



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Engineering Management—Article

新冠病毒肺炎疫情下基于区块链的医院全生命周期环境管理框架

钟波涛^{a,b}, 高寒^{a,b,c}, 丁烈云^{a,b,*}, 王宇航^{a,b}

^a National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

^b School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

^c Department of Civil and Building Systems, Technische Universität Berlin, Berlin 13156, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 March 2022

Revised 13 May 2022

Accepted 16 June 2022

Available online 7 October 2022

关键词

区块链

环境管理

院内感染控制

工作质量管理

生命周期可追溯性

摘要

新冠病毒肺炎疫情持续蔓延,世界各国纷纷通过新建或改造的方式建设了一批应急医院。医院的全生命周期环境管理对预防新冠病毒肺炎院内感染至关重要。为应对病例的激增,新建医院往往需要快速交付使用,工期被极大地压缩,工作流程审批速度加快,无法按照常规流程进行质量检查和验收,增加了感染预防措施执行质量的控制难度。本研究探索了区块链技术在改造应急医院项目工作质量检查流程中的潜力,以保障快速建造模式下医院感染控制措施的有力执行。建立了基于区块链的全生命周期环境管理框架,用于追溯医院在设计、施工和运营阶段中关键感染控制措施的执行过程。当无法及时检查某些工序时,该框架能够支持工序完成后再检查。本研究通过用例阐述了该框架的具体功能和应用场景,为医院快速建造模式下的环境管理提供了基于区块链的解决方案。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

新冠病毒肺炎 (COVID-19) 疫情迅速蔓延,已形成全球大流行,许多患者在大流行期间发展为重症并需要住院治疗[1]。重症患者的病毒载量高,增加了院内感染的风险[2]。世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 泛美区域办事处的报道显示,在2020年9月之前,全球已有超过57万医护人员受到感染[3]。一些医疗机构的数据表明,医护人员的感染风险比一般人高10倍以上[4]。在英国第一波大流行中,超过十分之一的病例是在医院被感染的[5]。致病性生物气溶胶对医院空气和环境表面的污染被认为是医院交叉感染的主要途径[6]。

医院的环境管理需要多专业协作。传统的医院环境感染控制策略,包括严格佩戴个人防护用品 (personal protective equipment, PPE) 以及定期的医院消毒和清洁[7–9]。同时为了阻断病原体的空气传播途径,通风、过滤、室内压力梯度控制和空气循环控制等工程措施在医院环境管理中也至关重要[10–12]。研究表明,在不改变医护人员工作流线的情况下增加工程感染控制措施,能够将院内感染数量减少45% [13]。通常运营阶段的医院环境管理最受重视,而运营期间的医院的环境安全直接受到空调系统设计、布局流线设计、设备安装质量,以及隔离病房施工质量等设计和施工阶段工作质量的影响。例如,施工验收时,隔离病房的换气率不达标会增加病毒空气传播的风险

* Corresponding author.

E-mail address: dly@hust.edu.cn (L. Ding).

[14]。要想有效控制院内感染，需要在设计、施工和运营阶段采取综合而有针对性的措施。

为了应对病例的激增，传染病医院的新建和改造工作必须在短时间内完成。快速建造模式下，设计和施工过程中，无法像常规项目一样进行准确、细致的工作检查，给工作质量控制带来挑战，增加医院运营阶段的感染风险。在医院运营期间，许多前线医护人员紧急上岗，未具备足够的院内感染预防专业知识[15]。研究显示，某医院258例消毒措施中正确执行率仅为35% [16]。负压病房缺乏日常维护或设备意外故障会导致病原体传播。大流行高峰期间英国伦敦在52.3%的物体表面和45.2%的空气样本中检测到病毒的RNA [17]。无论是在医院的设计和施工阶段还是在运营阶段，都需要通过严格执行感染控制措施来减少院内感染。为严格控制院内感染风险，需要对关键防控措施执行情况进行可靠的记录，以此来保证责任追溯。

区块链是一种能够提高数据安全性、透明度和可追溯性的新兴信息技术，已经在供应链管理[18–19]和医疗数据管理[20–21]等领域中显示出应用潜力。区块链能够保证数据安全，防止数据丢失、被损坏和被篡改。许多研究都探讨了区块链技术在抗击COVID-19疫情大流行中的作用。目前大多数研究都集中在区块链在疫情早期预警和疫苗接种管理中的应用，包括密切接触者追踪[22–24]、大流行监测[25–27]、疫苗证书验证[28]、电子病历管理[29]和疫苗供应链跟踪[30]。然而，目前很少有研究探讨对于医院的环境管理挑战，如何通过区块链技术来帮助预防和控制院内感染。医院的快速建造和交付要求给设计、施工、运营阶段的工作质量控制带来挑战，关键环节的工作失误会造成院内感染的风险。在此背景下，本研究旨在回答以下两个研究问题：

- 如何搭建区块链系统来帮助克服医院的院内感染控制的挑战？
- 如何通过区块链技术解决快速建造模式下医院环境质量控制难题？

为了回答上述研究问题，本文提出了一个基于区块链的医院全生命周期环境管理框架，以确保工作流程的可追溯性和可问责性。借助区块链的数据不可否认的特点，对于某些工作，在紧急情况下如果无法及时检查，可以将工作过程记录存储在区块链上，之后再进行检查。区块链的不可篡改存储特性能够间接提高参与方的责任意识，有助于降低数据被操纵的风险，使工作流程更加透明，进一步助力保障医院环境安全。此外，智能合约可以监控工序的完成情况，并通过向运营人员发送提醒来支持实时环境监测和设备维护。本研究的主要贡献如下：首先，本研究建

立了基于区块链的医院感染控制解决方案，填补了区块链技术在医院环境管理领域中的研究空白。其次，本研究提出了一种由区块链技术支撑的工作质量管理流程，以应对快速建造模式下质量管理挑战。

其余部分组织如下。第2部分综述了相关文献并分析了当前领域的研究空白。第3部分描述了所提出的基于区块链的框架的概念模型和系统架构。第4部分阐述了所提出的框架在医院全生命周期环境质量管理中的应用。第5部分分析了所提出的方案的性能。第6部分讨论研究的理论和管理意义。最后，第7部分总结全文。

2. 相关工作

2.1. 基于区块链的COVID-19医疗保健相关应用

区块链的概念是由中本聪[31]在2008年所提出的，旨在解决加密货币的双花问题。区块链是一种分布式账本，按时间顺序不可变地记录点对点（peer-to-peer, P2P）网络中所有参与者之间共享的所有数据[32]。链上的节点在P2P网络上传播交易信息，每个节点都有一个账本的副本[33]，P2P传播机制确保了交易记录不会被篡改。虽然区块链技术最初是为了解决数字货币交易（即比特币）的安全和隐私问题而提出的，但区块链的应用并不局限于数字货币，很多学者也在研究区块链能否在其他行业产生颠覆性应用。

已经有一些学者研究了区块链对于COVID-19疫情大流行中的各种问题的解决方案，相关研究如表1 [22–23, 25–26, 30, 34–38]所示，主要涉及COVID-19疫情大流行监测、健康和疫苗接种认证等领域。区块链在医疗保健领域的第一种应用是COVID-19疫情大流行监测。例如，Ouyang等[25]提出了一个基于区块链和智能合约的COVID-19疫情协同预警框架，以降低预警决策中人为错误的风险。Lee等[26]开发了一种基于区块链的架构，可以实现全球传染病监测和感染病例跟踪。第二种类型的区块链医疗保健应用与健康及疫苗接种证书有关。Eisenstadt等[34]提出了一种结合加密算法的区块链框架，在移动应用程序中实现感染检测结果的防篡改和永久性存证。第三种类型的区块链医疗保健应用是疫苗、PPE和药物等物品的供应链管理[39–43]。还有一种重要的应用场景是密切接触者追踪，Bandara等[44]开发了一个基于区块链的COVID-19密切接触者追踪平台，可以通知接触阳性病例的人，同时保护被感染者的隐私。上述研究探讨了医疗保健领域中通过区块链技术来帮助遏制大流行的案例。这些研究涉及多种基于区块链的疫情控制手段，然而目前还没有研究讨论区块链

技术对于院内感染预防的作用。

2.2. 区块链在项目管理中的应用

项目中往往会出现大量的纠纷[45]，区块链技术在项目管理领域目前引起了许多关注。区块链技术可以为项目许多方面助力，如提升项目各方的信任、提升信息共享和流程自动化水平。一些研究人员已经开始研究区块链技术在项目管理中的潜在应用。Turk 和 Klinc [46]指出了项目管理中存在的挑战，并指出区块链可以提升工程日志和完工记录的可信度。Li 等[47]表示，区块链的不可篡改性、可追溯性、透明性，可以提升项目的可审计性和工程人员责任意识，以此减少工程纠纷。

除了上述理论研究以外，一些学者还研究了如何将区块链与特定的项目管理流程相结合。项目的完成需要多方参与，项目管理过程中需要界定各方的责任。Pradeep 等[48]设计了一个基于区块链的设计管理流程，旨在提供设计过程中的责任追溯。Sheng 等[49]开发了一个基于区块链的施工质量管理平台，为施工过程提供质量缺陷追溯。Lu 等[50]提出了一个基于区块链的框架，在建筑工程监管中实现信息共享、防篡改和可追溯性。

此外，区块链也被应用在建筑供应链管理[51–52]和项目交付管理[53]中。虽然目前已经提出了很多区块链在工程管理中的应用，但是鲜有研究讨论如何将区块链应用到应急工程的管理之中。为了满足 COVID-19 疫情下不断增长的医疗需求，目前世界各地都已经建造了许多应急医院。进度、成本和质量被称为项目管理中的“铁三角”[54]。应急医院的建造工期压缩给工程质量管理带来了很大的挑战[55]。以武汉的雷神山和火神山医院为例，急剧压缩的工期给施工过程监管和质量检查带来了很大的难度，在有限时间内去完成每个工序的细致检查的难度加大[56]。本研究旨在利用区块链技术解决 COVID-19 疫情紧急情况下的项目快速交付要求带来的质量管理挑战。本研

究提出的基于区块链的医院环境管理框架可以提供工作过程记录的不可变存储，以支持紧急情况下无法及时检查的工作在之后进行补检。

2.3. 不同区块链对比

目前，业界存在多种类型的区块链方案，根据去中心化程度和透明程度划分为以下三类：公有区块链、私有区块链和联盟区块链[57]。表 2 对比了三种不同区块链的差异。

• **公有区块链**：公有区块链通常被视为无需许可的区块链[58]。公有区块链对所有想要加入网络的节点开放。所有节点都可以在公有区块链上进行查询和读写数据。公有区块链不被第三方机构所控制，是完全去中心化的[59]。公有区块链上上传确认后的交易数据无法更改。知名的公有区块链包括比特币和以太坊[60–61]。因为链上的所有节点需要就每笔交易达成共识[62–63]，所以公有区块链平台的交易速度相对较慢。工作量证明（proof of work, PoW）和权益证明（proof of stake, PoS）[64]是公有区块链中最常用的共识机制，可以增强区块链上交易确认的可靠性，但同时也降低了交易速度。例如，比特币每秒大约处理 7 笔交易，而 Visa 每秒可以完成超过 20 000 笔交易[47]。

• **私有区块链**：私有区块链网络只允许获得许可的用户参与[62]。私有区块链不是完全去中心化的，由单一组织管理，并要求参与者申请读取和写入区块链的权限[65]。私有区块链网络上的数据对公众不可见，只能由网络参与节点查看。与公有区块链相比，私有区块链提供了更多的数据隐私保护。私有区块链的节点更少，从而加快了交易速度，私有区块链更适合于信息只需要由有限数量的参与者共享的情况。

• **联盟区块链**：联盟区块链是私有区块链的一种特殊形式，但它由多个组织而不是单一组织进行管理和维护

表 1 基于区块链的 COVID-19 医疗保健应用程序

Category	Related topics in the field	Research focus	Publications
Healthcare	Pandemic control and surveillance	COVID-19 early warning	[25]
		Global infectious disease surveillance and infected case tracking	[26]
	Health and immunity certificates	Verification of tamper-proof test results	[34]
		Medical supply-chain management	Vaccine supply management
			Medical equipment supply-chain management
		Supply-chain management of ventilators and PPE	[36]
Contact tracing		Privacy-preserved contact tracing	[22]
		Contact information sharing	[23]
Electronic medical records		Patient health information sharing	[37]
		COVID-19 patient reports sharing	[38]

[66]。联盟区块链具有与私有区块链类似的特性，如交易确认速度快、存储成本低和隐私保护强。然而，作为一个部分去中心化的区块链，它受到多个预先设定的组织监管，以防止单点操纵[67]。联盟区块链中的管理节点可以创建通道，通道上区块链参与节点之间可以互相通信。此外，在联盟区块链上可以针对不同的业务活动设置不同的通道，实现交易数据的隔离。当多个机构在同一行业中合作并需要可信的交易环境时，联盟区块链通常是一个更好的解决方案。

应急医院的设计、施工、运营过程涉及多个不同参与方，如材料供应商、施工人员、设计师、医护人员等。设计文件、施工记录等项目文档有隐私保护的要求，需要对不同参与者分配不同的业务权限，联盟区块链更适合本研究涉及的场景。此外，与公有区块链相比，因为无需挖

矿，联盟区块链的实施成本更低。

3. 基于区块链的医院环境管理框架

在设计、施工和运营阶段履行关键的感染控制预防措施对于保障医院的环境安全至关重要，必须对关键措施的执行过程进行严格的监控。以下部分介绍本研究提出的概念框架和系统架构，以提高快速建造模式下医院环境管理相关关键过程记录的可追溯性。

3.1. 概念模型

所提出的基于区块链的框架的概念模型如图1所示。该模型由5个关键部分组成：业务层、数据追溯层、区块链网络层、链下层和用户层。

表2 公有、私有和联盟区块链的比较

Blockchain type	Public	Private	Consortium
Access level	Anyone	Single organization	Multiple organizations
Authority	Highly decentralized	Partially decentralized	Partially decentralized
Transaction reading/writing	Anyone	Single organization	Selected multiple organizations
Consensus mechanisms	Distributed consensus (PoW, PoS)	Voting/multi-party consensus	Voting/multi-party consensus
Speed	Slow	Fast	Fast
Scalability	Low	High	High

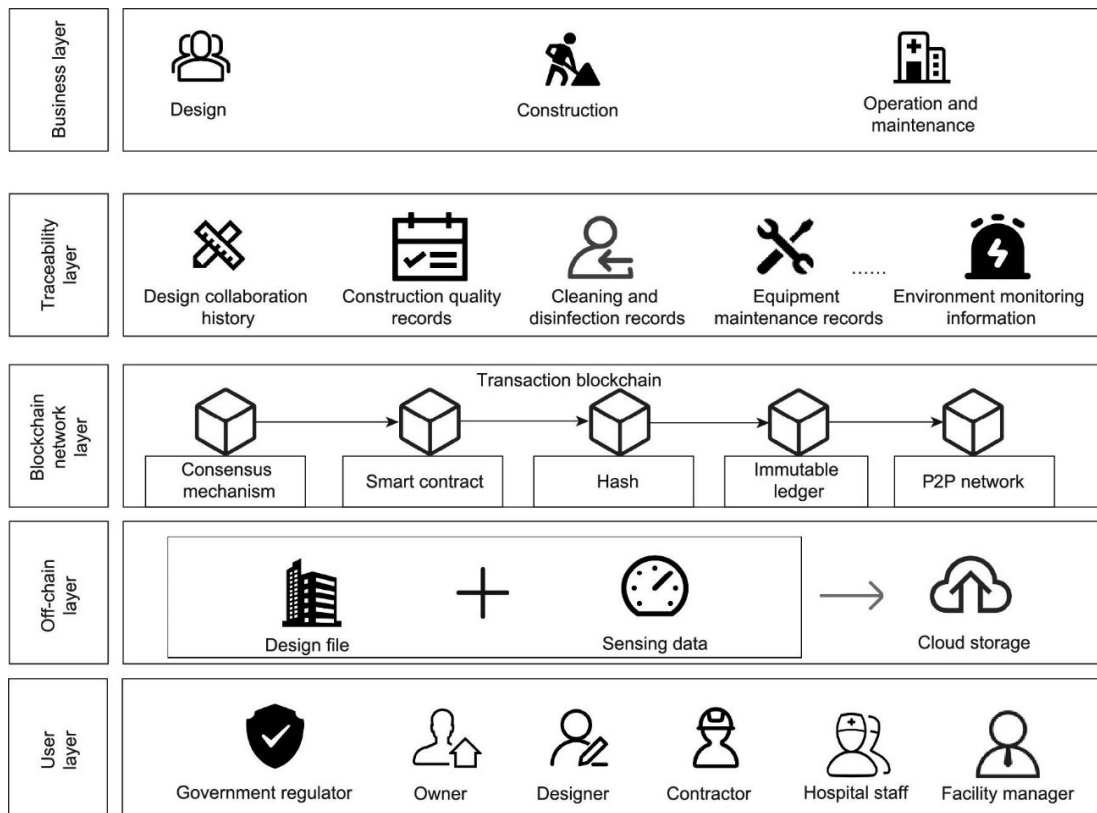


图1. 概念模型。

业务层描述了传染病医院项目设计、施工、运营维护阶段的主要业务活动，涉及与感染控制措施相关的工作流程信息。这些信息被记录并存储到区块链中，使得工作质量可追溯。

数据追溯层记录与医院感染预防相关的项目生命周期中的关键过程信息。美国供热、制冷和空调工程师协会（American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE），世界卫生组织，以及各国的疾病控制和预防中心（Centers for Disease Control and Prevention, CDC）都发布了有关医院设计、施工和运营阶段感染控制的指南和规定。在设计阶段，设计人员必须检查设计是否符合感染控制的要求。在施工阶段，关键施工质量记录需要可信的存储，特别是负压病房施工质量验收记录（如气压、气密性、气流方向等）。在运维阶段，物联网（IoT）传感器如差压计、温度和湿度传感器用于监控环境指标的变化，保证运营安全。

区块链网络层记录不同参与者之间的信息交互，使得医院生命周期数据透明可追溯，助力质量缺陷溯源。区块链网络层包括共识机制、智能合约和哈希。共识机制是一种多方协作机制，协同多个参与者达成一致，确保数据交互过程可信而稳定的持续运行。智能合约是基于业务逻辑而编写的规则。当规则执行的条件满足时，系统将自动执

行相应的操作。哈希是一种信息加密算法，在区块链中用于验证参与者的数字身份并存储加密数据。

链下层存储设计文件、传感数据等大容量数据，并提取其中关键信息，发送到区块链网络层。区块链上的存储成本很高，不适合存储大文件和高频数据。设计文件、物联网监测数据、一些大文件、非结构化文档都存储在链下云服务器中，而这些文件的哈希值被存储在区块链上。

用户层包含区块链上的不同参与方，涵盖项目的整个生命周期。在本研究涉及的场景中，用户包括政府监管机构、业主、设计师、承包商、医院工作人员、设施管理人员等。每个用户都有不同的数据访问权限，并可以参与不同的交易，区块链网络只允许有电子身份的授权用户写入数据和发起交易。

3.2. 系统架构

以下是基于区块链的医院全生命周期环境管理系统架构。基于数据隐私和访问权限的设置需求，选择超级账本 Hyperledger Fabric（以下简称 Fabric）来构建区块链网络。Fabric 是 Linux 基金会启动的开源联盟区块链项目，是目前最流行的联盟区块链网络框架[49]。本研究设计的系统架构如图 2 所示。该架构集成了区块链、物联网和云服务，通过分布式应用程序（DApp）来支持医院的环境管理，下面阐述该架构的具体组成。

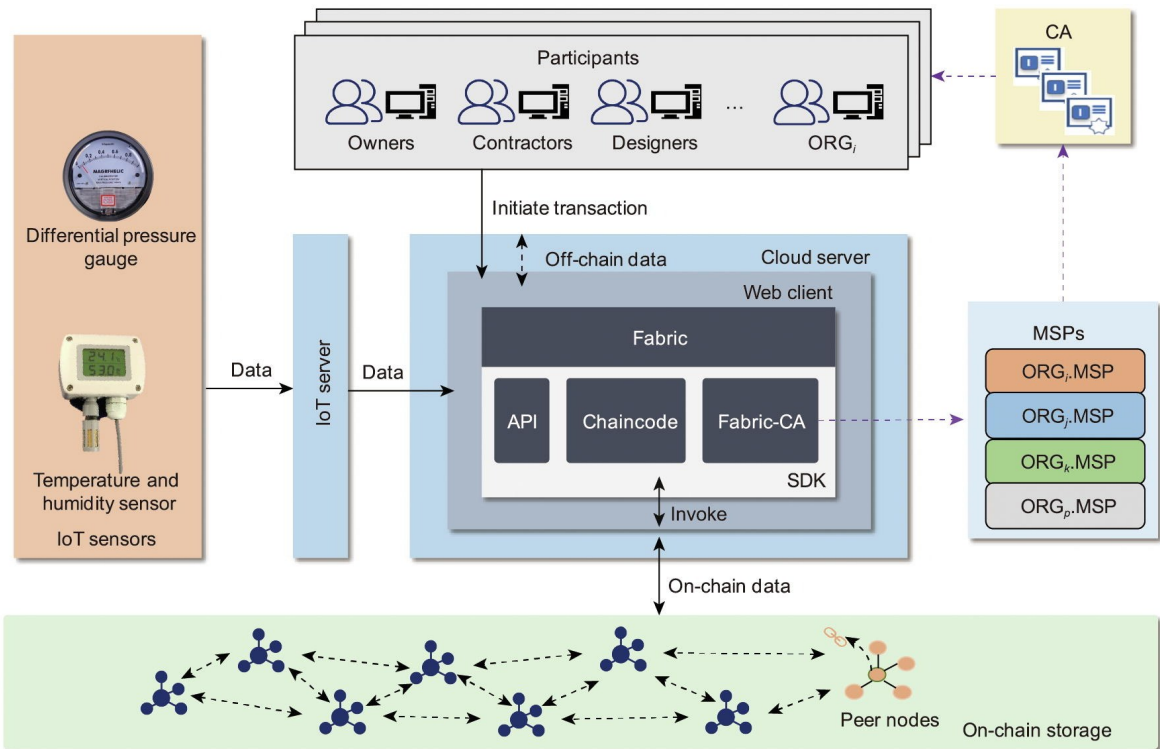


图2. 基于区块链的医院生命周期环境管理系统架构。CA：证书颁发机构；MSP：成员服务提供者；API：应用程序编程接口；ORG：组织；SDK：软件开发工具包。

3.2.1. 身份管理

参与者必须通过区块链网络中的成员服务提供商 (membership service provider, MSP) 注册数字身份。MSP 是一种使参与者能够将其身份转换为可由区块链网络识别的数字证书的机制。MSP 通过 Fabric 的证书颁发机构 (certificate authority, CA) 来定义受信任的组织, 并为组织中的成员设置在区块链网络中的角色。每个成员都被分配一个公钥和一个私钥来证明他们的身份, 同时公私钥机制又实现了对数据的访问权限控制。业主、设计师、承包商、医院工作人员、设施经理和监管机构等利益相关者被视为联盟区块链中的不同组织。组织中每个对等节点的资源记录的访问权限由 MSP 确定。物联网设备也需要在区块链网络上注册, 当新的物联网设备被添加到网络时, 将从物联网设备的产品信息中生成哈希值作为注册信息。一旦传感器数据上传到区块链, 设备产品信息的哈希值也会被上传到区块链, 可以防止在物联网传感器前端收集的数据被篡改。

在 Fabric 中, 可以创建单独的通道来隔离业务数据, 通道用于不同组织之间的通信。不同组织的不同成员可以加入通道, 一个通道对应一条区块链。通道中的对等节点可以相互发起交易并共享相同的分布式账本。交易由 Fabric 中的链码调用, 链码保存世界状态和账本数据。例如, 可选择两个承包商节点、一个业主节点、一个政府监管节点、一个医院工作人员节点来形成一个通道。每个节点都可以通过 Web 客户端发送信息, 并调用 Fabric 中的链码函数来启动交易。交易被验证后, 更新的交易信息将在通道中被广播, 以此确保通道上的信息被同步, 而不会被未经授权的第三方篡改。

3.2.2. 链下数据管理

基于区块链的系统架构可以为项目参与者提供数据防篡改和可追溯的功能。然而, 鉴于区块链的分布式存储特性, 项目中的一些数据因为容量太大, 会降低平台的运行速度而无法存储在链上。同时, 出于隐私保护需求, 一些机密数据无法公开存储在链上。本研究提供了一种链下数据存储方案。

该方案基于 Fabric 区块链架构, 区块链 Web 客户端上可以同步项目参与者的状态信息。云服务用于处理链下数据, Fabric 用于处理链上数据。参与者被分配不同的项目数据访问权限, 并通过 Web 客户端传递生命周期业务数据。

隐私要求和数据量是选择链上或链下存储的标准。链下数据包括大型文件和文档, 如传感器数据、设计文件和

表单。链上数据主要涉及传染病医院环境管理中的流程状态信息, 如任务检查信息、预警信息、异常环境状态等。

以设计文件和传感数据的传递为例来说明链下信息流, 过程如图 3 所示。区块链能够给协同设计过程提供可信的交互环境。项目参与方将设计文件通过 Web 客户端上传到云端, 系统自动生成设计文件的哈希值。同时设计文件的文件名、时间戳、哈希值、数字签名等信息都会被上传到区块链网络作为不可变的存证。当之后验证设计文件版本时, 会再次计算设计文件的哈希值来确定设计文件是否被更改。另外, 所有的传感数据都会被上传到云端, 同时生成传感数据的哈希值并且存储到链上。

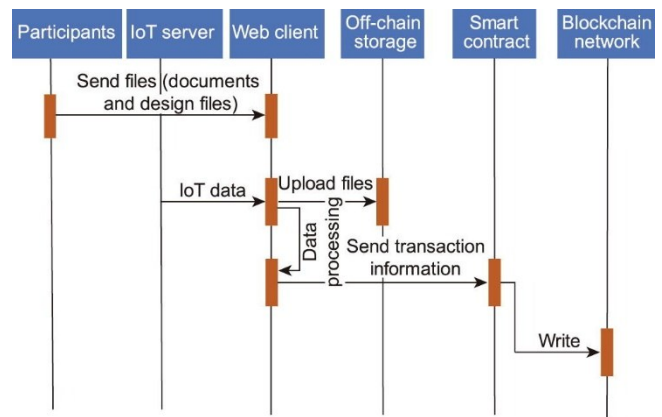


图 3. 链下信息流。

3.2.3. 智能合约

智能合约是应用系统与区块链底层交互的中间件, 用户通过智能合约与分布式账本进行数据交互。下面描述与智能合约的功能相关的智能合约算法。

- **协同工作智能合约:** 这个智能合约用于实现文档的创建和审批流程。该智能合约在项目生命周期中的应用场景是设计协同和合规性审查。算法 1、2、3 描述了文档的生命周期 (创建、反馈、修改)。首先, 一个文档被创建后上传到链下层进行存储, 文档的哈希值被生成, 同时文档上传者需要在文档上附上电子签名, 生成交易 TX_h 并记录到区块链网络中。然后, 当文档被其他节点审查时, 审查人员需要在文档上添加反馈, 反馈交易 $TX_{h-feedback}$ 也会被记录到区块链账本上。当用户需要对已经上传到区块链的文档进行更新时, 智能合约会通过用户的公钥来自动验证原始文档上的数字签名, 然后, 文档的修改交易 $TX_{h-revision}$ 被生成并且被记录到区块链上。

- **自动表单检查智能合约:** 可以预定义多种表单 (如施工质量检查表和医院日常维护记录表), 以支持项目生命周期中的自动表单检查。算法 4 展示了自动表单检查的

Algorithm 1. Generate a document for approval.

Input: Document

Output: Document transaction TX_h

```

1  Foreach Document do
2  Send Document to off-chain storage node;
3  Off-chain storage node returns HD = Hash(Document);
4   $Ts_h = \text{getTimeStamp}()$ ;
5  Generate signature of WorkflowInvoker  $Sig_h$ ;
6  Generate document creation transaction id  $IDD_h$ ;
7  Record HD,  $Ts_h$ ,  $Sig_h$ ,  $IDD_h$  in the transaction and generate  $TX_h$ ;
8  return  $TX_h$ ;
9  End

```

Algorithm 2. Feedback on a document.

Input: Document id IDD_h

Output: Feedback transaction $TX_{h-feedback}$

```

1 Search  $IDD_h$  and download the document from the off-chain storage node;
2 Add a comment on the document then generate a new file;
3 Send the new file to the off-chain storage node;
4 Off-chain storage node return HF = Hash (File);
5 Generate a timestamp  $Ts_h$ ;
6 Generate signature of reviewer  $Sig_{h-reviewer}$ ;
7 Record HF,  $Ts_h$ ,  $Sig_{h-reviewer}$  in the transaction and generate  $TX_{h-feedback}$ ;
8 Return  $TX_{h-feedback}$ ;
9 End

```

Algorithm 3. Update an existing document.

Input: Document id IDD_{h1} (old version), new_document (new version), signature on existing document $Sig_{h-operator}$'s public key PK;

Output: Document revision transaction $TX_{h-revision}$

```

1 If  $Sig_h = PK$  then
2   Send document2 to the off-chain storage node;
3   Link the old version's document id  $IDD_{h1}$  with the document id  $IDD_{h-new}$  in the document manager;
4   Record the old version's transaction detail and generate  $TX_{h-revision}$ ;
5   Return  $TX_{h-revision}$ ;
6 Else
7   Reject the transaction
8 End

```

算法逻辑。表单中不同检查项的阈值在智能合约中被预先定义。当用户在 Web 界面中填写表单并确认提交时，智能合约会自动检查表单中的值是否在允许范围内。如果所有值都在允许范围内，则表单状态被自动设置为“Pass”。如果表单中存在超出允许范围的值，则表单状态将被自动设置为“Fail”，并将警告通知发送给相关负责人，同时表单检查交易 TX_{h-form} 会自动被上传到区块链网络。

- **环境预警智能合约：**在运营阶段，影响环境安全的

Algorithm 4. Automatic form checking.

Input: Form, Lower_limit_value, Upper_limit_value

Output: Form checking transaction TX_{h-form}

```

1 Search Lower_limit_value and Upper_limit_value for each Item in Form;
2 If all values are in value_range[Lower_limit_value, Upper_limit_value] then
3   Set Form_state as Pass;
4   Send Form to the off-chain storage node;
5   Off-chain storage node returns HF=Hash (Form);
6    $Ts_h = \text{getTimeStamp}()$ ;
7   Generate form creation transaction id  $IDF_h$ ;
8   Record HF,  $Ts_h$ , Form_state,  $IDF_h$  in the transaction and generate  $TX_{h-form}$ ;
9   return  $TX_{h-form}$ ;
10 Else
11   Send warning information to the form creator node;
12   Set Form_state as Fail;
13   Send Form to the off-chain storage node;
14   Off-chain storage node returns HF = Hash(Form);
15    $Ts_h = \text{getTimeStamp}()$ ;
16   Generate form creation transaction id  $IDF_h$ ;
17   Record HF,  $Ts_h$ , Form_state,  $IDF_h$  in the transaction and generate  $TX_{h-form}$ ;
18   Return  $TX_{h-form}$ ;
19 End

```

室内环境参数由物联网传感器所监控。用于监测医院运维阶段室内环境参数的算法5如下。每个物联网传感器被分配唯一的ID，传感器身份信息的哈希值被上传到区块链账本，从而保证了数据采集源头可信。该算法在医院运营阶段会持续判断环境参数是否超过标准范围，一旦室内环境参数超过阈值一段时间，会自动向运维人员发送预警，并将环境参数预警交易 TX_{h-EW} 发送给区块链网络中的其他相关人员。

4. 用例

本节通过设计、施工和运营阶段的用例来阐述区块链如何在快速建造的背景下助力医院的感染控制。Axure RP 9 是一个 Web 原型设计工具，在本研究中用来设计用例中的用户界面。这些用例的场景涉及世界卫生组织、各国疾病控制和预防中心，以及美国供热、制冷与空调工程师协会建议的 COVID-19 疫情背景下设计、施工、运营阶段的关键感染措施。

在 COVID-19 疫情期间，许多应急医院被建造，同时一些医院改造了一些病房作为负压病房用于重症患者的治疗。世界卫生组织和美国供热、制冷与空调工程师协会颁

Algorithm 5. IoT-based environmental warning.**Input:** sensor_ID, parameter_threshold_range, time_interval**Output:** Environmental warning transaction TX_{h-EW}

```

1 Search sensor_ID in Iot Server, get current_time, get sensor_value at
  current_time;
2 If current_sensor_value is not within environmental_threshold_range
  then
3 Get average_sensor_value in time_range[current_time, (current_time +
  time_interval)]
4 If average_sensor_value is not within parameter_threshold_range then
5 Send records in time_range[current_time, (current_time + time_inter-
  val)] to off-chain storage node;
6 Off-chain storage node returns HD = Hash(records);
7  $Ts_h = \text{getTimeStamp}()$ ;
8 Generate warning_information including warning content, space_ID,
  sensor_ID, etc;
9 Generate environmental warning transaction  $TX_{h-EW}$ , including HD,  $Ts_h$ ,
  warning_information, etc;
10 Send  $TX_{h-EW}$  to maintenance personnel;
11 Return  $TX_{h-EW}$ ;
12 End
13 End

```

布的传染病控制指南提供了一些在设计阶段减少空气中传染性气溶胶暴露的设计措施，其中涵盖不同区域的布局设计（污染区、半污染区、清洁区、医护通道、患者通道），负压病房设计，通风、过滤和空气消毒等多个方面[68–69]。本研究提出的基于区块链的框架可以改变设计协同和审查的流程，并且促进设计责任控制，能对可能造成

成医院环境安全风险的设计失误进行溯源；同时当由于工期紧张无法进行细致的设计审查时，能够保证存储的设计文件不被篡改，支持事后再审查。

正常情况下医疗设施的新建和改造需要一个循环往复的设计审查过程，如图4所示。以一个典型的设计审查场景为例，首先，不同学科的设计师完成他们的设计，并将设计文件提交给设计团队负责人。然后，设计团队负责人检查是否符合设计要求。如果审查结果符合要求，则上传设计文档并等待政府监管机构审批。在快速交付模式下，往往缺少足够的时间来完成细致设计审查以获得行政审批，设计师必须对自己的工作质量承担更多的责任。为了满足快速交付的需求，本研究中开发的框架提供了一种基于区块链的设计审查工作流程，允许推迟设计文件审查，以便施工可以更早开始，为项目交付争取时间。区块链为设计文件提供不变性和可追溯性以实现设计责任控制。由于区块链的分布式存储特性，设计文件的每次上传和修改都记录在区块链上，并附有时间戳和设计人员的数字签名，因此设计文件无法被篡改。如图5所示，如果在施工或运营阶段出现问题，政府监管机构可以先批准设计，然后再审查设计文件，可以减少设计审查所耗费的时间。所有设计文件都存储在区块链下，设计文件对应的哈希值存储在区块链上，设计师的签名和时间戳不可篡改。该方案可以缩短设计审批流程，同时增强设计师的工作责任意识。

图6显示了设计的系统原型中设计协作场景的截图。

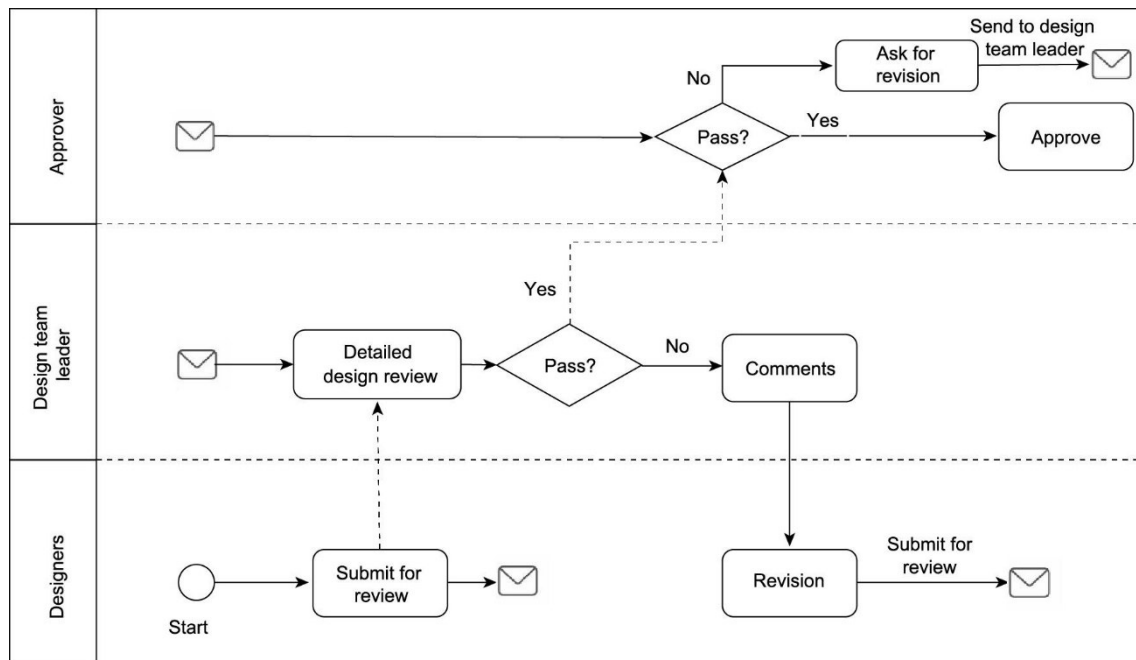


图4. 正常情况下医院新建或改造的典型设计审查流程。

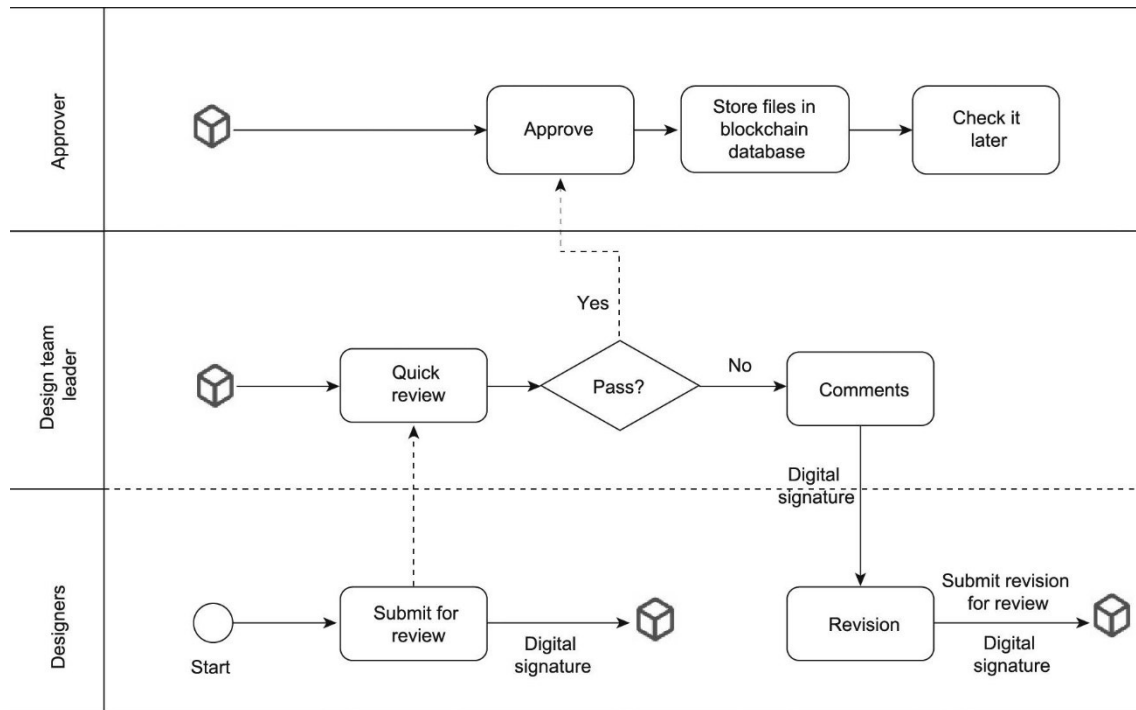


图5. 在快速交付要求下基于区块链的设计审查流程。

设计人员将设计文件上传到 Web 客户端，原文件被存储在云上，而文件的哈希值被存储在区块链上。数字签名、时间戳、文件名和文件标识（哈希）记录被保存在区块链上作为设计协作的历史记录，以此来保证设计过程的可追溯。这些记录被不可变地存储在区块链中。所有记录可以被追溯，但无法被篡改。例如，如果在医院运营阶段设备维护人员检测到负压病房的通风系统故障，可以在区块链

上搜索带有时间戳和设计负责人数字签名的供暖、通风和空调（heating, ventilation, and air conditioning, HVAC）设计文件以及完整的设计审查记录，这样可以加强设计追责和设计质量的可追溯性。区块链可以记录所有设计过程，设计文件被加密并生成哈希值，哈希值存储在链上。设计文件的哈希值还可用于检查设计文件版本的一致性。

以下内容阐述了本文提出的基于区块链的框架如何在

Design Collaboration History						
Design File	Layout design-v1					
Timestamp	2020-9-19 09:13					
Creator	hospital staff@hospital2020.com					
Design File Type	Layout design					
Linked File	Design review comments.pdf					
Transaction Hash	39f4545435feac9bd4d55c148f61d6eda34f95e0af4993c5e3c08adb16bf299d					
▶ Design Files History						
Transaction Hash	Timestamp	Design File	Linked File	Creator	Transaction Status	
c480a5194fe164...	2020-9-30 21:28	HVAC design-v2	HVAC design.pdf	MEP.designer@h..	Finish	
dd0176aa920a96...	2020-9-23 09:59	HVAC design-v1	Design review comments.pdf	Reviewer@h..	Finish	
2f26ba125febe6f...	2020-9-23 08:35	HVAC design-v1	HVAC design.pdf	MEP.designer@h..	Finish	
39f4545435feac9...	2020-9-19 09:13	Layout design-v1	Design review comments.pdf	Reviewer@h..	Finish	
e2ace6fdc5248e7...	2020-9-17 12:13	Layout design-v1	Layout design.pdf	architect.designe..	Finish	

图6. 原型的截图（通过 Axure RP 9 设计）——基于区块链的设计协作。

快速交付模式下改变施工验收流程和工作模式，并同时保证交付质量。在以往的施工工序验收流程（图7）中，只有在完成前一个工序验收之后，才能批准开始下一道工序。在快速建造的要求下，施工工期被急剧压缩，无法按照常规工作流程进行质量检查及验收。如图8所示，在基于区块链的施工质量检查流程中，施工过程被不可更改地记录在区块链上，这样可以实现一些特定工序先完成区块链记录并通过简单的快速检查后，直接审批开始下一道工序，之后再仔细检查区块链上存储的不可篡改的施工过程记录。

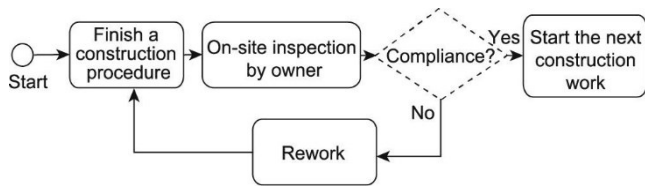


图7. 常规项目施工过程检查流程。

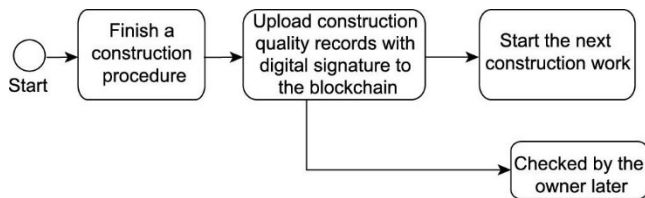


图8. 快速建造模式下基于区块链的施工检查流程。

根据《医疗机构环境感染控制指南》(Guidelines for environmental infection control in health-care facilities)

[70]，负压病房的施工质量对医院的环境安全至关重要，在医院建设或改造过程中必须对施工质量进行严格把关。负压病房中通风、过滤、空气净化系统的施工质量需要得到严格保证。当负压隔离病房建设完成后，必须严格检查压差、房间气流方向、空气过滤效率等指标才能放心投入使用。如图9所示，负压病房的施工质量记录和其他关键感染控制措施的施工执行记录被上传到区块链上，并附上时间戳和负责人的数字签名。业主方可以在下一道工序开始后再检查施工质量记录，以便施工方可以更早地开始下一道工序。质量记录不可变更的特性同时能够支持在医院运营期间发现质量缺陷时的问题溯源。比如，如果在运营期间发现质量缺陷，医院运维人员可以很容易追溯到施工质量记录和相关责任人，并要求维修。

以下展示了所提出的框架如何用于保障运营阶段中健康和安全的医院环境。世界卫生组织发布的《医疗保健机构感染控制实用指南》(Practical guidelines for infection control in health care facilities) [71]中强调医院的清洁和消毒程序需要被严格正确地遵循，通风、过滤和空气清洁系统需要维持正常运转。

首先，如图10所示，在完成通风、过滤和空气净化系统的日常消毒、清洁任务后，操作人员将记录上传到区块链进行存储。这些记录留存在区块链上，可供将来设施经理检查。

其次，通过物联网传感器可以实时监测负压病房的压差，环境异常情况被作为不可变的记录自动上传到区块

Construction quality records

Negative pressure ward construction quality record

Basic information

Ward ID: 06 Location: 3rd floor

Tester: XXXX Test Date: 2020.11.05

Task ID	Inspection Task	Value	Description	Compliance	Linked file
1	Room airflow direction	/	Into the room	Yes	
2	Air changes per hour (ACH)	13	Value >12 (for renovation or new construction)	Yes	
3	Pressure differentials	-5.3 Pa	Value > -2.5 Pa (0.01" water gauge)	Yes	Negative pressure ward construction quality record.pdf
4	Clean-to-dirty airflow in room	/	Towards the patient (airborne disease patient)	Yes	
5	Filtration efficiency	99.97%	Value > 90% (dust spot test)	Yes	

Buttons: Save, Submit and sign

Construction quality records | Display: 5 | Choose time range | Search for name

Record ID	Record Name	Last recorded time	Transaction Hash	Transaction Status	Record Details
1	Ward air tightness inspection	2020-10-7 12:21	7c6f17e5ca00ac7e84...	Finish	Details
2	Duct leakage test	2020-10-14 08:55	7148b83fc0d7641e82...	Finish	Details
3	Duct pressure test	2020-10-25 17:43	31c8344317ce55b2a...	Finish	Details

图9. 用户界面（通过 Axure RP 9 设计），用于在施工阶段进行过程跟踪。

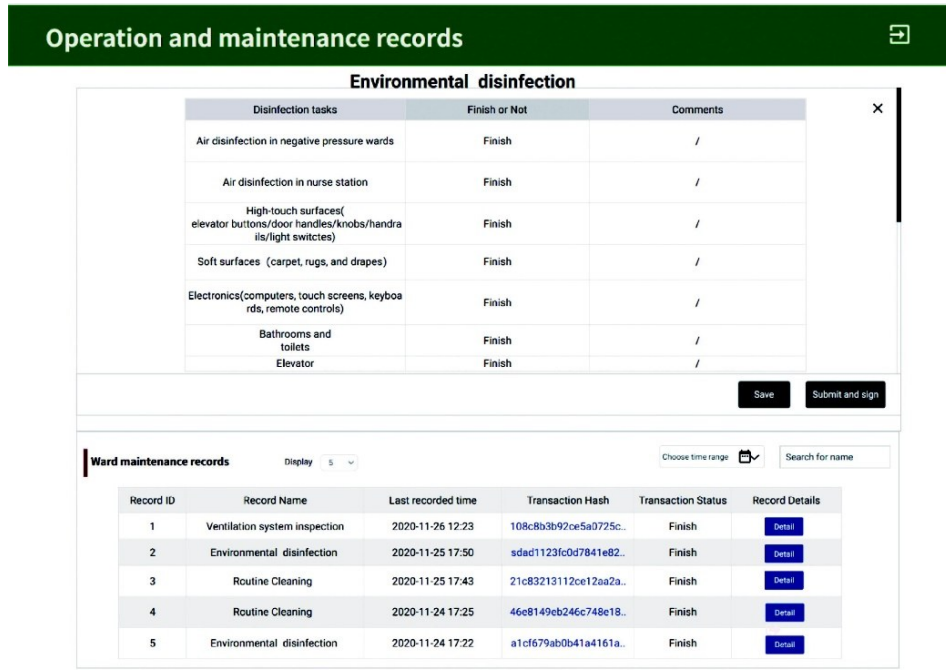


图 10. 用户界面（通过 Axure RP 9 设计），用于日常环境消毒记录跟踪。

链，并通过 Fabric 中预定义的智能合约向相关人员发送预警。图 11 显示了基于区块链的医院环境监控原型截图。在图 11 中，负压病房中的压差低于标准值，该记录被自动上传到区块链。相关工作人员可以在交易详情页中查看警告信息。警告信息包括交易的哈希值、时间戳、交易状态、所处空间类型、所处空间 ID、传感器 ID 等。此外，医院的运营维保人员可以访问设备的历史状态，维保人员

查找造成带来环境指标不合规的原因，并进行处理，最后将带有维保人员数字签名的维护记录上传到区块链上作为存证。

以上用例阐述了如何通过基于区块链的医院环境管理框架来促进快速建造模式下的工作质量管理，并改变工期紧张情况下的工作检查流程，降低以此带来的医院环境安全风险。

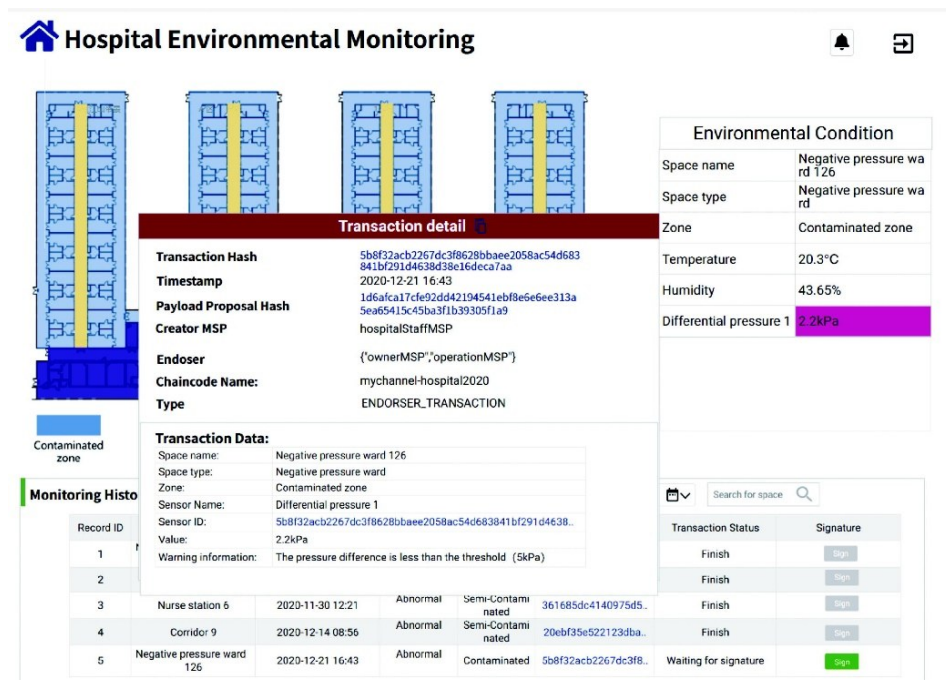


图 11. 医院环境监测区块链记录（通过 Axure RP 9 设计）。

5. 评价

本节内容对所提出的系统架构进行性能评估。首先本文使用区块链基准测试工具 Hyperledger Caliper (<https://github.com/hyperledger/caliper>) 来测试交易延迟和吞吐量。Caliper 可以通过控制交易发送速率来生成不同交易的工作负载。然后, 本研究对链上存储方案和链下存储方案的数据存储开销进行了对比分析。涉及的仿真实验在 CPU 为 AMD 锐龙 7 4800U (1.80 GHz) 和内存大小为 16 GB 的计算机上运行, 其中系统的版本为 Ubuntu 20.04 LTS, 超级账本 Hyperledger Fabric 框架版本为 1.4.0。

5.1. 延迟

交易延迟是从提交交易到交易结果在网络中可利用所消耗的时间。在本研究所提出的方案中, 与感染控制措施有关的工作记录需要被发送到区块链上进行广播。文件的发送操作是频率最高的交易, 交易发送速率是区块链性能测试的关键指标。本研究模拟了不同交易发送速率 (即每秒 50、100、200、500 和 1000 个交易) 下的平均交易延迟, 仿真结果如图 12 所示。当发送速率达到每秒 500 个交易时, 最大交易延迟为 820 ms, 并小于 1 s。本研究涉及的医院设计、施工、运维场景与区块链在线交易等场景不同, 对延迟的要求不高, 测试结果中的延迟能够满足要求。

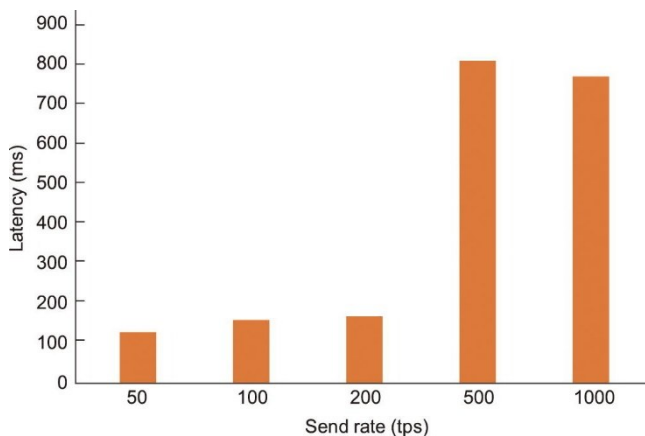


图 12. 不同发送速率下的平均交易延迟。

5.2. 吞吐量

交易吞吐量是区块链在特定时间段内提交有效交易的速率。本研究测试了不同交易发送速率下交易的平均吞吐量。如图 13 显示, 当交易发送速率达到每秒 50 个和 100 个交易时, 吞吐量分别达到每秒 48 个和 99 个。当每秒发送交易数量达到 200 个之后, 随着交易数量的增加,

吞吐量逐步稳定在每秒 140 个交易左右。对于联盟区块链应用来说, 网络的参与者有限, 相对来说交易频率不高, 该网络吞吐量能够满足本研究场景的性能要求。

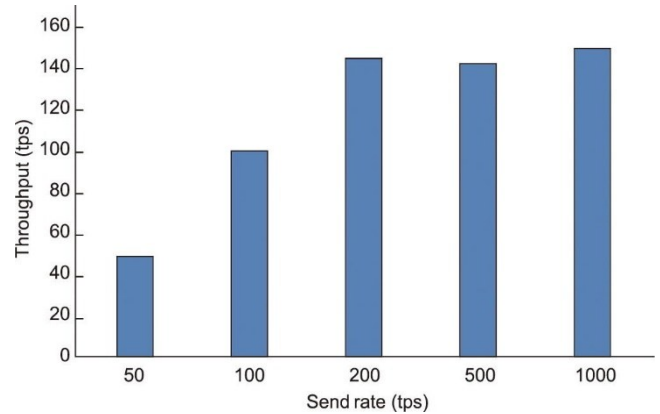


图 13. 不同发送速率下的平均交易吞吐量。

5.3. 储存成本分析

本部分比较链下存储和链上存储方案的存储成本, 将区块头设置为 80 B 标准大小, 将区块大小设置为 1 MB。以施工质量检查表单的存储为例。假设表单的平均数据大小为 20 KB。对于链下存储方案, 交易的最大数据大小为 300 B。一个区块的容量为 1 MB。因此, 100 个区块可以在链上存储方案中存储 5120 个交易, 在链下存储方案中可以存储 349 525 个交易。与链上存储方案相比, 单个区块在链下存储方案中可以存储更多的交易。要存储 1000 个交易, 链下存储方案需要 300 000 B 存储空间, 而链上存储方案需要 20 480 000 B 存储空间。因此, 使用链下存储方案可以节省更多的存储空间, 实现更高的吞吐量。

6. 讨论

本研究探讨了区块链技术如何在快速交付模式下助力医院的环境管理。本研究的理论意义如下: 首先, 与以往关于区块链技术在应对 COVID-19 疫情大流行中的其他应用研究文献相比, 本研究为院内感染防控提供了基于区块链的解决方案。其次, 这项研究作为一个示例, 阐述了如何通过区块链技术来助力解决应急管理中的挑战。最后, 以前关于院内感染控制的研究通常局限一个特定方面, 如通风、消毒或穿戴个人防护用品。与以往文献不同, 本研究从项目生命周期的角度来探讨医院的环境管理问题的解决方案, 并且提出对于设计、施工、运维不同阶段关键感染控制措施执行质量的追溯方案。

从管理角度来看, 医院的环境管理对于遏制病原体的

传播以及保护人员的健康和生命安全至关重要。在医院的快速建造或医院改造过程中，过程质量控制难度大，容易造成运营期间的医院环境健康安全风险。在紧急情况下，所提出的框架可以保证工作过程记录不被篡改。本研究提出的框架为快速建造模式下工程进度和质量之间的矛盾提供潜在的解决方案，为医院的设计、建造和运营中关键感染控制措施的执行提供数据可追溯性和追责机制。

本研究提出的方案为疫情期间建立医疗机构联盟区块链提供了参考。当某地区感染病例激增，医院建设或改造工作必须快速完成时，提出的区块链解决方案能够助力项目生命周期中的环境管理，以降低院内感染的风险。

7. 结论

目前，COVID-19 疫情仍在全球范围内蔓延。为保证快速建造模式下的应急医院的环境安全，本研究提出了一个基于区块链的应急医院生命周期环境管理框架；提出了一个联盟区块链框架来存储工作流程记录，以支持关键感染控制预防措施执行质量的可追溯性。本研究的主要贡献如下：①本研究为应对 COVID-19 疫情大流行的区块链应用研究领域提供了新的见解。提出了一个基于区块链的框架，以助力医院环境管理中的院内感染控制。②所提出的基于区块链的框架能够助力快速交付模式下的工作质量检查，可以为工作记录提供不可篡改的记录，以便在快速建造模式下可以对某些工作进行事后补检。本研究从医院生命周期的角度提出了概念框架、系统架构和用例，可以为针对医院的设计、施工和运营过程开发用于工作流程跟踪的区块链解决方案提供参考。

基于区块链的医院环境管理的研究探索仍处于起步阶段。实践中的区块链网络配置必须考虑不同的组织、参与者的隐私保护要求。在实践中必须考虑部署的标准化和模块化，降低成本并提高部署效率。本研究仅从工作质量管理的角度考虑了区块链技术在应急工程项目中的应用。未来的工作将进一步探索如何通过区块链来促进应急项目中多方协作，并研究区块链下项目参与方之间的责任分担机制。

致谢

本研究由国家自然科学基金(71732001、51878311、51978302)、工程前沿项目(2021-HYZD-5-13)、湖北省重大科技专项(2020ACA006)和国家留学基金管理委员会

(202006160115)资助。感谢 Timo Hartmann 教授(德国柏林工业大学)对本论文提出的建议。

Compliance with ethics guidelines

The Authors declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Wang D, Hu B, Hu C, Zhu F, Liu X, Zhang J, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China. *JAMA* 2020;323(11):1061–9.
- [2] Jones TC, Biele G, Mühlemann B, Veith T, Schneider J, Beheim-Schwarzbach J, et al. Estimating infectiousness throughout SARS-CoV-2 infection course. *Science* 2021;373(6551):180–93.
- [3] PAHO. COVID-19 has infected some 570 000 health workers and killed 2 500 in the Americas. PAHO Director says [Internet]. Washington, DC: PAHO; 2020 Sep 2 [cited 2022 Feb 2]. Available from: <https://www.paho.org/en/news/2-9-2020-covid-19-has-infected-some-570000-health-workers-and-killed-2500-americas-paho>.
- [4] Alshamrani MM, El-Saed A, Al Zunitan M, Almulhem R, Almohrij S. Risk of COVID-19 morbidity and mortality among healthcare workers working in a large tertiary care hospital. *Int J Infect Dis* 2021;109:238–43.
- [5] Read JM, Green CA, Harrison EM, Docherty AB, Funk S, Harrison J, et al.; ISARIC4C investigators. Hospital-acquired SARS-CoV-2 infection in the UK's first COVID-19 pandemic wave. *Lancet* 2021;398(10305):1037–8.
- [6] Liu Z, Wang L, Rong R, Fu S, Cao G, Hao C. Full-scale experimental and numerical study of bioaerosol characteristics against cross-infection in a twobed hospital ward. *Build Environ* 2020;186:107373.
- [7] Ge T, Lu Y, Zheng S, Zhuo L, Yu L, Ni Z, et al. Evaluation of disinfection procedures in a designated hospital for COVID-19. *Am J Infect Control* 2021;49(4):447–51.
- [8] Kampf G, Todt D, Pfaender S, Steinmann E. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *J Hosp Infect* 2020;104(3):246–51.
- [9] Liow MHL, Lee LC, Tan NCK, Tan HK, Chow W, Wee GLE, et al. Personal protective equipment training for non-healthcare workers in the COVID-19 pandemic: effectiveness of an evidence-based skills training framework. *Infect Dis Heal* 2021;27(1):38–48.
- [10] Ren J, Wang Y, Liu Q, Liu Y. Numerical study of three ventilation strategies in a prefabricated COVID-19 inpatient ward. *Build Environ* 2021;188:107467.
- [11] Srivastava S, Zhao X, Manay A, Chen Q. Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings. *Sustain Cities Soc* 2021;75:103408.
- [12] Miller SL, Clements N, Elliott SA, Subhash SS, Eagan A, Radonovich LJ. Implementing a negative-pressure isolation ward for a surge in airborne infectious patients. *Am J Infect Control* 2017;45(6):652–9.
- [13] Ereth MH, Fine J, Stamatatos F, Mathew B, Hess D, Simpser E. Healthcare-associated infection impact with bioaerosol treatment and COVID-19 mitigation measures. *J Hosp Infect* 2021;116:69–77.
- [14] Walker JT, Hoffman P, Bennett AM, Vos MC, Thomas M, Tomlinson N. Hospital and community acquired infection and the built environment—design and testing of infection control rooms. *J Hosp Infect* 2007;65(Suppl 2):S43–9.
- [15] Ataullah AHM, Rahman S, Ridoy MNH, Turaeva N, Lozada-Martinez ID, Moscote-Salazar LR, et al. Impact on surgical wards in COVID-19 pandemic & safe surgery. *Int J Surg Open* 2021;30:100320.
- [16] Yang M, Wang H, Li Z, Zhang Q, Liu X, He M, et al. Prevention and control of COVID-19 infection in a Chinese mental health center. *Front Med* 2020;7:356.
- [17] Zhou J, Otter JA, Price JR, Cimpeanu C, Garcia DM, Kinross J, et al. Investigating SARS-CoV-2 surface and air contamination in an acute healthcare setting during the peak of the COVID-19 pandemic in London. *Clin Infect Dis* 2020;73(7):e1870–7.
- [18] Menon S, Jain K. Blockchain technology for transparency in agri-food supply chain: use cases, limitations, and future directions. *IEEE Trans Eng Manage* 2021;99:1–15.

- [19] Guggenberger T, Schweizer A, Urbach N. Improving interorganizational information sharing for vendor managed inventory: toward a decentralized information hub using blockchain technology. *IEEE Trans Eng Manage* 2020; 67(4):1074–85.
- [20] Du M, Chen Q, Chen J, Ma X. An optimized consortium blockchain for medical information sharing. *IEEE Trans Eng Manage* 2020;68(6):1677–89.
- [21] Biswas S, Sharif K, Li F, Latif Z, Kanhere SS, Mohanty SP. Interoperability and synchronization management of blockchain-based decentralized e-health systems. *IEEE Trans Eng Manage* 2020;67(4):1363–76.
- [22] Aslam B, Javed AR, Chakraborty C, Nebhen J, Raqib S, Rizwan M. Blockchain and ANFIS empowered IoMT application for privacy preserved contact tracing in COVID-19 pandemic. *Pers Ubiquitous Comput* 2021 Jul:1–17.
- [23] Song J, Gu T, Feng X, Ge Y, Mohapatra P. Blockchain meets COVID-19: a framework for contact information sharing and risk notification system 2020. arXiv:200710529.
- [24] Manoj M, Srivastava G, Somayaji SRK, Gadekallu TR, Maddikunta PKR, Bhattacharya S. An incentive based approach for COVID-19 planning using blockchain technology. In: *Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*; 2020 Dec 7–11; Taipei, China. Piscataway: IEEE; 2020.
- [25] Ouyang L, Yuan Y, Cao Y, Wang FY. A novel framework of collaborative early warning for COVID-19 based on blockchain and smart contracts. *Inf Sci* 2021; 570:124–43.
- [26] Lee HA, Kung HH, Lee YJ, Chao JCJ, Udayasankaran JG, Fan HC, et al. Global infectious disease surveillance and case tracking system for COVID-19: development study. *JMIR Med Inform* 2020;8(12):e20567.
- [27] Gupta R, Kumari A, Tanwar S, Kumar N. Blockchain-envisioned softwareized multi-swarming uavs to tackle COVID-19 situations. *IEEE Netw* 2021;35(2): 160–7.
- [28] Shamsi K, Khorasani KE, Shayegan MJ. A secure and efficient approach for issuing KYC token as COVID-19 health certificate based on stellar blockchain network. 2020. arXiv:201002169.
- [29] Yu K, Tan L, Shang X, Huang J, Srivastava G, Chatterjee P. Efficient and privacy-preserving medical research support platform against COVID-19: a blockchain-based approach. *IEEE Consum Electron Mag* 2021;10(2):111–20.
- [30] Antal C, Cioara T, Antal M, Anghel I. Blockchain platform for COVID-19 vaccine supply management. *IEEE Open J Comput Soc* 2021;2:164–78.
- [31] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [Internet]. 2008 [cited 2022 Feb 26]. Available from: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [32] Miglani A, Kumar N, Chamola V, Zeadally S. Blockchain for internet of energy management: review, solutions, and challenges. *Comput Commun* 2020; 151: 395–418.
- [33] Hammi MT, Hammi B, Bellot P, Serhrouchni A. Bubbles of trust: a decentralized blockchain-based authentication system for IoT. *Comput Secur* 2018;78:126–42.
- [34] Eisenstadt M, Ramachandran M, Chowdhury N, Third A, Domingue J. COVID-19 antibody test/vaccination certification: there's an app for that. *IEEE Open J Eng Med Biol* 2020;1:148–55.
- [35] Ahmad RW, Salah K, Jayaraman R, Yaqoob I, Omar M, Ellahham S. Blockchainbased forward supply chain and waste management for COVID-19 medical equipment and supplies. *IEEE Access* 2021;9:44905–27.
- [36] Sathya AR, Banik BG. An approach of trustworthy supply chain management of ventilator and PPE in COVID-19 pandemic through blockchain technology. In: Tavares JMRS, Dutta P, Dutta S, Samanta D, editors. *Cyber intelligence and information retrieval*. Berlin: Springer; 2022. p. 445–53.
- [37] Christodoulou K, Christodoulou P, Zinonos Z, Carayannis EG, Chatzichristofis SA. Health information exchange with blockchain amid COVID-19-like pandemics. In: *Proceedings of the 2020 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*; 2020 May 25–27; Marina del Rey, CA, USA. Piscataway: IEEE; 2020. p. 412–7.
- [38] Kumar R, Tripathi R. A secure and distributed framework for sharing COVID-19 patient reports using consortium blockchain and IPFS. In: *Proceedings of the 2020 Sixth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*; 2020 Nov 6–8; Wanknaghat, India. Piscataway: IEEE; 2020. p. 231–6.
- [39] Gordon DE, Jang GM, Bouhaddou M, Xu J, Obernier K, White KM, et al. A SARS CoV-2 protein interaction map reveals targets for drug repurposing. *Nature* 2020;583(7816):459–68.
- [40] Kovács G, Falagara SI. Lessons learned from humanitarian logistics to manage supply chain disruptions. *J Supply Chain Manag* 2021;57(1):41–9.
- [41] Khurshid A. Applying blockchain technology to address the crisis of trust during the COVID-19 pandemic. *JMIR Med Inform* 2020;8(9):e20477.
- [42] Ho D. Addressing COVID-19 drug development with artificial intelligence. *Adv Intell Syst* 2020;2(5):2000070.
- [43] Alexander GC, Qato DM. Ensuring access to medications in the US during the COVID-19 pandemic. *JAMA* 2020;324(1):31–2.
- [44] Bandara E, Liang X, Foytik P, Shetty S, Hall C, Bowden D, et al. A blockchain empowered and privacy preserving digital contact tracing platform. *Inf Process Manage* 2021;58(4):102572.
- [45] Wang J, Wu P, Wang X, Shou W. The outlook of blockchain technology for construction engineering management. *Front Eng Manag* 2017;4(1):67–75.
- [46] Turk Ž, Klinc R. Potentials of blockchain technology for construction management. *Procedia Eng* 2017;196:638–45.
- [47] Li J, Greenwood D, Kassem M. Blockchain in the built environment and construction industry: a systematic review, conceptual models and practical use cases. *Autom Construct* 2019;102:288–307.
- [48] Pradeep ASE, Yiu TW, Zou Y, Amor R. Blockchain-aided information exchange records for design liability control and improved security. *Autom Construct* 2021;126:103667.
- [49] Sheng D, Ding L, Zhong B, Love PED, Luo H, Chen J. Construction quality information management with blockchains. *Autom Construct* 2020;120:103373.
- [50] Lu W, Wu L, Zhao R, Li X, Xue F. Blockchain technology for governmental supervision of construction work: learning from digital currency electronic payment systems. *J Constr Eng Manage* 2021;147(10):04021122.
- [51] Hamledari H, Fischer M. Measuring the impact of blockchain and smart contracts on construction supply chain visibility. *Adv Eng Inform* 2021; 50: 101444.
- [52] Wang Z, Wang T, Hu H, Gong J, Ren X, Xiao Q. Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction. *Autom Construct* 2020;111:103063.
- [53] Elghaish F, Abrishami S, Hosseini MR. Integrated project delivery with blockchain: an automated financial system. *Autom Construct* 2020;114:103182.
- [54] Pollack J, Helm J, Adler D. What is the Iron Triangle, and how has it changed? *Int J Manag Proj Bus* 2018;11(2):527–47.
- [55] Mungmunpantipantip R, Wiwanitkit V. Building Pathology and COVID-19: a literature review and commentary on field hospital setting. *Int J Real Estate Stud* 2021;15(1):112–6.
- [56] Lu H, Wang H, Yu D, Ye J. Sharp schedule compression in urgent emergency construction projects via activity crashing, substitution and overlapping: a case study of Huoshengshan and Leishenshan hospital projects in Wuhan. *Eng Constr Archit Manag*. In press.
- [57] Zheng R, Jiang J, Hao X, Ren W, Xiong F, Ren Y. BcBIM: a blockchain-based big data model for BIM modification audit and provenance in mobile cloud. *Math Probl Eng* 2019;2019:5349538.
- [58] Helliar CV, Crawford L, Rocca L, Teodori C, Veneziani M. Permissionless and permissioned blockchain diffusion. *Int J Inf Manage* 2020;54:102136.
- [59] Leng J, Ruan G, Jiang P, Xu K, Liu Q, Zhou X, et al. Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: a survey. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;132:110112.
- [60] Hattori T, Ishida R. Did the introduction of Bitcoin futures crash the Bitcoin market at the end of 2017? *North Am J Econ Financ* 2020;56:101322.
- [61] Farrugia S, Ellul J, Azzopardi G. Detection of illicit accounts over the Ethereum blockchain. *Expert Syst Appl* 2020;150:113318.
- [62] Salimitari M, Chatterjee M, Fallah YP. A survey on consensus methods in blockchain for resource-constrained IoT networks. *Internet Things* 2020; 11: 100212.
- [63] Kotilevets ID, Ivanova IA, Romanov IO, Magomedov SG, Nikonov VV, Pavelev SA. Implementation of directed acyclic graph in blockchain network to improve security and speed of transactions. *IFAC-PapersOnLine* 2018; 51(30): 693–6.
- [64] Shi S, He D, Li L, Kumar N, Khan MK, Choo KR. Applications of blockchain in ensuring the security and privacy of electronic health record systems: a survey. *Comput Secur* 2020;97:101966.
- [65] Fan K, Sun S, Yan Z, Pan Q, Li H, Yang Y. A blockchain-based clock synchronization scheme in IoT. *Future Gener Comput Syst* 2019;101:524–33.
- [66] Perera S, Nanayakkara S, Rodrigo MNN, Senaratne S, Weinand R. Blockchain technology: is it hype or real in the construction industry? *J Ind Inf Integr* 2020; 17:100125.
- [67] Zhang S, Rong J, Wang B. A privacy protection scheme of smart meter for decentralized smart home environment based on consortium blockchain. *Electr Power Energy Syst* 2020;121:106140.
- [68] World Health Organization. Annex to infection prevention and control during health care when coronavirus disease (COVID-19) is suspected or confirmed [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2021 Oct 1 [cited 2022 Feb 26]. Available from:

- IPC-Annex-2021.1.
- [69] Bahnfleth W, Degraw J. Reducing airborne infectious aerosol exposure. *ASHRAE J* 2021;63(5):18–21.
- [70] Schulster LM, Chinn RYW, Arduino MJ, Carpenter J, Donlan R, Ashford D, et al. Guidelines for environmental infection control in health-care facilities; recommendations of CDC and Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC). Chicago, IL: American Society for Healthcare Engineering/American Hospital Association; 2004.
- [71] World Health Organization. Practical guidelines for infection control in health care facilities [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2005 Aug 4 [cited 2022 Feb 26]. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/practical-guidelines-for-infection-control-in-health-carefacilities>.