****

**本科毕业论文（设计）开题报告**

**题 目：**

**专 业 软件工程**

**学 生 付书煜**

**学 号 2021111824**

**指导教师 贺祥**

**日 期**

**哈尔滨工业大学教务处制**

**目录**

[1 课题来源及研究的目的和意义 1](#_Toc23334)

[2 国内外在该方向的研究现状及分析 1](#_Toc12657)

[3 主要研究内容 3](#_Toc10174)

[3.1 云-边协同架构的系统建模 3](#_Toc27835)

[3.2 响应时间差异最小化的公平性优化算法 4](#_Toc11203)

[3.3 模型公平性优化效果的评估标准 4](#_Toc29599)

[4 研究方案 5](#_Toc16482)

[4.1 系统建模 5](#_Toc4997)

[4.2 公平性优化算法设计 6](#_Toc14985)

[4.3 模型公平性优化效果的评估方法 7](#_Toc15909)

[5 进度安排，预期达到的目标 8](#_Toc31628)

[5.1 进度安排 8](#_Toc5140)

[5.2 预期目标 8](#_Toc7155)

[6 课题已具备和所需的条件、经费 8](#_Toc1246)

[7 研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施 8](#_Toc10681)

[8 主要参考文献 9](#_Toc14531)

# 课题来源及研究的目的和意义

随着互联网迅速发展，微服务架构[1]作为一种高效、灵活的架构模式，正在被广泛应用于各种需要高实时性和灵活性的服务场景，如视频流媒体[2]、在线游戏等。微服务架构将传统的单体应用划分为多个独立、细粒度的服务模块，使每个模块能够根据需要进行独立的部署和扩展，并通过轻量级通信协议相互协作，从而显著提升了系统的灵活性和扩展性[3]。然而，尽管微服务在提升系统敏捷性和故障隔离方面具有明显优势，但其也面临诸多挑战。由于服务被分布在多个节点上，服务间的调用的网络延迟可能导致系统整体的响应速度降低。此外，这种分布式架构还增大了系统管理和运维的复杂性，如服务间依赖管理、状态一致性维护等[4，5]。并且微服务的动态扩展往往对资源使用效率有更高要求，如何高效地分配和管理资源以保障服务质量，已成为微服务应用亟待解决的核心问题之一。

为了进一步优化微服务的响应速度和服务质量体验（QoE），云-边协同计算模式应运而生。云-边协同计算通过在云端和边缘节点之间合理分配任务，使得云端和边缘节点各自的资源能够得到最大化利用[6]。云端拥有丰富的计算资源，能够高效处理大规模数据和复杂的计算任务，但由于其物理位置通常距离用户较远，可能带来较高的网络传输延迟[7，8]。边缘节点则位于用户附近[9]，可以就近处理用户请求，从而显著降低网络传输延迟[10]，并提升用户体验。然而，由于边缘节点计算资源相对有限，在高并发访问或者复杂任务处理中，其资源限制可能导致性能瓶颈并增加延迟。因此，尽管云-边协同部署在整体上提升了QoE，但在实际部署过程中，如何合理分配服务实例和资源、优化资源利用效率以进一步改善 QoE 仍然是一个重要的研究问题。

现有的云-边协同部署方案通常集中于最大化整体QoE[11]，即通过合理分配任务和资源来优化整体服务质量。然而，这些方案往往忽视了不同用户间的体验差异问题，即公平性[12]。由于地理位置、网络条件以及节点资源负载等差异，不同用户的响应时间可能有较大波动，导致部分用户的体验显著劣于其他用户[13]。对于那些需要高实时性和一致性的应用场景，这种体验差异尤为明显。例如，在视频流媒体服务中，远离边缘节点的用户因网络传输延迟而产生卡顿，严重影响其体验，而接近边缘节点的用户则能够享受更高质量的流媒体服务。因此，如何通过优化服务实例的部署方法来减少不同用户间的响应时间差异，以确保不同用户的 QoE 较为均衡，成为一个亟待解决的问题。

实现云-边协同环境中的公平性部署不仅是提升整体 QoE 的必要条件，也是推动云-边协同计算在更多应用场景中普及的关键。在保障 QoE 的前提下，通过减少用户间的服务质量差异，不仅能够提升用户的整体满意度，也为云-边协同计算的实际应用提供了更强的适应性和推广价值。因此，在云-边协同计算中实现微服务的公平性部署，具有重要的研究意义和广阔的应用前景。

# 国内外在该方向的研究现状及分析

近年来，随着云计算和边缘计算的快速发展，微服务在云-边协同环境中的部署及资源管理成为了研究热点。为了全面优化整体服务质量体验（QoE）和用户体验公平性，我们对现有研究成果进行分析和综述。

为了提升整体QoE，一些研究者提出了基于用户位置的任务分配方法，降低用户请求的响应时间。例如，Liu等人[14]提出了一种基于边缘计算低延迟特性的分布式任务调度策略，通过在边缘节点进行就近处理显著提升了系统对高并发请求的响应速度。Alsurdeh等人[15]则提出了一种混合工作流调度方法，通过在云端和边缘节点之间协同分配任务，提高了资源利用率，同时显著增强了整体的QoE。国内学者马璐等[16]也提出了一种基于混合任务调度的云-边协同方法，根据用户位置和边缘节点资源动态分配任务，从而减少了请求的响应时间。王朝等人[17]提出了一种基于博弈论的协作缓存策略，通过区域间协作缓存数据资源，显著降低了用户数据获取延迟，提高了系统QoE。此外，张雅洁等[18]通过在电力物联网下应用云边协同计算，提出了基于位置的任务放置算法，优化了响应延迟并提升了整体QoE；朱仪和江雪[19]提出了一种基于云边协同的任务卸载策略，通过智能卸载减少了延迟，提高了系统的响应效率；张文康等[20]研究了低延迟故障预测算法，在云边协同环境下有效降低了延迟并提高了QoE。这些研究表明，云-边协同在提高资源利用率、降低延迟方面具有显著效果，但它们大多侧重于优化单一层次的性能，尚未充分考虑如何平衡不同用户间的QoE差异，尤其是在远离边缘节点的用户群体中，可能会出现明显的QoE不均衡，进而影响整体的用户体验公平性。

随着用户公平性需求的提升，近年来的研究开始更加关注如何通过优化资源分配和任务调度来减少不同用户之间的QoE差异。为了进一步提升用户体验的一致性，研究者们提出了多种方法。例如，Zhang等人[21]基于图神经网络提出了一种工作负载迁移方案，通过在边缘节点间动态调整资源分配，有效平衡了不同地理位置用户QoE，从而显著降低了用户之间的QoE差异。肖旋等[22]在云边协同场景下研究了服务器负载均衡与协调，提出了负载均衡方法以进一步提升用户体验一致性。冯起等[23]提出了一种考虑云端距离的科技服务边缘计算资源均衡调度算法，通过动态评估云端和边缘节点的距离与任务需求，优化资源调度，以提升不同用户间的QoE一致性。Hao等人[24]提出了一种基于深度强化学习（DRL）的计算卸载方案，通过学习算法在边缘节点之间动态分配计算任务，以减少用户体验差异并提升资源利用率。此外，Zhou等人[25]提出了一种公平性导向的移动边缘缓存策略，通过缓存优化平衡不同用户的响应时间，减少资源分配不均带来的体验差异。这一方法特别适用于资源受限环境，为用户提供了更具公平性的服务。除了这些已有的研究，近年来一些新的工作也为提升公平性提供了新的思路。例如，吴忠辉[26]研究了基于区块链的边缘分布式计算卸载技术，提出通过去中心化的方式改善资源分配的公平性。徐恒炜[27]探讨了基于公平通信方案的穿戴设备隐私学习方法，通过保障隐私的同时提高了通信的公平性。张世焱[28]则研究了云边协同网络中的多资源管理机制，提出了多资源调度策略以平衡不同用户的服务体验。金韬等[29]提出了一种基于区块链的云边协同系统设计，利用区块链技术提升了资源分配的透明度和公平性。这些研究为云边协同系统中的公平性优化提供了新的技术路径，并有助于在多用户、多节点环境中实现更加均衡的QoE。

尽管现有研究在提高整体QoE和优化用户体验一致性方面取得了一定进展，但多数方法仍面临着计算效率和迁移机制的挑战。例如，Zhang等人[21]提出的基于图神经网络的工作负载迁移方案，虽然能有效平衡不同地理位置用户的QoE，但其复杂的迁移机制在大规模分布式环境中难以实现高效计算，仍需进一步优化。肖旋等[22]提出的负载均衡方法，尽管能够提升用户体验一致性，但其在动态负载变化下的调度效率尚有待提升。冯起等[23]的云端距离评估方法虽然在一定程度上优化了资源调度，但对于大规模服务实例的调度仍存在一定的计算开销和复杂度。此外，现有的研究多集中于单一层次的资源优化（如边缘计算或缓存策略），缺乏对云-边协同环境中微服务部署的整体性考量，未能全面解决不同用户QoE差异问题。例如，金韬等[29]基于区块链的云边协同系统设计，虽然提供了透明的资源分配机制，但仍然缺乏对不同资源类型的综合调度与平衡，未能完全优化用户之间的公平性。吴忠辉[26]的基于区块链的边缘分布式计算卸载技术，虽然通过去中心化的方式提高了资源分配的公平性，但在实际部署中仍面临计算效率和大规模环境下的调度问题。因此，现有研究的局限性在于，大多数方法还没有在云-边协同架构下进行全面整合，且缺乏针对微服务部署的公平性优化策略，无法充分解决远离边缘节点的用户QoE差异。

在此背景下，如何在云-边协同架构中更全面地结合云端和边缘资源，实现用户体验的公平性优化，仍然是一个亟待解决的关键问题。未来的研究应进一步探索在云-边协同环境中通过智能化的部署策略和公平性优化手段，以减少不同用户之间的QoE差异。这样不仅能够提升用户体验的一致性，还能更有效地支持边缘计算的应用，最终满足用户对服务质量公平性日益增长的需求。

# 主要研究内容

本研究围绕在云-边协同环境中优化视频流媒体服务的公平性微服务部署，旨在通过构建合理的系统模型、设计优化算法和评估指标，最终实现服务的公平性优化。随着视频流媒体用户数量的增长，不同用户因地理位置、网络条件等差异在服务体验上可能产生显著的响应时间差异，导致用户体验不一致。传统的云-边协同部署方法多集中于整体用户体验质量（QoE）的提升，但在不同用户之间的体验公平性方面仍存在不足。因此，本研究以最小化不同用户之间的响应时间差异为核心优化目标，力求缩小用户间体验的差距，提升用户体验的公平性。具体研究内容如下：

## 云-边协同架构的系统建模

系统建模主要包括以下几个要素：

1. 用户分布与服务实例部署：识别用户的地理位置分布，设计不同区域的边缘节点

和云节点的资源配置，确保每个区域的服务实例数量和位置能够满足区域内用户的响 应需求。

1. 延迟与响应时间：分析物理拓扑结构、传输延迟、带宽限制和计算资源配置等对

用户响应时间的影响。将用户连接到边缘或云节点的延迟细分为传输延迟（基于地理距离和带宽）和处理延迟（基于节点的计算资源）。

1. 约束条件：设定各节点的资源上限及响应时间要求，包括平均响应时间、部署成

本和资源限制等多方面约束，以满足视频流媒体服务的需求并保证模型的现实可行性。

## 响应时间差异最小化的公平性优化算法

设计公平性导向的优化算法，主要包括以下几个方面：

1. 优化目标：设定最小化不同用户间的响应时间差异为核心目标，结合用户连接到

边缘或云节点的传输延迟和处理延迟，构建数学模型，确保优化结果能够提升用户体验的公平性。

1. 约束条件：在优化过程中综合考虑以下三个关键约束条件：

* 低延迟需求：满足视频流媒体服务的特性，确保响应时间支持实时播放要求，

以提供流畅的用户体验。

* 成本限制：合理控制部署成本，将经济性作为约束条件之一，以确保优化方

案在预算范围内可行。

* 资源配置限制：设定边缘节点和云节点的资源上限，防止因资源超载而导致

性能下降，保障服务质量的稳定性。

## 模型公平性优化效果的评估标准

为验证模型的公平性优化效果，本研究建立了一个全面的评估指标体系和评估方法，以确保模型在实际应用中的公平性表现具有可验证性和可改进性。具体内容如下：

1. 评估指标：通过一组关键指标对模型的公平性优化效果进行量化评估，以全面衡

量模型的实际应用表现：

* 不同用户的响应时间差异：计算不同用户间的响应时间的方差，以量化公平

性。较小的响应时间差异表明用户体验的公平性更高。

* 平均响应时间：统计所有用户的平均响应时间，确保在实现公平性优化的同

时，整体服务响应时间符合实时播放需求。该指标能够衡量整体用户体验的质量。

* 部署成本：计算边缘节点和云节点的总成本，确保优化方案在预算范围内可

行。部署成本包括节点租用费用、计算资源使用费用、带宽费用等。通过该指标确保模型在保证公平性和资源配置合理性的同时，也满足经济性要求。

* 资源消耗：监控各节点的资源消耗情况，包括CPU、内存和带宽使用率。通过

合理分配资源，避免边缘和云节点的过度负载，从而保障服务质量的稳定性。该指标反映了系统资源使用的效率，过高的资源消耗可能导致成本增加或服务质量下降。

1. 评估方法：在本研究中，评估方法主要包括以下几种方式，以确保全面和客观地

量化模型的优化效果：

* 量化分析法：通过计算各项评估指标的数值，量化模型优化前后不同用户之

间的响应时间差异、平均响应时间、成本与资源消耗等情况。这些数据将为模型的优化效果提供量化依据。

* 灵敏度分析：在模型优化过程中，通过调整不同的约束参数（如资源限制、

带宽要求、成本预算等），分析模型对不同输入条件的敏感度。通过灵敏度分析，能够评估模型在面对不同实际应用场景时的适应能力和稳定性。

* 综合评估：将所有评估指标结合起来，计算加权综合得分，从而全面评估模

型的公平性优化效果。此方法有助于同时考虑多个因素，尤其是公平性与经济性的平衡。

# 研究方案

本研究旨在优化视频流服务在云边协同环境中的公平性部署方案。研究方案具体包括以下几个步骤：

## 系统建模

系统建模是实现公平性优化的基础，包括以下几个要素：

1. 用户分布与服务实例部署：

* 识别用户的地理位置分布，根据不同区域的需求设置边缘节点和云节点的资

源配置，以满足各区域内用户的响应时间需求。

* 为确保每个区域的服务实例分布合理，设定用户集，服务

节点集。

* 连接变量 表示用户 是否连接到服务节点：

1. 延迟与响应时间：

* 传输延迟：包括物理传输延迟和带宽延迟，其计算方式如下：
  + 物理传输延迟：由用户到服务节点的距离除以信号传播速度

来计算：

* + 带宽延迟：由请求数据大小除以节点的带宽计算：
* 处理延迟：由请求数据大小和节点的处理速率计算：
* 综合响应时间为传输延迟和处理延迟之和：

1. 约束条件：

在优化过程中综合考虑以下三个关键约束条件：

* 平均响应时间约束，设定最大允许平均响应时间：
* 部署成本，由边缘和云节点的总预算限制控制：

其中，表示边缘节点上的服务部署成本；表示云节点上的服务部署成本。

* 资源配置，限制边缘节点的资源上限，确保服务节点不会超载。以、、分别表示CPU、存和带宽的最大可用资源：

其中，、、分别表示用户所需的 CPU、内存和带宽资源。

## 公平性优化算法设计

针对不同用户之间的响应时间差异最小化，设计公平性优化算法。

1. 优化目标：设定最小化响应时间差异为核心目标。目标函数f表示用户响应时间

的方差，确保用户体验的公平性：

1. 算法选择：为了解决公平性优化问题并最小化用户间的响应时间差异，我们考虑

了几种常见的优化算法。以下是几种候选算法及其原理分析：

* 遗传算法（GA）

原理：遗传算法是一种模拟自然选择和遗传学原理的优化算法。在每一代中，算法会生成多个候选解（个体），这些个体根据适应度函数评估其优劣，适应度越高的个体被选中进行“交叉”和“变异”，生成下一代候选解。遗传算法的核心思想是通过选择、交叉、变异等操作，从一个随机的种群中逐步筛选出最优解。遗传算法特别适合处理复杂、非线性、多目标和大规模的优化问题。

适合本研究的原因：由于本研究的问题涉及多个约束条件，如成本、延迟和资源配置，同时优化多个目标，遗传算法能够在解空间中进行全局搜索，有效避免陷入局部最优解，并能处理复杂的约束条件。

* 粒子群优化算法（PSO）

原理：粒子群优化算法模拟了鸟群觅食行为，在优化过程中，每个候选解（粒子）通过位置和速度的调整来寻找最优解。每个粒子都会根据自己的历史经验以及整个粒子群体的经验来更新自己的位置。粒子通过在搜索空间中迭代移动，最终收敛到最优解。PSO算法的优势在于搜索过程较为简单，计算量较小。

适合本研究的原因：粒子群优化适合解决连续的优化问题，并且具有较强的全局搜索能力，能够在高维空间中有效探索最优解。其简单且高效的搜索过程使得它成为一种非常合适的优化工具，尤其在优化问题没有复杂约束的情况下，能够帮助快速找到全局最优解，支持研究中的优化目标。

* 模拟退火算法（SA）

原理：模拟退火算法是一种随机优化算法，模拟了金属冷却过程中的原子排布过程，通过引入“温度”逐渐降低的机制来控制搜索步长。初始时，温度较高，允许算法跳出局部最优解，随着温度的降低，搜索过程逐渐收敛到最优解。模拟退火算法的优点是可以接受某些不太优的解，以跳出局部最优，但随着时间的推移，会逐步趋近全局最优解。

适合本研究的原因：模拟退火算法特别适合处理非线性、多峰问题，能够有效避免局部最优解，并在全局最优解的搜索中展现出良好的探索能力。对于本研究中涉及的复杂优化问题，模拟退火能够提供有价值的解空间探索，有助于优化服务部署和资源分配策略。

* 贝叶斯优化（Bayesian Optimization）

原理：贝叶斯优化是一种基于概率模型的全局优化方法，主要用于解决目标函数评估代价高昂的优化问题。通过构建目标函数的概率模型，并使用贝叶斯推断方法来逐步逼近最优解。贝叶斯优化采用高斯过程（Gaussian Process）或类似模型来表示目标函数的不确定性，并利用已评估的数据指导后续搜索。

适合本研究的原因：贝叶斯优化在处理高维度、具有不确定性的优化问题时表现出色，尤其在计算资源昂贵或评估代价较高的情况下，能够高效地寻找最优解。在微服务部署优化中，贝叶斯优化能够通过较少的评估步骤提供较优的解决方案，帮助提高优化效率，尤其适用于评估代价较高的情境，有助于在复杂的资源约束下实现较优的微服务部署。

## 模型公平性优化效果的评估方法

在本研究中，评估的实施方式将通过具体的实验和数据分析来进行，确保模型在真实环境中的有效性和可行性。评估实施方式包括以下几种具体操作：

1. 仿真实验

通过仿真平台，模拟不同用户分布、服务节点配置、带宽条件等环境下的服务部署。仿真实验能够在没有实际部署的情况下，评估不同优化方案对公平性、响应时间和资源消耗等的影响。实验过程中，将对比优化方案与传统部署方案的差异，评估各项评估指标，如响应时间差异、平均响应时间等。仿真环境还将涵盖不同的负载情况、网络延迟以及节点资源配置等，以检验模型在各种复杂情况下的表现。

1. 响应时间差异分析

基于仿真实验的结果，统计不同用户之间的响应时间分布情况。通过计算响应时间的方差，进一步评估模型优化前后用户体验的公平性。响应时间差异分析有助于识别在哪些区域或用户组之间，模型存在公平性不足的情况，并为后续优化提供依据。

1. 敏感性分析

对关键模型参数进行敏感性分析，观察不同参数对模型公平性优化效果的影响。例如，调整资源配置的上限、带宽限制和成本预算等，观察这些参数变化对模型公平性的影响。这一分析能够验证模型的健壮性，并确保其在多种约束条件下依然能够保持较好的性能。

1. 成本效益分析

对不同优化方案的成本和效果进行对比，分析优化方案的成本是否与公平性收益相匹配。通过成本效益分析，能够确保公平性提升的同时，不会导致过高的经济成本，从而保持方案的实用性和可行性。

# 进度安排，预期达到的目标

## 进度安排

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 工作安排 | 周数 | 起止时间 |
| 系统建模与设计阶段 | 4 | 2024.11.25-2024.12.22 |
| 算法设计与实现 | 6 | 2024.12.23-2025.02.02 |
| 仿真实验与数据收集 | 8 | 2025.02.03-2025.03.30 |
| 敏感性分析与模型调优 | 5 | 2025.03.31-2025.05.04 |
| 成本效益分析与优化验证 | 4 | 2025.05.05-2025.06.01 |
| 结题，论文编写 | 2 | 2025.06.02-2025.06.15 |

## 预期目标

* 中期目标：完成云边协同环境中视频流服务的公平性优化模型设计和算法的基本

框架，进行初步实验与参数调优。

* 结题目标：实现云边协同环境下的公平性优化模型，能够基于视频流服务的实际

需求，在满足资源和成本限制的前提下，最大限度地减少用户间响应时间差异。

# 课题已具备和所需的条件、经费

本课题的研究工作已经具备了充足的条件和经费保障。首先，研究将充分利用现有的实验室资源和仿真平台，这些平台能够支持大规模的云边协同架构实验，并进行多种性能评估。实验室内拥有必要的硬件设备以及高性能计算资源，为研究提供了充分的技术保障。与此同时，相关经费也已充足，能够覆盖研究过程中所需的软硬件支出、数据采集与处理、人员支持等各项费用。因此，课题的顺利开展具有良好的资源基础和保障。

# 研究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施

1. 数据真实性不足：仿真数据可能无法完全模拟实际应用场景的数据特征，影响实验结果的可靠性；解决措施：在仿真数据的基础上，可以通过公开数据集进行结果验证，提高模型的适用性。
2. 约束条件冲突：多个约束条件（如延迟、成本、资源分配）之间可能存在冲突，

影响优化结果；解决措施：采用多目标优化方法，平衡不同目标之间的关系。

# 主要参考文献

1. J. Thönes, "Microservices," in IEEE Software, vol. 32, no. 1, pp. 116-116, Jan.-Feb. 2015, doi: 10.1109/MS.2015.11.
2. Ashwin Rao, Arnaud Legout, Yeon-sup Lim, Don Towsley, Chadi Barakat, and Walid Dabbous. 2011. Network characteristics of video streaming traffic. In Proceedings of the Seventh COnference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 25, 1–12. https://doi.org/10.1145/2079296.2079321
3. Dragoni, N. *et al.* (2017). Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. In: Mazzara, M., Meyer, B. (eds) Present and Ulterior Software Engineering. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12>
4. 赵然,朱小勇.微服务架构评述[J].网络新媒体技术,2019,8(1):58-61F0003
5. 李春霞.微服务架构研究概述[J].软件导刊, 2019, 018(008):1-3,7.
6. J. Pan and J. McElhannon, "Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 1, pp. 439-449, Feb. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2767608.
7. M. N. O. Sadiku, S. M. Musa and O. D. Momoh, "Cloud Computing: Opportunities and Challenges," in IEEE Potentials, vol. 33, no. 1, pp. 34-36, Jan.-Feb. 2014, doi: 10.1109/MPOT.2013.2279684.
8. W. Zhang, Y. Hu, Y. Zhang, and D. Raychaudhuri, “SEGUE: Quality of service aware edge cloud service migration,” in Proc. IEEE Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci., 2016, pp. 344–351.
9. Q. He et al., “A game-theoretical approach for mitigating edge DDoS attack,” IEEE Trans. Dependable Secure Comput., vol. 19, no. 4, pp. 2333–2348, Jul./Aug. 2022.
10. K. Cao, Y. Liu, G. Meng and Q. Sun, "An Overview on Edge Computing Research," in IEEE Access, vol. 8, pp. 85714-85728, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991734.
11. X. He, H. Xu, X. Xu, Y. Chen and Z. Wang, "An Efficient Algorithm for Microservice Placement in Cloud-Edge Collaborative Computing Environment," in IEEE Transactions on Services Computing, vol. 17, no. 5, pp. 1983-1997, Sept.-Oct. 2024, doi: 10.1109/TSC.2024.3399650.
12. H. SHI, R. V. Prasad, E. Onur and I. G. M. M. Niemegeers, "Fairness in Wireless Networks:Issues, Measures and Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 1, pp. 5-24, First Quarter 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.050113.00015.
13. P. Lai et al., “QoE-aware user allocation in edge computing systems with dynamic QoS,” Future Gener. Comput. Syst., vol. 112, pp. 684–694, 2020.
14. F. Liu, G. Tang, Y. Li, Z. Cai, X. Zhang and T. Zhou, "A Survey on Edge Computing Systems and Tools," in Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 8, pp. 1537-1562, Aug. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2920341.
15. R. Alsurdeh, R. N. Calheiros, K. M. Matawie and B. Javadi, "Hybrid Workflow Scheduling on Edge Cloud Computing Systems," in IEEE Access, vol. 9, pp. 134783-134799, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116716.
16. 马璐, 刘铭, 李超, 路兆铭, 马欢. 面向6G边缘网络的云边协同计算任务调度算[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 66-73.
17. 王朝, 高岭, 高全力, 等. 边缘计算中基于博弈论的数据协作缓存策略研究[J].计算机应用研究, 2020, 37 (12): 3739-3743.
18. 张雅洁,陆旭,李曦,等.电力物联网下基于云边协同的计算任务放置算法[J].电力信息与通信技术,2024,22(10):38-47.DOI:10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2024.10.06.
19. 朱仪,江雪.基于云边协同的任务卸载策略技术研究[J/OL].无线电工程,1-21[2024-11-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.tn.20241010.0924.004.html.
20. 张文康,赵伟,刘德成,等.云边协同低延迟故障预测算法研究[J].能源与环保,2024,46(10):238-243.DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.10.036.
21. C. Zhang, J. Yin and S. Deng, "Ensuring Fairness in Edge Networks: A GNN-Based Media Workload Migration Scheme With Fairness Guarantee," in IEEE Transactions on Services Computing, vol. 17, no. 3, pp. 934-948, May-June 2024, doi: 10.1109/TSC.2023.3298695.
22. 肖旋.云边协同场景下服务器负载均衡与协调研究[D].重庆大学,2021.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.004253.
23. 冯起,薛喜红,任龙,等.考虑云端距离的科技服务边缘计算资源均衡调度算法[J].自动化技术与应用,2024,43(08):95-98+104.DOI:10.20033/j.1003-7241.(2024)08-0095-05.
24. H. Hao, C. Xu, W. Zhang, S. Yang and G. -M. Muntean, "Computing Offloading With Fairness Guarantee: A Deep Reinforcement Learning Method," in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 33, no. 10, pp. 6117-6130, Oct. 2023, doi: 10.1109/TCSVT.2023.3255229.
25. J. Zhou, F. Chen, Q. He, X. Xia, R. Wang and Y. Xiang, "Data Caching Optimization With Fairness in Mobile Edge Computing," in IEEE Transactions on Services Computing, vol. 16, no. 3, pp. 1750-1762, 1 May-June 2023, doi: 10.1109/TSC.2022.3197881.
26. 吴忠辉.基于区块链的边缘分布式计算卸载关键技术研究[D].北京邮电大学,2024.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2024.000039.
27. 徐恒炜.基于公平通信方案的穿戴设备隐私学习方法[D].中国科学技术大学,2023.DOI:10.27517/d.cnki.gzkju.2023.002058.
28. 张世焱.云边协同网络中的多资源管理机制研究[D].北京邮电大学,2024.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2024.000220.
29. 金韬,庄丽婉,张晨,等.基于区块链的云边协同系统研究与设计[J].信息安全研究,2021,7(04):310-318.