

基于区块链的海南自贸港 数据跨境流通安全技术研究

Research on Blockchain-Based Data Cross-Border Flow Security Technology for Hainan Free Trade Port

张汉宁^{1,2},甘 泉^{1,3},冯 磊²,马瑞涛⁴,邓俊琼²(1. 中国联通[海南]创新研究院,海南 海口 570208;2. 联通[海南]产业互联网有限公司,海南 海口 570002;3. 中国联通海南分公司,海南 海口 570002;4. 中国联通研究院,北京 100048)

Zhang Hanning^{1,2},Gan Quan^{1,3},Feng Lei²,Ma Ruitao⁴,Deng Junqiong²(1. China Unicom[Hainan] Innovation Research Institute, Haikou 570208, China;2. China Unicom[Hainan] Industrial Internet Co., Ltd., Haikou 570002, China;3. China Unicom Hainan Branch, Haikou 570002, China;4. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

针对海南自贸港数据跨境流通安全挑战,提出了基于区块链的安全技术方案。通过分析海南自贸港数据跨境需求,论证了区块链在数据跨境安全、隐私保护与监管合规中的优势。构建了基于联盟链的数据跨境流通架构,提出了联盟链网络架构、跨链数据授权机制、智能合约驱动的监管沙箱和跨链数据互操作等关键机制,分析了其在跨境贸易、金融、医疗等场景的应用,并通过数据跨境流通项目验证了其可行性和有效性。

关键词:

数据跨境流通;区块链;智能合约;隐私计算;监管沙箱

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.05.002

文章编号:1007-3043(2025)05-0007-06

中图分类号:TN919.2

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It addresses the security challenges of cross-border data circulation in Hainan Free Trade Port by proposing a blockchain-based technical solution. Through analyzing the data cross-border requirements of the port, it demonstrates the advantages of blockchain technology in ensuring data security, privacy protection, and regulatory compliance. A consortium blockchain-based architecture for cross-border data circulation is established, incorporating key mechanisms such as consortium network infrastructure, cross-chain data authorization mechanisms, smart contract-driven regulatory sandboxes, and cross-chain data interoperability. The application scenarios in cross-border trade, finance, and healthcare sectors are analyzed, and the feasibility and effectiveness are validated through a data cross-border circulation project.

Keywords:

Cross-border data flow; Blockchain; Smart contracts; Privacy computing; Regulatory sandbox

引用格式:张汉宁,甘泉,冯磊,等. 基于区块链的海南自贸港数据跨境流通安全技术研究[J]. 邮电设计技术,2025(5):7-12.

0 引言

随着数字经济的蓬勃发展,数据已成为与土地、劳动力、资本、技术并重的第五大生产要素。2020年6月1日,《海南自由贸易港建设总体方案》发布,明确提出建设海南自由贸易港是党中央作出的重大战略决

策。数据作为新型生产要素,其跨境流通对促进数字经济发展、推动国际贸易便利化具有重要意义。海南自由贸易港作为我国对外开放的重要窗口,在推动数据要素跨境流通方面具有先行先试的独特优势和使命^[1]。然而,数据跨境流动面临诸多挑战:一方面,数据包含敏感信息,跨境流动可能引发数据泄露、隐私侵犯等安全风险;另一方面,各国对数据主权的重视程度不断提高,数据本地化要求与数据跨境自由流动之间存在张力。特别是在海南自由贸易港这一特殊

基金项目:海口市科技计划项目(2024-042)

收稿日期:2025-03-27

区域,如何在确保数据安全与隐私保护的前提下,促进数据要素的跨境流动,成为亟待解决的关键问题^[2]。

区块链技术作为一种新兴的分布式账本技术,以其去中心化、不可篡改性和密码学安全性等特点,为解决数据跨境流动中的安全与信任问题提供了新的思路。本文旨在研究如何将区块链技术应用与海南自由贸易港的数据跨境流通管理中,通过构建安全可控、高效便捷的数据跨境流通体系,区块链技术有望促进海南自由贸易港数据跨境流动的便利化和规范化,为数字经济的蓬勃发展注入新的动能。

1 研究背景与相关工作

1.1 海南自贸港数据跨境政策概述

2020年6月《海南自由贸易港建设总体方案》明确提出,要“探索数据跨境传输安全管理机制”。该方案强调了数据跨境流动的必要性,并设定了“安全可控”的基本原则。《海南自由贸易港数字加工贸易业态实施方案》是海南自由贸易港数据跨境流动的一项重要创新业务模式。这为“来数加工”等新型业态的发展提供了政策支持,也为区块链技术在保障数据安全和可信性方面提供了应用场景。《海南自由贸易港国际数据中心发展规定》明确了国际数据中心在海南自贸港的法律地位和发展方向,鼓励其利用高速便捷的跨境数据专用通道,仅向境外提供数据存储、加工、交易等国际数据服务^[3]。《海南自由贸易港数据出境管理清单(负面清单)(2024版)》聚焦深海、种业、航天、旅游和免税商品零售等重点产业,对14个具体业务场景下的数据出境进行了分类管理^[4]。这种负面清单的管理模式为区块链解决方案的设计提供了具体的业务场景和监管要求,有助于框架的精准化和合规性。因此,区块链技术因其在数据溯源、隐私保护、完整性保障等方面的优势,在海南自贸港的数据跨境安全有序探索中,对保障数据跨境安全和可信性有重要作用。

1.2 数据跨境流动技术研究现状

区块链技术凭借其独特的特性,在数据安全领域展现出了广阔的应用前景。目前,数据跨境流动的技术研究主要集中在以下几个方面。

a) 数据分类分级技术。根据数据敏感程度进行分类分级,对不同类别的数据采取差异化的跨境管理措施^[5]。

b) 数据脱敏技术。通过数据掩码、数据置换、数据扰动等方式,降低原始数据的敏感性,从而实现安

全跨境^[6]。

c) 安全多方计算。允许多方在不泄露各自原始数据的前提下,共同完成数据计算任务,避免数据显性跨境^[7]。

d) 联邦学习。将模型训练分布到多个本地数据持有方,只交换模型参数而非原始数据,实现“数据不动,模型动”的跨境计算模式^[8]。

此外,文献[9]提出了基于区块链的数据共享权限管理框架;文献[10]设计了区块链驱动的数据溯源系统;文献[11]研究了区块链与同态加密相结合的隐私保护机制。文献[12]提出了基于可信执行环境的跨境数据处理方案;文献[13]研究了联邦学习在数据跨境应用中的价值。

1.3 区块链在数据跨境中的应用研究

区块链技术因其独特的架构和机制,在数据跨境流动中具有独特优势,在数据跨境流通安全保护中发挥以下几方面的作用。

a) 数据确权与授权。利用区块链记录数据所有权和使用授权,确保数据在跨境流动过程中的所有权明晰^[14]。

b) 数据流转追溯。区块链的不可篡改特性使数据流转过程可被完整记录,满足监管审计的需求^[15]。

c) 智能合约监管。通过智能合约自动执行数据使用规则,确保数据跨境使用符合预设条件^[16]。

d) 跨链数据共享。通过跨链技术实现不同区块链网络间的数据互通,支持更复杂的跨境数据场景^[17]。

在跨境数据流通方面,文献[18]提出了区块链支持的跨境电子商务数据交换平台;文献[19]研究了区块链在跨境医疗数据共享中的应用。然而,现有研究主要关注通用场景下的数据跨境技术,针对海南自由贸易港特定政策环境和需求的技术框架的研究仍显不足,缺乏针对自由贸易港特殊环境的深入探讨。

2 基于区块链的海南自贸港数据跨境流通技术框架

2.1 海南自贸港数据跨境流通需求分析

海南自由贸易港的数据跨境流通具有以下特点。

a) 高频次性。旅游、医疗、金融等产业的国际化发展使数据跨境流通频次高于一般地区。

b) 多样性。涉及个人信息、商业数据、科研数据等多种类型。

c) 敏感性。部分数据涉及国家安全、商业机密和个人隐私。

d) 政策特殊性。享有特殊政策支持,但同时面临更高的安全监管要求。

海南自由贸易港数据跨境流通主要面临以下挑战。

a) 安全风险。数据跨境流通增加了数据泄露、篡改和滥用的风险。

b) 隐私保护。不同国家和地区对隐私保护的法律法规存在差异。

c) 监管困境。传统监管手段难以适应数字经济发展的需要。

d) 信任机制。缺乏跨境数据共享的可信机制。

e) 技术壁垒。不同国家和机构的技术标准和系统不兼容。

2.2 数据跨境流通框架总体设计

本研究提出的基于区块链的海南自由贸易港数据跨境流通技术架构如图1所示,主要包括5个层次。



图1 基于区块链的海南自贸港数据跨境流通技术架构

a) 数据层。包括个人数据、企业数据、政府数据和科研数据等各类数据源。通过对数据进行分类与分级管理,确保数据的安全性和有效性。同时,该层采用数字签名和时间戳技术来验证数据源的真实性,并通过数据预处理模块对原始数据进行清洗、标准化和初步脱敏处理。

b) 基础设施层。包括高性能的P2P网络、密码算法、分布式存储和容器技术等底层支持。该层建立了多层次的密码学体系,如同态加密、零知识证明和多方安全计算,以确保数据的隐私和安全性,并在数据

源附近布置边缘计算节点,提升数据处理的实时性和效率。

c) 区块链平台层。区块链平台层实现架构的核心功能,包括混合共识机制(结合PBFT和PoS算法)、分层智能合约(支持业务逻辑与监管规则的智能化执行)、链上数据索引(采用Merkle树优化的高效索引结构)、跨链协议网关(支持与全球主流区块链系统的互操作性)和状态通道(实现高频交易的链下处理与结算)。同时,建立治理机制,支持社区投票和权益相关方的共同治理。

d) 服务层。提供多因素身份认证(结合生物特征和行为分析的身份验证)、精细化数据授权(基于RBAC和ABAC的混合授权模型)、隐私计算服务(包括联邦学习、安全多方计算、差分隐私)、监管沙箱环境(提供合规测试和风险评估)、数据溯源与审计(记录数据全生命周期的操作与使用)、动态风险控制(实时监测异常流通行为)和数据价值评估(基于使用频率和应用效果的价值量化模型)等服务。

e) 应用层。该层面向具体应用场景,包括跨境贸易平台(提供物流跟踪、原产地证明、通关自动化等服务)、金融服务生态(涵盖跨境支付、供应链金融等功能)、医疗旅游一体化(实现医疗数据安全共享、跨境医疗服务协同)、文化创意产业(支持AIGC出海、版权交易、短剧出海等)、科研数据协作(促进跨境科研项目数据的安全高效共享)和智慧旅游服务(提供一站式跨境旅游服务与体验)等。

2.3 数据跨境流通关键技术设计

2.3.1 联盟链网络架构

本方案采用联盟链技术构建数据跨境流通网络,由海南自由贸易港管理机构、参与企业、监管部门等多方共同维护。联盟链节点分为以下几类。

a) 核心节点。由海南自由贸易港管理委员会、海关、税务等政府部门运维,负责共识验证和监管执行。

b) 企业节点。由参与数据跨境流通的企业运维,参与交易验证和数据处理。

c) 服务节点。提供身份认证、隐私计算等专业服务。

d) 观察节点。可查看链上交易信息但不参与共识过程,供审计和研究使用。

联盟链采用改进的PBFT共识算法,确保在有限节点环境下的高性能和最终一致性。

2.3.2 基于联盟链的数据确权与授权体系

针对海南自由贸易港数据跨境需求,为解决不同数据主体间的授权问题,本文设计了基于联盟链的数据确权与授权体系。该体系主要由数据主体、数据提供方、数据使用方以及监管部门组成,通过共识机制维护数据权属和使用授权,具体如图2所示。

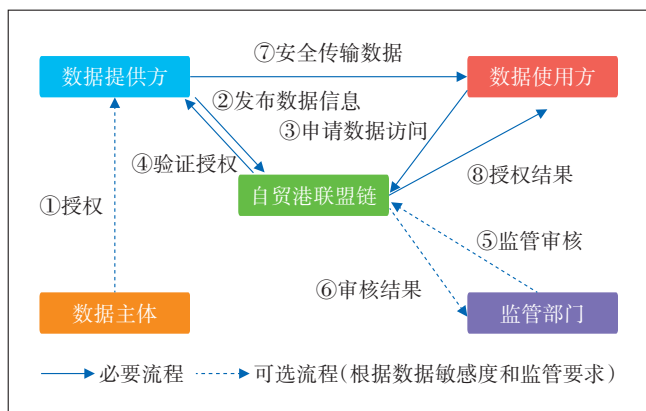


图2 跨链数据授权机制

该机制主要流程如下。

- 数据主体向数据提供方授权其数据的跨境传输权限。
- 数据提供方将数据摘要(哈希值)发布在联盟链上,确定数据资源描述信息和授权条件。
- 数据使用方通过联盟链提交数据访问申请。
- 联盟链通过智能合约验证授权条件和合规要求。
- 对于敏感数据,可触发监管部门审核流程。
- 审核通过后,联盟链向数据使用方颁发访问凭证,授权信息上链存证。
- 数据提供方根据凭证向数据使用方传输数据。
- 整个过程在联盟链上记录,确保可追溯和可审计。

2.3.3 智能合约驱动的监管沙箱

针对不同类型数据的监管需求,本方案设计了智能合约驱动的监管沙箱机制,实现差异化和自动化监管,智能合约自动执行预设规则,确保数据在跨境流动过程中始终处于可控状态。该智能合约主要实现的功能如下。

- 差异化监管。根据数据类别(个人、金融、医疗等)使用不同的监管规则。
- 自动化审核。通过代码执行监管规则,减少人工干预。
- 实时监控。对数据流通过程进行实时监控和

审计。

- 灵活配置。监管规则可根据政策变化进行动态调整。

智能合约驱动的监管沙箱架构如图3所示。

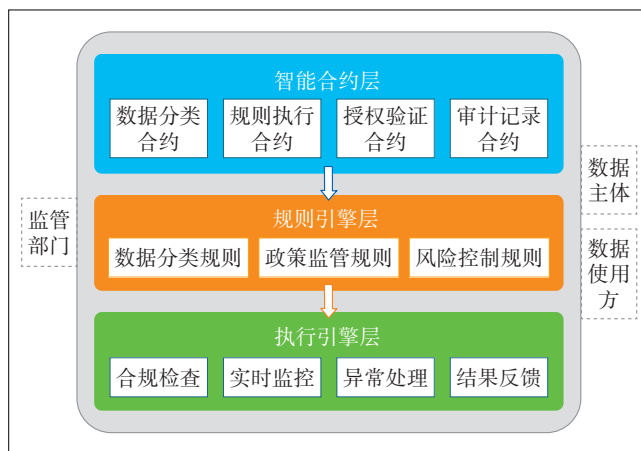


图3 智能合约驱动的监管沙箱架构

2.3.4 跨链数据互操作技术

为支持海南自由贸易港与全球数据网络的互联互通,本文提出一种“分层自适应多模态跨链互操作框架”(Layered Adaptive Multi-modal Cross-chain Interoperability Framework, LAMCIF)的增强架构,实现不同区块链网络间的数据互通和价值传递。该技术采用分层公证人机制(Notary Scheme)、多层跨链协议架构、增强型跨链智能合约等机制相结合的方式,确保跨链数据交换的安全性和原子性。

跨链技术架构如图4所示,主要包括以下内容。

- 分层公证人节点网络。包括核心公证人集群(由高安全性节点组成,负责管理整个跨链网络)、边缘公证人节点(负责特定链之间的数据验证和传递)以及监督节点(监控公证人行为,确保系统安全)。
- 多层跨链协议架构。包括基础通信层(定义不同链间的消息格式和传输机制)、资产映射层(实现不同链上资产的标准化表达和映射)、交易验证层(验证跨链交易的有效性和完成性)以及应用接口层(为开发者提供统一的跨链调用接口)。
- 增强型跨链智能合约。包括链间调用合约(允许一条链上的合约直接调用另一条链上的合约)、跨链预言机(提供链外数据和验证服务)、事务管理合约(协调多链上的复杂交易流程)以及状态同步合约(在多链间保持状态一致性)。
- 安全保障机制。包括改进型哈希时间锁(支持

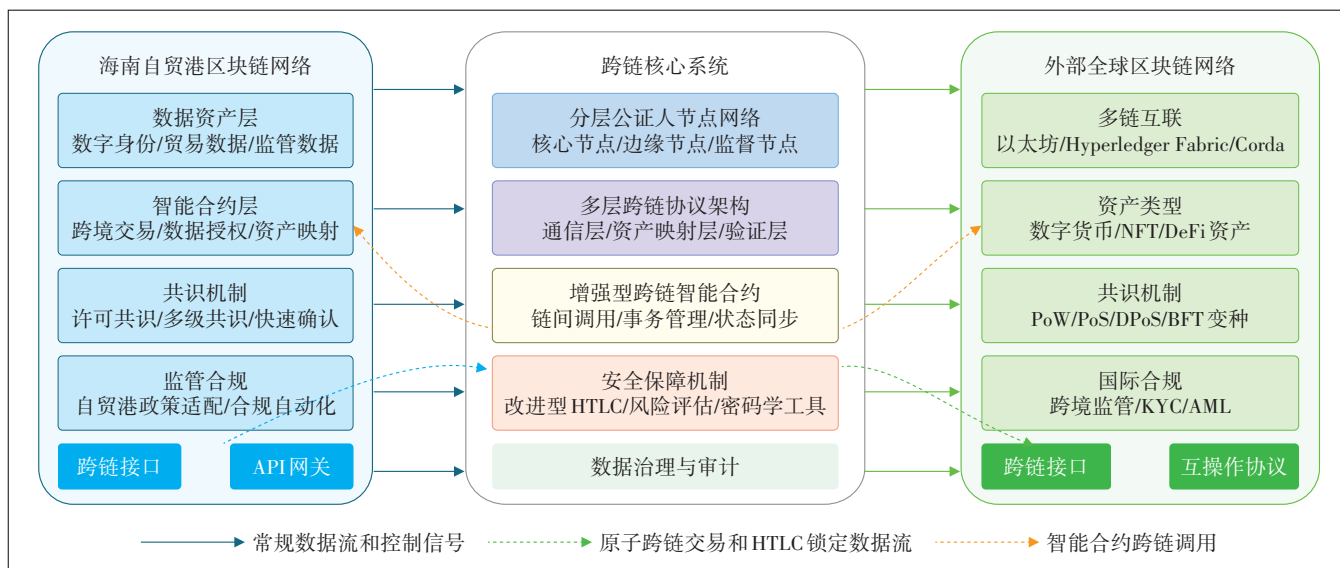


图4 面向海南自贸港的分层自适应多模态跨链互操作框架

多步骤原子交换和部分执行)、风险评估系统(动态评估跨链交易风险并调整安全参数)、高级密码学工具(结合零知识证明、多签名等技术保障安全)以及纠纷解决机制(处理跨链交易异常和纠纷)。

e) 数据治理与审计。包括跨链数据标准(定义通用数据结构和交换格式)、数据血缘追踪(记录数据流转全过程,支持审计)、合规性验证(确保跨链数据交换符合不同链的规则和法规)以及跨链治理去中心化自治组织(DAO)(实现跨链网络的去中心化治理)。

3 海南自贸港数据跨境应用场景

3.1 跨境贸易数据协同

跨境贸易场景涉及贸易商、物流企业、海关、金融机构等多方主体,数据跨境需求强烈。海南自由贸易港的贸易便利化措施需要多方数据协同,本技术框架可实现以下功能。

- a) 海关、贸易商、物流企业等可通过联盟链共享必要的贸易数据。
- b) 智能合约自动执行清关、检验检疫等流程,提高贸易效率。
- c) 零知识证明技术允许验证贸易合规性,无需披露商业敏感信息。
- d) 跨链技术连接海南自贸港与国际贸易网络,实现全球贸易数据的互联互通。

3.2 金融数据跨境交换

海南自由贸易港金融开放创新涉及大量跨境金

融数据交换,本方案支持的相关技术如下。

- a) 金融机构通过联盟链网络发布和请求跨境金融数据。
- b) 差分隐私技术保护敏感金融数据,同时允许进行风险评估和合规审查。
- c) 监管沙箱实时监控跨境金融数据流通,防范金融风险。
- d) 分布式审计机制确保金融交易全程可追溯,支持反洗钱等监管要求。

3.3 跨境医疗数据共享

随着海南国际医疗旅游先行区建设,会吸引国际患者到海南就医,涉及敏感的医疗数据跨境流通。本方案可应用的场景如下。

- a) 患者通过联盟链授权个人医疗数据的跨境使用。
- b) 海外医疗机构可在获得授权后访问患者在海南的诊疗数据。
- c) 多方安全计算技术确保在不泄露原始数据的情况下进行医疗数据分析。
- d) 智能合约自动执行相关法规要求,确保医疗数据流通合规。

4 总结

本文针对海南自由贸易港数据跨境流通所面临的安全、隐私和监管挑战,提出了一种基于区块链的数据跨境管控技术方案。方案设计了联盟链网络架

构、跨链数据授权机制、智能合约驱动的监管沙箱和跨链数据互操作等关键技术,并结合多方安全计算和差分隐私等技术保护数据隐私。

本研究提出的基于区块链的海南自由贸易港数据跨境流通技术架构,已成功应用于海口某产业园区中。该园区聚焦动漫制作、图形渲染、虚拟偶像直播等数字创意产业,其业务特性对数据跨境传输的安全性、效率和合规性的要求较高。本技术架构通过基础设施层提供分布式网络与密码学支持,服务层提供关键的身份认证、数据授权与隐私计算能力,结合区块链平台层的智能合约与共识机制,实现了对跨境数据流转过程中的主体身份、数据权限及内容隐私的精细化管理,保障了数据处理活动的安全与合规,为园区企业的数据要素跨境流动构建了可信、高效的技术底座。

在应用实践中,该架构有效支撑了园区数字创意企业开展面向海外市场的内容生产与加工业务,促进了动漫素材、渲染数据、特效文件等数据作为生产要素时的安全、高效跨境流通。初步实践表明,该架构在保障数据安全与合规性的前提下,显著提升了数据跨境流转效率,为推动文化出海和构建数字创意产业跨境协作新模式提供了关键技术支撑,并为探索海南自贸港数据跨境流动监管提供了有价值的应用实例。

未来,研究将进一步优化系统性能,增强跨链互操作性,提高隐私计算效率,推动其在跨境医疗数据共享、金融数据跨境交换和跨境贸易数据协同等场景有更多应用,为海南自由贸易港乃至全球数据要素安全有序流通提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 中共中央 国务院印发《海南自由贸易港建设总体方案》[EB/OL]. [2024-08-26]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2020-06/01/c_1126061164.htm.
- [2] 周念利,于美月,柳春苗. 我国自贸区(港)数据跨境流动试点制度创新研究[J]. 国际商务研究,2023,44(4):86-97.
- [3] 海南自由贸易港国际数据中心发展规定[N]. 海南日报,2024-11-30(A08).
- [4] 海南省互联网信息办公室,海南省委发展和改革委员会. 关于印发《海南自由贸易港数据出境管理清单(负面清单)(2024年版)》的通知[EB/OL]. [2024-08-26]. <http://www.hainanjubao.cn/xinwen/show-2872.html>.
- [5] WANG H M, ZHENG Z B, XIE S A, et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey[J]. International Journal of Web and Grid Services, 2018, 14(4): 352-375.
- [6] CHEN L X, LEE W K, CHANG C C, et al. Blockchain based searchable encryption for electronic health record sharing[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 95: 420-429.
- [7] EVANS D, KOLESNIKOV V, ROSULEK M. A pragmatic introduction to secure multi-party computation[J]. Foundations and Trends in Privacy and Security, 2018, 2(2/3): 70-246.
- [8] YANG Q, LIU Y, CHEN T J, et al. Federated machine learning: concept and applications[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2019, 10(2): 1-19.
- [9] CHINNASAMY P, VINODHINI B, PRAVEENA V, et al. Blockchain based access control and data sharing systems for smart devices[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1767(1): 012056.
- [10] 张帅,项伟. 基于区块链对溯源数据的多方共享系统[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(6): 394-399.
- [11] 王瑞锦,唐榆程,裴锡凯,等. 基于轻量级同态加密和零知识证明的区块链隐私保护方案[J]. 计算机科学, 2021, 48(增刊2): 547-551.
- [12] ZHANG C, LIU Y, XU M D, et al. Trans-border trusted data spaces: a general framework supporting trustworthy international data circulation[J]. IEEE Access, 2025, 13: 30481-30496.
- [13] SPRENKAMP K, DELGADO FERNÁNDEZ J, ECKHARDT S, et al. Overcoming intergovernmental data sharing challenges with federated learning[J]. Data & Policy, 2024, 6: e27.
- [14] ZHU L H, WU Y L, GAI K K, et al. Controllable and trustworthy blockchain-based cloud data management [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 91: 527-535.
- [15] ZYSKIND G, NATHAN O, PENTLAND A. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data [C]//2015 IEEE Security and Privacy Workshops. San Jose: IEEE, 2015: 180-184.
- [16] 覃浩华,李志. 基于智能合约的数据跨境流动风险识别机制[J]. 中国人民警察大学学报, 2022, 38(6): 31-37.
- [17] 李光柱,李雷孝,高昊昱. 跨链技术发展与应用研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(2): 32-45.
- [18] 余益民,刘明瑶,陈韬伟. 基于区块链的跨境物流数据共享及交换研究[J]. 电子商务, 2020(11): 1-2, 10.
- [19] NALIN M, BARONI I, FAIELLA G, et al. The European cross-border health data exchange roadmap: case study in the Italian setting [J]. Journal of Biomedical Informatics, 2019, 94: 103183.

作者简介:

张汉宁,毕业于西安交通大学,教授级高级工程师,博士,主要从事人工智能、大数据分析、智能系统等研究工作;甘泉,毕业于南京邮电大学,高级工程师,硕士,主要从事信息通信、产业互联网等工作;冯磊,毕业于黑龙江科技学院,高级工程师,学士,主要从事信息通信、人工智能等领域的研究工作;马瑞涛,毕业于北京邮电大学,教授级高级工程师,硕士,主要从事人工智能、区块链及新型数字技术的创新应用工作;邓俊琼,毕业于海南师范大学,高级工程师,学士,主要从事信息通信、计算机应用等领域的研究工作。