

基于流量负载均衡的通信骨干网络自主决策优化技术探索

Research on Autonomous Decision Optimization Technology for Communication Backbone Networks Based on Traffic Load Balancing

李海彬, 林雨浓 (中国联通云南分公司, 云南 昆明 650051)
Li Haibin, Lin Yunong (China Unicom Yunnan Branch, Kunming 650051, China)

摘要:

为了解决现代骨干网络在处理大流量数据时面临的流量负载均衡问题,提出了一种基于深度强化学习(DRL)的自主决策优化技术,其通过智能化调整流量分配来优化网络性能。采用实时数据驱动的学习模型,通过分析历史与当前网络负载数据,使系统能够在无需预定模型的情况下,学习如何动态调整流量以适应网络状态的变化。该技术有效整合了网络状态的实时监测、流量预测及自适应路由算法,形成了一个能够预测并响应网络状况变化的多层次决策系统,对高流量网络环境下的流量管理提供了一种有效的解决方案。

关键词:

骨干网络; 流量负载均衡; 深度强化学习; 自主决策优化; 实时; 多层次决策系统

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.05.004

文章编号: 1007-3043(2024)05-0019-06

中图分类号: TN919

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

To address the issue of traffic load balancing in modern backbone networks when handling large data volumes, it proposes an autonomous decision optimization technique based on Deep Reinforcement Learning (DRL), which optimizes network performance through intelligent traffic distribution adjustments. The research employs a real-time data-driven learning model that analyzes both historical and current network load data, enabling the system to learn how to dynamically adjust traffic without the need for a predefined model, in order to adapt to changes in network conditions. This technique effectively integrates real-time monitoring of network status, traffic prediction, and adaptive routing algorithms, forming a multi-level decision system capable of predicting and responding to changes in network conditions, which provides an effective solution for traffic management in high-traffic network environments.

Keywords:

Backbone network; Traffic load balancing; Deep reinforcement learning; Autonomous decision optimization; Real-time; Multi-level decision system

引用格式: 李海彬, 林雨浓. 基于流量负载均衡的通信骨干网络自主决策优化技术探索[J]. 邮电设计技术, 2024(5): 19-24.

1 骨干网络概述

骨干网络作为全球互联网的中枢神经系统,是一个由高容量的网络通信系统构成的结构复杂的网络,其主要目的是连接分布广泛的小型网络或网络段,是国际数据传输的主要通道以及通信服务实现的基础

设施。骨干网络的基础架构是其高效通信能力的核心,包括先进的物理媒介、高效的数据处理技术以及精心设计的网络拓扑结构。骨干网络主要基于光纤通信技术构成。除光纤外,多协议标签交换(MPLS)技术在逻辑层面上提高了网络的效率和灵活性,优化了网络流量,增强了服务质量(QoS)。SDH技术可用于保证数据传输的同步性。目前,软件定义网络(SDN)已成为骨干网络架构的重要部分,提供了更加动态和

收稿日期: 2024-03-30

灵活的网络管理方式。SDN通过中心化控制平面来管理数据平面,从而更精确地控制流量和网络资源的分配。中国联通实施的运营商IP骨干网SDN改造网络转型行动,构筑了具备SDN/NFV能力的全新IP骨干网——中国联通产业互联网CUII。A省联通网络节点也已支持SDN功能,能够支持各类行业客户、政企客户面向未来云网协同业务快速开通和灵活承载的智能化网络新能力。随着技术的进步,尤其是物联网(IoT)和云计算的广泛应用,需通过不断的技术创新和网络管理,确保骨干网络能处理日益增长的数据流量。

2 骨干网络现状

2.1 现有的网络管理技术

在当前的网络流量管理研究中,已有多种流量管理技术的应用,从基础的网络带宽管理到复杂的图论优化策略。例如,传统的网络流量管理技术,文献[1]中提到的带宽限制和优先级标记,确保关键应用优先获取网络资源,保障组织的运营效率。此外,文献[2]探讨了软件定义网络(SDN)在流量管理中的应用,强调了SDN的动态配置能力,中国联通也积极探索SDN技术,早期在China169骨干网的国际出口进行了SDN试点。SDN软件配合Netflow系统采集到的链路利用率,对流量进行调度,使出口带宽利用率不均的情况得到改善,大客户的服务质量得到进一步保障。通过SDN技术可以疏导相应流量,优先使用低时延、低阻塞链路,提升重点业务的网络质量。文献[3-4]分别展示了图论和复杂网络理论如何在城市流量控制和网络研究中提供系统化的解决方案。

总的来说,流量管理机制按处理网络流量问题的不同层面和目标划分为四大类:路由优化、流量控制、拥塞控制和负载均衡。

2.1.1 路由优化

路由机制关注如何选择数据包从源点到目的地的路径。有效的路由策略能够优化整个网络的流量分布,减少拥堵,提高数据传输的效率。

在域间路由中,文献[5]针对分布式OpenFlow控制器网络,提出了基于路径向量的边界网关协议(BGP-PV)方法,该方法通过分割流量到多条路径使网络更具可扩展性。文献[6]针对在软件定义网络环境中实现跨域路由中心化,提出了一个模拟框架和模型,该模型支持BGP的演进,并能够在SDN环境中进

行有效的跨域路由中心化。文献[7]展示了在多层SDN网络中利用分段路由进行动态恢复的应用。文献[8]提出的多播算法利用分段路由的路径自定义功能,优化了数据流的分发路径,从而减少了所需的网络资源和操作复杂性。文献[9]提出了一种基于SDN的无线多跳网络路由技术,具有集中式控制器的SDN可以提供最短并且不相交的多路径路由以延长网络寿命。

2.1.2 流量控制

流量控制的主要目的是通过合理调节数据的发送速率,确保数据能够根据网络的承载能力和接收端的处理能力被有效传输。这一机制有助于防止数据在传输过程中丢失,尤其是在网络条件变化或接收端能力受限的情况下。文献[10]提出了一个空间-时间协作采样(STCS)框架,用于流量感知的精确控制。文献[11]提出了快速流表聚合(FFTA)及其在线补充iFFTA(incremental FFTA)的方法,以实现实用的流表聚合。文献[12]提出了一个名为FTRS(Flow Table Reduction Scheme)的机制,该机制通过减小交换机中的流表大小,可以有效地减轻由于流表过大引起的控制器和交换机的负担,从而间接改善流量控制的效率和效果。

2.1.3 拥塞控制

拥塞控制机制旨在减少或避免网络拥堵,确保网络资源的合理分配,提高网络吞吐量。这通常涉及到使用各种算法和策略来监测和响应网络中的拥堵状态。针对由于部分聚合工作负载与TCP的拥塞控制参数不匹配导致的TCP incast崩溃问题,文献[13]提出了一种全知TCP(OTCP)的方法,该方法用于计算基于中心可用网络属性的环境特定的拥塞控制参数。OTCP通过集中收集网络基础设施属性(如拓扑、延迟、吞吐量和交换机的缓冲区大小),计算并分发适合操作环境的拥塞控制参数。

2.1.4 负载均衡

负载均衡技术用于在网络中以某种策略分配负载,以防任何单一的路径或节点过载。通过有效的负载均衡,网络系统可以确保所有路径的合理利用,提高资源的使用效率和服务质量。文献[14]提出了一种基于服务器响应时间的负载均衡方法(LBBSRT),该方法通过控制器测量每个服务器的实时响应时间来处理用户请求,从而实现服务器负载的均衡。文献[15]通过收集部分流量统计数据来优化路由决策,减

少了因全面数据收集带来的网络负担,同时利用部分数据实现有效的负载均衡,提高了网络资源的利用率和整体性能。文献[16]提出了一种基于双重深度Q网络(DDQN)的负载均衡算法(DDQNLB),此算法针对大流和小流的不同需求(大流高吞吐量,小流低延时),并结合网络状态(交换机负载和带宽利用率)进行智能决策路由。文献[17]针对云环境中存在大量传输任务到来时的负载均衡问题,提出一种结合了深度强化学习(DRL)和并行粒子群优化(Parallel)有效的调度算法DRLPSO,以更高的精度和速度求解负载均衡问题及其各种参数。文献[18]为了捕捉环境随机性引起的调度过程的内在随机性,利用分布强化学习,处理云计算环境中的动态多目标负载均衡。此方法能够实时响应环境变化,动态调整资源分配策略以最大化资源利用效率和服务质量。文献[19]为应对蜂窝网络中的负载均衡挑战,尤其是在移动数据流量快速增长的情况下,提出了一种基于深度强化学习的框架,利用蜂窝个体偏移(CIO)来管理移动负载。

这些研究表明,无论是物理网络还是城市交通系统,流量管理技术都在向更高的智能化和系统化发展,以应对全球化和技术进步带来的挑战。这种技术的融合和创新不仅优化了网络性能,也为未来的网络流量管理研究提供了丰富的理论和实践基础。

2.2 骨干网络面临的挑战

在当今信息化快速发展的背景下,骨干网络作为数据传输的主要通道,面临着前所未有的挑战。随着数据流量呈指数级增长,传统的网络带宽管理和流量调度机制难以应对突发的高流量需求,导致数据传输速率下降,服务质量(QoS)整体下滑,影响用户体验和关键业务的运行效率。此外,大流量环境下的数据管理也面临复杂性增加的问题。在高流量的网络环境中提高网络效率的关键是有效地识别和管理数据流,而现有的网络架构和流量管理策略难以做到精细化管理,导致网络负载不均,无法最大化网络设施的效用。

最后,大流量环境下网络设备和基础设施的可靠性和可持续性也是一个重要问题。网络设备在处理高流量数据时的性能稳定性和能耗问题直接影响到整个网络系统的运行成本和维护难度。因此,如何设计高效且可靠的网络负载均衡方法,以适应不断增长的数据流量需求,成为了骨干网络发展中需要解决的关键问题。

3 基于流量负载均衡的自主决策优化技术

在信息化迅猛发展的背景下,骨干网络作为数据传输的核心通道,其在处理高峰流量时面临严重挑战。传统流量管理方法已不能满足日益增长的网络性能需求,尤其在高流量的时空分布不均衡场景下,容易导致部分链路拥塞,严重影响网络服务质量。针对这一问题,本文提出一种基于深度强化学习(DRL)的自主决策优化技术,通过智能化调整流量分配来优化骨干网络的性能。

3.1 技术框架与设计原理

如图1所示,该技术框架利用深度强化学习(DRL)的原理,通过智能化的自主决策机制,实时优化流量负载均衡。DRL通过与环境的持续交互,使得系统能够在无需预定模型的情况下,学习如何动态调整流量以适应网络状况的变化。该框架整合了网络状态的实时监测、流量预测技术以及自适应路由算法,形成了一个多层次的决策系统,该系统不仅响应当前的网络状况,还预测未来的流量变化,从而提前调整策略以防止可能的拥塞或性能瓶颈。

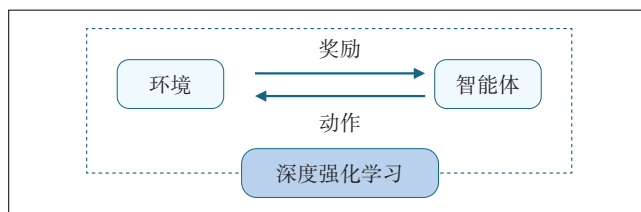


图1 深度强化学习的交互模型

DRL结合了深度学习的高度非线性表示能力和强化学习的决策制定能力,特别适用于解决动态复杂系统的优化问题。以下是其在骨干网络流量管理中的应用核心组件。

a) 环境建模。DRL模型的环境是指骨干网络本身,包括其物理拓扑、各节点和链路的运行状态、实时和历史流量数据。此环境模型需要能够实时反映网络的状态变化,以供DRL智能体做出响应。

b) 状态空间。网络的状态空间由网络的即时可观测参数定义,例如各链路的流量负载、节点处理能力、延迟指标和服务质量(QoS)参数。状态空间的选择关键在于能准确描述网络当前的运行情况,为智能体的决策提供依据。

c) 动作空间。在骨干网络中,动作可以包括修改路由表、调整带宽分配、改变流量调度策略等。动作

空间的设计必须能够实际影响网络运行,以实现流量的优化分配。

d) 奖励函数。奖励函数基于网络性能的改善来设计,如流量处理效率的提升、延迟的降低和服务质量的改善等。奖励函数的目的是激励 DRL 智能体寻找最优策略,以提升整体网络性能。

这种技术的引入旨在通过智能化自主决策机制实时优化流量负载均衡,特别是在处理大流量数据时保持骨干网络的高效和稳定性。

3.2 基于负载均衡的自主决策机制

自主决策机制的核心是基于实时数据驱动的智能体学习模型。该模型通过分析历史和当前的网络负载数据,学习如何在各种网络状态下作出最优决策。深度学习网络能够处理高维度的输入数据,如各节点的流量负载、延迟指标和历史流量模式等,确保强化学习决策过程的准确性和效率。此外,智能体会实时接收来自网络的反馈,不断优化其决策策略,实现持续学习和改进。

流量负载均衡策略关注于合理分配网络资源,确保数据包在网络中的高效传输。通过智能决策机制,系统能够在多条可用路径之间动态调整流量分配,减轻高负载链路的压力,同时利用起其他低负载的路径。这不仅减少了拥塞的风险,还提高了带宽的利用率。在此基础上,策略还包括对流量类型进行智能识别,优先保证关键应用(如实时通信服务)的流量需求,同时对非紧急流量进行适当的调控,以维持整体网络的性能和稳定性。

基于 DRL 实现的负载均衡自主决策机制主要由流量分析与预测、实时动态路由优化和自适应流量调节 3 个部分组成,其结构如图 2 所示。

a) 流量分析与预测。首先利用深度学习技术,智

能体通过分析历史和实时的网络负载数据,学习在各种网络状态下做出最优决策。该模型处理的数据包括高维度输入,如各节点的流量负载、延迟指标、流量类型等,从而确保决策过程的精确性和效率。其次利用历史数据和统计模型,智能体不仅能响应当前的网络状况,还能预测未来可能的流量变化,如流量高峰和潜在的拥塞点。预测模型允许系统提前调整策略(如路由的重新配置),避免拥塞和性能下降。

b) 实时路由优化。根据智能体的预测和当前网络状态,动态调整数据流的路由路径。通过算法选择最佳路径来平衡各链路的负载,减轻高负载链路的压力,同时充分利用网络中的低负载链路。此策略通过优化路由选择,确保带宽资源得到最大化利用,减少拥塞风险,提高整个网络的服务质量和可靠性。

c) 自适应流量调节。在网络流量达到高峰时,系统会自动进行优先级智能管理,调整不同数据流的优先级,保障关键应用(如实时通信和关键任务数据传输)被优先处理,同时对非紧急流量进行适当调控。通过这种自适应调节策略,系统能有效平衡网络性能和稳定性,确保在高流量情况下网络运行的高效和连续性。

该自主决策机制不仅通过上述策略进行即时的网络管理,还包括一个持续优化和反馈循环,以不断提高决策的准确性和网络的运行效率。实施任何决策后,系统都会监控其对网络性能的影响,如吞吐量提升、延迟降低和丢包率减少。这些性能指标的反馈帮助智能体调整其学习模型和决策策略,以适应网络环境的动态变化。智能体利用从环境反馈获得的数据不断调整其行为,通过机器学习算法优化决策过程,使网络管理更加精细化和自动化。

3.3 基于负载均衡的深度强化学习自主决策方法

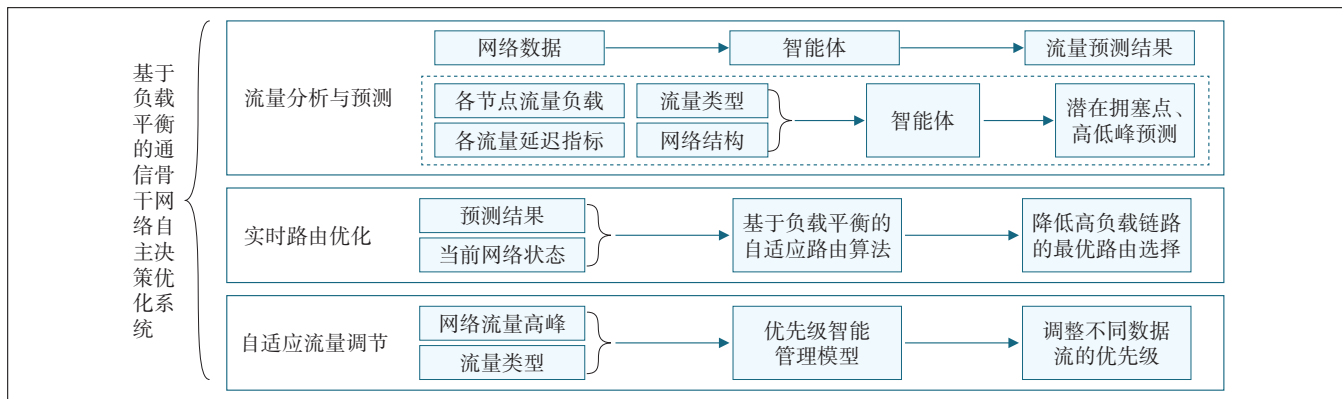


图 2 自主决策机制模型

为了应对骨干网络在高峰时段处理不均匀流量分布引起的负载不平衡挑战,本节介绍了一种由深度强化学习(DRL)驱动的自主决策优化方法(见图3)。这一策略采用分散式方法,其中每个网络节点都部署了一个DRL智能体。这些智能体能够独立学习并优化流量分配和网络资源利用,提高网络整体性能和负载均衡。

该方法的核心包括2个阶段:首先是基于流量负载的网络状态监测,其次是流量的智能重定向和负载均衡。在第1阶段,网络状态监测,路由器通过DRL智能体实时收集和分析网络流量数据,包括链路负载、节点处理能力和网络延迟。这些数据以一种结构化的方式表示网络的即时状态,可用于后续的决策过程。在第2阶段,每个DRL智能体独立运作,根据其观察到的网络状态信息制定策略。策略的目标是通过动态调整路由表以修改流量分配从而实现负载均衡。智能体的学习过程包括探索和利用,以发现和应用最佳的流量管理策略。

为了确保每个智能体能够准确理解和响应网络动态,图神经网络被引入,以模拟网络的复杂拓扑结构。这允许智能体不仅基于本地信息作出决策,还能考虑到整个网络中其他节点的状态和行为。

决策结果随后通过Softmax函数转化为具体的网络操作,如改变特定流量的路由路径,或调整不同服务等级的流量优先级。这样的自主优化决策不仅能

响应当前的网络状态,还能适应未来的流量需求和潜在变化,提供一种动态而灵活的网络流量管理方法。

3.4 应用展望

以A省联通骨干网为例,目前A省联通拥有9个省际直达方向,从2019年以来随着省内IP城域网特别是IDC业务的高速发展,骨干网省际方向链路的压力日渐增大。骨干网主要面临2个问题,一是A省联通两大骨干节点对同一省际方向链路负荷的不平衡,造成网资源未能充分发挥作用。二是部分直达或非直达省际方向的业务路由和转发逻辑无法适应IDC、CDN等业务流量流向的动态变化,造成多个省际方向链路忙闲不均。依靠传统方式进行大的路由和业务逻辑调整,无法在短时间内制定出全面细致的网络调整方案,实际执行时面临周期长,网络影响大的问题,同时优化效果有限。根据本文中基于“深度强化学习(DRL)的自主决策优化技术”来生成较为智能的动态网络调整策略,通过深度学习以及当下不断发展的大模型训练和推理等技术,可以实现较高水平的网络智能管理。

2022年,A省联通骨干网至某市方向短时间内负荷由33%增长至90%,传统模式下的网络优化调整需要2个月,而此时流量高峰已经过去,未能有效解决问题。基于深度强化学习(DRL)的自主决策优化技术,通过1个或多个特定周期的模型训练学习,面向多种业务变化情况自主生成多个全面且细致的网络调整

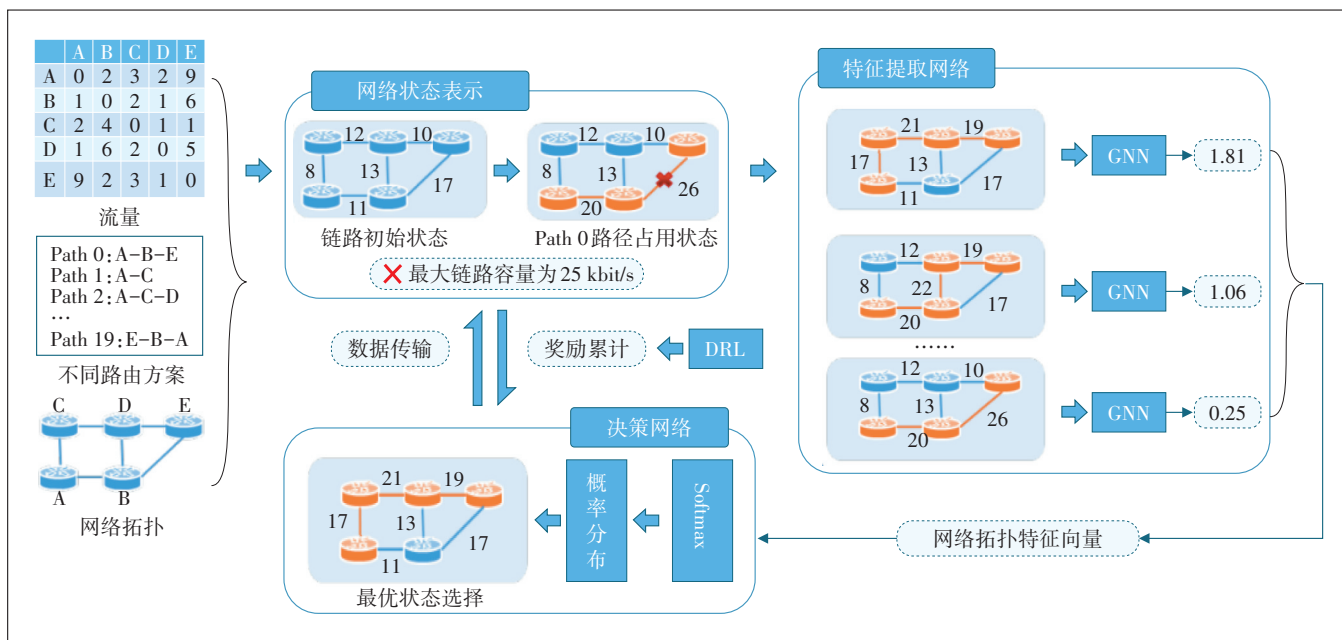


图3 基于深度强化学习的自主决策优化方法

方案,可以有效应对不断变化的网络需求。

4 结束语

基于负载均衡的自主决策机制提供了一个高度自动化且智能化的解决方案,用于管理复杂的骨干网络环境。通过实时数据驱动的分析与预测、实时动态路由优化和自适应流量调节,该机制能有效应对大流量带来的挑战,优化网络性能,减少拥塞,并提升整体的网络管理效率。这种方法不仅能应对瞬间流量高峰带来的挑战,也能适应长期的网络流量变动,确保骨干网络在各种条件下都能高效、稳定地运行。这种技术的引入显著提升了网络的自适应能力和性能,是对传统流量管理方法的重要补充和提升。同时,在SDN已经广泛应用的前提下,将基于DRL实现的负载均衡自主决策机制与SDN结合,将为骨干网提供一种新的具有潜力的网络管理解决方案,从而优化SDN的服务质量。

参考文献:

- [1] STEFANOVIC V, KATINSKI M. Network traffic management [M]// STEFANOVIC V, KATINSKI M. Pro azure administration and automation, Berkeley: Apress. 2021: 215–245.
- [2] HODAEI A, BABAIE S. A survey on traffic management in Software-Defined networks: challenges, effective approaches, and potential measures [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118 (2): 1507–1534.
- [3] REDDY V, SAIKRISHNA, RADHAKRISHNA, et al. Efficient traffic control using graph theory: a comprehensive overview and application [J]. International Journal for Multidisciplinary Research, 2024, 6 (2): 1–13.
- [4] DING R, UJANG N, HAMID, H, et al. Application of complex networks theory in urban traffic network researches [J]. Networks and Spatial Economics, 2019, 19(4): 1281–1317.
- [5] HASSAN S, ARLIMATTI S, ELBREIKI W, et al. Border gateway protocol based path vector mechanism for inter-domain routing in software defined network environment [C]//2016 IEEE Conference on Open Systems (ICOS). Manhattan: IEEE, 2016: 76–80.
- [6] KOTRONIS V, GÄMPERLI A, DIMITROPOULOS X, et al. Routing centralization across domains via SDN: a model and emulation framework for BGP evolution [J]. Computer Networks, 2015, 92 (2): 227–239.
- [7] GIORGETTI ALESSIO, SGAMBELLURI A, PAOLUCCI F, et al. Demonstration of dynamic restoration in segment routing multi-layer SDN networks [C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Manhattan: IEEE, 2016: 1–3.
- [8] SHEU J P, CHEN Y C. A scalable and bandwidth-efficient multicast

algorithm based on segment routing in software-defined networking [C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Manhattan: IEEE, 2017: 1–6.

- [9] WANG J F, MIAO Y M, ZHOU P, et al. A software defined network routing in wireless multihop network [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 85: 76–83.
- [10] WANG X F, LI X H, PACK S, et al. STCS: spatial-temporal collaborative sampling in flow-aware software defined networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38 (6): 999–1013.
- [11] LOU S X, YU H F, LI L M. Practical flow table aggregation in SDN [J]. Computer Networks, 2015, 92(Part 1): 72–88.
- [12] LENG B, HUANG L S, WANG X L, et al. A mechanism for reducing flow tables in software defined network [C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). Manhattan: IEEE, 2015: 5302–5307.
- [13] JOUET S, PERKINS C, PEZAROS D. OTCP: SDN-managed congestion control for data center networks [C]//NOMS 2016 – 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Manhattan: IEEE, 2016: 171–179.
- [14] HONG Z, FANG Y M, JIE C. LBBSRT: an efficient SDN load balancing scheme based on server response time [J]. Future Generation Computer Systems, 2017, 68: 183–190.
- [15] XU H L, LI X Y, HUANG L S, et al. Partial flow statistics collection for load-balanced routing in software defined networks [J]. Computer Networks, 2017, 122: 43–55.
- [16] 陈康, 朱晓娟. 基于SDN-DDQN的数据中心网络负载均衡算法 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(6): 72–78.
- [17] PRADHAN A, BISOY S K, KAUTISH S, et al. Intelligent decision-making of load balancing using deep reinforcement learning and parallel PSO in cloud environment [J]. IEEE Access, 2022, 10: 76939–76952.
- [18] LI T G, YING S, ZHAO Y S, et al. Batch Jobs load balancing scheduling in cloud computing using distributional reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2024, 35 (1): 169–185.
- [19] ALSUHLI G, Banawan K, ATTIAH K, et al. Mobility load management in cellular networks: a deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22 (3): 1581–1598.

作者简介:

李海彬, 中国联通云南分公司党委委员、副总经理, 高级工程师, 硕士, 主要从事网络建设、管理工作; 林雨浓, 中国联通云南分公司网络部(科技创新部)总经理, 高级工程师, 硕士, 主要从事通信网络的规划、建设、优化及管理工作。

