



XXXX

基于通证化的跨境可信数据空间：关键技术、系统构建与未来展望

余智, 李春梅

(中国移动通信有限公司研究院安全技术研究所, 北京 100053)

摘要: 随着数字经济全球化深入发展, 跨境数据流通需求激增, 传统模式面临信任缺失、安全风险及合规壁垒等关键挑战。针对跨境数据可信高效安全流转的需求, 提出基于通证化的跨境可信数据空间。该空间通过融合通证化核心技术与数据空间技术, 实现跨境数据的可信共享、安全可控及合规流转, 构建一体化跨境数据治理生态, 其技术体系与系统构建方案可为跨境数据治理生态建设提供重要参考。

关键词: 通证化; 跨境可信数据空间; 数据流通; 跨境数据合规

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Tokenization-based Cross-border Trusted Data Space: Key Technologies, System Construction and Future Outlook

YU Zhi, LI Chunmei

Institute of Security Technology, China Mobile Communications Corporation Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the in-depth development of the global digital economy, the demand for cross-border data circulation has surged, while traditional models are confronted with critical challenges such as lack of trust, security risks and regulatory barriers. To address the demand for trusted, efficient and secure cross-border data flow, this paper proposes a tokenization-based cross-border trusted data space. By integrating core tokenization technologies with data space technologies, this space enables trusted sharing, secure control and compliant circulation of cross-border data, thereby establishing an integrated cross-border data governance ecosystem. Its technical system and system construction scheme can provide important reference for the development of cross-border data governance ecosystems.

Key words: tokenization, cross-border trusted data space, data circulation, cross-border data compliance

0 引言

在数字经济全球化深入发展的背景下, 跨境

数据流通已成为驱动全球贸易协同、产业升级与科技创新的核心引擎。随着跨境电子商务、跨境金融、跨境医疗等新业态的快速崛起, 数据作为



关键生产要素的流动需求呈现指数级增长，但其面临的信任缺失、安全风险、合规壁垒等问题日益凸显。传统跨境数据流通模式依赖中心化机构背书，存在数据篡改风险、隐私泄露隐患以及跨境监管协同不足等弊端，难以满足数字经济时代对数据可信、高效、安全流动的需求^[1]。

通证化技术作为区块链、分布式账本等技术的重要应用延伸，通过将数据权益、访问权限、合规状态等要素以数字通证形式进行锚定与流转，为构建跨境可信数据空间提供了全新技术路径。通证化不仅能够实现数据权属的清晰界定与可追溯管理，还能通过智能合约自动化执行数据访问规则与合规要求，打破跨境数据流通中的信任壁垒。在此背景下，基于通证化的跨境可信数据空间应运而生，其核心目标是通过通证化技术与数据空间技术的深度融合，构建一个集数据可信共享、安全可控、合规流转于一体的跨境数据治理生态^[2]。

当前，国内外学者与企业已围绕跨境数据治理、可信数据空间构建、通证化技术应用等方面开展了大量研究与实践。在跨境数据安全治理领域，已有研究提出基于“AI+Web 3.0”的治理模型，通过区块链实现数据溯源与访问控制，利用AI技术强化风险检测与合规审计^[3]。在可信数据空间方面，国际数据空间（IDS）参考架构通过标准化接口与协议实现数据空间互联互通，为跨境数据共享提供了基础技术框架；在通证化应用方面，已有研究探索了通证化在数据权属确认、访问权限管理、合规凭证流转等场景的技术实现。然而，现有研究尚未形成通证化技术与跨境可信数据空间深度融合的完整技术体系，在通证化数据权益映射、跨境多链通证互认、通证化合规自动化执行等关键技术环节仍有待突破。

1 关键技术

基于通证化的跨境可信数据空间是多技术融

合的复杂系统，其核心技术体系涵盖通证化核心技术、数据可信流通技术、跨境合规适配技术、通证化数据空间运维技术等关键技术方向，各技术模块相互协同，共同保障跨境数据空间的可信性、安全性与高效性。

1.1 通证化核心技术

通证化核心技术是构建跨境可信数据空间的基础，主要包括通证生成与标准化、通证账本与共识机制、通证流转与智能合约执行三大关键技术，实现数据权益的数字化锚定与可信流转。

通证生成与标准化技术聚焦于将跨境数据相关权益与属性转化为标准化数字通证。数据通证的生成需基于数据分类分级结果，明确通证对应的数据源、数据类型、权属主体、访问权限、有效期限等核心属性。采用基于哈希算法的通证标识生成方案，依托SHA-256算法的强抗碰撞性，对数据元数据进行加密运算，可有效避免不同元数据生成相同哈希值，从算法底层保障通证标识的唯一性，确保通证与对应数据的一一映射关系。同时，参考W3C去中心化身份（DID）标准与ISO/IEC 27701数据隐私保护标准，制定跨境数据通证的统一数据格式与元数据规范，涵盖通证权属、权限控制、合规校验等字段，确保不同跨境数据空间节点对通证的识别与解析一致性^[4]。共识机制采用PBFT与DPoS混合方案，在百级节点规模下，PBFT可实现容错阈值达节点总数1/3，保障核心交易一致性，DPoS则将出块节点限定为选举节点，使系统吞吐量随节点规模提升呈线性增长，兼顾安全性与高效性。例如，跨境电商交易数据通证含供需方DID、数据分类等级、访问有效期、合规认证编号等核心字段，为跨境流转的权限校验与合规审计提供依据。

通证账本与共识机制技术为通证流转筑牢可信存储与验证底座，依托联盟链架构搭建专属通证账本，将数据供需方、监管及认证机构纳入节点体系，通过严格的节点准入机制完成主体资质

核验，从参与源头保障账本安全。账本采用“链上+链下”混合存储架构，将通证权属、权限及流转记录等核心管控信息上链存证，实现全流程可追溯与不可篡改；数据原文则存储于 IPFS 分布式文件系统，仅将数据哈希值与通证关联，在实现数据与通证精准绑定的同时，大幅降低链上存储负载。该技术通过适配的共识机制，兼顾核心交易一致性与账本交易处理效率，可充分满足跨境数据通证高频流转的业务需求。以跨境医疗数据场景为例，医疗数据原文留存于机构本地 IPFS 节点，通证账本仅记录数据访问权限与流转轨迹，通过哈希值即可完成通证与数据原文的一致性校验^[5]。

通证流转与智能合约执行技术实现通证化数据访问与流转的自动化、合规化。通证流转采用基于智能合约的访问控制机制，数据提供方通过部署智能合约定义通证流转规则，包括通证持有方权限范围、数据访问条件、合规校验要求等。当数据需求方发起访问请求时，需通过通证持有证明、身份认证等前置校验，智能合约自动验证请求方通证有效性、权限匹配度以及是否满足跨境合规要求，验证通过后自动授权数据访问权限或触发数据加密传输^[6]。通证流转过程中，智能合约自动记录每一笔流转交易，包括流转时间、参与主体、权限变更等信息，形成完整的流转轨迹链，支持全生命周期追溯。此外，针对跨境场景下的多币种支付与权益结算需求，智能合约集成跨境支付通证模块，实现数据价值的跨境变现。

1.2 数据可信流通技术

数据可信流通技术是基于通证化的跨境可信数据空间的核心支撑，主要包括通证化数据加密传输、数据权益追溯、跨境数据一致性校验等技术，保障数据在跨境流转过程中的安全性、完整性与可追溯性。

通证化数据加密传输技术实现数据在跨境传

输中的机密性与完整性保护。采用“通证绑定加密”方案，数据提供方在传输数据前，基于数据通证对应的公钥对数据进行非对称加密，仅持有对应私钥的通证持有者可解密数据。针对大规模跨境数据传输场景，结合对称加密算法（AES-256）与非对称加密算法（RSA-2048）的混合加密机制，通过 AES-256 算法对数据原文进行加密，利用 RSA-2048 算法对 AES 密钥进行加密，加密后的密钥与数据通证进行绑定存储^[7]。同时，引入传输层安全协议（TLS1.3）与量子密钥分发（QKD）技术增强传输链路安全性，抵御中间人攻击、窃听等网络威胁。面向量子计算带来的密码体系安全威胁，可将基于格理论的后量子密码算法（如 CRYSTALS-Kyber）集成至通证绑定加密体系，构建后量子加密迁移路径：在通证元数据中新增后量子公钥字段，采用该算法对 AES 密钥进行二次加密，替代传统 RSA-2048 完成密钥加密环节，通证持有者通过配套后量子私钥实现密钥解密，既保留通证与加密密钥的绑定关系，又实现现有加密机制向抗量子攻击体系的平滑过渡，保障量子计算时代下跨境数据加密传输的安全性。

数据权益追溯技术基于通证流转轨迹实现数据全生命周期的权益追溯与审计。通过将数据访问、修改、共享等操作与数据通证进行关联绑定，每一次数据操作都会生成对应的通证交易记录，记录操作主体、操作时间、操作内容等关键信息。采用区块链分布式账本技术，确保追溯记录的不可篡改与不可删除，支持数据权益相关方随时查询数据流转轨迹与操作详情。引入零知识证明（ZKP）技术实现隐私保护下的权益验证，数据使用方在不泄露具体数据内容的前提下，可通过零知识证明向数据提供方或监管机构证明其数据使用行为符合通证约定的权益规则^[8]。此外，构建数据权益追溯分析引擎，基于大数据分析技术对通证流转记录进行深度挖掘，识别异常



数据流动行为，为数据权益纠纷处理提供技术支持。

跨境数据一致性校验技术保障通证与对应数据在跨境流转中的一致性与完整性。采用基于哈希值的一致性校验机制，数据提供方在生成数据通证时，计算数据原文的哈希值并写入通证元数据，数据接收方在获取数据后，重新计算数据哈希值并与通证中记录的哈希值进行比对，验证数据是否被篡改。针对跨境数据传输中的分片传输场景，采用默克尔树（Merkle Tree）技术对数据分片进行哈希计算，将根哈希值写入数据通证，接收方通过验证各分片哈希值与根哈希值的一致性，确保数据分片完整无缺失^[9]。同时，引入智能合约自动校验机制，定期对跨境流转中的数据与通证进行一致性校验，发现不一致时自动触发预警并冻结相关通证流转，保障数据与通证的关联性。

1.3 跨境合规适配技术

跨境合规适配技术是通证化跨境可信数据空间实现全球化部署的关键，主要包括合规规则通证化、跨境监管协同、多域通证互认等技术，确保数据跨境流转符合不同国家和地区的监管要求。

合规规则通证化技术将跨境数据监管规则转化为可执行的智能合约与通证属性，实现合规要求的自动化落地。基于自然语言处理（NLP）技术对不同国家和地区的跨境数据监管法规进行解析，提取核心合规条款，包括数据本地化存储要求、数据出境安全评估标准、个人信息保护规则等。将解析后的合规规则转化为结构化的智能合约代码，通过通证属性定义合规要求，例如，针对欧盟 GDPR 法规，在数据通证中设置“数据主体同意”、“数据脱敏要求”、“跨境传输授权”等合规属性^[10]。智能合约自动校验数据通证的合规属性，只有满足全部合规要求的通证才能参与跨境流转，实现合规要求的强制约束与自动化执

行。此外，建立合规规则更新机制，通过通证升级实现合规规则的动态迭代，适应跨境监管政策的变化。

跨境监管协同技术基于通证化实现跨境监管机构之间的信息共享与协同执法。构建跨境监管通证体系，监管机构通过专属通证接入跨境可信数据空间，获取授权范围内的数据通证流转记录与合规校验信息。采用联盟链技术构建跨境监管节点网络，各监管节点通过共识机制同步监管数据，实现监管信息的可信共享。引入监管智能合约，支持监管机构通过通证发起合规审计请求，智能合约自动提取相关数据通证的流转记录、访问日志等信息，生成合规审计报告^[11]。例如，在跨境金融数据监管场景中，不同国家的金融监管机构通过监管通证接入数据空间，实时获取跨境金融数据通证的流转状态，通过智能合约自动化完成合规校验与风险监测。

多域通证互认技术解决不同跨境数据空间之间的通证互联互通问题。采用通证映射机制，通过跨链网关实现不同区块链网络上的数据通证相互映射与兑换，建立统一的通证互认标准。参考国际数据空间（IDS）的互联互通协议，制定多域通证互认接口规范，确保不同数据空间的通证能够相互识别与验证。构建通证互认联盟链，作为不同数据空间通证互认的信任中介，通过跨链智能合约实现通证权属的跨域转移与验证。

1.4 通证化数据空间运维技术

通证化数据空间运维技术为跨境可信数据空间的稳定运行提供保障，主要包括通证生命周期管理、节点运维与监控、系统性能优化等技术，确保数据空间的高可用性与高效运行。

通证生命周期管理技术实现数据通证从生成、流转、注销到归档的全生命周期管理。通证生成阶段，基于数据分类分级结果与权属确认信息，通过智能合约自动生成标准化数据通证；通证流转阶段，实时监控通证交易状态，记录流转

轨迹，确保通证流转符合智能合约定义的规则；通证注销阶段，当数据有效期届满、数据权益转移或违规使用时，通过智能合约自动注销通证，冻结相关数据访问权限；通证归档阶段，将注销后的通证记录与相关数据流转信息进行归档存储，支持后续审计与追溯。同时，建立通证状态监控数据看板，实时展示通证生成数量、流转频次、合规状态等关键指标，为运维人员提供可视化管理工具。

节点运维与监控技术保障跨境可信数据空间节点的稳定运行与安全防护。采用容器化部署技术（Docker+Kubernetes）实现节点的弹性伸缩与快速部署，支持根据业务需求动态调整节点数量与资源配置。构建节点安全防护体系，集成节点身份认证、访问控制、入侵检测技术，依托公钥基础设施（PKI）实现节点身份认证，确保仅授权节点接入数据空间。部署实时监控系統，对节点运行状态、网络带宽、计算资源占用等指标实时监测，采用孤立森林与LSTM融合的AI异常检测算法，提取通证流转频次、节点负载波动、网络传输速率等核心特征构建检测模型，通过滑动窗口阈值校准与异常样本增量学习实现误报率控制在5%以内，精准识别恶意攻击、资源过载等异常行为并自动触发告警与故障转移^[8]。此外，建立节点备份与恢复机制，通过跨区域节点备份保障数据与通证信息可用性，在节点故障时快速完成数据恢复与服务迁移。

系统性能优化技术提升跨境可信数据空间的处理能力与响应速度，满足大规模跨境数据流转需求。采用分片技术将通证账本与数据存储进行分片处理，不同分片并行处理交易与数据访问请求，提升系统吞吐量。引入缓存技术对高频访问的通证元数据、智能合约代码等进行缓存，减少数据库查询压力，提升响应速度。优化智能合约执行效率，采用虚拟机优化、代码压缩、预编译合约等技术，降低智能合约执行的资源消耗与延

迟。针对跨境网络延迟问题，采用边缘计算技术部署边缘节点，将部分通证验证、数据加密等功能下沉至边缘节点，减少跨境数据传输距离，降低网络延迟。通过上述技术优化，可使跨境可信数据空间的通证交易处理延迟控制在秒级，支持每秒万级以上的交易吞吐量。

2 基于通证化的跨境可信数据空间的系统构建

2.1 系统需求分析与架构设计

系统构建的首要前提是建立覆盖业务、安全、合规、性能的多维度需求体系，为架构设计提供明确依据。业务需求层面，需适配跨境电商、金融、医疗、科研等多场景数据交互需求，支持B2B、B2C等不同模式下的数据通证发行、交易、兑换全流程操作，同时满足数据提供方、接收方、监管机构等多主体的协作需求，实现数据资源的高效配置。安全需求需贯穿数据全生命周期，涵盖传输加密、存储防篡改、访问权限管控、异常行为监测等核心诉求，针对跨境场景下的中间人攻击、数据窃取、恶意篡改等风险，建立多层次、全方位的安全防护体系。

合规需求需应对全球监管政策的差异性与动态性，适配欧盟GDPR、中国《数据出境安全评估办法》、APEC CBPR等多区域法规要求，解决数据本地化存储、出境安全评估、个人信息保护等核心合规痛点，支持合规规则的动态更新与自动化落地。性能需求需满足大规模跨境数据流转场景，明确通证交易处理延迟低于500ms，支持每秒万级以上交易吞吐量，同时适配跨境网络波动特性，保障数据传输成功率不低于99.9%，满足跨境业务的实时性要求。需求优先级划分采用Kano模型，将数据加密传输、合规校验、通证可信流转列为核心需求，多语言支持、可视化运维等作为增值需求，确保资源集中投入关键环节。

系统采用“六层分布式架构”设计，通过标



准化接口实现各层松耦合协作，兼顾可扩展性与可维护性。感知层作为数据接入入口，支持多源异构数据采集，包括跨境电商交易数据、物流数据、监管合规数据、医疗科研数据等，采用 Python 爬虫技术结合 BERT 模型实现结构化与非结构化数据的自动化采集与格式标准化处理，保障数据接入质量^[12]。接入层负责节点接入与身份认证，基于公钥基础设施（PKI）与去中心化身份（DID）技术，为每个参与节点分配唯一身份标识，结合 RBAC 权限模型实现细粒度权限管控，确保只有授权节点才能接入系统。

网络层构建跨境专用传输网络，基于 SD-WAN 技术优化跨境传输路径，结合 SRv6 分段路由实现数据传输的确定性转发，降低网络延迟，同时可选择部署量子密钥分发（QKD）技术保障传输链路的绝对安全，抵御网络监听与攻击。数

据层采用“链上+链下”混合存储架构，链上基于联盟链存储通证元数据、流转记录、权属信息等核心数据，确保不可篡改与可追溯；链下采用 IPFS 分布式文件系统存储数据原文，仅将数据哈希值与通证关联，兼顾存储效率与数据安全性。

通证层核心实现通证全生命周期管理与跨域互认，集成智能合约引擎执行通证规则，构建多域通证互认机制，解决不同跨境数据空间之间的通证互联互通问题。应用层提供面向不同场景的标准化接口与个性化服务，涵盖跨境数据交易、合规审计、风险监测、数据资产定价等功能模块，支持 Web 端、移动端、API 接口等多终端接入，满足不同用户的操作需求。

2.2 核心功能模块开发

通证管理模块采用模块化设计，实现从生成到归档的闭环管理，确保通证操作的规范性与可

表 1 基于通证化的跨境可信数据空间的六层分布式架构

层级	层级名称	数据交互格式	协议标准	安全约束条件	与其它层的交互规则
1	感知层	结构化与非结构化数据(如 JSON、XML、CSV 等)	HTTP/HTTPS、MQTT、CoAP	数据加密(TLS 1.3)、数据格式标准化(通过 Python 爬虫和 BERT 模型)	将标准化后的数据传输至接入层，确保数据格式和加密符合接入层要求
2	接入层	标准化数据(如 JSON、XML)	RESTful API、gRPC	身份认证(PKI、DID)、权限管控(RBAC)、数据加密(TLS 1.3)	接收感知层的数据，进行身份认证和权限管控，确保数据安全后传输至数据层；提供标准化 API 供应用层调用
3	网络层	加密数据包(如 IPSec、TLS 1.3 封装的数据)	SD-WAN、SRv6、IPSec、TLS 1.3	数据传输加密(TLS 1.3、IPSec)、传输路径优化(SRv6)、量子密钥分发(QKD)	接收接入层的数据，通过优化的跨境传输路径和加密技术，确保数据安全传输至数据层；可选部署 QKD 技术
4	数据层	链上数据(如通证元数据、流转记录、权属信息)和链下数据(如数据原文)	区块链协议(如 Hyperledger Fabric、Ethereum)、IPFS 协议	数据不可篡改(区块链)、数据存储安全(IPFS)、数据哈希值校验	接收网络层的数据，链上存储核心数据，链下存储数据原文，确保数据的安全性和可追溯性；与通证层交互，管理通证元数据和流转记录
5	通证层	通证数据(如通证元数据、智能合约代码)	智能合约协议(如 Solidity、Vyper)、API 接口	通证生命周期管理、通证互认(通过跨链网关和多域通证互认机制)	接收数据层的数据，管理通证的全生命周期，执行通证规则，确保通证的可信性和互认性；与应用层交互，提供通证相关的 API 调用
6	应用层	用户请求数据(如 HTTP 请求、API 调用参数)	RESTful API、gRPC、WebSocket	用户身份认证(多因素认证)、数据隐私保护(零知识证明)、数据访问控制	接收用户请求，通过调用通证层和数据层的 API，提供跨境数据交易、合规审计、风险监测、数据资产定价等功能；确保用户数据的安全和隐私

信性。通证生成组件基于数据分类分级结果，开发自动化生成引擎，输入数据元数据、权属信息、合规属性等参数，通过 SHA-256 算法生成唯一通证标识，参考 ISO/IEC 27701 标准定义通证元数据格式，包含数据类型、权属 DID、访问权限、有效期限、合规认证编号等核心字段。针对不同业务场景开发专用生成模板，例如跨境电商数据通证包含交易金额、物流信息、商品分类等字段，跨境医疗数据通证包含脱敏等级、科研用途限制、数据有效期等字段，满足场景化需求^[6]。

通证交易模块支持点对点交易与平台撮合交易两种模式，智能合约自动执行交易规则，包括定价机制、支付结算、权益转移等流程。集成跨境支付基于智能合约完成汇率计算、资金清算与交易记录上链，实现数据价值的跨境变现。通证注销与归档组件设计多触发机制，当数据有效期届满、权益转移完成或出现违规使用时，自动冻结访问权限并注销通证，注销记录与流转轨迹归档至分布式存储系统，保留至少 10 年审计痕迹，支持后续追溯。同时搭建通证状态监控看板，实时展示生成数量、流转频次、合规状态、交易成功率等关键指标，为管理人员提供可视化管理工具。

数据流转模块围绕“可信传输、可控共享、可追溯”核心目标，构建全流程安全管控机制。数据加密传输组件开发混合加密引擎，基于通证绑定的公钥加密方案，数据提供方通过通证中存储的接收方公钥对数据进行加密，传输过程采用 TLS1.3 协议构建安全通道，大规模数据传输支持分片传输与断点续传，通过默克尔树技术保障数据完整性。权限管控组件基于 RBAC 与 ABAC 混合模型，结合数据敏感等级、用户角色、通证属性动态分配访问权限，支持权限的实时调整与细粒度控制，防止越权访问^[13]。

合规适配模块核心解决多区域监管规则的融合与自动化执行问题，构建“规则解析-合约转

化-动态适配”全流程机制。规则解析组件基于 NLP 技术采集全球跨境数据法规，通过 BERT 模型做语义分析提取核心合规条款，搭建结构化规则库，该模型处理小语种、复杂句式法律文本时，语义提取准确率显著低于主流语言，形成技术准确率瓶颈。针对规则冲突开发专属消解算法，以“最严格标准优先”为核心决策逻辑，叠加场景化适配原则，如 GDPR “被遗忘权”与金融监管数据留存要求冲突时，在满足法定留存期限后执行数据删除操作，兼顾不同法规的合规约束与业务实际需求。

2.3 系统部署与集成

系统采用“跨境核心节点集群+边缘节点”的分布式部署方案，结合容器化与虚拟化技术实现灵活扩展与稳定运行。核心节点部署于亚太、欧洲、美洲等全球主要跨境数据中心，每区域至少 3 个构成集群，通过共识机制同步数据，保障高可用与容灾能力。边缘节点部署于跨境网络边缘，按任务分配算力：轻算力承担通证格式校验、身份初验等预验证工作，中高算力配置专用模块完成数据分级脱敏、本地合规初验，仅将校验通过的通证元数据、脱敏数据同步至核心节点。边缘与核心节点通过加密专线联动，构建“边缘前置处理-核心集中管控”负载均衡模型，边缘承接 80% 以上本地轻量化任务，大幅降低核心节点计算与跨境传输负载。

系统需与跨境业务系统、监管系统、第三方服务系统实现无缝集成，采用标准化接口与中间件技术保障兼容性与数据一致性。与跨境电商平台集成时，通过 RESTful API 接口对接交易数据、用户数据、物流数据，开发数据适配器实现不同平台数据格式的标准化转换。与监管系统集成时，遵循监管机构的数据接口规范，开发合规数据上报组件，自动提取通证流转记录、合规校验结果、数据访问日志等信息，支持监管机构的实时查询与审计。



第三方服务集成涵盖支付系统、身份认证系统、物流追踪系统等，通过智能合约实现多币种支付与通证兑换的自动化结算。身份认证系统集成生物识别、硬件令牌、数字证书等多因素认证方式，与第三方CA机构合作实现身份认证的可靠性与权威性。集成过程中采用Kafka消息队列实现异步通信，降低系统间耦合度，通过哈希值比对、数据签名验证等机制保障传输数据的完整性与准确性。

针对存量系统的数据迁移需求，采用“无损迁移+平滑切换”方案，确保数据迁移过程中的安全性与业务连续性。迁移前梳理存量数据的类型、权属、敏感等级、流转记录等信息，基于分类分级结果制定差异化迁移策略，核心敏感数据采用加密迁移方式，普通数据采用批量同步方式，避免数据泄露与丢失。开发专用迁移工具，支持从传统数据库（MySQL、Oracle）与分布式存储系统（HDFS、IPFS）中提取数据，通过通证生成引擎为存量数据批量创建对应通证，确保数据与通证的一一映射关系。

2.4 系统运维与优化

建立覆盖通证、节点、系统的全生命周期运维机制，保障跨境可信数据空间的稳定运行。通证运维方面，构建通证状态实时监控系統，跟踪通证生成、流转、注销、归档全流程状态，设置异常阈值告警机制，当通证流转频次异常、合规校验失败、权限变更异常时自动触发告警，通知运维人员及时处理。定期开展通证合规审计，核查通证属性与监管规则的适配性，清理无效通证与过期通证，优化通证存储结构。

节点运维方面，采用容器化管理工具实现节点的弹性伸缩与快速部署，支持根据业务负载动态调整节点数量与资源配置。构建节点安全防护体系，包括节点身份认证、访问控制、入侵检测、漏洞扫描等功能，采用基于PKI的节点身份认证机制，防止未授权节点接入，定期更新安全

防护规则，抵御新型攻击。建立节点备份与恢复机制，通过跨区域节点备份确保数据与通证信息的可用性，在节点故障时快速实现数据恢复与服务迁移，保障系统连续性^[14]。

系统运维方面，部署实时监控平台，采集系统运行指标，包括交易吞吐量、延迟、节点负载、网络带宽占用等，通过可视化仪表盘展示运维状态。建立运维日志管理系统，记录通证操作、节点状态变化、系统配置变更等信息，保留至少1年运维日志，支持故障追溯与审计。制定常态化运维流程，包括日常巡检、定期维护、应急响应等，明确运维职责与操作规范，提升运维效率。

针对跨境数据流转的大规模、高并发特性，采用多层次性能优化策略，提升系统处理能力与响应速度。通证账本优化采用分片技术，按区域、数据类型、业务场景对通证账本与数据存储进行分片处理，不同分片并行处理交易与数据访问请求，提升系统吞吐量。引入缓存技术，对高频访问的通证元数据、智能合约代码、合规规则库等进行内存缓存，减少数据库查询压力。

智能合约优化采用预编译合约、代码压缩、虚拟机优化等技术，降低合约执行的资源消耗与延迟，将合约执行时间控制在毫秒级。数据传输优化结合边缘计算与数据压缩技术，边缘节点承担部分通证验证、数据加密、合规校验功能，减少跨境传输数据量，通过压缩算法对传输数据进行压缩，降低带宽占用。网络优化基于SD-WAN技术动态选择最优传输路径，避开网络拥堵节点，部署CDN节点缓存静态资源，减少数据传输距离，针对跨境网络延迟问题，采用量子密钥分发与确定性路由技术，保障传输稳定性^[15]。

3 未来展望

3.1 技术融合纵深推进

未来通证化跨境可信数据空间将与新兴数字

表2 基于通证化的跨境可信数据空间的关键技术与系统构建

关键技术	核心技术	对应系统构建环节	典型应用场景	场景化技术指标	原型测试方案	性能达成路径	性能边界条件
通证化核心技术	-通证生成与标准化 -通证账本与共识机制 -通证流转与智能合约执行	-需求分析与架构设计(通证层/数据层) -核心功能模块开发(通证管理/交易模块) -系统运维与优化(智能合约优化)	-跨境电商交易数据通证化 -跨境金融数据访问控制	-通证生成耗时短 -合约执行延迟低 -交易端到端延迟达标	搭建多地域核心节点+边缘节点原型系统,覆盖跨境电商/金融场景,实测通证生成、跨域交易、权限校验等核心操作,模拟跨境网络波动与异构节点配置,全流程记录操作延迟与交易成功率	-哈希算法生成唯一通证标识,遵循国际标准化制定元数据规范 -混合共识机制兼顾交易一致性与处理效率 -智能合约预编译优化,边缘节点前置通证格式校验、身份初验等轻量化操作	-跨境网络基础延迟与丢包率在合理适配范围 -异构节点数量与算力差异控制在设计区间 -复杂通证操作需拆分执行,避免单次任务过载
数据可信流通技术	-通证化数据加密传输 -数据权益追溯 -跨境数据一致性校验	-需求分析与架构设计(网络层/数据层) -核心功能模块开发(数据流转模块) -系统部署与集成(加密传输组件)	-跨境医疗数据加密传输 -跨境贸易数据防篡改	-加解密速率高 -数据传输成功率 -权益追溯查询响应快	部署跨境加密传输原型链路,测试分片传输、断点续传功能,模拟节点临时故障与网络带宽波动,验证数据完整性校验效果与权益追溯日志查询效率	-混合加密结合通证绑定,多重传输协议增强链路安全 -通证关联操作日志上链存证,零知识证明实现隐私保护下的验证 -哈希值+默克尔树双重校验,智能合约自动触发异常预警	-跨境网络带宽与波动幅度处于可控范围 -单批次传输数据量与分片数适配系统处理能力 -核心节点故障数与持续时间在容灾设计范围内
跨境合规适配技术	-合规规则通证化 -跨境监管协同 -多域通证互认	-需求分析与架构设计(通证层/应用层) -核心功能模块开发(合规适配模块) -系统部署与集成(监管系统对接)	-欧盟GDPR合规自动校验	-规则解析准确率高 -合规校验响应快-跨境通证互认无差错	对接跨境监管节点原型,搭建跨域通证互认测试环境,实测合规校验、监管数据上报、跨境通证映射全流程,验证多区域法规适配性与通证互认有效性	-自然语言处理技术解析法规,转化为结构化智能合约代码 -通证嵌入合规属性字段,智能合约自动化完成合规校验 -跨链网关结合互认联盟链,实现通证跨域映射与验证	-单次合规校验涉及规则数与通证属性字段数适中 -合规校验节点算力满足基础处理要求,监管节点同步延迟低 -参与互认的区块链网络兼容统一接口规范
通证化数据空间运维技术	-通证生命周期管理 -节点运维与监控 -系统性能优化	-需求分析与架构设计(全层级运维架构) -系统部署与集成(核心/边缘节点部署) -系统运维与优化(全生命周期运维)	-通证状态可视化 -跨境节点故障容灾	-系统吞吐量达万级 -异常检测误报率低 -节点故障恢复时间短	容器化部署核心+边缘节点集群原型,发起高并发通证交易请求至系统瓶颈,验证吞吐量指标。人为模拟节点故障、资源过载,测试故障恢复率与异常检测精准度	-智能合约自动化完成通证全生命周期管理,可视化看板实时监控状态 -容器化弹性伸缩适配业务负载,AI算法精准识别节点异常 -分片技术提升并行处理能力,缓存高频数据,SD-WAN优化跨境传输路径	-账本分片数量与并发用户数适配系统承载能力 -边缘与核心节点数量按业务需求合理配置 -分布式存储读写速度满足系统基础数据交互要求

技术开展场景化分阶段融合,打造智能自适应的基础设施体系。以医疗数据跨境场景为例,联邦学习与通证化技术将分三步融合演进:第一阶段实现权限锚定,通过通证定义医疗数据分级访问权限,联邦学习依托通证完成跨机构节点准入与联合建模,同步制定通证与模型参数的交互适配标准;第二阶段实现全流追溯,基于通证流转轨迹记录联邦学习训练全流程,构建隐私计算与通

证账本的联动验证机制;第三阶段实现动态调控,通过通证化实时调整联邦学习节点参与权与模型更新权限,达成数据使用与权益管控的一体化。此外,AI大模型将深度嵌入通证全生命周期管理,实时解析监管与市场动态实现通证策略智能调整。6G与空天地一体化通信将为边缘节点提供超低时延连接,支撑通证验证与数据交换毫秒级完成,打破地理边界对实时协同的限制。



表3 基于通证化的跨境可信数据空间的核心指标及可行性

关键技术	核心验证指标	可行性分析依据	典型技术支撑	指标可行性结论
通证化核心技术	-通证交易端到端延迟<500ms -系统吞吐量达万级TPS	-混合共识机制兼顾一致性与高效性，PBFT保障核心交易可靠，DPoS提升出块效率，适配高频交易需求； -分片技术实现账本并行处理，可大幅提升系统整体交易处理能力； -边缘节点前置轻量化校验操作，减少核心节点交互与跨境传输耗时	PBFT+DPoS 混合共识、账本分片技术、边缘计算前置处理、智能合约预编译	依托成熟的共识优化与并行处理技术，结合边缘轻量化操作，从技术原理上可实现延迟与吞吐量指标，具备可行性
数据可信流通技术	-数据跨境传输成功率>99.9% -数据一致性校验准确率100%	-混合加密+通证绑定机制为数据传输提供双层安全保障，TLS1.3+QKD技术可有效抵御跨境传输链路风险； -哈希值唯一映射特性+默克尔树分片校验，从密码学原理上可实现数据完整性精准验证； -断点续传与智能合约自动重传机制，可有效降低跨境网络波动导致的传输失败率	AES-256+RSA-2048 混合加密、哈希校验+默克尔树验证、TLS1.3传输协议、断点续传机制	基于密码学基础原理与成熟的传输容错技术，数据传输与一致性校验的指标要求可实现，具备可行性
跨境合规适配技术	-合规校验响应时间<200ms -多域通证互认成功率100%	-合规规则通证化将法规转化为机器可执行的智能合约，避免人工介入，大幅缩短校验耗时 -预编译合规规则缓存至节点本地，可实现规则快速匹配 -跨链网关+统一接口规范，从技术架构上保障不同数据空间通证的精准映射与互认	NLP法规解析、智能合约自动化执行、跨链网关技术、国际数据空间(IDS)互联互通协议	依托智能合约自动化与标准化接口互认的成熟技术架构，合规校验与通证互认的指标可实现，具备可行性
通证化数据空间运维技术	-节点异常检测误报率≤5% -节点故障恢复时间<5分钟	-孤立森林+LSTM融合的AI异常检测算法，结合多维度运行特征，可实现异常行为精准识别，从算法设计上控制误报率 -容器化部署(Docker+K8s)支持节点弹性伸缩与快速启停，跨区域节点备份机制可实现数据快速同步 -故障自动切换机制无需人工干预，大幅缩短恢复耗时	容器化编排技术、PKI节点身份认证、孤立森林-LSTM融合算法、跨区域节点备份	基于成熟的容器化运维与AI异常检测技术，节点监控与故障恢复的指标要求可实现，具备可行性

3.2 治理范式全球协同

随着各国数据主权意识增强，单一国家主导的治理模式将逐步让位于多边共治新范式。未来基于通证的跨境数据空间有望成为全球数字治理的“通用语言”，通过建立跨国互认的通证标准联盟（如ISO/IEC框架下的专项工作组），推动GDPR、CCPA、中国《个人信息保护法》等法规核心条款转化为机器可读、可执行的通证属性

集。国际组织或将牵头设立“跨境数据通证认证中心”，为符合多域合规要求的数据通证颁发“全球信任徽章”，大幅降低企业合规成本。同时，监管沙盒机制将扩展至跨国层面，允许企业在受控环境中测试新型通证流转模式，积累监管经验并反哺规则优化。这种“技术驱动+制度协同”的双轮治理模式，将有效弥合监管碎片化鸿沟，构建更具包容性与韧性的全球数据流通

秩序^[16]。

3.3 应用生态泛在拓展

通证化跨境可信数据空间将从当前聚焦电商、金融、医疗等垂直领域，向更广泛的经济社会场景渗透，催生新型数据要素市场与商业模式。在绿色经济领域，碳足迹、ESG 表现等可持续发展指标可被通证化，实现跨国供应链碳数据的可信追溯与交易，支撑全球碳关税机制落地。在科研协作方面，高校与研究机构可通过通证共享基因组、气候模拟等高价值数据集，在保障知识产权前提下加速跨国联合创新。更进一步，个人将成为数据通证的重要主体，用户可自主发行代表其健康记录、消费偏好或技能认证的个人数据通证，在跨境求职、保险定制、教育认证等场景中实现数据资产化变现。伴随 Web3.0 身份体系普及，通证化数据空间将演化为支撑全球数字公民权利的基础平台，推动数据从“平台所有”向“主体可控”根本性转变，重塑数字经济的价值分配逻辑。

4 结束语

本文首先介绍了基于通证化的跨境可信数据空间关键技术，包括通证化核心技术、数据可信流通技术、跨境合规适配技术及通证化数据空间

运维技术。随后阐述了系统构建全流程要点，涵盖需求分析与架构设计、核心功能模块开发、系统部署与集成及运维优化，并总结了技术体系与系统构建的核心特征等。最后，针对未来技术融合纵深推进、治理范式全球协同及应用生态泛在拓展等方向，进行了深入探讨，给出了系统性发展思路。

表4 基于通证化的跨境可信数据空间未来展望

发展方向	核心特征	关键支撑技术	治理/制度创新	典型应用场景	社会经济价值
技术融合纵深推进	-智能化、实时化、自适应 -分阶段场景化融合	-AI大模型、隐私计算、6G与空天地网络 -联邦学习、通证账本联动验证机制	-动态合规引擎、自动化策略更新机制 -通证与模型参数交互适配标准	-跨境实时风控、高敏医疗数据协作 -跨境医疗数据联邦学习联合建模	-实现毫秒级安全协同，释放数据要素潜能 -达成数据使用与权益管控一体化
治理范式全球协同	-多边互认、规则可执行 -技术驱动+制度协同	-通证标准化、跨链互操作、智能合约 -机器可读的通证属性集	-全球认证中心、跨国监管沙盒 -ISO/IEC框架下通证标准联盟、跨境数据通证认证中心	-跨境电商合规、国际审计与执法协作 -多域跨境数据监管协同执法	-降低企业合规成本50%以上，提升全球互信 -弥合监管碎片化鸿沟，构建韧性全球数据流通秩序
应用生态泛在拓展	-主体多元、场景泛化 -数据从平台所有向主体可控转变	-个人数据通证、Web3.0身份、 -碳足迹通证、ESG通证、高价值科研数据集通证	-数据产权确权、跨境资产交易规则 -跨国供应链数据交易规则、个人数据资产化制度	-碳足迹交易、科研数据共享、数字身份认证 -跨境求职/保险定制/教育认证、跨国供应链碳数据追溯	-推动个人数据资产化、催生万亿美元新市场 -支撑全球数字公民权利，重塑数字经济价值分配逻辑



参考文献:

- [1] ZHAO X S. A study on the applications of big data in cross-border e-commerce[C]// 2018 IEEE 15th International Conference on e-Business Engineering(ICEBE). Piscataway: IEEE, 2018:280-284
- [2] 梅宏,黄罡. 可信数据空间:数据产业高质量发展的新动力[J]. 智慧中国, 2024, 12: 20-21
MEI H, HUANG G. Trusted data space: A new driving force for the high-quality development of the data industry[J]. Wisdom China, 2024, 12: 20-21
- [3] LI X, LU Z G. Construction of a global cross-border e-commerce data security governance model based on "AI+web 3.0" [C]//2024 International Symposium on Digital Home (ISDH). Piscataway: IEEE, 2024:338-342
- [4] 朱奥,韩昊轩,等. 基于区块链的通证化数字债券探索[J]. 债券, 2023, 2:33-37
ZHU A, HAN H X, et al. Exploration of tokenized digital bonds based on blockchain[J]. China Bond, 2023, 2:33-37
- [5] ZHANG B, GUO S J, et al. Cross-border data circulation solution based on xinghuo chain network[C]//2023 3rd International Conference on Networking Systems of AI(INSAI). Piscataway: IEEE, 2023: 291-296
- [6] 蒋荣. 基于智能合约的数据跨境流动多方互信机制构建和应用[J]. 大数据, 2025, 5: 126-137
JIANG R. Construction and application of a multi-party trust mechanism for cross-border data flow based on smart contracts [J]. Big Data Research, 2025, 5: 126-137
- [7] FANG Z, ZHANG K, et al. Risk assessment based on dataflow dynamic hypergraph for cross border data transfer[C]//2024 IEEE 23rd International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom). Piscataway: IEEE, 2024: 2504-2509
- [8] ZHANG C, LIU Y, et al. Trans-border trusted data spaces: a general framework supporting trustworthy international data circulation[J]. IEEE Access, 2025: 30481-30496
- [9] HUANG X R. Secure sharing of cross-border trade data based on fuzzy neural network mode[C]//2025 International Conference on Intelligent Communication Networks and Computational Techniques (ICICNCT). Piscataway: IEEE, 2025
- [10] 蒋牧云,何莎莎. 巨头境外发力资产通证化,安全合规仍是底线[N]. 中国经营报, 2024/08/26
JIANG M Y, HE S S. Giants step up efforts in asset tokenization overseas, safety and compliance remain the bottom line [N]. China Business Journal, 2024/08/26
- [11] MENG W T. Construction of a legal collaborative model for cross-border communication data flow in the guangdong-hong kong-macao greater bay area[C]//2025 IEEE 7th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE). Piscataway: IEEE, 2025:1185-1189
- [12] LI Y, MENG N. Design of cross-border e-commerce data acquisition system based on python crawler technology[C]//2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms(EEBDA). Piscataway: IEEE, 2024: 506-510
- [13] 中国工商银行金融科技研究院区块链研究团队. 区块链赋能可信数据空间建设的研究与实践[J]. 中国金融电脑, 2025, 8 : 62-67
Blockchain Research Team, Fintech Research Institute, Industrial and Commercial Bank of China. Research and practice on blockchain empowering trusted data space construction[J]. Financial Computer of China, 2025, 8 : 62-67
- [14] 管涛,许茂恒. 可信数据空间的构建逻辑与路径-基于全生命周期理论[J]. 图书与情报, 2025, 5: 123-132
GUAN T, XU M H. Construction logic and path of trustworthy data space: based on the whole lifecycle theory[J]. Journal of Library and Information Science, 2025, 5: 123-132
- [15] 裴雷,陈晓宇. 大模型赋能可信数据空间:数据安全治理与信任机制构建[J]. 文献与数据学报, 2025, 7(2): 015-027
PEI L, CHEN X Y. Empowering trusted data spaces with large models: Data security governance and trust mechanism construction [J]. Journal of Library and Data, 2025, 7(2): 015-027
- [16] 胡峰. 流动的丰盈:面向可信数据空间建设的理论观照与实践观察[J]. 图书情报知识, 2025, 5: 6-18
HU F. Flowing abundance: Theoretical reflection and practical observation for the construction of trusted data space[J]. Documentation, Information & Knowledge, 2025, 5: 6-18

[作者简介]



余智 (1977-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院安全技术研究所主任研究员, 主要研究方向为区块链、Web3.0、数据安全、AI安全等。



:

李春梅 (1977-), 女, 硕士, 中国移动通信有限公司研究院安全技术研究所技术经理, 主要研究方向为区块链、

Web3.0、数据安全、AI 安全等。