

智慧校园网络下不同敏感特征下的分配调度算法设计

孙铭吾¹
SUN Mingwu

摘要

与一般网络不同,智慧校园网络中的数据存在时间敏感流、带宽敏感流和低优先级流等不同模态流量,各模态下的流量特征对带宽需求差异显著,且传输优先级各不相同。单纯线性排队策略容易导致低优先级流过度占用带宽,干扰高优先级流传输,致使网络资源利用率低。基于此,文章提出一种针对智慧校园的网络流量分配调度算法。在流量模态分析上,详细划分不同模态下智慧校园网络构成要素,明确其对带宽和优先级的特定需求,完成敏感性分类。并设计了一种多排队优先权调度算法,该算法利用有效的多队列优先调度机制,依据不同流量敏感特性,将其精准分类并映射至对应优先级队列,确保各类流量按需分配带宽资源,同时获取最优路径,保障传输效率。引入深度强化学习智能体,基于获取的最优路径,结合网络实时状态动态调整路由,依据节点排队使用情况、可用带宽资源等实际情况分配数据,并通过设置节点分数实现数据智能分流,有效避免智慧校园网络的拥塞,实现动态流量分配调度。实验结果表明:所提算法能够明显提升智慧校园网络吞吐性能,大幅提高资源利用率,为智慧校园多模态网络的高效稳定运行提供了切实可行的创新解决方案。

关键词

智慧校园;网络;分配调度;流量分配;多模态

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.026

0 引言

智慧校园网络承载行政管理、后勤服务以及师生间的沟通交流等多元化业务。在线直播教学、视频会议、远程医疗诊断等实时交互业务兴起的同时,网络数据呈爆炸式增长,校园网络中时间敏感流、带宽敏感流和低优先级流等多种模态业务同时存在,且各自对带宽的需求和优先级不同,采用简单的平均分配方式,无法满足不同业务的实际需求。因此,需要一种创新的带宽分配机制,能够根据不同业务的特性和需求,动态、合理地分配带宽资源,实现多模态业务的和谐共存。

目前,基于软件定义网络(SDN)与多核处理技术相结合,为多模态网络的可扩展性提供了良好的体系结构支撑。文献[1]基于NFV技术,将网络功能从专用硬件解耦为虚拟网络功能,并下沉至边缘云部署。通过多接入边缘计算降低时延敏感型业务的传输延迟,同时利用核心云处理非实时业务。但该方法通过流量拆分和路径选择间接保障QoS,但未针对不同模态业务(如时间敏感流、低优先级流)设计显式的优先级队列和调度策略,在突发流量场景下,可能导致实时业务延迟超标问题。文献[2]将网络周期划分为固定时间片,

为不同优先级流量分配独占传输窗口。通过门控列表控制交换机队列的开关状态,确保高优先级流量在预定时间窗口内独占信道,避免低优先级流量干扰。但该方法中低优先级流量可能因窗口受限而长期积压,如娱乐系统流量在高峰时段会因窗口被占用导致数据丢失或延迟过高,甚至引起网络拥堵。

针对上述问题,本文将开展智慧校园网络流量分配调度算法研究。

1 网络不同敏感性的划分与映射

智慧校园网络中,时间敏感流,如视频会议、在线教学等实时交互业务,对带宽的稳定性要求极高,且必须在极短时间内完成传输,对端到端时延极为敏感,具有最高优先级;带宽敏感流,如文件下载、高清视频播放等业务,数据量庞大,需要持续且充足的带宽支持,但对时延的容忍度相对较高,优先级次之;低优先级流,例如后台同步、软件更新等业务,对实时性要求低,在网络资源紧张时可适当让步,优先级最低^[3]。为了提高网络的整体性能和资源利用率,需要确定一个合理的调度目标,即在同一网络环境下,精准识别各业务的带宽需求和优先级,合理调配网络资源,确保不同业务之间互不干扰,各自顺畅运行。

1. 南京审计大学智慧校园建设中心 江苏南京 211800

将智慧校园网络建模为有向图 $G=(V, E)$ ，其中， V 表示无线接入点 (AP)、交换机和核心路由节点的集合； E 表示节点间的无线或有线链路集合。在每条链路中，都包含带宽容量、传输时延、丢包率等参数数据。

可进一步对智慧校园网络中的流量进行划分，具体包括：时间敏感流（如视频会议）、带宽敏感流（如文件下载）和低优先级流（如后台同步）^[4]。为便于对各类流量进行统一管理和调度，将流量集合定义为 F ，其中，每条流均由流的源节点、目的节点、流的带宽需求、流的周期（适用于周期性业务）以及最大允许端到端时延等关键要素构成。通过对这些要素的精确描述，能够全面、准确地刻画每条流的特性，为后续的带宽分配和优先级调度提供坚实的数据基础，从而实现对智慧校园网络流量的精细化管理和高效调度，进一步提升网络性能和资源利用率。

在满足不同模式业务服务质量需求的前提条件下，确定智慧校园网络的调度目标为最敏感数据 $\max F$ ，用公式表示为：

$$\max F = \max \sum_{i=1}^K w_i \cdot S(f_i) \quad (1)$$

式中： w_i 表示流的优先级权重，时间敏感流权重较高； $S(f_i)$ 表示二元变量，用于描述流 f_i 是否被成功调度。为确保该智慧校园网络路由与调度优化模型的合理性，设置带宽和时延的约束条件^[5]。要求链路上的总流量不得超过其实际容量，用公式表示为：

$$\sum_{f_i \in F} d_i \cdot x_{i,e} \leq C_e, \forall e \in E \quad (2)$$

式中： $x_{i,e}$ 表示流 f_i 是否经过链 e 。对时延的约束，要求时间敏感流的端到端时延不超过 $D_{\max}$ ：

$$\sum_{e \in p} D_e \leq D_{\max}, \forall f_i \in F_i \quad (3)$$

式中： p 表示流 f 的路径。

在完成对上述约束条件的配置后，确保后续优化结果能够充分满足智慧校园网络路由与调度的需求。慧校园网络要求在保持不同模式之间逻辑上相互独立的前提下，能够对时间敏感流、带宽敏感流和低优先级流等数据进行分类，并映射到相应的优先级队列当中^[6]。对于高优先级队列（HPQ），其承载时间敏感流（如视频流），因此采用严格的优先级调度方案；对于中优先级队列（MPQ），其承载带宽敏感流（如文件传输），因此采用加权公平队列（WFQ）；对于低优先级队列（LPQ），其承载背景流量（如日志同步），采用尽力而为（BE）调度。

2 不同敏感性下的网络流量分配调度方法

智慧校园数据流量呈指数级增长，网络中的节点和链路面临不同程度的负载压力^[7]。因此，在获取不同数据敏感性

的基础之上，以敏感性为优先级，引入动态负载均衡策略，对网络路径中不同敏感性节点的实时状况进行全面评价，根据节点的排队使用情况、可用带宽资源和路径跳数等因素^[8]，动态调整流量分配，使网络中的负载均匀分布，避免拥塞问题的产生，提高网络资源的利用率。智慧校园网络的端到端时延组成部分可用公式进行描述：

$$t = t_q + t_p + t_r + t_o \quad (4)$$

式中： t 表示端到端时延； t_q 表示排队时延，取值取决于队列调度策略； t_p 表示处理时延，取值由流表查找和转发决策决定； t_r 表示传输时延，取值与数据包大小和链路带宽相关； t_o 表示传播时延，取值由物理距离决定。对其中排队时延进行分析，高优先级队列的时延可近似为 M/D/1 模型，用公式表示为：

$$t_q^H = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} \quad (5)$$

式中： t_q^H 表示高优先级队列的时延近似值； μ 表示服务率； ρ 表示到达率。

在对上述时延情况进行优化时，引入本地转发决策，以此可以减少 SDN 控制器的交互时延^[9]。这一过程用公式表示为：

$$t_{pr} = t_{fl} + t_{fw} + I_\alpha \cdot (t_{sw} + I_\beta \cdot T) \quad (6)$$

式中： t_{pr} 表示交互时延； t_{fl} 表示流表查找时延； t_{fw} 表示转发时延； I_α 表示控制器是否决策，当 I_α 取值为 1 时，表示决策，当 I_α 取值为 0 时，表示未决策； t_{sw} 表示决策时延； I_β 表示本地转发是否成功，当 I_β 取值为 1 时，表示本地转发失败，需要回退到控制器； I_β 取值为 0 时，表示本地转发成功，不需要回退到控制器； T 表示处理总用时。

通过上述操作，实现对时延的优化处理，从而最大程度提高智慧校园多模态网络流量分配调度效率以及网络整体运行的效率。

在智慧校园多模态网络流量分配调度过程中，还需要应对节点 / 链路的故障问题，基于此本文通过对故障感知的设计，实现对其动态流量分配调度^[10]。首先，定义节点 / 链路的敏感性状态函数，可表示为：

$$Z(e, t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $Z(e, t)$ 表示节点 / 链路敏感状态。当 $Z(e, t)$ 取值为 1 时，表示在节点 / 链路 e 上在 t 时刻存在敏感调度需求；当 $Z(e, t)$ 取值为 0 时，表示在节点 / 链路 e 上在 t 时刻不存在这种需求。

3 实例应用研究

3.1 应用环境

通过本文上述研究，提出一种全新的智慧校园多模态网

络流量分配调度算法。为验证该算法的实际应用可行性及应用性能，搭建了基于 SDN 的智慧校园网络测试平台，如图 1 所示。

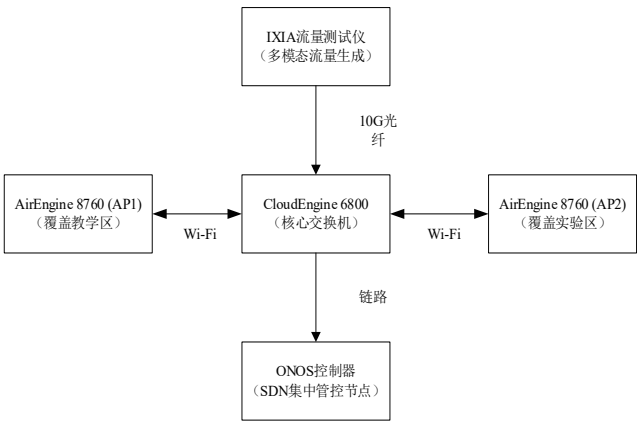


表 1 测试平台软硬件配置表

序号	组件	参数
(1)	控制器	ONOS 2.7.0 (基于 OpenFlow 1.3)
(2)	无线 AP	AirEngine 8760 (支持 Wi-Fi 6 和 5G 融合)
(3)	核心交换机	CloudEngine 6800 (支持 DPDK 加速)
(4)	终端设备	50 台终端 (包括 20 台 4K 视频终端、 20 台 IoT 设备、10 台 VR 教学终端)
(5)	流量生成器	Ixia XGS12 (模拟多模态流量)

按照表 1 中数据完成对平台参数的配置，将本文提出的调度算法应用到该平台中，对多模态网络流量进行调度分配。

3.2 参数配置

在实验过程中，采用多模态流量混合注入，其中包含时间敏感流（在线课堂 4K 视频）、带宽敏感流（文件下载 / 云存储同步）和低优先级流（IoT 传感器数据）。

其中，时间敏感流数据包大小为 1 024 B，发包速率为 2 Mpps，最大允许时延为 50 ms；带宽敏感流数据包大小为 512 B，发包速率为 1 Mpps，带宽需求 100 Mbit/s；低优先级流数据包大小为 128 B，发包速率为 500 Mpps，允许时延 < 200 ms。

在实验过程中，应用本文调度算法时，需要按照表 2 中内容完成对关键参数的配置。为实现对调度算法应用性能的直观验证，将吞吐性能作为评价指标，在不同数据包大小下，测试调度算法应用前后的吞吐性能（丢包率 ≤ 0.01%）。

表 2 调度算法参数配置

序号	参数	取值
(1)	高优先级队列（HPQ）权重	60%
(2)	中优先级队列（MPQ）权重	30%
(3)	低优先级队列（LPQ）权重	10%
(4)	DRL 学习率	0.001
(5)	故障检测周期	100 ms

3.3 应用效果分析

将调度算法应用前后，网络吞吐性能绘制成图 2 和图 3 所示。

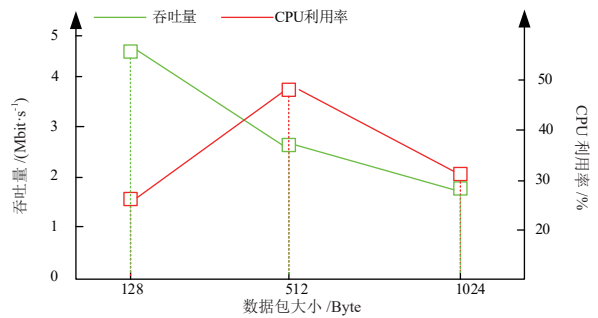


图 2 调度算法应用前网络吞吐性能

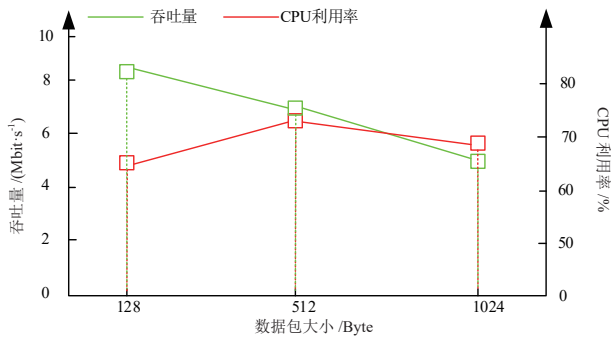


图 3 调度算法应用后网络吞吐性能

通过图 2 和图 3 可以看出，未应用本文算法时，网络仅能达到 4.8 Mbit/s 的峰值吞吐量。这一数值较低，说明在混合多模态流量（时间敏感流、带宽敏感流、低优先级流）并发场景下，传统调度策略存在明显瓶颈。根本原因在于：线性排队策略未区分流量优先级，导致低优先级流（如 IoT 传感器数据）与高优先级流（如 4K 视频）竞争带宽。当突发流量产生时，低优先级流过度占用资源，阻塞高优先级流的传输路径，造成整体吞吐量下降。CPU 利用率（<50% 且波动大）。CPU 利用率始终低于 50%，且波动显著，表明资源调度效率低下：资源闲置：未充分利用多核处理能力，无法动态分配计算资源。处理瓶颈：集中式调度（如依赖 SDN 控制器决策）导致流表查找、转发决策等环节产生高交互时延，进一步限制吞吐性能。波动现象反映了突发流量下的负载不

均衡，如在线课堂高峰期流量激增时，节点因未动态调整路由而局部拥塞。

应用本文算法后，吞吐量提升至 8.6 Mbit/s，增幅达 79%，证明算法显著优化了多模态流量调度：多队列优先级调度：将流量按敏感性精准分类（HPQ/MPQ/LPQ），确保时间敏感流（HPQ）优先调度，避免低优先级流干扰。DRL 动态路径调整：基于实时网络状态（节点负载、可用带宽）动态选择最优路径，均衡链路负载，减少拥塞。CPU 利用率稳定在 60%~80% 的高效区间，关键改进在于：本地转发决策减少交互时延；敏感性深度分组探测识别业务流类型，将不同敏感性数据分配至不同 CPU 核心处理（如视频流分配至高算力核心），避免单核过载。稳定的高利用率表明算法充分调用硬件资源（如 DPDK 加速的核心交换机），且未因过载导致丢包（丢包率 $\leq 0.01\%$ ）。

4 结语

本文针对智慧校园网络环境中多模态流量（时间敏感流、带宽敏感流、低优先级流）共存且需求各异，传统调度策略易导致资源分配不公、优先级流受干扰及整体资源利用率低下的关键问题，提出了一种创新的多模态无线网络流量分配调度算法。该算法的核心创新点在于：

多模态流量精细划分与映射：基于流量对带宽、时延的敏感性 & 业务优先级，将智慧校园网络流量精准划分为三类模态（时间敏感、带宽敏感、低优先级），并明确映射至高（HPQ）、中（MPQ）、低（LPQ）三个优先级队列，为差异化调度奠定基础。

多队列优先权调度机制：设计并实现了基于优先级队列的调度策略（HPQ 严格优先级、MPQ 加权公平队列 WFQ、LPQ 尽力而为 BE），确保高优先级时间敏感流获得即时服务，带宽敏感流获得充足保障，同时约束低优先级流对关键资源的占用。

深度强化学习驱动的动态路径调整与负载均衡：引入深度强化学习（DRL）智能体，结合网络实时状态（节点排队状况、可用带宽、链路负载等），动态计算最优传输路径并进行智能流量分流。该机制有效规避了拥塞热点，实现了网络负载的动态均衡。

综上所述，本文提出的智慧校园多模态无线网络流量分配调度算法，通过融合多队列优先级调度、深度强化学习智能路径优化、本地化决策及故障感知等关键技术，有效解决了多模态流量共存下的资源分配难题。该算法能够显著提升网络吞吐量、优化资源利用率、保障关键业务的服务质量，并具备良好的动态适应性，为构建高效、稳定、智能的智慧校园网络提供了切实可行的创新解决方案。随着智慧校园建

设的深入和网络承载业务的日益复杂化，本算法具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] 杨培星, 汤红波, 游伟, 等. 云边协同下的虚拟网络功能部署和流量调度方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(11): 2485-2492.
- [2] 张旭东, 温雅, 邹渊, 等. 面向车载时间敏感网络的流量调度策略及改进算法研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46(1): 75-83.
- [3] 孙晓磊, 孔德志, 张焕生, 等. 基于虚拟软件的网络流量调度数学模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(5): 417-421.
- [4] 张焱, 陈峰, 谢泽堃, 等. 突发流量自适应的 6TiSCH 网络分布式 PID 调度 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 142-148.
- [5] 陆以勤, 黄成海, 陈嘉睿, 等. 基于遗传算法的时间敏感网络调度方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 52(2): 1-12.
- [6] 陈亚鹏, 周振宇, 韩东升, 等. 电力 +5G 前传网中融合时延敏感网络技术的流量调度方法 [J]. 电子学报, 2023, 51(5): 1141-1147.
- [7] 张朝辉, 周嘉琦. 基于带宽匹配的软件定义数据中心网络流量节能调度方案 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(11): 3901-3911.
- [8] 宗楚瑜, 许方敏, 李斌, 等. 基于自适应差分进化算法的时间敏感网络流量调度 [J]. 计算机应用研究, 2025, 42(6): 1838-1843.
- [9] 农佳明, 陈孟臻. 基于流量延时调度的无线传感网数据传输拥塞控制方法 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(8): 1441-1447.
- [10] 王家兴, 杨思锦, 庄雷, 等. 时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法 [J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 286-292.

【作者简介】

孙铭吾（1984—），男，江苏南京人，本科，工程师，研究方向：实验室管理、教育技术。

（收稿日期：2025-08-18 修回日期：2026-03-03）