

基于区块链的现实世界资产数字化发行及交易技术研究*

安 宁, 许文静, 刘珠慧, 于 重

(国务院国有资产监督管理委员会干部教育培训中心, 北京 100053)

摘 要: 随着加密货币 (Cryptocurrencies) 发行及交易的火爆, 其弊端也正日益凸显——由于没有现实世界资产的支持, 其价值只存在于网络上, 资产会在短时间造成大量损失, 因而现实世界资产 (Real-World Assets, RWA) 数字化成为当前关注的重点。此外如何建立安全有效的发行交易模型, 规避或降低已知的交易风险, 是目前研究的难点。通过深入研究当前 RWA 数字化存在的两大发展路线, 指出风险的存在是由于其数字化所建立的物理和数字空间市场割裂所导致的, 据此提出了一种新的“轨道模型”, 并构建了其发行与交易的数学模型, 解决了传统 RWA 数字化中的并行市场割裂与系统性风险问题。

关键词: 现实世界资产; 区块链; 轨道模型; 发行与交易

中图分类号: F49

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2097-1788.2025.07.005

引用格式: 安宁, 许文静, 刘珠慧, 等. 基于区块链的现实世界资产数字化发行及交易技术研究 [J]. 网络安全与数据治理, 2025, 44(7): 27-35, 57.

Research on blockchain-based technologies for digitizing the issuance and trading of real-world assets

An Ning, Xu Wenjing, Liu Zhuhui, Yu Zhong

(SASAC Education and Training System, Beijing 100053, China)

Abstract: As the issuance and trading of cryptocurrencies soar in popularity, their drawbacks are becoming increasingly apparent. Without the support of real-world assets, their value exists solely online, leading to potential substantial losses in a short period. Consequently, the digitization of Real-World Assets (RWA) has become a key focus of current attention. Furthermore, the challenge lies in establishing a secure and effective issuance and trading model to avoid or reduce known transaction risks. This article delves into the two major development pathways of current RWA digitization, pointing out that the existence of risks stems from the fragmentation between the physical and digital space markets created by their digitization. Based on this analysis, a new "Orbit Model" is proposed, along with a mathematical model for issuance and trading, addressing the issues of fragmented parallel markets and systemic risks in traditional RWA digitization.

Key words: RWA; blockchain; orbit model; issuance and trading

0 引言

加密货币或加密资产 (Cryptoassets) 是纯虚拟资产, 没有实物作为价值支撑, 因此价值不稳定经常暴涨暴跌, 对全球宏观经济与金融稳定正构成潜在威胁^[1]。不论是比特币、以太坊或是 NFT (Non-Fungible Token), 都是采取纯虚拟资产的模式。2022 年加密货币出现两次大事件 (Luna 和 FTX 事件), 造成损失高达 5 000 亿美元。美国、

韩国、新加坡等多国因此改变对加密货币的观点和政策, 2023 年美国开启两个重要改变: 一是在 2023 年不再使用证券法来治理加密货币, 二是开始重视现实世界资产 (Real-World Assets, RWA) 的数字化, 而不是只关注于纯虚拟资产。

虽然 RWA 数字化得到重视, 但是如何进行 RWA 项目仍然是一个研究课题。目前流行的方式是使用加密货币的底座如以太坊网络或分布式金融 (Decentralized Finance, DeFi) 系统生成 Token (这种方式非常便利, 在几分钟之内可生成 Token), 生成后就可以在交易所进行交

* 基金项目: 国务院国资委干部教育培训中心 (中央党校国务院国资委分校) 科研项目 (25GZW0308)

易,或是存在数字钱包内。如果在一个 DeFi 系统内产生,相关的加密货币生态可能已经建立,于是这样的 RWA Token 可以立刻在加密货币世界内流动。然而如果出现问题,损失不会限制在加密货币世界内,会外溢到银行界、金融界甚至整个社会。因此许多机构纷纷放弃这条路线,寻求重新建立一个数字经济的底座。

数字资产是通过区块链技术实现的数字化资产^[2],本文设计的基于区块链的新型 RWA 数字化模型突破传统现实世界资产数字化研究中物理空间与数字空间市场割裂的固有范式,依靠现实资产交易平台的全面链化和数字化做支撑,通过构建基于轨道耦合机制的新型发行交易模型,在数字孪生层面实现实物资产与数字凭证的动态价值锚定,所有数据的收集和处理都是对现实世界的一种抽象和模拟^[3]。基于现实世界资产的证书和相关部门管理,信息公开真实透明,数字资产较现有 RWA 更有说服力;同时从数学底层重构资产数字化交易的安全架构,为解决 RWA 领域长期存在的系统性风险难题提供了创新理论工具与方法论体系。

需要注意的是,这里讨论的问题不只发生在数字空间,在物理空间类似问题也会出现^[4]。本文主要讨论数字资产的问题以及解决方案。

1 RWA 数字化

1.1 RWA 数字化简介

数据资产包括现实世界资产(RWA)和虚拟资产两大类,如图1所示。其中RWA数字化已成为世界数字经济的发展趋势。

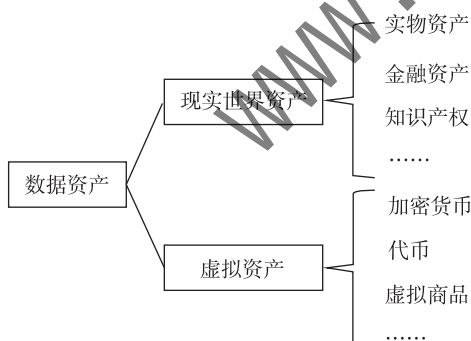


图1 数据资产分为两大类：现实世界资产和虚拟资产

RWA 与虚拟资产的开放和交易流程不同,RWA 需要先有现实世界资产然后数字化,而虚拟资产是纯虚拟化的资产。RWA 数字化,资产在物理空间,是让数字经济融合实体经济;而虚拟资产却重视支付和货币功能,资产停留在数字空间。RWA 上的 Token 不是数字代币,而是数字凭证;而虚拟资产上的 Token 代表在数字空间的资产。

RWA 通过区块链技术将现实世界资产数字化,即“链上化”,从而允许这些资产在区块链上进行交易或其他金融操作。

区块链的组成结构主要包括核心架构层和中间件层,每一层都在 RWA 中发挥着特定的作用。

(1) 核心架构层

区块链底层平台:这是 RWA 系统的基石,负责资产的登记、转移和管理。根据项目需求选择合适的区块链平台,确保系统的性能、安全性、可扩展性及合规性。

智能合约:用于定义资产的发行、转移、所有权、分配收益等规则。自动执行协议条款,管理资产生命周期,处理交易和结算。

数据存储:分为链上存储和链下存储。链上存储是将部分关键数据(如交易记录、合规信息等)存储在区块链上,保证数据的不可篡改性和可追溯性。链下存储是将大容量数据(如资产图片、文件等)存储在链下存储系统,降低链上存储成本,以实现数据的安全、高效存储和访问。

(2) 中间件层

预言机(Oracle Machine):将链下数据(如资产价格、法律文件等)安全地传输到链上。连接现实世界和区块链世界,提供可信的数据源,确保 RWA 系统的可靠性。

身份验证和 KYC/AML:验证用户身份,并执行反洗钱(AML)和了解你的客户(KYC)等合规要求。确保用户身份的真实性和合法性,以满足监管要求。

1.2 RWA 数字化优点

RWA 数字化具有流动性强、覆盖性广、安全性高及成本低等优点^[5]。

(1) 流动性:数字凭证化可以使传统的非流动性资产更具流动性,部分所有权允许较小投资者参与市场,增加需求和流动性。

(2) 覆盖性:数字化的 RWA 可以通过互联网进入每个国家或是地区。

(3) 安全性:利用区块链技术确保所有交易都是透明、不可变和安全的,每笔数字凭证交易都会被记录下来,使得欺诈或资产操纵变得困难。

(4) 成本性:数字化可减少对中介机构的需求,简化流程并降低成本。

1.3 RWA 数字化风险

2020 年经济合作与发展组织发布报告《资产数字凭证化以及其对金融市场潜在的意义》,提出 RWA 数字化对金融市场会有巨大影响,改变了市场架构和交易流程,也提出一些风险。

在合规性风险方面，RWA 市场通常涉及多国资产和投资者，不同司法管辖区的法律对资产代币化、交易等方面的规定存在差异。此外，如果 RWA 代币被认定为证券，其发行和交易将受到严格的证券法规监管。但在实际操作中，代币的证券属性认定存在模糊地带，可能导致项目方在未经适当注册和批准的情况下进行非法证券发行和交易活动。

在技术安全风险方面，RWA 数字化涉及大量敏感数据的跨境传输。对于一些与物联网设备等底层资产相关的 RWA 项目，底层资产的安全问题也会影响数字化资产。

此外，当前市场存在伪 RWA 项目泛滥的现象，部分项目缺乏真实资产支撑，却以 RWA 为噱头进行炒作，严重损害市场信任机制。估值逻辑缺失与数据来源不透明，使得 RWA 通证化在风险定价和资产定级方面缺乏可复制性和可验证性基础，容易陷入概念驱动大于价值支撑的误区。

1.4 RWA 数字化关键问题

RWA 数字化的关键问题包括资产真实性、资产合法绑定、参与方同步信息、交易安全有序等。（1）资产真实性。RWA 数字凭证化的资产必须是有价值的，资产是真实存在的。如果资产没有价值，那么数字凭证化的 RWA 就不存在。（2）资产合法绑定。RWA 资产在数字空间和物理空间都要有政府部门和监管单位的认可，需要法律合同绑定，通过合法公正的方式将物理空间与数字空间连接起来。（3）参与方同步信息。在物理空间与

数字空间都有很多参与单位，每一个参与单位都同步信息，保证信息在物理空间和数字空间上的每一个参与单位的一致性。（4）交易安全有序。交易要保证法律安全，法律安全包括监管以及相关合同有效，交易要有法律效力。监管方不能随意更改数据，保护所有参与者的隐私安全，同时也对监督单位的所有操作进行记录，监管方本身也处于被监管状态。交易要保证系统安全，防止交易平台卷款，同时要保证市场安全，在物理空间或数字空间出现任何交易异常时，能够紧急处理。

2 基于区块链技术的 RWA 发行路线

许多机构围绕 RWA 发行方式、法律规范以及 RWA 平台开展了研究。目前 RWA 出现公链发行和银行级别系统发行两种路线，其对比情况如表 1 所示。

（1）公链发行：RWA 数字资产发行在现成公链上，采用现成公链上的智能合约来产生 RWA 数字凭证。由于大部分公链都有原生加密货币，因此 RWA Token 不是该公链原生的数字资产，而这些 RWA Token 在大部分情形下由该公链的智能合约完成，因此该公链可能有成千上万的数字资产同时存在。

（2）定制银行级别的区块链系统发行：RWA 数字资产发行在银行级别的新型区块链系统上。区块链中的“区块”指的是数据被分组并打包成一个个数据块，“链”指的是每个区块通过哈希值链接在一起，形成了一个链式结构，并不断地扩展^[6]。每当有新的交易发生时，其交易信息就会被记录在一个新的区块中，并链接到前一个区块的末尾，形成连续的链^[7]。

表 1 两种 RWA 发行路线对比

	公链发行路线	银行级别系统发行路线
区块链系统	使用现成公链	定制化系统
系统架构	直接使用公链的智能合约，或是在公链内建立内部网络	新型区块链架构，与传统公链差距大
数字资产	发行的 RWA 数字资产和公链原生的加密货币，以及在该公链发行的其他数字资产共存	由于发行系统可以发行多种 RWA 数字资产，这些数字资产会在该系统共存
加密货币	和 RWA 数字资产运行在同一系统上	没有加密货币，发行的 RWA 数字资产不和加密货币同存在同一系统内
隐私保护	需要在公链内建立隐私内部网络	可以有大量隐私保护机制
关键点	认为加密货币生态会自然发展而达到现代金融系统的规范	认为系统需要和多家银行合作，符合多国法律，从事跨境支付工作；而认为现成公链无法到达该需求
优势	有现成的生态，包括 DeFi 生态，市场开发的成本小	法律问题比较少
挑战	现成公链在许多国家的法律内还有挑战，非常难克服	生态正在建立中，系统在市场上阅历少
样本系统	以太坊，Chainlink，Maker 等	Onyx，RLN 等
支持单位	币圈、富兰克林 - 邓普顿	美联储、麻省理工学院、摩根大通银行、花旗银行

2.1 RWA 交易流程分析

现有的 RWA 数字凭证化的模型归纳为“十字模型”，如图 2 所示。对于十字模型，物理空间的资产和数字空间的资产只有一个交汇点，没有在每一个流程上进行同步，容易造成交易风险：

(1) 虚假资产：在发行前，资产是真实的，也有足够的证据，但是发行后，项目方私下将资产转让，或是暗中抵押给其他银行，以至于在后面 RWA 交易流程中没有现实世界资产；

(2) 资产没有价值：由于资产的选择和政府的许可没有同步，容易造成对不合规的资产进行数字凭证化；

(3) 托管风险：当数字凭证在市场流通后，如果用户不慎将管理数字凭证的密钥丢失，则用户拥有的数字资产也随之丢失；

(4) 数字资产的凭证遗失：由于物理空间与数字空间信息不同步造成凭证遗失风险；

(5) 各国不同数字资产标准：现有的十字模型并未针对该问题进行统一设计，其数字凭证发行经当前物理空间的资产审核部门审核后，并无针对物理空间资产的数据同步机制，因而也没有形成统一协议和标准。

2.2 RWA 公链平台发行风险

使用公链平台来发行 RWA 数字凭证会有法律风险，大部分公链采取弱化的客户身份认证或许可匿名交易。这些公链的现实世界资产都是在链上，其模型与 RWA 是不匹配的，RWA 的资产是在物理空间，不在网络空间。因此如果采取公链来进行 RWA 数字化，就会出现一个现象：公链的数字资产弱化为“数字凭证”，不再具备真实价值，而公链上的 RWA 和“数字凭证”的绑定是依赖链下纸质合同的约束来维持的。

3 新型 RWA 数字化流程模型——轨道模型

基于上述讨论本节提出了一种新型 RWA 数字化流程模型——轨道模型，其模型架构如图 3 所示。

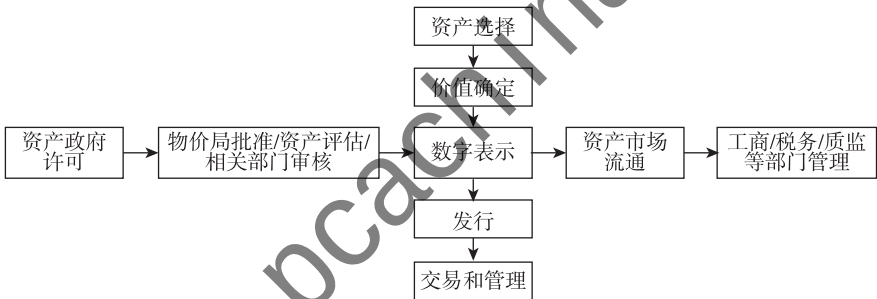


图2 现有 RWA 交易模型——十字模型

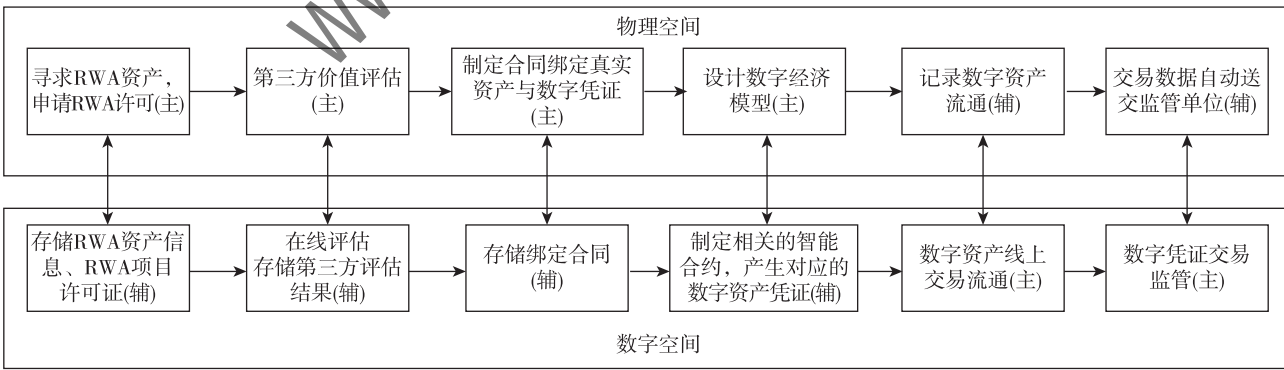


图3 新型 RWA 数字化双轨并行模型

轨道模型源于火车轨道，具有以下特点：

(1) 双轨并行模型：轨道双轨全程并行，代表物理空间和数字空间都是全程对接的。

全流程持续保持一致性，数字空间有更改即通知物理空间，物理空间有更改即通知数字空间。轨道模型融合数字资产与现实世界资产，全生命周期全部对应。

(2) 双轨信息一致：物理空间与数字空间在全时间

(3) 同步进行：在双轨上的行动不论是前进或停止

都是同步的。

(4) 及时处理：如果任何一个空间出现事故，则同时通知两个轨道上的所有参与节点，立刻进行异常处理。

(5) 双轨道监管：物理空间有监管机构或管理单位，管理整个系统，监管机构也同时可以获取数字空间的信息通知，及时把控数字空间的状态。

(6) 高可信作业：物理空间与数字空间有两个不同的区块链系统来维护，避免因单一系统的瘫痪而导致整个 RWA 系统的崩溃。

(7) 价值保障：生成数字凭证或销毁数字凭证都是在数字空间进行，但是所有的物理资产都在物理空间而不在数字空间，避免因数字系统出问题而造成资产损失。

3.1 RWA 轨道流程

RWA 在物理空间的发行及交易流程主要包括 6 个步骤，具体如下：

第一步（发行前）：项目方需要选择合适的现实世界资产，并且将相关信息上链。资产经过验证后，确保资产没有法律纠纷，资产的所有者明晰且资产没有抵押，项目方在政府相关部门申请许可从事 RWA 相关业务。

第二步（发行前）：项目方提供第三方资产评估报告。

第三步（发行前）：项目方和现实世界资产所有者签署合同，同意该资产作为 RWA 的对标物。

第四步（发行前）：项目方需要制定数字经济（数字

凭证）的模型，并且依照模型制定相关的智能合约。

第五步（发行后）：记录数字资产的交易信息。

第六步（发行后）：自动报告交易数据给监管单位。

RWA 在数字空间的发行及交易流程包括 6 个步骤，具体如下：

第一步（发行前）：数字空间（数字资产交易平台上，并且记录政府相关的许可证书。

第二步（发行前）：数字资产交易平台记录第三方资产评估报告或提供线上评估系统。

第三步（发行前）：存储绑定合同，将资产与数字凭证结合的绑定合同保存到数字空间，作为发行数字凭证的合法依据。

第四步（发行前）：数字资产平台记录项目数字经济（数字凭证）的模型信息，并且参照智能合约进入平台。

第五步（发行后）：数字资产平台执行数字资产发行和交易，相关信息记录在区块链系统上，而相关机构或客户在物理空间可以通过平台或区块链系统找到相关信息。

第六步（发行后）：数字资产平台执行 KYC 和 AML，并且将相关数据记录在区块链系统内，相关机构或客户在物理空间可以通过平台或区块链系统找到相关信息。

表 2 给出了物理空间流程与数字空间流程的对应情况。

表 2 物理空间和数字空间流程的对应

	物理空间流程	数字空间流程	讨论
1	寻求 RWA 资产，申请 RWA 许可	存储 RWA 资产信息、RWA 项目许可证	物理流程主导，目的在于确保 RWA 存在
2	第三方价值评估	存储第三方价值评估或是网上评估	物理流程主导，目的在于确保 RWA 有价值
3	制定合同绑定 RWA 与数字凭证	存储绑定合同	物理流程主导，目的在于维护数字资产项目的信任度
4	设计数字经济模型	记录数字资产的流通信息，并且融合智能合约进入平台	物理流程主导，目的在于保障数字凭证的发行与实际物理资产一致
5	记录数字资产流通	数字资产线上交易流通	数字流程主导，目的在于提升服务质量，提高交易效率
6	交易数据自动送交监管单位	数字凭证交易监管	数字流程主导，目的在于发现问题并及时处理

3.2 整体 RWA 流程

新型 RWA 交易流程分为发行前和发行后。发行前的流程如图 4 所示,发行后的流程如图 5 所示。

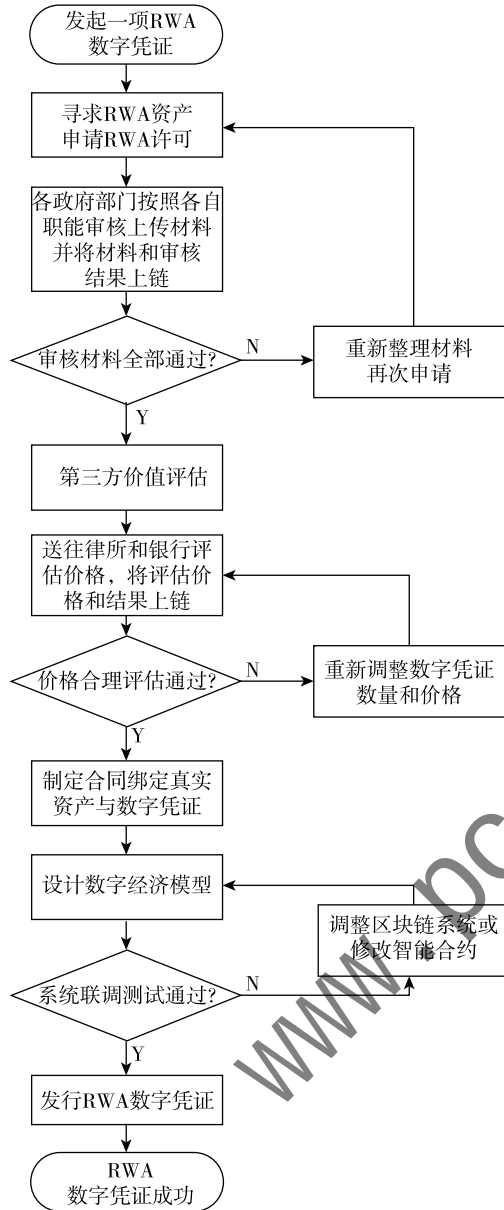


图4 数字凭证发行前的整体流程

4 基于区块链的新型 RWA 发行与交易技术在教育培训领域的应用

教育资产是学校保证教学、后勤等工作正常开展的物质基础。教育信息化也是国家战略之一^[8]。随着区块链技术的成熟,教育培训领域的资产数字化逐渐成为提升效率、增强透明度和拓展流动性的关键路径。传统上,许多教育培训机构采用中心化管理平台,导致各机构之间缺乏有效的监督^[9],数量庞大、种类繁多^[10]的教育资产的安全性和可信性得不到保证,面临确权难、流通慢、

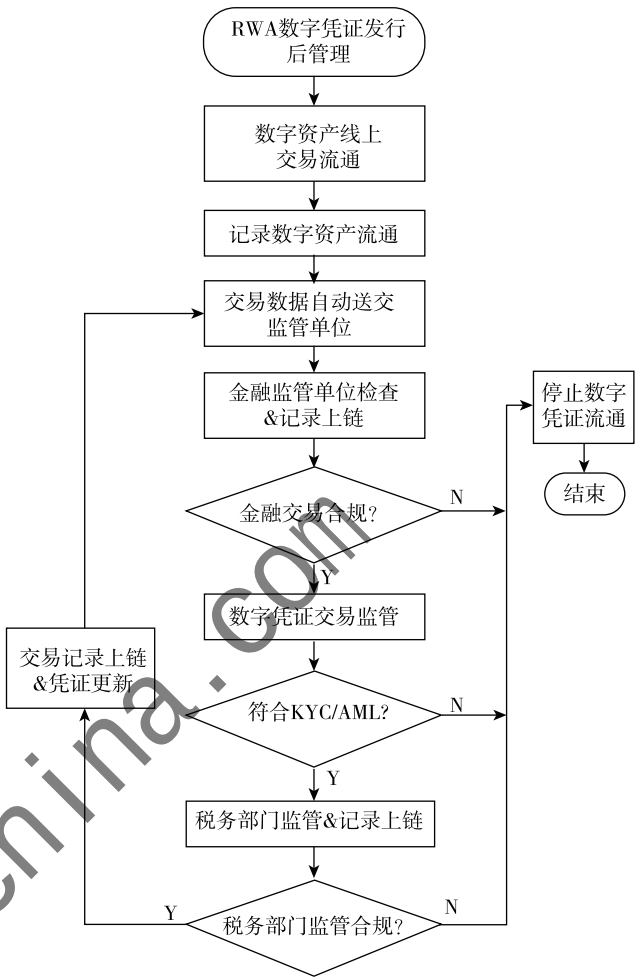


图5 数字凭证发行后的流程

监管弱等痛点,而 RWA 通过代币化、智能合约和跨链技术,为教育资产的全生命周期管理提供了创新解决方案。

4.1 RWA 适用性分析

当前教育培训领域的 RWA 资产类型主要包括:

- (1) 知识产权类:如课程内容版权、教材版权、科研成果专利等。
- (2) 学习证书类:如学历证书、职业资格认证、培训结业证书等。
- (3) 实体资产类:如存储于介质中的课程、教学设备、实验室资源等。
- (4) 服务类:如在线课程订阅权、教育咨询服务合同等。

这些资产的共同特点是需确权、可交易、需长期存证,适合通过区块链技术实现数字化管理。区块链技术在教育培训领域的 RWA 轨道模型中的核心作用如下:

(1) 资产确权与存证

智能合约:自动生成数字凭证,绑定物理空间的法律合同,确保所有权透明可追溯。

链上存证：学习证书的颁发过程全程记录于区块链，哈希值唯一且不可篡改，支持全球即时验证。

(2) 双轨同步机制

物理空间流程：教育机构在颁发证书或签署版权合同时，需同步提交至区块链网络。

数字空间流程：区块链自动触发智能合约，生成对应的数字凭证，并实时更新至分布式账本。

一致性验证：通过跨链协议连接物理空间的公证机构与数字空间的区块链节点，确保数据一致性。

(3) 交易与流通

去信任化交易：学员可通过区块链平台直接购买课程订阅权，交易记录公开透明，无需依赖第三方平台。

部分所有权分割：高价值资产可通过 Token 化实现分时租赁，降低使用门槛。

(4) 合规与监管

KYC/AML 集成：用户实名认证数据上链，自动对接监管机构数据库，防止虚假身份或洗钱行为。

自动报告机制：区块链系统实时向教育部门报送交易数据，确保符合《个人信息保护法》等法规。

4.2 实施流程

教育培训的 RWA 数字化使用轨道模型，通过物理空间与数字空间双轨并行以确保全流程一致性。发行前阶段、发行后阶段以及双轨一致性验证流程如图 6 ~ 图 8 所示，具体实施流程如下。

4.2.1 发行前阶段

(1) 物理空间流程

资产选择与审核：教育机构选定资产，提交至有关部门审核，审核结果上链存证。

第三方价值评估：版权局或评估机构出具报告，数据通过预言机同步至链上。

法律合同绑定：签署纸质合同并加密上链，智能合约解析条款。

(2) 数字空间流程

智能合约部署：根据资产价值设计 Token 发行规则。

跨链数据同步：许可证哈希与物理空间审核链互通，确保双轨一致。

4.2.2 发行后阶段

(1) 交易与流通

学员通过去中心化平台购买课程订阅 Token，智能合约自动授权访问权限。

高价值资产使用权 Token 化，支持分时租赁。

(2) 监管与合规

监管节点实时监控交易记录，触发异常警报。

税务报告自动生成并同步至链上数据库，符合《个人信息保护法》。

4.2.3 异常处理机制

异常处理机制主要指双轨一致性验证，其流程如图 8 所示。

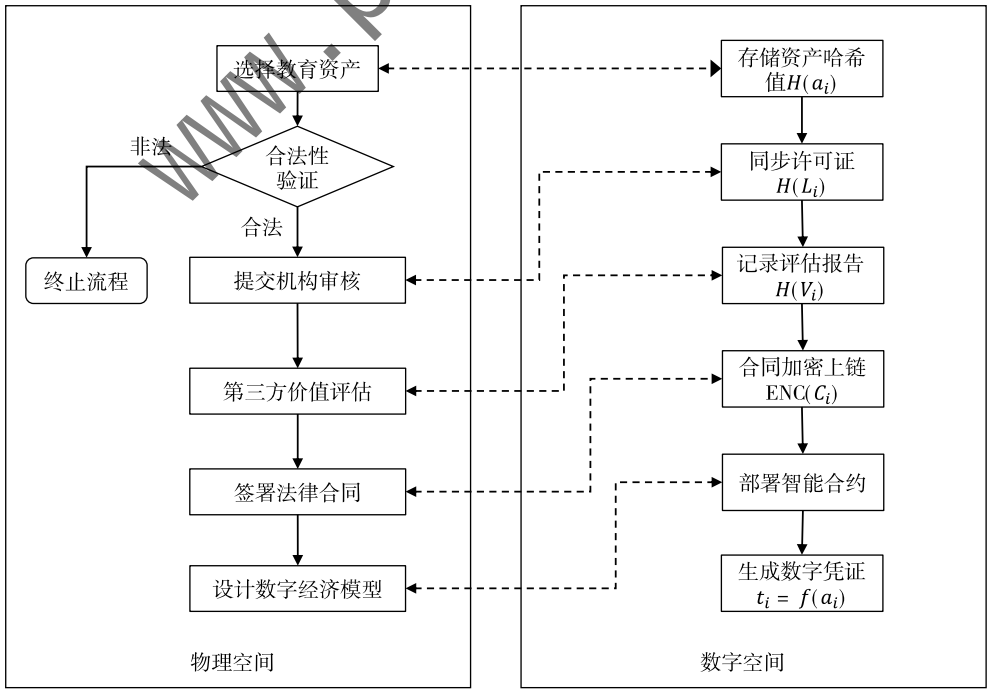


图 6 发行前阶段流程

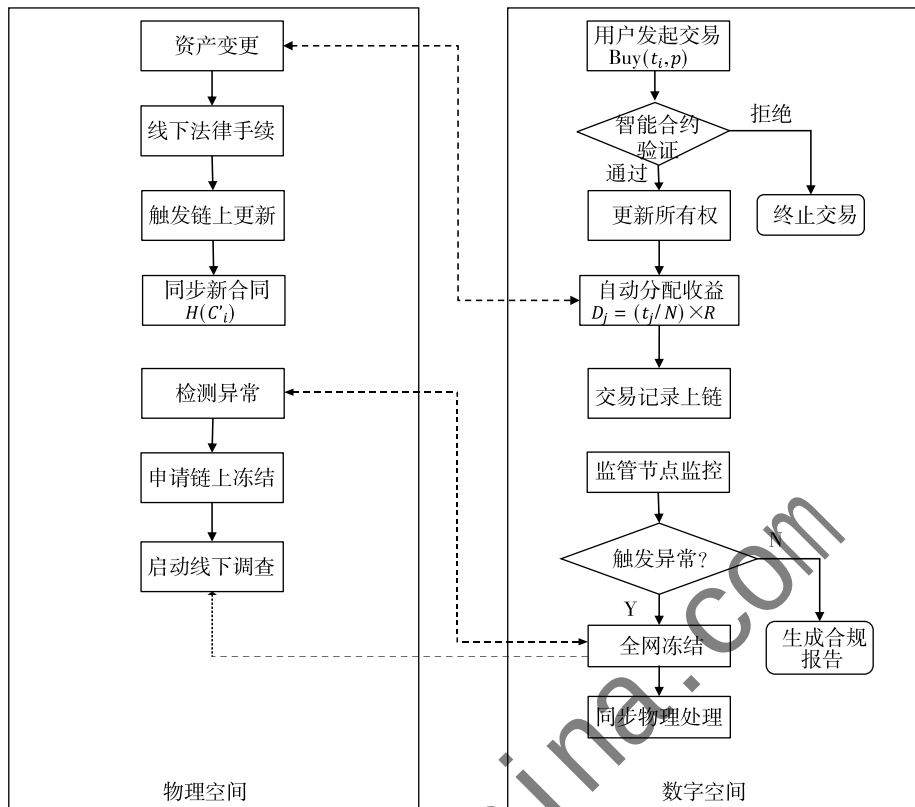


图7 发行后阶段流程

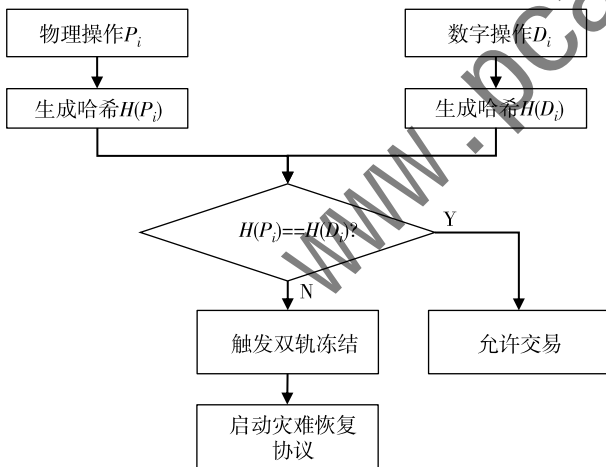


图8 双轨一致性验证流程

(1) 双轨冻结: 若检测到伪造证书或黑客攻击, 物理与数字空间同时暂停交易, 启动链下调查。

(2) 灾难恢复: 通过区块链快照回滚至安全状态, 物理资产需重新验证后同步更新。

4.3 数学模型

4.3.1 符号定义

物理空间资产: 设资产集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots,$

$a_n\}$, 其中 a_i 表示第 i 项教育资产。

数字空间凭证: 对应资产的数字凭证集合为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 满足 $t_i = f(a_i)$, 其中 f 为代币化函数。

区块链网络: 定义为图 $G = (V, E)$, 节点集 V 包含教育机构、监管方、第三方评估机构等, 边集 E 表示节点间的通信与共识协议。

哈希函数: $H: A \rightarrow \{0, 1\}^k$, 将物理资产信息映射为固定长度的哈希值。

智能合约: 表示为状态机 S , 其状态转移函数为 $\delta: S \times I \rightarrow S \times O$, 其中 I 为输入, O 为输出。

4.3.2 发行流程的数学建模

(1) 资产选择与验证

物理空间流程:

①资产筛选: 选择资产 $a_i \in A$, 满足合法性条件 $\text{Valid}(a_i) = \text{True}$ 。

②哈希上链: 计算 $h_i = H(a_i)$, 并将 h_i 写入区块链, 生成交易 $T_{\text{hash}} = (h_i, \text{timestamp})$ 。

③政府审核: 教育部门对 a_i 进行审核, 生成许可证 L_i , 其哈希 $H(L_i)$ 同步至链上。

数学约束:

$\forall a_i \in A, \exists t_i \in T: \text{Integrity}(a_i) \Leftrightarrow H(a_i) = h_i \wedge \text{Verify}(h_i,$

$$L_i) = \text{True} \quad (1)$$

(2) 第三方价值评估

评估函数：设第三方评估机构对 a_i 的价值评估为 $v_i = g(a_i)$ ，其中 g 为评估模型。

链上同步：评估结果通过预言机 O 输入链上，生成代币总量 $N_i = \lfloor v_i / \tau \rfloor$ ，其中 τ 为最小交易单位。

(3) 合同绑定与智能合约部署

合同加密：签署纸质合同 C_i ，加密后存储为 $\text{Enc}(C_i, \text{ZKP})$ ，其哈希 $H(C_i)$ 上链。

智能合约逻辑：定义收益分配规则为线性函数

$$\text{Distribut}(s_j) = \frac{t_j}{\sum_{k=1}^{N_i} t_k} \cdot R, \forall t_j \in T_i \quad (2)$$

其中 R 为总收益， T_i 为资产 a_i 对应的 Token 集合。

4.3.3 交易流程的数学建模

(1) 去中心化交易

交易请求：用户 u 发起购买请求 $\text{Buy}(t_j, p)$ ，其中 p 为支付金额。

智能合约验证：合约检查以下条件：

$$\text{Balance}(u) \geq p \wedge \text{Ownership}(t_j) = \text{Issuer} \quad (3)$$

状态转移：若条件满足，更新所有权

$$S' = S \setminus \{(t_j, \text{Issuer})\} \cup \{(t_j, u)\}, \text{Balance}(u) := \text{Balance}(u) - p \quad (4)$$

(2) 分时租赁模型

时间分割：设设备使用权 Token_{t_j} 的时间窗口为 $[t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ ，其价值与时间线性相关：

$$\text{Value}(t_j) = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \lambda(t) dt \quad (5)$$

其中， $\lambda(t)$ 为时间价值密度函数。

动态定价：根据供需调整价格 p_j ，采用拍卖机制：

$$p_j = \alpha \cdot \frac{\text{Demand}(t_j)}{\text{Supply}(t_j)} \quad (6)$$

其中， α 为市场调节系数。

4.3.4 区块链的核心作用

(1) 一致性验证的双轨模型

物理与数字同步：设物理空间操作 P 和数字空间操作 D ，满足：

$$\forall P_i, \exists D_i: H(P_i) = H(D_i) \quad (\text{哈希一致性}) \quad (7)$$

异常检测：若检测到不一致，如 $\exists i: H(P_i) \neq H(D_i)$

时触发冻结函数：

$$\text{Freeze}(T) = \bigcap_{t_j \in T} \text{Pause}(t_j) \quad (8)$$

(2) 智能合约的形式化验证

安全性证明：通过形式化方法验证合约无漏洞：

$$\{\emptyset\} \delta(S, I) \{\psi\} \quad (9)$$

其中 $\emptyset$ 为前置条件， ψ 为后置条件。

(3) 跨链数据同步

跨链桥协议：设教育资产数据库为链 G_1 ，教育资产链为 G_2 ，跨链操作定义为映射 $\Phi: G_1 \rightarrow G_2$ ，满足：

$$\Phi(\text{Certificate}_i) = t_i \text{ 且 } \text{Verify}(t_i, \Phi^{-1}(t_i)) = \text{True} \quad (10)$$

基于 RWA 轨道模型的教育培训资产发行及交易流程，通过双轨同步机制和区块链技术，实现了物理与数字空间的严格映射，确保资产真实性与一致性，实现了自动化交易与合规监管以及动态资源优化，提升了资产利用率。

5 结论

本文针对传统 RWA 数字化流程模型存在的问题，通过分析其系统风险，将 RWA 数字化发展路线选取的问题转化为解决传统 RWA 数字化流程模型的物理空间市场和数字空间市场割裂的问题，创造性提出了一种新型 RWA 数字化流程模型——轨道模型，应用双轨同步机制和区块链技术建立了 RWA 发行与交易技术的数学模型，实现了自动化交易与合规监管以及动态资源优化，并给出了实际应用的实施流程。本模型可以让 RWA 在有监管的安全环境下实现交易，保护了 RWA 数字化的良性发展。

参考文献

- [1] 陶然，胡增芳，蒋武. 数字资产价格泡沫风险的形成机制、传导路径及监管对策研究 [J]. 安徽商贸职业技术学院学报, 2025, 24 (1): 39–45.
- [2] 陆岷峰. 商业银行数字化转型：数字资产入表的契机、挑战与应对策略 [J]. 宝鸡文理学院学报 (社会科学版), 2024, 44 (6): 42–51.
- [3] 孙煜华. 世界的数据与数据的世界——数字经济背景下的数据 [J]. 数字经济, 2024 (11): 50–57.
- [4] 数字经济财经. 大公报：香港 Web3 下一步是 RWA [EB/OL] (2023–10–11). https://mp.weixin.qq.com/s/YaBYQvJGp0kJ9k_hPqNXtA.
- [5] CHAMRIA R. Comprehensive guide on tokenized real-world assets [EB/OL]. (2022–11–23). <https://www.zeeve.io/blog/comprehensive-guide-on-tokenized-real-world-assets/>.
- [6] 董春雨，李守伟，张瑞彬. 基于知识图谱的区块链与供应链金融融合研究 [J]. 财会月刊, 2022 (4): 149–154.
- [7] 刘世强，李碧，王伟锋. 基于大数据与区块链融合的供应链金融创新模式及应用研究 [J]. 中国经贸导刊, 2025 (4): 10–12.
- [8] 教育部关于印发《教育信息化“十三五”规划》的通知 [J]. 中华人民共和国教育部公报, 2016 (22): 46–52.
- [9] 陈然. 基于联盟区块链的教育培训系统研究与应用 [D]. 济南：齐鲁工业大学, 2023. (下转第 57 页)

- [7] 卢荣婕. 生成式人工智能赋能政务服务智能化建设的价值、困境与治理 [J]. 西华师范大学学报 (哲学社会科学版), 2025 (3): 51-61.
- [8] 刘辉, 雷崎山. 生成式人工智能的数据风险及其法律规制 [J]. 重庆邮电大学学报 (社会科学版), 2024 (4): 40-51.
- [9] 江必新, 王鑫. 数字行政行为算法歧视的法律规制 [J]. 学术论坛, 2024 (6): 49-63.
- [10] 刘银喜, 吴京阳. 生成式人工智能嵌入政府治理的应用前景、潜在风险和防范机制 [J]. 北京航空航天大学学报 (社会科学版), 2025, 38 (1): 103-112.
- [11] 雷刚. 数字政府时代算法行政的程序法治研究 [D]. 重庆: 西南政法大学, 2022.
- [12] 曾宇航, 史军. 政府治理中的生成式人工智能: 逻辑理路与风险规制 [J]. 中国行政管理, 2023, 39 (9): 90-95.
- [13] 苏子龙. 生成式人工智能的数据安全风险防控与法律规制研究 [J]. 通信与信息技术, 2024 (5): 95-98, 110.
- [14] 张佳琳. ChatGPT 模型辅助数字政府建设的风险及其法律规制 [J]. 内蒙古社会科学, 2024 (1): 65-75.
- [15] 刘艳红. 生成式人工智能的三大安全风险及法律规制——以 ChatGPT 为例 [J]. 东方法学, 2023 (4): 29-43.
- [16] 李芳, 刘鑫怡. 欧盟人工智能立法最新动向 [J]. 科技中国, 2021 (6): 35-38.
- [17] 傅建平. 生成式人工智能引入数字政府建设的规制路径——基于风险社会的视阈 [J]. 湖南大学学报 (社会科学版), 2025, 39 (1): 124-132.
- [18] 何振, 彭海艳. 人工智能背景下政府数据治理新挑战、新特征与新路径 [J]. 湘潭大学学报 (哲学社会科学版), 2021, 45 (6): 82-88.
- [19] 林伟, 周耀铭. 国内外数据治理研究述评 [J]. 数字图书馆论坛, 2022 (6): 65-72.
- [20] 谭九生, 杨建武. 人工智能嵌入政府治理的伦理风险及其防控 [J]. 探索, 2021 (2): 126-138.
- [21] 邹焕聪. 公私协力法律问题研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.

(收稿日期: 2025-02-22)

作者简介:

邹焕聪 (1974-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 行政法学、经济行政法、数字行政法等。

王庆 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 刑法学、数字法治。

(上接第 35 页)

- [10] 李点横. 基于物联网的教育资产管理系统设计与实现 [D]. 大连: 大连交通大学, 2021.

(收稿日期: 2025-04-15)

作者简介:

安宁 (1990-), 男, 硕士, 高级工程师, 高级经济师, 主

要研究方向: 软件工程、云计算、人工智能、大数据、信息安全、数字经济等。

许文静 (1990-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 人工智能、大数据智能、数字教育、信息安全等。

刘珠慧 (1992-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 信息化项目管理、信息安全等。

版权声明

凡《网络安全与数据治理》录用的文章，如作者没有关于汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权等版权的特殊声明，即视作该文章署名作者同意将该文章的汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权授予本刊，本刊有权授权本刊合作数据库、合作媒体等合作伙伴使用。同时，本刊支付的稿酬已包含上述使用的费用，特此声明。

《网络安全与数据治理》编辑部

www.pcachina.com