

## NDN 区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型

修佳鹏, 刘卉馨, 杨正球, 张德昊, 郭少勇  
(北京邮电大学计算机学院(国家示范性软件学院), 北京 100876)

**摘要:** 为进一步提升基于命名数据网络(NDN)的区块链系统的网络层传输性能, 提出一种NDN区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型, 该模型包括NDN区块链系统中区块同步时间和区块传输冗余度的计算方法、基于区块同步时间和区块传输冗余度的网络拓扑结构评分指标体系和基于网络拓扑结构属性和评分的网络拓扑结构优化方案。利用所提模型, 可以解决基于TCP/IP的区块链网络拓扑结构评价模型与NDN区块链的不适配性, 并且在已知网络环境参数和NDN网络层数据同步方法的前提下, 完成性能指标计算和分析, 为NDN区块链的实际组网提供优化方案。实验结果表明, 使用所提模型对9个节点的网络拓扑结构进行分析和优化, 优化后的网络拓扑结构与原有评分最高的网络拓扑结构相比, 可以在维持区块传输冗余度不变的情况下, 将区块同步时间从2.95 s降低至2.37 s, 降低了19.66%, 同时评分由0.64提升至0.82, 证明所提模型在提升NDN区块链性能上具有较好的效果。

**关键词:** NDN; 区块链传输性能; 网络拓扑; 性能分析及优化; 冗余度

**中图分类号:** TP393.0

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024206

## NDN blockchain network topology performance analysis and optimization model

XIU Jiapeng, LIU Huixin, YANG Zhengqiu, ZHANG Dehao, GUO Shaoyong

School of Computer Science (National Pilot Software Engineering School), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** In order to further improve the network layer transmission performance of the blockchain system based on named data networking (NDN), a performance analysis and optimization model for the NDN blockchain network topology was proposed. The model included methods for calculating block synchronization time and block transmission redundancy in the NDN blockchain system, a network topology scoring system based on block synchronization time and block transmission redundancy, and an optimization scheme based on network topology attributes and scores. The model addressed the incompatibility of blockchain network topology evaluation models based on TCP/IP with NDN blockchain. Given the known network environment parameters and NDN network layer data synchronization methods, the performance metrics were calculated and analyzed, providing optimization solutions for actual NDN blockchain networking. The experimental results show that after analyzing and optimizing a 9-node network topology using this model, the optimized network topology reduces block synchronization time from 2.95 seconds to 2.37 seconds, a decrease of 19.66%, while maintaining the block transmission redundancy unchanged, and increases the score from 0.64 to 0.82. This demonstrates that the model has a good effect on improving the performance of NDN blockchain.

**Keywords:** NDN, blockchain transmission performance, network topology, performance analysis and optimization, redundancy

收稿日期: 2024-07-19; 修回日期: 2024-11-12

通信作者: 刘卉馨, liuhuixin@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2022XAGG0148)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2022XAGG0148)

## 0 引言

自从 2008 年中本聪首次提出比特币以来<sup>[1]</sup>, 区块链技术受到广泛关注。区块链技术已经从最初的数字货币领域扩展到金融、供应链、医疗、政府、艺术等多个行业<sup>[2]</sup>, 但其在实际应用中还面临着效率低下、扩展性受限等问题, 这些问题很大程度上源于现有区块链系统多采用传统的 TCP/IP 网络模型。由于 TCP/IP 网络的端到端性质, 导致区块链系统在区块同步过程中存在数据冗余高、传输时延高等问题<sup>[3-4]</sup>, 整体性能较差。为了提高性能, 多数研究将优化方向聚焦在区块链系统的共识层和数据层<sup>[5]</sup>, 通过优化共识算法<sup>[6]</sup>和高效验证<sup>[7-8]</sup>来提高时间性能。

然而, 区块链系统中的数据必然要经过网络层进行传输<sup>[9]</sup>, 网络层的改进也至关重要<sup>[10]</sup>。区块链系统的网络层包括底层网络架构、数据传输策略、网络拓扑结构等。针对底层网络架构, 目前研究的发展趋势是以命名数据网络 (NDN)<sup>[11]</sup>作为区块链系统的底层网络架构<sup>[12]</sup>。NDN 是一种以数据为中心的网络通信架构, 数据以唯一的名称而非 IP 地址进行识别和请求, 通过这种方式可以减少数据冗余和传输开销。同时, NDN 自身具有的多路径转发和网内缓存功能也能更好地提高区块链系统的性能。

在基于 NDN 的区块链系统中, 很多研究主要针对数据同步方法<sup>[4,13]</sup>、数据传输策略<sup>[14]</sup>等方面进行性能优化, 但是很少对区块链的网络拓扑结构进行优化研究。区块链网络拓扑结构主要定义了区块链节点之间如何进行连接和交互, 在某种确定的数据同步方法下, 不同网络拓扑结构对数据传输速度、效率和可靠性有较大的影响。如果针对某种数据同步方法能够评价并优化网络拓扑结构的性能, 可以显著提升区块链系统的传输效率, 减少数据传输的跳数、降低网络时延、提高数据包的传输成功率, 从而提升整体网络的性能和稳定性。目前的研究主要以 TCP/IP 作为区块链底层网络架构, TCP/IP 与 NDN 的架构设计、传输方式存在明显差异, 现有的研究结果并不能适配于 NDN 区块链系统中网络拓扑结构性能的评价及优化。现存未解决的问题主要包括 3 个方面, 第一是 NDN 拥有不同于 TCP/IP 的独特通信方式, 主要包括基于数据包命名的传输方式和自身拥有的

缓存机制等, 因此基于 NDN 的区块链系统的传输性能指标计算方式需要重新定义; 第二是如何根据实际需求, 将多个性能指标映射为一个量化的数字, 便于直观分析和比较网络拓扑结构的性能表现; 第三是如何通过现有的网络拓扑结构和分析结果, 确定影响性能的因素并实现网络拓扑结构的优化方案。

基于以上背景和问题, 本文提出一种 NDN 区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型, 基于实际网络环境和具体的数据同步方法, 对区块链网络拓扑结构的性能指标进行计算, 进而获得当前网络环境下针对该数据同步方法的网络拓扑结构分析结果, 最终通过网络拓扑结构的自身属性和分析结果, 为区块链系统的实际组网提供优化意见。在实际区块链系统中, 基于本文模型可以对 NDN 区块链网络拓扑结构进行周期性性能指标计算及评分分析, 如果分析结果表明网络性能不符合预期, 则可以基于本文模型进行拓扑优化, 持续保证 NDN 区块链网络的高效传输。

本文包括以下 3 个主要贡献, 依次解决上述的 3 个问题。

1) 提出一种 NDN 区块链系统的区块同步时间和区块传输冗余度计算方法。通过结合 NDN 的数据传输方式和区块链系统的底层原理, 给出区块同步时间和区块传输冗余度的计算公式, 从而完成 NDN 区块链系统的性能指标计算。

2) 提出一种 NDN 区块链中基于区块同步时间和区块传输冗余度的网络拓扑结构评分指标体系。根据具体需求, 将 2 个性能指标转换为一个量化的评分结果, 从而完成网络拓扑结构的定量分析和比较。

3) 提出一种 NDN 区块链中基于网络拓扑结构属性和评分的网络拓扑结构优化方案。以网络拓扑结构属性作为自变量, 评分结果作为因变量, 分析各个属性对区块链系统性能的影响程度, 并根据具体的属性值范围完成网络拓扑结构优化。

## 1 相关工作

针对区块链网络传输性能分析和优化的研究工作主要集中在 2 个方面, 一是对网络拓扑结构进行设计以降低传输时延, 二是对区块链时间性能指标的分析。以上 2 个方面的相关研究均基于

TCP/IP 网络，文献调研未见以 NDN 作为区块链底层网络架构进行网络拓扑结构分析和优化的研究。

在网络拓扑结构研究方面，Miller 等<sup>[15]</sup>设计了一种发现比特币中点对点链接的技术 Address-Probe，并将其应用于实时拓扑。Fadhil 等<sup>[16]</sup>提出一种基于比特币集群的超级节点 (BCBSN, bitcoin clustering based super node) 协议，根据地理距离对节点进行聚类，通过减少路由条数改善事务传输时延。Fadhil 等<sup>[17]</sup>之后又提出了基于位置的聚类 (LBC, locality based clustering) 协议，该协议使用 IP 地址表示各个节点之间的距离，将距离接近的节点相连，以此来降低区块链中的传输时延。Sallal 等<sup>[18]</sup>提出了基于比特币集群的 ping 时间 (BCBPT, bitcoin clustering based ping time) 协议，该协议通过基于节点之间的 ping 命令时延对比特币节点进行分组，通过物理网络距离提高传输性能。Hao 等<sup>[19]</sup>提出了一种新的拓扑结构 BlockP2P，首先利用 K-Means 算法将邻近对等节点聚集到聚类中。其次是层次拓扑结构，确保强连通性和小直径基础上的节点属性分类。

在区块链时间性能分析研究方面，Decker 等<sup>[20]</sup>测量了比特币对等网络 (P2P, peer to peer) 中消息的信息传播率。Mišić 等<sup>[21]</sup>为比特币的区块链分发网络提供了一个全面的分析模型，对区块和交易分配时间、节点响应时间、分叉概率、网络分区大小以及账本不一致时持续时间的概率分布进行了展示。Toshniwal 等<sup>[22]</sup>模拟了各种著名的网络拓扑，包括立方体网络拓扑结构 Hypercube、环面网络拓扑结构 Torus、胖树网络拓扑结构 Fat-Tree 和无标度网络拓扑结构 Scale-Free 作为区块链的底层网络，基于区块链和网络方面比较评估每个网络拓扑的性能。

## 2 预备知识

### 2.1 区块链

区块链是一种去中心化的分布式账本技术，通过将交易数据打包成区块，并将这些区块以链式结构依次相连，从而形成一个连续的、不可篡改的记录链条，其数据结构是有序的，区块向前链接，每个区块都通过保存前一个区块的哈希值完成指向。区块链被可视为垂直的栈，第一个区块作为栈底，

其他的依次向上堆叠。

区块链的数据结构独特且复杂，主要包括区块大小、区块头、交易个数计数器、交易数据 4 部分。区块头是区块中最为重要的部分，其中包括了版本号、前一个区块的哈希值、默克尔根、时间戳、目标哈希和随机数 (Nonce)，区块数据结构如图 1 所示。每个区块的哈希值都是通过对区块头使用 2 次安全散列算法 (SHA256, secure hash algorithm) 加密生成，因此前一个区块的哈希值会对当前区块的哈希值产生影响。如果试图篡改任意区块中的数据，会级联影响之后所有的块，这种攻击成本十分巨大，由此可以保证区块链的连续性和安全性。

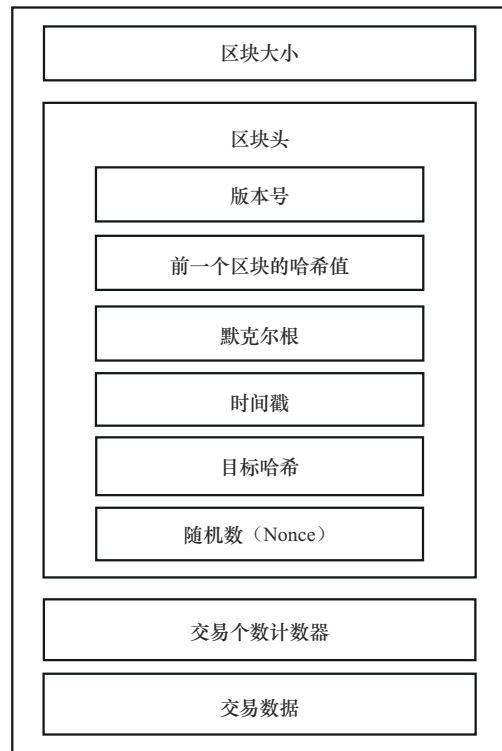


图1 区块数据结构

区块链的整体架构包括网络层、数据层、共识层、控制层和应用层，如图 2 所示。网络层负责节点之间的通信和数据传输，它确保区块链网络中的所有节点可以相互连接并传递信息；数据层中包括区块链的数据结构和非对称加密算法；共识层负责节点之间的共识达成，以确保区块链的一致性，包括工作量证明 (PoW, proof of work)、权益证明 (PoS, proof of state) 等共识算法；控制层主要包括智能合约等，提供了区块链的可编程特性；应用层

包括相关业务场景和去中心化应用 (DApp, decentralized application) 等。

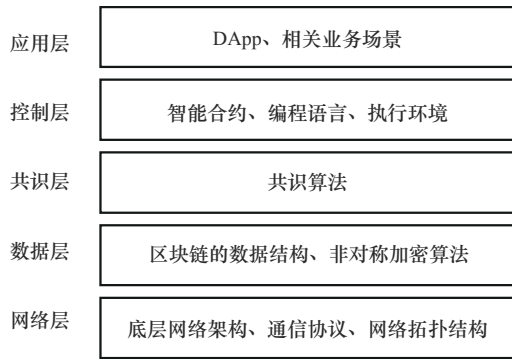


图2 区块链的整体架构

区块链的工作流程包括交易生成、交易广播、区块生成和区块验证等步骤。当用户发起交易时,交易被打包并广播到整个网络中的节点。矿工节点收集交易并将其打包成区块,进行 PoW 计算,以解决一个复杂的数学问题。当矿工成功找到有效的 Nonce 时,该区块被广播到网络中的其他节点进行验证。节点通过验证区块中的交易和哈希值来确认其有效性,并将其添加到自己的区块链副本中。

区块链技术具有去中心化、透明性、不可篡改性和安全性等特点。去中心化意味着区块链网络由多个节点共同维护,不依赖于中央机构,避免了单点故障的风险。透明性指的是区块链上的交易数据对所有节点公开可见,任何人都可以查看交易记录。不可篡改性确保了一旦区块被记录,任何人都无法更改,任何试图修改区块的数据都会被网络中其他节点发现。安全性通过密码学技术保障数据的完整性和隐私性,区块链使用哈希算法等来保护数据。

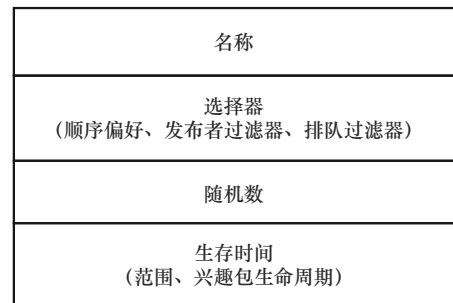
区块链技术在多个领域得到了广泛应用。在金融领域,区块链被用于跨境支付、数字货币、证券交易等,简化了交易流程,降低了成本,提高了透明度。在供应链管理中,区块链通过提供透明的追溯机制,提高了物流管理的效率和可靠性。在医疗领域,区块链技术被用于保护患者数据隐私,提供安全的电子健康记录管理。在政府和公共服务中,区块链用于选举系统、土地登记和公共资金管理,提高了公开性和透明度。

## 2.2 NDN

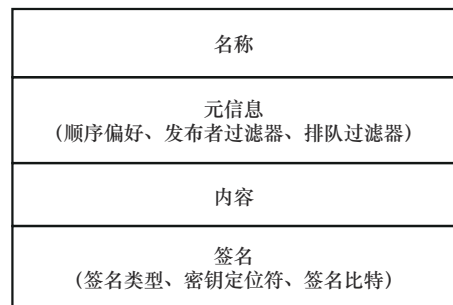
NDN 是一种新型的网络架构,通过数据名称而非 IP 地址来进行数据传输,其核心理念是以数

据为中心而非以位置为中心,强调数据本身的命名和请求。这种架构旨在适应当前网络流量变化,尤其是内容分发和检索需求的显著增加。

NDN 的通信过程主要通过兴趣包和数据包来实现。兴趣包和数据包的结构如图 3(a)和图 3(b)所示。消费者通过发送兴趣包来请求特定名称的数据,兴趣包包含所请求数据的名称。兴趣包在网络中传播,直到找到具有所请求数据的节点。生产者收到兴趣包后,如果能够提供所请求的数据,则返回数据包。数据包包含数据的名称、元信息、内容和签名,确保数据的完整性和来源的可信性。NDN 的路由器可以缓存经过的数据包,当其他消费者请求相同数据时,可以直接从缓存中获取数据,而不必重新向生产者请求。这一过程通过数据命名实现高效的数据传输,减轻了网络负担。



(a) 兴趣包的结构



(b) 数据包的结构

图3 NDN 中兴趣包和数据包的结构

在 NDN 中,关键的数据包括转发信息表 (FIB, forwarding information base)、待处理兴趣表 (PIT, pending interest table) 和内容存储 (CS, content store)。

1) FIB 用于存储数据名称前缀与接口的映射关系,类似于传统路由表。当路由器收到一个兴趣包时,会根据 FIB 查找匹配的数据名称前缀,并将兴趣包转发到对应的接口。FIB 中的条目通过路由协议动态更新,以适应网络拓扑的变化。

2) PIT 用于记录所有未满足兴趣包的条目, 包括兴趣包的名称和到达接口。当路由器收到一个兴趣包时, 会在 PIT 中查找是否有相同名称的未满足兴趣包。如果存在相同的条目, 路由器不会转发该兴趣包, 而是将到达接口加入该条目中。当路由器收到对应的数据包时, 会根据 PIT 中的记录, 将数据包转发到所有记录的接口, 并删除相应的 PIT 条目。

3) CS 用于缓存经过的数据包。当路由器收到兴趣包时, 首先在 CS 中查找是否有匹配的数据包。如果找到匹配的数据包, 则直接将其返回给请求的消费者, 而无须进一步转发兴趣包。这种缓存机制可以显著提高数据传输的效率, 减轻网络负担。

NDN 具有以下几个特点, 这些特点与传统的 TCP/IP 网络在多个方面存在显著差异。

1) NDN 通过数据命名进行传输, 强调的是数据本身, 同时内置的缓存机制进一步提高了数据传输的效率, 减轻了网络负担; 而 TCP/IP 网络通过 IP 地址进行标识和路由, 强调的是数据的传输路径和位置。

2) NDN 支持多路径数据转发, 允许数据包通过多条路径同时传输, 提高了数据传输的可靠性和效率。同时 NDN 采用的通信方式不需要进行连接, 使得 NDN 在动态和高负载环境下更加高效; 而 TCP/IP 网络采用端到端的数据传输方式, 通过建立连接进行数据传输。

3) NDN 的数据包包含签名, 内置安全性, 确保数据的来源可信; TCP/IP 网络中的安全机制主要依赖于传输层和应用层的协议, 如传输层安全 (TLS, transport layer security) 协议等。

### 2.3 区块链与 NDN 的结合

区块链和 NDN 的结合是一个近年来备受关注的研究领域, 两者的适配性和优势可以互补, 共同改善传统区块链系统中的一些关键问题。区块链通过去中心化的方式记录和验证数据, 具有高安全性和透明度, 但在实际应用中, 区块链系统面临着性能瓶颈, 特别是在数据传输和区块同步方面。传统的区块链网络依赖于 TCP/IP 模型, 这种模型在面对大规模数据传输时, 容易产生高冗余和高时延的问题。而 NDN 通过数据命名和请求机制, 可以有效地优化数据传输, 提高网络的整体性能。

NDN 与区块链的适配性主要体现在数据传输和内容分发方面。NDN 通过兴趣包和数据包的方

式进行数据传输, 路由器可以缓存经过的数据包, 从而减少重复传输, 提高数据传输效率。在区块链系统中, 节点需要频繁地进行区块和交易数据的同步, 这时 NDN 的缓存机制和多路径转发机制可以显著降低传输时延, 减轻网络负担, 提高数据同步的速度和效率。具体来说, 区块链网络中的每个节点可以通过发送兴趣包来请求新区块数据, 其他节点则通过返回数据包来响应请求, NDN 的路由器可以缓存这些数据包, 当有新的节点请求相同数据时, 可以直接从缓存中获取数据, 而不必重新向源节点请求, 这大大提高了数据传输的效率。

此外, NDN 的内置安全机制也可以保证区块链系统的安全性。NDN 的数据包包含签名, 可以确保数据的来源可信和内容完整, 这与区块链的安全需求高度契合。在 NDN 区块链系统中, 每个数据包的签名可以有效防止数据篡改和伪造, 提高了系统的整体安全性。相比之下, 传统的 TCP/IP 网络需要依赖额外的传输层和应用层协议来保证数据安全, 而 NDN 的内置安全性则更加简化和高效。

目前, NDN 和区块链的结合取得了一定的发展。研究人员提出了多种基于 NDN 的区块链优化方案。例如, Jin 等<sup>[13]</sup>提出了 BlockNDN, 将比特币区块链与 NDN 相结合, 创建一个去中心化的系统, 解决了 TCP/IP 区块链中存在的问题, 改善了弱连接现象, 减少了广播开销。马红桥等<sup>[4]</sup>提出“NDN+区块链”结构, 设计基于 NDN 的区块同步算法并基于以太坊源码进行改造, 在数据流量占比和区块同步消耗时间方面优于传统的 TCP/IP 区块链和 BlockNDN。Yi 等<sup>[14]</sup>提出一种区块链节点间数据传输结构 (IBN-DTS, inter-blockchain-node data transmission structure), 建立分离的数据分发通道完成区块数据和交易数据的分别发送, 同时提出一种相关面表 (CFT, correlation face table) 结构, 实现特定路径的路由和转发, 同样与 TCP/IP 区块链和 BlockNDN 进行实验对比, 证明其在同步时间和网络流量上提高 NDN 区块链传输性能。以上研究表明, NDN 在提高区块链系统性能方面具有显著优势, 二者的技术融合可以实现优势互补。

### 3 模型设计

#### 3.1 问题概述

在研究 NDN 区块链网络传输优化方案的过程中, 作者发现在基于不同的区块链网络拓扑结构开展 NDN 传输方案验证实验时, 传输性能表现存在不稳定的特点, 即有的传输方案在某种网络拓扑下表现优异, 但是在其他网络拓扑下的实验传输性能表现一般。通过分析可以明确传输方案与网络拓扑结构的特点存在一定的关联性, 这种关联性对于优化网络拓扑结构和提升区块链网络传输性能有重要意义。基于以上原因, 本文对 NDN 区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型进行了研究。

本文模型共分为 3 个部分, 介绍如下。

1) NDN 区块链系统中区块同步时间和区块传输冗余度的计算方法。

2) NDN 区块链系统中基于区块同步时间和区块传输冗余度的网络拓扑结构评分指标体系。

3) NDN 区块链系统中基于网络拓扑结构属性和评分的网络拓扑结构优化方案。

本文模型的输入是相同网络环境下不同类型的网络拓扑结构、具体的数据同步方法和运行日志, 输出是当前网络环境下针对该数据同步方法的网络拓扑结构分析结果, 以及实际组网优化意见。模型整体架构如图 4 所示。

#### 3.2 区块同步时间和区块传输冗余度的计算方法

由于区块的传输时间是区块验证时间的几十倍<sup>[3]</sup>, 因此在本文模型中主要聚焦传输时延。区块同步时间定义为区块链内全部节点获得最新区块的时间, 即新区块在网络中的传输时延, 并不包括区块的验证和共识时间。在区块链系统中, 有 2 种场景存在区块同步情况, 第一种是当有新节点加入网络或断网的节点重新连接进入网络时发出区块同步请求, 第二种是矿工节点挖出新区块并进行广播。第二种情况中待同步节点数与节点总数的关系如式(1)所示。

$$\text{update\_node} = \text{total\_node} - 1 \quad (1)$$

其中,  $\text{update\_node}$  是待同步节点数,  $\text{total\_node}$  是节点总数, 式(1)代表矿工节点挖出新区块, 其他节点都是待同步节点, 在这种情况下待同步节点个数最多。

在 NDN 中, 数据的请求与传输以兴趣包和数据包为载体。兴趣包大小远小于包含区块的数据包大小, 数据包的冗余会影响网络流量并导致拥塞情况, 因此本文模型主要聚焦于数据包冗余度。数据包冗余度是一个百分比数值, 定义如式(2)所示。

$$\text{redundancy} = \frac{\text{redundancy\_packet}}{\text{redundancy\_packet} + \text{real\_packet}} \quad (2)$$

其中,  $\text{redundancy}$  是冗余度,  $\text{redundancy\_packet}$  是冗余数据包数量,  $\text{real\_packet}$  是真实数据包数量。

在 NDN 中, 数据通信形式是消费者发出兴趣包, 生产者返回数据包, 且一个兴趣包最终只对应一个数据包<sup>[23]</sup>。在基于 NDN 的区块链系统中, 消费者即待同步节点, 生产者即拥有更新区块的节点。待同步节点通过兴趣包请求本地缺少的区块, 拥有更新区块的节点将区块打包至数据包内进行返回。所以真实数据包数量可以通过所有待同步节点发送的请求区块兴趣包进行统计, 如式(3)所示。

$$\text{real\_packet} = \sum_{i=1}^m \text{interest}_{c_i} \quad (3)$$

其中,  $m$  是待同步节点个数,  $\text{interest}_{c_i}$  是第  $i$  个待同步节点发出的兴趣包。

正如上文所述, 在 NDN 中, 一个兴趣包对应一个数据包, 因此在网络中相同数据包的副本即是冗余<sup>[24-25]</sup>。当一个节点多次收到同一命名的数据包时, 就产生了数据包冗余。冗余数据包数量可以通过转发节点和消费者节点进行计算, 如式(4)所示。

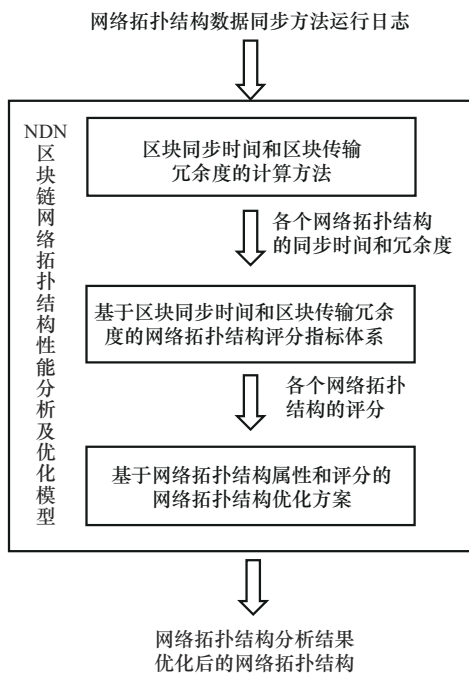


图 4 模型整体架构

$$\begin{aligned} \text{redundancy\_packet} = & \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\text{real\_packet}} (\text{in\_data}_{f_{ij}} - 1) + \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\text{real\_packet}} (\text{in\_data}_{c_{ij}} - 1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $n$  是转发节点个数,  $\text{in\_data}_{f_{ij}}$  是第  $i$  个转发节点收到的第  $j$  个命名的数据包,  $m$  是待同步节点个数,  $\text{in\_data}_{c_{ij}}$  是第  $i$  个消费者节点收到的第  $j$  个命名的数据包。

### 3.3 基于区块同步时间和区块传输冗余度的网络拓扑结构评分指标体系

在区块链网络拓扑结构中, 降低传输时延和减少冗余度是长期追求的目标。然而, 这两者在一定程度上是相互矛盾的。因此, 本文模型结合具体需求, 将 2 个指标转换为量化的评分, 实现网络拓扑结构的筛选, 对其进行直观分析和比较。

首先设置同步时间和冗余度的上限值, 根据 2 个评价指标的上限值, 排除不符合要求的网络拓扑结构, 例如删除同步时间过长或冗余度过高的网络拓扑结构。其次, 由于同步时间和冗余度这 2 个评价指标的量纲不同, 且同步时间取值范围较大, 而冗余度的取值范围为  $[0, 1]$ , 使用二者的原始值直接进行评分计算会导致同步时间对评分的影响较大, 因此对这 2 个评价指标进行归一化处理, 将二者缩放到同一范围  $[0, 1]$  内, 使得评分公式为无量纲表达式, 以保证指标加权和评分结果的准确。最后, 结合 2 个评价指标的权重和各个网络拓扑结构的具体指标值, 对网络拓扑结构进行评分, 其中 2 个评价指标的权重表明了哪个评价指标更为重要。2 个评价指标的权重选择可以根据实际情况进行设置, 但需要保证二者相加和为 1。

本文方法中采用的归一化方法是最小最大归一化, 如式(5)和式(6)所示。

$$\text{time\_normal}_i = \frac{\text{time}_i - \text{time\_min}}{\text{time\_max} - \text{time\_min}} \quad (5)$$

$$\text{redundancy\_normal}_i = \frac{\text{redundancy}_i - \text{redundancy\_min}}{\text{redundancy\_max} - \text{redundancy\_min}} \quad (6)$$

其中,  $\text{time\_normal}_i$  是归一化处理后第  $i$  个网络拓扑结构的同步时间,  $\text{time}_i$  是第  $i$  个网络拓扑结构同步时间,  $\text{time\_min}$  是所有拓扑结构中同步时间最小

值,  $\text{time\_max}$  是同步时间上限;  $\text{redundancy\_normal}_i$  是归一化处理后第  $i$  个网络拓扑结构的冗余度,  $\text{redundancy}_i$  是第  $i$  个网络拓扑结构冗余度,  $\text{redundancy\_min}$  是所有拓扑结构中冗余度最小值,  $\text{redundancy\_max}$  是冗余度上限。

评分公式如式(7)所示。

$$\text{score}_i = (1 - \text{time\_normal}_i) \times \text{time\_weight} + (1 - \text{redundancy\_normal}_i) \times \text{redundancy\_weight} \quad (7)$$

其中,  $\text{score}_i$  是第  $i$  个网络拓扑结构的评分,  $\text{time\_weight}$  是同步时间权重,  $\text{redundancy\_weight}$  是冗余度权重。根据式(7)可知, 当网络拓扑结构的同步时间越低、冗余度越低时, 其评分会更高。

### 3.4 基于网络拓扑结构属性和评分的网络拓扑结构优化方案

本节首先对所有符合要求的网络拓扑结构进行属性计算, 完成网络拓扑结构的特征分析。属性包括网络连通性、网络直径、平均最短路径长度、密度、集群系数 (CL)、节点度分布 (ND), 定义如下。

1) 网络连通性  $C$ : 网络中的节点之间能否相互到达的特性。网络连通性对于区块链网络来说极其重要, 因为它直接影响网络的稳健性和信息的传播效率。在区块链中, 网络连通性确保了交易和区块能够有效地在整个网络中传播, 从而维持网络的一致性和安全性。

2) 网络直径  $D$ : 衡量网络大小的一个指标, 定义为网络中所有节点对的最短路径中的最大值。网络直径可以被视为网络中信息传播的“最坏情况”下的距离。在区块链网络设计中, 较小的网络直径意味着信息能够更快速地在网络中传播。

3) 平均最短路径长度  $L$ : 网络拓扑中任意 2 个节点之间的最短路径的平均值, 较短的平均路径长度意味着信息可以更快地在网络中传播。

4) 密度  $\rho$ : 实际存在的边数与网络中可能存在的最大边数之比, 衡量网络中节点连接的紧密程度。

5) 集群系数 (CL): 衡量网络中节点的聚集程度。一个高集群系数表明网络中的节点倾向于形成紧密连接的群组, 对于区块链网络中的信息传播和冗余有益。

6) 节点度分布 (ND): 网络中每个节点拥有的连接数的分布, 即在度的范围内的频次统计, 反映了网络的异质性或均匀性。

其次, 通过综合考虑网络拓扑结构的关键属

性: 网络直径  $D$ 、平均最短路径长度  $L$ 、密度  $\rho$  以及集群系数  $CL$ , 旨在深入理解各属性对网络性能的影响。此步骤采用随机森林回归模型, 将上述 4 个属性作为自变量, 网络拓扑结构的评分结果作为因变量, 将数据分割为训练集和测试集, 分割的比例为 4:1, 进行精确训练。接下来, 使用基尼指数作为评价指标, 判断各个属性在随机森林中每棵树上的贡献程度并计算平均值, 之后比较属性之间的贡献大小并从大到小进行排序为  $oa_1 \sim oa_4$ 。该步骤的过程如图 5 所示。

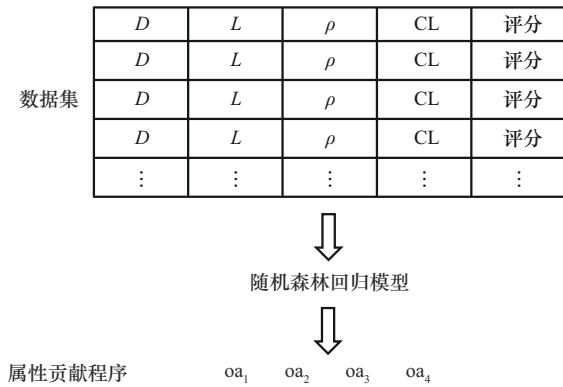


图5 随机森林回归模型训练及属性贡献程度提取过程

最后, 根据各属性的贡献程度, 选择前 2 名的 2 个网络拓扑结构属性  $oa_1$  及  $oa_2$  作为优化方向, 之后从多个评分较高的网络拓扑结构中, 选取对应优化方向的属性值, 以此组成该优化方向的目标属性范围。同时, 对于贡献程度较低的 2 个属性  $oa_3$  和  $oa_4$ , 从评分最高的网络拓扑结构中提取对应的属性值, 作为优化后网络拓扑结构的目标属性值, 以此保证优化的准确性。在此步骤中, 使用迭代的方式生成优化后的网络拓扑结构, 在保证  $oa_3$  和  $oa_4$  属性值的前提下, 通过循环迭代保证  $oa_1$  和  $oa_2$  属性值处于目标范围内, 整体流程如算法 1 所示。

#### 算法 1 生成优化网络拓扑结构算法

输入  $oa_1$  和  $oa_2$  目标属性值范围,  $oa_3$  和  $oa_4$  属性值

- 1) while true do
- 2) 基于  $oa_3$  和  $oa_4$  属性值生成随机图
- 3) 计算随机图的  $oa_1$  和  $oa_2$  属性值
- 4) if 这 2 个属性值处于目标范围内 then
- 5) 返回随机图
- 6) end if
- 7) end while

在实际的网络组建过程中, 此方案的结果提供

了极具价值的参考依据。组网过程中可以优先考虑更重要的属性, 特别是在邻居选择和网络优化策略的制定上, 优先考虑那些对提升网络性能贡献更大的属性。此外, 结合每个属性的具体范围值, 用户可以更加精准地调整和优化网络配置, 以实现更高效、更稳定的网络通信性能。

## 4 实验结果

### 4.1 实验条件设置

本文基于以上分析及优化模型进行了实验与评估。

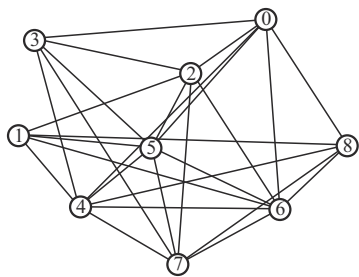
整体实验基于 ndnSIM 仿真平台, 以便更好地模拟 NDN 的性能。实验中选用的区块链网络拓扑结构类型为小世界网络 Watts-Strogatz、规则网络 Regular、随机图网络 ER、随机边 Waxman、无标度网络 BA 共 5 种类型。这 5 种网络拓扑结构适用于区块链的各种场景, Watts-Strogatz 包含一些连接紧密的簇, 适用于需要高速共识的物联网区块链系统; Regular 具有均匀的节点连接, 具备较高的稳定性, 适用于高安全性的区块链场景; ER 连接随机, 适用于需要广泛节点参与的公共区块链; Waxman 基于节点的几何距离生成连接, 适用于智能城市的区块链场景; BA 具备无标度特性, 高连接度的节点具备较强的抗攻击性, 适用于需要高扩展性的区块链场景。实验中的网络情况参数如表 1 所示, 基于此生成了 8 个网络拓扑结构。各个网络拓扑结构的命名格式为网络拓扑结构名称+该类型的标号, 标号从 0 开始。实验中 8 个网络拓扑结构的命名分别为 ws0、rg0、er0、wx0、wx1、wx2、wx3、ba0。网络拓扑结构如图 6 所示。

同时, 实验中对区块链的初始状态进行了相关设置, 9 个节点中 0、1 号节点的区块高度为 80, 2、3 号节点的区块高度为 90, 其余节点的区块高度为 100。区块同步的目标是 9 个节点的区块高度统一达到 100。

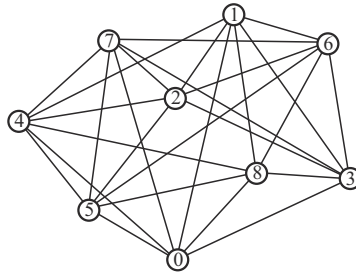
实验中同样考虑了 NDN 和区块链的结合。各个节点推送自己本地最高区块号的兴趣包命名为 /ndnSync/pushLocal/{local}, local 是各个节点本地的区块高度。请求本地缺少区块的兴趣包命名为 /ndnSync/requestBlock/{request}, request 是请求区块的对应高度当收到第二种兴趣包时, 若接收节点本地拥有该兴趣包请求的区块, 则将区块放置在数据包中进行返回。

表1 网络情况参数

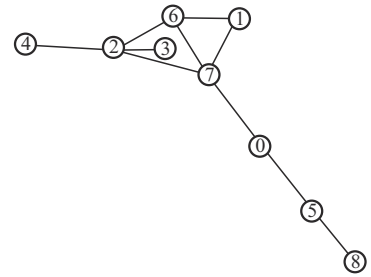
参数	含义	实验值
节点总数	区块链网络拓扑结构中节点的个数	9
网络拓扑结构类型	Watts-Strogatz、Regular、ER、Waxman、BA	以上5种
带宽	真实网络中的带宽范围,单位是Mbit/s	[1, 5]
传输时延	真实网络中的传输时延范围,单位是ms	[100, 500]
邻居个数	Watts-Strogatz 网络模型和 Regular 网络模型的参数,表示每个节点的度数,即邻居节点数。范围是[2,节点总数)	[6, 7]
重连概率	Watts-Strogatz 网络模型的参数,表示每条边都有一定概率以 $p$ 的概率被随机重连到网络中的其他节点上,范围是(0,1]	[0.8, 0.9]
连接概率	ER 网络模型的参数,表示每一对节点,以概率 $p$ 随机决定是否有一条连接,范围是(0,1]	[0.2, 0.3]
$\alpha$	Waxman 网络模型参数,用于表示节点之间距离对连接概率的影响程度,较大的 $\alpha$ 值会使得节点之间的距离对连接概率的影响减小,使网络更容易形成连接,范围是(0,1]	[0.4, 0.8]
$\beta$	Waxman 网络模型参数,用于控制节点之间连接概率的分布。较小的 $\beta$ 值会导致连接概率更加均匀分布,而较大的 $\beta$ 值会导致连接概率更加集中在较小的距离范围内,范围是(0,1]	[0.5, 0.6]



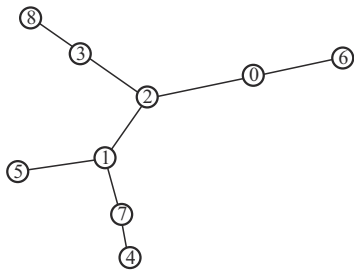
(a) ws0网络拓扑结构



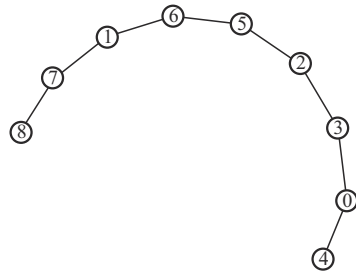
(b) rg0网络拓扑结构



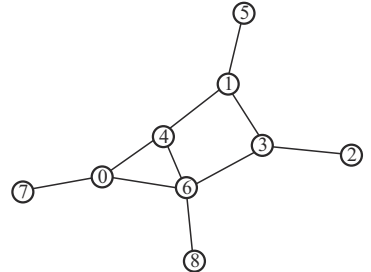
(c) er0网络拓扑结构



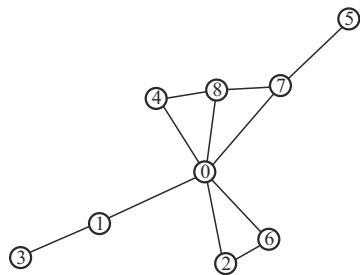
(d) wx0网络拓扑结构



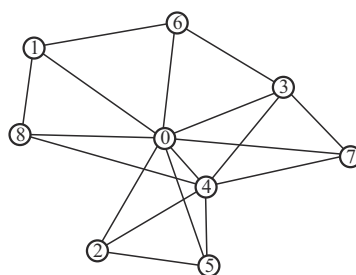
(e) wx1网络拓扑结构



(f) wx2网络拓扑结构



(g) wx3网络拓扑结构



(h) ba0网络拓扑结构

图6 网络拓扑结构

### 4.2 实验结果

通过 ndnSIM 的日志结果和式(1)~式(4)计算各个网络拓扑结构的同步时间和冗余度,结果如图 7 和图 8 所示。在这些实验中,不同的网络拓扑结构表现出了显著的性能差异。实验中,rg0 的同步时间最低,为 2.95 s,wx3 的同步时间最高,为 15.57 s;wx1 的冗余度最低,为 0.71,ws0 的冗余度最高,为 0.96。

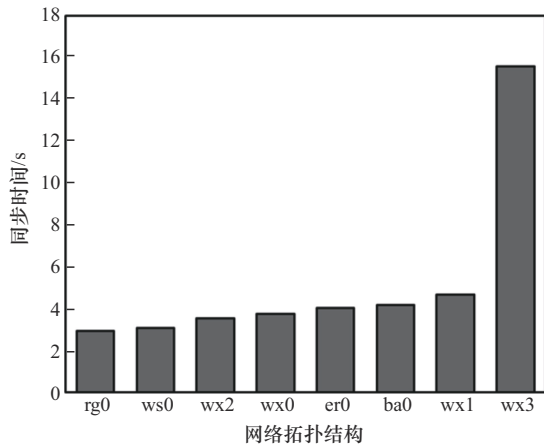


图 7 网络拓扑结构与同步时间的关系

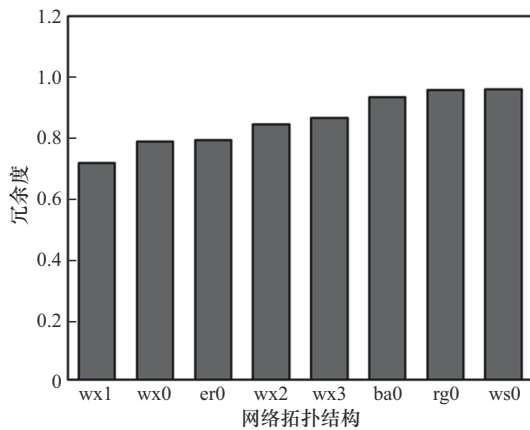


图 8 网络拓扑结构与冗余度的关系

结合同步时间和冗余度进行分析,可以明确同步时间和冗余度之间存在一定的矛盾关系。具体来说,网络拓扑结构的同步时间越低,其冗余度往往相对较高,即当通过优化网络拓扑结构来降低同步时间时,往往会引起冗余度的增加。这种矛盾关系说明了在网络拓扑结构优化过程中,需要在同步时间和冗余度之间进行权衡,无法简单地通过优化一个指标来全面提升网络性能。

使用式(5)~式(7),根据具体需求将 2 个相互矛盾的指标转化为一个评分,从而对网络拓扑结构进行定量分析和比较。实验中设置的同步时间上限为 5 s,同步时间权重为 0.8,冗余度上限为 0.98,冗余度权重为 0.2。根据 2 个指标的上限进行筛选,首先会将 wx3 的网络拓扑结构排除,其次经过式(5)~式(7)的计算,各个网络拓扑结构的评分结果如图 9 所示,可以明确网络拓扑结构 rg0 的评分最高,为 0.82。

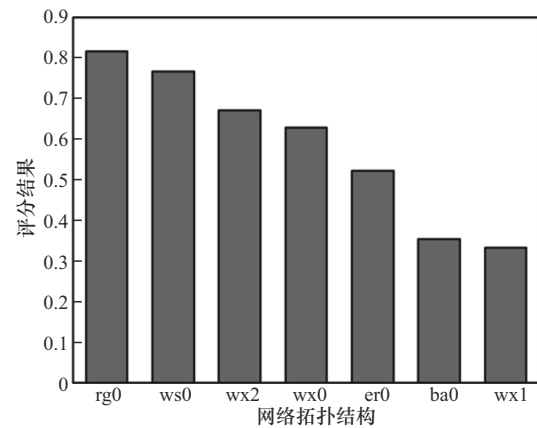


图 9 网络拓扑结构与评分结果的关系

各个网络拓扑结构的属性计算结果如表 2 所示,表中对各个网络拓扑结构的 6 个属性——网络

表 2 网络拓扑结构的属性计算结果

网络拓扑结构	网络连通性	网络直径	平均最短路径长度	密度	集群系数	节点度分布
rg0	True	2	1.28	0.75	0.67	[0, 0, 0, 0, 9, 0, 0]
ws0	True	3	1.25	0.75	0.70	[0, 0, 0, 0, 3, 3, 3, 0]
wx2	True	4	2.17	0.28	0.09	[4, 0, 4, 1, 0, 0, 0, 0]
wx0	True	5	2.61	0.22	0	[4, 3, 2, 0, 0, 0, 0, 0]
er0	True	5	2.39	0.28	0.24	[3, 3, 1, 2, 0, 0, 0, 0]
ba0	True	2	1.50	0.50	0.72	[0, 0, 6, 1, 0, 1, 0, 1]
wx1	True	8	3.33	0.22	0	[2, 7, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

连通性、网络直径、平均最短路径长度、密度、集群系数和节点度分布进行描述。

首先，所有网络拓扑结构在网络连通性上均为 True，说明这些拓扑结构中的节点之间都能够相互到达，确保了网络的基本通信需求。

在网络直径方面，rg0 网络拓扑结构的网络直径最小，为 2，意味着在这个网络拓扑结构中，信息可以在最短的路径内传输，传输效率较高。相对而言，wx1 网络拓扑结构的网络直径最大，为 8，表明在该网络中，信息传输可能需要经过更多的中间节点，传输时延较大。

平均最短路径长度的计算结果也显示出不同网络拓扑结构的差异。rg0 网络拓扑结构的平均最短路径长度为 1.28，仅比最低的 1.25 多 0.03，进一步说明其在信息传输方面的高效性。相比之下，wx1 网络拓扑结构的平均最短路径长度最高，为 3.33，显示出较大的传输路径长度，可能导致更高的传输时延。

在网络密度方面，rg0 和 ws0 网络拓扑结构的密度最高，均为 0.75，表明在这些网络中，节点之间的连接较为紧密，有助于提高信息传输的可靠性和速度。相反，wx0 和 wx1 网络拓扑结构的密度最低，均为 0.22，显示出较为稀疏的节点连接，可能不利于高效的信息传输。

集群系数的计算结果进一步揭示了各个网络拓扑结构的聚集特性。ws0 网络拓扑结构的集群系数最高，为 0.70，说明在该网络中，节点倾向于形成紧密的群组，有助于信息的局部传输和冗余度的降低。相对而言，wx0 和 wx1 网络拓扑结构的集群系数最低，均为 0，显示出较低的节点聚集性，可能影响网络的整体传输效率。

节点度分布的结果展示了各个网络拓扑结构中节点连接数的分布情况。例如，rg0 网络拓扑结构的节点度分布较为集中，所有节点的度数均为 6，表明该网络的连接较为均匀，有助于提高网络的稳定性和传输效率。相反，wx0 和 wx1 网络拓扑结构的节点度分布较为分散，不同节点的度数差异较大，显示出这些网络中的节点连接不均匀，可能导致传输效率的不稳定性。

通过对这些属性的计算和分析，可以更全面地理解各个网络拓扑结构的特性和其对网络性能的影响。这些结果为后续的网络拓扑结构优化提供了重要依据。

将网络拓扑结构的属性作为自变量，评分结果

作为因变量，通过随机森林回归模型训练后，得到的属性重要程度如图 10 所示，分别为 0.36、0.26、0.21 和 0.17。

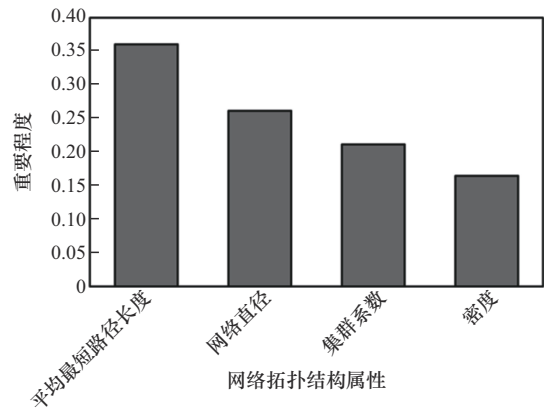


图 10 网络拓扑结构属性与重要程度的关系

### 4.3 网络拓扑结构优化

从图 10 中可以明确，在当前网络环境和区块同步算法下，平均最短路径长度和网络直径对于网络拓扑结构性能有较大的提升。从表 2 中选取前 3 名作为优化的标准，平均最短路径长度的范围为 [1.25, 2.17]，网络直径的范围为 [2, 4]。以这 2 个属性为准，生成符合属性值范围的优化网络拓扑结构，如图 11 所示，其平均最短路径长度为 1.27，网络直径为 2。在其他条件不变的情况下，使用 ndnSIM 再次进行仿真实验，查看同步时间和冗余度，并对全部 9 个网络拓扑重新计算评分结果。

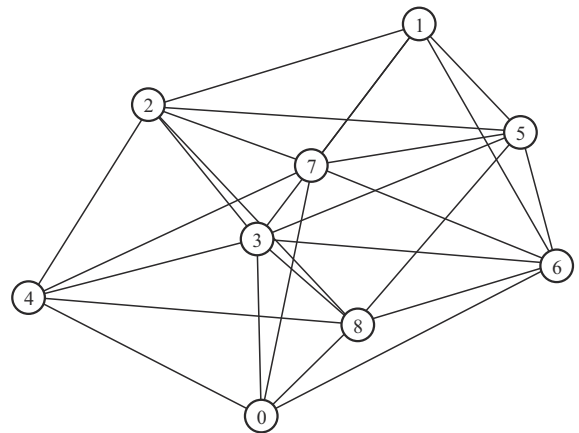


图 11 优化后的网络拓扑结构

使用优化后的网络拓扑结构进行实验的结果如图 12~图 14 所示。优化的网络拓扑同步时间为 2.37 s，

冗余度为0.95,与原有性能最好的网络拓扑结构相比,同步时间缩短0.58 s,冗余度基本没有发生变化。将9个网络拓扑结构重新计算评分,从图中也可以确定优化后的网络拓扑结果评分最高,为0.82,较原有性能最好的网络拓扑结构评分提高0.18。由此可以说明,本文模型可以实现网络拓扑结构的分析与优化。

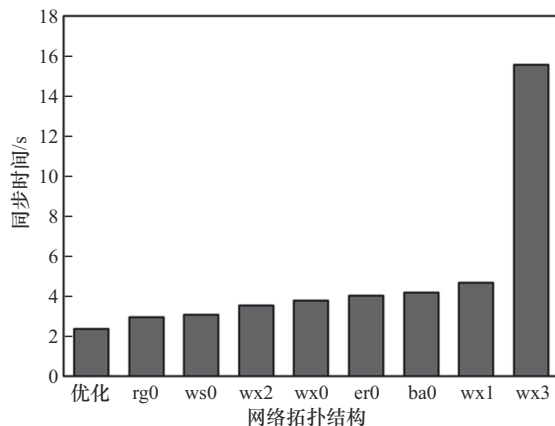


图 12 优化后网络拓扑结构与同步时间的关系

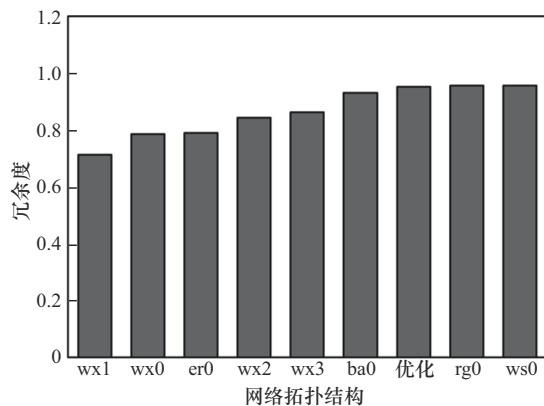


图 13 优化后网络拓扑结构与冗余度的关系

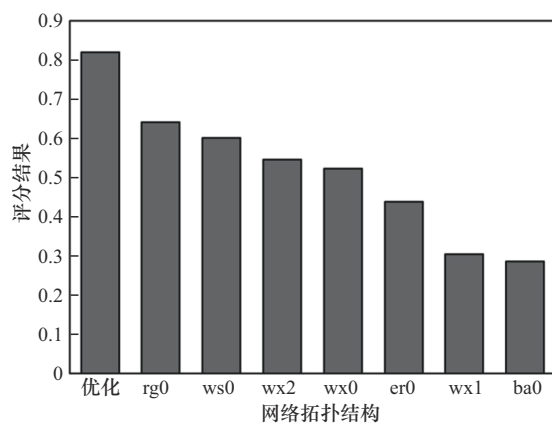


图 14 优化后网络拓扑结构与评分结果的关系

## 5 结束语

本文设计并验证了一个NDN区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型。模型分为3个主要部分:区块同步时间和区块传输冗余度的计算方法、基于区块同步时间和区块传输冗余度的网络拓扑结构评分指标体系,以及基于网络拓扑结构属性和评分的网络拓扑结构优化方案,其中前2个部分对性能指标和评分进行计算,完成了网络拓扑结构的分析工作,第3个部分确定影响NDN区块链系统性能的关键因素,完成了网络拓扑结构的优化工作,提升了整体性能。实验结果表明,优化后的网络拓扑结构可以对NDN区块链系统的性能进行提升,证明了分析优化模型的有效性和实用性。本文的研究在理论和实践的层面上为NDN区块链网络拓扑结构的性能分析和实际组网优化提供了新的思路和方法,具有重要的理论价值和实际应用意义。未来的研究可以进一步深入结合实际应用场景,完成模型的优化和改善,以应对更加复杂和多变的网络条件。

## 参考文献:

- [1] SQUAREPANTS S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[J]. SSRN Electronic Journal, 2008: 1-8.
- [2] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述: 原理、进展与应用[J]. 通信学报, 2020, 41(1): 134-151.  
ZENG S Q, HUO R, HUANG T, et al. Survey of blockchain: principle, progress and application[J]. Journal on Communications, 2020, 41(1): 134-151.
- [3] CROMAN K, DECKER C, EYAL I, et al. On scaling decentralized blockchains: (a position paper)[C]//Proceedings of the 3rd Workshop on Bitcoin and Blockchain Research. Berlin: Springer, 2016: 106-125.
- [4] 马红桥, 杨文忠, 康鹏. 基于NDN的区块链数据同步方法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(23): 117-125.  
MA H Q, YANG W Z, KANG P. Blockchain data synchronization method based on NDN[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(23): 117-125.
- [5] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构及进展[J]. 计算机学报, 2018, 41(5): 969-988.  
SHAO Q F, JIN C Q, ZHANG Z, et al. Blockchain: architecture and research progress[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(5): 969-988.
- [6] BACH L M, MIHALJEVIC B, ZAGAR M. Comparative analysis of blockchain consensus algorithms[C]//Proceedings of the 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1545-1550.
- [7] REYZIN L, MESHKOV D, CHEPURNOY A, et al. Improving authenticated dynamic dictionaries, with applications to cryptocurrencies[C]//Financial Cryptography and Data Security 2017. Berlin: Springer, 2017: 376-392.
- [8] ZHANG C, XU C, XU J L, et al. GEM<sup>2</sup>-tree: a gas-efficient structure

- for authenticated range queries in blockchain[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE). Piscataway: IEEE Press, 2019: 842-853.
- [9] 霍如, 程祥凤, 孙闯, 等. 区块链网络拓扑优化和转发策略设计[J]. 通信学报, 2022, 43(12): 89-100.  
HUO R, CHENG X F, SUN C, et al. Topology optimization and forwarding strategy design for blockchain network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(12): 89-100.
- [10] ROBERT A, DZISI G J, TUTU T E, et al. A survey on network optimization techniques for blockchain systems[J]. Algorithms, 2022, 15(6): 193.
- [11] ZHANG L X, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [12] 刘江, 霍如, 李诚成, 等. 基于命名数据网络的区块链信息传输机制[J]. 通信学报, 2018, 39(1): 24-33.  
LIU J, HUO R, LI C C, et al. Information transmission mechanism of Blockchain technology based on named-data networking[J]. Journal on Communications, 2018, 39(1): 24-33.
- [13] JIN T, ZHANG X, LIU Y R, et al. BlockNDN: a Bitcoin blockchain decentralized system over named data networking[C]//Proceedings of the 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2017: 75-80.
- [14] YI D, HUO R, WANG S, et al. An NDN-enabled data transfer strategy for blockchain network layer[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/2026/1/012001.
- [15] MILLER A K, LITTON J, PACHULSKI A, et al. Discovering bitcoin's public topology and influential nodes[J]. Computer Science, 2015: 1-17.
- [16] FADHIL M, OWENSON G, ADDA M. A Bitcoin model for evaluation of clustering to improve propagation delay in Bitcoin network[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Intl Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE Intl Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC) and 15th Intl Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering (DCABES). Piscataway: IEEE Press, 2016: 468-475.
- [17] FADHIL M, OWENSON G, ADDA M. Locality based approach to improve propagation delay on the Bitcoin peer-to-peer network[C]//Proceedings of the 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). Piscataway: IEEE Press, 2017: 556-559.
- [18] SALLAL M F, OWENSON G, ADDA M. Proximity awareness approach to enhance propagation delay on the Bitcoin peer-to-peer network[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2411-2416.
- [19] HAO W F, ZENG J J, DAI X H, et al. BlockP2P: enabling fast blockchain broadcast with scalable peer-to-peer network topology[C]//International Conference on Green, Pervasive, and Cloud Computing. Berlin: Springer, 2019: 223-237.
- [20] DECKER C, WATTENHOFER R. Information propagation in the Bitcoin network[C]//Proceedings of the IEEE P2P 2013. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [21] MIŠIĆ J, MIŠIĆ V B, CHANG X L, et al. Modeling of Bitcoin's blockchain delivery network[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(3): 1368-1381.
- [22] TOSHNIWAL B, KATAOKA K. Comparative performance analysis of underlying network topologies for blockchain[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 367-372.
- [23] 雷凯, 袁杰. 命名数据网络内容分发机制研究与探讨[J]. 电信科学, 2014, 30(9): 27-36.  
LEI K, YUAN J. Content distribution mechanisms of named data networking[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(9): 27-36.
- [24] MENG Y H, ALI NAEEM M, ALI R, et al. EHCP: an efficient hybrid content placement strategy in named data network caching[J]. IEEE Access, 2022, 7: 155601-155611.
- [25] REZAZAD M, TAY Y C. Decoupling NDN caches via CCndnS: design, analysis, and application[J]. Computer Communications, 2020, 151: 338-354.

## [作者简介]



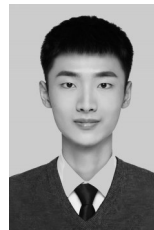
修佳鹏 (1977-), 女, 吉林省吉林市人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为区块链性能优化、大数据安全、物联网安全等。



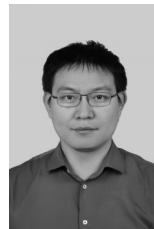
刘卉馨 (2001-), 女, 吉林白城人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为新一代网络、区块链技术等。



杨正球 (1967-), 男, 江苏靖江人, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为计算机通信、人工智能、编译原理等。



张德昊 (2001-), 男, 山东沂水人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为命名数据网络等。



郭少勇 (1985-), 男, 河北隆尧人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为DPU、区块链应用技术、边缘智能等。