度与安全性的不断提升，寿命更长、成本更低的电池（主要是低功耗、小容量、充放电速率低的传统电池）已经被广泛应用且影响了人类生活的方方面面，例如电池在电子消费方面的广泛应用直接促进了信息与物联网的蓬勃发展^[2]。

1.3 能源以及储能的发展现状和趋势

随着地球能源的短缺以及污染问题日益凸显，利用以风能和太阳能为主的新能源成为人类抵御气候问题、能源危机的主要手段。作为世界上发电

量最大的国家，中国是《巴黎协定》的坚定支持者，也是新能源领域的积极探索者。2010年到2025年中国风光发电量与预测情况如图2所示，从2010年起，中国的风光发电量迅速增长，到2025年非化石能源装机将占50%，2030年新能源发电量将达到20%左右，2050年新能源发电量将达到50%左右；切实为人类的节能减排以及可持续发展做出巨大贡献^[3-4]。

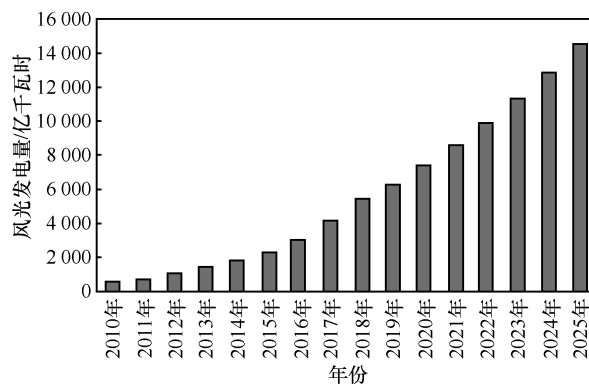


图2 2010年到2025年中国风光发电量与预测情况

不同于水能与地热能，风能和太阳能的间歇性与随机性非常强，因此在大规模利用时容易对电网产生冲击进而诱发多种问题，例如电网频率偏差、电压波动与闪变等。针对这些问题，中国提出了多种解决方法，例如在政策方面有就近消纳与统一并网标准等，在技术方面有抽水蓄能与有功无功补偿等，在控制算法方面有随机优化与鲁棒优化等，在装置方面有整流器与并联补偿电容器等，来统筹解决弃风弃光等新能源利用率问题。然而，这些解决方法均有不足之处，难以灵活、快速地大规模及时响应，从而满足电网的各种需求，无法从根本上解决新能源的大规模利用问题。

2010年到2025年全球锂离子电池成本与预测

情况如图3所示,由于技术的不断成熟以及生产工艺的改进,自2010年以来,锂离子电池的成本迅速下降,到2025年将具备平价上网的条件。因此,以电池为代表的新一代大规模分布式储能技术为解决新能源的高效利用带来了曙光^[4]。

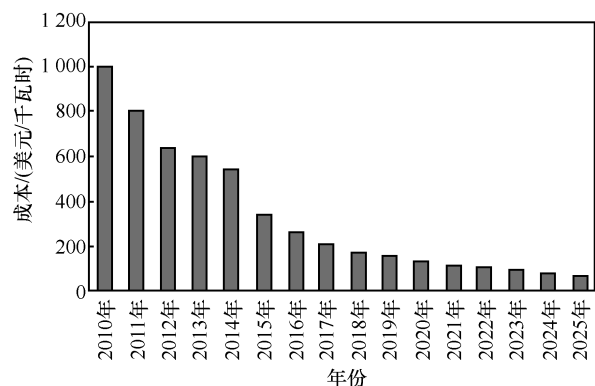


图3 2010年到2025年全球锂离子电池成本与预测情况

1.4 平行电池的必要性及紧迫性

笔者认为,随着基于电池的大规模灵活方便储能技术的发展,能源系统中的多个方面会更加紧密地耦合在一起,例如碳排放、能源安全、多种类能源价格、用户侧的负荷调节等。在这种情况下,多种类的能源物理系统、社会信息以及人类行为的互动,将会通过这些紧密的耦合产生更加密切的相互影响和相互作用。因此,在能源物联网的基础上,2008年黄勤(Alex Huang)教授提出能源路由器的概念,希望未来可以由此实现多方面物理信息上的融合,即传统意义上的物理信息系统(cyber-physical systems, CPS)。

但是,不能忽视的是能源系统与信息系统的社会属性,人类行为的本身又将会反作用于实际的物理信息系统而形成更加复杂的社会物理信息系统(cyber-physical-social systems, CPSS)^[5-14]。因此,以智能化、生态化为基础的平行电池将进一步提升物理世界、信息世界,解决人类社会的一体化,其核心是通过虚拟人工系统与现实物理系统的相互影响与平行交互,高效地实现虚实互动的CPSS。与此同时,应该关注的是传统储能以及电池行业的一次污染以及二次污染问题,降低有毒金属、重金属和电解液的污染,解决废弃物排放问题,实现生态化、环保化的发展。在未来,平行电池可以作为能源系统以及与能源系统紧密相关的各系统的能量收集、分配与合理利用的枢纽,积极参与到人类各项生产以及生活活动中,并将广泛应用于储能、

电动汽车及动力电池、信息化、物联网与工业自动化等与能源紧密相关的工业生产与居民日常生活方面。同时,通过从实际的物理系统接入,构建虚拟的分布式人工平行电池系统,对实际的平行电池系统进行建模、推理、分析与优化控制,实现实际电池系统与人工虚拟的电池系统的高效交互、相互引导与迭代更新。

2 平行电池的概念框架

2.1 平行系统与平行电池

根据平行系统的理论,平行智能的核心框架是ACP,包括人工系统(artificial intelligence)、计算实验(computational experiment)、平行执行(parallel execution)^[15-25]。ACP系统如图4所示,首先对复杂物理模型建立虚拟的人工系统,再通过计算实验对虚拟的人工系统进行优化和控制的模拟,最后通过平行执行的方式统一虚实世界,实现对复杂系统的各种优化控制目标。

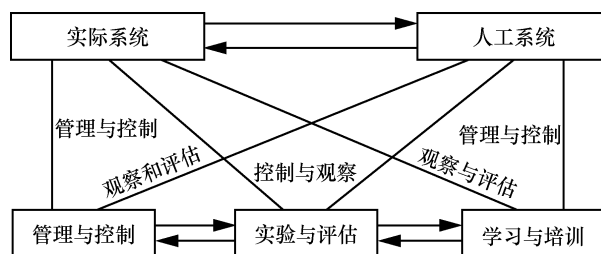


图4 ACP系统

平行电池作为未来能源的枢纽,将积极地参与人类社会多种系统的活动,例如交通系统、信息系统、城市系统、能源系统、安全系统等。这使得现实世界中的物理系统与虚拟世界的人工系统的互动进一步增强,同时进一步强化了人工系统的动态性和主动性。虚拟的人工系统从原来的被动建模(孪生系统)到主动引导实际系统进行优化控制与运行升级,实现虚实互动的平行智能。

2.2 平行电池的基本框架

基于平行智能理论,平行电池系统的基本框架如图5所示,由人工电池系统与实际电池系统组成虚实两大部分,虚实互动,平行运行。对应ACP方法,平行电池系统包括三大步骤。

第一步:通过实际电池系统建立虚拟的人工电池系统,人工电池系统是由实际电池系统抽象构建而来的,是实际电池系统在人工虚拟空间的反映,两个系统之间亦可以相互参考、相互借鉴。

第二步：通过实际电池系统和人工电池系统对不同的实验目标进行观察与探索，生成实验数据，再针对实验数据开展计算实验，对不同情况进行观察、分析、评估以及预测。

第三步：基于第一步与第二步的结果，将实际电池系统与人工电池系统平行互联，平行执行，实现人工系统对实际系统的引导，同时实际系统是人工系统的物理基础与物理实现。

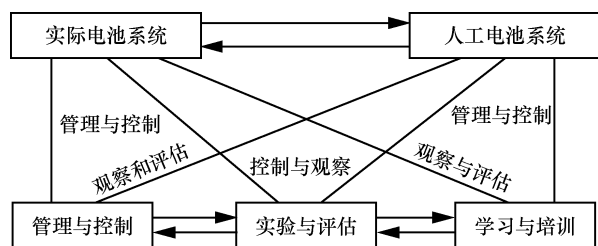


图5 平行电池系统的基本框架

通过以上平行电池系统的基本框架，可以实现由实际电池系统到人工电池系统的描述建模；再从人工电池系统反馈到实际电池系统，并且通过人工电池系统中的实验与评估对实际电池系统做出培训与引导；从而形成一个闭环控制（如图6所示），不断自我调整、自我更新，实现对不同情况、不同目标的自适应优化与控制。在实际应用中，可以根据应用目标以及实际条件来合理选择平行执行的方法。考虑到不同的目标以及实际环境，平行执行包括三大内容。

第一，整体平行执行。在此情况下，整个平行电池系统更加考虑系统的统一性与完整性，可以看

成系统级别的宏观建模，对于大时间尺度、大空间范围的目标进行快速观察与估计，而对子系统的细节将有所取舍。

第二，局部平行执行。在此情况下，整个平行电池系统将更加灵活且具有弹性，对于不同的情况以及目标函数，系统可以灵活选择考虑子模块的一致性和精度，只针对子模块或局部进行平行执行与引导。

第三，混合平行执行。在此情况下，整个平行电池系统将做到整体与局部的分割对立与统一，既考虑局部的精度又考虑整体的一致性，可以看成能适应多种情况且应用较广泛的平行电池系统执行方式。

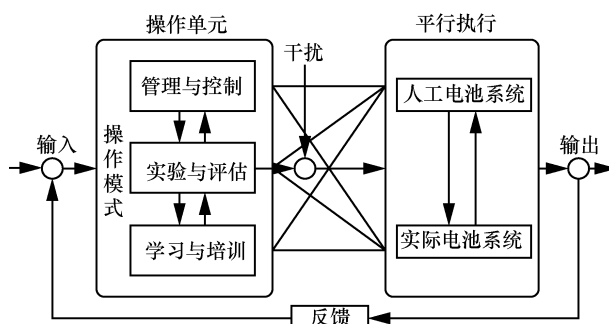


图6 平行电池系统的闭环控制

3 平行电池的具体设计

平行电池系统的具体设计如图7所示，其核心在于通过虚拟的人工电池系统对现实的平行电池系统做出精准描述，从而进行预测智能与引导智能

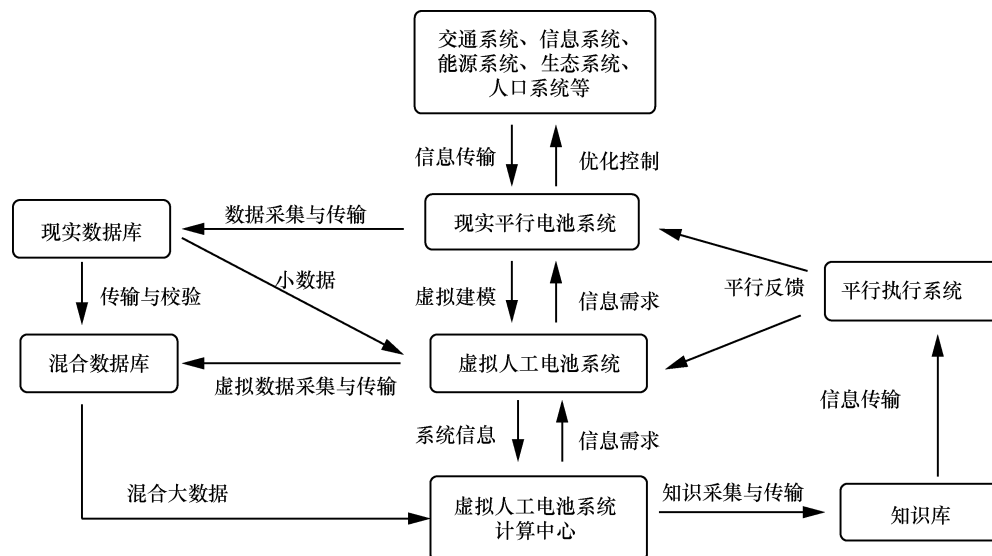


图7 平行电池系统的具体设计

的分析与计算,最后分别平行反馈给现实世界与虚拟人工世界进行优化与控制。因此,平行电池系统的具体设计包含3个层次智能:对现实世界的描述智能、对虚拟人工电池系统的分析预测智能以及对虚实系统的反馈引导智能。

3.1 描述智能

能源是所有人类活动的基础,人类的历史就是一部能源的探索利用史。在现实世界中,平行电池系统可以作为能源系统的能量收集、分配与合理利用的枢纽,积极参与到人类各项生产以及生活活动中,例如交通系统、信息系统、能源系统、生态系统、人口系统等。在这里,关于平行电池系统的描述智能是指将现实中的诸多复杂系统,通过各个学科的知识进行建模,例如工程学科(电子、计算机、通信、信息、机械、土木、生物、材料等)以及人文类的学科(经济、社会、法律、历史、地理等),此外还包括很多现代化的交叉学科以及新兴学科等^[26-29]。

具体来说,可以通过多种不同类型的数据采集,收集多种与能源相关的系统信息,对系统中不同范围、不同场景的物理、信息以及社会空间的信息进行收集、分析和整理,从而提取各个系统的运行状态以及基本情况。这种从数据开始分析建模的方法属于典型的数据驱动建模方法,但是考虑到多种系统的动态性以及复杂性,仅仅依靠一种建模方式是不够的。因此,在平行电池系统的描述智能中,还应该考虑基于系统本身运行机理的模型,依靠人类历史积累知识的知识图谱模型,依赖数字孪生的仿真模拟模型以及多种类型交叉的混合模型。在搭建模型时,也需要考虑系统的服务目标以及对应的资源消耗。例如,考虑一个城市能源系统的季节性变动对应的能量消耗,对于这种变化缓慢且平稳的时间序列,可以采用相对简单的时间序列模型建模,这既可以保证建模精度又可以降低系统的计算资源。

此外,作为虚拟人工电池系统与现实平行电池系统的第一个层次,多种类的虚实接口方式也值得研究并且成为了解虚实系统运行情况的窗口。典型的方法有多种类型数据的可视化、脑机接口、增强现实、虚拟现实技术等,充分利用声、光、电等技术帮助人类更好地了解虚实电池系统运行状态,并与之积极互动。

3.2 预测智能

作为平行电池系统的第二个层次,预测智能是

指通过建立的虚拟人工电池系统以及收集到的混合大数据,对所需求的目标系统中的不同任务进行不同种类的评估、推演、预测、预警等。例如现代城市中的能源系统作为生产与生活的基础,其除本身结构复杂之外,还紧密连接通信系统、信息系统、交通系统、医疗系统、社区生活系统等,是一个高度复杂、多维度、多连接的物理-信息-社会系统。在这个系统中,当局部出现故障或者问题时,需要其他地方及时做出补偿或者补救,否则可能会由于系统本身控制裕度已经不够而导致级联事故。

一个著名的事件就是2003年8月的美加大停电事故。事情的起因是一家能源公司的软件存在问题,没有及时触发能量管理系统的负荷警报,从而使得系统中多家发电厂的发电机超负荷运行而导致跳闸,进而引起级联反应,当地265家发电厂的508个发电机组相继关闭,造成巨大的停电事故。事件的直接影响是加拿大1000万人以及美国8个州的4500万人遭受停电影响,最长停电地区时长4天,交通系统、城市轨道系统、通信系统、医疗系统、城市生活系统(供水排水系统、生活配电系统等)、多种类的工业系统(化工炼油系统、城区外的矿山系统等)纷纷遭受重创,经济损失上百亿美元,100多人丧生^[30]。

这样大体量的物理-信息-社会系统是不可能用实际操作或者实际实验进行安全估计与预计的。在虚拟的人工电池系统中则可以通过不同类型的计算实验,例如对复杂系统的高维度的优化,对不确定性问题的随机控制,对系统安全以及稳定性的鲁棒性分析,对未来发展的预测分析或预测控制等,来安全、经济、高速、准确且方便地完成对整个物理-信息-社会系统的评估、推演、预测、预警等任务,从而保证现实世界与虚拟世界在各种条件下正常有序地运行与更新。

3.3 引导智能

平行电池系统中的最后部分是引导智能,如图7所示,是指将之前的结果平行反馈给实际平行电池系统与虚拟人工电池系统,其核心是通过实际平行电池系统与虚拟人工电池系统的虚实互动、平行学习、平行执行来实现的。具体来说,通过平行反馈的执行结果,可以从虚实系统的对比运行与对比执行中发现各自系统中的问题与差异,进而调整运行状态、系统结构、控制机理、优化算法等,实现虚实系统的同步运行以及共同更新。

虚实互动的平行电池系统设计将整个复杂的物理-信息-社会系统纳入完整的闭环控制之中,使得整个系统的多个维度、各个方面得到统筹细致的规划、安全快速的系统响应与智能调整。同时虚实互动的平行电池系统可适应不同状态不同情况的平行执行方式,例如整体平行执行、局部平行执行与混合平行执行,在增加引导智能灵活性的同时,大大提高了引导智能的执行效率。此外,结合多种学科以及跨学科的理论及知识,虚实互动的平行电池系统可以方便地与多种系统组合连接,成为多系统跨系统的能源枢纽,通过描述智能、预测智能与引导智能,实现不同系统的多个预设目标,提升整个系统的平行化、智能化的水平。

4 平行电池的关键技术与应用

作为未来多种工业与社会系统的能量来源与能量枢纽,平行电池不仅需要与多种先进的技术接轨与融合,例如信息、传感、优化控制、智能计算、通信传输等,更需要关注本身的安全、生态环保以及与社会和谐共融。

4.1 数据采集与信息感知

随着传感器、互联网、物联网、智联网、大数据的发展,多种系统的数据采集与传输能力得到了快速发展。这种多维度、多尺度、多元化的大数据采集以及传输能力正是构建多种与平行电池相关的人工系统的基础。由于分布式能源系统的稳定性与可靠性,平行电池也具有分布式特征,因此,一方面要注意分布式的数据采集与传输,另一方面要提高分布式数据的存储与传输的安全性。

由于与多种系统的高度融合,对多种事件的智能分析与感知成为平行电池的另一个特点,这也是构建复杂物理-信息-社会系统的原材料与信息来源。此外,这种智能分析与感知的能力不仅可以服务于虚拟人工系统的构建,更可以直接服务于多种现实系统,用于应急响应、提供决策信息、维护多系统正常运行等。

4.2 基于区块链的智能组织与智能交易方式

对应于平行电池的分布式特征,区块链也有去中心化以及分布式的结构与计算范式,可以以非常经济与便捷的方式构建与规范分布式能源的组织与交易方式,从而间接地维护多系统的组织性、稳定性与安全性。

第一,区块链的去中心化以及平等自由的特征

保证了分布式能源的自由交易,平行电池的能源管理与能源利用将更加高效。同时配合虚拟人工系统的使用,可以开发出更多更适用于未来能源消费的新模式。

第二,区块链的共识机制与智能合约保证了平行电池的能源信誉以及能源使用的规范性。由于高度的平等与分布式特征,平行电池的能源使用体系将是一个自由度非常高的能源交易体系,所以稳定性、有序性显得尤为重要。基于区块链的共识机制以及智能合约提供了数据与合约上的安全性,同时也维护了分布式能源的信誉,使得整个系统可以安全、高效地运行。

第三,区块链的集体参与以及数据公开与隐私保护可以有效地降低系统维护成本,提高分布式平行电池的参与度,促进以平行电池为能源核心的多种工业-社会系统的共同发展。

4.3 安全生态环保以及社会共融

在人类发展的今天,能源安全、生态环保以及与社会共融是世界各国实现可持续发展的必要条件。中国共产党第十九次全国代表大会、“两步走”战略、《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中都将清洁低碳、安全高效作为未来我国能源体系建设的重要目标与关键要求。同时,中国也向世界承诺降低碳排放,大规模开发、利用、配置清洁能源,实现人类社会的可持续发展。

作为未来能源系统中能源存储与利用的枢纽,平行电池是以现实中的电池技术为基础结合虚拟人工系统的智能化、生态化的先进电池技术以及能源存储与管理理念。同时,平行电池也为多种系统提供能源服务与能源管理,将深远地嵌入和影响生产与生活的各个体系。因此,与电池技术本身有关的物理化学、电化学、制造工艺、回收流程、电能管理需要注意安全、生态与环保,同时在与其它系统结合时,也需要利用自身与虚拟人工电池系统的结合来提升系统整体的能源效率,创造一个安全、生态、环保的平行电池框架与服务体系,促进人、系统与社会和谐共融、可持续发展。

4.4 多场景的智能应用

结合引言中未来人类能源的发展方向以及平行电池多种技术和服务框架的讨论可以预见,与平行电池相关的研究以及应用实践将成为新兴的热点,也可为人类未来的发展提供一条合理、高效利

用能源且可持续发展的道路。平行电池可以利用的系统场景众多，除自身电池技术的发展外，还可以面向多种系统，提供能源服务与能源管理技术，利用虚拟人工系统针对不同的场景与目标开展定制化的服务与应用开发。

以城市分布式多能源系统为例，在规划期，可以通过多种类型的数据采集与信息感知，利用虚拟人工系统中的描述智能构建待规划系统，了解系统规律，查找反馈系统问题，优化系统规划方案。在建设期，可以基于规划期的最优方案，进一步降低建设成本，减少系统重复建设环节，提高城市多能源系统整体的工程工艺质量。在运行管理阶段，可以针对多种系统以及各个子系统，例如控制子系统、储能子系统、通信子系统等，实现预测智能与引导智能，使复杂系统的完整闭环控制可以安全、经济和稳定地运行。

5 平行电池的应用

5.1 面向未来工业系统：与云边智能结合的应用

在未来的工业系统中，平行电池不但作为能源来源以及能源枢纽为工业系统提供能量，更作为虚拟人工系统的基础为实际物理系统提供分布式多场景的描述智能、预测智能与引导智能。例如，未来的电力系统将由多种分布式新能源搭配传统能源、多种储能设备以及智能负荷响应与智能控制设备构成。类似地，在未来的大规模制造业中，也将广泛分布不同类型、多种功能、高度灵活的智能机器人来协助人类降低生产成本，提高生产效率与产

品品质。这种分布式、多智能体、大规模、大范围、高复杂度的未来工业系统，给平行电池的应用提出了新的挑战。

早在 20 世纪 90 年代，“当地简单，远程复杂 (local simple, remote complex)” 的代理控制系统设计原理由 Wang F Y^[31]率先提出，其目的是利用远程端的强大处理、计算能力有效降低本地的控制成本，实现高灵活性的复杂系统控制。随着计算机技术、通信技术、信息技术、人工智能技术、控制技术等多种学科以及人类工程能力与制造能力的不断进步，这一思想得到进一步的发展与完善。从如今云边智能的角度看，该方法在当时的技术条件下，为现在的边缘计算与云计算提供了一种有效的理论模型与技术基础^[32]。得益于互联网、物联网、物联网、区块链等技术的发展，以边缘计算与云计算为基础的云边智能将在未来的工业系统中发挥更大的作用。如图 8 所示，以基于平行电池系统的知识自动化机器人为例，具体有以下 3 个方面。

第一，以物联网、社会网络、物联网与区块链的结合为基础，通过先进的通信技术、射频识别 (radio frequency identification, RFID)、多种智能传感器、全球定位系统、复杂数据库系统等将物-物、人-物，以及系统建立起高效的连接、感知与管理系统。相对于依赖于中央处理系统的传统控制管理结构，多种类、智能化、弹性化的众多终端系统为整个复杂系统提供了多样化、多尺度的数据来源与信息渠道。同时，传统的中央处理系统也无法对这种大规模、大范围的分式系统进行有效建模和高

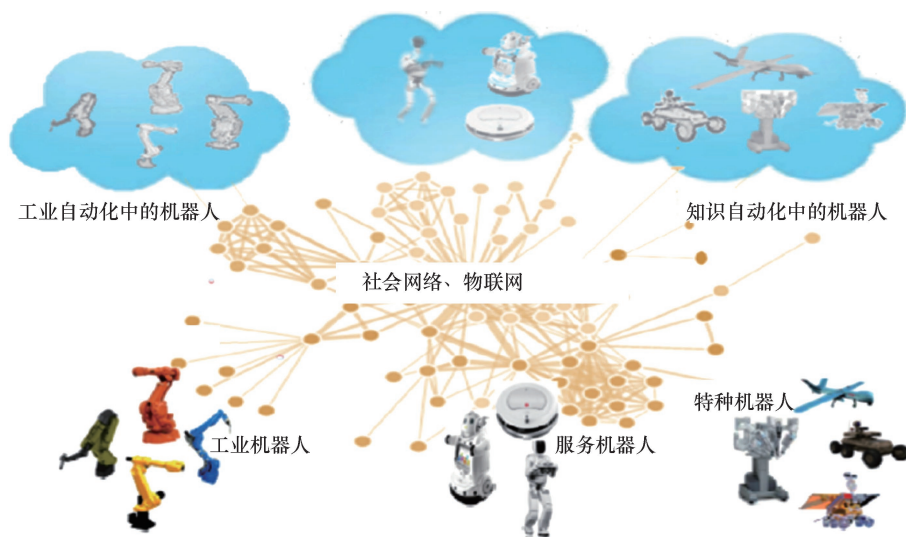


图 8 基于平行电池系统的知识自动化机器人

效管理控制。因此,基于边缘计算与云计算的云边智能将成为未来平行电池系统以及相关工业系统的计算服务基础。

第二,得益于虚拟化的服务技术,云计算可以将复杂系统的多种任务进行有机拆解,由云服务器集群进行分析计算,是一种将系统优势资源集中,解决复杂系统管理与控制的有效方案。由于终端系统的复杂度与智能化程度大幅度增加,一些原本需要云计算服务的任务,可以下放到系统靠近数据源的边缘侧进行分析与计算,从而减轻系统数据通信的压力以及云服务器集群的负荷。随着分布式系统与先进通信技术的进一步发展,边缘计算与云计算互为补充和拓展,云边智能将极大程度地满足未来复杂工业系统的信息分析、处理与管理的需要。

第三,结合云边智能,平行电池系统可以高效地将虚拟人工电池系统以及相关虚拟工业系统的描述智能、预测智能与引导智能多层次、分布式地与边缘计算和云计算相互结合。对于多模态、复杂场景、多智能体的情况,边缘计算可以将虚拟人工系统布置到距离数据源更近的地方,实现高效处理、个性配置以及实时响应,同时也减轻系统信息传输压力,提高隐私保护与分布式系统的安全性。在边缘端分担信息处理任务的同时,云端服务器集群可以集中力量处理更加复杂且多层次的问题,以提高整体解决方案的通用性,整合系统资源,提升系统效率。以前文讨论的分布式多智能体机器人为例,如图8所示,以平行电池与云边智能为基础,可以在保证高效率、经济性的前提下,构建多场景、不同类型的机器人。同时物理世界与虚拟世界形成虚实互动,打造通用性与个性化兼顾、一对多、多对一、多对多等新型的机器人系统,既保证知识的深度,又兼顾实际应用的宽度与适应力,完成工业自动化向知识自动化的转化^[33]。

5.2 打破数据孤岛:与联邦生态结合的应用

从以上分析可以发现,平行电池系统与云边智能的结合,边缘计算、云计算、虚实互动的平行电池系统、知识自动化、物联网、互联网以及智联网,都离不开的一个重要主题,就是大数据、数据安全以及大数据的共享。但是在现实中,考虑到安全、法律法规、隐私保护、版权等方面的要求,数据的传输和共享的范围是非常有限的。由于工业系统与生活系统中的数据本身具有分布

式的特点,平行电池系统在实际应用中将会面临难以桥接的数据孤岛问题。

前文讨论的边缘计算、云计算、云边智能以及区块链等分布式处理技术可以从一定程度上解决数据分散问题、降低数据传输量、保护本地数据等。但是,考虑到在工业系统与社会生活系统的多种具体应用中,目标系统作为一个复杂系统的整体,亟须一种可以打通数据与信息在多环节中传输的层层壁垒的机制,从而保障数据与信息有效且安全的存储、分析、处理与计算。在参考文献[26]中,为了解决数据孤岛的问题,联邦生态的理念首次被提出,其不仅适用于多情况下的分布式系统,同时也注重对多层次、多级别的数据安全、信息隐私的保护;不但提高了系统各个联邦节点的积极性,而且提升了整体系统的经济性与性能。

联邦生态的支撑技术为联邦合约、联邦共识、联邦激励、联邦安全,联邦生态的核心为联邦数据、联邦控制、联邦管理、联邦服务。通过联邦生态的四大支撑技术,可以将联邦生态的四大核心有机结合,充分解决以区块链技术为基础的、分布式联邦节点之间的数据安全、信息隐私与资源协同的多种问题。

结合图8所示的例子,可以得到基于平行电池系统与联邦生态的知识自动化机器人,如图9所示。通过云边智能,平行电池可以紧密地与多种类型的机器人有机结合,形成新型知识自动化机器人系统,以增强系统对于多场景、复杂条件下多类型任务的适应力与执行力。同时,可以结合联邦生态的理念,在考虑云边智能与知识自动化的前提下,充分保障数据安全、信息隐私,提高资源协同能力。具体的保障措施如下。

第一,如图9所示,通过与联邦生态结合,可以提高数据的利用率,并有效解决数据孤岛问题。由于多种行业的法律法规以及行业制度不同,数据安全、数据共享以及相关隐私保护成为阻碍平行电池、云边智能以及知识自动化系统的壁垒。例如,通过对家用服务型机器人与家用电器的用电行为分析,能间接得出主人的行为、习惯,甚至是否在家、生活作息等个人生活方式。这对于信息安全、隐私保护以及社会治安都是一个巨大的挑战。因此,在联邦生态的理念下,可以通过联邦服务提供不同颗粒度的数据解决方案,为不同类型的数据提供不同等级的存储、流通、管理等方面的服务。通

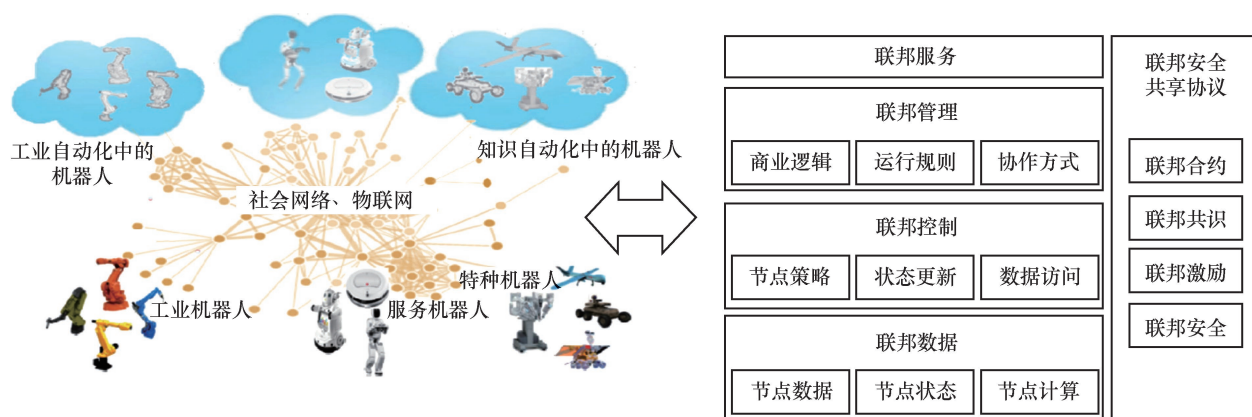


图9 基于平行电池系统与联邦生态的知识自动化机器人

过联邦服务与联邦管理，既可以提高数据的利用率，又有效解决了原有的数据孤岛问题。

第二，通过联邦生态与区块链技术，可以建立高效安全的分布式系统。区块链技术的核心是通过共识机制以及加密算法，实现分布式的数据存储与点对点的信息传输，以建立服务群体的集体信用。如图9所示，在联邦生态的条件下，通过联邦管理与联邦数据服务，基于区块链的联邦安全共享协议可以有效解决信息不对称导致的欺骗问题，进一步降低系统的信任成本和安全不确定性，从而建立更加高效安全的分布式系统。这种系统的建立将大大提升基于平行电池的多种工业系统的数据安全性以及面向复杂情况的适应力。

第三，基于以上两点，以联邦生态为基础的平行电池系统可以高效地实现从数据、信息到知识自动化的全面提升。如图9所示，联邦系统与区块链系统互为补充，保障系统多层次多区域的数据安全，充分实现信息共享，建立分布式节点之间安全可靠的集体信任。同时，云边计算为平行电池系统提供高效与高度自治的数据计算、信息处理与系统管理的能力。那么，整个平行电池系统将可以高效连接物理、社会以及信息空间，使未来的工业系统由牛顿式机械系统向默顿式系统转变，充分实现全方面多角度的知识自动化。

6 结束语

随着人类社会的快速发展，多种工业生产系统与社会生活系统都离不开大规模、稳定的能源供给，因此能源开发与能源利用将成为人类未来发展中不可避免的重要课题。随着以太阳能和风能为代

表的清洁能源的大规模开发与利用，人类也进入了以可再生能源为支撑的能源新时代；然而如何高效利用这些具有强间歇性的新能源，是一个亟待解决的问题。

本文从人类能源的发展史出发，在详细阐述各阶段能源、能源利用以及与储能的关系的基础上，对未来能源以及储能的发展做出了详细的分析与预测，由此提出了平行电池——一种新型的智能生态化电池技术与服务体系的框架与流程。作为一种全新的能源分配、规划、利用的方式，平行电池不但能依靠其天然的储能属性解决新能源的强间歇性问题；同时，也作为能源来源与枢纽，积极参与并影响各项工业生产活动与社会生活活动。最重要的是，作为ACP理论的拓展应用，平行电池可构建虚拟人工系统，将描述智能、预测智能与引导智能用于能源以及与之相关的系统，进行虚实互动的控制与管理，大大提高系统的灵活性以及适应能力。在平行电池系统的应用中，本文重点讨论能源系统与云边智能和联邦生态的具体结合，进一步促进物理、社会与信息空间的融合，实现由牛顿式机械系统向默顿式系统的智能发展，实现全方面多角度的知识自动化。

目前，平行电池系统的研究与应用仍处于发展阶段；同时，由于电池储能技术的发展，以及相关多系统的复杂性、开放性、高动态性，需要多部门（包括政府）与企业一起制定对应的政策，探索可发展的商业模式，推动平行电池理论与方法的研究与应用实践。未来，平行电池将作为能源以及与之紧密相关的系统的基础设施与服务体系，促进人类、社会与自然的和谐可持续发展。

参考文献:

- [1] WHITTINGHAM M S. History, evolution, and future status of energy storage[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100: 1518-1534.
- [2] GOODENOUGH J B, MANTHIRAM A. A perspective on electrical energy storage[J]. *MRS Communications*, 2014, 4(4): 135-142.
- [3] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. *中国电力*, 2020, 53(1): 1-9.
HUANG B B, ZHANG Y Z, WANG C X. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan[J]. *Electric Power*, 2020, 53(1): 1-9.
- [4] LI M, LU J, CHEN Z W, et al. 30 years of lithium-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(33): 1800561.
- [5] WANG F Y, ZHANG J J, ZHENG X H, et al. Where does AlphaGo go: from Church-Turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(2): 113-120.
- [6] 王飞跃, 戴汝为, 汤淑明, 等. 城市综合交通、物流、生态问题的基础研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2004, 4(3): 37-46.
WANG F Y, DAI R W, TANG S M, et al. Fundamentals of sustainable and integrated development of metropolitan transportation, logistics and ecosystems[J]. *Communication and Transportation Systems Engineering and Information*, 2004, 4(3): 37-46.
- [7] 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 等. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架[J]. *自动化学报*, 2015, 41(12): 2003-2016.
DENG J L, WANG F Y, CHEN Y B, et al. From industries 4.0 to energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- [8] 王飞跃. 社会计算与平行管理: 智慧城市、智慧企业、智慧社会[R]. 2011.
WANG F Y. Social computing and parallel management: smart city, smart enterprise, and smart society[R]. 2011.
- [9] WANG F Y. Shadow systems: a new concept for nested and embedded co-simulation for intelligent systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1994.
- [10] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 293-302.
WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 293-302.
- [11] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25-35.
- [12] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 893-897.
WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex Systems[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(5): 893-897.
- [13] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [14] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习—机器学习的一个新型理论框架[J]. *自动化学报*, 2017, 43(1): 1-8.
LI L, LIN Y L, CAO D P, et al. Parallel learning—a new framework for machine Learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(1): 1-8.
- [15] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3): 630-638.
- [16] 王飞跃. 社会信号处理与分析的基本框架: 从社会传感网络到计算辩证解析方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43(12): 1598-1611.
WANG F Y. A framework for social signal processing and analysis: from social sensing networks to computational dialectical analytics[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2013, 43(12): 1598-1611.
- [17] 张俊, 王飞跃, 方舟. 社会能源: 从社会中获取能源[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 7-20.
ZHANG J, WANG F Y, FANG Z. Social energy: mining energy from the society[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 7-20.
- [18] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. *自动化学报*, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Y, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(4): 481-494.
- [19] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 40-51.
LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 40-51.
- [20] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. *自动化学报*, 2015, 41(1): 1-8.
WANG F Y. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(1): 1-8.
- [21] ZHANG N, WANG F Y, ZHU F H, et al. DynaCAS: computational experiments and decision support for ITS[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2008, 23(6): 19-23.
- [22] WANG F Y, JIN N, LIU D R, et al. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optimal control of discrete-time nonlinear systems with ϵ -error bound[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(1): 24-36.
- [23] WANG F Y, ZHANG J, WEI Q L, et al. PDP: parallel dynamic programming[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(1): 1-5.
- [24] 王晓, 要婷婷, 韩双双, 等. 平行车联网: 基于 ACP 的智能车辆网联管理与控制[J]. *自动化学报*, 2018, 44(8): 1391-1404.
WANG X, YAO T T, HAN S S, et al. Parallel Internet of vehicles: the ACP-based networked management and control for intelligent vehicles[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(8): 1391-1404.
- [25] 王飞跃, 张俊. 物联网: 概念、问题和平台[J]. *自动化学报*, 2017, 43(12): 2061-2070.
WANG F Y, ZHANG J. Internet of minds: the concept, issues and Platforms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- [26] 王飞跃, 王艳芬, 陈慧竹, 等. 联邦生态: 从联邦数据到联邦智能[J]. *智能科学与技术学报*, 2020, 2(4): 305-311.
WANG F Y, WANG Y F, CHEN Y Z, et al. Federated ecology: from federated data to federated intelligence[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, 2(4): 305-311.
- [27] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能

- 源系统：需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
- ZHANG J, GAO W Z, ZHANG Y C, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [28] 吕宜生, 王飞跃, 张宇, 等. 虚实互动的平行城市：基本框架、方法与应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 311-317.
- LYU Y S, WANG F Y, ZHANG Y, et al. Parallel cities: framework, methodology, and application[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 311-317.
- [29] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通：虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [30] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [31] WANG F Y. Shadow systems: a new concept for nested and embedded cosimulation for intelligent systems[R]. 1994
- [32] 白显阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能：电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410.
- BAI Y Y, HUANG Y H, CHEN S Y, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and

applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.

- [33] 王飞跃. 机器人的未来发展：从工业自动化到知识自动化[J]. 科技导报, 2015, 33(21): 39-44.

WANG F Y. On future development of robotics: from industrial automation to knowledge automation[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(21): 39-44

[作者简介]



王飞跃（1961—），男，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，主要研究方向为复杂系统、智能控制、社会计算、平行理论。



蒋怀光（1984—），男，博士，国家可再生能源实验室研究负责人，主要研究方向为人工智能、优化控制、无人自动化系统、能源系统。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Vol.3 No.4 (EOV) December 2021

Contents

Review Intelligence

MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems
..... *LI Xiaoshuang, WANG Xiao, YANG Linyao, TIAN Yonglin, WANG Yutong, ZHANG Jun, WANG Fei-Yue* (387)

Surveys and Prospectives

Review of pedestrian trajectory prediction methods..... *LI Linhui, ZHOU Bin, REN Weiwei, LIAN Jing* (399)

Theoretical framework of brain modelling and highlighted problems..... *HU Dongwei, FENG Xiaolu* (412)

Special Column: Data Based Learning and Optimization

Parallel control-based event-driven approximate optimal control of discrete-time nonlinear systems
..... *LIAO Zehua, LIANG Ziyu, ZHOU Tianmin, LU Jingwei, WEI Qinglai* (435)

Synchronization control of unknown heterogeneous multi-agent system via model-free adaptive dynamic programming
..... *XIA Lina, LI Qing, SONG Ruizhuo, WANG Zihan, XU Zhen* (444)

Action dependent heuristic online tracking control for a class of nonaffine systems
..... *ZHAO Huiling, WANG Ding, REN Jin* (449)

Papers and Reports

Dynamic water quality warning with seasonal decomposition and long short-term memory network.....
..... *XU Bowen, BI Jing, YUAN Haitao, WANG Gongming, QIAO Junfei* (456)

Tibetan entity relation extraction based on multi-level attention fusion mechanism *WANG Like, SUN Yuan, LIU Sisi* (466)

Classification method of dermoscopic image based on hierarchical convolution neural network.....
..... *SHAO Hong, ZHANG Mingkun, CUI Wencheng* (474)

Improved M-ORB based direct-loop closure detection algorithm for visual SLAM
..... *LI Wei, REN Menghan, HUANG Weihao, DU Xiaoyu, ZHOU Yi* (482)

Implicit knowledge learning: taking clinical simulation for example..... *DONG Jun* (492)

Windblown sand control decision-making support system based on parallel intelligence: Taklimakan desert highway and its
sand-breaking system *CHANG Fangle, KANG Mengzhen, WANG Xiujuan, LEI Jiaqiang, WANG Fei-Yue* (499)

Game 5.0: social cognitionparallel game based on the parallel systems and machine game
..... *LI Yaling, YANG Linyao, GE Jun, QIN Yuanqi, WANG Xiao* (507)

Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services.....
..... *WANG Fei-Yue, JIANG Huaiguang* (521)

智能科学与技术学报

2021年(第3卷)总目次

评论智能

	期	页码
平行医学:从医学的温度到智慧的医学.....王飞跃	1	(1)
平行博物馆:新时代博物馆运营的智能管理与控制.....王春法,王飞跃,鲁越,李华飙,郭超	2	(125)
平行哲学与智能技术:平行产业与智慧社会的对偶方程与测试基础.....王飞跃	3	(245)
元电网 MetaGrid:基于平行电网的新一代智能电网的体系与架构.....李小双,王 晓,杨林瑶,田永林,王雨桐,张 俊,王飞跃	4	(387)

综述与展望

面向智能服务的雾无线接入网络:原理、技术与挑战.....刘晨熙,刘炳宏,张 贤,龙新南,彭木根	1	(10)
进化集成学习算法综述.....胡 毅,瞿博阳,梁 静,王 杰,王艳丽	1	(18)
行人轨迹预测方法综述.....李琳辉,周 彬,任威威,连 静	4	(399)
大脑建模的理论框架及热点问题.....胡东伟,冯晓璐	4	(412)

专题:情感脑机接口

情感脑机接口研究综述.....吕宝粮,张亚倩,郑伟龙	1	(36)
基于脑电功能连接微状态的情绪状态解码.....沈新科,李奕超,刘 锦,宋 森,张 丹	1	(49)
基于多源域自适应的跨被试情感脑电识别.....高寒冰,张 驰,靳明艳,肖 杨,丛丰裕	1	(59)
基于脑机协同智能的情绪识别.....刘栋军,王宇涵,凌文芬,彭 勇,孔万增	1	(65)
基于 3D 分层卷积融合的多模态生理信号情绪识别.....凌文芬,陈思含,彭 勇,孔万增	1	(76)

专题:智能交通系统与应用

轨道交通工业控制系统信息安全:分析与展望.....李浥东,章子凯,董海荣,张洪磊,陈灏瑜,韩瑜珊	2	(139)
移动目标轨迹预测方法研究综述.....刘 文,胡琨林,李 岩,刘 钊	2	(149)
需求响应公交及其路径优化研究综述.....冯 帅,刘小明	2	(161)
一种考虑时空关联的深度学习短时交通流预测方法.....张 阳,胡 月,辛东嵘	2	(172)
基于 AlphaZero 的地铁列车大量速度曲线自动生成算法.....芦玉琦,陈德旺,赵钊林	2	(179)

专题:工业物联网

面向防疫的智能导诊机器人关键技术及应用.....王 腾,潘 晶,董 璐,孙长银	2	(187)
基于文本信息抽取的列控车载设备故障发现.....陈 曦,李润梅,王 剑,董舒韵	2	(195)
基于 PMC 指数模型的电力政策量化及其在负荷预测中的应用.....刘天斌,赵 杭,汪 辰,袁红霞,张银芽,胡晨茜,李金星,高天露,张 俊	2	(202)
长江智城智慧平台框架的规划与实践.....吴 军,张 俊	2	(211)
平行港口:智慧绿色时代下港口工业物联网新形态与体系结构吴宇震,张 俊,高天露,孙玉健,刘金旭	2	(218)

专刊：目标智能检测与识别

基于深度卷积集成网络的视网膜多种疾病筛查和识别方法	王禾扬, 杨启鸣, 朱 旗	3	(259)
基于 3D 卷积的图像序列特征提取与自注意力的车牌识别方法	曾淦雄, 柯 道	3	(268)
基于视觉显著性的车载单目相机自运动估计及前车尺度估计方法	艾明欣, 刘 铁, 王 净, 丁佳丽, 袁泽剑, 尚媛园	3	(280)
基于差分特征注意力机制的无锚框多光谱行人检测算法	沈继锋, 刘 岳, 韦 浩, 左 欣, 杨万扣	3	(294)
基于多尺度卷积神经网络特征融合的植株叶片检测技术	李 颖, 陈 龙, 黄钊宏, 孙 杨, 蔡国榕	3	(304)
基于 SE-YOLOv5s 的绝缘子检测	田 庆, 胡 蓉, 李佐勇, 蔡远征, 余兆钗	3	(312)
基于角度敏感的空间注意力机制的轻量型旋转目标检测器	尹开石, 杨 萌, 顾 曦, 王志成	3	(322)
一种基于最大相关熵和局部约束的协同表示分类器	余沁茹, 卢桂馥	3	(334)
鲁棒的非负监督低秩鉴别嵌入算法	姚 裕, 万鸣华	3	(342)
基于超轻量通道注意力的端对端语音增强方法	洪 依, 孙成立, 冷 严	3	(351)
特征空间中基于半遗传稀疏表示的图像识别	石林瑞, 黄祎婧, 符进武, 郭心悦, 范自柱	3	(359)
基于半监督学习的人脸识别反欺骗方法研究	李 莉, 曾伟良, 黄永慧, 孙为军	3	(370)

专栏：基于数据的学习与优化

基于平行控制的离散非线性系统的事件触发近似最优控制	廖泽华, 梁子钰, 周天民, 卢经纬, 魏庆来	4	(435)
未知异构多智能体系统无模型自适应动态规划同步控制	夏丽娜, 李 擎, 宋睿卓, 王子涵, 许 镇	4	(444)
一类非仿射系统的执行依赖启发式在线跟踪控制	赵慧玲, 王 鼎, 任 进	4	(449)

学术论文

基于脑机接口的人机共享控制技术研究	邓晓燕, 俞祝良, 林灿光, 顾正晖, 李远清	1	(85)
基于细节增强的 MR 序列转换方法	严 凡, 邸奕宁, 张建伟, 陈 为	1	(93)
大数据智能指挥控制内在机理框架模型研究	胡志强	1	(101)
平行光场：基本框架与流程	王飞跃, 孟祥冰, 杜思聪, 耿 征	1	(110)
面向城市复杂系统的社会计算关键技术研究	贾晓丰, 高 嵩, 江 茜, 齐红威, 王 晓, 张 俊, 秦 蕊, 欧阳丽炜	2	(228)
NFT：基于区块链的非同质化通证及其应用	秦 蕊, 李娟娟, 王 晓, 朱 静, 袁 勇, 王飞跃	2	(234)
基于季节性分解与长短期记忆网络的水质动态预警	许博文, 毕 敬, 苑海涛, 王功明, 乔俊飞	4	(456)
基于多级注意力融合机制的藏文实体关系抽取	王丽客, 孙 媛, 刘思思	4	(466)
基于分层卷积神经网络的皮肤镜图像分类方法	邵 虹, 张鸣坤, 崔文成	4	(474)
基于改进 M-ORB 的视觉 SLAM 直接-闭环检测算法	李 伟, 任孟瀚, 黄威豪, 杜晓玉, 周 毅	4	(482)
隐性知识学习——以临床模拟为例	董 军	4	(492)
平行智能风沙防护治理决策支持系统——塔克拉玛干沙漠公路及其防沙体系	常方乐, 康孟珍, 王秀娟, 雷加强, 王飞跃	4	(499)
博弈 5.0：基于平行系统和机器博弈的社会认知平行博弈	李亚玲, 杨林瑶, 葛 俊, 覃缘琪, 王 晓	4	(507)
平行电池：智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程	王飞跃, 蒋怀光	4	(521)

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Contents List Vol.3 (2021)

Review Intelligence

	No.	Pages
Parallel medicine: from warmness of medicare to medicine of smartness <i>WANG Fei-Yue</i>	1	(1)
Parallel museums: intelligent management and control of museum operations in the new era <i>WANG Chunfa, WANG Fei-Yue, LU Yue, LI Huabiao, GUO Chao</i>	2	(125)
Parallel philosophy and intelligent technology: dual equations and testing systems for parallel industries and smart societies <i>WANG Fei-Yue</i>	3	(245)
MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems <i>LI Xiaoshuang, WANG Xiao, YANG Linyao, TIAN Yonglin, WANG Yutong, ZHANG Jun, WANG Fei-Yue</i>	4	(387)

Surveys and Prospectives

Intelligent service oriented fog radio access network: principles, technologies and challenges <i>LIU Chenxi, LIU Binghong, ZHANG Xian, LONG Xinnan, PENG Mugen</i>	1	(10)
A survey on evolutionary ensemble learning algorithm <i>HU Yi, QU Boyang, LIANG Jing, WANG Jie, WANG Yanli</i>	1	(18)
Review of pedestrian trajectory prediction methods <i>LI Linhui, ZHOU Bin, REN Weiwei, LIAN Jing</i>	4	(399)
Theoretical framework of brain modelling and highlighted problems <i>HU Dongwei, FENG Xiaolu</i>	4	(412)

Special Topic: Affective Brain-computer Interface

A survey of affective brain-computer interface <i>LU Bao-Liang, ZHANG Yaqian, ZHENG Wei-Long</i>	1	(36)
Emotional state decoding using EEG-based microstates of functional connectivity <i>SHEN Xinke, LI Yichao, LIU Jin, SONG Sen, ZHANG Dan</i>	1	(49)
Cross-subject emotional EEG recognition based on multi-source domain adaptation <i>GAO Hanbing, ZHANG Chi, JIN Mingyan, XIAO Yang, CONG Fengyu</i>	1	(59)
Emotion recognition based on brain and machine collaborative intelligence <i>LIU Dongjun, WANG Yuhan, LING Wenfen, PENG Yong, KONG Wanzeng</i>	1	(65)
Multi-modal physiological signal emotion recognition based on 3D hierarchical convolution fusion <i>LING Wenfen, CHEN Sihan, PENG Yong, KONG Wanzeng</i>	1	(76)

Special Topic: Intelligent Transportation Systems and Applications

Information security of the industrial control system for rail: analysis and prospect <i>LI Yidong, ZHANG Zikai, DONG Hairong, ZHANG Honglei, CHEN Haoyu, HAN Yushan</i>	2	(139)
A review of prediction methods for moving target trajectories <i>LIU Wen, HU Kunlin, LI Yan, LIU Zhao</i>	2	(149)

A survey of research on demand responsive transit and its route optimization	<i>FENG Shuai, LIU Xiaoming</i>	2	(161)
A deep learning short-term traffic flow prediction method considering spatial-temporal association	<i>ZHANG Yang, HU Yue, XIN Dongrong</i>	2	(172)
Algorithm for automatically generating a large number of speed curves of subway trains based on AlphaZero	<i>LU Yuqi, CHEN Dewang, ZHAO Zhaolin</i>	2	(179)

Special Topic: Industrial Internet of Minds

Key technologies and applications of intelligent guiding robots for epidemic prevention	<i>WANG Teng, PAN Jing, DONG Lu, SUN Changyin</i>	2	(187)
Fault discovery based on text information extraction for on-board equipment of CTCS	<i>CHEN Xi, LI Runmei, WANG Jian, DONG Shuyun</i>	2	(195)
Power policy quantification based on PMC index model and its application in load forecasting	<i>LIU Tianbin, ZHAO Hang, WANG Chen, YUAN Hongxia, ZHANG Yinya, HU Chenxi, LI Jinxing, GAO Tianlu, ZHANG Jun</i>	2	(202)
Planning and practice of the Yangtze River smart city platform	<i>WU Jun, ZHANG Jun</i>	2	(211)
Parallel port: new formation and system architecture of port industry Internet of minds in smart and green era	<i>WU Yuzhen, ZHANG Jun, GAO Tianlu, SUN Yujian, LIU Jinxu</i>	2	(218)

Special Issue: Intelligent Object Detection and Recognition

Retinal multi-disease screening and recognition method based on deep convolution ensemble network	<i>WANG Heyang, YANG Qiming, ZHU Qi</i>	3	(259)
3D convolution-based image sequence feature extraction and self-attention for license plate recognition method	<i>ZENG Ganxiong, KE Xiao</i>	3	(268)
A method based on visual saliency for vehicle-mounted monocular camera ego-motion estimation and vehicle scale estimation	<i>AI Mingxin, LIU Tie, WANG Jing, DING Jiali, YUAN Zejian, SHANG Yuanyuan</i>	3	(280)
Anchor free multispectral pedestrian detection algorithm based on differential feature attention mechanism	<i>SHEN Jifeng, LIU Yue, WEI Hao, ZUO Xin, YANG Wankou</i>	3	(294)
Plant leaf detection technology based on multi-scale CNN feature fusion	<i>LI Ying, CHEN Long, HUANG Zhaohong, SUN Yang, CAI Guorong</i>	3	(304)
Insulator detection based on SE-YOLOv5s	<i>TIAN Qing, HU Rong, LI Zuoyong, CAI Yuanzheng, YU Zhaochai</i>	3	(312)
Light weight rotating object detector based on angle sensitive spatial attention mechanism	<i>YIN Kaishi, YANG Meng, GU Xi, WANG Zhicheng</i>	3	(322)
Collaborative representation based classifier with maximum correntropy criterion and locality constraint	<i>YU Qinru, LU Guifu</i>	3	(334)
Robust non-negative supervised low-rank discriminant embedding algorithm	<i>YAO Yu, WAN Minghua</i>	3	(342)
End-to-end speech enhancement based on ultra-lightweight channel attention	<i>HONG Yi, SUN Chengli, LENG Yan</i>	3	(351)
Sparse representation for image recognition based on semi-genetic algorithm in feature space	<i>SHI Linrui, HUANG Yijing, FU Jinwu, GUO Xinyue, FAN Zizhu</i>	3	(359)

Research on anti-spoofing method of face recognition based on semi-supervised learning		
..... <i>LI Li, ZENG Weiliang, HUANG Yonghui, SUN Weijun</i>	3	(370)

Special Column: Data Based Learning and Optimization

Parallel control-based event-driven approximate optimal control of discrete-time nonlinear systems		
..... <i>LIAO Zehua, LIANG Ziyu, ZHOU Tianmin, LU Jingwei, WEI Qinglai</i>	4	(435)
Synchronization control of unknown heterogeneous multi-agent system via model-free adaptive dynamic programming		
..... <i>XIA Lina, LI Qing, SONG Ruizhuo, WANG Zihan, XU Zhen</i>	4	(444)
Action dependent heuristic online tracking control for a class of nonaffine systems		
..... <i>ZHAO Huiling, WANG Ding, REN Jin</i>	4	(449)

Papers and Reports

Research on human-computer shared control technology based on brain-computer interface		
..... <i>DENG Xiaoyan, YU Zhuliang, LIN Canguang, GU Zhenghui, LI Yuanqing</i>	1	(85)
Conversion method of magnetic resonance sequence based on detail enhancement		
..... <i>YAN Fan, DI Yining, ZHANG Jianwei, CHEN Wei</i>	1	(93)
The framework model on internal mechanism of big data intelligent command and control		
..... <i>HU Zhiqiang</i>	1	(101)
Parallel light field: the framework and processes · <i>WANG Fei-Yue, MENG Xiangbing, DU Sicong, GENG Zheng</i>	1	(110)
Research on key technologies of social computing for urban complex system		
..... <i>JIA Xiaofeng, GAO Song, JIANG Xi, QI Hongwei, WANG Xiao, ZHANG Jun, QIN Rui, OUYANG Liwei</i>	2	(228)
NFT: blockchain-based non-fungible token and applications		
..... <i>QIN Rui, LI Juanjuan, WANG Xiao, ZHU Jing, YUAN Yong, WANG Fei-Yue</i>	2	(234)
Dynamic water quality warning with seasonal decomposition and long short-term memory network		
..... <i>XU Bowen, BI Jing, YUAN Haitao, WANG Gongming, QIAO Junfei</i>	4	(456)
Tibetan entity relation extraction based on multi-level attention fusion mechanism		
..... <i>WANG Like, SUN Yuan, LIU Sisi</i>	4	(466)
Classification method of dermoscopic image based on hierarchical convolution neural network		
..... <i>SHAO Hong, ZHANG Mingkun, CUI Wencheng</i>	4	(474)
Improved M-ORB based direct-loop closure detection algorithm for visual SLAM		
..... <i>LI Wei, REN Menghan, HUANG Weihao, DU Xiaoyu, ZHOU Yi</i>	4	(482)
Implicit knowledge learning: taking clinical simulation for example		
..... <i>DONG Jun</i>	4	(492)
Windblown sand control decision-making support system based on parallel intelligence: Taklimakan desert highway and its sand-breaking system		
..... <i>CHANG Fangle, KANG Mengzhen, WANG Xiujuan, LEI Jiaqiang, WANG Fei-Yue</i>	4	(499)
Game 5.0: social cognitionparallel game based on the parallel systems and machine game		
..... <i>LI Yaling, YANG Linyao, GE Jun, QIN Yuanqi, WANG Xiao</i>	4	(507)
Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services		
..... <i>WANG Fei-Yue, JIANG Huaiguang</i>	4	(521)

收录声明

本刊对发表的文章, 拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

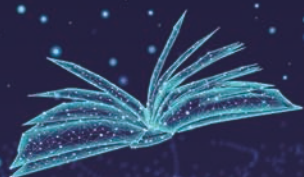
Chinese Journal of Intelligent Science and Technology has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果, 无一稿多投; 论文内容不涉及国家机密; 未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过; 论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题, 论文作者将承担全部责任。

The authors of *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

助力我国科技期刊建设
激发科学共同体能量



依法科学有序**防控** 坚决遏制**疫情**扩散



不聚集

戴口罩

勤洗手