• 专论:智慧医疗 •

编者按: 智慧医疗是在互联网、物联网等现代科技高度发展背景下,在医疗行业融入更多人工智慧、传感技术等高科技元素,逐步提升医疗健康领域智能化水平,全面提高医疗管理效率和服务质量的整个管理运作系统和医疗活动过程。智慧医疗作为一种新兴医疗模式,能够缓解医疗资源紧缺压力、合理化医疗资源分配,为公众提供更优质的医疗服务。在《关于促进"互联网 + 医疗健康"发展的意见》等一系列国家政策支持下,我国智慧医疗行业发展迅速。研究者对智慧医疗的关注度也日益提升,研究热点包括互联网助力诊疗流程优化、云计算与大数据辅助信息化平台建设、人工智能实现临床技术更新、各地区智慧模式探索、物联网与无线网基础上的社区健康服务等,信息淹没、数据安全隐私等问题也亟需在其发展过程中给予关注和妥善解决。本期专论着眼于智慧医疗,所载论文详细阐述了区块链、云计算、移动应用、可穿戴等技术在智慧医疗领域的应用以及智慧急救信息平台的设计与建设实践,为积极推进健康中国战略实施和智慧医疗发展提供借鉴和参考。

面向智慧医疗的区块链关键技术研究与应用*

尹 浩 李心怡

(清华大学北京信息科学与技术国家研究中心 北京 100084)

〔摘要〕 **目的/意义** 总结智慧医疗的发展趋势,提出利用区块链技术构建高可用信任体系的新型基础设施,以克服智慧医疗建设中存在的技术困难,促进智慧医疗领域发展。**方法/过程** 对智慧医疗服务发展过程中面临的智慧数字化、数据服务化及协作高效化 3 大问题进行深入分析。综述国内外在医疗数字化过程中应用区块链技术的相关工作。从隐私安全保护、数据可信流通、构建去垄断化应用和高效的组织协作机制 4 方面,分析区块链技术对智慧医疗服务建设的核心作用。**结果/结论** 区块链技术可促进数据安全共享和互操作性,改善医疗服务效率和透明度。未来深度融合智慧医疗与区块链技术将推动更多创新的数字化技术和应用。

〔关键词〕 智慧医疗;区块链;新型信息基础设施;数据要素流通

〔中图分类号〕R-058 〔文献标识码〕A 〔DOI〕10.3969/j.issn.1673-6036.2023.06.001

Study and Application of Key Blockchain Technologies for Smart Healthcare

YIN Hao, LI Xinyi

Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

---

〔修回日期〕 2023-06-16

〔作者简介〕 尹浩,教育部长江学者,国家万人计划领军人才,博士生导师,发表论文 200 余篇,发明专利 40 余项。

〔基金项目〕 国家重点研发计划(项目编号:2022YFB2702800);国家自然科学基金项目(项目编号:20191300999)。

〔**Abstract**〕　**Purpose/Significance**　To summarize the current development trend of smart healthcare, and to propose the utilization of blockchain technology to establish a new type of infrastructure for a highly available trust system, so as to overcome technical difficulties in the construction of smart healthcare and promote the development of smart healthcare. **Method/Process**　The paper conducts an in-depth analysis on the three major issues faced in the development of smart medical services, namely intelligent digitization, data service-oriented, and collaborative efficiency. It summarizes the relevant work on the application of blockchain technology in medical digitization at home and abroad, analyzes the core role of blockchain technology in the construction of smart medical services from four aspects: privacy security protection, trusted data circulation, construction of de-monopolization applications, and efficient organizational collaboration mechanisms. **Result/Conclusion**　Blockchain technology can promote data sharing security and interoperability, improve the efficiency and transparency of medical services. In the future, the deep integration of smart healthcare and blockchain technology will promote more innovative digital technologies and applications.

〔**Keywords**〕　smart healthcare; blockchain; new information infrastructure; data element circulation

1　引言

从技术演进角度看，医疗信息化发展历程可以划分为信息化、可视化、网络化与智慧化 4 个阶段，见图 1，每阶段医疗服务模式都受当时信息化技术的影响。近年来，人工智能（artificial intelligence，AI）、大数据与区块链等新一代信息技术不断发展与应用，推动医疗服务模式从传统的以医院治病为中心转变为以患者服务为中心。未来有望借助数字疗法和医疗器械对患者进行全病程管理，构建数字化患者，通过 AI 与医生在线诊疗相结合构建数字化医生，推动实现数字空间在线问诊等医疗服务，改善患者就医体验并提升疾病治疗效果。

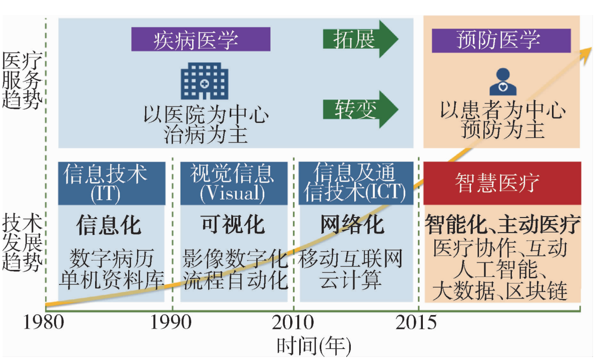

图 1　智慧医疗发展趋势

在医疗服务的智慧化与数字化过程中面临着业务数字化程度低、院内数据价值挖掘难和医疗相关机构间信息共享协作难等具体问题。为克服这些挑战，需要利用新一代信息技术构建新型信息基础设施，将高端医疗能力以信息技术为载体有效赋能给基层单位，促进医疗服务快速发展。对此，笔者认为区块链技术作为被广泛认可的“信任机器”，具有可追溯、不可篡改特性，是构建上述信息基础设施的核心技术。区块链技术能够帮助开展智慧医疗场景下数据要素流通全价值链的治理、赋权与监管，为数字化应用提供追溯和审计能力；明确不同参与方的贡献、权益分配与归属，保证数据要素化与流通应用形成规模化数字经济生态；建立高可用的信任体系实现数据以及数字化产品的高效利用与共享，降低协作中的不确定性[1]。

2　国内外相关研究

2.1　智慧医疗发展技术难题

2.1.1　智慧数字化　智慧数字化服务主要依托于 AI 模型展开，需要高质量训练数据、充足的算力资源与多机构部门合作协同建设。医疗数据具有数据量大、异构化、多源化、隐私要求高等特征，因此存在治理成本较高、算力资源依赖性强、医疗机构间协作复杂等困难，影响 AI 模型的训练和推广[2-3]。在医疗文本理解与应用领域，语种差异也使基于英语文本数据训练的 AI 模型难以直接应用于中文电子病历，需要额外的中文语言处理工作和知识工程建设[4]。此外，AI 目前很难实现高可信的人机融合，医疗服务的低容错性和模型输出结果的可解释性差之间的矛盾也限制其深入应用[5]。

2.2.2　数据服务化　目前，提供数字化医疗服务

的主流机构通常要求患者将数据提交至云平台以获得服务。然而，这种服务模式容易导致数据失控、服务商数据垄断、隐私泄露或难以保障服务质量等问题。从技术角度看，这是受到现有主流冯·诺依曼计算机体系结构的影响，即数据与应用紧耦合的计算模式。近年来学术界与工业界尝试通过构建数据与应用松耦合的新计算模式以解决这个问题，万维网之父蒂姆·伯纳斯－李（Tim Berners－Lee）提出一种名为 SoLiD 的新型计算架构，希望通过完全由用户持有并管理的个人数据存储空间防止数据被垄断和滥用[6]。美国麻省理工学院媒体实验室则试图利用区块链技术解决数据流通面临的诸多难题[7]，相关技术公司先后提出联邦学习框架支持构建"应用跟着数据走"计算范式，创建 DokChain 支撑医疗数据共享[8]。

2.2.3 协作高效化 目前医疗、医药和医保部门之间的协作效率偏低也是影响公众就医体验的一个难题。社会选择理论[9]和信息经济学[10]指出激励和信息对称是影响协作效率的重要因素。尽管医疗信息化能提供部分能力支撑，但仍然面临数据与身份可信性、信息不对称、协作过程中工作流程缺乏灵活性、难以适应政策快速变化和缺乏激励机制等问题。针对这些难题，美国食品药品监督管理局已经尝试采用区块链技术来解决药品流通中的协作困境。我国也正在进一步探索相关领域的创新方法来提高协作效率。

2.2 区块链技术在智慧医疗领域的应用

2.2.1 美国 在美国，区块链技术已被应用于医疗数据生态系统、电子病历共享、制药和供应链等方面。2016 年麻省理工学院提出基于区块链的电子病历共享系统 MedRec[11]，致力于提供一个全面的、不可变的日志，使患者可以轻松访问医疗服务提供者和治疗站点之间的医疗信息；2019 年制药企业辉瑞、美源伯根和麦克森等联合推出 MediLedger 项目[12]，制药商、批发商和医院等药品供应链上的节点都能够在区块链上记录药品运送数据，以保障制药及供应链真实性；2021 年有公司发布区块链医疗网络以解决传统医疗机构之间数据交换低质量和低效率问题。

2.2.2 欧洲 欧洲在医疗记录、个人健康数据跟踪和保险应用等场景积极推动区块链技术实践。2018 年首次在英国使用区块链技术使患者完全掌握个人医疗记录；同年德国某咨询集团提出一种基于区块链的解决方案 Hypertrust X－Chain[13]，使生物技术和制药公司能够在同一平台上安全可靠地设计、规划和运行供应链；2020 年由创新药物倡议和欧洲制药工业联合会资助的医疗保健区块链项目 PharmaLedger 宣布最新的 8 个用例案例，提供更多参考模式。

2.2.3 亚洲 2020 年韩国非政府组织 Commons Foundation 开发基于区块链技术的医疗健康平台，利用区块链公共服务开展流行病学研究。从 2020 年起中国国家卫生健康委员会积极强调 AI、区块链、5G 等新兴技术与医疗健康行业的创新融合。2022 年《"十四五"的卫生健康标准化工作规范》中提到要推进区块链、大数据等新兴信息技术与卫生健康行业融合性标准的供给，加强卫生健康信息标准应用效果评价，促进信息共享互认和互联互通。在产业界，阿里、京东与其他单位也开展了一系列在区块链和智慧医疗应用场景的结合应用推广。

3 区块链技术驱动新一代信息技术赋能智慧医疗

3.1 区块链技术

区块链技术是一种由密码学、分布式共识算法与点对点网络等技术创建的分布式账本，可存储交易数据。区块链由被共识确认的区块按时间顺序使用加密链接不断追加串联形成，每一个区块里面包含前一个区块加密后得到的哈希值，相应的时间戳以及交易数据，这样的设计使区块内容具有难以伪造、难以篡改和可追溯的特点[14]。

区块链技术对构建信任与提升协作效率都发挥着极重要的作用。区块链技术能够提高单个组织或个人在统一共识规则下按照自治方式进行协作的效率[15－17]，保证共享和协作过程中的历史记录难以篡改和伪造，并且链上数据及行为源头追溯方便，从而降低协作中的不确定性和风险。具体而言，其

技术特点主要包括以下4个方面：区块链技术是一种可以同时完成记账与对账的分布式账本；共识机制保证链上信息得到全网认可；支持智能合约的区块链提供可编程的业务应用；分布式架构使区块链技术的运营与维护不依赖于中心机构，而是依赖于激励机制和市场化规则自我“更新”[18]。

3.2 区块链技术对智慧医疗的核心作用

3.2.1 确保医疗数据完整性 保障医疗数据的隐私与安全是医疗信息化系统中至关重要的任务，而区块链技术的特点使其非常适合用于确保医疗数据完整性。物联网安全领域公司 Cynerio 的调研报告指出，在全球300多家医院1 000多万台联网医疗设备中，53%存在已知漏洞，17.5%存在重大风险[19]。涉及的风险包括医疗数据可被攻击者篡改、访问控制存在隐私泄露漏洞及数据不透明等问题。区块链技术能够提供可信的链上数据并实现不可更改的可靠工作流。当设备发生故障、意外或由于安全攻击而导致故障时，链上记录可用于实现操作追溯和问责，并依赖群体共识避免节点失效及单点依赖问题。

3.2.2 引入权属和权益证明，实现数据可信流转 区块链技术能够引入权属和权益证明，实现价值流转，推动激励机制建设。区块链可以提供可编程的通证能力，以便将权力与权益转化为可流通的加密数字权益证明，实现现实世界中的权益在数字世界中的映射。在智慧医疗领域中，通过将数据应用过程中数据或数据产品的访问、授权、撤销等权利通证化，使患者、院方及其他参与应用医疗数据或数据产品的组织方受到区块链技术的保护，快速实现权属的灵活管理和权益、价值的流通。在此领域，麻省理工学院媒体实验室已基于智能合约体系构建 MedRec 架构，支持由患者对自己医疗数据进行管理，并向医院和卫生管理机构进行访问授权。

通证化权利和权益也将推动更高效的数据要素化与流通应用变革[20]，见图2。在传统的消费模式中，信息流、价值流和管理流是独立的，由监管机构负责管理，信息平台提供信息，独立的第3方银行或中介机构负责交易。但在区块链平台中，区块链技术的特点能同时提供监督权、记账权和使用权，使数据对象的使用过程或权属权益证明流通过程中能够同时完成使用、对账、认账、记账、交易以及存证，大大降低了使用数字化产品或者数字化对象流通过程中的不确定性与应用成本。

图2 区块链技术引入权属和权益证明实现价值流转

3.2.3 构建去垄断化应用，打破巨头垄断 区块链技术能够构建去平台垄断化应用，如保护智慧医疗服务中的用户身份。个人在数字空间中的身份只能用数据代表，因此身份主权在数字世界中尤为重要，也是支持未来基于数字人的智慧医疗服务的身份认证和信任机制的基础。然而，现有的身份认证机制容易造成巨头垄断与平台控制。区块链技术无中心权威、中立性原则、资产可追溯可证明与无障碍协作的特点，都有利于建立分布式自我主权身份系统，支持可完全由用户控制的数字身份建立。

3.2.4 提供高效的组织和协作机制 区块链技术能够带来组织协作模式的变革[21-22]。基于区块链技术衍生出的新组织协作模式被称为分布式自治组织（decentralized autonomous organization，DAO），是一种通过区块链协议在共享规则下分权自治完成决策并自动执行任务的组织形式。DAO通过智能合约将组织的管理与运营规则以代码形式写在链上，参与者依据合约规则进行分布式自治管理。当组织需要进行决策时，一般通过参与者投票进行共同决策，每位参与者投票的影响力取决于其对组织的贡献度。

分布式自治组织研究也存在一系列难点，如在部分特定场景中，基于自治的治理模式是低效甚至失效的。尽管如此，分布式自治组织的概念仍是对现有互联网经济模式的一种变革。目前互联网经济遵循梅特卡夫定律（Metacalfe's Law），见图3。

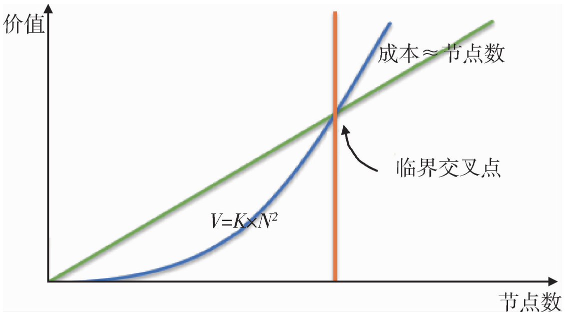

图3 梅特卡夫定律

网络的价值 V 与该网络内节点数 N 的平方成正比，即 $V = K \times N^2$，其中 K 为比例系数。由于一般网络的部署成本和节点数量呈线性关系，当网络规模达到一定程度时，可形成利润与成本的剪刀差，使网络价值收益大于部署成本以使所有者获利。现有的互联网经济大多依据这一模式营利，常通过补贴等营销模式吸引用户流量，以便在短期内快速达到网络价值临界交叉点，形成流量经济。但在基于区块链技术构建的 Web 3.0 应用与服务中，公开透明、自主管理，因此遵循谁创造的价值越多，谁的发言权越大的新经济模式。平台难以形成垄断优势，贡献越多者将拥有越多利益分配权。

4 区块链技术在智慧医疗领域的建设成果

4.1 基于区块链技术的智慧医疗应用建设

医疗信息化和数字化的发展与计算机系统的发展历程有相似之处。目前，医疗的数字化发展相当于计算机系统发展的早期阶段，即每个应用直接和底层“硬件”交互的阶段。每个独立的业务系统需要与不同业务对象、信息化系统进行一对一对接，这种实现的繁琐性和扩展难度导致数字化应用开发及维护困难以及服务不稳定、高成本。计算机产业发展过程中使用操作系统对底层不同规格的硬件设备实现统一管理与调度，并面向上层应用开放标准化通用接口。类比于计算机行业，目前亟须基于区块链技术构建面向智慧医疗应用的多要素数据流通协作服务平台，向下整合各家独立的医院、诊所、药房、医疗器械等医疗资源与数据资源，向上屏蔽底层大部分异构性，为智慧医疗应用提供标准化接口，解决智慧医疗中面临的数据服务化与协作高效化等问题，从而支持智慧医疗应用更加便捷地对接医疗资源，进一步完善智慧医疗产业链，推动产业发展，见图4。

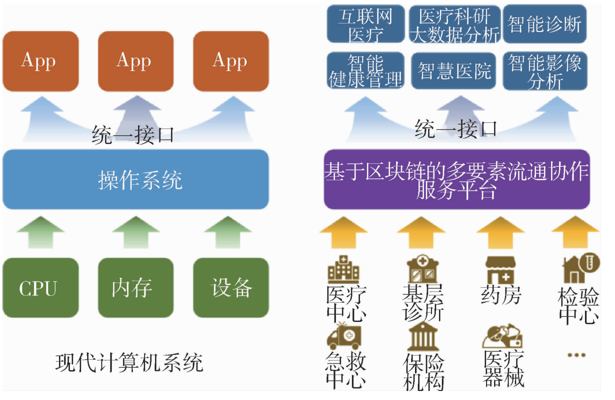

图4 基于区块链的智慧医疗平台服务目标

4.2 基于区块链可信交互的智慧医疗平台建设

基于区块链可信交互的智慧医疗平台由清华大学区块链交叉创新团体联合中国医学科学院医学信息研究所共同开展研究，致力于构建链上链下可信交互技术体系，并在医疗场景中促进医疗数据流通与共享。通过将链下与数据和业务相关的行为进行抽象，将必须应用区块链技术形成可信存证和共识的内容映射至链上，依托区块链的可信性为链下业务赋予“信任”能力，见图5。该技术体系的构建思想主要包括以下4点。

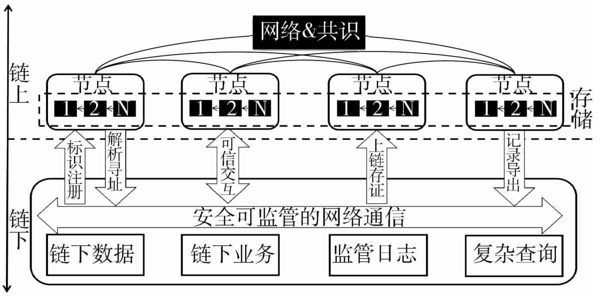

图5 链上链下数据可信交互关键技术

4.2.1 小核心大边缘 借鉴互联网设计中的小核心大边缘思想，构建“瘦”链上“胖”链下的体系结构。由于区块链形成共识与信任的成本较高而性能偏低，通过对医疗领域不同业务场景上链特点展开研究，形成对业务中链上链下交互数据与行为的

抽象描述，提炼共性关键技术，建立链上链下映射模型、多样化数据可信上链技术体系和灵活可扩展的数字化合约体系，仅将必要的事情放在“链”上。

4.2.2　安全与性能联合驱动　基于国密标准构建安全与性能联合驱动的可信体系。由于区块链的安全性与隐私性很大程度上来源于密码学技术的保护，依据我国 SM2、3、4、9 国密标准，实现高效的密码算法并全面改造主流区块链结构中使用的密码技术，实现安全和性能的联合优化，构建链上链下协同的隐私保护方法与自主可控的可信体系，进而满足区块链链上链下可信交互需求。

4.2.3　基于双网结构的追溯审计　为兼顾区块链开放共享与关键通信行为可追溯、可审计的要求，将可信交互过程中通信功能与过程监管用两个隔离网络分别实现，构成“双网”结构，通过公网实现交互功能，通过专用监管网络传输通信过程的相关日志等高阶语义数据至监管平台，以实现兼顾隐私安全和性能需求的在线监管。

4.2.4　遵从区块链技术成长性构造适应性演化的成长规律　以多样化真实场景技术需求为牵引，攻关共性关键技术、体系结构与理论模型，通过深入的应用验证与示范应用来推动技术的适应性演化，通过迭代交互的研究方式和不断获取实际应用验证经验的协同创新，结合开源创新等众智模式，构建具有技术先进性与行业引领性的链上链下可信交互技术体系。

4.3　基于区块链技术的全域智慧医疗产业示范

湖南省科技创新重点工程“基于区块链技术的全域智慧医疗关键技术研究及产业示范”是基于区块链的智慧医疗建设实践典型应用成果之一。该工程结合中南大学湘雅医院医疗体系的优势力量，在湖南省卫生健康委员会和科学技术厅的支持下，以两个地级市为试点城市，建立基于区块链的区域医疗信息基础。该信息基础设施于 2019 年 12 月 27 日正式开通，形成以中南大学湘雅二医院为龙头，链接不同地级市与基层医疗机构的“云 + 网 + 链 + 端”网络，见图 6，实现了数据服务化和协作高效化的公共基础服务平台。基于该基础服务平台，多家应用厂家纷纷加入构建丰富的应用，推动基于区块链技术的全域智慧医疗服务体系建设和产业示范。

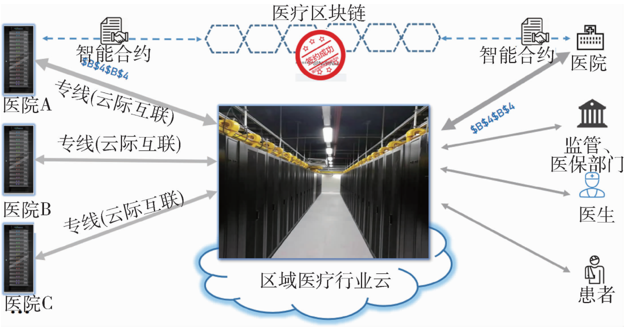

图 6　湖南省重点工程“云 + 网 + 端 + 链”架构

项目的技术体系包括云、网、端、链 4 个方面。“云”包括私有云和公有云两部分，私有云被部署在数据或服务提供侧，如医院信息科。私有云利用 AI、数据挖掘等技术将医院生产系统中的碎片化数据进行治理，将分散的健康数据重组构成个人健康档案并在区块链上注册登记。“网”是指医院之间彼此连接的一张软件定义网络，利用信息安全技术实现数据加密流通不留存，连入公有云，为数据安全应用提供网络资源。“端”是指患者和医生等用户使用的服务终端，利用底层安全硬件环境支撑各类服务终端应用开发。“链”即区块链技术，提供个人健康档案等数据要素的注册、授权接口，并基于智能合约约定业务双方工作流程，支撑协作高效化。当业务需求双方要交换数据或协作业务时，双方利用区块链上的智能合约建立电子协议，达成共识后，软件定义的网络会点亮协作双方之间的物理通道，并通过加密的手段将数据从拥有方传送给需求方，并在协议结束后释放建立的连接。整个数据流通过程中保证面向公众开放的公有云内数据不管、不看、不存，而部署在院内信息科等位置的私有云对管辖数据“可管、可控、可见”，防止对数据失控和垄断。数据流通过程中的所有行为都会被区块链记录在账本上，以便随时进行每个行为的审计、追溯和核查。基于上述技术体系可以构建起数据服务化和协作高效化的服务平台，以支撑丰富的业务应用建立，从而营造多机构协作的全域智慧医疗应用生态。

4.4 基于区块链的健康大数据平台

中关村医药健康大数据平台由北京市大数据中心联合清华大学北京信息科学与技术国家研究中心、中国技术交易所以及中关村生命科学园等共同推进，利用区块链技术和配套网关提供信用体系和可编程能力，构建医疗健康数据流通的交易平台。项目设计的核心思想包括以下 3 点：首先，平台技术架构遵循开放体系的设计思想，使数据、服务等能按需聚合以应对多样性需求；其次，利用区块链技术打造基于智能合约的可编程高效协作平台，将数据交易过程中监管方、计算方与用户方间的复杂协作问题转化为代码化可自动化执行的智能合约；最后，在满足可信安全要求的前提下，基于云服务实现安全与加密技术，降低用户使用数据交易工具的复杂度，提升用户体验。

实现数据交易时，平台会通过软件定义的智能网关依据交易请求接入交易专网，并将交易上传至链上，调用链上智能合约完成数据交易的鉴权、确权与共识等操作。在交易共识达成后，智能网关将进一步依据交易需求传送数据资源进入云服务平台。上述工作流程保证数据安全交互，并隐藏了技术的复杂性，保证用户在前端界面对服务的便捷调用，实现平台设计中核心思想。

5 结语

医疗服务的数字化与智慧化已经成为政府、医疗机构、医疗从业人员、患者和企业等全球医疗价值相关方的共识，并在不断发展和应用。本文阐述区块链技术对智慧医疗领域建设的价值、作用与应用实践，通过将智慧医疗与区块链技术深度融合，将出现更多创新数字化技术和应用，促进数据安全共享和互操作，加强临床试验和药物溯源的可信度，改善医疗服务效率和透明度，推动医疗资源精准下沉至患者，更好地造福社会，也将为人类的健康事业带来更多机遇。

参考文献

1 于洋，杨祖艳，林彦熹，等. 做好数据流通全价值链赋权：筑基数字化发展环境［J］. 银行家，2023，267（4）：110－113.

2 ESTEVA A，ROBICQUET A，RAMSUNDAR B，et al. A guide to deep learning in healthcare［J］. Nature medicine，2019，25（1）：24－29.

3 PICCIALLI F，DI SOMMA V，GIAMPAOLO F，et al. A survey on deep learning in medicine：why，how and when［J］. Information fusion，2021，66：111－137.

4 CHEN L，SONG L，SHAO Y，et al. Using natural language processing to extract clinically useful information from Chinese electronic medical records［J］. International journal of medical informatics，2019，124（4）：6－12.

5 TOPOL E J. High－performance medicine：the convergence of human and artificial intelligence［J］. Nature medicine，2019，25（1）：44－56.

6 SAMBRA A V，MANSOUR E，HAWKE S，et al. Solid：a platform for decentralized social applications based on linked data［EB/OL］.［2023－06－16］. http：//emansour. com/research/meccano/solid_ protocols. pdf.

7 THOMAS H，SHRIER D L，PENTLAND A，et al. Trusted data，revised and expanded edition：a new framework for identity and data sharing［M］. Cambridge：MIT Press，2019.

8 DHILLON V，METCALF D，HOOPER M，et al. The hyperledger project［EB/OL］.［2023－06－16］. https：//doi. org/10. 1007/978－1－4842－3081－7_ 10.

9 ARROW K J. Social choice and individual values［M］. London：Yale University Press，2012.

10 STIGLER G J. Production and distribution theories［M］. New Jersey：Transaction Publishers，1994.

11 AZARIA A，EKBLAW A，VIEIRA T，et al. Medrec：using blockchain for medical data access and permission management［C］. Vienna：2016 2nd International Conference on Open and Big Data（OBD），2016.

12 SAMPLE M. MediLedger DSCSA Pilot Project［EB/OL］.［2023－06－16］. https：//www. amerisourcebergen. com/－/media/assets/amerisourcebergen/manufacturer/mediledger－dscsa－pilot－report. pdf.

13 NICOLAI B，TALLARICO S，PELLEGRINI L，et al. Blockchain for electronic medical record：assessing stakeholders' readiness for successful blockchain adoption in health－care［J］. Measuring business excellence，2023，27（1）：157－171.

（下转第 15 页）

et al. Context－based adaptation of in－hand slip detection for service robots［J］. IFAC－PapersOnLine，2016，49（15）：266－271.
23 张绍华，张天奉，王玉龙，等．互动式头针对脑卒中患者足底动态压力分布的影响［J］. 中国中医基础医学杂志，2018，24（8）：1109－1112.
24 徐冬艳，田茹锦，刘珏，等．上肢智能力反馈康复机器人联合常规康复治疗改善脑卒中患者上肢运动功能临床研究［J］. 康复学报，2018，28（2）：11－17.
25 胡靖然，陈小飞．虚拟现实技术联合下肢康复机器人训练对缺血性脑卒中患者下肢功能及平衡能力影响的研究［J］. 中国康复，2020，35（12）：633－636.
26 杨延辉，陈树耿，李秋霞，等．智能软体手功能康复机器人在脑卒中康复中的应用效果［J］. 临床医学研究与实践，2021，6（33）：23－26.
27 邓燕玲. 脑卒中延续护理综合信息服务云平台构建及应用［J］. 护理学报，2019，26（19）：50－52.
28 方子杰，崔韶阳，林子琦，等．基于古今医案云平台分析针刺治疗卒中后肢体运动功能障碍选穴规律［J］. 广州中医药大学学报，2023，40（5）：1205－1213.
29 贾书磊，方小群，冯琼，等．线上线下互动平台在社区脑卒中康复中的应用［J］. 中国康复医学杂志，2017，32（3）：340－343.
30 吴智水，徐静娟，李毅，等．基于云平台的连续康复管理模式对脑卒中患者运动功能的影响［J］. 临床医药文献电子杂志，2018，5（39）：175.
31 李萌，盖海云，陈红．云随访平台在缺血性脑卒中恢复期偏瘫患者延续性护理中的应用［J］. 重庆医学，2020，49（17）：2956－2961.
32 薛建琴，朱竹君，苏建华，等．基于云平台脑卒中远程延续性居家上肢康复模式在脑卒中偏瘫患者上肢功能锻炼中的应用［J］. 名医，2020（5）：178.
33 徐雁，朱菊训，乔建红，等．基于云平台的院外远程护理干预在脑卒中患者中的应用［J］. 齐鲁护理杂志，2020，26（7）：9－11.
34 CHA K，WANG J Y，LI Y，et al. A novel upper－limb tracking system in a virtual environment for stroke rehabilitation［J］. Journal of neuroengineering and rehabilitation，2021，18（1）：166.
35 BERGMANN J，KREWER C，BAUER P，et al. Virtual reality to augment robot－assisted gait training in non－ambulatory patients with a subacute stroke：a pilot randomized controlled trial［J］. European journal of physical and rehabilitation medicine，2018，54（3）：397－407.
36 姜财，黄墩兵，郭进华，等．互动式头针结合沉浸式虚拟现实康复系统对脑卒中偏瘫患者上肢功能的影响［J］. 按摩与康复医学，2022，13（9）：1－4.
37 于艳梅，刘茵茵．中青年脑卒中手偏瘫患者应用虚拟现实康复训练效果研究［J］. 华南国防医学杂志，2021，35（12）：881－884.
38 杨荣，王萍，常海霞．基于虚拟现实技术的综合干预对老年脑卒中后抑郁患者生活质量的改善作用［J］. 中国老年学杂志，2020，40（23）：5077－5079.
39 梁明，徐奕鹏，曲源，等．基于3D环境的虚拟现实任务导向训练在脑卒中患者平衡功能康复中的应用［J］. 临床神经病学杂志，2021，34（5）：348－351.
40 娄安华. 分阶段康复护理联合短期虚拟现实情景康复训练对脑卒中偏瘫患者认知和肌力的影响［J］. 黑龙江医学，2022，46（5）：616－618.
41 盛煜，刘志衡，单丽雅，等．基于5G网络技术的移动卒中单元的研究［J］. 电信科学，2020，36（1）：34－40.
42 郑波，杜潇，王建，等．基于5G网络技术的智慧医疗在移动卒中急救系统领域的架构设计研究［J］. 中国卒中杂志，2021，16（1）：7－14.
43 徐佩，刘薇群，王春燕，等．基于心理授权理论的早期康复护理方案在脑卒中患者中的应用［J］. 上海护理，2021，21（11）：45－48.

（上接第7页）

14 ISO. ISO 22739：2020 blockchain and distributed ledger technologies－vocabulary［EB/OL］.［2023－06－16］. https：//www. iso. org/standard/73771. html.
15 斯旺 M. 区块链 新经济蓝图［M］. 韩锋，译. 北京：新星出版社，2020.
16 泰普斯科特 D，威廉斯 A D. 维基经济学 大规模协作如何改变一切［M］. 何帆，林季红，译. 北京：中国青年出版社，2007.
17 泰普斯科特 D，塔普斯科特 A. 区块链革命 比特币底层技术如何改变货币、商业和世界［M］. 凯尔，孙铭，周沁园，译. 北京：中信出版集团股份有限公司，2016.
18 尹浩. 区块链技术的发展机遇与治理思路［J］. 人民论坛·学术前沿，2018（12）：6－10.
19 Cynerio. Data report：the insecurity of connected devices in healthcare［EB/OL］.［2023－06－16］. https：//www. cynerio. com/ponemon－survey－insecurity－of－connected－devices－in－healthcare－2022.
20 迈耶－舍恩伯格 V，拉姆什 T. 数据资本时代［M］. 李晓霞，周涛，译. 北京：中信出版集团股份有限公司，2018.
21 江小娟. 数字经济，解构与链接［EB/OL］.［2023－06－16］. https：//www. tsinghua. edu. cn/info/1177/26138. htm.
22 丁文文，王帅，李娟娟，等. 去中心化自治组织：发展现状、分析框架与未来趋势［J］. 智能科学与技术学报，2019，1（2）：202－213.