

多模态网络中的路由技术与协议研究综述

—— 兰佳晨, 陈夏润, 周杨凯, 文伟平 ——

(北京大学软件与微电子学院, 北京 100871)

摘要: 随着多模态网络在统一基础设施上并发运行, 不同通信范式之间的差异性和复杂性日益凸显, 同时也对路径可信性与路由安全性提出了更高要求。文章对多模态网络中的路由技术与协议进行了系统综述, 围绕内容导向、身份导向、地理导向、IP 导向与算力导向等代表性模态, 总结了其路由模式、路径构建方式及主要特征, 并比较了各自的适用场景与安全考量。NDN 模态强调内容自带安全, IP 模态发展了 BGP-SEC 与 RPKI 来保障路径完整性, 跨模态环境中则出现了可信路由、路径加密与随机化等技术以增强可靠性与抗攻击能力。在此基础上, 文章进一步探讨了模态动态加载、标识共存与网络编译等跨模态协同机制, 并展望了面向可信路径构建与可验证网络服务的研究方向。文章的目标在于为未来多模态网络的路由体系提供结构化参考, 推动其向更高效、更安全的下一代网络演进。

关键词: 多模态网络; 路由协议; 可信路由; 路径验证; 内生安全

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1122 (2025) 10-1506-17

中文引用格式: 兰佳晨, 陈夏润, 周杨凯, 等. 多模态网络中的路由技术与协议研究综述 [J]. 信息网络安全, 2025, 25 (10): 1506-1522.

英文引用格式: LAN Jiachen, CHEN Xiarun, ZHOU Yangkai, et al. A Survey of Routing Technologies and Protocols in Polymorphic Networks[J]. Netinfo Security, 2025, 25(10): 1506-1522.

A Survey of Routing Technologies and Protocols in Polymorphic Networks

LAN Jiachen, CHEN Xiarun, ZHOU Yangkai, WEN Weiping

(School of Software & Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As polymorphic networks operate concurrently over a unified infrastructure, the heterogeneity and complexity among network modals become increasingly salient, raising stronger requirements for path trustworthiness and routing security. This paper presented a systematic survey of routing technologies and protocols in polymorphic networks. We reviewed representative network modals—content-centric, identity-centric, geographic-

收稿日期: 2025-08-10

基金项目: 国家重点研发计划 [2024YFB2906501]

作者简介: 兰佳晨 (2002—), 男, 江西, 硕士研究生, 主要研究方向为网络安全、人工智能安全; 陈夏润 (1997—), 男, 江西, 博士研究生, 主要研究方向为网络攻防、智能漏洞挖掘、人工智能安全; 周杨凯 (2002—), 男, 浙江, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能安全; 文伟平 (1976—), 男, 湖南, 教授, 博士, 主要研究方向为系统与软件安全、云安全、人工智能安全。

通信作者: 文伟平 weipingwen@pku.edu.cn

oriented, IP-oriented, and compute-oriented—summarizing their routing patterns, path-construction methods, and key characteristics, and contrasting their application scenarios together with security considerations. In particular, NDN embodied data-centric security; the IP modal had evolved BGP-SEC and RPKI to protect path integrity; and cross-modal settings had introduced trusted routing, path encryption, and path randomization to enhance reliability and resilience against attacks. Building on these observations, we further discussed cross-modal coordination mechanisms such as dynamic loading of network modals, identifier coexistence, and network compilation, and outlined research directions toward trustworthy path construction and verifiable network services. The goal of this survey is to provide a structured reference for the design of routing systems in polymorphic networks and to support their evolution toward a more efficient and secure next-generation network.

Key words: polymorphic networks; routing protocols; trusted routing; path verification; endogenous security

0 引言

随着信息技术的迅猛发展,互联网正在与工业、交通、医疗、能源等多个垂直行业深度融合,传统“通用性为主”的网络架构正逐渐向“定制化、智能化、可编程化”转型。这种融合态势促使网络基础设施不仅需满足传统的数据传输需求,更需支撑高安全、高可靠的行业级应用场景^[1]。然而,以 TCP/IP 协议栈为核心的单一网络技术体系,在协议层级、寻址机制、路由策略等方面呈现出结构刚性和适应性不足的问题,难以支撑异构资源的动态调度和多源多标识的数据交互。

面对传统网络范式在工程复杂度、安全保障和业务敏感性上的困境,邬江兴院士提出了一种网络发展范式——多模态网络环境(Polymorphic Network Environment, PNE)^[2]。该范式强调“网络技术体系与支撑环境分离”,通过构建全维可定义的基础设施能力池,支持多种网络模态在统一物理环境中的共生共存与按需演化^[1]。多模态网络环境为不同的网络模态提供“插件化”部署支持,并通过可编程化机制,实现路由协议、转发逻辑、报文格式、标识系统等维度的深度可定制。相较于传统“统一协议主导”的网络架构,该范式显著提高了网络体系对多样化应用的适应性、演化能力与安全性。

在此背景下,路由协议作为网络的核心控制逻辑之一,正面临根本性变革。在传统 TCP/IP 体系下,路由协议多基于单一寻址空间,采用静态或分布式的路

径计算方式,其设计目标是寻求路径最短、带宽最优、收敛快速等普适性性能指标。而在多模态网络中,路由问题呈现出多维异构、标识多样、路径动态、目标多元的复杂特征,同时也对路径可信性与安全保障提出了更高要求。不同网络模态具备各自独立的寻址体系与路径发现机制,例如,NDN(Named Data Networking)/CCN(Content-Centric Networking)使用基于内容名称的逐跳反向路径建立机制,MobilityFirst 基于 GUID/NA 的双向映射与绑定更新机制,而地理信息驱动的网络模态则基于空间坐标的广播与区域转发策略。多个模态共存时,需在统一网络基础上实现路由表的隔离、标识的多义映射与路径选择的策略协调,这对现有路由协议的控制面、数据面乃至命名解析逻辑提出了挑战^[3]。

多模态网络环境还引入了诸如模态动态加载、存算转一体化网元、内生安全机制等关键技术,这些技术的引入直接改变了传统路由协议的设计边界与实现路径。一方面,模态的“即插即用”要求路由机制具备高度的配置自适应性与状态重构能力^[4];另一方面,标识体系的融合与分解使得路径决策需结合多标识关联性与安全策略,并在必要时支持路径匿名化与可验证性控制^[5]。随着网元智能程度的提升,路由行为已不再仅由网络拓扑和带宽条件决定,算力负载、缓存状态、能耗约束等非传统指标也逐渐纳入路径选择逻辑中,推动路由协议向认知化、自优化的方向演进。

基于上述背景,本文旨在系统梳理并分析多模态网络环境下的路由技术与协议研究现状,重点围绕两个核心问题展开:其一,探讨不同网络模态中典型的路由协议机制及其异同,比较它们在路径发现、转发策略、拥塞控制和安全保证等方面的设计特征与适用条件;其二,分析多模态网络的关键技术组成对传统路由协议和安全机制所带来的挑战与转变。本文希望通过系统性综述,为多模态网络下可信、安全的路由体系设计提供理论参考与借鉴。

1 多模态网络的发展背景与架构

1.1 多模态网络提出的背景与动因

随着互联网在规模、性能和业务复杂度方面的持续演进,基于TCP/IP协议的传统网络架构正面临越来越多的结构性挑战。在现有体系中,网络采用“单一协议主导、分层抽象设计”的范式,以IP地址为核心标识,建立从终端到终端的连接^[6]。然而,当前网络与社会深度融合的趋势,如车联网、工业互联网、智慧医疗、沉浸式交互系统等,对通信网络提出了多标识融合、超低时延、智能协同、安全弹性等多维异构需求^[1],传统网络架构显现出明显的瓶颈:其一,固定协议栈难以快速适配多样化场景;其二,标识与定位耦合带来的寻址障碍;其三,演进式的补丁式优化导致系统复杂度持续上升,运维与安全代价高昂^[5]。

在此背景下,“网络技术体系是否可以像操作系统一样模块化、按需加载和协同运行”的问题成为网络体系结构研究的关键突破口^[2]。由此,多模态网络环境作为一种新型网络发展范式应运而生,力图突破传统网络“单协议、单标识、单路径”的发展范式限制,实现支持多种网络模态共存、动态加载、深度编程与内生安全保障的统一承载架构^[4]。

1.2 多模态网络的核心理念与定义

多模态网络环境本质上是一种“技术体系与支撑环境分离”的网络架构范式^[7],其核心思想是通过构建统一的底层资源池(基线能力)和标准化的软硬件

接口,支持多种网络协议栈、路由机制、转发逻辑以“模态”的形式动态加载、共生演进^[2]。

网络模态是指在多模态网络环境中运行的、面向特定技术体系或应用场景的逻辑网络单元,可以是实体部署,也可以是虚拟定义^[4]。模态之间在命名空间、寻址机制、路由协议、报文结构等方面存在显著差异。例如,基于内容的命名数据网络、基于身份的MobilityFirst网络、基于地理标识的区域通信网络、IP网络均可视为不同类型的模态。

多模态网络架构允许许多模态在同一物理网络基础设施中按需加载、并行运行、协同调度,并通过统一的接口管理平台实现模态的生命周期控制^[3]。这种解耦设计大幅提升了网络对新场景的适应能力,提供了可扩展、可演进的“网络操作系统”式的基础架构。

1.3 多模态网络的体系架构与构成要素

多模态网络环境的体系架构如图1所示,可划分为以下3个关键组成部分。

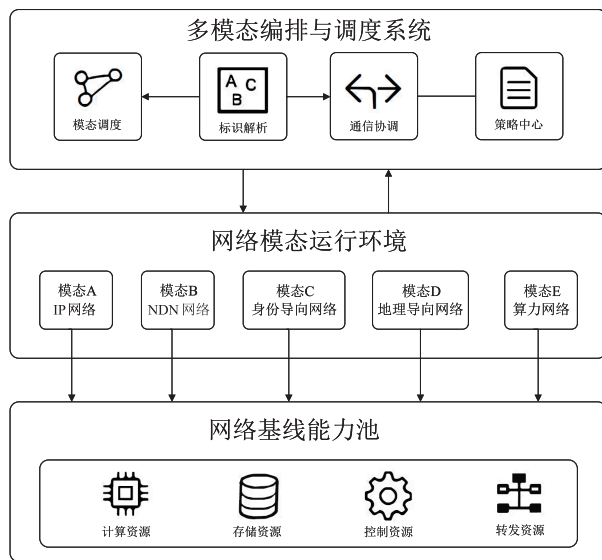


图1 多模态网络环境体系架构

1) 网络基线能力池:提供池化的计算、转发、存储、控制等资源,是承载各类网络模态运行的基础设施单元。

2) 网络模态运行环境:通过标准化的软件接口与

硬件抽象,支持各类模态的加载、配置、重构与卸载。

3) 多模态编排与调度系统:作为系统的控制核心,该系统基于任务需求、资源状态与业务目标进行策略制定,驱动模态调度为各模态动态分配运行环境与路径;它通过标识解析融合IP、内容名等多种标识空间,并由通信协调机制实现消息转发、寻址映射与路径跳转,确保多模态的无缝协同。

在多模态网络环境的抽象架构模型中,模态如“插件”一般被加载至网络执行体,通过调度控制器完成跨模态资源协同、路径构建与策略部署。

1.4 网络模态的分类与典型特征

从技术维度来看,网络模态可依据其标识方式、通信逻辑与服务对象的不同进行如下分类。

1) 内容导向模态:以内容名称为标识体系,典型代表如CCN、NDN。其主要通信特征为请求-数据对称路径,具备强缓存友好性。

2) 身份导向模态:采用GUID/NA映射作为标识体系,如MobilityFirst。该模态支持主机移动性,路径可动态更新。

3) 地理导向模态:以空间坐标或区域码为标识,如GEO Net、工业控制网络。其通信特征为区域广播,空间相关性强。

4) IP 导向模态:以IP地址为标识体系,如IPv4、IPv6。该模态以路由表驱动,基于最短路径选择。

5) 自定义标识模态:采用逻辑或任务ID为标识,常见于工业应用、物联网专网等。其通信特征为与应用逻辑耦合,适用于隔离性强的场景。

每种模态对应特定的寻址方式与路由机制,这为其路径计算策略、转发逻辑和拥塞控制方式奠定了基础。尤其在路由协议层面,不同模态之间呈现出显著的设计差异。例如,NDN使用基于兴趣包的反向路径回溯机制,而MobilityFirst使用GUID绑定的基站辅助路径查找;IP网络强调收敛与扩展性,而内容网络更侧重流量引导与副本发现。

1.5 多模态网络对路由体系的挑战与机会

多模态网络不仅引入了多种路由协议共存的现实,同时也为传统的路径构建逻辑带来了结构性重塑,其挑战主要体现在以下5个方面。

1) 寻址与标识多样性:多模态网络需同时适配内容名、身份ID、地理位置等多种标识体系,不同标识在语义、作用域和解析方式上存在显著差异,跨模态时需进行动态映射与一致性维护。这不仅增加了寻址解析的时延,还可能引发标识歧义与路由决策不稳定等问题。

2) 协议逻辑的不一致性:不同模态的路由协议在控制面交互、路径状态维护、故障恢复方式等方面差异显著,使跨模态协调变得复杂,容易导致协议间信息映射困难、路径切换延迟增加。

3) 模态动态加载与卸载:多模态网络支持模态的“热插拔”,要求路由状态具备快速感知、增量更新与局部收敛能力。然而,模态的动态上线或下线会引发拓扑频繁变化,容易导致路由震荡、转发黑洞或控制面过载,在大规模网络中更难维持稳定收敛。

4) 路由行为的深度可编程:随着算力、存储与转发资源的紧密耦合,路径选择需综合考虑资源状态与业务上下文。这要求路由策略具备多维感知与实时决策能力,但多维状态空间庞大、计算复杂度高,且实时优化路径会引入额外的控制面开销。

5) 安全性与隐私增强需求:多模态环境下的路由需同时满足多路径传输、匿名化、路径混淆与可验证性等安全要求。不同模态在安全机制和信任模型上的差异,使得统一安全策略难以直接应用。传统静态路径验证机制难以应对动态、多模态场景,增加了安全协议设计与实现的复杂度。

此外,多模态网络也为新一代智能化、自组织、自演化的路由协议设计提供了实验土壤。通过结合软件定义网络(Software Defined Network, SDN)、网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)、人工智能与可编程转发技术,可实现按业务意图、路径代价、标识语

义等多维约束构建优化路径,推动“认知路由”的发展。

2 多模态网络各类模态的路由协议比较与分析

随着多模态网络体系的快速发展,各类面向内容、身份、地理空间、算力等特征的通信模态不断涌现,传统基于IP的单一路由机制已难以满足多样化网络业务的差异化需求。本章将围绕多模态网络中典型通信模态的路由协议展开系统分析,重点比较不同模态在路径发现、寻址机制、转发策略与适用场景等方面的设计特征与技术差异。通过横向对比与归纳总结,旨在揭示出多模态网络中路由机制的演化趋势与共性特征,为后续构建统一可编程的多模态路由体系提供理论依据与技术支撑。

2.1 内容导向模态的路由机制

内容导向模态是信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)中最具代表性的通信范式,其核心思想是将网络通信对象由主机地址转变为具备语义的内容名称,实现“以内容为中心”的数据获取^[8]。在该模态下,数据以命名内容(Named Data)的形式存在,通信双方无需建立端到端连接,而是通过逐跳转发的“请求-响应”模型实现数据检索与返回^[9]。典型代表包括CCN和NDN架构。NDN在设计上保留了CCN的三表模型,分别是内容存储(Content Store, CS)、待处理请求表(Pending Interest Table, PIT)和转发表(Forwarding Information Base, FIB)。如图2所示,该三表结构在NDN路由节点中协同工作:当用户发起一个Interest报文请求特定命名的数据时,路由节点优先在本地CS中查找命中内容,如未命中则在FIB中基于最长前缀匹配选择一个或多个下一跳接口,并将请求信息记录于PIT中,待数据包返回时沿反向路径逐跳转发至请求者,并同时支持内容副本的本地缓存^[10]。

与传统IP网络的路径预计算和静态转发机制不同,NDN支持基于策略的多路径选择与动态适配。例如,策略转发器可以依据转发延迟、丢包率、带宽利用率等实时指标选择最优下一跳,从而提升内容检索效率和网络利用率^[11]。为了支持更复杂的转发行为,一些

研究提出了负载感知(如LoadBalanceNDN)、副本感知(如iNRR)或拥塞反馈驱动的转发策略,进一步增强了系统在动态环境中的适应能力。在路由协议层面,NDN发展了基于链路状态的NLSR(Named-Data Link State Routing)协议,通过内容前缀的链路状态通告实现全网拓扑感知与路径构建^[12]。此外,也有研究尝试将传统的OSPF或IS-IS协议适配至内容命名空间中,形成路径标签或区域广播机制以应对复杂命名结构下的寻址问题^[13]。

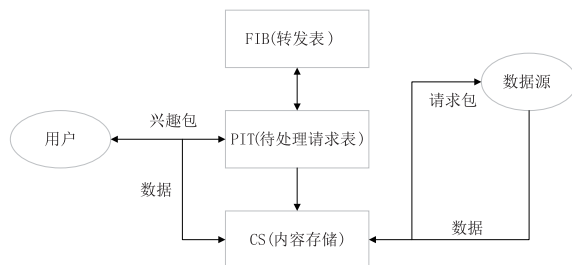


图2 NDN三表模型结构与兴趣包/数据路径示意图

内容导向模态的一个显著优势是天然支持内容缓存与副本发现机制,极大提高了内容获取效率和网络带宽利用率,尤其适用于热点内容分发、广播类应用和多接入网络环境。此外,由于通信行为是围绕数据对象本身展开,NDN具备良好的移动性支持与无连接通信特性,有利于在高动态环境下保持服务连续性。其安全机制也体现出“内容自带安全”的理念,即每个数据包均由内容源进行签名验证,确保内容本身的真实性与完整性,不依赖底层链路的加密通道。然而,该模态仍面临如命名空间管理复杂、PIT表膨胀导致的状态维护负载大、对实时业务支持能力弱等挑战。因此,尽管内容导向模态在学术界和部分实验网络中得到广泛研究和验证,但在广域网部署和跨模态互通方面仍需进一步的协议优化与工程实践支撑。

2.2 身份导向模态的路由机制

身份导向模态(Identity-Oriented Networking, ION)是未来网络架构中的一种重要设计,其核心思想是通过身份标识符(如GUID、NA)来标识网络节点,而非依赖传统的IP地址。在这种架构中,路由协议不再

以节点的位置或地址为基础,而是基于身份标识符实现信息的传输与交换。身份导向模态最具代表性的协议是MobilityFirst,其主要特征是身份与定位分离,通过全局唯一标识符(GUID)来标识每个参与者^[14]。在MobilityFirst中,网络中的每个节点都有一个全局唯一的身份标识符,而位置或IP地址则作为辅助手段通过名称-地址映射机制进行动态更新。这种身份与位置的分离,不仅有效解决了传统IP网络中因设备迁移引起的路由问题,也为支持高度移动的网络环境提供了基础。

在MobilityFirst的路由机制中,路径计算基于身份标识符而非传统的IP地址。具体来说,MobilityFirst采用了双向映射机制,支持动态更新和移动性管理。该机制通过一个全局名称解析系统(Global Naming Resource Service,GNRS)来管理这些映射关系,实现了网络层与应用层之间的分离,从而使得网络架构具有更高的灵活性与可扩展性^[15]。路由协议使用了名为MobilityFirst Routing Protocol(MFRP)的路由协议,这一协议设计支持跨域的路径查找,并根据网络的拓扑变化动态选择最佳路径。与传统的IP路由协议相比,MFRP能够在节点移动或网络拓扑发生变化时,快速进行路径更新,无需重新建立端到端的连接,这极大提高了网络的响应速度和鲁棒性。

除MobilityFirst外,另一个与身份导向网络相关的协议是ID/Locator Separation Protocol(ILSP)。ILSP的核心思想是将身份标识符与网络位置标识符分离。传统的IP地址体系将身份与定位信息绑定在一起,而ILSP通过引入单独的身份标识符与位置标识符,使得网络通信可以独立于设备的物理位置进行^[16]。通过使用身份标识符,ILSP能够实现更灵活的路径选择与管理,并支持在节点变动时对路径进行高效的调整。与MobilityFirst不同,ILSP强调的是在分布式环境中的路径计算与管理,尤其适用于需要大量动态更新和路径调整的场景^[17]。

此外,Named-Data MobilityFirst(NDM)协议是

MobilityFirst的一种扩展,结合了命名数据的概念,旨在提高大规模分布式系统和移动环境中的数据传输效率。NDM通过将数据与身份标识符绑定,能够实现更高效的数据访问与路径管理。其核心是使用一个全局命名系统来标识和访问数据,同时通过优化的路由协议提高数据的获取速度与传输质量。

尽管身份导向模态在移动性支持、灵活性和可扩展性方面具有显著优势,但它也面临一些挑战。首先,身份标识符的管理与映射可能会增加网络的复杂度,尤其是在大规模网络中,如何高效管理身份映射与路由表成为关键问题。其次,由于身份与位置分离,传统的路由机制需要进行大幅调整,新的协议需要在保证灵活性的同时避免路径计算的过度开销。此外,身份导向网络对实时业务的支持仍显不足,尤其是在延迟和抖动控制方面,与传统基于位置的IP网络相比,尚需进一步优化。

总体而言,身份导向模态的路由机制通过分离身份与位置的设计,提供了一种更加灵活且具有良好扩展性的解决方案,特别适合于高移动性和大规模分布式环境。

2.3 地理空间导向模态的路由机制

地理空间导向模态(Geographic-Oriented Networking,GON)是网络架构中的一种基于节点地理位置的路由方式。在这种模式下,每个网络节点通过其地理坐标进行标识,而不是依赖传统的IP地址。地理空间导向的路由协议广泛应用于无线自组织网络,如MANET(Mobile Ad-hoc Network)、VANET(Vehicular Ad-hoc Network)和物联网中,尤其适用于移动性强且具有地理位置相关性的场景。在这些网络中,节点的动态变化和位置信息是进行数据转发和路径选择的核心依据。地理空间导向的路由机制与传统的基于IP的路由机制不同,依赖节点的地理位置进行路径计算,并通过逐跳转发来完成数据传输。

贪婪边界无状态路由协议(Greedy Perimeter Stateless Routing,GPSR)是最典型的地理空间导向路由协议之一,它基于“贪婪转发”策略,通过选择距离目标最近的节

点来进行数据包转发^[8]。在 GPSR 中，每个节点需要知道自己及其邻居节点的位置信息，通过定期广播更新邻居节点的位置信息，构建一个位置表来进行数据包转发。数据包被逐跳转发，每次都选择一个距离目标节点最近的邻居。然而，当遇到局部最小问题时，即没有任何邻居能够靠近目标节点时，GPSR 会转向区域广播策略，允许数据包在一个局部区域内进行广播，直到找到合适的转发节点为止。GPSR 协议的优势在于其简单且易于实现，适合大规模动态网络环境。然而，GPSR 的局部最小问题和较大的转发开销依旧是其面临的挑战。

为了应对 GPSR 的局部最小问题，研究者提出多种改进方案。例如，GeRaF (Geographic Random Forwarding) 协议在 GPSR 的基础上进行了改进，通过增强的区域广播机制和更强的路径选择策略，降低了局部最小点的影响^[9]。GeoGRID 协议则通过将网络区域划分为多个网格，每个网格内的节点都有一个唯一标识符，数据包通过选择进入目标网格的节点进行转发^[20]。如图 3 所示，该方法有效降低了全局寻址的复杂性，并且通过网格划分与路由协议的结合提高了数据传输效率。然而，GeoGRID 面临的挑战是如何优化网格的划分策略：过小的网格会导致频繁的转发，而过大的网格则会降低路由的精度。

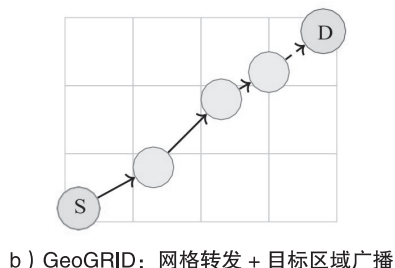
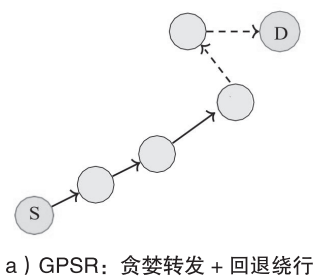


图 3 地理路由中 GPSR 与 GeoGRID 路由机制流程

在车载网络 VANET 中，地理空间导向的路由协议得到了广泛应用。车载网络中的节点通常是高度动态的，因此，传统的 IP 路由协议无法满足低延迟、高移动性的要求。Geocast 协议是专为车载网络设计的一种基于地理位置的组播路由协议^[21]。在 Geocast 中，数据包的目标是一个地理区域，而不是单个节点。数据包被定向传输到目标区域，并通过区域广播策略传递到该区域内的所有节点。Geocast 的优势在于能够高效地广播数据到指定区域，适用于道路交通信息发布、位置感知服务等应用。然而，该协议的挑战在于如何高效地进行区域定位和转发。

除了传统的基于位置的路由协议外，NDM 协议结合了内容命名和位置导向路由的优点，通过全局唯一标识符与地理位置结合，实现了灵活的数据访问和路径选择。NDM 不仅能够支持基于位置的路由，还能够处理大规模分布式系统中的数据访问请求，通过统一的命名系统来优化数据传输路径。

尽管地理空间导向的路由协议在高移动性和位置依赖型应用中表现出色，但它们仍面临一些挑战。首先，随着网络规模的扩大，地理位置依赖的路由协议在计算和存储上的开销会显著增加，在节点频繁变化的情况下，如何高效更新路由信息是一个亟待解决的问题；其次，地理空间导向协议的路径选择通常依赖于节点位置的精确性，在实际应用中，位置信息可能因 GPS 信号干扰、定位误差等原因导致不准确，从而影响路由的效果；最后，在多路径选择和拥塞控制方面，现有协议尚缺乏有效的机制来协调不同路径间的资源分配，导致网络中的资源利用率可能不高。总之，地理空间导向的路由协议在处理动态性强、地理位置相关的网络场景中具有巨大的潜力，尤其在移动网络、物联网和车载网络中展示了其独特的优势。

2.4 IP 导向模态的传统路由机制

IP 导向模态构成了互联网的基础架构，其所有数据交换与路由决策均基于 IP 地址进行。传统的 IP 路由协议广泛应用于自治系统 (Autonomous System, AS)

内部与之间的数据转发,是当前全球网络互联架构的核心组成部分。主要的代表性协议包括 OSPF (Open Shortest Path First)^[22]、BGP (Border Gateway Protocol)^[23]、RIP (Routing Information Protocol)^[24]、IS-IS (Intermediate System to Intermediate System)^[25] 和 EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)^[26]。这些协议分别采用链路状态、距离矢量或路径向量等不同的路由算法,适配不同规模、复杂度与管理域的网络拓扑。

OSPF 是一种内部网关协议 (Interior Gateway Protocol, IGP),广泛部署于大型自治系统中。其采用链路状态算法,路由器周期性广播链路状态信息,使所有路由器能够构建一致的全网拓扑视图,并通过最短路径优先 (Shortest Path First, SPF) 算法计算到目的节点的最优路径。OSPF 的优势包括快速收敛、支持分层区域化设计以及较高的带宽利用效率。在大规模网络中,OSPF 通过区域划分减少路由表规模,并降低全网路由同步开销。然而,随着网络规模进一步扩大,OSPF 在路由计算、拓扑更新与状态同步方面的处理开销也随之增加,其扩展性面临一定挑战。针对这些问题,研究者提出了多路径 OSPF (Multipath OSPF, OSPF-MT),通过引入多路径转发与负载均衡机制提高链路利用率与容错性^[22]。

IS-IS 是一种链路状态协议,与 OSPF 原理相似,但在设计上更适用于大型运营商骨干网络与多协议环境。其具有较高的可扩展性和较快的收敛特性,特别适合在多层次、跨域的大型网络部署。然而,IS-IS 在全球互联网的普及度相对 OSPF 较低,且在某些复杂拓扑变化场景下,其路径选择策略的灵活性有限^[25]。

BGP 是当前互联网中应用最广泛的外部网关协议 (Exterior Gateway Protocol, EGP),主要用于不同自治系统之间的域间路由信息交换。BGP 采用路径向量 (Path Vector) 算法,通过携带 AS 路径 (AS_PATH) 及相关路径属性实现跨域最优路径的策略化选择。其核心优势包括基于策略的路由控制、路由聚合以及 (经扩展) 多路径选路能力,使其能够满足复杂的跨域互联需求,并构

成互联网域间路由的基础。然而,BGP 的收敛速度相对较慢,同时面临安全性与策略一致性挑战。为应对这些问题,研究者提出了多种优化方案。例如,BGP 流量工程 (BGP Traffic Engineering, BGP-TE) 利用 BGP 的路径属性 (如 LOCAL_PREF、AS_PATH、Community 等) 实现出口选择优化与跨域流量调度,从而提升带宽利用率与路由灵活性。此外,BGP 安全扩展 (BGP Security Extensions, BGP-SEC) 结合 RPKI (Resource Public Key Infrastructure) 机制,在路由通告中引入数字签名以验证路由起源与 AS 路径完整性,从而防范前缀劫持与路径伪造。

RIP 是最早期的路由协议之一,采用距离矢量算法,以跳数 (Hop Count) 作为路径度量来选择最短路径。其实现简单、易于部署,但在网络规模较大时,收敛速度慢且带宽利用效率低。改进版本 RIP-2 引入了认证机制以增强安全性,而 RIPng (RIP Next Generation) 在此基础上扩展了对 IPv6 的支持,并改进了路由更新与表同步机制^[24]。

EIGRP 是 Cisco 提出的一种增强型距离矢量路由协议,融合了链路状态与距离矢量算法的优点。其采用 DUAL (Diffusing Update Algorithm) 实现快速收敛,并基于带宽、时延等多维度度量优化路径选择。EIGRP 开销低、计算效率高,适用于中大型企业网络。但由于其最初为闭源协议,跨平台部署与开放标准支持有限。EIGRP for IPv6 扩展了对 IPv6 的支持,并改善了其在多协议环境下的适用性^[26]。

总体而言,IP 导向的传统路由协议在全球互联网中发挥了关键作用。然而,随着网络规模不断扩大与应用场景多样化,这些协议面临收敛性能下降、路由表膨胀以及安全风险等挑战。为应对这些问题,研究者提出了多种改进方案,如支持多路径转发的 OSPF-MT、增强安全性的 BGP-SEC、支持 IPv6 的 RIPng 等,这些优化在可扩展性、安全性与性能方面均取得一定成效。同时,随着 SDN 与 NFV 技术的发展,传统路由协议在路径计算与策略管理方面有望获得进一步优化。

2.5 算力标识模态的路由机制

算力标识网络 (Compute-Oriented Networking) 是一种基于计算资源需求和任务要求进行动态路由的网络架构,其路由决策不仅依赖于节点的网络拓扑和带宽条件,还考虑到每个节点的计算能力、任务的实时需求和资源的负载情况。通过引入计算资源和任务需求作为路由决策的核心因素,算力标识网络能够动态调整路径,从而优化数据传输和计算资源分配^[27]。这种模式特别适用于云计算、边缘计算和物联网等高动态、计算密集型的应用场景。

在算力标识网络中,传统的网络层级和路由协议面临着计算和带宽需求的多重挑战,许多研究者提出了新型的路由协议和改进方法,旨在根据计算需求和资源分配来进行路径选择。COR (Compute-Oriented Routing) 协议提出了一种基于计算资源和任务需求的动态路由机制^[28]。在这一协议中,节点不仅通过计算任务的特性来选择最适合的路径,还通过考虑网络中每个节点的计算能力和资源使用情况来优化任务的执行效率。COR 协议能够确保任务在计算能力最强的节点上得到处理,从而减少延迟并提高资源的使用率。

任务导向路由 (Task-Oriented Routing, TOR) 协议是另一种在算力标识网络中常见的路由机制。TOR 协议的关键在于根据每个计算任务的优先级、大小和实时性要求来调整路由路径。与传统的基于地址的路由不同, TOR 协议使得数据流和计算任务之间的关系更加紧密,确保任务能够根据计算资源的负载动态调度。TOR 协议特别适用于边缘计算和高性能计算环境,其中计算节点通常分布在不同位置,并且需要根据任务的需求和资源的可用性来选择最优路径。为了优化任务调度和路由选择, ETOR (Enhanced Task-Oriented Routing) 协议引入了任务优先级和负载均衡机制,进一步提升了路由的灵活性和计算效率。

与上述协议相似, NFV 在算力标识网络中的应用也推动了路由机制的创新。NFV-Based Routing 协议通过将计算、存储和网络功能虚拟化,能够根据任务需

求和网络负载动态调整路由路径^[29]。在虚拟化环境中,网络中的计算资源是动态分配的,任务和数据流可以根据计算资源的需求自动选择合适的路径。这种路由机制不仅提高了计算资源的利用率,还减少了物理网络的负载,提高了网络的整体效率。

除了这些协议,资源感知路由 (Resource Aware Routing, RAR) 协议也在算力标识网络中得到了广泛应用。RAR 协议通过监测网络中每个节点的计算负载、处理能力、内存和带宽使用情况来选择最佳路径。在任务密集型网络环境中, RAR 能够根据资源状况做出动态的路由决策,确保任务能够在负载较轻的节点上执行^[28]。这种协议特别适用于数据中心和云计算平台,在这些环境中,计算资源的需求变化快速,传统的静态路由协议无法适应这种动态变化。RAR 协议通过资源感知的方式,优化了计算任务的路由路径,提高了计算效率和资源的使用率。

综上,算力标识模态的路由机制通过将计算资源状态与网络路由深度融合,实现了在高动态、计算密集型场景下的自适应与高效传输。伴随云计算、边缘计算及物联网等应用的不断发展,基于计算需求驱动的路由协议将成为未来网络架构中的重要组成部分。

为便于直观比较多模态网络中各类典型协议的特征差异,本文在前述分析的基础上,结合相关文献进行了整理与归纳。表1从路由机制和拥塞控制等定性维度进行了总结,而表2则进一步提供了关键量化性能指标的对比。

2.6 模态间路由互通与路径转换机制

在多模态网络中,不同网络模态拥有各自独立的路由协议、标识体系和通信范式,如何实现模态间的路由互通与路径转换成为构建统一网络体系的关键问题。由于 IP 导向、内容导向、身份导向等模态在寻址方式、协议栈结构及路径决策逻辑上的异质性,传统的单一协议栈无法满足多模态协同通信的需求。

当前,模态间路由互通主要依赖以下典型机制:

1) 标识空间映射机制,如通过全局名称解析 (Global

表 1 多模态网络典型协议在路由机制方面的比较

模态	协议及其改进	路由机制特征	拥塞控制
内容导向	NDN	Interest/Data 驱动的逐跳路径回溯, FIB、PIT 与 CS 三表联动	缓存驱动 + 数据副本机制
	NLSR	内容前缀链路状态广播驱动全网拓扑发现, 扩展 OSPF 模型	无直接机制
	LBNDN	基于延迟、丢包和负载的策略转发机制, 多路径动态选择与副本适配	拥塞反馈辅助副本调度
身份导向	MFRP	GUID/NA 映射 +GNRS 全局解析, 基于身份的路径映射与快速切换	快速路径重绑定机制
	ILSP	身份 / 定位分离设计, 通过映射更新实现路径解耦与灵活选择	路径变动时保持标识映射稳定
	NDM	基于 GUID 的名字解析与内容驱动的动态路由, 支持多源、缓存数据拉取	路径重构支持副本 / 缓存调度
地理导向	GPSR	贪婪路径选择, 逐跳转发至最近邻节点	无显式机制, 存在局部最小问题
	GeRaF	贪婪路径失败时自动切换区域广播后退, 提高路径可达性	局部广播缓解节点拥塞
	GeoGRID	以网格为单位进行分区域转发, 简化地理寻址与路径构建	网格内调度优化拥塞路径
IP 导向	OSPF	链路状态广播 +SPF 最短路径计算, 全网拓扑一致驱动路由决策	快速收敛, 等价多路径负载均衡, 支持分层区域设计
	BGP	基于 AS 路径向量传播, 策略驱动的跨域路径选择与聚合	冗余路径支持但收敛慢
	RIP/RIPng	跳数广播进行路径传播, 逐跳更新构建路由表	简单, 开销小, 收敛慢; 适用小型、拓扑结构简单的网络
算力导向	COR	基于节点算力状态、任务需求进行路径调度, 资源感知式选择最优路径	任务驱动 + 状态反馈 + 实时重路由
	TOR/ETOR	考虑任务优先级、实时性, 融合调度与多目标路径选择	负载均衡 + 优先级感知策略
	RAR	路径选择结合网络负载、内存与算力监控, 自适应动态路由策略	实时反馈与资源感知调控

Name Resolution, GNR) 服务实现内容标识与 IP 地址或身份标识间的动态绑定, 如 MobilityFirst、NDN 与 SIN 架构提出的 Name-GUID/NA 映射方案; 2) 协议转化机制, 在路由节点通过边界转发器进行协议封装与解封装 (Encapsulation/Decapsulation), 完成从一类模

表 2 多模态网络典型协议的量化性能比较

协议	路由收敛时间	路由开销	关键性能指标	影响因素
OSPF	快, 通常小于 10s, 结合 BFD 可小于 1s	较高, LSA 泛洪导致 CPU 和内存占用高	带宽利用率高	网络规模、区域划分、计时器配置
BGP	慢, 秒级到数分钟	较低, 增量更新, 但路由表规模较大	策略控制能力强, 可扩展性较高	路由策略复杂性、网络稳定性
NDN / NLSR	较快, 基于 AI 的 Q-NDN 拥塞控制被证实能快速收敛	状态维护开销大, PIT 表膨胀问题	兴趣满足率、内容检索时延	缓存策略、内容流行度、拓扑结构
GPSR	不适用, 无状态协议, 无需全局收敛	较低, 仅需维护一跳邻居信息, 但信标广播产生开销	数据包交付率、路由开销	节点密度、移动性、地理环境
MFRP	快, 通过 GNRS 更新映射实现快速切换	依赖于 GNRS 的解析开销和更新频率	移动性支持能力	GNRS 系统性能、节点移动速度
COR / TOR	动态, 依赖于任务调度和资源状态, 实时重路由	较高, 需要频繁感知和通告计算资源状态	任务完成时延、资源利用率	计算任务特征、资源负载变化频率

态 (ICN) 向另一类模态 (IP) 的跨模态转发^[30], 如 FlexE 与 MTN 等技术通过物理层 TDM 时隙隔离提供“逻辑互通、物理隔离”的路径承载能力, 有效支持模态间并发与互通的端到端路径构建^[3,7]。

在路径选择方面, PNE 通常依托 SDN 控制平面或计算感知调度系统, 根据各模态的拓扑结构、资源状态与任务需求, 统一计算跨模态路径, 并动态下发策略, 实现路径的智能切换与按需重构。同时, 为提升路径可达性与鲁棒性, 系统支持多路径并发与策略分发机制, 确保在网络状态变化时能够迅速完成跨模态路径迁移与负载重平衡。近年来, 研究者还提出了基于 NFV 的跨模态虚拟网络映射技术, 通过网络功能虚拟化实现模态逻辑隔离与动态组合, 从而在同一物理基础设施上构建多模态并存、逻辑可控的统一网络体系。相关研究如 SDN-Enabled 跨域互通模型、基于服务标识的中继路由机制、任务感知路径编排算法等, 均为模态间路由互通提供了可行性技术路径与理论支撑。

综上, PNE 中的模态间路由互通机制不仅解决了协议异构与寻址冲突问题, 更通过控制面集约化与资源调度智能化实现了路径转换的灵活性与可编程性,

是支撑多模态网络协同演化的关键基础能力。

3 多模态网络的关键技术对路由协议的影响

在多模态网络环境中,路由机制不再仅依赖于拓扑结构与静态标识,而是受到诸如模态动态加载、标识融合寻址、内生安全机制、算力协同等关键技术的深刻影响。这些新兴技术的引入不断拓展路由协议的设计边界,并促使其从传统的路径选择逻辑向具备智能、自适应、安全增强等多维特性的方向演进。因此,本章重点分析多模态网络中的代表性关键技术如何重塑路由机制的控制面、数据面与策略面设计,并探讨它们对多模态路由系统整体演化路径所产生的潜在影响。

3.1 模态动态加载机制对路由配置与收敛的影响

在多模态网络体系中,网络模态作为可插拔的逻辑功能组件,其动态加载与卸载行为使得网络状态处于持续演化之中。这种“即插即用”的模态机制极大提高了网络的服务灵活性与资源调度弹性,但同时也对传统路由协议提出了全新的挑战。模态的动态上线将引入新的命名空间、转发逻辑或链路资源,要求控制平面具备强实时性的状态感知能力。传统基于静态拓扑假设的路由机制难以满足这种快速变化的环境,路由表必须支持按需增量生成和动态修正,以避免全局路径重计算带来的收敛开销。此外,模态的加载并不总是连续或可预测的,尤其在边缘侧或业务高频切换场景中,路径状态的维护需具备高敏捷性与低扰动特性,否则将导致转发黑洞或控制面震荡。

在电力6G或工业物联网等场景中,模态的生命周期紧密耦合于任务调度与资源编排系统,若路由系统无法同步感知模态状态变更,如冷启动、切模、下线等,将难以保障路径可达性与QoS持续性^[27]。现有主流协议如OSPF与BGP本质上设计于静态拓扑与单一寻址域环境,其配置机制多依赖预定义策略与全局路径协商,缺乏对模态状态变化的感知接口与策略联动能力。在多标识、多寻址、多路径同时存在的动态模态环境中,OSPF/BGP难以快速识别模态切换事件、更新转发信息

或进行策略迁移,导致路径重构滞后、标识映射异常等问题。为此,多模态网络需构建以“模态生命周期”为核心驱动的新型控制机制,支持将模态加载、运行、卸载等生命周期事件纳入路由协议的感知和处理流程中,实现模态状态与路径状态的动态协同。如图4所示,该机制通过在控制面中引入模态生命周期管理,实现了模态事件与路由状态的联动更新,从而提升路径可达性与系统自适应能力。

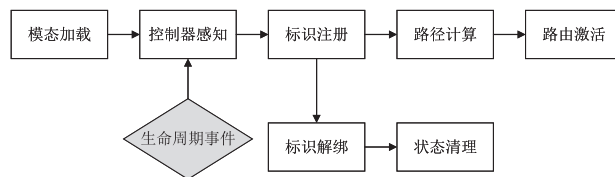


图4 模态生命周期与路由状态联动示意图

此外,部分研究提出将生命周期管理平台与路由系统进行深度解耦实现路径重构与状态热更新,从而增强网络面对模态弹性加载时的稳定性与敏捷性^[3,7]。这种耦合设计不仅优化了控制平面的反应效率,也为未来模态编排、意图驱动通信和任务导向调度等高级功能提供了坚实的支撑。

3.2 多标识共存对寻址与路径计算策略的重塑

随着多模态网络架构的演进,网络中的标识体系正呈现出高度多样化与共存化趋势。内容名称、全球唯一身份标识、地理坐标、传统IP地址等多类标识在同一网络环境中共存,为不同类型的通信需求提供支持。然而,这种多标识并存的局面也带来了寻址语义不一致与解析边界模糊等问题,形成所谓的“寻址歧义”挑战。不同标识之间的粒度、作用域、命名层次差异显著,导致在跨模态路径选择与标识绑定过程中出现策略冲突与匹配不确定性^[31]。例如,IP地址强调网络位置的静态映射,而GUID则代表实体的逻辑身份,内容名称则进一步脱离位置,强调命名与内容绑定,这些差异会在无统一协调机制下对路由协议造成路径决策的歧义性。

为解决标识异构带来的寻址与路径计算问题,多个体系结构都提出了跨标识路由映射机制。MobilityFirst提

出的GNRS是典型代表,它通过将GUID映射为可路由的网络地址,实现了标识与定位的解耦,进而支持终端迁移与服务可达性的灵活维护^[32]。这一机制重构了传统基于IP地址的路径计算逻辑,通过引入名称解析中间层,使得路径的确定不再依赖静态地址绑定,而是动态依赖于映射关系的实时性与一致性。

与标识异构化相适应,路由系统也正发生结构性重构。传统基于IP前缀和掩码匹配的单一维度路由表已无法满足多标识环境下的灵活寻址需求。为此,研究者提出融合式路由表结构,支持内容名、GUID、NA、IP等多类型字段的表项匹配,并引入策略控制字段进行匹配规则的精细化管理。在基于策略感知的转发系统中,控制面可依据应用类型、用户意图或模态上下文动态选择匹配字段,实现路径表的自适应加载与分域调度,推动路由系统由静态配置向智能演化。

3.3 网络模态编译与控制平面机制对路由协议控制面的变革

在多模态网络中,传统路由控制面机制正面临深刻重构。随着“模态即服务”理念的推进,网络功能不再固化为底层协议栈的一部分,而是作为可编译、可加载的逻辑单元按需部署至网络资源池中。模态编译机制通常包含功能描述编译、网络行为映射、资源绑定与路径策略生成,其输出直接影响控制面的时序驱动方式与信令交互模式。与传统周期性、拓扑感知驱动的控制逻辑不同,模态编译机制强调事件触发与策略主动下发。当新的模态被加载或卸载时,控制器需同步更新标识注册、路径状态、转发规则等信息,从而实现路径状态的热更新与快速收敛。

与此同时,控制平面的集中化正在逐步替代传统的分布式路由协商机制。以SDN为代表的集中式架构,将网络路径规划、策略控制等功能统一集成于控制器之中,使得路径生成不再依赖于分布式的路由比对与拓扑扩散,而是依托控制器的全局网络视图进行集中计算与策略驱动下发^[33]。例如,在面向电力6G的多模态网络架构中,研究者提出通过白盒交换与可编程控

制面实现路径动态加载、策略实时验证,极大提升了路径构建的精度与安全性^[27]。

为适应多模态间路由差异性,控制面进一步需要构建统一的调度域机制。该机制不仅协调不同模态的生命周期与转发策略,还负责在路径构建过程中进行跨模态资源融合与策略映射。例如,在任务驱动或算力感知模态场景中,路径需基于业务意图、资源分布、拓扑约束进行动态生成,此时控制器需具备模态识别、策略迁移、路径切换等多维协调能力。统一调度域通过抽象模态行为、隔离策略边界、强化路径一致性,已成为保障路由控制面稳定性与灵活性的重要支撑。

模态编译机制与集中式控制平面的融合推动了路由控制逻辑从“拓扑被动响应”向“策略主动编排”演进。在多模态网络环境中,控制面不再仅仅是路径协商和状态转发的辅助模块,而逐步演化为模态驱动、策略调度与网络编程的核心中枢,成为实现可定义、可调度、可协同网络体系的关键环节。

3.4 内生安全机制对路径规划与可信路由的影响

随着网络面向多模态、多业务和多安全域演进,传统以性能最优为导向的路径规划模式逐渐暴露出对攻击防护、路径可控性和可信验证的支持不足。为应对这一趋势,内生安全机制需要加入路由协议设计之中,路径规划的目标从“最短路径优先”向“安全路径优先”转变。安全路径优先不仅强调路径的物理连通性和带宽保障,还引入对路径匿名性、加密强度、重放抗性和可信计算能力的综合考量,从而提升数据在多模态异构网络环境中的传输可靠性与抗攻击能力^[5]。

首先,需要保证路径的可控性与可验证性。为防止中间节点篡改、流量重放或路径绕行等攻击行为,系统需引入多路径冗余与随机化机制,在路径选择过程中动态评估信任等级并生成可审计的路径标签。部分研究^[34]提出在内容导向网络中结合“签名验证+路径反演”的机制构建可验证传输链路,在MobilityFirst架构中借助GNRS的身份解析实现路径链条可信绑定。此外,路径随机化机制可有效防止路径被预测

或恶意阻断，尤其在安全敏感场景中展现出重要价值^[35]。如图5所示，可信路由机制通常包括路径构建与签名、逐跳验证以及接收端的完整路径验证环节，通过在关键节点部署可信执行环境（Trusted Execution Environment, TEE）协同验证，可有效保障跨模态路径的可验证性与可控性。

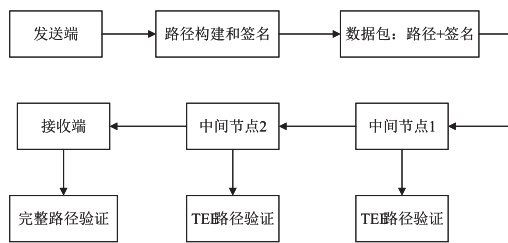


图5 可信路由机制流程

其次，模态隔离与路径加密成为实现可信路由的重要手段。在多模态网络中，各模态具有不同的信任等级和攻击面，路径构建过程中需确保跨模态边界时不引入低信任域。为此，研究者提出将安全标签嵌入模态路由表项中，并结合TEE在节点侧进行加密跳转控制，实现路径在不同模态之间的隔离与跳数授权。同时，基于路径加密与转发验证的机制，也正在被集成到新一代路由协议中，如SCION等路径验证型协议架构，正是面向多路径安全与可控设计的代表^[36]。

更进一步地，为构建不依赖于攻击特征等先验知识的主动防御能力，业界提出了基于动态异构冗余（Dynamic Heterogeneous Redundancy, DHR）的内生安全架构。DHR架构通过并行运行一组功能等价但实现方式不同的“异构执行体”，并利用裁决和负反馈机制，能够不依赖先验知识就有效识别并隔离被攻击或发生故障的执行体。在多模态网络中，这一思想获得了全新的应用维度：不同的网络模态（如IP、NDN、身份导向等）由于其在路由算法、标识体系和安全假设上的天然差异，构成了实现DHR架构理想的“异构执行体”资源池。

在此框架下，多模态网络的运行机制将发生深刻变革。近期有研究指出，可利用强化学习（Reinforcement Learning, RL）等人工智能技术构建此反馈

闭环^[37]。RL智能体（Agent）作为网络的智能调度器，通过持续监测跨模态路径的性能与安全状态，动态地将业务流量调度到一个或多个模态上并行传输。网络中的裁决机制通过比对不同模态路径的传输结果，一旦发现不一致，例如，某条路径的数据被篡改，便会触发负反馈。RL智能体根据此反馈实时更新其调度策略，动态地降低受影响模态的权重，将流量迁移至更可信的模态组合，从而实现对威胁的自适应防御。

综上所述，内生安全机制正深刻改变路由协议的控制逻辑与路径构建模式。它将路径随机化、多路径冗余、模态隔离、路径加密等传统安全手段，整合到一个由DHR架构和智能反馈驱动的、更高级的动态防御体系中。这标志着路径规划正从面向“安全、可靠、可控”的复合策略演进，迈向具备主动“免疫”能力的全新范式。

4 未来研究方向与挑战

4.1 跨模态寻址与路径一致性的增强机制

为支撑未来网络在复杂业务需求下的自适应演化，多模态智慧网络技术已被纳入国家级发展路线图，其重点涵盖标识融合、模态协同与安全保障等方向^[38]。在多模态网络环境中，不同模态采用各异的标识体系，导致数据在跨模态传输时必须进行寻址映射与路径重构。这种异构寻址机制虽为多样化通信模式提供了灵活性，但也带来了寻址歧义、路径状态不一致、标识解析延迟等严重问题。一方面，不同模态中的标识维度、绑定语义及作用域存在显著差异，缺乏统一的命名抽象层；另一方面，路径的构建依赖于寻址结果，当标识映射机制不稳定或缺乏一致性维护时，易导致路径跳变、策略冲突或转发异常。

当前已有如GNRS（Global Name Resolution Service）、NDNS（NDN Name Service）等系统用于标识解析与路径映射，但这些方案大多聚焦于单一模态，缺乏跨模态的协同能力。GNRS虽支持GUID到网络地址的动态映射^[32]，但其扩展性与策略表达能力有限；NDNS在NDN

架构下实现内容名到转发路径的绑定,但难以支持动态模态切换与策略注入。尤其在路径中同时涉及多个模态时,标识之间的语义冲突、路径状态的片段化以及控制平面的分裂成为路径一致性保障的主要障碍。

未来研究亟需构建统一的跨模态标识解析与路径保持机制。一个可行的方向是引入虚拟标识抽象层,通过建立标识间的中间映射模型,实现内容名、GUID、Geo坐标等之间的动态等价关系。此外,可设计路径语义保持机制,在路径构建过程中附加模态标签与策略域信息,使路径在模态间迁移时能够自动调整并保留原始策略意图。同时,通过引入标识生命周期协同管理机制,使路径状态更新与标识映射变更保持时间一致性,减少不必要的路径失效与控制面震荡。如图6所示,未来路由体系的演化可从标识统一性、控制智能化与路径可信度3个核心维度展开,呈现出从传统静态配置到意图驱动、自适应与可验证网络的渐进发展趋势。

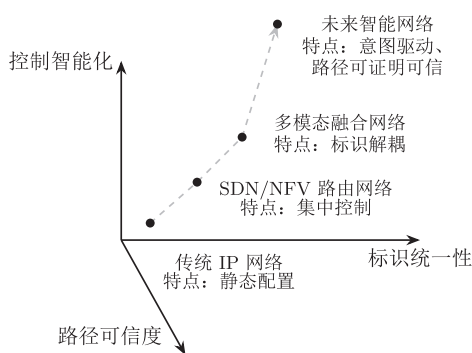


图6 未来路由体系三维演化

技术挑战主要集中在3个方面:1)如何在开销可控的前提下,实现标识解析服务的分布式部署与一致性维护;2)跨模态路径中的策略继承与冲突解决机制尚不成熟;3)寻址解析与路径构建的协同接口设计缺乏标准化。在此背景下,发展具备动态标识融合能力、可扩展路径语义建模、支持路径语义感知重构的机制,将成为多模态网络未来发展的关键路径之一。

4.2 可信路由体系的内生构建与验证

随着多模态网络向高可编程性、高异构性方向演

进,路径不再是静态拓扑的单一结果,而是在动态模态加载、策略迁移与资源映射中不断变化的过程。在此背景下,传统“默认可信”的路由假设逐渐失效,路径劫持、重放攻击、模态间策略污染等安全风险愈发显著。因此,构建“可信路由”机制,使路径在生成、转发与演化过程中具备可验证、可追溯、可管控的内生安全能力,已成为多模态网络发展的核心诉求^[5,34]。

现有研究已在若干典型架构中尝试嵌入路径验证机制。SCION架构通过将路径信息嵌入报文头,并结合路径授权与验证服务,实现了端到端路径选择与验证分离的双重机制^[36];NDN体系则依赖内容签名与路径反演机制,实现请求/响应路径上的完整性绑定;Path Splicing等协议也在路径构建中引入了分段认证或跳数证明,提升了路由可信度^[35]。这些机制展示了可信路径可通过链路信息绑定、标识签名与分段证明实现其可验证性,成为未来可信路由设计的重要参考。

然而,在多模态网络中,路径不仅需保障转发链条的真实性,还需确保跨模态路径策略的一致性、标识解析的可追溯性与策略协同的可验证性。为此,未来可信路由体系需要从“路径本体可信”扩展为“路径+策略+标识的全链可信”。一方面,应构建“模态可信标签机制”,在路径表项中标注模态源信息、策略域、信任等级等元数据;另一方面,可结合TEE部署边缘路径验证代理,实现报文转发时的跳级认证与路径一致性审计。

同时,路径可信性的验证也需引入形式化建模与验证技术。通过模型检测、符号执行等方法,对路径构建逻辑进行约束表达与安全属性校验,提升协议设计阶段的漏洞预防能力。结合可证明安全协议、可验证网络函数的发展,可信路径在多模态网络中的可部署性与可扩展性将大幅提升。

尽管可信路由体系已具雏形,但仍面临若干挑战:1)安全机制所带来的计算与通信开销如何在异构模态中权衡;2)路径与模态生命周期内的信任域隔离与动态绑定机制尚不成熟;3)多模态控制面如何统一协调

路径验证策略与可信策略配置。未来可信路由机制的关键,在于将安全属性嵌入路径生命周期中,使其与模态编排、标识管理、策略部署形成闭环协同,从而构建“路由即信任”的基础通信范式。

4.3 面向业务需求的多模态最优寻址

在传统网络中,路径选择往往依据拓扑最短、带宽最优或协议优先等静态指标完成,缺乏对业务意图的感知能力。而在多模态网络中,路径构建不再局限于单一协议栈和固定资源维度,而是跨越不同的寻址逻辑、模态结构与控制域。与此同时,业务类型日益多样化,面向低延迟、强安全、算力敏感或任务驱动等场景的差异化寻址需求愈发突出,迫切需要实现从“拓扑驱动”向“意图驱动”的寻址范式转型,构建面向业务优化的多模态寻址机制^[39]。

实现业务驱动的最优寻址,首先需突破模态间资源异构与标识割裂带来的感知瓶颈。当前多模态架构虽支持插件化模态加载与策略分发,但缺乏统一的业务语义抽象接口,无法表达任务的网络约束、服务质量指标(Quality of Service, QoS)、算力偏好或安全策略等多维目标。因而未来应构建“业务意图建模语言”,用于描述任务类型、服务目标与资源约束,并在控制面中通过策略映射模块,将业务意图转化为路径构建与模态编排的约束条件^[7]。

在寻址决策机制上,可引入多目标优化模型,将延迟、吞吐、计算资源利用率、能耗、安全性等作为联合优化指标,通过控制器或调度域进行路径解算与模态选择。例如,面向AI推理任务,可优先匹配具备GPU资源的算力模态,并规避带宽瓶颈路径;对于应急响应类任务,则需选取具有地理接近性与低跳数特征的路径模态组合。此类寻址策略应具备感知性、推理性与自适应性^[27]。

此外,模态间需建立“策略协同域”,实现路径构建时的策略继承与冲突解决。由于不同模态在标识解析、路径计费、安全策略上存在差异,协同域机制应定义统一的策略规则翻译框架与模态间权重映射关

系,以保证业务流在路径转换过程中的语义保持与策略连续。

面向业务优化的多模态寻址机制仍面临多重挑战:1)业务语义向网络行为的映射缺乏标准接口与建模框架;2)多模态资源的分布、状态与能力需实时感知,带来控制面复杂度上升;3)路径解算过程中的目标冲突与解空间爆炸问题仍待解决。未来应以网络意图驱动为核心,推动模态编排、寻址策略与任务语义的深度融合,构建“路径-模态-任务”三元协同的寻址优化体系,实现真正意义上的“以业务为中心”的网络服务能力演进。

5 结束语

多模态网络作为未来网络体系的重要演进方向,打破了传统网络“单一协议-单一寻址-单一拓扑”的封闭模式,通过模态即插即用、标识解耦、路径多元化等机制,为复杂应用场景下的通信服务提供了前所未有的灵活性与可塑性。本文系统梳理了多模态网络中典型的模态类型与代表性路由协议机制,分别从内容导向、身份导向、地理导向、IP导向、任务驱动与算力标识等六类模态出发,分析了其路由逻辑的内在差异性与策略演化路径。在此基础上,进一步探讨了多模态共存背景下的模态间互通机制、路径切换方法及协议互操作挑战,并重点分析了模态动态加载、标识共存、控制平面演化、可信路径规划等关键技术对现有路由体系的深刻影响。

通过上述研究可以看出,多模态网络中的路由技术正在经历从“静态配置驱动”向“模态动态感知”、从“分布式拓扑反应”向“集中式策略编排”、从“单目标寻址”向“业务优化调度”的多维跃迁。与此同时,该演进过程也暴露出若干亟待攻克的核心难题,包括但不限于标识异构下的路径一致性维护、可信可验证的路径构建机制,以及如何在复杂业务目标下实现最优寻址与模态组合选择。

展望未来,多模态网络的路由协议体系将在3个维度持续深化发展:1)架构维度的融合创新,需构建

统一的标识空间与策略协同域,实现异构模态间的寻址平滑与路径一致;2)控制平面的智能化进化,引入网络意图识别、策略推理与自适应调度机制,实现路径构建与业务目标之间的紧耦合;3)路由安全与可信性的内生嵌入,通过路径证明、可信标签与认证转发等机制,实现“路径即信任”的可验证路由体系。随着多模态网络技术逐步落地于电力、工业互联网、车联网、6G等关键领域,其路由机制的智能化、可验证性与业务自适应能力将成为未来网络体系演化的决定性变量。为此,仍需深化理论模型、验证平台与协议实现的系统化研究,推动多模态网络从概念架构迈向可部署、可管控的工程体系。

参考文献:

- [1] HU Yuxiang, YI Peng, SUN Penghao, et al. Research on the Full-Dimensional Defined Polymorphic Smart Network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 1-12.
- 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 1-12.
- [2] WU Jiangxing. Revolution of the Development Paradigm of Network Technology System—Network of Networks[J]. Telecommunication Science, 2022, 38(6): 3-12.
- 郭江兴. 论网络技术体制发展范式的变革——网络之网络[J]. 电信科学, 2022, 38(6): 3-12.
- [3] LIU Aihua, LUO Hanguang, WEN Jianzhong, et al. Research on Isolated-Forwarding Technology Oriented Polymorphic Network[J]. Telecommunication Science, 2023, 39(6): 52-60.
- 刘爱华, 骆汉光, 温建中, 等. 面向多模态网络的隔离转发技术研究[J]. 电信科学, 2023, 39(6): 52-60.
- [4] HU Yuxiang, CUI Pengshuai, TIAN Le, et al. Research Progress on Polymorphic Network Environment[J]. China Basic Science, 2024, 26(3): 1-8.
- 胡宇翔, 崔鹏帅, 田乐, 等. 多模态网络环境研究进展[J]. 中国基础科学, 2024, 26(3): 1-8.
- [5] ZHANG Lincong, ZENG Haoheng. Endogenous Security Technologies for Full-Dimensional Definable Network[J]. Information Recording Materials, 2024, 25(4): 12-14.
- 张林丛, 曾昊恒. 全维可定义网络的内生安全技术研究综述[J]. 信息记录材料, 2024, 25(4): 12-14.
- [6] GAO Zhen, LYU You, YANG Ailing, et al. Research Progress on Internet Network Layer Protocol[J]. Journal of Information Engineering University, 2021, 22(6): 699-708.
- 高镇, 吕游, 杨爱玲, 等. 互联网网络层传输协议研究综述[J]. 信息工程大学学报, 2021, 22(6): 699-708.
- [7] WU Jiangxing, LI Junfei, SUN Penghao, et al. Theoretical Framework for a Polymorphic Network Environment[J]. Engineering, 2024, 39: 222-234.
- [8] AHLGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A Survey of Information-Centric Networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36.
- [9] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking Named Content[C]//ACM. The 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2009: 1-12.
- [10] ROSSINI G, ROSSI D. Coupling Caching and Forwarding: Benefits, Analysis, and Implementation[C]//ACM. The 1st ACM Conference on Information-Centric Networking. New York: ACM, 2014: 127-136.
- [11] KARIM F A, AMAN A H M, HASSAN R, et al. Named Data Networking: A Survey on Routing Strategies[J]. IEEE Access, 2022, 10: 90254-90270.
- [12] HOQUE A K M M, AMIN S O, ALYYAN A, et al. NLSR: Named-Data Link State Routing Protocol[C]//ACM. The 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking. New York: ACM, 2013: 15-20.
- [13] WANG Lan, HOQUE A K M M, YI Cheng, et al. OSPFN: An OSPF Based Routing Protocol for Named Data Networking[R]. Los Angeles: NDN, Technical Report NDN-0003, 2012.
- [14] RAYCHAUDHURI D, NAGARAJA K, VENKATARAMANI A. MobilityFirst: A Robust and Trustworthy Mobility-Centric Architecture for the Future Internet[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2012, 16(3): 2-13.
- [15] SESKAR I, NAGARAJA K, NELSON S, et al. Mobilityfirst Future Internet Architecture Project[C]//ACM. The 7th Asian Internet Engineering Conference. New York: ACM, 2011: 1-3.
- [16] ATKINSON R, BHATTI S, HAILES S. ILNP: Mobility, Multi-Homing, Localised Addressing and Security through Naming[J]. Telecommunication Systems, 2009, 42(3): 273-291.
- [17] KOMU M, SETHI M, BEJJAR N. A Survey of Identifier-Locator Split Addressing Architectures[J]. Computer Science Review, 2015, 17: 25-42.
- [18] KARP B, KUNG H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks[C]//ACM. The 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2000: 243-254.
- [19] ZORZI M, RAO R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(4): 349-365.
- [20] ZHANG Jianjun, ZHANG Gong, LIU Ling. Geogrid: A Scalable Location Service Network[EB/OL]. (2007-06-25)[2025-08-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4268213>.
- [21] MAIHOFFER C. A Survey of Geocast Routing Protocols[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 6(2): 32-42.
- [22] VILLAMIZAR C. OSPF Optimized Multipath (OSPF-OMP)[R]. Fremont: IETF, RFC 2676, 1999.
- [23] REKHTER Y, LI T, HARES S. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)[R]. Fremont: IETF, RFC 4271, 2006.
- [24] HEDRICK C L. Routing Information Protocol[R]. Fremont: IETF, RFC 1058, 1988.

- [25] CALLON R W. Use of OSI IS-IS for Routing in TCP/IP and Dual Environments[R]. Fremont: IETF, RFC 1195, 1990.
- [26] SAVAGE D, NG J, MOORE S, et al. Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)[R]. Fremont: IETF, RFC 7868, 2016.
- [27] MIAO Weiwei, ZHANG Rui, ZHANG Zhen, et al. Research on Polymorphic Intelligent Routing Technology for White-Box Network in Power 6G[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(5): 9-17.
- 缪巍巍, 张瑞, 张震, 等. 面向电力 6G 的白盒网络多模态智能路由技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23 (5): 9-17.
- [28] DUAN Ying, LUO Yun, LI Wenfeng, et al. A Collaborative Task-Oriented Scheduling Driven Routing Approach for Industrial IoT Based on Mobile Devices[J]. Ad Hoc Networks, 2018, 81: 86-99.
- [29] PEI Jianing, HONG Peilin, XUE Kaiping, et al. Resource Aware Routing for Service Function Chains in SDN and NFV-Enabled Network[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2018, 14(4): 985-997.
- [30] OU Siwei, XIE Renchao, HUANG Tao, et al. A Survey of Communication between IP and ICN[J]. Information and Communications Technology, 2017, 11(6): 51-58.
- 欧思维, 谢人超, 黄韬, 等. IP 网络与 ICN 网络互通研究[J]. 信息通信技术, 2017, 11 (6): 51-58.
- [31] GAO Shuai, HOU Xindi, LIU Ningchun, et al. Research on Heterogeneous Identifier Namespace Management and Control Architecture in Polymorphic Network Environment[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 26-35.
- 郝帅, 侯心迪, 刘宁春, 等. 多模态网络环境异构标识空间管控架构研究[J]. 通信学报, 2022, 43 (4): 26-35.
- [32] LI Hui, WU Jiangxing, XING Kaixuan, et al. Prototype and Testing Report of a Multi-Identifier System for Reconfigurable Network Architecture under Co-Governing[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2019, 49(9): 1186-1204.
- 李挥, 邬江兴, 邢凯轩, 等. 多边共管的多模态网络标识域名生成管理解析原型系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49 (9): 1186-1204.
- [33] WU Zongming, CAO Jijun, TANG Qiang. Online Parallel SDN Routing Optimization Algorithm Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Computer Science, 2025, 52(S1): 795-803.
- 吴宗明, 曹继军, 汤强. 基于深度强化学习的在线并行 SDN 路由优化算法研究[J]. 计算机科学, 2025, 52 (S1): 795-803.
- [34] WU Jiangxing. Cyberspace's Endogenous Safety and Security Problem and the Countermeasures[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2022, 52(10): 1929-1937.
- 邬江兴. 论网络空间内生安全问题及对策[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52 (10): 1929-1937.
- [35] MURTAZA M, MEGAN E, NICK F, et al. Path Splicing[C]//ACM. The ACM SIGCOMM 2008 Conference on Data Communication. New York: ACM, 2008: 27-38.
- [36] ZHANG Xin, HSIAO H C, HASKER G, et al. SCION: Scalability, Control and Isolation on Next-Generation Networks[C]//IEEE. The 2011 IEEE Symposium on Security and Privacy. New York: IEEE, 2011: 212-227.
- [37] YU Xuewen, HE Lei, GENG Jingbu, et al. Dynamic Defense Strategy Selection through Reinforcement Learning in Heterogeneous Redundancy Systems for Critical Data Protection[EB/OL]. (2024-08-15)[2025-08-06]. <https://doi.org/10.3390/app15169111>.
- [38] LI Junfei, HU Yuxiang, YI Peng, et al. Development Roadmap of Polymorphic Intelligence Network Technology toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 141-147.
- 李军飞, 胡宇翔, 伊鹏, 等. 面向 2035 的多模态智慧网络技术发展路线图[J]. 中国工程科学, 2020, 22 (3): 141-147.
- [39] LI Dan, HU Yuxiang, WU Jiangxing. Innovative Development Strategy of New Network Technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 15-21.
- 李丹, 胡宇翔, 邬江兴. 新型网络技术创新发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23 (2): 15-21.