

华南理工大学硕士学位论文

# 面向协同边缘计算的资源联合任务调度系统研究

梁华倩

指导教师：杨磊 教授

华南理工大学

2026 年 3 月 1 日

## 摘要

协同边缘计算作为一种新兴范式，通过利用地理分布且异构的边缘节点资源，为自动驾驶、工业互联网等低延迟、高可靠应用提供了技术支撑。然而，边缘环境的异构性、计算与网络资源的紧密耦合性，以及分布式智能应用（如分布式训练）所呈现的复杂网络依赖拓扑，使得传统的任务调度机制在资源效率和系统性能上面临严峻挑战。当前研究主要存在两大局限：其一，主流基于有向无环图的任务依赖模型难以有效刻画可能具有环状等复杂通信特征的分布式智能任务；其二，现有调度方案普遍将计算资源与网络资源进行独立管理与调度，忽略了二者间的内在权衡关系，容易导致资源竞争与性能瓶颈。为解决上述问题，本文在协同边缘计算环境下设计了一种高效的计算与网络资源联合调度方案，主要工作如下：

本文设计并实现了协同边缘调度系统 SCES (Collaborative Edge Scheduler)，首次将任务到节点的映射与网络带宽分配进行联合管理。其次，构建了一个计算与网络资源的联合优化模型，该模型能够精确描述分布式训练等任务的通信拓扑与资源需求，并弹性适应动态环境。我们进一步提出了一种基于深度强化学习的智能调度算法，采用双分支演员-评论家架构，并融入启发式奖励函数，使系统能够在动态环境中自主学习全局最优的联合调度策略，从而实现系统负载均衡与用户带宽满足度等整体性能的优化。仿真实验和系统实验结果表明，该算法在整体性能上显著优于现有基准方法。

此外，为应对多分布式学习作业并发的场景，本文在 CES 基础上进一步提出了 CES-Multi 算法。该算法以提升资源利用均衡度、保障作业带宽需求满足度及降低作业平均等待时间为目地，在边缘节点多资源约束下，融合滚动窗口机制、资源感知贪心排序与动态饥饿保护策略。该算法通过滚动窗口动态选择候选作业，依据资源适配度、业务优先级和等待时间进行综合评分与排序，并调用既有单作业调度器执行资源分配；同时通过优先级动态提升与最小资源预留等机制，避免低优先级作业饥饿。实验表明，CES-Multi 在资源利用率、作业等待时间与带宽满足度方面的综合表现优于现有方法，有效增强了 CES 系统在多作业调度场景中的适用性与综合性能。

**关键词：**边缘计算；任务调度；多目标优化；深度强化学习；分布式训练

## Abstract

**Keywords:** Edge Computing; Task Scheduling; Multi-objective Optimization; Deep Reinforcement Learning; Distributed Training

# 目 录

<b>摘 要</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>插图目录</b> .....	V
<b>表格目录</b> .....	VI
<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 研究现状与分析 .....	2
1.3 本文研究工作及创新点 .....	3
1.4 本文组织结构 .....	4
<b>第二章 相关技术基础概述</b> .....	5
2.1 协同边缘计算 .....	5
2.2 分布式训练 .....	5
2.3 任务调度 .....	5
2.4 深度强化学习 .....	5
2.5 本章小结 .....	5
<b>第三章 协同边缘计算任务调度系统 CES 设计</b> .....	6
3.1 系统设计目标 .....	6
3.2 系统架构设计 .....	6
3.3 任务调度流程 .....	6
3.4 本章小结 .....	6
<b>第四章 基于深度强化学习的联合任务调度算法</b> .....	7
4.1 问题建模 .....	7
4.2 算法设计 .....	7
4.3 实验结果与分析 .....	7
<b>第五章 多任务队列调度算法</b> .....	8
5.1 问题建模 .....	8
5.2 算法设计 .....	8
5.3 实验结果与分析 .....	8

总结与展望 .....	9
参考文献 .....	10
攻读博士/硕士学位期间取得的研究成果 .....	11
致 谢 .....	12

## 插图目录

## 表格目录

# 第一章 绪论

本章为本课题提供了简要介绍。首先概述了研究背景和意义，然后总结了国内外关于协同边缘计算下分布式训练任务调度方法的研究现状，进而详细阐述了本文的主要研究工作及创新点。最后，对本文的组织结构进行了说明。

## 1.1 研究背景和意义

近年来，随着物联网与人工智能技术的深度融合与规模化应用，计算范式正经历一场深刻的变革，从以云计算为中心的集中式处理模式，逐步向“云-边-端”协同的分布式智能架构演进。在这一过程中，边缘计算作为关键一环，通过将计算、存储与分析能力下沉至网络边缘侧，直接在数据源头或近端进行实时处理，有效缓解了云中心在带宽消耗、服务延迟和隐私安全方面的巨大压力。然而，单一、孤立的边缘节点往往受限于其固有的资源瓶颈（如算力、存储）与物理覆盖范围，难以独立支撑日益复杂、跨地域协作且对实时性有严苛要求的智能应用。在此背景下，协同边缘计算应运而生，它超越了对单一边缘节点的优化，演进为一种旨在实现地理分布广泛、形态异构（包括边缘服务器、网关、车载单元及各类移动设备）的众多边缘节点之间，进行数据、计算、模型与网络资源深度共享与协同调度的新范式。该架构通过一个统一的管控平面，对大规模、分布广泛且异构的边缘基础设施进行联合管理与智能编排，从而将离散的边缘节点组织成一张高效的边缘协同网络。这不仅能够极大地提升系统在服务可靠性、资源利用率和任务完成效率等方面的表现，支持业务的灵活部署与快速规模化扩展，更推动了无处不在的智能服务真正走向现实。

在上述发展趋势中，分布式训练是实现边缘智能的关键任务，广泛出现在智能驾驶（多车感知协同）、工业互联网（跨厂区质量检测）和智慧城市（分布式视频分析）等前沿领域。此类任务通常将训练数据分散在多个边缘节点上，通过协同执行本地计算并频繁交换模型参数或梯度信息，共同完成全局模型的更新。在协同边缘计算环境下，分布式训练任务的执行涉及多个边缘节点之间的紧密协作，形成一个包含数据并行或模型并行的计算-通信流程。在协同边缘计算环境下，这样一个分布式训练任务的执行，本质上构建了一个逻辑上紧密耦合、物理上分散的计算-通信协同体。其性能表现呈现出鲜明的双重依赖性：既依赖于各参与节点的本地计算能力，更严重依赖于节点间通信链路的带宽、延迟和稳定性。任务的逻辑通信拓扑（如环形、星形等）如何高效、低冲突地映射到底层物理网络拓扑上，直接决定了同步过程的通信开销，进而成为影响整体训练

效率（如达到目标精度所需的时间）的决定性瓶颈。

这一将分布式训练等复杂任务调度到协同边缘网络中的场景，对资源管理和任务编排提出了一定的挑战。具体而言，该调度场景的核心特征体现在多维资源的耦合性与任务需求的复杂性上。首先，边缘节点并非孤立的计算单元，其计算资源（如 CPU、内存）与网络资源（如带宽）紧密耦合，任务对一种资源的消耗往往会影响另一种资源的可用性。其次，任务内部（如分布式训练中的工作节点之间）存在着严格的数据依赖与同步点，形成了复杂的通信拓扑。任务的性能不仅由单个节点的计算能力决定，还会显著受到其内部通信链路所经历的物理网络性能的影响。任务的通信拓扑与底层物理网络拓扑的匹配程度，直接决定了通信开销的大小，从而成为系统整体性能的关键瓶颈。这些因素共同带来了如下核心难点：

(1) 分布式训练等任务产生的密集、周期性通信流，在映射到共享的物理网络时，会竞争有限的带宽资源。由于任务逻辑通信拓扑可能非常复杂，不同任务间甚至同一任务内的数据流可能在不经意间共享某条关键物理链路，形成隐蔽的带宽竞争点。这种竞争难以通过局部信息进行准确建模和预测，极易引发局部网络拥塞，造成部分任务同步延迟激增，从而破坏系统整体的负载均衡与性能稳定性。

(2) 调度器在决策时面临固有的目标权衡。例如，为了最小化通信开销，理想策略是将频繁通信的任务子单元（如一个分布式训练的 Worker）尽可能集中部署在物理距离近、带宽充足的少数节点上。但这往往会导致这些节点形成计算热点，引发排队延迟，并违背了负载均衡的原则。反之，为了最大化计算资源的均衡利用，将任务分散部署到更广泛的节点上，又会显著增加节点间的通信距离与跳数，从而加大通信延迟和带宽压力。这种“计算聚集”与“通信分散”之间的矛盾，使得在协同边缘计算中实现计算与网络资源的联合均衡调度成为一个难以同时优化所有目标的复杂问题。

综上所述，在协同边缘计算环境下，如何设计一种能够同时考虑计算资源与网络资源，并在二者之间实现智能权衡的调度机制，具有广阔的应用前景及重要的研究意义。

## 1.2 研究现状与分析

现有的边缘计算任务调度系统仍存在诸多局限：FlexiTask 虽然将带宽纳入 Kubernetes 边缘环境的资源模型，并结合负载预测提升效率，但其视带宽为静态资源，忽略任务间网络依赖，优化目标局限于节点级负载均衡。Edge Service 框架支持 QoS 感知调度，但缺乏网络联合调度与长期全局优化能力，且网络模型过于简化。FAOFE 采

用有向无环图（DAG）对任务依赖进行建模，但未考虑网络状态，依赖静态规则，难以响应动态变化。ENTS 虽深化了网络资源集成并提升吞吐量，但仍未充分实现计算与网络资源的协同优化，且存在目标单一或模型简化问题。

当前边缘计算任务调度算法研究普遍采用有向无环图（DAG）对任务建模，该模型适用于具有任务依赖关系的任务流，并在工作流调度等场景中表现良好。然而，随着边缘智能与分布式协同计算的发展，分布式训练等应用呈现出环状拓扑和动态交互特征，难以用 DAG 准确描述，导致现有调度机制在适应性和资源效率方面存在明显不足。另一方面，虚拟网络嵌入（VNE）的研究多聚焦于节点计算与内存资源优化，常将网络资源视为次要约束。这种忽略带宽和拓扑调度的做法在多租户、动态变化的边缘环境中易引发资源竞争和传输瓶颈，已成为系统性能的主要短板。

### 1.3 本文研究工作及创新点

针对上述不足，本文以分布式训练等网络依赖型任务为应用背景，旨在设计并开发一种能够联合调度计算与网络资源的任务调度系统。不再将“任务如何部署”和“网络带宽分多少”当作两个独立的问题，而是作为一个统一的问题来求解。我们构建了同时考虑计算资源和网络资源的联合优化模型，并基于深度强化学习生成全局最优调度策略。该系统致力于为动态、异构的边缘环境提供资源感知能力强、整体性能优越且具备自适应能力的任务—资源协同管理机制，以弥补现有研究在资源协同方面的缺陷。本文的主要贡献如下：

(1) 本文首次提出了面向计算资源与网络资源联合调度的 CES 系统：我们设计并实现了一个名为 CES 的系统，能够在分布式边缘基础设施中协同完成计算任务到节点的映射与网络带宽资源的动态分配，实现两类资源的统一管理与调度。

(2) 本文构建了计算与网络资源的联合优化模型：建立了同时考虑计算资源（CPU、内存）和网络资源（带宽）的联合优化模型。该模型能够准确描述分布式学习等通信依赖型任务在边缘环境中的通信与计算需求，并弹性适应动态带宽变化，从而实现任务映射策略与带宽分配策略的协同优化。

(3) 本文设计了基于强化学习的智能调度机制：采用深度强化学习方法，设计了双分支演员-评论家结构，在奖励函数设计中融入启发式思想，帮助智能体快速学习决策，以实现任务部署与网络资源分配的联合决策。

(4) 本文通过仿真实验和系统实验在三种分布式学习任务场景下测试了 CES 的智

能调度机制性能。相较于基准算法，CES 能够更好地平衡负载均衡度和带宽满足度，显著提高整体性能。

## 1.4 本文组织结构

关于  $\text{\LaTeX}$  以及基于  $\text{\LaTeX}$  写作的好处不再赘述。 $\text{\LaTeX}$  的入门资料推荐文献 [1] 以及文献 [2]。

## 第二章 相关技术基础概述

2.1 协同边缘计算

2.2 分布式训练

2.3 任务调度

2.4 深度强化学习

2.5 本章小结

### 第三章 协同边缘计算任务调度系统 CES 设计

3.1 系统设计目标

3.2 系统架构设计

3.3 任务调度流程

3.4 本章小结

## 第四章 基于深度强化学习的联合任务调度算法

4.1 问题建模

4.2 算法设计

4.3 实验结果与分析

## 第五章 多任务队列调度算法

5.1 问题建模

5.2 算法设计

5.3 实验结果与分析

## 总结与展望

## 参考文献

- [1] CTAN: Package Lshort-Zh-Cn[EB/OL]. <https://ctan.org/pkg/lshort-zh-cn>.
- [2] 一份其实很短的 LaTeX 入门文档[EB/OL]. 始终. <https://liam.page/2014/09/08/latex-introduction/index.html>.

## 攻读博士/硕士学位期间取得的研究成果

一、已发表（包括已接受待发表）的论文，以及已投稿、或已成文打算投稿、或拟成文投稿的论文情况（只填写与学位论文内容相关的一部分）：

序号	作者（全体作者，按顺序排列）	题目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	与学位论文哪一部分（章、节）相关	被索引收录情况
1						
2						

注：在“发表的卷期、年月、页码”栏：

1. 如果论文已发表，请填写发表的卷期、年月、页码；
2. 如果论文已被接受，填写将要发表的卷期、年月；
3. 以上都不是，请据实填写“已投稿”，“拟投稿”。

不够请另加页。

二、与学位内容相关的其它成果（包括专利、著作、获奖项目等）

## 致 谢

这次你离开了没有像以前那样说再见, 再见也他妈的只是再见  
我们之间从来没有想象的那么接近, 只是两棵树的距离  
你是否还记得山阴路我八楼的房间, 房间里唱歌的日日夜夜  
那么热的夏天你看着外面, 看着你在消逝的容颜  
我多么想念你走在我身边的样子, 想起来我的爱就不能停止  
南京的雨不停地下不停地下, 就像你沉默的委屈  
一转眼, 我们的城市又到了夏天, 对面走来的人都眯着眼  
人们不敢说话不敢停下脚步, 因为心动常常带来危险  
我多么想念你走在我身边的样子, 想起来我的爱就不能停止  
南京的雨不停地下不停地下, 有些人却注定要相遇  
你是一片光荣的叶子, 落在我卑贱的心  
像往常一样我为自己生气并且歌唱  
那么乏力, 爱也吹不动的叶子

作者姓名

2020 年 7 月 10 日

于华南理工大学