

信息世界： 连接与创新

The Information World: Connection and Innovation



2025.08

第9卷 第8期 总第97期

信息世界： 连接与创新

The Information World: Connection and Innovation



出版社信息

主管：香港星源出版社

主办单位：香港星源出版社

主编：裴景川

执行主编：姜若尘

社内编辑：

邢曜哲 苏言晖 罗承焯 梁至恒

祁若川 唐思屹 钟昱廷 林曜

高子渊 唐沛然 贺云策 林峻尧

赵慕辰 周泽杭 罗晋 傅云衡

叶承哲

网址：<https://hksspub.com/>

电话：+852 6855 8145

邮箱：hksspub2022@163.com

刊期：月刊

STAR SOURCE PUBLISHING
香港星源出版社



6378 9010

目 录

CONTENTS

异构计算环境下大规模数据并行调度机制研究	段衡宇	001
面向实时决策的流式数据处理框架优化策略	卓奕辰	008
基于深度神经网络的跨域数据表示学习方法探索	梁牧川	013
云原生应用架构中的服务拆分与依赖治理研究	傅景行	020
高性能客户端渲染管线的动态资源调度模型	祁昱哲	026
联邦智能系统中的隐私增强计算架构设计	韩曜铭	033
物联网场景下边缘推理模型的轻量化部署策略	周聿航	039
分布式缓存系统的多级一致性控制与延迟优化分析	唐湛予	045
端 - 边 - 云协同环境下移动应用性能与能耗权衡研究	沈砚	051
面向超大规模日志分析的自适应索引构建方法	秦知远	056
容器化环境中的弹性扩缩容预测算法研究	罗靖川	064
跨平台图形计算引擎的模块化重构与性能对比	江亦衡	072
基于强化学习的智能任务分发与负载均衡模型	温奕凡	079
企业级数据湖治理框架的工程化实践与优化路径	顾宸昊	085
人工智能模型在移动端推理加速中的算子优化技术	林拓然	093
分布式系统中的故障自愈机制与服务可用性提升策略	叶景淮	100
跨终端同步架构的消息一致性保障方法研究	邵廷轩	107
面向大模型应用的高效向量数据库架构设计	苏曜川	113
客户端资源监控与能效分析平台的系统实现	贺彦霖	121
智能计算基础设施协同演进与未来技术融合趋势研究	袁子骁	126

端 - 边 - 云协同环境下移动应用性能与 能耗权衡研究

沈 砚

(武汉 华中科技大学 430074)

摘要:

随着移动应用对低时延与高交互体验需求的提升,端-边-云协同计算逐渐成为缓解终端资源受限问题的重要技术手段。然而,不同计算执行位置在改善应用性能的同时,也会对移动终端能耗产生不同影响,性能提升与能耗控制之间的权衡关系亟需系统分析。本文围绕端-边-云协同环境下移动应用的性能与能耗问题展开研究,从工程视角探讨协同机制对应用运行特性的影响。

在分析端-边-云协同计算模式与系统结构特征的基础上,本文对移动应用性能指标和终端能耗构成进行了界定,梳理了计算任务在端、边、云不同执行位置下对应用响应性能和能耗表现的影响特征。通过对网络条件、计算卸载行为及协同策略的分析,揭示了端-边-云协同环境中性能改善与能耗变化之间的内在关联。研究表明,协同计算能够在一定条件下有效降低应用响应时延,但其能耗表现受任务特性、网络状态及执行位置选择的共同影响,二者之间呈现出明显的权衡关系。

关键词:端-边-云协同计算;移动应用性能;能耗分析;性能-能耗权衡;计算卸载;边缘计算

第一章 端 - 边 - 云协同环境下的性能与能耗问题

1.1 移动应用发展背景与终端能耗约束问题

随着移动互联网技术的发展,移动应用逐渐从以信息展示为主的轻量级应用,演进为承载复杂计算和高交互需求的综合服务载体。即时通信、在线协作、智能推荐等应用对响应时延和服务稳定性的要求不断提高,使得移动应用在运行过程中对计算资源和网络条件的依赖程度显著增强。

与此同时,移动终端在计算能力、存储资源和电池容量等方面仍然受到客观限制。尽管硬件性能持续提升,但终端能耗问题依然是制约移动应用持续运行和用户体验的重要因素。高计算负载和频繁的数据传输容易导致能耗快速上升,进而影响应用的可用性和稳定性。如何在保障应用性能的同时控制终端能耗,成为移动应用系统设计中亟需关注的问题。

1.2 端 - 边 - 云协同计算的提出背景与应用场景

为缓解移动终端资源受限问题,计算卸载和协同计算逐渐成为研究与应用的重要方向。端-边-云协同计算通过将计算任务在终端、边缘节点与云平台之间进行合理分配,试图在性能提升与资源利用之间取得平衡。相较于仅依赖云计算的集中式处理模式,边缘计算通过将部分计算能力下沉至网络边缘,缩短了数据传输路径,为低时延应用提供了新的支撑方式。

在实际应用中,端-边-云协同计算已被广泛应用于对实时性和交互性要求较高的场景,如智能交互应用、在线协作服务和智慧城市相关系统。这些应用通常需要在有限的终端资源条件下,处理复杂计算任务并快速响应用户操作,使协同计算成为一种具有现实意义的系统架构选择。然而,不同协同方式在改善应用性能的同时,也可能引入新的资源消耗和能耗负担,其综合效果有待进一步分析。

1.3 性能提升与能耗控制并存的权衡问题界定

端-边-云协同计算通过灵活的任务分配机制,为提升移动应用性能提供了新的可能性,但其效果并非单向优化。将计算任务卸载至边缘或云端,虽然有助于降低终端计算负载和应用响应时延,但同时会增加数据传输开销和通信能耗。在网络条件不稳定或任务特性不匹配的情况下,协同计算甚至可能导致能耗上升而性能改善有限。

因此,性能提升与能耗控制在端-边-云协同环境中并非完全一致的优化目标,而是存在相互制约的权衡关系。这种权衡关系受到多种因素影响,包括任务计算特性、网络状态、执行位置选择以及协同策略设计等。如果缺乏对上述因素的系统分析,协同计算机制在实际应用中可能难以达到预期效果。明确性能与能耗之间的权衡问题,是开展相关研究和系统设计的重要前提。

1.4 研究思路、研究内容与论文结构安排

基于上述背景与问题分析, 本文围绕端 - 边 - 云协同环境下移动应用的性能与能耗权衡问题展开研究。从系统视角出发, 分析不同计算执行位置和协同策略对应用性能表现与终端能耗特征的影响, 探讨二者之间的内在关联及其变化规律。

全文首先对端 - 边 - 云协同计算及移动应用性能、能耗分析的相关基础进行梳理, 构建统一的分析视角; 随后分别从性能和能耗两个维度, 对协同环境下移动应用的运行特征进行分析; 在此基础上, 重点讨论不同协同策略下性能与能耗之间的权衡关系, 并结合应用需求场景对相关结论进行分析; 最后总结全文研究结论, 提出对端 - 边 - 云协同移动应用系统设计的启示, 并讨论研究的局限性与后续工作方向。

第二章 端 - 边 - 云协同计算与性能能耗分析基础

2.1 端 - 边 - 云协同计算模式与系统结构特征

端 - 边 - 云协同计算是一种面向分布式移动应用的计算组织方式, 其基本思想是在终端设备、边缘节点与云计算平台之间进行功能分工与协同运行, 以缓解终端资源受限与应用计算需求持续增长之间的矛盾。该模式下, 终端主要承担数据采集与用户交互任务, 边缘节点负责处理对时延敏感或需快速响应的计算任务, 云平台则提供集中式的高性能计算与大规模存储支持 [4]。

从系统结构角度看, 端 - 边 - 云协同计算呈现出明显的分层特征。终端层直接面向用户, 其计算能力和能耗约束最为突出; 边缘层部署在接近终端的网络位置, 具备较低的通信时延和一定的计算资源; 云层位于集中式数据中心, 资源供给能力较强, 但通信路径相对较长。这种分层结构为计算任务在不同层级间的灵活分配提供了基础, 同时也使系统在性能表现和资源消耗方面呈现出更加复杂的特征。

需要指出的是, 端 - 边 - 云协同计算并非单纯的任务转移机制, 而是一种涉及系统结构、通信模式与资源管理策略的综合体系。不同协同模式在任务划分粒度、调度方式以及资源利用策略上存在差异, 这些差异会直接影响移动应用的性能表现与终端能耗水平。因此, 从系统结构层面对端 - 边 - 云协同计算特征进行分析, 是开展后续性能与能耗研究的必要前提。

2.2 移动应用性能指标及其影响因素分析

在端 - 边 - 云协同环境下, 移动应用性能主要体现在为应用在运行过程中的响应能力和服务稳定性。相较于单端执行模式, 协同计算引入了多层执行路径,

使应用性能不再仅由终端计算能力决定, 而是受到计算位置、通信条件以及系统调度方式等多种因素的共同影响。

应用响应时延是衡量移动应用性能的重要指标, 其构成包括本地计算时间、任务传输时延、远端计算时间以及结果返回时间等多个部分。不同计算执行位置会改变上述时间构成的比例关系, 从而影响整体响应性能。当任务在终端本地执行时, 通信开销较低, 但计算能力受限; 当任务被卸载至边缘或云端时, 计算能力得到提升, 通信条件则成为影响性能的重要约束因素。

除执行位置外, 网络带宽、通信稳定性以及任务计算特性同样会对应用性能产生显著影响。在网络状态波动较大的情况下, 即使协同计算具备潜在的性能优势, 其实际响应性能也可能出现明显波动。

2.3 移动终端能耗模型与评价维度

移动终端能耗是评估端 - 边 - 云协同计算效果的重要维度, 其变化直接影响设备续航能力和用户使用体验。从构成上看, 终端能耗主要包括计算能耗、通信能耗以及系统基础运行能耗等部分, 其中计算卸载行为对计算能耗和通信能耗具有直接影响。

在本地计算模式下, 终端需要持续占用处理器资源, 计算能耗占据主要比例; 在协同计算模式下, 部分计算任务被转移至边缘或云端, 终端计算能耗相应降低, 但由此引入的数据传输会增加通信能耗。不同任务特性和网络条件下, 计算能耗与通信能耗的变化趋势并不一致, 使终端总体能耗表现呈现出复杂特征。

从评价维度来看, 终端能耗既可以通过单位任务能耗或单位时间能耗进行衡量, 也可以结合应用运行周期对能耗表现进行综合分析。在端 - 边 - 云协同环境中, 单独考察计算卸载是否降低能耗难以全面反映系统运行效果, 更有意义的是分析不同协同策略下终端能耗变化趋势及其与性能改善之间的关系。

第三章 端 - 边 - 云协同环境下移动应用性能特征分析

3.1 计算任务执行位置对应用性能的影响分析

在端 - 边 - 云协同体系中, 计算任务的执行位置直接决定了应用性能的基本特征。终端、边缘与云在计算能力、通信距离和资源可用性方面存在显著差异, 使得应用响应时延在不同执行路径下呈现出明显差别。

当计算任务在终端本地执行时, 应用无需进行远程数据传输, 通信开销较低, 适用于对交互实时性要求较高且计算复杂度有限的任务类型。但受终端处理

能力限制，本地执行在面对计算密集型任务时容易导致处理时间延长，从而削弱应用的响应性能。

将任务卸载至边缘节点后，应用能够利用相对充足的计算资源，同时保持较短的通信路径。在网络条件稳定且边缘节点负载适中的情况下，边缘执行通常能够有效降低响应时延，尤其适合对时延敏感的移动应用场景。然而，当边缘节点资源竞争加剧或负载升高时，其性能优势可能逐渐减弱 [2]。

云端执行为复杂任务提供了最强的计算支撑，但终端与云平台之间较长的通信路径不可避免地引入额外时延，使其在高交互性应用中面临性能瓶颈。由此可见，计算任务执行位置对应用性能的影响并非线性关系，而是由任务特性、网络条件和系统负载等因素共同决定。

3.2 网络条件变化下的应用性能响应特征

在端 - 边 - 云协同计算中，网络条件是影响应用性能的重要外部约束。相较于单端执行模式，协同计算对网络带宽、通信时延和连接稳定性的依赖显著增强，使应用性能对网络状态变化更加敏感 [2]。

在网络带宽充足且通信稳定的条件下，计算卸载带来的计算能力优势能够较为充分地转化为性能提升，应用响应时延主要由远端计算时间决定。然而，当网络带宽受限或通信时延出现波动时，任务传输和结果返回所消耗的时间迅速增加，协同计算的性能收益可能被部分甚至完全抵消。

在网络条件频繁变化的场景中，应用在不同时间段内可能表现出明显不同的响应水平，使服务体验难以保持稳定。这表明，端 - 边 - 云协同环境下的移动应用性能不仅受系统设计影响，还高度依赖运行环境条件，需要在性能分析中加以综合考量。

3.3 协同策略对应用性能稳定性的影响

除计算执行位置和网络条件外，协同策略的设计方式同样对应用性能稳定性产生重要影响。协同策略决定了计算任务在端、边、云之间的分配方式及其调整机制，其合理性直接关系到应用在不同运行条件下的性能波动程度 [3]。

静态协同策略通常基于预设规则或固定阈值进行任务分配，结构相对简单，易于实现。在运行环境较为稳定的情况下，该类策略能够维持相对可预测的性能表现。但当任务负载或网络条件发生变化时，静态策略缺乏自适应能力，容易导致性能下降或资源利用不均。

相比之下，引入动态调整机制的协同策略能够根据系统状态变化对任务执行位置进行调整，从而在一定程度上缓解性能波动问题。这类策略有助于提升应

用性能的稳定性，但同时也增加了系统决策复杂度，使性能表现受到策略设计合理性的影响。

第四章 端 - 边 - 云协同环境下移动应用能耗特征分析

4.1 移动终端能耗构成及其关键影响因素

移动终端能耗是评估端 - 边 - 云协同计算效果的重要指标，其变化直接影响设备续航能力和应用运行的可持续性。从构成角度看，终端能耗主要由计算能耗、通信能耗和系统基础运行能耗组成。其中，计算能耗与处理器利用率及任务复杂度密切相关，通信能耗则受数据传输频率、数据规模以及网络接口工作状态影响 [1]。

在端 - 边 - 云协同环境下，终端能耗不再由单一因素主导。一方面，协同计算通过转移部分计算负载，有助于降低终端本地处理器能耗；另一方面，频繁的数据交互和远程通信又引入额外的通信能耗，使终端能耗呈现出多因素叠加的特征 [4]。

此外，应用类型和运行场景对终端能耗具有显著影响。对交互实时性要求较高的应用通常伴随频繁通信和持续计算，其能耗水平对协同方式较为敏感；而计算密集型应用在本地执行阶段更容易产生较高的处理器能耗。

4.2 计算卸载行为对终端能耗的影响分析

计算卸载是端 - 边 - 云协同计算中的关键机制，其对终端能耗的影响具有明显的双重特征。当计算任务从终端卸载至边缘或云端时，终端处理器负载下降，计算能耗随之降低，这一效果在计算复杂度较高的任务中尤为突出，使计算卸载成为缓解终端能耗压力的重要手段之一。

然而，计算卸载并不必然降低终端总体能耗。卸载过程通常伴随着任务输入数据和中间结果的传输，通信能耗相应增加。在网络条件不稳定或任务数据规模较大的情况下，通信能耗可能抵消甚至超过计算能耗的节省，从而导致终端总体能耗上升。频繁的卸载决策与状态切换还可能引入额外的系统开销，进一步影响能耗表现。

计算卸载对终端能耗的影响取决于任务计算特性、数据规模和网络条件等多种因素的综合作用。在缺乏合理策略的情况下，简单地将任务卸载视为能耗优化手段，难以获得稳定效果。

4.3 边缘与云协同对系统能耗分布的影响

在端 - 边 - 云协同环境中，能耗问题不再局限于终端设备，而是扩展为跨终端、边缘节点和云平台的系统性问题。边缘与云的协同运行改变了计算任务

的执行位置,使系统整体能耗在不同层级之间重新分布[4]。

当计算任务被转移至边缘或云端执行时,终端能耗可能得到一定程度的缓解,但边缘节点和云平台的资源消耗相应增加。这种能耗转移并不意味着系统整体能耗必然上升或下降,而是体现为能耗负载在不同计算层级之间的再分配。在大规模应用场景中,边缘节点的负载变化和云端资源调度方式会对系统能耗分布产生显著影响[3]。

从系统视角看,合理的端-边-云协同机制有助于在满足应用性能需求的同时,实现能耗在不同层级之间的相对均衡分布。相反,若协同机制设计不当,可能导致某一层级能耗过度集中,进而影响系统运行的稳定性和长期可持续性。

第五章 面向性能与能耗权衡的端-边-云协同机制分析

5.1 性能-能耗权衡问题的分析视角与建模思路

在端-边-云协同环境下,移动应用性能与终端能耗并非相互独立的优化目标,而是共同受到计算任务执行位置、通信条件以及资源分配方式等因素影响。不同协同决策通过改变任务执行路径和系统运行方式,在性能改善与能耗变化之间形成取舍关系,这构成了性能-能耗权衡问题的核心内涵。

从分析视角看,性能-能耗权衡可被理解为应用任务在不同执行路径下所产生的综合运行结果。当任务在终端、边缘或云端执行时,其计算时延、通信时延及对应的能耗构成存在明显差异。将响应时延等性能指标与终端能耗指标纳入统一分析框架,有助于从整体上刻画协同决策对系统运行状态的影响。

通过区分计算开销与通信开销在不同协同模式下的相对变化,可以揭示协同机制对性能与能耗的影响路径,为不同策略之间的比较提供统一尺度。

5.2 不同协同策略下的性能-能耗权衡特征

在端-边-云协同体系中,不同协同策略在性能与能耗上的作用路径存在明显差异。以终端本地执行为主的策略通信开销较低,但在计算密集型任务下容易导致响应时延增加,同时终端计算能耗较高。这类策略在能耗表现上具有一定可预测性,但性能提升空间有限。

以边缘计算为核心的协同策略通过缩短通信路径并提供较强计算能力,在多种场景下能够有效改善应用响应性能。与此同时,终端计算负载降低,使计算能耗有所下降。然而,该策略对网络稳定性和边缘资

源可用性较为敏感,在负载较高或网络波动明显的情况下,其通信能耗和调度开销可能上升,从而削弱整体能耗优势。

云端协同策略侧重于利用集中式计算资源处理复杂任务,其优势主要体现在计算能力带来的处理效率提升上。但较长的通信路径使其通常伴随着较高的通信时延和通信能耗,在交互性较强的应用场景中容易形成性能与能耗之间的明显矛盾。

总体而言,不同协同策略并不存在统一的最优解,其性能-能耗表现更多体现为在特定条件下的相对优势。

5.3 面向不同应用需求的权衡关系讨论

在实际应用中,移动应用对性能和能耗的关注重点存在差异,不同需求导向对协同策略选择具有直接影响。对实时交互性要求较高的应用,更关注响应时延和服务连续性,在此类场景下,性能改善往往优先于能耗控制,边缘协同策略具有较高的适配性[3]。

相比之下,对终端续航要求较高的应用更强调能耗控制,其协同策略需要在降低本地计算负载的同时,避免引入过高的通信能耗。在网络条件较为稳定的情况下,合理的计算卸载有助于在一定程度上兼顾性能与能耗;而在不利条件下,则需要更加谨慎的协同决策,以防能耗水平上升。

此外,一些应用同时对性能和能耗提出约束,其协同策略需要在二者之间进行动态权衡。在此类场景中,协同机制不宜被视为固定配置,而应结合任务特性和运行环境进行调整。从应用需求出发理解性能-能耗权衡关系,有助于明确不同协同策略的适用边界,并为系统设计提供更具针对性的分析视角。

第六章 端-边-云协同环境下性能与能耗权衡的综合分析

6.1 端-边-云协同性能与能耗权衡的主要结论

围绕端-边-云协同环境下移动应用的性能与能耗问题,本文从系统结构、计算任务执行位置以及协同机制等层面对相关特征进行了分析。研究表明,端-边-云协同并不必然实现性能与能耗的同步优化,其实际效果取决于任务计算特性、网络条件以及协同策略设计的综合作用。性能改善与能耗变化在协同计算环境中呈现出显著的关联性和制约关系,这一特征构成了协同机制分析的重要基础。

进一步分析发现,计算任务的执行位置是影响性能与能耗权衡的关键因素。终端本地执行、边缘执行与云端执行在计算能力和通信开销方面存在明显差

异，使不同协同方式在响应性能与能耗表现上呈现出不同侧重。协同计算在一定条件下能够降低应用响应时延，但其能耗表现会随着通信负载和系统运行状态变化而发生调整，呈现出动态特征。

此外，协同策略的设计方式对性能与能耗权衡具有重要影响。以静态规则或单一目标为导向的协同策略难以适应复杂多变的运行环境，而具备一定灵活性和情境适配能力的协同机制更有利于在性能需求与能耗约束之间取得相对平衡。

6.2 权衡分析结果的系统设计启示

基于本文对性能与能耗权衡关系的分析，可对端 - 边 - 云协同移动应用系统设计提出若干启示。系统设计不宜将性能优化或能耗控制作为单一目标，而应将二者纳入统一的分析框架进行综合考量。忽视性能与能耗之间的相互影响，容易导致协同机制在实际运行中偏离预期效果。

在协同机制设计过程中，有必要根据应用需求特征明确优化侧重点。对时延敏感的应用，应合理利用边缘计算资源以缩短响应路径；对能耗敏感的应用，则需谨慎评估计算卸载引入的通信开销，避免能耗在系统层面发生不利转移。这一设计思路强调协同策略的情境适配性，而非追求在所有场景下通用的最优配置 [2]。

从系统层面看，端 - 边 - 云协同机制的价值不仅体现在单一设备性能或能耗指标的改善上，还体现在不同计算层级之间资源与能耗的合理分配。通过在系统设计阶段引入性能 - 能耗权衡视角，有助于提升协同计算在复杂应用场景中的稳定性和长期可持续性。

6.3 研究局限与后续研究方向

本文围绕端 - 边 - 云协同环境下移动应用性能

与能耗权衡问题进行了理论层面的分析，但仍存在一定局限性。研究主要基于机制分析和概念建模，未结合具体系统实现或实验数据对相关结论进行验证，因此所得结论更侧重于趋势性和结构性认识。

此外，本文在分析过程中对应用类型和运行环境进行了抽象处理，未进一步区分不同任务负载特性和网络条件对权衡关系的具体影响。在实际系统中，这些因素往往呈现出更为复杂的交互特征，需要在后续研究中加以细化。

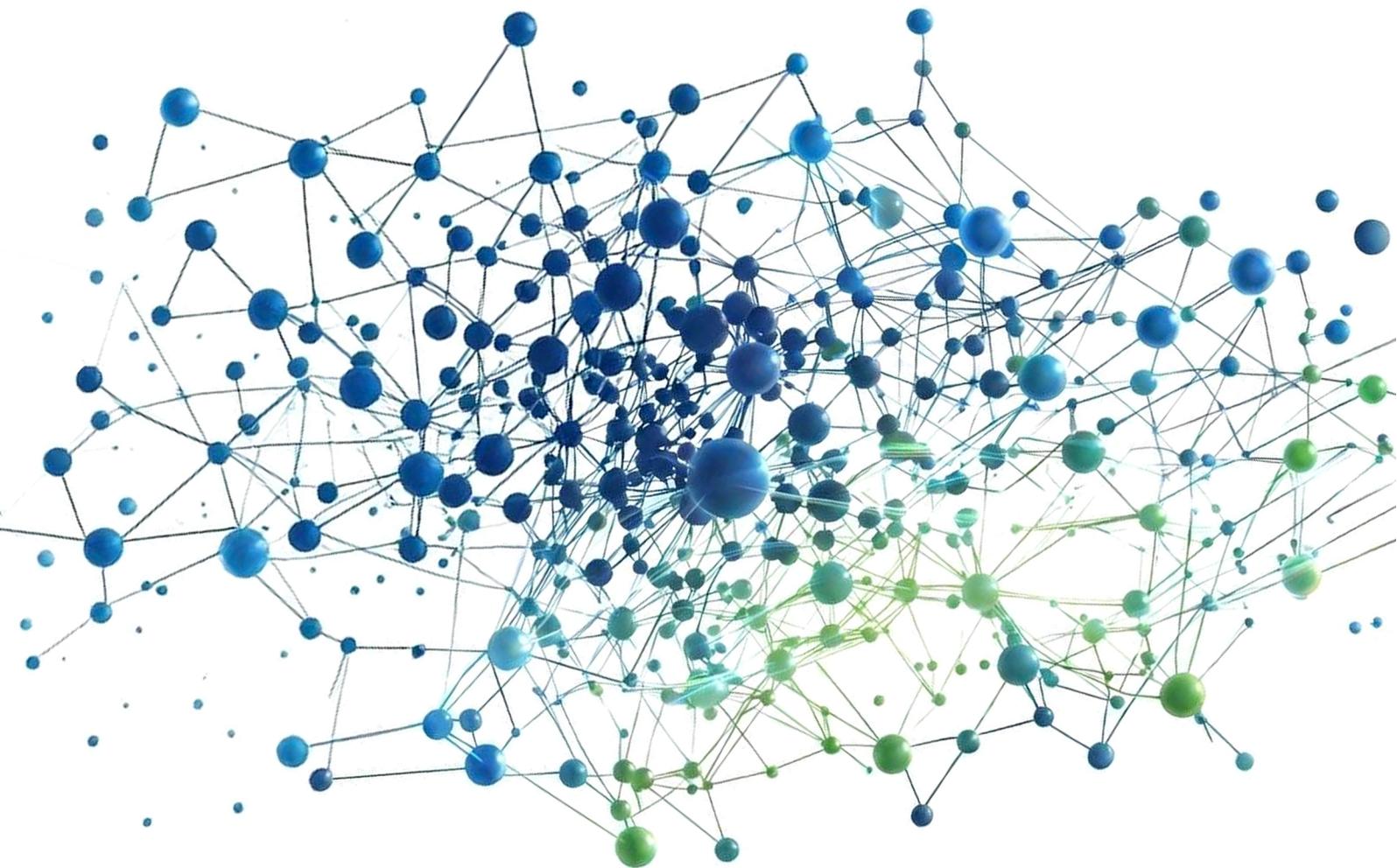
未来研究可在本文分析基础上，引入实验平台或仿真环境，对性能与能耗权衡关系进行定量验证；同时结合具体应用场景，探索更加精细化的协同策略设计方法，以提升端 - 边 - 云协同计算在实际移动应用中的适用性和可操作性 [1]。

参考文献：

- [1] Askar Madiyev, Daulet Bulegenov, Anuar Karzhaubayev, Meiram Murzabulatov & Dinh Mao Bui. Energy-efficient offloading framework for mobile edge/cloud computing based on convex optimization and Deep Q-Network[J]. The Journal of Supercomputing, 2025.
- [2] O. Maraqa, et al. Task offloading strategies for mobile edge computing: A survey[J]. ScienceDirect, 2023.
- [3] 移动边缘计算中基于云边端协同的任务卸载策略 [J]. 计算机集成制造系统, 2021.
- [4] Junlong Zhou, Xiangpeng Hou, Lan Lan, Yan Xu. Cloud-Edge-End Collaborative Computing and Intelligence[J]. 2025.

信息世界： 连接与创新

The Information World: Connection and Innovation



STAR SOURCE PUBLISHING
香港星源出版社



6378 9010