

区块链在医学工程中的应用探索

何世乔

引用本文:

何世乔. 区块链在医学工程中的应用探索[J]. 中国医疗器械杂志, 2026, 50(4): 407-414.

HE Shiqiao. Exploration of the Application of Blockchain in Medical Engineering[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2026, 50(4): 407-414.

<https://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.250735>

收稿日期: 2025-11-29

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于区块链技术的体外诊断试剂全流程智慧追溯体系应用研究

Research on Application of Intelligent Tracing System for IVD Reagents Based on Blockchain Technology

中国医疗器械杂志. 2021, 45(1): 105-108 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.01.022>

闭环管理下大型医院物资供应链实践

Large-scale Hospital Material Supply Chain Practice under Closed-loop Management

中国医疗器械杂志. 2022, 46(3): 346-349 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2022.03.023>

物联网技术在医学工程中的研究概述

Research Overview of Internet of Things Technology in Medical Engineering

中国医疗器械杂志. 2023, 47(5): 576-581,590 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2023.05.021>

基于SPD供应链的医用耗材全过程精准管理实践

Accurate Management Practice of Medical Consumables in the Whole Process Based on SPD Supply Chain

中国医疗器械杂志. 2022, 46(6): 696-700 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2022.06.022>

智能运维模型在医疗装备管理中的应用研究进展

Research Progress on Application of Intelligent Operation and Maintenance Models in Medical Equipment Management

中国医疗器械杂志. 2025, 49(3): 250-254 <http://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240561>

物联网及临床服务的DSA设备使用合理化探索

Exploration of Rational Use of DSA Equipment in IoT and Clinical Service

中国医疗器械杂志. 2025, 49(2): 186-190 <http://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240316>



微信公众号



网站二维码

文章编号: 1671-7104(2026)04-0407-08

区块链在医学工程中的应用探索

【作者】何世乔

灵山县人民医院, 钦州市, 535400

【摘要】区块链技术以其去中心化、不可篡改、可追溯和高透明度等特性, 为医学工程领域创新发展提供了新思路。医学工程领域作为保障医疗质量、安全和效率的关键支撑, 正面临着医疗设备管理复杂、数据孤岛现象严重、供应链不透明以及信息安全风险突出等多重挑战。该文系统概述了区块链在医学工程领域的研究现状与发展趋势: 首先, 阐述区块链技术的基本原理及其与医学工程需求的高度契合性; 其次, 重点从医疗设备全生命周期管理、医疗设备数据安全与共享、医疗设备及耗材供应链管理3个核心维度, 深入剖析区块链的主要应用场景、关键技术和最新研究进展; 然后, 探讨基于区块链的医学工程应用系统典型架构, 并整合分析现有研究中的关键性能指标的实证数据; 之后, 系统梳理区块链技术应用面临的技术、法规、成本和组织等多维度挑战, 综合评估其可行性; 最后, 展望了该领域未来的研究方向。

【关键词】区块链; 医学工程; 医疗设备管理; 数据安全; 供应链; 区块链系统性能

【中图分类号】R197.39

【文献标志码】A

doi: 10.12455/j.issn.1671-7104.250735

Exploration of the Application of Blockchain in Medical Engineering

【Author】HE Shiqiao

Lingshan County People's Hospital, Qinzhou, 535400

【Abstract】Blockchain technology, with its characteristics of decentralization, immutability, traceability, and high transparency, offers innovative solutions for the innovative development of the medical engineering field. As a key support for ensuring the quality, safety and efficiency of medical care, the medical engineering field is currently facing multiple challenges such as complex medical device management, severe data silos, opaque supply chains and prominent information security risks. This paper systematically summarizes the research status and development trends of blockchain in the medical engineering field. Firstly, it elaborates on the basic principles of blockchain technology and its high compatibility with the demands of medical engineering. Secondly, it focuses on three core dimensions: the full life cycle management of medical device, the security and sharing of medical device data, and the management of medical device and consumables supply chains, to deeply analyze the main application scenarios, key technologies, and existing research progress of blockchain. Thirdly, this paper discusses the typical architecture of medical engineering application systems based on blockchain and integrates and analyzes the empirical data on key performance indicators in existing research. Fourthly, this paper systematically summarizes the multi-dimensional challenges faced by the application of blockchain technology in the medical engineering field, including technical, regulatory, cost and organizational aspects, and conducts a comprehensive assessment of its feasibility. Finally, it looks forward to the future research directions in this field.

【Key words】blockchain, medical engineering, medical device management, data security, supply chain, blockchain system performance

0 引言

医学工程学是工程学与医学、生命科学相结合的交叉学科。现代化医院的高质量运行与持续发展, 与该学科的进步息息相关。一直以来, 医学工程部门作为医院的核心技术职能部门, 其职责范围

不仅贯穿整个医疗设备的全生命周期——从采购计划、执行采购、安装、验收, 到日常维保、定期校准、质控和报废处置, 还涉及医疗数据的系统性管理、耗材供应链稳定性保障等多项关键任务^[1]。

区块链的独特性在于: 去中心化的组织模式、不可篡改的数据存储机制、可追溯的交易记录功能以及智能合约的执行能力自动化。基于这些特性, 区块链方能构建起一个多方参与、协同维护的信任

收稿日期: 2025-11-29

作者简介: 何世乔, E-mail: 237780224@qq.com

网络。因此,区块链能在缺少中心化第三方机构的环境下,依然能确保信息的真实可靠、完整统一和安全保密^[2]。该技术在医疗健康领域的应用探索一直在不断深入推进,研究范围涵盖了药品溯源等多个重要场景^[3]。然而,现有的研究大多集中在通用的医疗场景,对于医学工程这种需兼顾工程技术实践与运营管理的特殊领域,还缺乏整体性梳理和系统性整合^[4]。

在当前研究中,有几个棘手的问题需要面对:

①大多数研究仍停留在概念框架构建或系统原型设计层面,缺乏在真实的医学工程环境中进行大规模应用验证和量化效果评估;②不同研究项目在技术路线选择、共识机制设计、性能评价指标等方面存在显著差异,导致研究成果难以直接对比与有效复用;③虽然政策明确鼓励技术创新与数据安全协同发展^[5],但区块链的应用到底如何在现行医学工程管理体系、医疗器械监管法规及数据隐私保护要求等多方取得平衡,是一个值得深入探讨的问题;④最后要特别关注的是,持续产生的、实时性要求高的海量设备运行数据,对于现有的区块链解决方案的吞吐效率、延迟响应和存储成本管理等各方面都是一种严峻的挑战^[6]。

基于以上背景,本文系统梳理了区块链在医学工程领域的研究进展,重点分析其在应对上述问题时的解决方案与实践探索,为推动该技术在医学工程领域的实际应用提供一些建设性参考。

1 区块链技术核心原理及其在医学工程中的适用性

区块链本质上是由点对点网络中众多节点共同维护、持续延伸的分布式数据库系统,其技术架构包含以下几个核心要素^[7-10]。

(1) 分布式账本 (distributed ledger): 确保数据由网络内全部或部分节点共同记录与存储,不再依赖单一中心服务器。这种“全民记账”的模式,从物理和逻辑上彻底根除了单点故障的风险,提高了系统的容错和抗打击能力,尤为适用于构建一个需要多方共同参与和监督的医学工程信息协作平台。

(2) 非对称加密与哈希算法 (asymmetric cryptography & Hash algorithm): 为数据安全提供双重保障。信息在存入区块链前,需经过严格的加密处理和哈希计算。每个新建区块都包含前一区块的哈希值,从而形成紧密相连的链式结构。这种架构使得任何对历史数据的细微修改,都会引发后续

所有区块哈希值的连锁变化,进而被系统迅速识别,实现数据的永久性防篡改。这个特性为建立医疗设备的完整履历、可靠的维修记录和关键的操作日志提供了理想的技术支撑。

(3) 共识机制 (consensus mechanism): 通过工作量证明、权益证明等算法,以及在联盟链环境中广泛采用的实用拜占庭容错算法,确保网络内所有节点对新产生区块形成一致合法性的判断。这种机制有效解决了在缺乏中心化信任主体的协作环境中,如何实现数据验证与同步的核心难题。

(4) 智能合约 (smart contract): 其作为一种以代码形式固化在区块链上的自动化执行协议,能够在满足预先设置条件时,自主触发相关操作(类触发器)。这种特性可应用于设备维护到期的自动提醒、备品备件的智能采购、设备使用权限的动态管理等具体场景。显然,这将大幅提升医学工程管理的自动化水平和执行效率。

这些技术特点与医学工程管理的本质需求天然契合。借助区块链的不可篡改性,能为每台医疗设备建立从采购、验收、使用、维保到报废全过程的数字身份认证体系;利用其可追溯性,可实现对药品和高值耗材从生产源头到临床使用的全流程闭环监控;通过其加密和权限控制机制的配合,能在充分保障数据安全和患者隐私的前提下,推进医疗设备数据的跨机构安全共享。

2 区块链在医学工程中的主要研究与应用领域

自2016年起,区块链在医学工程领域的研究活动呈现明显增长态势,应用逐渐从基础数据管理向多元化方向拓展。但截至近期,仅有个别试点项目进入实际演示阶段,尚未形成成熟的应用模式,亟须通过更多实际部署案例验证其技术可行性和应用效益。综合现有研究成果,该领域的应用探索主要集中在如表1所示的几个方向^[11-14]。

表1 区块链在医学工程中的主要应用领域
Tab.1 Main application areas of blockchain in medical engineering

应用领域	核心解决问题	关键优势
医疗设备全生命周期管理	信息孤岛、记录易篡改、维保追溯难	数据完整性、不可篡改、流程自动化
医疗设备数据安全与共享	数据安全风险、隐私泄露、跨机构共享难	数据加密、访问控制、隐私保护、可信共享
医疗设备及耗材供应链管理	假冒伪劣风险、流向不透明、追溯效率低	全程可追溯、防伪认证、供应链透明化

2.1 医疗设备全生命周期管理

医疗设备从采购入库到最终报废，涉及多个环节和部门，传统纸质或中心化电子记录存在信息丢失、篡改和追溯困难等问题。区块链为此提供了创新的解决方案。

研究人员提出构建一个基于区块链的医疗设备管理平台^[15]。在该平台中, 每台设备都被赋予一个唯一的数字身份 (decentralized identifier, DID), 其采购合同、验收报告、安装调试记录、历次校准与维修保养报告、使用日志、不良事件报告等关键信息, 都作为一笔笔交易被记录在链上, 如图1所示。

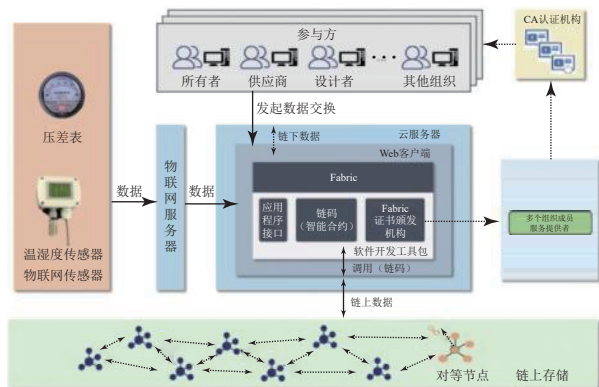


图1 全生命周期管理模型^[16-17]
Fig.1 Full life cycle management model^[16-17]

其具体的实施流程和效益分析如下。

(1) 资产建档：新设备入库时，医学工程师通过智能合约将设备的基础信息（型号、序列号、供应商等）和验收记录写入区块链，生成不可篡改的“数字出生证明”。

(2) 维护与质控：后续的每一次维修、保养、校准，其报告（或报告哈希值）都会由工程师签名后作为新交易上链，形成完整的设备履历。智能合约可设置自动提醒，当设备接近预定维保周期或发生故障时，自动向工程师和厂商创建工单。

(3) 设备共享与调配：在大型医院内部或医联体（医共体）之间，设备往往存在闲置和浪费的问题，也有研究探讨了基于区块链的医疗设备共享云平台。而通过智能合约管理设备的借用申请、审批、计费 and 归还，不仅提高了设备使用率和借用效率，其改进效果在统计学上也具有显著意义，同时确保了流转过程的透明可追溯^[18]。

(4) 成本与效率：一项仿真研究表明，基于区块链的互联网医疗设备系统在应用程序执行成本方面可降低33%^[19]。主要的获益在于两个方面：流程自动化、中间环节人工核验成本的减少。但事实

上，区块链的价值远不止于直接成本的削减。它通过重构信任机制、优化协作模式，带来了多个维度的综合效益提升，是一个从直接成本节约，到运营效率与安全性提升，再到资产价值最大化和数据价值化的递进过程^[20-22]。

2.2 医疗设备数据的安全与共享

现代医疗设备，特别是医学影像设备（如MRI、CT）、各类监护仪、可穿戴设备（如IoMT），产生了海量的医疗数据。区块链在此领域的应用，核心在于“数据所有权回归患者/机构”以及“授权访问下的可信共享”。一个典型的模式采用“链上+链下”的混合存储方案^[23]，如图2所示。

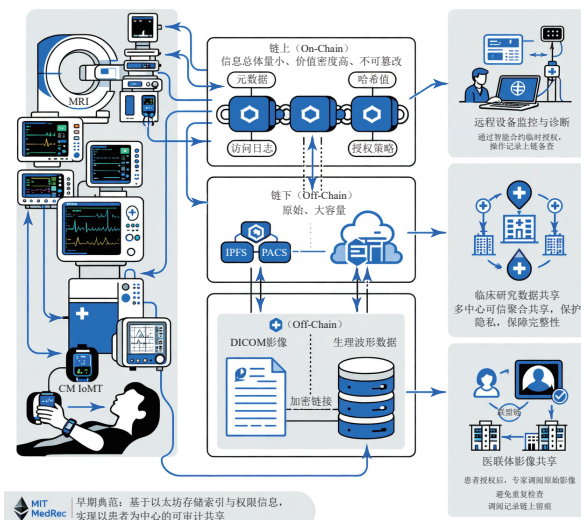


图2 区块链数据共享方案
Fig.2 Blockchain data sharing solution

（1）链上（on-chain）：存储数据的元数据（如Metadata）、哈希值（数据指纹）、访问日志以及授权策略。这些信息体量小，但价值密度高，利用区块链的不可篡改性确保其真实可信。

(2) 链下 (off-chain): 存储原始的、大量的医疗数据文件 (如DICOM影像、生理波形数据), 通常使用分布式存储系统 (如IPFS) 或医院现有的PACS/云存储。

麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）的MedRec项目是该领域的早期典范。它利用以太坊区块链存储患者医疗记录的索引和权限信息，允许患者授权医生、研究机构等访问其存储在医院数据库中的原始病历，所有访问行为都会被记录在区块链上，实现了以患者为中心的可审计的数据共享。

在医学工程实践中,该模式可应用于以下3个

方面。

(1) 远程设备监控与诊断: 厂商工程师在需要远程访问设备日志进行故障排查时, 可通过智能合约获得临时授权, 而所有操作记录需要上链备查, 从而确保数据安全^[24]。

(2) 临床研究数据共享: 在多中心临床研究中, 来自不同医院的设备数据可通过区块链平台进行可信聚合与共享。当然, 研究人员获得的是经过脱敏或授权的数据访问权限。这样既保护了患者隐私, 又保证了研究数据的原始性和完整性。

(3) 医联体内的影像共享: 不同医院之间可以通过联盟链共享患者的影像检查数据。患者授权后, 上级医院的专家可以直接调阅其在下级医院的原始影像数据进行会诊, 避免重复检查, 所有调阅记录都在链上留痕, 权责清晰。

2.3 医用耗材供应链管理

医用耗材尤其是高值耗材(如心脏支架、人工关节)和关键药品的供应链安全直接关系到患者的生命健康。从公开的报道看到, IBM的Hyperledger Fabric平台已被用于疫苗供应链管理, 而MediLedger项目则专注于药品溯源。其原理是将供应链上的每个关键节点——生产商、供应商、物流公司、医院、药房——都作为联盟链的一个参与方。

(1) 源头赋码: 每个最小包装单位的药品或耗材在生产时被赋予一个唯一的序列号, 并将其信息记录到区块链上。

(2) 全流程追溯: 在随后的仓储、运输、分销、入库、领用等环节, 相关方都会扫码, 并将物流信息和状态变更记录上链。

(3) 核验与防伪: 医学工程部门在接收耗材时, 通过扫码, 即可查询其完整的流转历史, 验证其来源的合法性, 从而有效杜绝假冒伪劣产品的流入。当耗材被植入患者体内, 该使用记录同样上链。这样就形成了一个从生产到最终使用的完整闭环。

然而, 该理想化流程在实际落地中, 面临着多重复杂性、技术细节挑战及潜在障碍。

(1) 医用耗材流转频率极高, 对系统实时响应的要求也高。到底如何在高并发场景下保持其性能稳定, 是个需要考究的问题。

(2) 大型医院动辄有数十个信息系统且数据异构, 与新建的区块链平台之间, 肯定会存在严重的集成难题。而要实现与在用系统的无缝数据交换, 需要开发大量适配接口, 无疑会增加技术复杂性和项目实施成本。

(3) 部署和维护区块链系统需要大量资金投入, 主要包括硬件采购、软件开发与日常运维成本。对于大多数医院而言, 这是一笔不小的开支, 而投资能不能得到近期和远期效果, 是个未知数。

(4) 区块链的成功应用, 主要依赖于供应链上所有参与方的深度协作, 且各方愿意共享数据。但实际情况是, 各方很有可能因数据主权、商业机密、竞争关系或对新技术的不了解而产生抵触情绪, 协调难度极大^[25]。医院内部也可能因部门壁垒、员工对新技术的接受度以及技能培训不足而影响最终的落地效果。

3 基于区块链的医学工程应用系统架构与性能分析

3.1 系统架构设计

为在医院环境中落地, 一个典型的基于区块链的医学工程应用系统通常采用分层架构设计, 并优先选择联盟链技术, 如Hyperledger Fabric, 因为它在保障多方协作的同时, 提供身份认证和权限控制, 更符合医疗行业的监管要求^[26], 如图3所示。

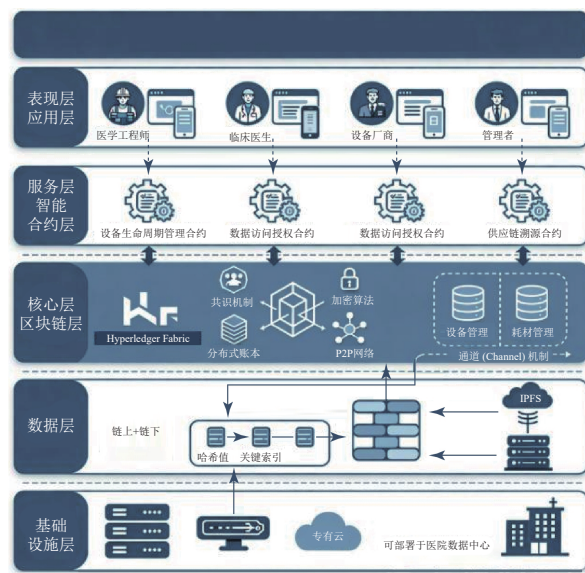


图3 基于联盟链的医学工程应用系统分层架构
Fig.3 Hierarchical architecture of the medical engineering application system based on the consortium chain

(1) 表现层/应用层: 为不同角色的用户(如医学工程师、临床医生、设备厂商、管理者)提供图形化界面(Web/App), 封装底层区块链的复杂性。

(2) 服务层/智能合约层: 部署业务逻辑的核心, 如设备生命周期管理合约、数据访问授权合约、供应链溯源合约等^[27]。

(3) 核心层/区块链层：由共识机制、分布式账本、加密算法、P2P网络等构成。Hyperledger Fabric的通道（channel）机制允许在同一网络中为不同业务（如设备管理、耗材管理）建立隔离的子账本，进一步增强了数据隐私性^[28]。

(4) 数据层：这里往往采用“链上+链下”的混合模式。“链上”存储的是关键索引和哈希值，“链下”（如IPFS、医院的内部存储）则存储海量的原始数据^[29]。

(5) 基础设施层：主要包括服务器、网络和存储资源。这些可以部署在医院数据中心或专有云上^[30]。

3.2 关键性能指标与实证数据

尽管区块链应用很值得期待，但其在性能方面的短板，尤其是交易吞吐量（transactions per second, TPS）和交易延迟（latency），无疑是决定其能否在真实业务场景中应用的生死关口。

(1) 吞吐量（TPS）：指系统每秒能够处理的交易数量，通俗地说就是衡量系统“吃饭能力”的指标。公有链（如比特币、以太坊）的TPS通常

较低（个位数到几十），因此难以满足高频次业务需求。相对来说，联盟链（如Hyperledger Fabric）通过优化的共识机制（如PBFT），性能有着显著的提升^[31]。

(2) 交易延迟（latency）：指从交易提交到最终在账本上确认所需的时间，也就是衡量系统“有无脾气”的标尺。这包括交易的传播、验证、排序和最终写入区块链等多个环节。对于那些对实时性有着极致要求的应用场景来说，低延迟不仅仅是一个指标，而是生存的底线。

从公开数据来看，很多研究对医疗场景下的区块链系统性能进行了基准测试。我们将部分具有代表性研究的数据进行了整理^[32-34]。

我们从表2可以看出：

(1) 性能差异巨大。不同区块链框架、共识机制和应用场景下的性能表现呈现显著差异。基于Hyperledger Fabric的联盟链在吞吐量上远超公有链，能够达到数百甚至上千tps，这意味着其能基本满足中高频次的医学工程管理需求。

表2 部分医疗区块链系统性能基准测试数据汇总

Tab.2 Summary of performance benchmark test data for some medical blockchain systems

研究/平台	区块链框架	共识机制	测试场景	发送速率/tps	吞吐量/tps	平均延迟/s
医疗区块链网络分析	Hyperledger Fabric v1.4		医疗记录交易	480~1920	430~1 090	1.41~44.26
HealthChain性能评估	自研框架		健康记录查询	—	>1 000	<1
实时环境可行性测试	以太坊（私有）		读/写操作	—	—	读取：0.023~0.027 交易：0.039~0.045
MedChain	Hyperledger Fabric	Raft	EHR数据访问	—	随节点数增加而变化	随节点数增加而变化
医疗数据共享方案	—	PoW/PoS/PoA	安全共享	—	PoA>PoS>PoW	PoA<PoS<PoW

(2) 延迟与负载强相关。延迟往往随着网络负载（交易发送速率）和节点数量的增加而增加。当系统达到吞吐量瓶颈时，延迟会急剧上升^[35]。图4则提示了吞吐量在达到饱和点之后不再增长，而平均延迟依然持续上升。

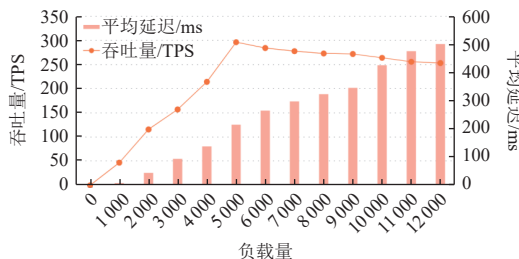


图4 典型医疗区块链系统吞吐量与延迟关系示意^[36]
Fig.4 Typical medical blockchain system throughput and latency relationship diagram^[36]

上述实证数据表明，虽然区块链性能并非无限，但如能通过合理的技术选型（如选择联盟链）、优化的系统配置（如调整区块大小、优化共识算法）和恰当的架构设计（如链下扩容），其性能是足以支撑绝大多数医学工程管理场景的。

4 应用挑战与可行性分析

应用前景的光明，并不意味着将区块链技术全面应用于医学工程是大路坦途，审慎的可行性分析仍然是重中之重。正如前面所说，大部分的研究和项目仍处于概念验证（proof of concept, PoC）、原型或早期应用阶段，缺乏大规模的落地案例和效果评估。

4.1 技术挑战

(1) 可扩展性与性能：医学工程场景数据异

构性极高,这里既有IoMT设备产生的高频、流式生理参数,也有大型影像设备生成的海量非结构化数据。区块链网络现有的吞吐量和共识延迟很难支持该类数据的实时、原始信息上链。因此,必须设计复杂的链下预处理与聚合机制,但这又引入了数据抽取的时效性、可靠性与链上链下数据一致性校验的新问题。

(2) 数据存储:在医疗设备生命周期管理中,会产生大量文档、操作日志等。如果它们完全依赖链上存储,那么成本极高且效率低下。如果采用混合模式,那么如何确保链下长期存储数据的可用性、防止其被篡改或丢失,并与持续迭代的链上智能合约保持兼容,都是接踵而至的挑战。

(3) 互操作性:如何让基于区块链的新系统与医院在用的庞杂信息系统进行无缝集成及数据交互,对于技术和工程而言,都是一个重大挑战,更为关键的是,目前缺乏统一的数据和接口标准。

(4) 隐私与安全:智能合约的自动执行虽能提升效率,但其代码漏洞很可能导致敏感的设备访问权限被非法获取或设备操作指令被恶意触发;医疗器械法规要求对某些严重不良事件相关数据进行封存甚至修正,明显与区块链“不可篡改”的核心特性存在本质冲突;另外,密钥管理不善会导致资产或数据访问权限的永久丢失^[37]。

4.2 非技术挑战

(1) 法规与合规:医疗数据是受严格监管的敏感数据。去中心化的数据治理模式,应该如何满足关于数据跨境流动、隐私保护和医疗数据监管的国家法律法规,仍需要明确的监管框架和具体的指导方针^[38]。

(2) 成本与投资回报:开发、部署和维护一个区块链系统需要高昂的前期投入和持续的运营成本。在缺乏清晰的商业模式和量化投资回报率(return on investment, ROI)的情况下,医院决策层对这种大规模的投资往往都持谨慎态度^[39]。

(3) 标准化缺失:从目前来看,行业内的确缺乏统一的技术标准、数据格式和业务流程规范,导致不同厂商开发的区块链系统可能成为新的“区块链孤岛”,同样违背了互联互通的初衷。

(4) 组织与文化阻力:区块链的引入是对传统中心化管理模式和工作流程的颠覆。这需要获得医院高层、各业务部门、IT人员乃至外部合作伙伴的广泛共识和积极参与,变革管理难度大。

4.3 可行性综合评估

综合来看,在当前阶段(2025年),将区块链作为一种“万能灵药”来彻底取代医院现有的所有信息系统是不现实也不可行的。更务实和可行的路径是,将其作为现有系统的“增强器”和“连接器”,从一些价值高、痛点明确的特定场景切入。

(1) 高可行性场景。高值耗材供应链追溯、大型设备的全生命周期履历管理、跨机构的临床试验数据管理、医联体内的影像及病理资料共享等场景,对数据的真实性和可追溯性要求极高,且参与方众多,正是发挥区块链优势的理想试验田。

(2) 逐步探索场景。普通医疗设备的日常维保、院内设备数据共享等场景可先在科室内部进行小范围试点,验证其技术可行性和业务价值后,再考虑适时逐步推广。

5 未来研究方向与展望

展望未来,区块链在医学工程领域的研究和应用,将朝着更智能、更融合、更高效的方向发展。

(1) 与新兴技术深度融合。

区块链+物联网(Internet of Things, IoT)的组合,将IoMT设备采集的生命体征、设备运行参数等数据实时、可信地记录上链,为远程监控、预测性维护和精准医疗提供高质量的数据源^[40]。

区块链+人工智能(artificial intelligence, AI)/联邦学习的组合,在区块链构建的可信数据共享网络基础上,利用联邦学习技术,可以在不移动原始数据(保护隐私)的情况下,联合训练AI模型(如医疗影像辅助诊断模型)。区块链则负责记录模型训练过程和参与方的贡献,确保整个过程的透明和可审计^[41]。

(2) 性能与可扩展性突破。

研究将持续关注改进共识算法、分片(sharding)、状态通道、侧链(sidechains)等Layer-2扩容方案,目的是突破现有性能瓶颈,从而支持更大规模、更高频率的应用^[42]。

(3) 标准化与互操作性研究。

推动医疗行业协会、龙头企业和监管机构多方共同制定医疗区块链的数据标准、接口规范和治理框架,是实现大规模互联互通的关键所在。另有研究显示,将FHIR等现有医疗数据标准与区块链结合,是值得探索的方向^[43]。

(4) 经济模型与激励机制设计。

只有设计合理的经济模型和智能合约驱动的激励机制,才能鼓励数据所有者(患者)、数据提供方(医院)和数据使用方(研发机构)积极参与到数据共享生态中,否则这条路将无法持续下去。

(5) 大规模实证研究。

未来需要有更多的走出实验室、在真实医疗环境中开展的大规模试点项目。这些项目应侧重收集和分析关于降本增效、改善医疗质量等方面的量化数据,从而为技术的价值提供强有力的实证支持^[44]。

6 结论

区块链技术以其独特的技术优势,为应对当前医学工程领域在设备管理、数据安全和供应链透明度等方面所面临的挑战,提供了一条极具前景的技术路径。

与此同时,我们也必须清醒地认识到,区块链技术并非万金油,其在医学工程领域的应用仍处于探索的初期阶段。技术成熟度、系统集成、法律合规、成本效益和组织变革等多重阻碍,都是我们需要面对的。而对于医学工程部门而言,当前最为可行的策略是秉持审慎乐观的态度,优先选择痛点突出、价值明确的特定场景进行小范围试点,积累经验,一步步地验证其技术和商业价值。

随着技术的不断成熟,标准的逐步建立,与人工智能、物联网等技术的深度融合,区块链有望成为构建下一代智慧医疗工程管理体系的核心基础设施之一。在提升医疗服务质量与安全、推动精准医疗发展、优化医疗资源配置等方面发挥积极作用。而对该领域的持续关注、研究和实践,也将对我国现代化医院的高质量发展产生深远影响。

参考文献

- [1] 陆阳, 杨林, 戴剑峰, 等. 区块链在医疗器械全生命周期质量管理中的应用探讨[J]. 现代医院, 2022, 22(8): 1248-1249, 1253.
- [2] Zhang Peng, White J, Schmidt D C, et al. FHIRChain: applying blockchain to securely and scalably share clinical data[J]. Comput Struct Biotechnol J, 2018, 16: 16267-278.
- [3] Taherdoost H. Blockchain and healthcare: a critical analysis of progress and challenges in the last five years[J]. Blockchains, 2023, 1(2): 73-89.
- [4] Lacson R, Yu Yufei, Kuo T T, et al. Biomedical blockchain with practical implementations and quantitative evaluations: a systematic review[J]. J Am Med Inform Assoc, 2024, 31(6): 1423-1435.
- [5] 国家卫生健康委员会, 国家中医药管理局. 进一步改善护理服务行动计划(2023—2025年)[J]. 中国护理管理, 2023, 23(7): 961-963.
- [6] 曾友露. 支持高吞吐量区块链的块结构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] 王谦, 李瑞华, 袁野. 基于区块链技术的公立医院医疗设备管理模式研究[J]. 财经界, 2021(1): 71-73.
- [8] 张超, 李强, 陈子豪, 等. Medical Chain: 联盟式医疗区块链系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(8): 1495-1510.
- [9] 冯涛, 焦滢, 方君丽, 等. 基于联盟区块链的医疗健康数据安全模型[J]. 计算机科学, 2020, 47(4): 305-311.
- [10] 王春鸣, 周亚旭, 周莹, 等. 智慧医院建设创新医疗服务模式实践研究——以仁济医院MyBaby区块链项目为例[C]//中国医师协会健康传播工作委员会. 第三届健康中国创新传播大会暨第八届中国健康品牌建设大会论文集. 上海交通大学医学院附属仁济医院智慧医疗发展处; 上海交通大学医学院附属仁济医院财务处; 上海交通大学医学院附属仁济医院生殖医学中心; 上海交通大学医学院附属仁济医院; 2021: 54-55.
- [11] Drosatos G, Kaldoudi E. Blockchain applications in the biomedical domain: a scoping review[J]. Comput Struct Biotechnol J, 2019, 17: 229-240.
- [12] Chopade S S, Gupta H P, Dutta T. Survey on sensors and smart devices for IoT enabled intelligent healthcare system[J]. Wirel Pers Commun, 2023, 131(3): 31-39.
- [13] Kumar P G, Arindom C, Mehedi H, et al. Blockchain application in healthcare systems: a review[J]. Systems, 2023, 11(1): 38-38.
- [14] Dounia M, Emre C M S, Khaled S, et al. Blockchain for patient safety: use cases, opportunities and open challenges[J]. Data, 2022, 7(12): 182-182.
- [15] 郭亮. 探讨区块链技术在医疗集团病历共享中的运用[J]. 现代医院管理, 2023, 21(1): 104-107.
- [16] Zhong Botao, Gao Han, Ding Lieyun, et al. A blockchain-based life-cycle environmental management framework for hospitals in the COVID-19 context[J]. Engineering (Beijing), 2022, 20: 208-221.
- [17] Jamil F, Ahmad S, Iqbal N, et al. Towards a remote monitoring of patient vital signs based on IoT-based blockchain integrity management platforms in smart hospitals[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(8): 2195.
- [18] 陈巧, 毛玲红, 陈维敏, 等. 基于区块链的医疗设备共享云平台构建与应用探讨[J]. 医院管理论坛, 2022, 39(6): 81-84, 87.

- [19] Lakhan A, Dootio M A, Sodhro A H, et al. Cost-efficient service selection and execution and blockchain-enabled serverless network for internet of medical things[J]. *Math Biosci Eng*, 2021, 18 (6): 7344-7362.
- [20] Lakhan A, Mohammed M A, Rashid A N, et al. Smart-contract aware ethereum and client-fog-cloud healthcare system[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21 (12): 4093-4093.
- [21] Lakhan A, Morten Groenli T, Majumdar A, et al. Potent blockchain-enabled socket rpc internet of healthcare things (IoHT) framework for medical enterprises[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22 (12): 4346.
- [22] 李麟, 方芳, 冶金明. 基于医院医疗区块链平台的EMR设计与实现[J]. *生命科学仪器*, 2020, 18 (2): 59-64.
- [23] 王建国, 李术君. 基于区块链技术的电子处方共享流转模型[J]. *中国数字医学*, 2021, 16 (10): 52-55.
- [24] 王瑞锦, 余苏喆, 李悦, 等. 基于环签名的医疗区块链隐私数据共享模型[J]. *电子科技大学学报*, 2019, 48 (6): 886-892.
- [25] Aswini Y, Shams R, Pinapala G. Blockchain technology implementation challenges in supply chains-evidence from the case studies of multi-stakeholders[J]. *Int J Logist Manag*, 2022, 33 (5): 278-305.
- [26] 罗婷. 基于Hyperledger Fabric框架的区块链一致性性能的研究和实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [27] 靳碧媛. 基于区块链的医联体电子病历安全共享研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [28] 聂泳. 基于Hyperledger Fabric联盟链的共识机制优化[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2022.
- [29] 陈松斌, 赵敏, 张露, 等. 基于区块链的医联体数据共享模型研究[J]. *中国卫生信息管理杂志*, 2023, 20 (1): 116-121.
- [30] 张馨榕, 王偲葳, 赵彩霞. 基于区块链技术的电子病历系统[J]. *软件*, 2024, 45 (7): 122-124.
- [31] 庄海燕. 基于私有区块链的共识算法性能分析[J]. *滨州学院学报*, 2020, 36 (2): 63-68.
- [32] Hang Lei, Choi E, Kim D. A novel EMR integrity management based on a medical blockchain platform in hospital[J]. *Electronics*, 2019, 8 (4): 467.
- [33] Hylock R H, Zeng Xiaoming. A blockchain framework for patient-centered health records and exchange (HealthChain): evaluation and proof-of-concept study[J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21 (8): e13592.
- [34] Shen Bingqing, Guo Jingzhi, Yang Yilong. MedChain: efficient healthcare data sharing via blockchain[J]. *Appl Sci*, 2019, 9 (6): 1207.
- [35] 景旭, 邢胜飞. 基于PBFT的猕猴桃溯源联盟链应用访问控制方案[J]. *农业机械学报*, 2023, 54 (1): 183-195.
- [36] Wen Haiying, Wei Meiyang, Du Danlei, et al. A blockchain-based privacy preservation scheme in mobile medical[J]. *Secur Commun Netw*, 2022.
- [37] 李有星. 区块链应用中的个人信息删除权与更正权问题研究[J]. *浙江树人大学学报*, 2022, 22 (2): 1-8,17.
- [38] 刘惠明, 潘珺瑜. 医疗区块链技术运用的法律规制探究[J]. *卫生软科学*, 2023, 37 (12): 28-33.
- [39] 曹策俊, 何瑜凡, 黄浩, 等. 区块链赋能家用医疗产品质量监管的多方博弈策略研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2025, 31 (10): 3884-3900.
- [40] 柏松, 王晓勇, 胡胜利. 基于区块链和代理重加密的医疗物联网数据安全管理系统[J]. *中国计量大学学报*, 2024, 35 (1): 80-88.
- [41] 陈思源, 谭艾迪, 魏双剑, 等. 基于区块链的医疗影像数据人工智能检测模型[J]. *网络安全与数据治理*, 2022, 41 (10): 21-25.
- [42] 李莉, 吴怡, 杨祉坤, 等. 基于分区型区块链医疗电子病历共享方案[J]. *计算机应用*, 2022, 42 (1): 183-190.
- [43] 唐晓华. 面向互操作一致性的医疗信息资源共享区块链模型研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2020.
- [44] 何冰雪. 基于区块链的健康信息共享系统研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.