

# 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统

王拥军<sup>1</sup> 王飞跃<sup>2,3,4</sup> 王戈<sup>5</sup> 王晓<sup>2,3,4</sup> 王伊龙<sup>1</sup> 李瑞<sup>1</sup>

**摘要** 本文旨在提出一个智慧化时代的集智能化管理、智能化运营与智能化诊疗为一体的智慧医院解决方案,即基于平行医学的平行医院. 平行医院以虚实互动的平行思想为核心理念,以突出人以及其社会因素的信息物理社会系统(CPSS)作为基础设施,以人工场景(Artificial scene),计算实验(Computational experiments)和平行执行(Parallel execution)为一体的ACP平行智能理论为指导构建虚实交互的新一代智慧化医院管理系统. 本文对比指出了当前信息系统存在的缺陷,提出了智慧医院操作系统的概念对医院的资源进行逻辑化统一管理,重点介绍了对医院不同设备以及建筑等硬件设施的数字化、虚拟化及其交互联动,参与人员数字化与虚拟化及其虚实交互的智能化系统构建. 在医院操作系统的应用层,基于ACP理论的智慧医院操作系统通过虚实交互的智能化运行模式,最终落实闭环、反馈、精准的收敛. 我们通过对天坛医院的平行医院实践案例——天坛智慧大脑进行案例分析,印证了本文所提出的智慧医院操作系统的可行性与科学性.

**关键词** 平行医院, 智慧医院, 数字医院, 智能化管理, 智能化培训

**引用格式** 王拥军, 王飞跃, 王戈, 王晓, 王伊龙, 李瑞. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统. 自动化学报, 2021, 47(11): 2585-2599

**DOI** 10.16383/j.aas.c210697

## Parallel Hospitals: From Hospital Information System (HIS) to Hospital Smart Operating System (HSOS)

WANG Yong-Jun<sup>1</sup> WANG Fei-Yue<sup>2,3,4</sup> WANG Ge<sup>5</sup> WANG Xiao<sup>2,3,4</sup>  
WANG Yi-Long<sup>1</sup> LI Rui<sup>1</sup>

**Abstract** This article aims to propose a smart hospital solution that integrates smart management, smart operation, and smart diagnosis and treatment in the smart era, that is, a parallel hospital based on parallel medicine. The Parallel hospital takes the parallel thinking of virtual and actual interaction as its core concept, uses the cyber-physical social system (CPSS) that highlights people and their social factors as the infrastructure, and uses the artificial scenarios of parallel thinking, computational experiments and parallel execution (ACP) theory as the guiding theory, and a new generation of intelligent hospital management system with virtual and real interaction has been constructed. Considering the shortcomings of the current information system, we proposed the concept of a smart hospital operating system, which manages the resources of the hospital in a logical and unified manner. We focused on the digitization, virtualization and mutual interaction of different equipment and hardware facilities such as buildings in the hospital, and the digitization and virtualization of participants and their virtual and physical interaction in the process of intelligent systems construction. At the application layer of the hospital operating system, different intelligent systems based on the ACP theory finally implement closed loop, feedback, and precise convergence through the intelligent operation mode of virtual and real interaction. We conducted a case study of the parallel hospital practice case of Tiantan Hospital — Tiantan Smart Brain, which confirmed the feasibility and scientificity of the smart hospital operating system proposed in this article.

**Key words** Parallel hospital, smart hospital, digital hospital, smart management, smart training

**Citation** Wang Yong-Jun, Wang Fei-Yue, Wang Ge, Wang Xiao, Wang Yi-Long, Li Rui. Parallel hospitals: From hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS). *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(11): 2585-2599

收稿日期 2021-07-22 录用日期 2021-10-18

Manuscript received July 22, 2021; accepted October 18, 2021  
国家自然科学基金(61533019)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61533019)

本文责任编辑 李力

Recommended by Associate Editor LI Li

1. 首都医科大学附属北京天坛医院 北京 100070 中国 2. 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 中国 3. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266109 中国

4. 中国科学院大学人工智能学院 北京 100049 中国 5. 澳门科技大学系统工程研究所 澳门 999078 中国

1. Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China 2. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China 3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China 4. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China 5. Institute of Systems Engineering, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China

健康问题仍然是 2015~2030 年联合国可持续发展重点关注的问题之一。为了促进健康中国的建设,我国印发了《“健康中国 2030”规划纲要》来指导与规范健康事业的发展与建设<sup>[1]</sup>。医疗健康是建设健康中国必不可少的重要一环,医疗基础设施的完善又是医疗健康的主要保证。但目前我国的现状却是基础设施的分布不均与医护人员的分布不均,偏远城市的快速就医面临巨大挑战。在我国大型城市中,越来越多的患者开始涌向更大的医院,期望接受更权威的专家诊断,这使得大多数大中型医院甚至该城市人口规模、交通运输等都面临着巨大的压力。近年来,随着人口老龄化的加重、城镇医疗资源比例的严重失衡,“看病难”的问题越来越严重,我国医疗体系面临着巨大的挑战,医疗改革势在必行。合理的医疗资源组织方式改革可以减少因地域差异而出现的就医差别,尽可能合理地平均分配医疗资源、建设健康中国。医疗资源的分配和管理主要考虑医疗的社会性、人文性以及其自身的科学性。

医疗是存在于人组成的社会中,从上古时代的“巫”到现代社会的“医”,无论沧海桑田,不变的是社会性。“看病难”、“看病贵”、“因疾返贫”是医疗面临的巨大问题。针对存在的问题,我国在不同层面作出了努力来进行相关的改善。我国国务院印发了《深化医药卫生体制改革 2021 年重点工作任务》来改善目前存在的问题,地方上如湖北、宁夏等省都出具了不同的政策来改变这一现状。总体而言,“看病难”、“看病贵”的问题是在社会层面出现的普遍问题,体现了医疗健康的社会复杂性。

随着时代的发展以及叙事医学的蓬勃兴起<sup>[2]</sup>,针对医疗健康的人文复杂性提出使用人文关怀的方式加快患者的康复进程。叙事医学是医学发展的美好愿景,可以使得医学治疗过程更有温度。但是,以增加一线医护工作人员的负担来实现这一目的是不合理的。物联网技术的发展为叙事医学带来了可能,可以使得医患关系重新回到救死扶伤,使得医学更有温度<sup>[3]</sup>。将医生与患者之间“人情味”的交流内容进行快速收集和信息化是实现叙事医学的基础。利用已有的物联网技术结合语音识别和自然语言处理技术<sup>[4]</sup>,可以提高医护人员的工作效率,减轻医护人员的负担。另外,随着民众知识水平的提高,人们的健康意识也逐渐增强,除了“看病难”与“看病贵”之外,患者对医疗健康的要求也在逐渐提高,越来越渴望“个性化”的治疗方案。同时,受医疗健康社会复杂性的长期影响,医患关系不断地物化,救死扶伤逐渐消费化、合约化。医患关系的紧张,必然出现不负责任的医生与不尊重医生的患者。人们对“个

性化”医疗的需求以及医患关系紧张的问题使得医疗健康同时具有了人文的复杂性。

医疗健康在社会性与人文性方面所具有的复杂性外,其本身的科学性也面临着巨大的挑战。从深度学习到深度医疗,人工智能相关技术在医疗领域得以实践,基于智能科技的医疗智能化成为当前发展的主流。医疗工作者与患者共同期待人工智能技术能够在医疗系统发挥巨大的作用。人们寄希望于人工智能在解决医疗的社会复杂性与人文复杂性问题之外,还能够解决医学本身科学性的复杂问题。如何面对并尽可能解决或者是改善这些问题?物联网、大数据、云计算、机器人、区块链、人工智能,这些引人注目的新技术为相关问题的解决带来了无限的遐想。但随之而来的还有另外一个问题,如何将目前已有的技术有效组合起来解决相关的问题呢?

目前,不同的医疗系统都在开始尝试将人工智能技术引入医院运行的不同阶段,不仅仅是对患者的诊断,还包括医院运营的各个部分,如市场预测等。人工智能+健康医疗还处在起步阶段,要保证人工智能在医疗健康领域良好、健康地应用与发展,仍有许多亟待解决的问题和挑战<sup>[5]</sup>。

针对医学治疗存在的社会性、人文性与科学性的问题,王飞跃教授提出使用 ACP 方法<sup>[6-7]</sup>+CPSS (Cyber-physical-social systems)<sup>[8]</sup>的新基建的平行医学和平行医疗的概念<sup>[9-10]</sup>。在智能时代将人工智能系统与已有的医疗系统进行有机的融合,形成人机融合的新型医疗哲学体系,并希望借此解决当前医学领域存在的复杂问题。新的医学范式的提出必将引起医疗机构的运营模式与管理模式的变革,以适应新时代的医疗模式发展的需要。

互联网技术的发展为医疗改革带来了新的解决方案,为此,2018 年国务院提出促进“互联网+医疗健康”发展。随着新一代信息通信技术的发展,医院的基础设施与数字化建设已经取得了长足的发展。远程诊疗、医患网络社区等的发展,使得患者与医生的交互方式突破了传统的固定场所就医模式,向着跨越时空的互联网医疗方向发展。互联网与医疗的有机结合通过使用非传统方式合理分配医疗资源来缓解“看病难”的问题,同时也大幅度降低了医疗的成本。这些都得益于互联网发展所带来的时空距离的大尺度缩短,是在互联网背景下,对医疗资源进行合理组织与分配的有益尝试。

医院信息化建设是物联网与相关的人工智能技术设备走进医院运行的不同环节的 necessary 保证。医院信息系统利用计算机与通讯设备,为医院所属部门提供病人诊疗信息和行政管理信息采集与存储的能力,同时也为医院所属各部门提供其他的信息服

并满足所有授权用户的功能需求. 随着信息技术的发展, 医院信息系统 (Hospital information systems, HIS) 的普及, 推动了我国医疗水平的发展. 但是面对新人工智能的技术和不断增加的基础设备, 基于 CPS (Cyber-physical systems, CPS) 的医院信息系统已经不能满足于新的管理需求. 人工智能技术在医疗健康领域的应用离不开数据的支撑. 大数据的采集、传输、管理与共享是人工智能得以实现的前提. 人工智能的引入对当前的医院信息管理系统带来了极大的挑战. 因而, 统一的设备管理与资源调度是智能设备发展到一定阶段的必然选择, 即智慧医院操作系统.

同时, 人, 不管是患者还是医生, 包括人类医生与机器人医生, 在医院的运营中, 都是主要角色. 以人为本的管理也逐渐得到不同程度的重视, 但是, 当前的医院信息系统却缺乏对人的建模, 将人排除在了医院决策管理的闭环之外. 基于 CPSS 理论的智能系统不仅考虑了基本的物理因素, 同时, 还将人考虑到了闭环之内. 因而, 基于 CPSS 构建医院新型智慧操作系统是大势所趋.

作为平行医学模式的具体实践, 本文提出依据 CPSS+ACP 理论进行未来发展需要的智慧化医院的建设, 即平行医院. 实现从医院信息化系统到智慧化操作系统的跨越, 满足未来的新的医疗发展对于社会性、人文性与科学性的发展的需要.

所谓的平行医院, 就是以操作系统的统一管理, 结合 ACP 理论与 CPSS 理论, 将医院以及医院运营管理者以及医疗活动的参与者全部进行数字化建模, 从而达到统一化管理与运营. 在操作系统的统一管理与访问的理念下, 对医院一切硬件以及人员进行建模数字化, 构建人工医院 (Artificial hospital). 与现实的医院对应, 人工医院由不同的科室组成, 在不同科室部署依据不同的虚拟医生与虚拟患者构成不同的虚拟诊疗系统. 该过程主要实现对现实医院的描述, 实现描述智能. 在人工医院中, 依据从现实医院中采集的小数据进行人工大数据的构造, 实现对现实医院未来发展走向的预测智能, 即计算实验 (Computational experiments). 针对具体的实际问题, 依照计算实验的预测智能, 选择最优的执行方案, 平行执行 (Parallel execution) 同时作用于人工医院与现实医院, 引导相关的工作人员实施最优化的解决方案, 即引导智能.

## 1 基本概念与基础理论

### 1.1 医院信息系统

图 1 所示的医院信息系统 (Hospital information systems, HIS) 利用计算机与通讯设备, 为医院

所属部门提供病人诊疗信息和行政管理信息的收集、存储、处理、提取和数据交换的能力, 为医院所属各部门提供信息服务, 并满足所有授权用户的功能需求<sup>[11-12]</sup>. HIS 是医疗数字信息化的主要元素, 广义的 HIS 是指医院使用的所有用于支撑诊疗、管理、后勤等业务的信息化工具、信息系统等. HIS 根据不同科室的需要, 将不同的信息、服务流程等进行了信息化管理, 同时, 相关的物联网设备如智能终端会被集成到系统中, 提高系统的智能化. 这是不同标准的、不同医疗专长的设备场景的信息系统的集合. 同时, 不同的信息子系统被逐渐实现, 如医学实验室系统 (Laboratory information systems, LIS)、策略过程管理系统 (Policy and procedure management systems, PPMS)、放射科信息管理系统 (Radiological information systems, RIS)、图像归档传输系统 (Picture archiving and communication systems, PACS) 等<sup>[13]</sup>.

目前的医院信息系统主要是基于 CPS 进行开发的, 充分考虑了当前医院运行信息化的需要, 将不同的诊疗流程极大自动化, 同时, 电子病历系统的引入使得患者的状态方便追踪, 这些都极大提高了医疗系统的发展与收益<sup>[14]</sup>.

医院针对不同科室的情况, 构建了不同的信息系统来满足医院诊疗与运行的目标, 已经为医院的发展与医生患者的方便诊疗与就医带来巨大提升. 但是不同科室与科室的差异性, 使得不同科室之间的信息共享变得困难, 知识的存储也是碎片化的. 同时, 为了满足各自的需求, 不同科室往往单独构建自己的信息系统, 使得大量设备出现冗余的情况. 随着物联网在医院信息系统的信息采集的重要性逐

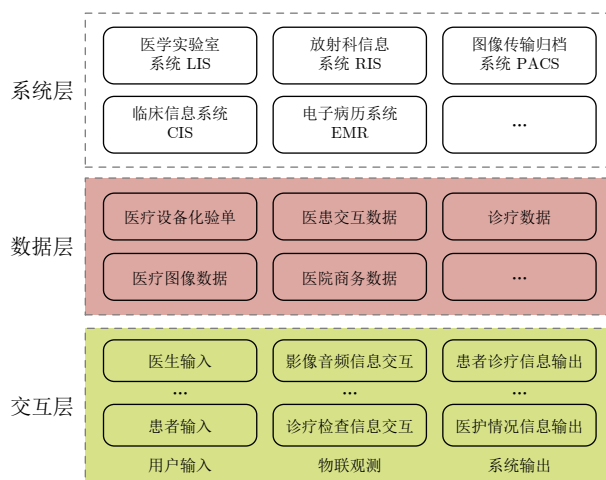


图 1 医院信息系统

Fig. 1 Hospital information system



渐凸显,大量的物联网设备被引入医院信息系统中,系统扩展变得困难重重.因此,HIS的智能化成为提升其效率的有效手段.

## 1.2 医院智慧操作系统

操作系统(Operating system, OS)<sup>[15]</sup>指的是对计算系统的硬件和软件资源进行统一的管理和控制,并合理地组织和调度计算系统的资源,以提供给用户和其他系统方便的接口和环境的程序集合.操作系统实现了对系统资源的统一管理,为用户提供统一的接口,使得用户专心于自己的业务而忽略底层资源的管理,方便不同系统之间的交互.智能设备发展到一定阶段都需要专门的操作系统进行系统资源的统一管理与调度.当前,随着新的通信技术的发展,物联网设备已经应用于生活的方方面面.繁多的智能设备在为不同的需要提供了丰富的数据的同时也给原始的信息管理系统带来了挑战.已有的信息管理系统已经不足以应付逐渐增多的不同厂家的物联网设备,因而急需对应的系统软件对逐渐增多的设备进行统一的管理.

操作系统的概念不再局限于传统的计算机系统.针对不同的应用环境,不同的智慧操作系统也逐渐被提出了,如面向人类的编程(Hop)及操作系统(Hoos)<sup>[16-17]</sup>、智慧城市操作系统<sup>[18]</sup>、智慧社区操作系统<sup>[19]</sup>.不同的智慧操作系统结合实际场景与其关联的物联网设备,对不同的设备单元进行抽象化管理,为上层的用户与软件提供统一的接口,方便调用与管理.

近年来,随着新的物联网设备的发展,不同的设备逐渐在医院被应用.将医院整体看作一个巨大的系统,为了更好地实现不同系统之间的交互,以及对不同的设备的统一管理,本文提出医院智慧操作系统的概念.医院智慧操作系统首要的任务是对资源的统一管理,为更上层的应用提供必要数据与功能支持.

随着云计算技术的发展,操作系统的作用越来越弱.与传统的服务器相比,云计算直接对底层进行了统一化虚拟管理,为用户直接提供不同的服务,出现了以虚拟化的硬件直接为服务的虚拟设施医疗云服务(Virtual facility healthcare cloud services, VF-HCS)、服务于大数据智能化时代的虚拟数据医疗云服务(Virtual data healthcare cloud services, VD-HCS)、以平台为服务的虚拟平台医疗云服务(Virtual platform healthcare cloud services, VP-HCS)以及软件层面的虚拟软件医疗云服务(Virtual software healthcare cloud services, VS-HCS)等不同粒度的云计算服务.智慧医院是一个巨大的生

态系统,为了方便不同科室及单位统一地访问与应用,我们基于云计算的服务模式给出了智慧医院操作系统的整体框架图.

图2展示了基本的医院智慧操作系统的整体结构,类似于传统的操作系统,医院智慧操作系统对医院的资源进行了统一的管理与调度,为上层的基础建设提供基本底层支撑,使得上层建设专注于医院本身发展逻辑.本文关注利用平行思想<sup>[6]</sup>对医院管理进行数字化建设来实现医院的智能化管理与运营.为了下文对平行医院的更好阐述,这里先对基于平行思想的平行系统做简单的阐述.

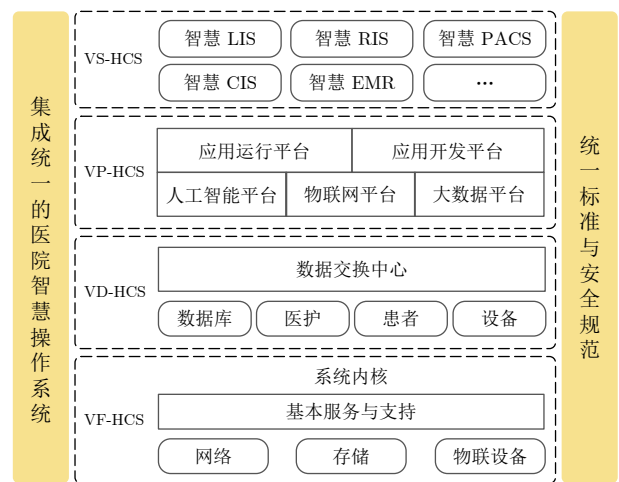


图2 医院操作系统

Fig.2 Hospital operating system

## 1.3 平行系统

平行系统<sup>[6]</sup>是由王飞跃教授在2004年首次提出的.平行系统理论是用于管理与控制复杂系统的体系化框架,同时随着系统复杂度的增加和计算机技术的进步,也是控制系统进一步发展的必然选择.平行系统是由现实中某个实际系统与对应的一个或者多个人工系统组成的共同系统,可以通过人工系统(Artificial systems)对实际系统进行模拟与描述.结合人工系统进行相关的计算实验(Computational experiments)可以对实际系统中对应任务进行预测与验证,通过虚实交互的平行执行过程(Parallel execution)进行虚实交互实现对实际系统的引导与管理.该方法整体上又被称为ACP方法,汇集描述智能、预测智能与引导智能于一体.基于ACP方法的复杂系统的管理与控制已经在很多方面取得了成功,如乙烯生产管理<sup>[20]</sup>、矿山无人化运输管理<sup>[21]</sup>、农业生产智能化<sup>[22]</sup>、企业资源计划<sup>[23]</sup>等.ACP方法于2015年被引入医疗系统相关的研究与应用,构建了一系列平行医学的应用,如平行眼<sup>[24]</sup>、

平行高特<sup>[25]</sup>、平行肠胃<sup>[26]</sup>、平行手术<sup>[27]</sup>、平行皮肤<sup>[28]</sup>、平行医学图像<sup>[29]</sup>等。图3展示了平行系统的不同模块及其之间的关系,下面就ACP理论的各个模块人工系统、计算实验与平行执行进行详细的说明。

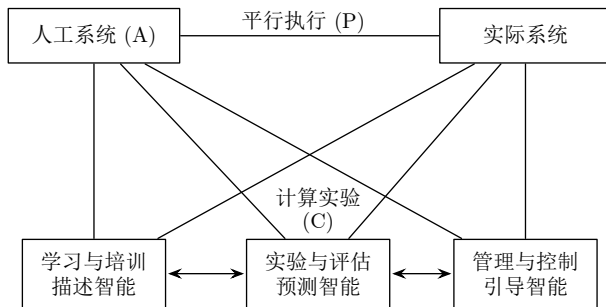


图3 平行系统的基本框架

Fig.3 Basic structure of parallel system

### 1.3.1 人工系统

人工系统是实际系统在虚拟空间的数字化。人工系统与实际系统并不是一一对应的,一个真实系统可以有若干个相关联的人工系统。针对实际空间中各个实体不同的作用与属性,在虚拟空间中,使用不同的建模技术进行数字化建模。不同于数字孪生技术,平行系统的人工系统并不是机械化的真实系统的数字化<sup>[30]</sup>。人工系统利用知识表示等手段实现对实际目标的不同表示。然后在虚拟空间构建不同的虚拟实体,每一个虚拟实体都是由原实体按照不同的优化目标抽象拓展而来的。每一个虚拟实体都对应着真实系统中一种可能的解决方案。总体而言,人工系统是基于描述智能,根据实际系统构建一个或者是多个可能出现的多重人工系统,是进一步应用预测智能与引导智能的基础。

### 1.3.2 计算实验

基于描述智能,可以获得若干个与真实系统关联的人工系统。在这众多的人工系统中,进行不同的计算实验便可以实现对实际系统的预测。这就是计算实验的预测智能。具体地,计算实验是通过丰富的计算技术,以及大量人工数据的生成<sup>[31]</sup>,利用机器学习等技术<sup>[32]</sup>在众多人工系统中,依据当前人工系统所设定的优化目标不断地进行迭代推演。随着计算机技术的不断发展,计算实验在借助计算机的情况下,可以在人工系统中实现对真实系统快速准确地预测。在得到每个人工系统中具有附加条件限定下的较优结果后,通过对比来自各个个人工系统的结果,选择出在当前条件下的最优结果,进一步通过平行执行实现引导智能。

### 1.3.3 平行执行

基于描述智能和预测智能,已经可以快速地得

到真实系统在施加不同附加条件下的预测结果。那么,如何通过预测的结果控制实际系统,或者对实际系统的运行产生积极的影响,便是平行执行<sup>[33]</sup>需要解决的问题。平行执行可以将计算实验中得到的最优解决方案同时作用于虚拟系统与实际系统,在实际的系统运行过程中对实际的系统进行引导。同时,实际系统在运行的过程中也会不断地产生反馈信息,又可以作为初始条件引导人工系统的构建。在此时的实际系统的基础上衍生出的若干个关联的人工系统,通过计算实验的预测学习方法,再次获得接下来实际系统的最优控制策略。这样循环向前推进,就可以实现针对复杂系统的、具有虚实互动、迭代优化特点的在线闭环控制方法——平行系统。

## 2 基本技术与基础框架

所谓平行医院,就是利用平行系统与平行智能的理念在医院的基础设施的基础上构建数字化、智能化、协作化、云端化的面向未来的医院。医院所有的设备与参与人员的数字化,统一的数据流是构建平行医院的基础。平行智能理论的应用基础是ACP理论的具体化实现,即平行系统。如上文所述,人工系统是实际系统的描述智能,计算实验是人工系统对实际系统的预测智能,平行执行是人工系统对实际系统的引导智能<sup>[24-25, 34]</sup>。从实际系统出发,对实际系统虚拟化,借助计算实验与平行执行,通过虚拟系统与实际系统的交互来实现对实际系统的预测与引导智能。

平行医院的构建紧扣ACP方法理论。整体来看,虚拟医院与实际医院以及两者之间的交互满足大的ACP循环。在不同的子系统之间,通过虚拟子系统与实际子系统的虚拟交互对不同的问题进行智能化预测与引导,同样满足ACP理论的逻辑。

### 2.1 整体架构

平行医院是在对实际医院数字化的基础上构建的,通过虚实交互的方式实现具体的智能化医疗流程。整体的构建离不开对医院资源的整体访问与管理,因而离不开医院智慧操作系统的支撑。下面对平行医院的基础平台及平行医院的整体结构框架进行说明。

图4展示了基于智慧操作系统的平行医院的整体架构。实际医院与虚拟医院构成了平行系统的两大核心部件。现实医院是基本硬件的载体,虚拟医院依赖于医院智慧操作系统对实际医院进行抽象化。以人为本始终是医院管理运营的核心。医院人员的主要组成部分为医疗工作者与患者。超越于一般的智慧操作系统,平行医院对其中的主要角色进

行了虚拟化, 构建了完全与实际医院对等的数字化医院, 即数字孪生医院。

从全局着眼, 基于 ACP 理论知识, 利用操作系统的概念作为具体的实现, 构成了包含实际医院与虚拟医院的平行医院。从局部来看, 不同的系统与具体的实际系统构成了不同的子平行系统。下面就对医院及相关设备、参与人员的虚拟化技术以及不同的基于平行理论的平行子系统进行详细的说明。

## 2.2 智慧医院基础平台

智慧医院操作系统对医院的资源已经进行了统一化的管理, 对不同的设施以及资源的管理进行了平台化, 为未来的智能化医院构建提供了基本的保障。结合已有的物联网技术、大数据分析技术与人工智能技术, 医院操作系统可以提供人工智能平台、大数据平台以及物联网平台来满足从数据收集、存储到分析。基于数据实现最终智能化的医疗服务的全栈基础平台的支持。

**物联网平台。**除了医院自身的管理与信息化管理, 医院的主体服务对象为患者。为了采集医院自身的信息以及患者的相关信息, 需要引入大量的物联网设备。物联网平台可以实现对相关的物联网设备进行统一的管理与维护, 通过统一的数据接口对不同患者以及其他的数据进行采集与管理。近年来,

不同的物联网平台如雨后春笋一样, 为物理空间与信息空间交互与联系以及对物理空间的全面数字化提供了技术保障。

**大数据平台。**事物发展的规律与原理都蕴含在数据中, 对历史数据的存储与分析具有很大的现实指导意义。医院在日常的运营中会产生大量的历史数据: 运营数据与患者数据。通过对历史运营数据的分析可以优化医院的资源配置, 为患者与医疗工作者提供更好的服务。对患者大数据的分析, 对于单个患者来说, 可以优化患者的行为以达到对自身健康的提升; 对于整个人类的发展来说, 可以对人类的发展进行科学指导。大数据平台为医院的大数据存储与分析提供了一套科学整体的管理与分析方案。

**人工智能平台。**人工智能为医学发展以及医院的革新带来了新的契机。信息与知识是两个不同的概念, 信息指的是客观存在的事实, 而知识指的是对客观规律的归纳总结。大数据以及机器学习, 尤其是深度学习的发展, 为人类信息自动化提供了很大的便利。就医学领域来说, 基于机器学习的相关人工智能方法极大减轻了医生的工作量, 如医学图像分析处理技术。然而, 仅仅是信息获取自动化的智能化只能作为医疗系统的辅助存在, 距离真正的医疗智能化还有很大距离, 这也是目前医疗智能化

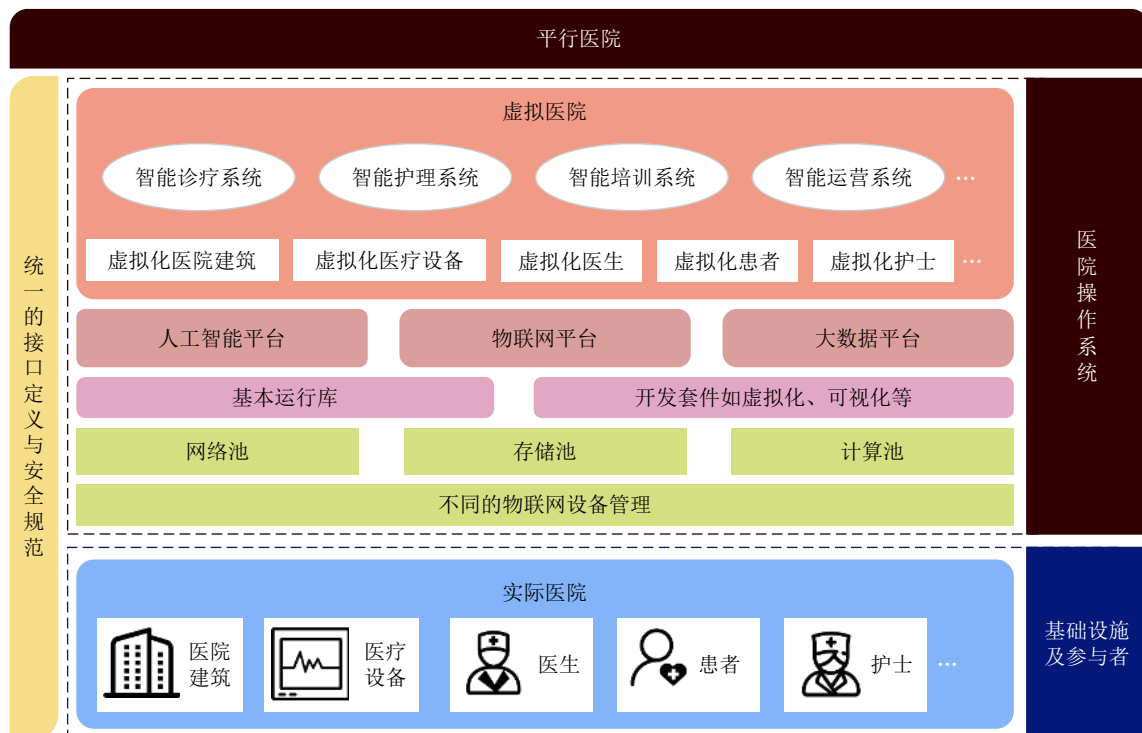


图 4 平行医院整体架构

Fig.4 Basic structure of parallel hospital



发展的困顿之一。为了实现人工智能的真正智能化,则需要从信息化自动化走向知识化自动化<sup>[35]</sup>。

知识图谱<sup>[36]</sup>是通过图的方式将实体之间进行关联,实现知识推理的目的,其示意图如图5所示。在医学领域,可以通过知识图谱来建模不同实体之间的关系来进行医学知识的推理,实现医疗方案推理以及医疗知识问答等。人工智能平台除了提供信息获取的模型训练与评估支持外,还需提供知识推理如知识图谱的知识抽取、知识表示、知识融合以及知识推理的技术支持。基于以上不同平台的支撑,下面就平行医院的基本构建作出具体的说明。

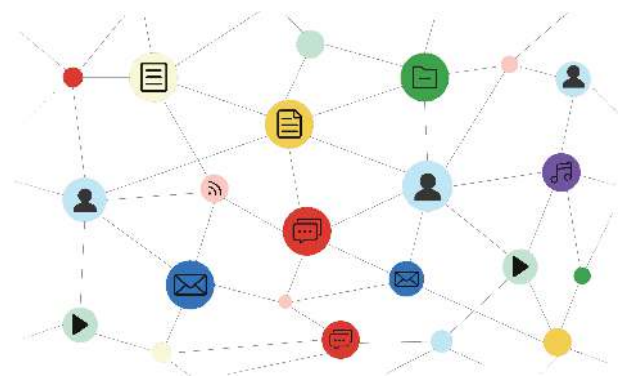


图5 知识图谱示意图

Fig.5 The diagram of knowledge graph

### 2.3 物理层数字虚拟化

为了实现对医院的智慧化管理与运营,对医院的一切进行数字化表示是必要的。基于 CPSS 的建模理论,智慧化的医院不仅仅包括医院的诸多硬件部分,还包括医疗过程的参与者如患者、医生、护士、管理人员等。

#### 2.3.1 医院设施虚拟数字化

医院的硬件设施包括基本的建筑,利用三维建模技术可以实现对实际的建筑进行数字化建设。除了医院的基本建筑,对不同的医疗设备进行数字化建模对以后的数字化管理是必要的。

目前,已有很多的开源的<sup>[37]</sup>或者是商业的游戏引擎与三维建模软件,如 Unity、3DS Max、Google 3D Warehouse 等,来实现数字化医院的建模,结合计算机视觉对实际场景的属性进行提取,实现快速高效对医院以及其中的医疗设备进行建模。在数字空间,一切的数字模型以实际医院的方式进行组织展示,实现对现实世界的全方位建模<sup>[38]</sup>。利用统一的智能化管理软件对数字化的医院进行建模,为医院资源的统一管理调度提供了统一的访问的接口。利用数字化定义的医院,用户可以通过虚拟现

实的方式与医院的相关设备进行交互,即虚拟现实(Virtual reality, VR)医院。

#### 2.3.2 医疗参与人员虚拟化定义

以人为本的医院管理理念使得医疗工作者更有归属感,患者有一种家的温馨感。平行医院理念是完全在虚拟空间将患者与医疗工作者进行数字化,每一位医疗活动的参与者都是一个独立的个体。

##### 1) 虚拟医生

虚拟医生是医院中各科医生与实体机器人医生在虚拟空间的映射。以人为本,根据现有医生的专业知识、临床经验、推理与思维方式、实际案例等大数据,通过 ACP 理论与方法和人工智能技术手段,对每个虚拟患者就相关的症状作出诊疗方案的数字医生<sup>[25]</sup>,即虚拟医生。实际医生的数字化过程中保留了不同医生的个性化特质,使其具有不同的知识水平与领域知识,为激发不同的个体的知识大融合与交流提供了潜在的条件。实体机器人医生本身是基于已有的实际医生而创造出来的有别于人类的实体医生,因而在具体的数字化过程中可以对其进行直接的映射。换句话说,实体机器人可以看作是虚拟机器人医生代理。

虚拟医生有三种形态,分别为描述医生、预测医生与引导医生<sup>[25]</sup>。1) 描述医生是对实际医生的医疗知识、临床经验、思维推理、性格特点等特征的虚拟抽象;2) 预测医生是针对每个虚拟患者做出诊断和治疗方案,对通过计算实验得到治疗效果进行实时观察与评估的过程;3) 引导医生是根据治疗效果,通过实验试错和搜索寻优后获得的一组最优状态的虚拟医生。虚拟医生是实体医生的抽象化。在实际诊疗过程中,不同病例需要不同的知识表示来应对不同的病例治疗,在实际的虚拟化过程中需要灵活针对不同的需要进行不同的虚拟化医生的虚拟化表示。平行高特<sup>[25]</sup>针对痛风治疗的特点,提出使用知识图谱对实际医生进行虚拟数字化。在实际的应用中,可以通过不同病症的不同特点,对医生的知识技能进行合理的模型化以实现医生的数字化。

##### 2) 虚拟患者

健康问题是一个复杂的问题,为了更好地对患者的状况作出评估,需要对患者进行全面的建模,即虚拟化患者的各项数据指标的建模而产生的。虚拟患者是通过仿真手段构建与实际患者保持一致的、一个或者多个历史出现过或未来可能产生的患者的模型。与虚拟医生类似,虚拟患者也有三种状态来应对患者的康复过程,使得患者的康复过程是最优的。描述患者是当前患者身体状态的具体描述,结合患者的发病原因、当前的身体生理状况、当前治

疗的状态等因素实现对患者的描述虚拟化. 预测患者指的是针对特定的描述患者, 根据其各项数据与参数, 结合虚拟医生给出的多种不同的实验诊疗方案, 将方案分别应用于同一描述患者, 进行计算实验, 从而得到不同当前的描述患者的将来可能出现的状态<sup>[25]</sup>. 预测患者给出了不同的诊疗方案对应的不同的结果, 为了更好帮助患者进行康复, 需要选择最优的治疗方案对患者进行诊疗. 引导患者指的是针对描述患者期望的治疗目标, 通过对计算实验结果进行评估得到的最优的治疗方案, 应用于描述患者, 通过平行执行的方式同时作用于实际患者, 引导实际患者走向最终的康复.

### 3) 虚拟护理人员

患者康复除了需要医生的诊疗, 护理人员对患者的合理护理也是重要因素之一. 虚拟护理人员与虚拟医生类似, 有三种不同的状态, 即描述护理人员、预测护理人员和引导护理人员. 描述护理人员指的是通过对护理人员的护理经验、以往的护理案例的描述, 以一定的知识表示的与当前的实际护理人员对应的虚拟护理人员. 预测护理人员指的是针对具体描述的患者护理任务, 描述护理人员通过对患者信息等进行分析, 通过计算实验搜索到最优的护理模式与随访模式. 引导护理人员根据具体的护理与随访方案, 对描述患者与实际患者同时作出护理动作, 通过计算实验结果达到对实际患者的护理起到引导作用.

### 4) 其他虚拟参与者

除了以上提到的主要的参与者如患者、医生及护理人员组成医院的基本功能模块外, 医院具体的运营还需要其他的管理人员与家属的参与. 管理人员针对当前医院运行的情况与历史数据, 通过平行学习<sup>[39]</sup>的方式对医院的后续运营作出合理的规划与安排. 依据管理人员角色的需要, 以及管理人员的管理能力、历史案例等因素定义不同形态的虚拟管理人员来实现对医院的正常运营与管理.

针对具有重大疾病的患者, 患者本身不适合被告知病情或者无能力被告知病情的时候, 为了系统的完整性, 需要家人作为患者的代理接受医生的问诊与护理人员的间接护理. 在这样的情况下, 根据需要对家属进行数字化, 对患者达到部分或者是全部代理的目的.

## 2.4 应用层智能系统

基于智能化医院操作系统平台, 基于 ACP 理论虚拟交互的智能化应用可以被开发出来, 方便系统参与人员的智能化交互. 这里以医院基本的智能

化系统进行说明来阐述 ACP 理论在构建医院不同智能化子系统所起到的指导性作用. 下面对医院医疗活动涉及到的相关智能化系统进行说明, 主要包括与医护有关的智能化诊疗系统、智能化护理系统, 员工培训的智能化培训系统以及与医院管理运行有关的智能化设备管理系统与智能化运营系统.

### 2.4.1 智能化诊疗系统

医生与具体的健康问题组成一套诊疗流程. 为了更好实现对具体疾病的诊疗, 利用已有的虚拟医生构成对应的虚拟诊疗流程, 与实际的诊疗流程构成平行的智能化诊疗系统. 随着人工智能与互联网+在医疗领域的深入, 越来越多的诊疗过程都有了智能化辅助诊断的影子. 在统一的资源调度与管理的基础逻辑层的支撑下, 结合 ACP 方法理论, 可以构建不同的平行智能诊疗系统.

如图 6 展示了在智能化系统中基于 ACP 理论的虚拟交互的医生对患者的诊疗过程:

1) 根据患者当前的状态, 预测医生根据患者的情况, 结合已有的医疗大数据知识库与描述医生已有的知识储备, 推荐出对应的诊疗方案.

2) 根据诊疗方案与描述患者, 利用预测患者对诊疗方案进行评估, 反馈于虚拟医生与实际医生.

3) 实际医生根据系统结合自己已有的知识对推荐治疗方案进行调整反馈给系统, 系统对对应的描述医生与描述患者作出相应的状态更新.

4) 通过虚实结合的方式确定最终的诊疗方案, 实现虚拟医生对实际医生的引导诊疗作用.

对实际的治疗过程进行实时跟踪是对患者进行健康医疗所必需的, 即 ACP 的平行执行步骤. 手术治疗是诊疗环节的重要组成部分, 但是不同的医生由于临床经验与对患者情况的认知不同, 给出的手术方案却千差万别<sup>[27]</sup>. 利用临床医学的循证医学的三要素临床经验、患者情况与以往案例, 系统可以推荐得到对应患者具体独特的手术方案. 可以使用智能化辅助来实时对手术过程进行跟踪与微调, 达到最佳的治疗效果. 图 7 给出了在平行医院的基础上的基于 ACP 平行手术治疗过程.

### 2.4.2 智能化护理系统

患者的康复治疗既离不开医生的专业治疗, 也离不开护理人员的专业护理. 利用 ACP 技术, 对患者与护理人员进行数字化建模, 结合实际护理与虚拟护理过程, 实现对患者最佳的护理途径. 图 8 展示了基于 ACP 方法的计算实验给出具体患者的护理方案.

与医生的诊疗过程类似, 对护理过程的跟踪是平行执行的具体体现, 这里不再赘述.



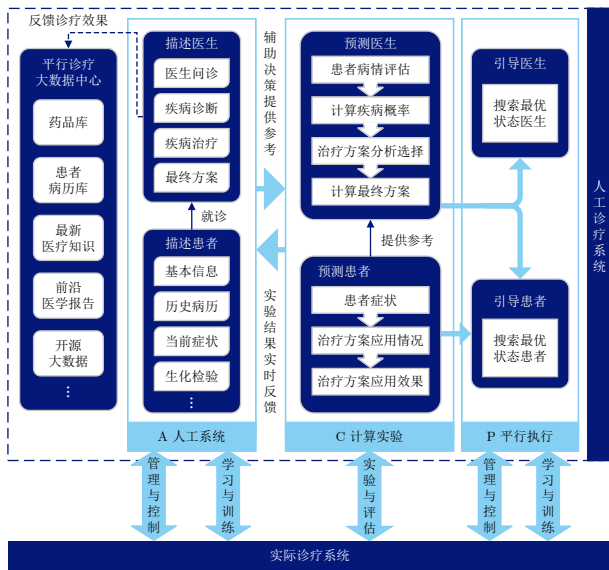


图 6 基于 ACP 的智能化诊疗流程

Fig.6 Intelligent diagnosis process based on ACP theory

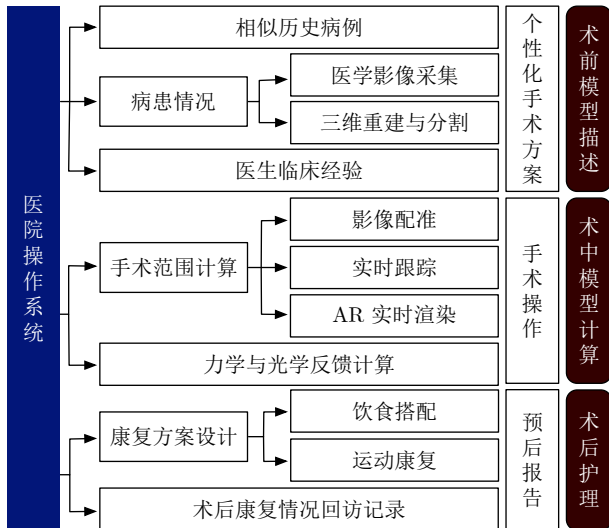


图 7 基于 ACP 的平行手术流程

Fig.7 Parallel operations based on ACP theory

### 2.4.3 智能化培训学习系统

医护人员是国民健康的主要保障, 相比其他行业, 专业的医护人员的培养周期更长. 虚拟医院是全体医疗人员经验与技术的集合, 不同的虚拟医生对应实际医生的不同实体, 是具体的知识图谱与案例经验的集合, 新入职的医生可以通过研读相关医生的案例与知识存储来快速实现对自己的知识库的建立与自己虚拟数字医生的构建, 缩短医护人员的培养周期, 快速进入相关的工作岗位.

利用虚拟现实技术, 培训人员可以直接与实际的案例与人体器官等进行交互、对相关的操作进行

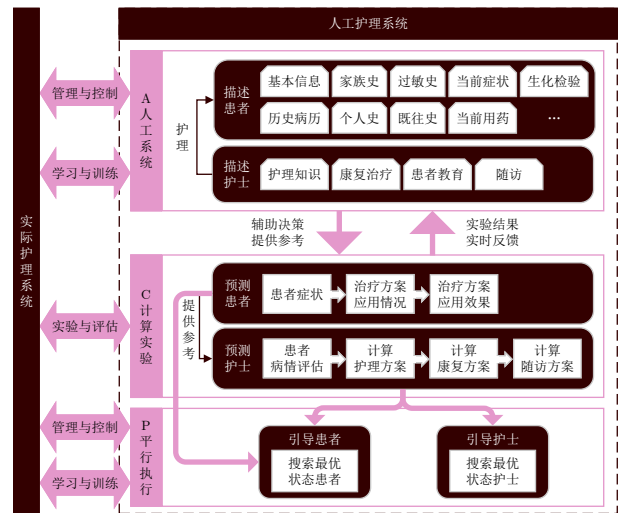


图 8 基于 ACP 的智能化护理系统

Fig.8 Intelligent nursing process based on ACP theory

虚拟化验证, 直观学习实际医疗过程的操作步骤与技巧, 极大提高职工对自己工作的直观认识, 实现未正式入职却通过人工医疗实验室积累大量可以直接应用于临床的医疗实践经验.

### 2.4.4 智能设备管理系统

平行医院的智慧操作系统对医院的相关角色纳入了管理范畴. 医院的智能化管理离不开对医院相关设施的管理. 平行医院的人工系统对医院进行了整体的描述, 通过虚拟现实的方式对医院整体进行了管理与可视化. 利用计算机视觉感知技术结合计算机三维建模技术可以实现对医院场景进行人工建模, 同时利用计算机视觉技术将实际场景的变化动态更新到系统中, 实现对实际场景的动态感知与智能化管理. 同时, 可以结合计算实验对相关决策进行在线评估, 为决策提供依据. 如对不同病区的待诊人员进行分析, 实现对医院实时动态的人员流动作出统计并动态分配医护工作者的工作岗位分布, 实现快速高效服务于患者.

同时, 实现在线长期化对医院硬件建筑的追踪规划, 在线化维护医院建筑与相关的医疗设备. 利用相关的技术对医院的硬件设施进行数字化建模, 方便设备的维修与管理, 为其他系统如员工培训、设备维护系统提供统一的调度信息. 根据不同设备运行的实时数据可以展示当前不同科室的位置、手术间状态以及对应的设备的运行状态等. 总之, 利用数字建模技术, 在虚拟空间实现对医院的相关硬件的维护、追踪、维护与调度.

### 2.5 智能化运营系统

平行医院对一切设备以及参与人员进行了虚拟

数字化表示,为医院的运营带来了便利.虚拟化的医院可以动态立体展示当前医院运行的不同的数据,对历史数据的挖掘来实现对医院历史地分析,对各个科室的医疗历史数据进行分析实现精确配置医院的相关资源.基于设备及人员活动的历史数据,结合医院的发展目标,可以方便调度人员与设备的实际配置,达到资源的最优化、服务最优化与利益的最大化.根据对设备的历史维护数据的挖掘实现对不同设备制定相应的预防性保养措施,提高医院硬件整体的运行效率,使得后勤部门最终能够高效快速服务于患者与一线的医护人员.

### 3 案例分析:天坛医院

首都医科大学附属北京天坛医院为了实现对医院的精细化管理与运营,对平行医院的理念进行了实践,构建了基于 CPSS 的天坛医院智慧管理中心“天坛大脑”.天坛医院智慧运营管理平台将临床、医技、医辅、财务、人事、资产、物资等多系统数据进行整合,实现了业务数据和经济数据等不同医院数据的高度融合与统一化管理,实现了从业务关联、价值管理到智能运营、智慧决策等一系列智慧管理<sup>[40]</sup>.图 9 为在京举行的天坛大脑启动仪式暨公立医院精细化管理交流活动.天坛大脑从数据的采集、数据集成到功能集成、统一化管理,初步形成了智能化与数字可视化的运营管理平台.

依托“天坛家”职工服务平台,在智能化设备管理维护方面,对相关设备的管理、查看与维护达到了实时化、智能化,维修状态实时追踪闭环的管理模式.通过对设备相关历史数据的分析挖掘,实现对设备设施的预防式维护保养.自“天坛家”于 2019 年 9 月 26 日上线至 2020 年 8 月 26 日,智能化设备管理系统工单总量达 26948 单,较上年同期下降 11.1%,总挂单量较上年同期下降 17.3%<sup>[40]</sup>.在新系统的促使下,平均完工较上年同期提升 50%,极大提升了后勤客户服务的满意度,相较上年同期提升 5.5%<sup>[40]</sup>.

住院智能化管理方面,2019 年 12 月与上年同期相比,医院的月均每诊位诊次较同期提高了 28.68%,住院手术量较同期提高 38.25%,床位使用率同期提高 10.91%.在业务量逐渐增加的情况,患者平均住院日相比上年同期下降了 1.3 天,百元医疗收入消耗卫生材料指标下降 0.91%.

在智能化系统的支撑下,医院的核磁共振、CT (Computed tomography)、超声与数字减影血管造影的检查人次均呈现增长的趋势,相较于上年同期



图 9 天坛大脑启动仪式暨公立医院精细化管理交流活动<sup>[40]</sup>

Fig.9 Tiantan brain launch ceremony and public hospital refined management exchanges<sup>[40]</sup>

分别提高了 33.02%、26.52%、53.13% 及 44.21%<sup>[40]</sup>.图 10 展示了天坛大脑的管理控制中心.天坛医院以信息智能化建设为工具,全面落实了国务院关于现代化医院管理制度和三级公立医院绩效考核的相关要求.

### 4 展望

医疗健康是国民经济发展与国民幸福指数的主要保障.基于平行智能理论<sup>[41]</sup>而提出的平行医学的医学发展理念为智能化技术在医疗健康领域落地并发挥作用提供了一个统一有效的应用架构,必将推动智能医学的深度发展.本文作为平行医学理念的实践,针对目前医疗实践中看病难、看病贵等社会性问题以及由于缺乏人文关怀的医患关系紧张等医学人文性复杂问题,结合医学自身发展的科学性复杂问题,提出新一代智慧化的医院智慧操作系统—平行医院.

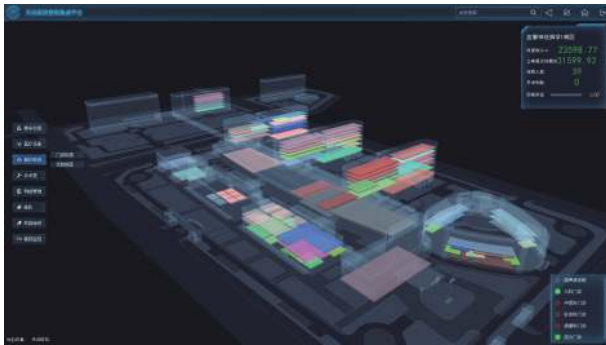
作为平行医学的具体实践方案,平行医院的提出,必将会对已有的医疗体系与健康体系造成变革性冲击,带来未来医院智能化发展甚至是医疗实施与发展方式的变革.

首先,平行医院的提出为医院的运营与发展带来巨大变革.平行医院的提出对医院进行了全面化的建模,不同部门的人员及医疗设备的运行情况实时进行管理与优化,实现对医院资源的动态合理调度或者是预分配,提高资源的利用最大化与服务优质化.同时,平行医院对实体医院的数字化是医疗资源共享的第一步,接下来为远程医疗、智慧医疗的全面发展提供了最基本的保障,为医院的发展带来巨大变革.

其次,平行医院的提出为临床医学的发展起到积极的作用.平行医院提出以操作系统的概念来组织统一医院的不同资源,构建了不同的详细的医疗



(a) 天坛大脑—管理控制中心  
(a) Management and control center of Tiantan Brain



(b) 天坛大脑—智能集成平台  
(b) Intelligent integration platform of Tiantan Brain

图 10 天坛大脑

Fig.10 Tiantan Brain

记录体系, 必然可以实现大量的临床医疗数据的积累. 海量的医疗数据是循证医学发展的基础. 量变必将引起质变, 医疗大数据必将带来医疗领域的巨大创新, 极大促进医疗专业的发展, 为人类的健康带来新的机遇.

最后, 平行医院的提出带来了医学人才培养的巨大的变革. 同理, 医疗数据基础平台的发展必然带来医疗案例的爆发式增长, 新入职的员工可以通过案例智能化分析快速掌握本专业相关的临床经验, 构建自己的知识体系, 即描述医生. 同时, 平行医院诊疗等系统将虚拟现实技术作为基本的技术应用, 应用于医疗过程的方方面面, 利用虚拟现实技术可以快速使得新入职的医生快速、立体、直观对不同的人体器官及对应的具体的医疗操作进行观摩或在人工实验室进行模拟操作, 快速掌握相关的医学操作.

与此同时, 本文提出的平行医院还可以进一步结合新兴的区块链和智能合约技术, 在医疗领域实现从联邦数据到联邦智能的联邦生态<sup>[42]</sup>, 即在分布式的联邦平行医院节点间, 构建以基于区块链的联邦安全、联邦共识、联邦激励、联邦合约为支撑技术, 以联邦数据、联邦控制、联邦管理、联邦服务为核心

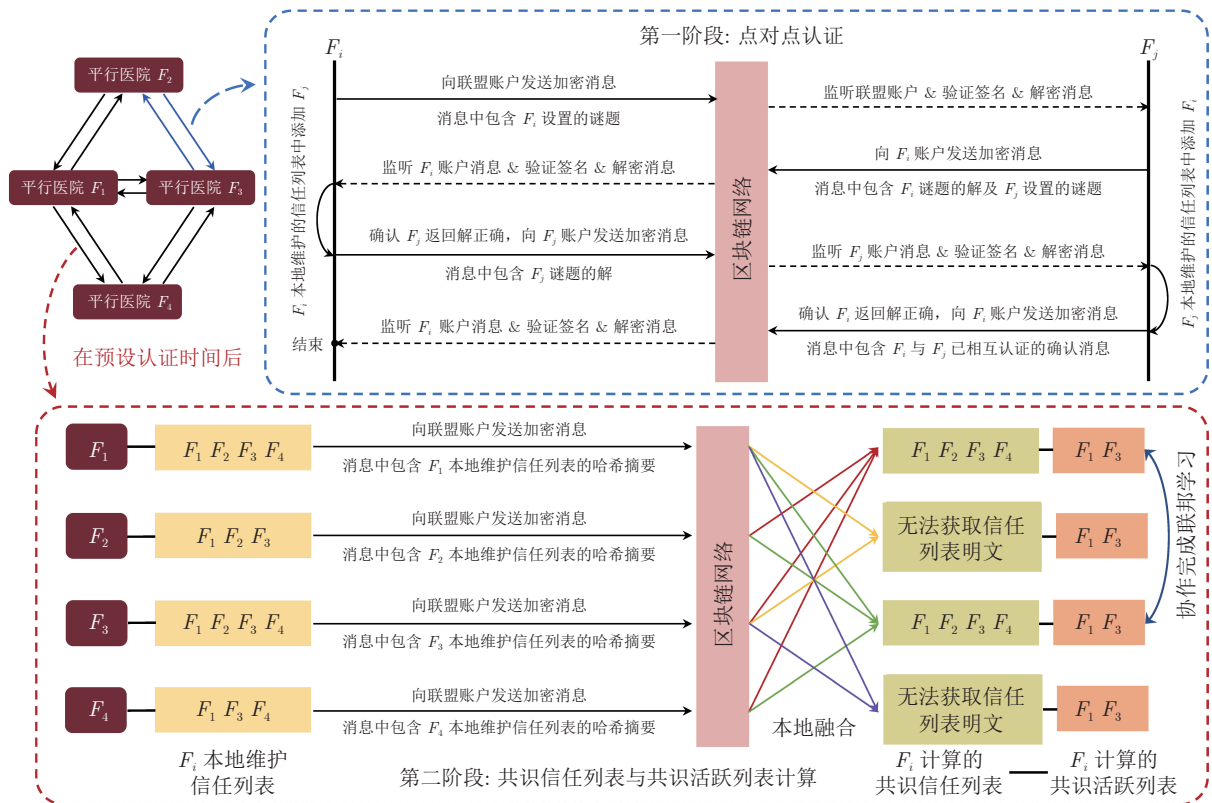
的面向隐私保护和数据安全、资源协同管理的统一整体. 以平行医院中的智能化诊疗系统为例, 单个医疗机构可掌握的本地隐私医疗数据库规模有限且不支持共享, 仅使用本地病例样本训练得到的智能辅助诊疗模型的效果难以满足临床应用需求, 则利用联邦生态系统可在多家医疗机构间协作构建表现更好的联邦诊疗模型, 当接收到新患者时, 可基于该联邦诊疗模型融合多家医疗机构的多种诊疗结果, 从而提高智能化诊疗系统的整体性能.

具体地, 在文献 [43] 中我们提出了一种称为人工认证 (Artificial identification) 的基于区块链的隐私联邦学习框架, 如图 11 所示为该框架结合本文平行医院后的运行机制. 人工认证框架整体运行在一条区块链上, 由隐私点对点认证和隐私联邦学习两个模块组成, 两个模块的主要功能分别由认证智能合约和协同训练智能合约实现. 分布式平行医院节点首先在链下组成医疗联盟并在联盟内协商和共享预设联盟信息; 之后, 借助隐私点对点认证模块在链上进行相互识别和认证, 实现链下医疗联盟到链上医疗联盟的转换; 最后, 借助隐私联邦学习模块在链上联盟内协同训练联邦诊疗模型, 并在协作结束后实施公平的奖惩. 实验证明, 人工认证框架以可接受的协作成本成功提高了联邦学习的隐私性、安全性和去中心化程度, 并具有高度的可扩展性. 而进一步地, 基于射频识别技术 (Radio frequency identification, RFID), 人工识别框架中预设的共享联盟信息可被存储在电子标签或射频卡中. 通过在可信医疗物联网设备上粘贴电子标签或向医疗参与人员发放射频卡, 同时在可信执行环境 (Trusted execution environment, TEE) 中预置标准的经审核的智能合约交互程序, 人工识别框架可实现大规模平行医院集群的自动链上识别和自主联邦学习, 从而为未来医疗领域联邦生态的构建奠定基础.

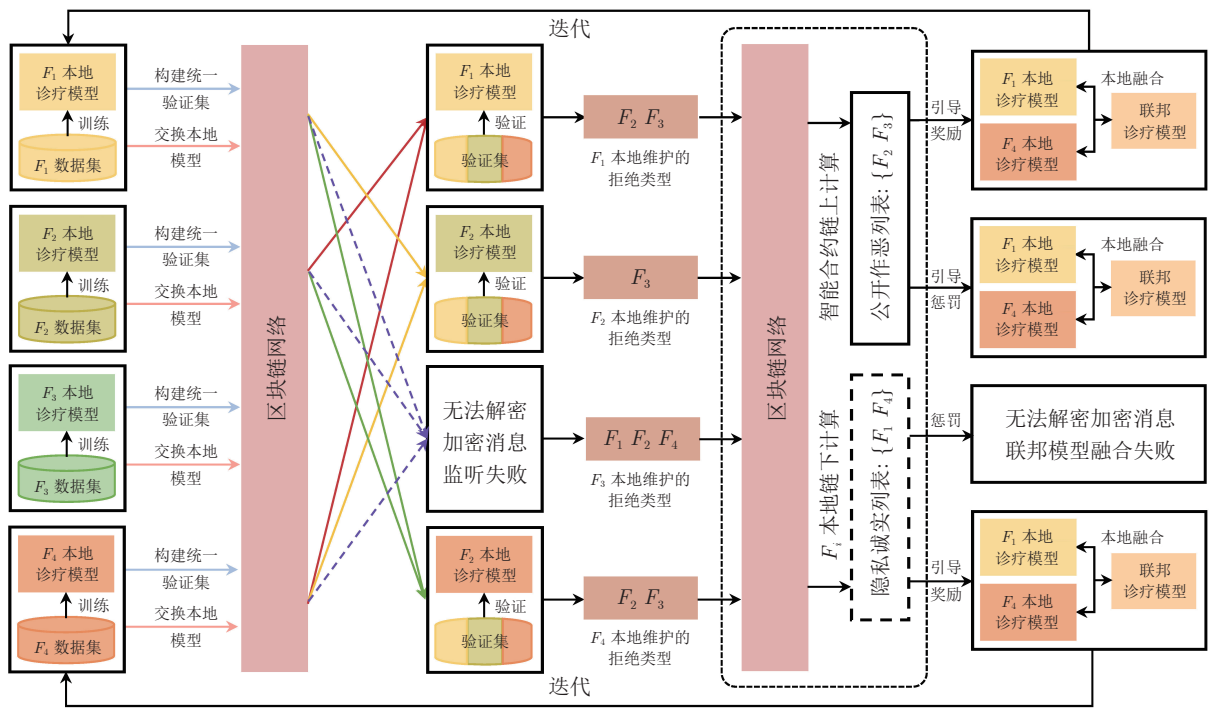
## 致谢

本文作者特别感谢博士生张文文、郑文博、严岚、王建功、欧阳丽炜为本文整理资料和录入手稿, 工程师毕临风为本文提供案例分析资料. 同时, 感谢国家自然科学基金委、首都医科大学附属北京天坛医院、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、中国科学院大学人工智能学院、中国澳门科技大学系统工程研究所等机构与组织对本文研究的支持.





(a) 隐私点对点认证  
(a) Private P2P identification



(b) 隐私联邦学习  
(b) Private federated learning

图 11 人工认证: 一种基于区块链的隐私联邦学习框架<sup>[43]</sup>

Fig. 11 Artificial identification: A novel privacy framework for federated learning based on blockchain<sup>[43]</sup>

## References

- 1 新华社. 中共中央国务院印发《“健康中国2030”规划纲要》[Online], available: [http://www.gov.cn/xinwen/2016-10/25/content\\_5124174.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-10/25/content_5124174.htm), July 1, 2021
- 2 Wang Yi-Fang. Some thoughts on developing narrative medicine. *Medicine & Philosophy*, 2020, **41**(10): 1-3 (王一方. 关于发展中的叙事医学的若干思考. *医学与哲学*, 2020, **41**(10): 1-3)
- 3 韩启德. 医学的温度. 北京: 商务印书馆, 2020.
- 4 Chen Y Y, Lv Y, Li Z, Wang F Y. Long short-term memory model for traffic congestion prediction with online open data. In: Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2016. 132-137
- 5 Tian Xue-Qing, You Mao. Issues and policy suggestions on the development of artificial intelligence in medical institutions in China. *Soft Science of Health*, 2019, **33**(10): 42-44 (田雪晴, 游茂. 我国医学人工智能在医疗机构发展面临的问题及政策建议. *卫生软科学*, 2019, **33**(10): 42-44)
- 6 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: A discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(4): 25-35 (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. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, **1**(4): 25-35)
- 7 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
- 8 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: From CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85-88
- 9 Wang Fei-Yue. Parallel medicine: From warmness of medicare to medicine of smartness. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, **3**(1): 1-9 (王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学. *智能科学与技术学报*, 2021, **3**(1): 1-9)
- 10 Wang Fei-Yue. Digital doctors and parallel medicare: From medical knowledge automation to systems intelligence medicine. *Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital*, 2021, **12**(6) (王飞跃. 数字医生与平行医疗: 从医疗知识自动化到系统化智能医学. *协和医学杂志*, 2021, **12**(6))
- 11 Schepplitz T, Kaczmarek S, Benedict M. The critical role of hospital information systems in digital health innovation projects. In: Proceedings of the 21st Conference on Business Informatics (CBI). Moscow, Russia: IEEE, 2019. 512-521
- 12 李包罗, 许燕. 医院信息系统简介. *中国护理管理*, 2009, **9**(1): 77-79
- 13 亿欧智库. 2020年中国智慧医院现状及趋势研究 [Online], available: [http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN\\_RES/INDUS/2020/10/13/3845fdb6-563e-4183-b01a-e9635571d574.pdf](http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2020/10/13/3845fdb6-563e-4183-b01a-e9635571d574.pdf), July 1, 2021
- 14 Khalifa M. Perceived benefits of implementing and using hospital information systems and electronic medical records. *Studies in Health Technology and Informatics*, 2017, **238**: 165-168
- 15 Silberschatz A, Peterson J L, Galvin P B. *Operating System Concepts* (Third edition). Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1991.
- 16 Wang F-Y. ABCS: Agent-Based Control Systems, in SIE Working Paper. Tucson, AZ: Univ. Arizona, 1998.
- 17 Wang F-Y. aDCS: Agent-Based Distributed Control Systems, Univ. Arizona, Tucson, AZ, PARCS Tech. Rep., 1999.
- 18 Wu J. Research on the framework of smart city operating system based on new ICTs. *American Journal of Artificial Intelligence*, 2020, **4**(1): 36-41
- 19 Nishi H. Information and communication platform for providing smart community services: System implementation and use case in Saitama city. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Lyon, France: IEEE, 2018. 1375-1380
- 20 Xiong Gang, Wang Fei-Yue, Zou Yu-Min, Cheng Chang-Jian, Li Le-Fei, Liao Chang-Yong, et al. Parallel evaluation method to improve long period ethylene production management. *Control Engineering of China*, 2010, **17**(3): 401-406 (熊刚, 王飞跃, 邹余敏, 程长建, 李乐飞, 廖昌勇, 等. 提升乙烯长周期生产管理的平行评估方法. *控制工程*, 2010, **17**(3): 401-406)
- 21 Yang Chao, Gao Yu, Ai Yun-Feng, Tian Bin, Chen Long, Wang Jian, et al. End-to-end parallel autonomous mining systems and key technologies. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(3): 228-240 (杨超, 高玉, 艾云峰, 田滨, 陈龙, 王健, 等. 端对端平行无人矿山系统及其关键技术. *智能科学与技术学报*, 2019, **1**(3): 228-240)
- 22 Kang Meng-Zhen, Wang Xiu-Juan, Hua Jing, Wang Hao-Yu, Wang Fei-Yue. Parallel agriculture: Intelligent technology toward smart agriculture. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(2): 107-117 (康孟珍, 王秀娟, 华净, 王浩宇, 王飞跃. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术. *智能科学与技术学报*, 2019, **1**(2): 107-117)
- 23 Qin Rui, Zeng Shuai, Li Juan-Juan, Yuan Yong. Parallel enterprises resource planning based on deep reinforcement learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1588-1596 (秦蕊, 曾帅, 李娟娟, 袁勇. 基于深度强化学习的平行企业资源计划. *自动化学报*, 2017, **43**(9): 1588-1596)
- 24 Wang Fei-Yue, Zhang Mei, Meng Xiang-Bing, Wang Yan, Ma Jiao-Nan, Liu Wu, et al. Parallel eyes: An ACP-based smart ophthalmic diagnosis and treatment. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, **31**(6): 495-504 (王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 王雁, 马娇楠, 刘武, 等. 平行眼: 基于ACP的智能眼科诊疗. *模式识别与人工智能*, 2018, **31**(6): 495-504)
- 25 Wang Fei-Yue, Li Chang-Gui, Guo Yuan-Yuan, Wang Jing, Wang Xiao, Qiu Tian-Yu, et al. Parallel gout: An ACP-based system framework for gout diagnosis and treatment. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, **30**(12): 1057-1068 (王飞跃, 李长贵, 国元元, 王静, 王晓, 邱天雨, 等. 平行高特: 基于ACP的平行痛风诊疗系统框架. *模式识别与人工智能*, 2017, **30**(12): 1057-1068)
- 26 Zhang Mei, Chen Ling, Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Guo Yuan-Yuan, Yang Tian. Parallel gastrointestinal: An ACP-based approach for intelligent operations. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, **32**(12): 1061-1071 (张梅, 陈玲, 王飞跃, 王晓, 国元元, 杨田. 平行胃肠: 基于ACP的智能胃肠疾病诊疗. *模式识别与人工智能*, 2019, **32**(12): 1061-1071)
- 27 Wang Fei-Yue, Zhang Mei, Meng Xiang-Bing, Wang Rong, Wang Xiao, Zhang Zhi-Cheng, et al. Parallel surgery: An ACP-based approach for intelligent operations. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, **30**(11): 961-970 (王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 王蓉, 王晓, 张志成, 等. 平行手术: 基于ACP的智能手术计算方法. *模式识别与人工智能*, 2017, **30**(11): 961-970)
- 28 Wang Fei-Yue, Gou Chao, Wang Jian-Gong, Shen Tian-Yu, Zheng Wen-Bo, Yu Hui. Parallel skin: A vision-based dermatological analysis framework. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, **32**(7): 577-588 (王飞跃, 苟超, 王建功, 沈甜雨, 郑文博, 于慧. 平行皮肤: 基于视觉的皮肤病分析框架. *模式识别与人工智能*, 2019, **32**(7): 577-588)
- 29 Wang Fei-Yue, Jin Zheng-Yu, Gou Chao, Shen Tian-Yu, Zheng Wen-Bo, Wang Jian-Gong, et al. ACP-based parallel medical imaging for intelligent analytics and applications. *Chinese Journal of Radiology*, 2021, **55**(3): 309-315 (王飞跃, 金征宇, 苟超, 沈甜雨, 郑文博, 王建功, 等. 基于ACP方法的平行医学图像智能分析及其应用. *中华放射学杂志*, 2021,

55(3): 309–315)

- 30 Yang Lin-Yao, Chen Si-Yuan, Wang Xiao, Zhang Jun, Wang Cheng-Hong. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(11): 2001–2031  
(杨林瑶, 陈思远, 王晓, 张俊, 王成红. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, **45**(11): 2001–2031)
- 31 Liu Xin, Wang Xiao, Zhang Wei-Shan, Wang Jian-Ji, Wang Fei-Yue. Parallel data: From big data to data intelligence. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, **30**(8): 673–681  
(刘昕, 王晓, 张卫山, 汪建基, 王飞跃. 平行数据: 从大数据到数据智能. 模式识别与人工智能, 2017, **30**(8): 673–681)
- 32 Li Li, Lin Yi-Lun, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel learning—A new framework for machine learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 1–8  
(李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习——机器学习的一个新型理论框架. 自动化学报, 2017, **43**(1): 1–8)
- 33 Lun Shu-Xian. Research on the classification of parallel execution modes of ACP theory. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(10): 1602–1608  
(伦淑娴. ACP理论的平行执行方式分类研究. 自动化学报, 2012, **38**(10): 1602–1608)
- 34 Ge Cheng-Long, Zhu Yuan-Chang, Di Yan-Qiang, Hu Zhi-Wei, Meng Xian-Guo. Theoretical framework for equipment parallel simulation. *Journal of Command and Control*, 2017, **3**(1): 48–56  
(葛承垄, 朱元昌, 邸彦强, 胡志伟, 孟宪国. 装备平行仿真理论框架研究. 指挥与控制学报, 2017, **3**(1): 48–56)
- 35 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: A parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1–8  
(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. 自动化学报, 2015, **41**(1): 1–8)
- 36 Xu Zeng-Lin, Sheng Yong-Pan, He Li-Rong, Wang Ya-Fang. Review on knowledge graph techniques. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, **45**(4): 589–606  
(徐增林, 盛泳潘, 贺丽荣, 王雅芳. 知识图谱技术综述. 电子科技大学学报, 2016, **45**(4): 589–606)
- 37 Zheng X, Zeng D, Li H, Wang F. Analyzing open-source software systems as complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **387**(24): 6190–6200
- 38 Wang K, Gou C, Zheng N, Rehg J M, Wang F Y. Parallel vision for perception and understanding of complex scenes: Methods, framework, and perspectives. *Artificial Intelligence Review*, **48**(3): 299–329
- 39 Li L, Lin Y L, Zheng N N, Wang F Y. Parallel learning: A perspective and a framework. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, **4**(3): 389–395
- 40 北京天坛医院. 北京天坛医院智慧管理中心“天坛大脑”在京启动 [Online], available: [http://www.bj.xinhuanet.com/bjxxjd/wqxx1/2020-08/23/c\\_1126402643.htm](http://www.bj.xinhuanet.com/bjxxjd/wqxx1/2020-08/23/c_1126402643.htm), July 1, 2021
- 41 Wang F Y, Wang X, Li L X, Li L. Steps toward parallel intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(4): 345–348
- 42 Wang Fei-Yue, Wang Yan-Fen, Chen Yi-Zhu, Tian Yong-Lin, Qi Hong-Wei, Wang Xiao, et al. Federated ecology: From federated data to federated intelligence. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, **2**(4): 305–313  
(王飞跃, 王艳芬, 陈慧竹, 田永林, 齐红威, 王晓, 等. 联邦生态: 从联邦数据到联邦智能. 智能科学与技术学报, 2020, **2**(4): 305–313)
- 43 Ouyang L W, Wang X, Tian Y L, Zheng W B, Jia X F, Qi H W, et al. Artificial Identification: A novel privacy framework for federated learning based on blockchain. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, Accept with minor revision.



**王拥军** 主任医师, 教授. 现任北京天坛医院院长、神经病学中心主任, 国家神经系统疾病临床医学研究中心副主任, 国家卫健委神经内科质量控制中心主任, 中国卒中学会常务副会长. 主要研究方向为脑血管病规范化诊疗技术创新, 国家脑血管病防控体系建设.

E-mail: yongjunwang@ncrcnd.org.cn

(**WANG Yong-Jun** Chief physician, professor. Director of Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, the Chairman of Neurology Center and the Vice Chairman of China National Clinical Research Center for Neurological Diseases. He is Director of Quality Control Center of Neurology Department, National Health and Family Planning Commission, Executive Vice President of Chinese Stroke Association. His research interest covers standardized diagnosis and treatment technology of cerebrovascular diseases, and construction of cerebrovascular disease prevention and control system.)



**王飞跃** 中国科学院自动化研究所研究员, 复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化. 本文通信作者.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, director of the State Key Laboratory for Management and Control of Systems, director of China Economic and Social Security Research Center at University of Chinese Academy of Sciences. His research interest covers theories, methods, and applications for robotics, parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation Corresponding author of this paper.)

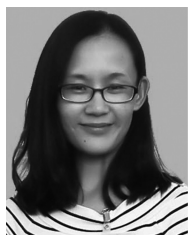


**王戈** 中国澳门科技大学系统工程研究所博士研究生. 主要研究方向为联邦治理, 分布式自治组织, 平行智能系统.

E-mail: wangg@cash capital.cn

(**WANG Ge** Ph. D. candidate at the Institute of Systems Engineering, Macau University of Science and Technology, China. His research interest covers federated governance, smart contracts, distributed autonomous organization (DAO), parallel intelligence.)





**王 晓** 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副研究员, 青岛智能产业技术研究院院长. 2016 年获得中国科学院大学社会计算博士学位. 主要研究方向为社会交通, 动态网群组织, 平行智能和社交网络分析. E-mail: x.wang@ia.ac.cn

**(WANG Xiao** Associate professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, president of Qingdao Academy of Intelligent Industries. She received her Ph. D. degree in social computing from University of Chinese Academy of Sciences in 2016. Her research interest covers social transportation, cyber movement organizations, parallel intelligence, and social network analysis.)



**王伊龙** 主任医师, 教授. 主要研究方向为脑小血管病临床研究.

E-mail: yilongwang528@163.com

**(WANG Yi-Long** Chief physician, professor. His research interest covers clinical study of cerebrovascular disease.)



**李 瑞** 副研究员. 主要研究方向为医院信息化建设.

E-mail: 375743499@qq.com

**(LI Rui** Associate researcher. His research interest covers hospital information construction.)