

# 异构网络移动云计算资源配置与计算迁移技术研究

## 研究成果报告

项目“异构网络移动云计算资源配置与计算迁移技术研究”（基金号：61702115）于2017年8月立项，执行期2018-01-01至2020-12-31，依托单位是广东工业大学。经过项目组三年的努力，已在国际著名期刊和会议上发表论文共32篇，其中CCF推荐的B类SCI期刊论文4篇（包括：**TSC 1篇，The Computer Journal 1篇，TITS 1篇，Parallel Computing 1篇**），CCF推荐的C类SCI期刊和会议论文21篇（包括：**ICA3PP 5篇，HPCC 3篇，ISPA 2篇，ICPADS 2篇**）。我们不仅超额完成了项目任务书中规定的各项研究任务，还对与本课题密切相关的热点问题进行了预研，取得了比较好的研究成果。

### （一）结题部分

#### 1. 研究计划执行情况概述

##### （1）按计划执行情况

本项目以高效率、高可靠性、低成本为目标，重点研究异构无线网络（HetNet）下基于服务激励机制的异构网络边缘用户负载迁移机制，探索系统微云节点的最佳部署方法与系统故障恢复等最优化问题的建模与求解等。本项目的主要研究内容包括：宏蜂窝网络边缘用户计算迁移技术、QoS约束下最优微云节点配置研究、面向故障或过载小蜂窝网络用户计算任务迁移技术等。本项目的研究体系与框架见图1。

具体地，在2018年度的研究计划包括：开展课题研究内容的文献收集与研究综述工作，认真研究移动云计算的最新研究成果，找出所提HetNet下问题研究的切入点，规划不同求解目标的研究策略，优化模拟实验仿真平台，完成宏蜂窝网络边缘用户计算迁移问题的研究，投稿并参加国际重要学术会议、投稿国际期刊。在本年度中，项目紧紧围绕异构无线网络下关键问题“**如何激励宏蜂窝网络边缘用户计算迁移问题**”对多网络同时接入设备的富裕无线带宽、宏蜂窝网络（Macro Cell）边缘设备通过小蜂窝网络（Small Cell）设备的中继传输激励方法展开了研究。我们还提前研究了2019年度计划的部分内容，即如何对边缘服务节点进行部署，从而在保障服务质量的基础上，尽可能节省成本。此外，我们还对边-云协同下的单任务执行能耗最优计算负载卸载、边缘设备控制下的端到端协同负载卸载激励机制等进行了研究。

在2019年度的研究计划包括：提出针对不同优化目标的QoS保障下微云节

点部署算法，探索单网络接入和多网络同时接入技术对于系统部署总成本的影响，实现基于干扰图的微云节点部署，使得微云迁移得到的计算任务最大程度并行化。实现部分算法的设计并给出部分算法的模拟实验方案。由于在 2018 年中，我们已经取得了关于此部分的研究结果，因此，我们将在 2019 年度的研究重点确定为面向可变网络环境下的端-边协同高效计算负载卸载。我们分别从具有能量收集功能边缘服务器协助下的终端负载卸载、终端设备随机请求下的高效边缘计算、面向上下文切换（Context Switch）代价最小的边缘计算等方面进行了研究。

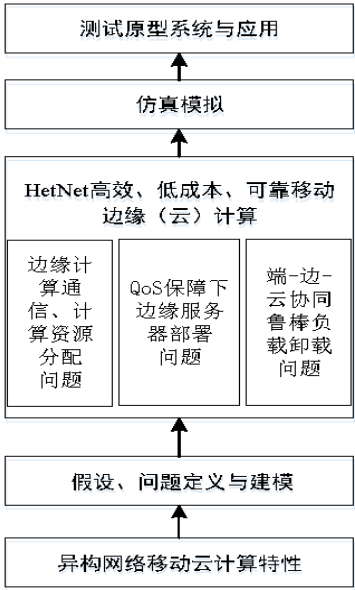


图 1. 项目研究内容

在 2020 年度的研究计划包括：提出面向故障或过载小蜂窝基站移动用户计算任务迁移技术，完成中继选择的负载迁移算法和基于任务缓存备份机制算法的设计，并实现部分算法的模拟，完成相关算法的性能对比，整理研究成果并准备验收结题事项。在 2019 年度研究的基础上，我们重点研究端-边-云协同任务高效卸载，分别从有边-云协同，无边-边协同，以及同时存在边-云协同与边-边协同两方面设计终端复杂计算负载卸载策略。此外，我们将研究拓展到车联网应用场景，以车辆的移动特性为切入点，利用车辆的同向移动特性组成自组织网络，实现计算负载的车-车协同卸载。通过研究高效的算法，我们提高了系统对抗网络拥塞的鲁棒性。

本项目沿着研究方案及确定的研究路线开展研究，按计划按时取得预期各项成果。本项目共发表及录用高水平文章 32 篇，其中包含 CCF B 类 SCI 期刊 3 篇（IEEE Transactions on Services Computing; The Computer Journal; IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems），CCF C 类 SCI 期刊（IEEE Transactions on Cloud Computing, Journal of Supercomputing, Computer Communications 等）及并行与分布式计算、体系结构方向 CCF C 类国际会议

(ICA3PP、HPCC、ICPADS、ISPA 等) Regular 论文 21 篇。申请并已受理发明专利 4 篇。项目负责人协助博士后导师培养硕、博士研究生 10 名。

课题组超额完成了原定计划书中“发表高质量论文 6 篇以上,其中 SCI/EI 论文、CCF 推荐的期刊与会议论文不少于 5 篇,并争取申请专利 2 项,协助合作教授培养研究生至少 4 名以上”的预期目标。具体如表 1 所示。

表 1 项目申报书预期研究成果与实际研究成果对比表

序号	科目	任务书规定的数量	执行情况	备注
1	发表论文数	6	32	
2	SCI/EI 论文 (含源刊待检索)	5	30	SCI 期刊 12 篇
3	CCF 推荐的期刊与会议论文	5	24	CCF B 类期刊 3 篇 CCF C 类期刊、国际会议 21 篇
4	申请专利	2	4	
5	培养研究生	4	10	
6	培养青年教师	0	1	项目负责人留校任教

(2) 研究目标完成情况。

本项目预期实现的目标为：在宏蜂窝网络边缘用户计算迁移方面，针对 HetNet 网络下特有的中继、带宽资源进行分配提供激励机制；在 QoS 约束下最优微云节点配置方面，实现边缘计算服务节点的部署成本最小；在面向故障或过载小蜂窝基站移动用户计算任务迁移上，增强系统的鲁棒性。通过本项目的研究，项目组成员依次实现了本项目的预期目标。首先，通过两阶段博弈策略，将多网络同时接入中继传输节点的富余信道出让给移动终端设备，从而增大系统吞吐率，保障计算负载卸载的传输；其次，通过构造双层拍卖机制，激励了小蜂窝网络设备协助处在网络覆盖边缘的宏基站用户设备，将其计算任务迁移至小蜂窝基站执行；再者，面向边缘服务器处理用户计算请求延迟与边缘服务器负载约束，设计多项式时间复杂度聚类算法实现边缘服务器节点的低成本部署；最后，通过 Lyapunov 优化以及贪心调整策略，本项目将边-边协同与边-云协同结合，实现高效的端-边-云协同计算。具体的完成情况如表 2 所示。

表 2 项目研究目标完成情况表

项目	预期研究目标	实际完成情况
----	--------	--------

目标		
1	<p>宏蜂窝网络边缘用户计算迁移激励机制。目标设定为单一宏蜂窝基站网络通信覆盖边缘用户吞吐率最大、多个宏蜂窝基站网络边缘用户组总吞吐率、最小吞吐率最大以及小蜂窝网络中继传输用户收益最大。</p>	<p>本项目首先将所研究的带宽-中继资源联合分配问题建模成两阶段博弈，第一阶段，我们将多网络同时接入中继的竞争过程使用非合作博弈建模，不同的中继设备之间根据所提供的带宽，采用不同的服务价格相互竞争。在第二个阶段，普通设备选择多网络同时接入中继采用进化博弈进行建模。通过理论分析证明 Nash 均衡存在，采用协作通信提高了网络吞吐率。主要成果：国际期刊 IEEE Trans. on Vehicular Technology 论文 1 篇。研究成果启发同行研究多网络同时接入端到端通信传感器节点数据发送能效优化（GLOBECOM 2018, Ali et al.）、多中继协作传输下发送功率协商激励机制（GLOBECOM 2018, IEEE Trans. on Wireless Communications 2019, Wu et al.）等。</p> <p>其次，我们分析宏蜂窝网络用户与小蜂窝网络用户之间感知计算资源的差异，借助小蜂窝网络用户的协助，帮助宏蜂窝网络覆盖边缘的移动设备申请部署在小蜂窝基站边缘服务器的计算资源。主要成果：国际期刊 IEEE Trans. on Services Computing 论文 1 篇。研究成果启发同行研究车联网环境下的负载卸载激励机制（IEEE Internet of Things Journal, LiWang et al., 2018）、高实时条件下云虚拟机资源分配机制（IEEE Trans. on Services Computing, Gao et al., 2019）等。</p> <p>本项目设计的拍卖算法可以高效完成边缘节点计算资源的配置，可以提高多网络同时接入中继节点的带宽利用率。本项目的方法已与学术界分享<sup>1</sup>。</p> <p>1. <a href="http://omnetsimulator.com/mobile-edge-computing-projects/">http://omnetsimulator.com/mobile-edge-computing-projects/</a></p>
2	<p>在 QoS 约束下最优微云节点配置方面，我们将优化目标</p>	<p>本项目将研究目标划分成两个子问题，分别是终端用户服务质量保障下的微云（边缘服务器）部署位置选择子问题，以及延迟需求保障下的部</p>

	<p>分别设定为需要的微云节点的总数最小，以及为减少传输延迟而使用的多网络同时接入节点费用最小。</p>	<p>署成本最优子问题。针对子问题一，我们考虑边缘服务器的算力有/无约束两种情况分别设计高效的算法来求解。针对子问题二，我们仍然结合边缘服务器算力有/无约束两种情况进行研究。相较于 Top-K 算法（TPDS 2016），本项目提出的解决办法在平均任务响应延迟、部署成本上降低 20%~70%。主要成果：国际期刊 Journal of Supercomputing 论文 1 篇。</p> <p>本项目的研究成果先后被同行引用，启发同行研究移动条件下的最优边缘服务器部署（IEEE Trans. on Industrial Informatics, Cao et al. 2020）、车联网中路边单元的部署（HPCC 2019, Jiang et al.）以及密集部署 5G 基站下的边缘服务器放置问题研究（Pervasive and Mobile Computing, Li et al. 2020）等。</p>
3	<p>在面向故障或过载小蜂窝基站移动用户计算任务迁移上，在满足发送节点所需发送速率需求条件下，均衡中继节点的能耗、最大化源节点在 HetNet 中的发送速率。</p>	<p>我们将研究目标中所涉无线异构网络基站按照高速光纤网络连接，在每一个小蜂窝基站部署边缘服务器节点提供小区内部无线访问接入服务。宏基站连接的远程云服务器提供云计算服务。针对数据流式任务，我们设计 Lyapunov 优化策略研究端-边-云协同计算负载卸载下的能量延迟权衡，利用边-边协同应对端-云链路的拥塞。相关成果在线发表在 Computer Communications 上。</p> <p>针对具有依赖关系的计算任务，我们研究边-边协同与边-云协同下，以及端-边-云协同下的高效负载卸载方法，保障边缘节点与远程服务器的效用。相关成果在线发表在 IEEE Trans. on Cloud Computing 上。</p> <p>通过边-边协同与边-云协同，我们增大了系统面对大规模处理任务或者网络拥塞下的鲁棒性。</p>

综上，本项目的实施所达成的研究目标完全覆盖了预期研究目标。并且，基于我们已有的研究成果，面向具体应用场景，在区块链应用边缘计算任务卸载、

车联网边缘计算等研究方向进行了拓展研究。

## 2. 研究工作主要进展、结果和影响。

### (1) 主要研究内容。

本项目以高效率、高可靠性、低成本为目标，重点研究异构无线网络下基于服务激励机制的异构网络边缘用户负载迁移机制，探索系统微云节点的最佳部署方法与系统鲁棒性增强问题的建模与求解。我们主要针对以下挑战进行研究。

- 由于无线异构网络本身的特性，例如移动设备的通信范围不同，基站的覆盖半径相异。在实际运行过程中，宏基站可能存在拥塞，或者宏基站用户处于宏基站通信覆盖范围的边缘。若不对边缘宏基站用户的计算请求进行迁移分流，其服务质量就会受到负面影响。在 HetNet 中，一方面如果增大边缘宏基站用户的发送功率实现分流，则会对周围的临近小蜂窝网络用户造成干扰。另一方面，边缘宏基蜂窝网络用户的能耗会随着发送功率的增大而增长。因此，在分担宏基站的计算负载或提高边缘宏蜂窝网络用户的接入可靠性时如何对干扰进行控制是一个挑战。

- QoS 约束下最优微云节点部署研究的网络拓扑结构不是完全给定的。在同一时刻，移动用户在网络里的分布以及移动设备对于云计算资源的请求情况不同。因此，在用户资源请求密集的小蜂窝网络里应适当多部署微云（边缘服务器）节点。然而，为了保证公平性，在尽可能优先部署微云节点到移动用户密集的小蜂窝网络时需要兼顾其他小蜂窝网络用户的服务延迟需求。

- 现有研究将远程云看成是特殊的边缘云服务器节点，而忽视了边缘服务器与远程服务器之间的特有属性。若远程网络信道由于障碍物遮挡、天气等原因，出现高信道衰减时，小蜂窝基站及其部署的边缘服务器就可以及时为移动终端设备用户提供所需计算服务。然而边缘服务器与远程服务器协助终端设备计算需要消耗其自身的资源，例如处理器算力、存储等。因此，在为终端用户提供实时、可靠的计算任务卸载服务的同时，需要保障边缘服务器、远程云服务器的效用或收益。

主要研究内容（包括拓展研究）有：

- ① 异构网络中多网络同时接入节点的富余带宽再分配研究。通过利用多网络同时接入节点的带宽，并进行协作传输，可在降低网络中源节点的发送功率的同时取得需要的带宽。通过这种方式，将减少对于邻居节点的功率干扰。

- ② 异构网络宏蜂窝网络信号弱覆盖区域用户计算负载卸载激励机制研究。在分散的网络环境中，通过小蜂窝网络用户的中继传输，将为弱覆盖区的宏蜂窝网络用户提供接入到部署在小蜂窝基站的边缘服务器的可能。由于这些设备由用户持有，具有自私性。为此，需要设计经济学激励机制，激励网络中的用户设备

参与到协同计算卸载服务中。

③ 面向网络用户计算卸载任务请求，研究响应时间最优下的边缘服务器节点部署与 QoS 延迟约束下的最小费用部署问题。边缘服务器的部署问题是移动边缘计算的基础问题之一。在此基础上，拓展研究单任务能耗最优、总任务执行时间与总能耗之间的权衡等问题。

④ 为增强异构网络移动云计算服务的鲁棒性，研究端-边-云协同计算任务负载卸载方法。特别地，针对端-云信道拥塞或通信链路故障，研究边-边协同计算鲁棒性保障策略。针对大规模应用，设计高效的近似算法求解终端设备任务卸载策略。

⑤ 针对车联网与区块链应用，分别研究车联网路边单元部署边缘服务器以及车-路协同高效计算，以及终端设备区块链共识算法计算任务高效卸载等。

下面的章节将针对上述主要研究内容对取得的主要成果进行详细阐述。

(2) 取得的主要研究进展、重要结果、关键数据等及其科学意义或应用前景。

## I 宏蜂窝网络边缘用户计算迁移技术研究

在无线异构网络中，发送功率与干扰密切相关。使用协作通信（Cooperative Communication）在保障信道带宽的同时可以进一步通过中继节点的转发降低发送功率。为顺利将移动终端用户的计算任务卸载至小蜂窝网络基站上的边缘服务器，我们分别对多网络同时接入中继节点的带宽、边缘服务器的计算资源进行分配，研究相应的经济学激励机制。由于资源的配置是完成计算任务迁移的先要条件，因此该问题是本项目研究的一个重点。我们还对能量收集边缘服务器节点负载卸载、多中继协同高效负载卸载等问题进行了研究。所取得的代表性成果如下：

◆ **Long Chen, Jigang Wu, Hong-Ning Dai and Xiaoxia Huang.** BRAINS: Joint bandwidth-relay allocation in multihoming cooperative D2D networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.6 (2018): 5387-5398. (中科院二区, JCR Q1 区)

作为新兴的技术，协同端到端通信技术用于解决通信带宽受限问题。将多网络同时接入技术与协同端到端通信技术结合，将会进一步提升异构网络（HetNet）资源的利用效率。为此，我们提出了一个新颖的多网络同时接入端到端通信网络体系结构。在这个网络中，具备有多网络同时接入功能的移动设备（简称 MMD，Multiple-Homing Device）作为中继节点，帮助普通的移动设备（简称 OMD，Ordinary Mobile Device）进行无线通信传输。我们将所研究的带宽-中继资源联合分配问题建模成两阶段博弈模型，用于解决如下两方面的挑战：1）如何设计

激励机制，激励 MMD 设备向 OMD 设备出售空闲带宽；2) 如何帮助 OMD 设备选择合适的 MMD 设备进行中继通信。为此，在问题求解的第一阶段，我们将 MMD 中继的竞争过程使用非合作博弈建模，不同的 MMD 中继设备之间根据所提供的带宽，采用不同的服务价格相互竞争。在第二个阶段，OMD 设备选择 MMD 中继设备的过程采用进化博弈进行建模。通过理论分析，我们证明博弈过程存在着 Nash 均衡。然后，我们设计了一个分布式的 IMES 算法来解决通信-中继资源联合分配问题。仿真模拟实验证明，在处于竞争关系的两个 MMD 设备中，当一个 MMD 设备的要价升高时，另一台中继设备的最优策略也是提高要价。与随机算法相比，提出的算法在多个场景中均能有效降低通信延迟达 25% 以上。与已有的算法相比，提出的 IMES 算法可以显著提升 MMD 中继设备的效益。

◆ **Long Chen, Jigang Wu, Xinxiang Zhang, Gangqiang Zhou.** TARCO: Two-Stage Auction for D2D Relay Aided Computation Resource Allocation in Hetnet, IEEE Transactions on Services Computing 2018 (CCF B)

在异构蜂窝网络中，计算任务的高效卸载问题是具有挑战性的研究热点问题之一。大多数已有的研究集中于通过转移宏蜂窝基站用户的计算任务到小蜂窝基站的方式，减轻宏蜂窝基站的负载。然而，网络用户的自私性往往被忽视。受到移动云计算的启发，我们设计了将宏基站用户的计算任务通过小蜂窝基站用户中继转发到小蜂窝基站的激励机制。计算任务卸载问题被建模成两阶段的拍卖模型。远程宏基站用户形成群组，以团购的方式向小蜂窝基站节点购买中继传输资源以及小蜂窝基站的计算资源。我们设计的**拍卖算法 TARCO**可以增大小蜂窝基站中继用户和远距离宏基站用户的效益。此外，我们设计两个改进的算法进一步提升网络节点的总效益和远程宏基站设备的效益。仿真实验结果表明，我们的算法 TARCO 比随机算法在中继的效益上平均提升 104.90%。改进的算法进一步提升 TARCO 的效率达 28.75% 和 17.06%。

◆ **Yifei Sun, Jigang Wu, Long Chen, Tonglai Liu, Mianyang Yao, Weijun Sun.** Latency optimization for mobile edge computing with dynamic energy harvesting, 17th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Processing with Applications, 2019 (CCF C 类会议)

在移动边缘计算中，能量收集能够保证电池供电移动设备的持续性工作。然而，大多数现有的移动边缘计算中同时考虑任务卸载和能量收集的研究工作没有考虑到任务之间的依赖性和动态能量收集。任务依赖关系决定了任务执行的前后顺序，直接将现有算法应用于具有依赖关系的任务卸载问题上可能会导致算法失



效。同时，大多数已有的能量收集研究工作假设能量收集和任务执行能够在在一个时隙内完成，然而有些移动设备一个时隙内收集的能量并不能满足任务的执行需求，需要分配更多的时隙用于收集能量，因此需要动态地为移动设备分配收集能量所用的时隙。为此，我们提出了一个同时考虑任务依赖关系和动态能量收集的模型，并对任务完成时间最小化问题进行了数学形式化表达，证明了该问题是 NP-Hard 的。针对移动设备能量收集问题，我们基于无线能量传输技术（Wireless Power Transfer）设计了一个动态能量收集策略，主要通过动态分配能量收集的时隙来解决这一问题。此外，我们设计了一个贪心算法将具有任务依赖性的子任务优先转移到完成时间最少的地方执行，在此基础上，我们设计了一个模拟退火算法，对贪心算法生成的解进行优化。实验结果表明，提出的算法在任务完成时间方面优于随机算法。同时，在算法的运行时间方面，提出的贪心算法的性能优于模拟退火算法。

◆ Zikai Zhang, Jigang Wu, **Long Chen**, Guiyuan Jiang, Siew-Kei Lam. Collaborative Task Offloading with Computation Result Reusing for Mobile Edge Computing, The Computer Journal 10.62 (2019): 1450-1462. (CCF B)

由于无线网络环境的实时动态变化，平衡移动边缘计算的能耗和延迟的计算任务迁移问题仍然是一个极具挑战性的问题。为了在降低能耗的同时满足移动应用的延迟约束，我们通过充分利用基站的存储资源以及复用任务的可重用计算资源，提出了一种面向 HetNet 的访问控制管理架构。针对依赖实时信息的移动应用，提出了两种能同时兼顾能效与计算延迟的算法来实现任务迁移。针对系统环境变化较少的场景，我们提出一种基于动态规划的最优静态算法，以获得最优的任务迁移方案。针对系统环境变化频繁的场景，我们提出了一种两阶段**在线算法**，以实时地自适应地获得当前状态的最优任务迁移方案。实验结果表明，在系统环境变化较少的场景中，提出算法的运行速度是穷举算法的 4 倍。在系统环境变化频繁的场景中，与现有算法 ARHOS（Zhang et al. 2015, TWC）相比，我们提出的算法平均降低了 16.3% 的能耗。此外，与现有算法 MDM（Lyu et al. 2016, IEEE Communications Letters）相比，我们所提出的算法平均降低了 25% 的计算延迟约束违规率。

◆ Mianyang Yao, **Long Chen**, Tonglai Liu, Jigang Wu. Energy efficient cooperative edge computing with multi-source multi-relay devices. 21st IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications HPCC 2019. (CCF C)

作为云计算的扩展,多接入移动边缘计算(MEC, multi-access edge computing)可以更好地支持应用程序完成更大的任务。现有的 MEC 系统能耗优化研究未充分利用多中继协作传输。中继节点可以帮助源节点完成负载卸载,对降低移动设备的计算功耗起重要作用。我们提出了一种在正交频分多址复用无线网络中使用多源、多中继和单边缘服务器的新型计算架构。移动设备上的应用程序任务可以在本地计算、卸载到中继设备并在中继设备上完成、直接卸载到边缘服务器或通过具有协作通信的中继设备卸载到边缘服务器并在边缘服务器上执行。本文的两个优化目标分别是总能耗最小化问题和最小化最大的源-中继器能耗设备对问题。对于第一个子问题,我们设计了基于二分匹配的最优总能耗算法(OTCA, Optimal Total Energy Consumption Algorithm)。针对第二个子问题,我们设计了一个具有  $(1+\epsilon)$  近似比的最优能耗分配算法(OECAA, Optimal Energy Consumption Assignment Algorithm)。仿真结果表明,在总能耗优化方面,OTCA 算法比随机算法平均提升 53.14%,在最小化最大的源-中继器能耗设备对问题上,OECAA 算法比 OTCA 算法平均提升 30.58%。

◆ Qiankun Yu, Jigang Wu, **Long Chen**. POEM: Pricing Longer for Edge Computing in the Device Cloud, International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, 2018: 355-369. (CCF C)

作为一种新兴技术,边缘计算通过在移动用户邻近部署边缘服务器,可将计算服务下沉到移动用户。在移动设备云中,空闲的移动设备可充当边缘服务器,以为繁忙的移动设备提供计算服务。大多数用于移动设备云的基于拍卖理论的激励机制只关注一轮拍卖,并且没有考虑到时间相关性。已有的单轮拍卖机制可以被多次执行。但是,当移动用户为获得更多的资源以较高的出价进行交易时,他们将很快耗光预算并无法参加下一轮拍卖,从而导致整个拍卖失效并损害系统的整体利益。为解决上述问题,我们将计算卸载问题构建为一个受限于移动设备预算越算的社会效益优化问题。由于该问题可规约为一个多选择多维背包问题,它是一个 NP-hard 问题。为此,我们提出了一个可获得长期利益的拍卖机制。在该拍卖机制中,每一时隙只执行一次资源拍卖。实验结果表明,与现有单轮拍卖机制相比,提出的拍卖机制提高了 55.6% 的移动用户平均收益。此外,与现有的双拍卖机制 WBD(Wang et al., INFOCOM 2017)相比,提出的拍卖机制提高了 68.6% 的移动用户效用。

## II QoS 约束下最优微云节点配置

微云节点(Cloudlet)或边缘服务器节点在现有的研究中大多假设已提前部

署在网络当中，且鲜有部署成本优化研究。在满足用户的延迟需求以及实际应用中给定若干备选部署区域下，面向用户的动态请求部署边缘服务器节点问题往往是 NP-难解性问题。为此，我们主要面向无线异构网络以及传感网络节点感知半径受限两种不通场景，分别设计高效的边缘服务器部署算法以及多阶段拍卖算法，对边缘服务器的位置进行部署，以及为用户选择满足延迟、成本需求的边缘服务器节点。课题组所取得的代表性研究成果如下：

◆ **Long Chen, Jigang Wu, Gangqiang Zhou, Longjie Ma.** QUICK: QoS-guaranteed efficient cloudlet placement in wireless metropolitan area networks. *Journal of Supercomputing* 2018, 74(8): 4037-4059. (CCF C, 中科院 3 区)

我们研究城市局域网边缘服务器部署问题，谋求移动用户的计算任务请求平均响应时间最小。与此同时，我们希望部署的总成本最小。针对以上两个不同的研究目标，我们分别考虑微云处理能力有限与无限两种不通的情形研究相应的节点部署方案。通过设计贪心与聚类方法的设计，以及实验仿真，我们提出的方法比现有的方法 Top-K (Jia et al. 2015, TCC) 平均节省 46% 以上的延迟，以及多达 50% 的部署成本。其创新性在于提出了 QoS 保障下的边缘服务器部署快速算法。该部分研究成果基于我们先期的预研结果，分别以 Regular paper 发表在 CCF 推荐 C 类国际会议 CCGrid 2017，以及 CSCWD 2017 上。

◆ **Gangqiang Zhou, Jigang Wu, Long Chen, Guiyuan Jiang, Siew-Kei Lam.** Efficient three-stage auction schemes for cloudlets deployment in wireless access network, *Wireless Networks*, 25 (2019): 3335-3349. (CCF C)

已有工作对如何通过微云部署与资源分配来解决移动用户计算资源稀缺问题展开了广泛研究。然而，大多数已有工作未能联合考虑这两种方法，并忽略了微云和接入点的自私性。在团购机制的启发下，本文提出一种微云部署与资源配置相结合的三阶段拍卖机制，以在满足经济属性的前提下最大化社会效益。本文首先根据接入点覆盖范围将移动用户划分为多个小组。然后，在同一个小组中的移动用户可以通过接入点以团购的方式与微云进行交易。如果赢得交易，移动用户将向微云付费。同时，本文证明了所提出的拍卖机制具有多项式时间的算法复杂度并满足拍卖理论中的经济属性。此外，本文将所提出的拍卖机制与现有的一种集中式非拍卖形式的算法 (HAF) (Jia et al. 2017, TCC) 进行性能比较。实验结果表明，本文所提出方案更具有效性。我们的研究先后启发研究者 Mazouzi 等 (ACM Trans. on Internet Technology, 2019) 研究异构计算任务（某些计算任务只能在本地完成，另一些类型的任务可以卸载）下的费用最小边缘服务器部署；启发 Yang 等 (IEEE Internet of Things Journal, 2020) 采用我们提出的算法进行多

轮运行实现智能计算边缘服务器的部署。

### III 故障或过载小蜂窝基站移动用户计算任务卸载与迁移

由于异构网络中无线信道环境的动态变化,终端设备执行复杂计算任务卸载时,常常会遇到无线网络由于设备故障或者拥塞,或者由于障碍物的遮挡效应,造成终端设备与远程宏基站的连接受阻。单纯的端-云协同负载卸载模式已无法满足移动应用高实时、高可靠的需要。为此,将边缘服务器节点部署在小蜂窝基站或者局部区域内部,将实现端-边-云协同计算。在这种计算体系结构下,难免会因为请求的差异以及设备的异构,导致边缘服务器的繁忙空闲程度不一。因此,有些边缘服务器会拥有大量的空闲计算资源,而有些边缘服务器的计算资源紧张。通过增加边缘服务器之间的协同计算,将有效缓解这一状况。所取得的代表性成果如下:

◆ **Long Chen, Jigang Wu, Jun Zhang, Hong-Ning Dai, Xin Long, Mianyang Yao.** Dependency-Aware Computation Offloading for Mobile Edge Computing with Edge-Cloud Cooperation, IEEE Transactions on Cloud Computing, 2020 (CCF C, 中科院 2 区)

在现有的移动边缘计算研究中,研究者往往将远程云服务器节点看成是一个特殊的边缘服务器,而边缘服务器与云服务器之间的协同计算任务卸载问题仍有待进一步探索。我们提出了面向依赖关系任务图(例如机器学习训练或推理任务)的计算负载卸载方案。每一个移动终端设备用户拥有自己的预算限制,且设备需要在基站的辅助下完成决策,确定将哪些计算子任务卸载到边缘服务器,哪些计算子任务卸载到远程云服务器。为此,我们将负载卸载决策问题划分为两个 NP 难解性子问题,以最小化总计算任务的完成时间。子问题一研究边-云协同,无边-边协同计算。我们为此设计近似比为  $1+\epsilon$  的算法实现终端设备计算任务的卸载。子问题二研究网络中同时存在边-云协同与边-边协同计算。为此,我们证明了问题的不可近似性,并提出了贪心策略实现协同计算。通过搭建端-边-云测试原型系统,我们验证了算法的有效性。实验表明,在同等网络配置条件下,我们提出的方法比 Hermes (INFOCOM 2015) 算法平均降低任务完成时间达 23%~43.6%。通过边边协同计算,可进一步提升至少 20% 以上的平均性能。

◆ **Long Chen, Jigang Wu, Jun Zhang.** Long-term optimization for MEC-enabled HetNets with device-edge-cloud collaboration. Computer Communications, 2020, 166:66-80 (CCF C, 中科院 3 区)

为了通过多接入移动边缘计算 (MEC) 进行有效的计算分流,需要考虑通

信以及移动用户的请求动态性（例如由于用户移动造成的计算请求的变化）。现有的大多数工作都将远程云服务器视为特殊的边缘服务器。但是，当某些边缘服务器无法连接时，将无法满足服务质量。此外，云的计算能力尚未得到充分利用，尤其是在边缘服务器时拥挤。我们设计了在线卸载决策和计算资源管理算法共同保障设备-云，边缘-边缘和边缘-云之间的协作。目的是根据服务器节点计算能力和任务缓冲区约束，将系统的总能耗降至最低，并保证计算任务处理队列的稳定性。为此，我们使用李雅普诺夫优化技术对延迟-能耗权衡进行研究，并保障系统负载均衡。通过算法的实施，我们可以确定最佳的 CPU 周期频率，最佳的传输功率和卸载调度策略。大量的模拟结果表明，系统控制参数 $V$ 的变化范围为 $[0.1, 5] \times 10^9$ ，相比于已有的基准比较算法边-边协同计算方法 Debts（Yang et al. 2018, IEEE Internet of Things Journal），以及端-边两层边缘计算算法（Mao et al., 2017, TWC），我们提出的算法可以节省 50% 以上的能耗和 120% 以上的任务平均处理时间。

◆ Xin Long, Jigang Wu, **Long Chen**. Energy-Efficient Offloading in Mobile Edge Computing with Edge-Cloud Collaboration, 18th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (CCF C)

多接入移动边缘计算作为一种使计算资源接近终端移动用户的新兴技术，通过在 WiFi 接入点或蜂窝基站部署边缘服务器，可扩展移动用户的计算能力。现有工作大多假设远程云服务器可被视为一个特殊的边缘服务器或边缘服务器愿意无条件合作。在现实应用上，由于边缘服务器及远程云服务器可能为不同运营商所有，这是不可行的。在这项工作中，我们提出了一个边缘云协作架构，其中边缘服务器可以租用远程云服务器，以加快来自移动用户的任务的计算。基于此体系结构，计算卸载问题被建模为混合整数规划问题。我们提出了一个贪心算法以及模拟退火算法，以有效地解决该问题。大量的仿真结果表明，提出的贪心算法和模拟退火算法可以实现近乎最佳的性能。实验结果表明，贪心算法只需增加 31% 的能耗，就可实现与蛮力法相同的应用程序完成时间。

#### IV 不同应用场景下的移动边缘计算计算任务迁移研究

在确保完成既定研究计划的同时，我们还挖掘不同的应用场景，例如车联网、区块链计算任务卸载等进行了研究，并取得了较好的成果，代表性文章如下：

◆ Yalan Wu, Jigang Wu, **Long Chen**, Jiaquan Yan, Yuchong Luo, Efficient task scheduling for servers with dynamic states in vehicular edge computing, Computer Communications 2020 (CCF C, 中科院 3 区)

车载边缘计算已成为一种具有吸引力的范式,其通过密集部署具有边缘服务器的路边计算单元(Road side units, RSUs),可提供延迟敏感型和丰富多媒体功能的计算服务。但是由于地域差异和能源效率,RSUs之间的计算负载严重失衡,同时,为了节省能源,RSUs的状态可在睡眠及工作之间切换。本文面向车载边缘计算中RSUs的状态可以动态地在睡眠和工作状态之间切换,提出了一个新的任务调度模型。其中,车载任务请求建模为独立同分布流,且每个边缘服务器建模为一个简单的M/M/1排队系统。本文构造了一个最小化任务总时延的问题,且证明该问题是NP难的。为解决该问题,本文提出了一个贪心算法。同时,本文定制了一个禁忌搜索算法,以提升所提出的贪心算法的性能。此外,本文提出了一个基于深度Q值网络的算法,其利用深度强化学习来学习最优调度策略。仿真实验结果表明,在任务总响应时间方面,基于深度Q值网络的算法性能表现最佳。所有提出的算法性能比随机算法好。例如,在每个任务最大可容忍的响应时间为14s的情况下,与定制的禁忌搜索算法、贪心算法及随机算法相比,基于深度Q值网络的算法可分别减少24.13%,28.73%以及35.95%的任务总响应时间。

◆ Yalan Wu, Jigang Wu, **Long Chen**, Gangqiang Zhou, Jiaquan Yan, Fog Computing Model and Efficient Algorithms for Directional Vehicle Mobility in Vehicular Network, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2020 (CCF B, 中科院1区)

车载雾计算(Vehicular fog computing, VFC)已成为一个吸引力的范式,其可为车辆和交通系统提供计算服务。然而,车辆的高移动性成为了通信和计算服务质量的一个重大挑战。在VFC中,为了保障车辆的服务质量,本文提出了一个基于方向性移动车辆的网络模型。在该模型中,根据车辆在下一个十字路口的转向,将车辆划分为三个子网。在每个子网中,车辆之间通过车与车(Vehicle-to-vehicle, V2V)通信,车辆与路边计算单元(Road side unit, RSU)之间通过车到基础设施(vehicle-to-infrastructure, V2I)通信。在该模型中,我们的目标是最小化平均任务响应时间。为解决该问题,我们提出了一个贪心算法,其通过选择邻近车辆作为任务处理协助者,从而最小化任务的平均响应时间。此外,我们利用Kuhn-Munkras方法和最小花费最大流方法,提出了两个基于二分匹配的算法,记为BMA1和BMA2。我们通过Open Street Map, SUMO和NS-3组成模拟平台,从而评估提出的模型和算法。仿真模拟实验表明,当失败的任务数量相近时,提出的模型比现有模型在平均响应时间上性能较好。此外,在任务平均响应时间方面,BMA1和BMA2性能比现有贪心算法性能好,且提出的贪心算法

能显著加速 BMA1 和 BMA2 以及现有的贪心算法。

◆ Xin Long, Jigang Wu, Yalan Wu, **Long Chen**. Task merging and scheduling for parallel deep learning applications in mobile edge computing, 20th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (EI, 扩展版本已推荐至 CCF B 类期刊 Parallel Computing, Accepted)

◆ Xin Long(#)(研究生), Jigang Wu(\*) (博士后合作导师), Yalan Wu(研究生), **Long Chen**(\*), Yidong Li, Context Switch Cost Aware Joint Task Merging and Scheduling for Deep Learning Applications, Parallel Computing, 102(2021): 102753, 2021. (CCF B 类)

移动边缘计算使得在计算资源有限的终端设备上可以执行计算密集型应用程序，例如深度学习应用程序。然而，由于深度学习应用需要密集的计算和计算过程中数百万计的模型参数，应用在移动边缘计算中面临性能瓶颈。本文考虑在移动边缘计算环境下并行计算深度学习应用。通过考虑处理器的占用分配及上下文切换成本，我们构造了最小化完成时间问题，并证明其为 NP 难问题。为此，我们提出一种融合调度算法。该算法通过将子任务进行融合为一个新的任务来减少上下文切换成本，同时通过调度来并行计算深度学习应用。本文搭建了一个分布式平台来评估提出的算法。实验结果表明，本文提出的融合调度算法相比于现有的冗余融合算法 RTM (Parsa et al. 2010, LNCS volume 5938) 与模拟退火算法 (Gangadharan et al. 1994, Computers and Industrial Engineering) 在应用平均完成时间方面分别减少了 63% 和 75%。同时，与现有算法相比，我们提出的算法几乎没有额外的控制开销。

◆ Yinan Li, Jigang Wu, **Long Chen**. POEM+: Pricing longer for mobile blockchain computation offloading with edge computing. 21st IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, HPCC 2019. (CCF C)

区块链作为一种有效的安全解决方案，已应用于许多移动设备。但是由于存储和计算能力的限制，移动设备很难在本地运行区块链应用程序。为了解决这一挑战，区块链应用程序可被卸载到移动边缘计算（简称 MEC，Mobile Edge Computing）的边缘服务器上执行。然而，大多数现有的移动区块链拍卖机制并没有利用并行执行，长期性能保证也没有解决。为提高拍卖参与者的总效用，本文研究移动区块链计算任务卸载问题。该问题是一个多维多选择背包问题，已被证明为 NP-hard。为解决该问题，本文提出了一个名为 POEM+ 的拍卖机制。POEM+ 可以卸载一个移动用户的任务，边缘服务器上的异构边缘服务。本文从

理论上证明了 POEM+满足个体合理性、预算平衡性、真实性和计算效率等经济特性。仿真和现实实验都表明，与现有的异构任务双拍卖 WBD 相比，POEM+的效用提高了 130.6%，平均分配效率提高了 138.77%。此外，POEM+的长期性能也可以保证。

◆ Xuelian Liu, Jigang Wu, **Long Chen**, Chengpeng Xia. Efficient Auction Mechanism for Edge Computing Resource Allocation in Mobile Blockchain. 21st IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications HPCC 2019. (CCF C)

区块链技术已被广泛应用于金融、物联网、法律等各个领域。然而，将区块链技术应用移动应用是一个挑战，因为移动设备无法承担挖掘过程所需的计算资源。本文提出了一种基于组合双拍卖的机制，将矿工的开采过程转移到边缘服务器上。这个机制被表述为一个资源分配问题，提出的分配算法和支付方案分别用于配资源和计算交易价格。此外，本文还证明了所提出的机制在计算上是有效的，并满足经济拍卖的三个性质，即预算平衡、个体合理性和真实性。实验结果表明，该机制具有较高的总效用和良好的可扩展性。在 900 名采矿者参与拍卖的情况下，提议机制的总效用比两件现有研究平均分别高出 39.2%和 569.9%。

3. 研究人员的合作与分工。

项目研究过程中，项目负责人主要负责课题整体规划、课题关键难题的攻关与协助博士后合作导师武继刚教授培养硕、博士研究生。研究生徐凯、占善华、贺子楠、左超由于研究方向切换，离开课题组。研究生马隆杰主要负责研究内容 QoS 保障下的边缘节点部署问题算法实现以及课题预研阶段的实验。周刚强、章子凯、罗裕崇、张新想、于乾坤、李一男、吴亚兰、龙鑫、姚绵阳等分别对各研究内容的派生子问题、不同应用场景下的复杂计算任务卸载问题进行了研究与算法实现。李嘉兴受课题组云计算启发，研究区块链云存储的安全保障机制。吴嘉鑫负责对课题组未来研究方向进行预研。

各位研究人员的合作与分工情况具体如表 3 所示：

表 3 项目主要参与者及分工情况

编号	姓名	职称	分工	备注
1	陈龙	博士后	关键技术研究与研究点规划	项目负责人，协助合作导师培养研究生
2	武继刚	教授	团队管理与研究质量管理	研究生导师
3	徐凯	博士生		2018 年退出



4	占善华	博士生		2018 年退出
5	马隆杰	硕士生	项目前期预研实验、QoS 保障下边缘节点部署问题实验	2018 年 6 月毕业, 获研究生国家奖学金 (见 <a href="https://hpcds.gdut.edu.cn/">https://hpcds.gdut.edu.cn/</a> )
6	周刚强	硕士生	研究内容 2 子问题边缘服务节点选择激励机制研究与实验仿真	2018 年 9 月中山大学攻博
7	贺子楠	硕士生		2018 年退出
8	罗裕崇	硕士生	研究内容 1 派生问题车联网应用场景下动态计算任务卸载请求问题实验仿真	2019 年硕士毕业, 获研究生国家奖学金 (见 <a href="https://hpcds.gdut.edu.cn/">https://hpcds.gdut.edu.cn/</a> )
9	左超	硕士生		2018 年退出
10	李嘉兴	博士生	区块链端到端存储技术与实验 (拓展研究方向)	硕转博, 受课题组云计算启发
11	张新想	硕士生	HetNet 中继协助边缘卸载资源分配算法实验仿真	2019 年研究生国家奖学金
12	吴嘉鑫	博士生	面向 D2D 协助的分布式训练任务卸载建模与仿真实验	硕转博, 2020 年中加入 (对未来研究方向预研)
13	章子凯	硕士生	可重用子任务端-边负载卸载研究与算法设计	2018 年 1 月~5 月加入, 2018 年 9 月北京交通大学攻博
14	吴亚兰	博士生	车联网应用场景下车-车及车-路协同计算负载卸载研究与算法设计	硕转博, 2018 年加入
15	龙鑫	硕士生	端-边-云协同计算任务卸载算法实现与测试床平台实验	本科免试推荐研究生 2018 年 9 月-2020 年 10 月加入
16	于乾坤	硕士生	端-端协同计算任务卸载激励机制研究与算法实验	2018 年 3 月-2018 年 5 月, 2017 级, 中国电信

17	李一男	硕士生	终端设备用户长时效用保障下的区块链计算任务卸载算法设计与实现	2018 年 3 月-2019 年 2 月, 2017 级, 南方电网
18	姚绵阳	硕士生	面向多源多中继的移动边缘计算负载卸载问题研究与算法实现	2020 级硕士, 本科生免试推荐研究生 2019 年 3 月加入

#### 4. 国内外学术合作交流等情况。

在国际学术交流方面, 项目申请者及所在的研究团队与国内同行建立了密切的合作关系。我们和澳门科技大学的戴弘宁博士、中山大学的黄晓霞教授等建立起了合作关系。受项目直接资助, 项目负责人在 2018 年 8 月至 2019 年 3 月赴香港科技大学电子及计算机工程学系, 与张军博士(现香港理工大学电子及信息工程学系副教授)在移动边缘计算课题上进行了合作研究, 发表 IEEE Trans. on Cloud Computing 与 Computer Communications 期刊论文各 1 篇(具体成果列表见张军博士个人主页 <http://www.eie.polyu.edu.hk/~jeiezhang>)。受项目资助, 课题负责人 2019 年暑期赴中国科学技术大学苏州研究院、中国科学技术大学(合肥)同徐宏力教授进行了学术访问交流, 以及时掌握本领域和相近领域内的最新研究动态。此外, 本课题组积极支持课题成员参加国际会议和国内的学术会议。例如 2018 年课题组派出多位硕士研究生参加 ICA3PP'18 国际会议, 并在大会上做了 5 次分组报告, 以增进与国内外同行的合作与交流。2019 年, 课题组获 HPCC'19 录用 Regular 论文 3 篇, 派出多名研究生参加大会并做分组报告。这些学术交流活动为本项目的开展营造了一个良好的学术氛围。

2019 年与 2020 年, 课题组多次积极参与中山大学数据科学与计算机学院举办的智能边缘计算研讨会, 了解到中山大学陈旭教授、上海科技大学杨旻教授、广东工业大学许杰教授、上海交通大学吴帆教授等的研究成果, 并同专家积极交流。2019 年 3 月, 课题组协办了粤港澳大湾区研究生论坛(详见中国计算机学会网站 <https://www.ccf.org.cn/c/2019-03-29/661266.shtml>, 以及团队网站对此次学术交流活动的报道 <https://hpcds.gdut.edu.cn/info/1063/1441.htm>), 邀请多位移动云计算领域的专家学者与会, 取得了良好的效果, 特别是张军副教授、吴方照博士、黄晓霞教授等关于智能边缘计算与无线网络优化的精彩演讲, 引起了广泛的兴趣和深入的讨论。

#### 5. 存在的问题、建议及其他需要说明的情况。

项目重点研究了异构无线网络下的通信资源、中继传输资源、边缘服务器计

算资源配置，以及终端设备复杂计算任务的卸载与计算迁移执行。这些研究大多假设网络状态，例如信道增益、RSSI 信息已知或部分可知，或者边缘服务器的算力是确定的。然而在实际平台环境下，网络信道状态会随着天气、移动过程中障碍物遮挡等出现变化，边缘服务器的算力会随着计算上下文的相关性发生变化。因此，在接下来的研究过程中，我们拟利用这些动态可变的环境、系统参数，结合机器学习算法，提高响应的时效性。另外，我们将结合具体的机器学习应用，设计不通的测试床对算法的实际性能进行检验，发现问题，找出瓶颈问题，并寻求突破。

经过项目组三年的努力，我们已经实现本项目的研究目标，并且在本基金的资助下，我们还对与本领域密切相关的其他热点问题进行了预研。从总体上看，取得了良好的研究成果，并超额完成原定计划。

今后进一步的研究，我们拟将本课题的研究成果与分布式机器学习领域的优秀研究成果结合起来，并探讨分布式边缘学习（推理）在复杂网络环境下的精度保障、延迟能耗优化、参数服务器的多级部署等问题，以使边缘计算适应智能化网络应用。

## （二）成果部分

### 1. 项目取得成果的总体情况。

本项目共发表及录用高水平文章 32 篇，其中包含 CCF B 类 SCI 期刊 3 篇（**IEEE Transactions on Services Computing; The Computer Journal; IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**），CCF C 类 SCI 期刊（**IEEE Transactions on Cloud Computing, Journal of Supercomputing, Computer Communications** 等）及并行与分布式计算、体系结构方向 CCF C 类国际会议（**ICA3PP、HPCC、ICPADS、ISPA** 等）Regular 论文 21 篇。申请并已受理发明专利 4 篇。项目负责人协助博士后导师培养硕、博士研究生 10 名。

通过项目的实施，我们形成了面向无线网络环境的资源配置与计算任务卸载一系列算法库。

### 2. 项目成果转化及应用情况。

本项目直接相关专利申请 4 项（详见成果列表）。

### 3. 人才培养情况。

通过该项目的实施，课题组培养或协助培养博士生 3 名，硕士生 7 名（均已毕业，其中 2 人继续国内攻博）。详见表 3。项目负责人于 2019 年 3 月博士后出站，获聘广东工业大学青年百人计划（一期 A 类）校内副教授（按讲师七级），

继续在广东工业大学计算机学院从事学术研究工作，并于 2020 年 9 月新增为硕士研究生导师。

**4. 其他需要说明的成果。**

无

**5. 项目成果科普性介绍或展示网站。**

我们所有成果在团队主页上以及学术博客上进行介绍与展示。

	 高性能计算与数据科学实验室 广东工业大学计算机学院 工学 1 号馆-726 室 <a href="https://hpcds.gdut.edu.cn/">https://hpcds.gdut.edu.cn/</a>
	学者网博客 <a href="http://www.scholat.com/loren.cn">http://www.scholat.com/loren.cn</a>
	科研之友网站 <a href="https://www.scholarmate.com/P/nYrIjy">https://www.scholarmate.com/P/nYrIjy</a>