

## NDN-Ad Hoc网络中基于多属性决策的可靠转发策略

韩江萍<sup>1</sup>, 汪浩东<sup>2</sup>, 杨佳宇<sup>1</sup>, 薛开平<sup>1</sup>, 李健<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学网络空间安全学院, 安徽 合肥 230027; 2. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为了应对传统自组织网络高度动态拓扑、短寿命连接等特性导致的传输失效问题, 基于命名数据网络(NDN)架构, 设计了一种联合链路稳定性和内容可达性的可靠转发(RF-LSCA)策略。该策略基于多属性决策方法, 综合考虑链路持续时间、节点间距离和内容可达性3个关键属性, 从而更加精确地选择最优转发节点, 提升了内容传输性能; 此外, 鉴于单一最优路径可能存在的不稳定性, 该策略进一步将决策模型与概率转发思想相结合, 设计了兼具低开销与高可靠性的冗余转发机制。这一设计充分利用了NDN的多路径特性, 以保障移动环境下的内容传输性能。通过仿真实验验证, 所提RF-LSCA在内容获取平均时延、平均跳数、内容满足率等多个关键性能指标上优于现有策略, 充分证明了其在提高NDN-Ad Hoc网络传输效率方面的优越性。

**关键词:** 命名数据网络; 转发策略; 多属性决策; 概率转发

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024085

## Reliable forwarding strategy based on multiple attribute decision-making in NDN-Ad Hoc networks

HAN Jiangping<sup>1</sup>, WANG Haodong<sup>2</sup>, YANG Jiayu<sup>1</sup>, XUE Kaiping<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>

1. School of Cyber Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

**Abstract:** To address transmission failures in traditional Ad Hoc networks, which was caused by highly dynamic topologies, short-lived connections characteristics, a reliable forwarding strategy based on link stability and content accessibility forwarding (RF-LSCA) based on the named data networking (NDN) architecture was designed. A multi-attribute decision-making method was utilized as the foundation for this strategy, with consideration given to link duration, distances between nodes, and content accessibility. This enabled a more precise selection of the optimal forwarding node, thereby enhancing the content transmission performance. Furthermore, given the potential instability of a single optimal path, the decision model was combined with probabilistic forwarding to design a low-overhead yet highly reliable redundant forwarding mechanism. The full exploitation of NDN's multipath characteristics was achieved through this design, thereby ensuring content delivery efficiency in mobile scenarios. Through simulation experiments, the proposed RF-LSCA is demonstrated to outperform existing strategies in key performance metrics, including average content retrieval delay, average hop counts, and content satisfaction rate. These results provide ample evidence of its superiority in enhancing transmission efficiency within NDN-Ad Hoc networks.

**Keywords:** named data networking, forwarding strategy, multiple attribute decision-making, probabilistic forwarding

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-03-11

通信作者: 李健, lijian9@ustc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62201540, No.62302472); 安徽省量子信息技术失导项目资助(No.AHY150400)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62201540, No.62302472), Anhui Provincial Initiative in Quantum Information Technologies (No.AHY150400)

## 0 引言

自组织 (Ad Hoc) 网络作为一种去中心化且分布式特征显著的网络架构, 在不具备基础设施 (如传统无线网络中的接入点或有线网络中的路由器) 的情况下, 依然能够在短时间内迅速部署并激活, 因此在应急响应、临时通信等诸多场景中具有极高的实用价值<sup>[1]</sup>。然而, 传统的基于 TCP/IP (transmission control protocol/Internet protocol) 协议栈的自组织网络架构, 由于其内容与网络地址紧密绑定的特性, 数据必须准确送达预设的目的地址才能实现内容获取。鉴于 Ad Hoc 网络的高度动态拓扑、短寿命连接等特性, 传输过程中频繁出现的链路中断问题导致数据包丢失现象严重。因此, 传统的 TCP/IP 框架在应对 Ad Hoc 网络的实际需求时, 存在明显的局限性, 亟须寻求新的网络架构以适应此类网络环境的独特挑战<sup>[2]</sup>。

命名数据网络 (NDN, named data networking) 是一种以数据内容为信息共享方式的新型网络架构<sup>[3]</sup>, 其采用基于内容名称的路由和转发机制, 实现数据的检索和获取。NDN 具有以下两点特性: 1) 内容与位置解耦特性, 在 NDN 中, 内容获取过程不再依赖 IP 地址绑定, 消费者可以通过内容名称直接检索数据, 使内容传输无需依赖端到端的会话连接; 2) 多源特性, NDN 默认采用网内缓存技术, 令消费者不仅可以从内容提供商中获取内容数据, 还可以从任意中间节点的缓存副本中灵活获取内容数据。这两点特性使 Ad Hoc 网络在 NDN 架构下不需要保证端到端的会话连接, 极大地改善了传统 TCP/IP 架构下 Ad Hoc 网络固有的高度动态拓扑、短寿命连接等特性导致的性能问题<sup>[4]</sup>。因此, NDN-Ad Hoc<sup>[5]</sup> 网络应运而生, 它将 NDN 架构应用到自组织网络中, 以解决传统自组织网络面临的困境<sup>[6]</sup>。然而, 在 NDN-Ad Hoc 网络中, 基础的数据获取策略为泛洪转发, 即每个节点收到兴趣包后再次广播, 直至发现内容。这种方式极易引起广播风暴问题<sup>[7]</sup>, 同时高度变化的拓扑也容易引起反向路径失效等问题<sup>[8]</sup>, 这些因素会严重影响 NDN-Ad Hoc 网络的传输性能。因此, 针对 NDN-Ad Hoc 网络的特点, 研究者普遍认为需要对现有的转发策略进行重新设计, 以适应网络环境中的高度动态拓扑和短寿命连接问题。

近年来, 有众多研究工作专注于 NDN-Ad Hoc

网络中的转发策略设计<sup>[9-10]</sup>。例如, 基于泛洪的转发策略通过在原始的泛洪策略中添加补丁操作来限制广播风暴等问题, 但其仅在消费者和内容源边界区域外部缓解了数据包广播风暴; 基于内容源信息的转发策略依据内容源的位置信息选择转发路径, 但这需要预先知道内容源的位置, 通常只适用于具有特定位置信息的应用; 基于链路稳定性的转发策略选择链路持续时间 (LET, link expired time) 较长的链路进行兴趣/数据包转发, 但其涉及更多的跳数, 导致转发效率较低。

针对上述问题, 本文提出了一种基于多属性决策的可靠转发策略。综合考虑链路持续时间、节点间距离和内容可达性这3个关键属性, 本文依据多属性决策模型精确选择最优转发节点。此外, 为了克服单路径传输的不稳定性问题, 本文进一步引入了概率转发思想, 并设计了一种兼具低开销与高可靠性的冗余转发机制, 从而充分利用了 NDN 的多路径特性。最终, 本文构建了一项融合以上2个核心要点的综合转发策略方案, 并命名为联合链路稳定性和内容可达性的可靠转发策略 (RF-LSCA, reliable forwarding based on link stability and content accessibility), 旨在全面提升 NDN-Ad Hoc 网络中的数据传输性能。

具体而言, 本文采取的多属性决策模型依赖于3个关键属性: 1) 链路持续时间, 即网络中两节点保持有效通信的时间, 这一属性用于评估链路的稳定性, 仅当其大于阈值时, 才能确保链路在传输过程中处于稳定状态; 2) 节点间距离, 与传统的基于地理位置的策略不同, 本文采用考虑节点运动方向的沿向距离替代传统的欧氏距离度量, 旨在选取距离内容源更近的节点参与转发, 从而减少获取内容所需的跳数; 3) 内容可达性, 定义为通过特定节点获取内容的成功程度。区别于现有方法, 本文针对每个名称前缀分别计算其内容可达性, 这种细粒度的性能度量有助于增强节点在转发决策时的精准度和适应性。基于上述关键属性, 本文采用加权算术平均 (WAA, weighted arithmetic average) 算子构建多属性决策模型, 以精确识别性能最优的转发节点。此外, 为了应对仅依赖最优节点的单路径传输的潜在不稳定性, 本文进一步将此决策模型与概率转发思想相结合, 设计了一套兼具低开销与高可靠性的冗余转发机制。具体而言, 基于决策模型

计算得到的结果,本文为非最优节点分配了冗余概率,性能表现越好的节点被选择为冗余节点的概率越高。这种概率冗余转发机制巧妙地利用了NDN的多路径特性,保障了动态环境下的内容获取性能。同时,借助多路径转发,网内缓存得以更广泛地分布传播,整体上提高了内容获取效率。本文工作的具体创新点总结如下。

1) 本文设计了一个基于多属性决策的可靠转发策略,该策略通过综合分析链路持续时间、节点间距离和内容可达性这3个关键属性,实现了对各节点性能的精细化评估。这一设计有效提高了转发路径选择的准确性,从而提升了内容获取效率。

2) 针对传统单路径转发可能引发的不稳定性问题,本文将多属性决策模型与概率转发思想相结合,设计了一种兼具低开销与高可靠性的冗余转发机制。在高动态网络环境下,这种机制能够有效保障内容获取的稳定性和高效性。

3) 本文在ndnSIM<sup>[11]</sup>中构建仿真环境并实现本文所提转发策略。通过对比现有多种转发策略在不同实验场景下的表现,结果显示,本文所设计的可靠转发策略在提高内容满足率、降低内容平均满足时延及平均跳数等方面均有突出表现,从而证明了其在整体内容传输性能上的优越性。

## 1 相关工作

转发策略是保证NDN-Ad Hoc网络中实现高效传输的核心环节,为此,许多工作致力于NDN-Ad Hoc网络中的转发策略设计。本文将现有策略分为五类,基于泛洪的转发策略、基于内容源信息的转发策略、基于邻居信息的转发策略、基于链路稳定性的转发策略和混合型转发策略,相关工作如表1所示。

### 1.1 基于泛洪的转发策略

在基于泛洪的转发策略中,通过在原始的泛洪策略中添加补丁操作,限制广播风暴等问题。文献[12]

通过在兴趣包中添加跳数计数器,以及在数据包中添加字段,限制了数据包的转发跳数,从而抑制了广播风暴。文献[13]提出了一种基于贝叶斯的接收端驱动的转发策略,依据贝叶斯理论决定是否进行转发,旨在减轻由兴趣包引起的广播风暴问题。文献[14]在兴趣包中定义了最大跳数,从而限制了传播范围。然而,这些方法仅缓解了消费者和内容源边界区域外的数据包广播风暴问题,而该区域内的广播风暴问题仍然存在。

### 1.2 基于内容源信息的转发策略

在基于内容源信息的转发策略中,内容源的位置已知,在转发过程中依据相应的位置信息选择转发路径。文献[15]机会性地获得内容源的位置,并比较邻居节点的位置,优先选择距离内容源更近的邻居节点作为转发节点。文献[16]提出了一种基于车辆跟踪的数据包转发策略,以提高移动环境中数据包的成功传输率,该方法将城市道路结构划分为多路口和直线2种情景,并根据车辆运动信息进行数据包转发。文献[17]采用基于地理位置的命名机制,使得转发策略可以获得节点的位置信息,从而根据该位置信息限制数据传输区域。但是,这类方法需要预先知道内容源的位置,这需要特定的内容命名方案或全局的内容信息通告等手段,通常只适用于具有特定位置信息的应用。

### 1.3 基于邻居信息的转发策略

在基于邻居信息的转发策略中,节点与其一跳邻居交换状态信息,并基于此信息进行转发节点的决策。在文献[18]中,各节点维护一个记录位置信息和速度信息的邻居表(NBT, neighbor table),并采用长短时记忆(LSTM, long short-term memory)算法预测最新的NBT。随后,计算链路持续时间和节点间距离,并依据此选择转发节点。文献[19]提出了一种基于最优和备份的转发策略。对于兴趣包,通过考虑信号强度、节点密度的多准则决策方法和重传机制,设计了高可靠性和可达性的单路径

表1 相关工作

类别	特点	缺陷
基于泛洪的转发策略 <sup>[12-14]</sup>	通过补丁操作限制广播风暴	无法彻底解决广播风暴
基于内容源信息的转发策略 <sup>[15-17]</sup>	依据内容源位置信息指导包转发	只适用于具有特定位置信息的应用
基于邻居信息的转发策略 <sup>[18-20]</sup>	利用邻居信息交互指导包转发	要求节点定位技术,信息实时更新困难
基于链路稳定性的转发策略 <sup>[21-23]</sup>	选择稳定性较高的链路	考虑因素过少,效率较低
混合型转发策略 <sup>[24-27]</sup>	综合多种技术指导包转发	过于复杂,实施困难

转发机制；对于数据包，则提供了一个可靠的多路径备份转发机制。文献[20]提出了一个内容和位置感知的转发策略，允许每个节点根据每个内容的性能测量和地理位置信息独立决定是否转发数据包，并采用了密度感知的抑制机制，以减少不必要的数据包传输。虽然基于邻居信息的转发策略减少了网络中兴趣包的重传，但其中的大多数要求节点定位技术，且节点需要根据当前位置维护最新的邻居表，这在链路不稳定的情况下实现是困难的。

#### 1.4 基于链路稳定性的转发策略

在基于链路稳定性的转发策略中，为了克服转发时突发链路中断造成的丢包问题，选择链路持续时间较长的链路进行转发。类似地，文献[21]提出了一种基于速度的可靠转发策略，以减少链路断开和孤立网络的问题。文献[22]利用模糊逻辑来缓解广播风暴问题，该策略基于节点距离、链路稳定性和信号质量等指标，避免了数据包冲突，同时设计了有效的数据恢复机制。文献[23]提出了一种分布式接收端驱动的链路稳定性感知转发协议，优先让链路稳定性高的节点进行转发。这些转发策略虽然缓解了返回路径失败的问题，但只考虑了链路稳定性这一物理层面的参量，而忽略了每个中间节点实际在内容获取方面的性能差异，且涉及更多的跳数，因此效率较低。

#### 1.5 混合型转发策略

混合型转发策略同时使用多种不同的技术来选择相应的转发节点。文献[24]提出了一种新的车载命名数据网络框架，构建了簇链车载骨干网。基于集群链，消费者可以使用请求聚合和单播从最近的内容源获取数据。文献[25]提出了一种基于多准则的转发策略，综合考虑接收信号强度、网络流量以及伪兴趣黑名单，从而有效解决本地泛洪以及泛洪攻击。文献[26]中，多个消费者通过一个数据检索过程共同获取数据，以保证反向路径的连续性和数据的成功接收。文献[27]提出了一种兴趣捆绑技术，以减少兴趣传输的数量。混合设计的转发策略可以通过结合各种技术来提供更好的转发决策，然而，设计一种同时满足各种应用需求的混合策略，是一项烦琐的任务。

## 2 框架设计

在NDN架构中，内容以其名称作为唯一标识，

通过这一名称在网络中实现内容的检索与获取。NDN架构包括2种类型的包结构：兴趣包和数据包，兴趣包扮演着请求特定内容的角色，而数据包承载了与兴趣包所对应名称相匹配的实际内容信息。每个NDN节点维护3个关键的数据结构：1) 内容存储表 (CS, content store)，用于存储数据副本，提高对重复请求的响应速度；2) 待定请求表 (PIT, pending interest table)，跟踪已转发但尚未被满足的兴趣包，为数据包提供返回路径；3) 转发信息表 (FIB, forwarding information base)，用于维护路由信息，指导兴趣包的转发。NDN遵循接收端驱动通信模式，即当消费者发起内容请求时，会生成特定的兴趣包，并遵循转发策略在网络中传递，直至到达具有相应内容的数据源，随后由数据包携带着相应的内容数据沿原兴趣包传输路径的相反方向返回至消费者。

图1展示了本文提出的可靠转发策略的具体框架设计。该框架在标准NDN架构基础上，为每个节点增设了2个关键组件——邻居信息模块与计算模块，并确保两者间的交互协作。邻居信息模块又分为2个部分：位置与速度信息统计子系统和兴趣包与数据包信息统计子系统。前者定期收集并更新邻居节点的位置及移动速度信息，这些信息通过节点间定期的信令交互来获取；后者则负责记录特定名称的兴趣包和数据包在节点间的转发次数，每次转发行为都会触发计数器进行累加。计算模块与邻居信息模块之间建立了交互接口，能够实时获取所需的邻居状态信息，进而用于计算本文决策模型中的核心参数，包括沿路距离、链路持续时间和细粒度内容连接度。而转发模块不仅与计算模块联动，根据计算结果选取最优转发节点；同时，它与邻居信息模块保持着反馈机制。转发模块会将转发的实际效果反馈至邻居信息模块，以便及时更新各类网络状态信息，从而实现整个转发策略的自适应调整。

## 3 具体策略

### 3.1 链路持续时间

在NDN架构中，内容请求通过兴趣包发起，其对应的数据包遵循原路径返回至消费者。然而，在自组织网络环境中，由于节点的高动态性特征，链路间连接呈现出短时和易变的特点，由此引出

2个核心挑战:一是当数据包沿着最初转发的兴趣包路径返回时,若因节点移动超出通信范围而导致原有链路断开,数据包可能无法沿原路径成功返回消费者;二是节点的移动性可能导致之前有效的转发路径失效,若不及时调整转发策略,后续发送的兴趣包将无法有效传输,进而导致消费者无法获取所请求的内容。

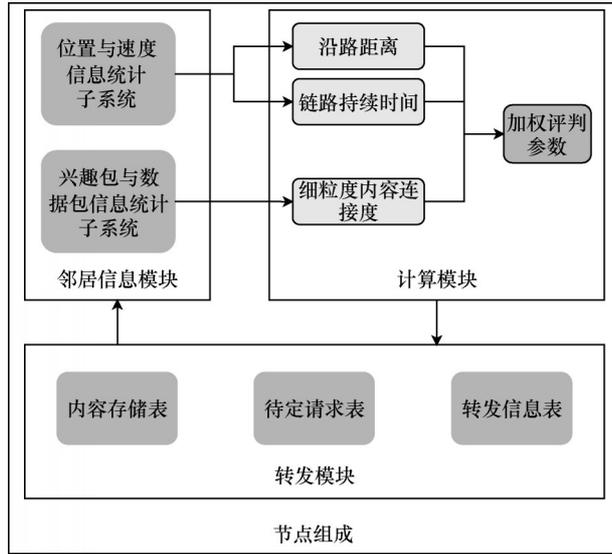


图1 本文策略框架设计

鉴于上述情况,对LET进行准确预测在转发过程中显得至关重要。在选择下一跳转发节点时,节点应当优先考虑那些具有更长LET的邻居节点,确保在整个内容传输过程中链路始终保持连通状态,从而避免由节点移动引发的传输中断问题。LET的估计依赖于链路两端节点的位置和速度信息,假设2个节点*i, k*的位置及速度信息如图2所示,则其在*t*时刻的链路持续时间 $L_{ik}^t$ 可以描述为

$$\left[ (x_i^t + v_{i,x}^t L_{ik}^t) - (x_k^t + v_{k,x}^t L_{ik}^t) \right]^2 + \left[ (y_i^t + v_{i,y}^t L_{ik}^t) - (y_k^t + v_{k,y}^t L_{ik}^t) \right]^2 = R^2 \quad (1)$$

其中,  $x_i^t$ 和 $y_i^t$ 分别为节点*i*在*t*时刻的水平方向位置坐标和垂直方向位置坐标,  $x_k^t$ 和 $y_k^t$ 分别为节点*k*在*t*时刻的水平方向位置坐标和垂直方向位置坐标,  $v_{i,x}^t$ 和 $v_{i,y}^t$ 分别为节点*i*在*t*时刻的水平方向速度和垂直方向速度,  $v_{k,x}^t$ 和 $v_{k,y}^t$ 分别为节点*k*在*t*时刻的水平方向速度和垂直方向速度,  $R$ 为通信范围阈值。

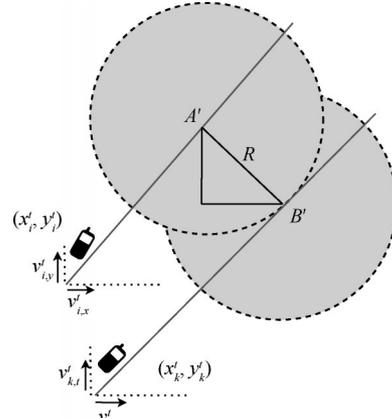


图2 链路持续时间

简化该方程, 令

$$\begin{aligned} a &= x_i^t - x_k^t, b = v_{i,x}^t - v_{k,x}^t \\ c &= y_i^t - y_k^t, d = v_{i,y}^t - v_{k,y}^t \end{aligned} \quad (2)$$

则式(1)可简化为

$$(a + bL_{ik}^t)^2 + (c + dL_{ik}^t)^2 = R^2 \quad (3)$$

求解该方程, 则 $L_{ik}^t$ 可描述为

$$L_{ik}^t = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(b^2 + d^2)R^2 - (ad - bc)^2}}{b^2 + d^2} \quad (4)$$

为计算LET, 需获取链路两端节点的位置和速度信息。在本文策略中, 假设每个节点都配备了定位系统(如全球定位系统(GPS, global positioning system)、北斗), 能够实时获取自身的位置信息和速度信息。其次, 为实现邻居节点间位置与速度信息的共享, 节点之间通过周期性发送并接收招呼包(Hello packet)进行交互。当节点*i*在*t*时刻收到邻居节点*k*的Hello packet后, 它将提取其中包含的移动信息, 并根据式(4)计算 $L_{ik}^t$ , 从而判断该链路是否满足传输要求。

### 3.2 节点间距离

在NDN-Ad Hoc网络中, 兴趣包通常需要经历多跳转发才能到达内容源。传统转发策略通常借鉴贪心思想<sup>[13-17]</sup>, 即优先选择与当前节点之间欧氏距离最远的相邻节点作为下一跳, 旨在减少整体传输跳数。然而, 这种单纯依赖欧氏距离的做法存在局限性, 如图3所示, 节点*a, c*之间的欧氏距离更远, 但是*c*节点的运动方向与数据传播方向相反, 如果选择*c*节点作为下一跳将导致兴趣包实际距离内容源越来越远, 最终无法到达内容源*d*节点处。

鉴于此, 本文参考了文献<sup>[18]</sup>的研究成果, 引入沿向距离 $D_{ik}^t$ 作为衡量节点间距离的新指标, 如图4所示, 其中,  $D_{ik}^t$ 表示 $E_{ik}^t$ 在下一跳节点*k*的运

动方向上的投影长度。回到图3的例子中，当采用  $D'_{ik}$  时，即使节点  $b$  与节点  $d$  之间的欧氏距离相对较短，但由于节点  $b$  的运动方向与兴趣包传播方向一致，故以  $D'_{ik}$  作为决策依据时会选择节点  $b$  作为更优的转发节点。随着节点  $b$  的移动，兴趣包能够逐渐接近内容源，从而有效地减少了到达内容源所需的跳数。因此，使用沿向距离替代传统的欧氏距离作为转发决策依据，更能确保在网络动态变化过程中，兴趣包能够高效地导向内容源。

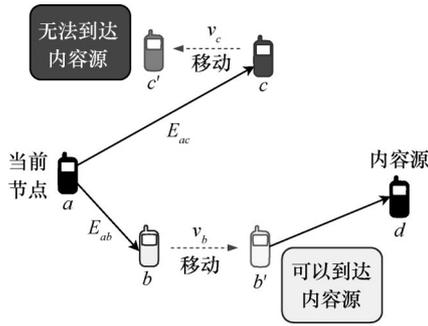


图3 欧氏距离作为距离指标

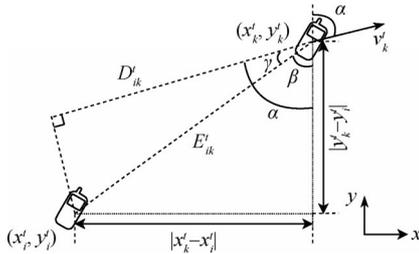


图4 沿向距离  $D'_{ik}$  的计算

假设节点  $i, k$  在  $t$  时刻的位置如图4所示，则  $D'_{ik}$  可表示为

$$D'_{ik} = E'_{ik} \cos(\gamma) = E'_{ik} \cos(\alpha - \beta) = E'_{ik} \cos\left(\alpha - \arctan\left|\frac{x'_k - x'_i}{y'_k - y'_i}\right|\right) \quad (5)$$

其中， $i, k$  分别为不同的节点， $(x'_i, y'_i)$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的位置坐标， $(x'_k, y'_k)$  为节点  $k$  在  $t$  时刻的位置坐标， $\alpha$  为节点  $k$  运动方向与正北方向的夹角， $\gamma$  为传播方向与节点  $k$  的运动方向之间的夹角， $\beta$  为传播方向与正北方向的夹角， $E'_{ik} = \sqrt{(x'_i - x'_k)^2 + (y'_i - y'_k)^2}$  为  $t$  时刻两节点之间的欧氏距离。需要注意的是， $D'_{ik}$  与  $D'_{ki}$  并不相同，前者表示当前节点为  $i$ ，下一跳节点为  $k$ ，在计算时考虑节点  $k$  的运动方向；后者表示当前节点为  $k$ ，下一跳节点为  $i$ ，在计算时考

虑节点  $i$  的运动方向。

### 3.3 内容可达性

内容可达性作为一种关键性能指标，反映了网络中节点成功获取特定内容的能力。通常情况下，具有较高内容可达性的节点往往与内容提供商或拥有本地缓存的节点保持良好的连接状态，从而能够高效地检索到所需数据内容。现有策略通常采用节点的整体兴趣满足率来评估其内容可达性。然而，这种方法存在局限性，因为它未能充分考虑不同内容请求可能对应不同的内容源这一事实，因此无法精确地反映节点在处理各种不同请求时的具体表现差异。因此，本文创新性地引入了细粒度内容可达性 (FCA, fine-grained content availability) 的概念，这一概念充分利用了NDN体系中的层次化命名机制。通过该方法，可以针对每个名称前缀独立计算其内容可达性。这种细粒度的性能度量能够显著提升节点在转发过程中的决策精准度，使其更智能地选取路径以高效获取与不同名称前缀相对应的数据内容，从而优化整体网络数据传输效率。

在节点  $k$  上，对应于特定的名称前缀  $p$ ，其 FCA 可表示为

$$FCA_k^p = \frac{D_p + \sum_{i \in \text{Sub}(p)} D_i}{I_p + \sum_{i \in \text{Sub}(p)} I_i} \quad (6)$$

其中， $k$  表示当前节点， $I_p$  和  $D_p$  分别表示对应名称前缀为  $p$  的兴趣包和数据包的数量， $\text{Sub}(p)$  表示  $p$  的子名称所构成的集合。

根据式(6)的定义，FCA 不仅考虑了原始的名称前缀下的内容满足率，还涵盖了其子名称的内容满足率。这种设计旨在确保即使在没有精确匹配的完整内容名称时，依然能够准确反映节点对于具有相似名称的内容的获取能力。鉴于NDN采用了层次化的命名机制，并且相同应用通常遵循一致的命名规则，这意味着具有相同名称前缀的请求很可能由相同的源提供内容服务。因此，在无法找到与兴趣包完全匹配的内容名称时，可以通过使用该名称前缀对应的 FCA 值作为参考指标，来有效评估节点对相应名称内容的可达性。

此外，鉴于自组织网络中节点的高度动态拓扑特性，本文策略采用指数加权移动平均 (EWMA, exponentially weighted moving average) 方法对 FCA

进行平滑处理,以确保短时间内发生的突发性网络状况变化不会对FCA的计算产生过大的影响。节点每收到一个数据包,就按照式(7)进行平滑处理。

$$FCA_k^p(n) = \alpha FCA_k^p(n) + (1 - \alpha) FCA_k^p(n - 1) \quad (7)$$

其中, $p$ 为名称前缀, $\alpha$ 为权值, $FCA(n)$ 和 $FCA(n-1)$ 分别为当前FCA值和更新前的历史FCA值。当节点向靠近内容源方向移动或成功收到相应数据包时,其兴趣满足率将上升,从而导致相应的FCA值逐步增长;反之,若节点向远离内容源方向移动或因缓存替换策略失去相应的数据包时,其兴趣满足率将下降,进而引起相应的FCA值逐渐降低。通过采用指数加权移动平均方法,避免了短期效应,降低了突发性状况对于网络传输的影响。

### 3.4 决策模型与概率冗余转发

基于3.1节至3.3节所描述的内容,对于当前节点 $i$ 与邻居节点 $k$ ,可以确定3个关键属性:链路持续时间、节点间距离和内容可达性。在此基础上,本文构建了一个基于多属性决策的模型,该模型能够综合评估这3个关键属性,并据此有效地推选出最优的转发节点,从而提升传输效率。

首先,依据节点间距离,可以确定当前节点的可通信邻居节点集合,如式(8)所示。

$$DL(i) = \{k \in \text{Neigh}(i) | D_{ik}^t \leq R\} \quad (8)$$

其中, $\text{Neigh}(i)$ 表示节点 $i$ 的邻居节点集合。

其次,为了在决策模型中进行公平比较和整合分析,分别对节点间距离和内容可达性2个属性进行归一化处理,如式(9)和式(10)所示。

$$S(D_{ik}^t) = \frac{D_{ik}^t}{\sum_{j \in DL(i)} D_{ij}^t}, k \in DL(i) \quad (9)$$

$$S(FCA_k^p) = \frac{FCA_k^p}{\sum_{j \in DL(i)} FCA_j^p}, k \in DL(i) \quad (10)$$

最后,基于加权算术平均算子,为集合中的每个节点计算其综合得分,如式(11)所示。

$$S_{ik}^t = \lambda S(D_{ik}^t) + (1 - \lambda) S(FCA_k^p), k \in DL(i) \quad (11)$$

其中, $\lambda$ 为重要性参数,表示节点间距离对于转发决策权重的影响程度,用以调节不同应用场景下节点间距离和内容可达性之间重要性的权衡。当 $\lambda$ 值较大时,在网络中选择转发节点时更侧重于考虑节点间距离,即在一定程度上认为距离因素比

内容可达性更重要;反之,当 $\lambda$ 值较小时,则意味着在决策过程中更加重视内容可达性指标,即相对于距离而言,节点能够获取相应内容的能力更为关键。

当节点收到一个兴趣包后,将按照上述方法对各个邻居节点进行评估打分,再依据式(12)所示的决策准则推选出最优下一跳转发节点。

$$\zeta = \begin{cases} \arg \max_{k \in DL(i)} [S_{ik}^t | L_{ik}^t > \mu], \exists L_{ik}^t > \mu \\ \arg \max_{k \in DL(i)} L_{ik}^t, \nexists L_{ik}^t > \mu \end{cases} \quad (12)$$

其中,参数 $\mu$ 为设定的LET阈值。当节点与任意邻居间的LET高于该阈值时,表明存在满足稳定性要求的链路,此时将依据加权算术平均得分选择得分最高的邻居节点作为最优转发节点,得分越高说明该节点在网络性能和内容可达性上的综合表现越优秀;相反,若节点与所有邻居间的LET都低于该阈值,则表明当前链路均无法满足稳定性要求,此时会选择具有最大LET值的邻居节点为最优转发节点,以最大程度保证传输的可靠性。这一决策准则能够在链路质量不同的情况下,灵活地选择最优的转发节点,从而提升转发策略的性能和可靠性。

然而,鉴于Ad Hoc网络的高度动态拓扑特性,仅依赖于单一最优节点进行单路径转发的方式在实际应用中存在明显的不可靠性。此外,单路径转发策略还可能导致网内数据的分布过于集中,大量节点未能有效参与转发过程,使得网内缓存资源难以充分发挥作用。为了缓解上述问题,本文将决策模型与概率转发相结合,设计了一个兼具低开销与高可靠性的冗余转发机制,从而更好地利用NDN的多路径特性,保障移动环境下的传输性能。具体而言,首先,基于上述决策模型计算得出的分值,本文为非最优节点分配了冗余转发概率,得分越高的节点所获得的冗余转发概率越大,如式(13)所示。

$$P(S_{ik}^t) = \frac{S_{ik}^t}{\sum_{j \in DL(i), j \neq \zeta} S_{ij}^t}, k \neq \zeta \quad (13)$$

在确定了节点的冗余转发概率之后,本文采用轮盘赌选择(RWS, roulette wheel selection)算法来实际选取参与冗余转发的节点。具体步骤如下。针对每个邻居节点,基于其计算出的概率进行排序;生成一个均匀分布于 $[0, 1]$ 的随机数 $q$ ;将 $q$ 与各节点累积概率相比较,当某个节点的累积概率大

于随机数时, 则选定该节点作为冗余转发节点, 其可形式化地描述为

$$P(j) = \begin{cases} 1, & P_{ij}^t \leq \sum_{j' \in DL(i)} P_{ij'}^t \geq q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

通过此冗余转发机制, 性能优越的节点因其较大的冗余转发概率而更有可能被选中执行冗余转发, 从而增强了整个网络的数据传输可靠性。

### 3.5 完整算法

在本文策略中, 具体的包转发流程如图 5 所示。当中间节点收到兴趣包后, 首先在 CS 内进行查询, 若有匹配项, 则直接返回相应的数据包; 若 CS 内未找到相应内容, 则继续查询 PIT, 若发现相匹配的条目, 则实施请求聚合操作, 避免重复转发; 若 PIT 内也未匹配成功, 则转向查询 FIB 表, 若无匹配项则丢弃该兴趣包, 否则根据转发策略从中选择下一跳转发节点, 同时更新邻居信息模块。当中间节点收到数据包后, 其首先检查 PIT 中是否存在相关联的请求记录, 若无则将其丢弃, 否则根据记录的信息, 将数据包返回给所有请求该数据的下游节点, 并更新邻居信息模块。兴趣包转发算法如算法 1 所示, 数据包转发算法如算法 2 所示。

在算法 1 中, 第 1 行至第 6 行分别执行 CS 匹配、PIT 匹配等, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ ; 第 7 行至第 10 行为 for 循环, 循环内部根据式(9)计算邻居节点的分

值, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ , 循环共执行  $k$  次 ( $k$  为邻居节点的数目), 因此总的复杂度为  $\mathcal{O}(k)$ ; 第 11 行根据式(12)得到最优节点, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ ; 第 12 行至第 14 行也为 for 循环, 循环内部依据式(12)进行概率冗余转发的判断, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ , 循环共执行  $k$  次, 因此总的复杂度为  $\mathcal{O}(k)$ ; 第 15 行至第 20 行分别执行请求聚合、丢弃数据包操作, 其复杂度均为  $\mathcal{O}(1)$ 。因此算法 1 总的复杂度为  $\mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(k) + \mathcal{O}(k) + \mathcal{O}(1) = \mathcal{O}(k)$ 。在算法 2 中, 第 1 行进行 PIT 匹配, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ ; 第 2 行至第 4 行返回数据包并缓存数据, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ ; 第 6 行若 PIT 匹配失败, 将丢弃数据包, 复杂度为  $\mathcal{O}(1)$ 。因此算法 2 总的复杂度为  $\mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(1) = \mathcal{O}(1)$ 。

#### 算法 1 兴趣包转发算法

节点  $i$  在  $t$  时刻收到一个兴趣包

- 1) 向兴趣满足率模块传递信息
- 2) if CS 中未匹配成功 then
- 3) if PIT 中未匹配成功 then
- 4) 在 PIT 中添加相应的新表项
- 5) 从位置信息模块获得速度与坐标参数
- 6) 根据式(8)得到可行节点集合  $DL(i)$
- 7) for  $i$  的所有邻居节点  $k \in DL(i)$
- 8) 从位置信息模块和兴趣满足率模块获得相应参数
- 9) 根据式(11)计算各节点的分值

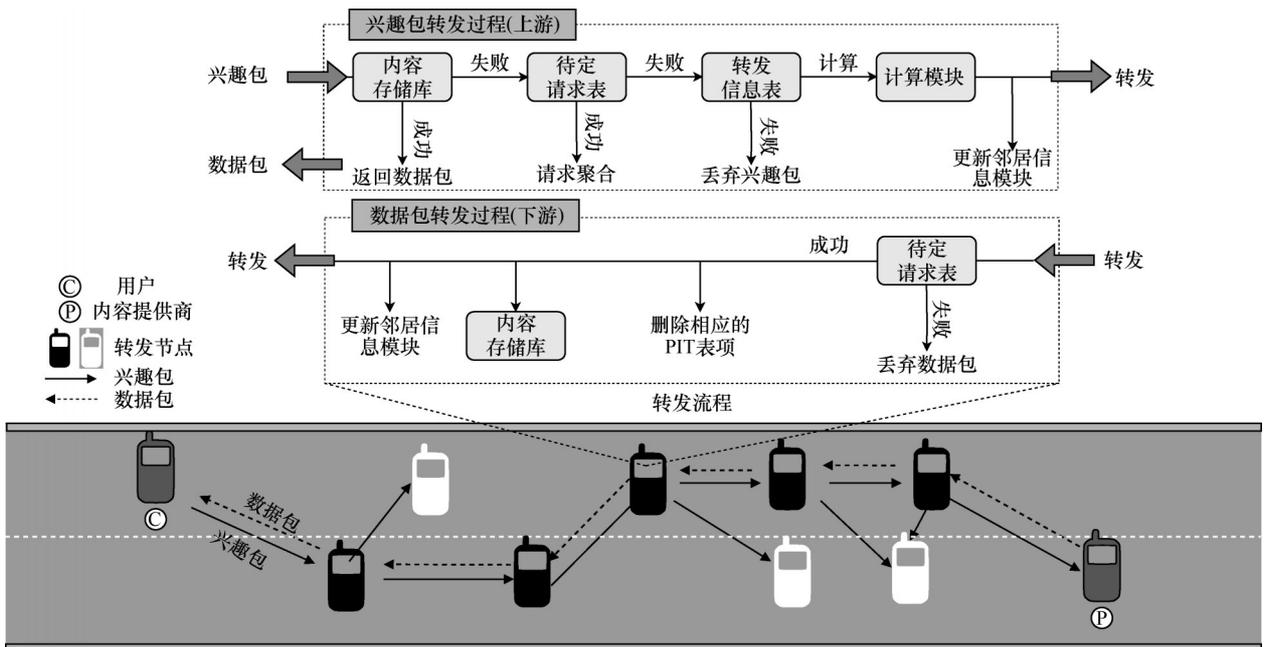


图 5 包转发流程

- 10) end for
- 11) 根据式(12)得到最优节点 $\zeta$ 并转发
- 12) for 节点 $j \in DL(i), j \neq \zeta$
- 13) 根据式(14)进行概率冗余转发
- 14) end for
- 15) else
- 16) 进行请求聚合, 丢弃该兴趣包
- 17) end if
- 18) else
- 19) 返回相应的数据包
- 20) end if

#### 算法2 数据包转发算法

节点 $i$ 在 $t$ 时刻收到一个数据包

- 1) if PIT中匹配成功 then
- 2) 将该数据包返回给所有的请求端口
- 3) 向兴趣满足率模块传递信息
- 4) 根据缓存策略将其缓存在CS中
- 5) else
- 6) 丢弃该数据包
- 7) end if

## 4 仿真分析

### 4.1 实验设置

为了对本文所提策略进行性能评估, 选取CODIE (controlled data and interest evaluation) [11]和PRFS (predictive forwarding strategy) [17]作为对比策略。

CODIE是一种基于泛洪机制优化的转发策略, 通过在数据包中添加控制字段以限制不必要的转发行为, 在保障内容满足率的同时, 显著减少了网络中的数据风暴现象, 并有效降低了内容获取时延。相较于传统泛洪转发策略, CODIE在保留其高效传播特性的同时进行了改进, 从而提升了整体传输性能, 实验结果展现出了CODIE的优越性。因此, 本文选取了CODIE来替代传统泛洪转发策略, 作为改进型的基础对比方案。

PRFS是建立在位置信息与链路稳定性基础上的转发策略。该策略要求每个节点维护一个邻居表, 其中记录了相邻节点的位置和速度信息。借助LSTM算法预测当前时刻邻居节点的移动信息, 计算出链路持续时间和节点间距离, 以此为基础筛选出最优转发节点。鉴于PRFS不仅在设计理念上与

本文策略密切相关, 且作为最新且具有典型意义的相关工作, 其性能表现卓越, 故而被选定为本文对比策略之一。

本文在基于NS-3的NDN仿真平台ndnSIM<sup>[11]</sup>中分别实现了3种策略。仿真场景设定为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格型区域, 其中随机放置了不同数目的节点(实验场景1中为50~100, 场景2和场景3中为100), 这些节点共同组成一个自组织网络, 并遵循随机游走模型进行运动。首先, 在整个网络中, 随机选取10个节点作为消费者, 它们请求内容的流行度服从Zipf分布; 其次, 随机选取5个节点作为内容提供商。各节点间交互Hello packet的时间为1 s, 节点间距离的权值 $\lambda = 0.5$ , 用于平滑FCA的权值 $\alpha = 0.5$ , LET的阈值 $\mu = 100\text{ ms}$ 。实验参数如表2所示。为了对策略的性能进行评估, 引入以下4个性能指标。

表2 实验参数

参数	含义
数据包大小/KB	1 024
最大传输距离/m	100
发送速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	6
载波频率/GHz	5.9
通信协议	IEEE 802.11p
仿真时间/s	20
仿真次数/次	10
$\mu/\text{ms}$	100
$\lambda$	0.5
$\alpha$	0.5

① 平均转发数据包数。网络中各个节点转发的数据包数量的平均值, 该指标是衡量网络流量负荷和冗余度的关键性能指标。

② 平均内容获取跳数。所有成功被满足的兴趣包所经历的跳数的平均值, 该指标体现了转发策略的内容检索效率。

③ 兴趣包平均满足时延。消费者发出兴趣包至收到相应数据包的时延的平均值, 该指标直观展示了网络在响应用户需求时的速度。

④ 内容获取成功率。成功被满足的兴趣包数量与消费者发送的兴趣包总数之比, 该指标体现了转发策略在提供服务方面的整体效能。

### 4.2 不同节点密度下的对比实验

在仿真过程中, 控制消费者请求数目为100 packet/s,

节点运动速度最大为 10 km/h。通过改变节点数量，评估了在不同节点密度的场景下，CODIE、PRFS 和本文策略在 4 个性能指标上的表现，具体结果如图 6 所示。图 6(a) 表明，本文策略在平均转发数据包数方面表现优秀，其数值明显低于 CODIE 策略，并与 PRFS 策略保持相近水平。尽管 CODIE 通过在数据包中嵌入跳数字段限制了数据包的过度泛滥，有效地控制了消费者和内容提供商边界区域外的广播风暴，但在该区域内，仍难以避免广播风暴的发生。相比之下，PRFS 策略利用节点的位置和链路稳定性信息，引导当前节点选择距离最远且链路稳定的节点作为下一跳，从而有效防止了广播风暴的产生。而本文策略则更进一步，在决策过程中综合考量了链路持续时间、节点间实际距离以及细粒度的内容可达性，确保了每次转发都指向性能最优的节点。此外，针对非最优节点采用了概率冗余转发机制，但通过对冗余节点数量的合理分配及轮盘赌选择算法的应用，使得冗余转发的程度得以降低，因此在平均转发数据包数这一指标上取得了接近于 PRFS 的良好效果。

由图 6(b)~图 6(d) 可知，本文策略在平均内容获取跳数、平均兴趣包满足时延以及平均内容获取成功率上均表现出优于 CODIE 和 PRFS 的性能。在较低节点密度环境中，由于网络覆盖范围有限，消费者需经过多跳才能抵达内容源，因此所有对比策略下的平均内容获取跳数和兴趣包响应时间都相对较高。同时，在低密度场景下，当前转发节点与相邻节点之间的链路可能不稳定或持续时间较短，这导致内容传输的成功率降低。然而，随着节点密度逐渐增加，网络中可用的中间节点数量增多，使得消费者能够通过更少的中间节点快速到达内容提供商，从而有效地减少了平均内容获取所需的跳数，并显著降低了平均兴趣包满足时延。此外，由于更多的稳定链路被利用，内容传输的成功概率也随之提升，故而内容获取成功率呈现上升趋势。

CODIE 策略是基于泛洪的转发机制，在网络节点数量较多时容易引发广播风暴现象，导致数据包碰撞率升高和重传频繁，从而影响了整体性能。尽管 PRFS 通过预测邻居信息表并基于距离和链路持续时间选择转发节点，有效地防止了广播风暴的

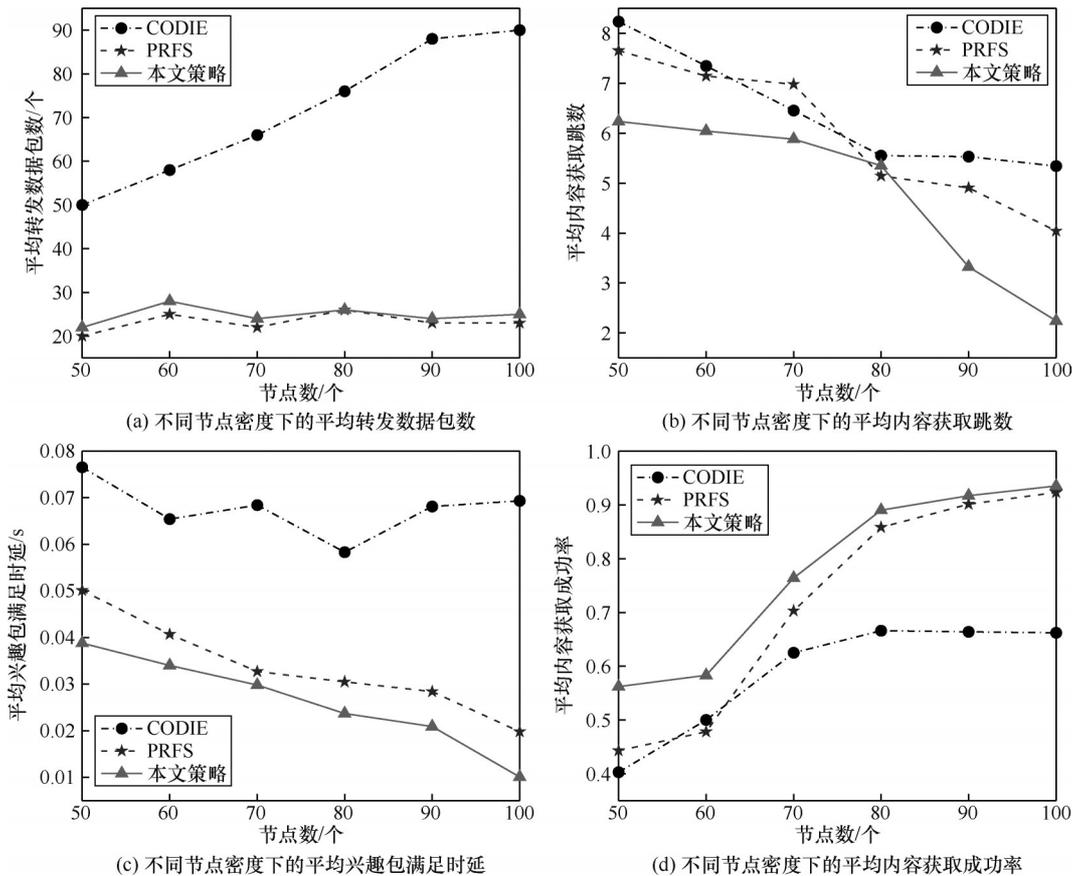


图 6 不同节点密度下 3 种策略的性能对比

发生, 并获得了较好的性能, 但该策略并未将内容可达性纳入考量, 因此在某些情况下对节点性能的评价可能不够精确。与此相比, 本文策略采用了多属性决策模型, 全面考虑了链路持续时间、节点间距离和内容可达性这 3 个关键属性, 使转发节点的选择更加精准有效。特别是在内容可达性的引入方面, 能够更好地利用网内缓存, 有助于进一步降低平均内容获取跳数和兴趣包满足时延, 并提高平均内容获取的成功率。然而值得注意的是, 在图 6(b) 中, 当节点数量为 80 时, 本文策略的平均内容获取跳数暂时高于 PRFS; 而在图 6(d) 中, 当节点数为 60 时, CODIE 的内容获取成功率竟超越了 PRFS。这些情况的出现主要是节点的位置随机分布及运动特性所导致的算法性能波动。总体来说, 尽管存在上述特定场景下的个别波动, 但从整体趋势上看, PRFS 策略相较于 CODIE 具有明显优势, 而本文策略则在多数情况下优于 PRFS 和 CODIE, 展现了更高的稳定性和效率。

### 4.3 不同网络流量下的对比实验

在仿真过程中, 控制节点数目为 100, 最大速

度为 10 km/h。通过改变请求数量, 评估了在不同网络流量的场景下, CODIE、PRFS 和本文策略在 4 个性能指标上的表现, 具体结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着网络流量的增加, 3 种转发策略在平均转发数据包数和平均兴趣包满足时延方面均呈现上升趋势, 而平均内容获取跳数值趋于稳定, 同时, 所有策略的平均内容获取成功率呈现下降趋势。这一现象的原因在于当网络流量增加时, 更多的兴趣包与数据包充斥于无线传输介质中, 碰撞概率随之显著提高, 导致网络拥塞加剧及重传频繁发生。在这种情况下, 兴趣包从发出到收到响应的时间延长, 且由于竞争激烈, 内容请求的满足率也相应降低。

在 3 种转发策略中, CODIE 因采用泛洪转发机制, 即使添加了限制广播范围的跳数字段, 但面对高流量场景仍表现出较高的冲突和冗余问题, 故其平均转发数据包数最高, 平均兴趣包满足时延增长最快, 平均内容获取成功率下滑最为明显。相比之下, PRFS 通过运用 LSTM 算法预测邻居节点状态, 并在前向和后向分别选择一个最优节点进行转发,

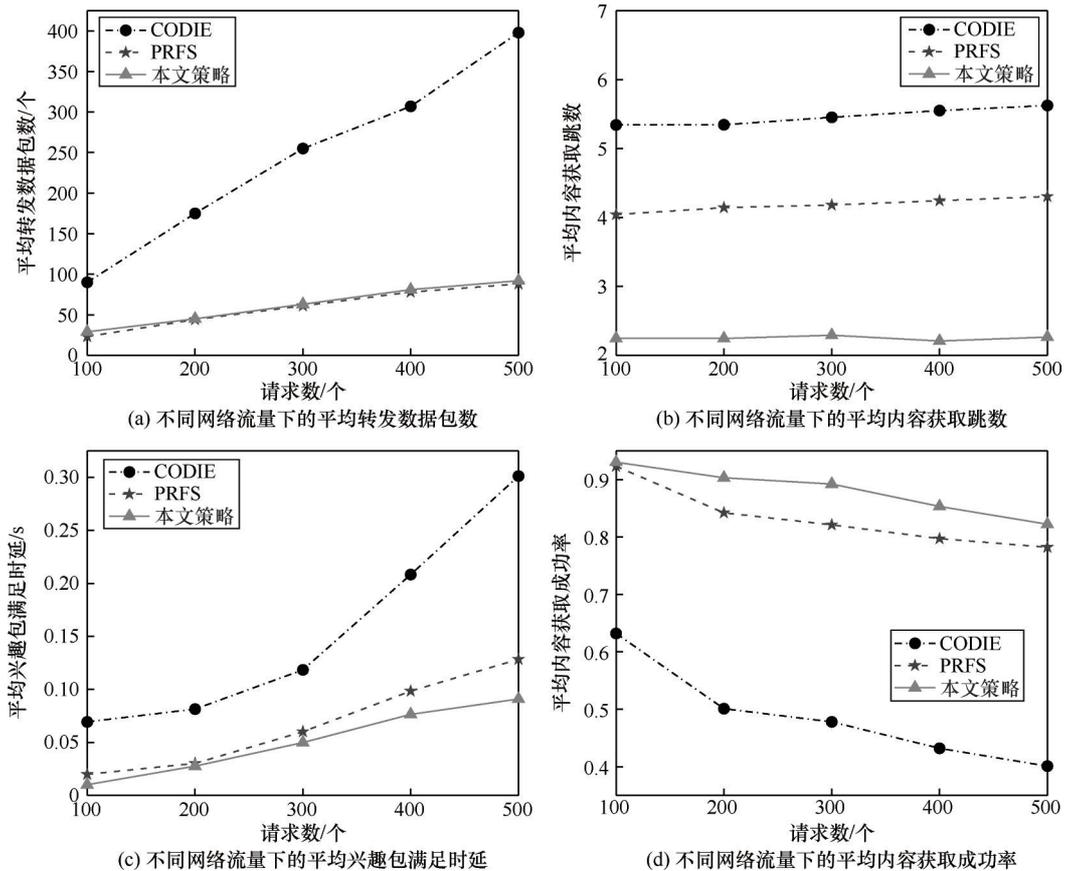


图 7 不同网络流量下 3 种策略的性能对比

从而有效减少了不必要的数据包转发，降低了冲突碰撞发生的概率。因此，在相同条件下，PRFS策略的平均转发数据包数相对较低，平均兴趣包满足时延的增长速度相较于CODIE更为缓慢。而本文策略在此基础上更进一步优化了下一跳节点的选择标准，综合权衡链路持续时间、节点间距离以及内容可达性这3个关键属性，使得节点性能评估更加精确。此外，本文策略倾向于选择具有相应缓存的中间节点作为转发点，避免直接从原始内容源中获取内容，这有助于减少传输跳数，因此表现出了最低的平均兴趣包满足时延以及最高的平均内容获取成功率。

#### 4.4 不同移动性下的对比实验

在仿真过程中，控制节点数目为100，请求速率为100 packet/s。通过改变节点移动速度，评估了在不同移动性的场景下，CODIE、PRFS和本文策略在4个性能指标上的表现，具体结果如图8所示。

由图8可知，在节点移动速度逐渐增大的情况下，3种策略的平均内容获取跳数和平均兴趣包满

足时延普遍呈现上升趋势，而平均内容获取成功率则普遍下降。由于节点移动速度的提升，导致同一时刻可选的转发节点数减少，因此消费者需要经过更多跳才能到达内容源。其次，高移动性使得节点互相之间更容易超出通信范围，从而导致链路持续时间减短，增加了包传输失败的可能性，导致消费者成功获取内容的概率降低。

CODIE策略在高移动性场景下的内容满足率下降最为显著，这是因为其基于泛洪的转发机制在链路不稳定的情况下会加剧无线传输碰撞和网络拥塞现象，从而导致更高的传输时延和更低的成功率。尽管PRFS通过预测算法以及距离指标选取转发节点，以减少冗余并优化路径，但在链路持续时间较短、节点快速移动的条件下，所选节点之间的链路稳定性难以保证，这同样无法确保内容传输的成功率。相比之下，本文策略采取了更为精细的多属性决策模型，在选择转发节点时综合评估了链路持续时间、节点间距离以及内容可达性这3个关键因素，使得对节点性能的评价更加准确。此外，本文策略还引入了概率转发思想，设计了概率冗

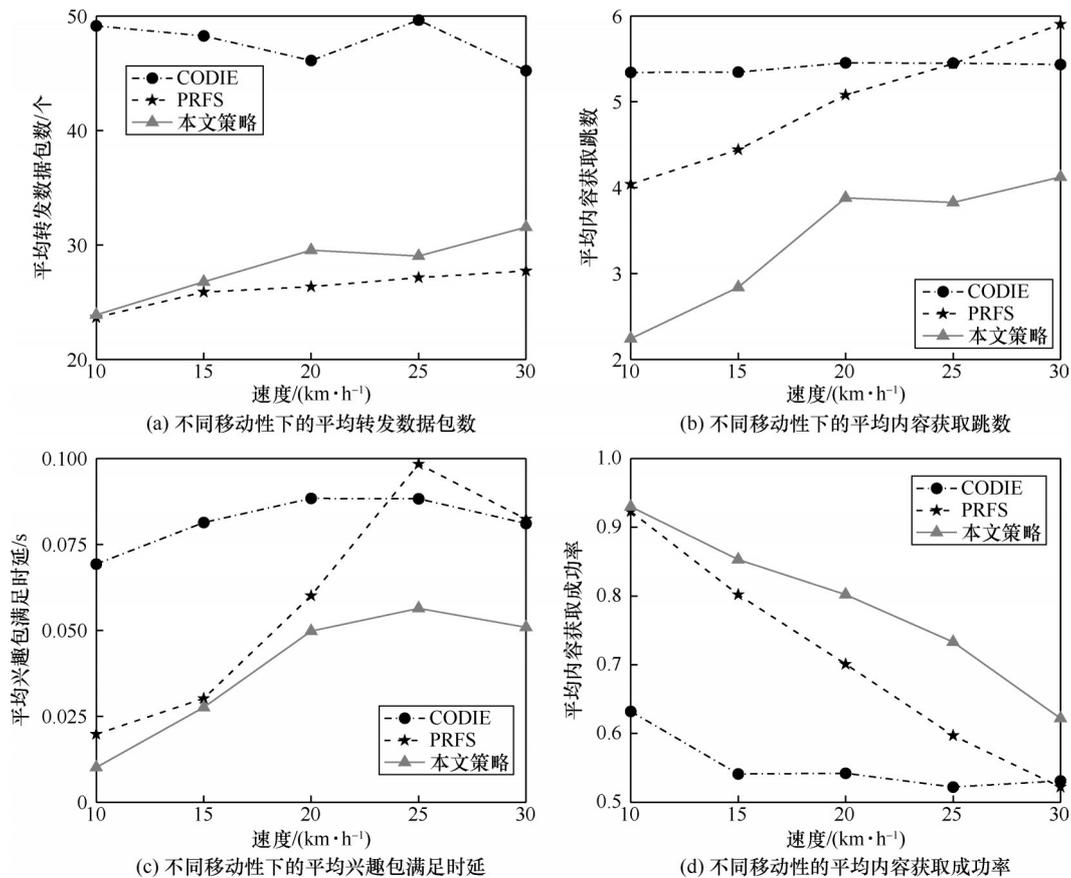


图8 不同移动性下3种策略的性能对比

余转发方案,巧妙地利用了NDN的多路径特性来提高平均内容获取的成功率。这种做法能够在高度动态变化的网络环境中,有效地利用多条路径,从而相较于CODIE和PRFS,表现出更优的传输性能。

## 5 结束语

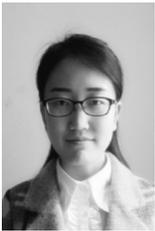
本文针对NDN-Ad Hoc网络环境,提出了一种基于多属性决策的可靠转发策略。在设计中,综合考虑了链路持续时间、节点间距离以及内容可达性这3个关键性能指标,从而更精准地衡量各个节点的性能,并利用多属性决策模型进行筛选,从而选择出最优的转发节点。为克服传统单路径传输可能存在的稳定性和低效率问题,本文引入概率转发思想,构建了一套低开销且高可靠的冗余转发机制,该机制充分利用了NDN的多路径特性,确保在动态变化的移动环境中也能保障高效的内容获取与传输。最后,基于ndnSIM仿真平台对本文所提出的策略进行了详细实验验证。实验结果表明,相较于现有工作,本文策略在内容传输性能方面取得了显著提升,展现了其在NDN-Ad Hoc网络中的优越性。

## 参考文献:

- [1] XIA Z C, WU J, WU L B, et al. A comprehensive survey of the key technologies and challenges surrounding vehicular ad hoc networks[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2021, 12(4): 1-30.
- [2] AHMED E, GHARAVI H. Cooperative vehicular networking: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: A Publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council*, 2018, 19(3): 996-1014.
- [3] ZHANG L X, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(3): 66-73.
- [4] 葛琳, 彭来献, 徐任晖. 命名数据网络体系架构的应用与发展[J]. *电讯技术*, 2020, 60(4): 483-488.  
GE L, PENG L X, XU R H. Application and development of named data network architecture[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(4): 483-488.
- [5] GRASSI G, PESAVENTO D, PAU G, et al. VANET via named data networking[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 410-415.
- [6] DOWLING A, LIU Y Q, HUIE L, et al. Building an information-centric and LoRa-based sensing platform for IoT[C]//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [7] RAHMAN M A, ZHANG B C. On data-centric forwarding in mobile ad-hoc networks: baseline design and simulation analysis[C]//*Proceedings of the 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-9.
- [8] 李兰凤, 马佳荣. 车联网环境下命名数据网络的关键技术分析[J]. *信息技术与信息化*, 2021(9): 181-184.  
LI L F, MA J R. Analysis on key technologies of named data network in the Internet of vehicles environment[J]. *Information Technology and Informatization*, 2021(9): 181-184.
- [9] TARIQ A, REHMAN R A, KIM B S. Forwarding strategies in NDN-based wireless networks: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1): 68-95.
- [10] AHED K, BENAMAR M, LAHCEN A A, et al. Forwarding strategies in vehicular named data networks: a survey[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(5): 1819-1835.
- [11] MASTORAKIS S, AFANASYEV A, ZHANG L. On the evolution of ndnSIM: an open-source simulator for NDN experimentation[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2017, 47(3): 19-33.
- [12] AHMED S H, BOUK S H, YAQUB M A, et al. CODIE: controlled data and interest evaluation in vehicular named data networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 3954-3963.
- [13] GUO X, CHEN Y X, CAO L C, et al. A receiver-forwarding decision scheme based on Bayesian for NDN-VANET[J]. *China Communications*, 2020, 17(8): 106-120.
- [14] BOUK S H, AHMED S H, KIM D, et al. LAPEL: hop limit based adaptive PIT entry lifetime for vehicular named data networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 5546-5557.
- [15] BOUKERCHE A, COUTINHO R W L. LoICen: a novel location-based and information-centric architecture for content distribution in vehicular networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 93: 101899.
- [16] HOU R, ZHOU S, CUI M T, et al. Data forwarding scheme for vehicle tracking in named data networking[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 6684-6695.
- [17] PRATES A A, BASTOS I V, MORAES I M. GeoZone: an interest-packet forwarding mechanism based on dissemination zone for content-centric vehicular networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2019, 73: 155-166.
- [18] WANG J X, LUO J T, RAN Y Y, et al. Towards predictive forwarding strategy in vehicular named data networking[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 3751-3763.
- [19] LI D X, SONG T, YANG Y T, et al. A reliable and efficient forwarding strategy in vehicular named data networking[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2020, 22(4): 348-357.
- [20] CHOWDHURY M, KHAN J A, WANG L. Leveraging content connectivity and location awareness for adaptive forwarding in NDN-based mobile ad hoc networks[C]//*Proceedings of the 7th ACM Conference on Information-Centric Networking*. New York: ACM Press, 2020: 59-69.
- [21] BURHAN M, REHMAN R A, KIM B S. Velocity based reliable forwarding strategy towards disconnect link avoidance in NDN-VANETs[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

- [22] CUNHA I K B, JUNIOR J C, FERNANDEZ M P, et al. VNDN-fuzzy-a strategy to mitigate the forwarding interests broadcast storm problem in VNDN networks[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 263-270.
- [23] ZAFAR W U I, REHMAN M A U, JABEEN F, et al. Decentralized receiver-based link stability-aware forwarding scheme for NDN-based VANETs[J]. Computer Networks, 2023, 236: 109996.
- [24] WANG X N, LI Y L. Vehicular named data networking framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(11): 4705-4714.
- [25] ARAÚJO F R C, MADUREIRA A L R, SAMPAIO L N. A multicriteria-based forwarding strategy for interest flooding mitigation on named data wireless networking[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(12): 7000-7013.
- [26] WANG X N, LU Y M. Efficient forwarding and data acquisition in NDN-based MANET[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(2): 530-539.
- [27] RAHMAN M A, LIANG T, ZHANG B C. BLEND: improving NDN performance over wireless links using interest bundling[C]//Proceedings of the MILCOM 2021-2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 432-437.

## [作者简介]



韩江萍 (1994-), 女, 河南洛阳人, 博士, 中国科学技术大学副研究员, 主要研究方向为互联网传输优化、数据中心和内容中心网络等。



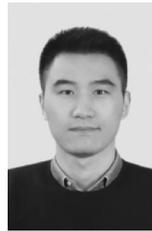
汪浩东 (2000-), 男, 安徽芜湖人, 中国科学技术大学硕士生, 主要研究方向为下一代互联网体系架构和传输优化。



杨佳宇 (1996-), 女, 甘肃白银人, 中国科学技术大学博士生, 主要研究方向为下一代互联网体系架构、传输优化和网络安全。



薛开平 (1980-), 男, 江苏盐城人, 博士, 中国科学技术大学教授, 主要研究方向为下一代互联网体系架构、传输优化和网络安全等。



李健 (1992-), 男, 安徽合肥人, 博士, 中国科学技术大学副研究员, 主要研究方向为下一代互联网体系架构、无线网络和量子网络等。