

电力 5G 切片资源分配的深度强化学习框架

宋知非

湖南电气职业技术学院 湖南湘潭

【摘要】电力 5G 切片资源分配需满足不同电力业务的差异化需求，而传统分配方法难以应对动态变化的网络环境与复杂业务场景。深度强化学习框架通过智能体与环境的持续交互，可实现资源分配策略的自主优化。该框架将电力业务需求、网络负载状态作为状态输入，以资源利用率最大化与业务 QoS 保障为目标，通过深度神经网络拟合价值函数，动态调整计算、存储、带宽等资源的分配方案。其具备较强的环境适应性与决策时效性，能有效解决切片资源竞争、负载不均衡等问题，为电力 5G 网络的高效运行提供技术支撑，对推动电力系统数字化转型具有重要意义。

【关键词】电力 5G；网络切片；资源分配；深度强化学习；智能决策

【收稿日期】2025 年 11 月 15 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250418

Deep reinforcement learning framework for power 5G slice resource allocation

Zhifei Song

Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan, Hunan

【Abstract】 The resource allocation of power 5G slices needs to meet the differentiated requirements of various power services, while traditional allocation methods struggle to cope with dynamically changing network environments and complex service scenarios. The deep reinforcement learning framework can realize the autonomous optimization of resource allocation strategies through continuous interaction between agents and the environment. This framework takes power service requirements and network load status as state inputs, with the goals of maximizing resource utilization and ensuring service QoS. It dynamically adjusts the allocation schemes of computing, storage, bandwidth and other resources by fitting the value function through deep neural networks. It has strong environmental adaptability and decision-making timeliness, which can effectively solve problems such as slice resource competition and load imbalance. It provides technical support for the efficient operation of power 5G networks and is of great significance for promoting the digital transformation of power systems.

【Keywords】 Power 5G; Network slicing; Resource allocation; Deep reinforcement learning; Intelligent decision-making

引言

随着电力系统向智能化发展，继电保护、智能巡检等业务对 5G 网络的可靠性、时延等提出了严苛要求，网络切片技术成为满足差异化需求的关键。但如何在动态变化的网络环境中实现切片资源的高效分配，是当前面临的难题。深度强化学习凭借自主学习与动态决策能力，为解决这一问题提供了新思路，其构建的资源分配框架有望突破传统方法的局限，支撑电力 5G 网络的高质量运行。

1 电力 5G 切片资源分配的核心挑战及传统方法的局限性

电力 5G 切片资源分配面临多重核心挑战，首要体现在业务需求的强差异化特性上。电力系统中，继电保护业务要求毫秒级时延与超高可靠性，而智能表计数据采集则对带宽需求波动较大，两者对切片资源的优先级、时延容忍度、丢包率等参数要求存在显著差异^[1]。这种差异化需求导致资源分配需在多目标间实现动态平衡，既要保障关键业务的实时性，又要避免非关键业务占用过多冗余资源，形成资源浪费。

网络环境的动态性进一步加剧了分配难度。电力通信网络的负载会随业务高峰期、设备接入量变化而剧烈波动，如变电站巡检机器人集中启动时，会瞬间增

加对上行带宽的需求；而电网故障抢修时，应急通信业务又会突发占用大量资源^[2]。这种动态变化要求资源分配策略具备快速响应能力，能够实时调整资源配比，否则易出现切片资源过载或闲置的极端情况。跨切片资源竞争是另一突出难题。不同切片共享物理网络基础设施，当多个高优先级业务同时请求资源时，如何在保证公平性的前提下实现资源的最优分配，成为关键瓶颈。若分配不当，可能导致关键业务因资源抢占失败而中断，影响电力系统的稳定运行。

传统资源分配方法在应对这些挑战时暴露出明显局限性。静态预分配方法基于历史数据设定固定资源配额，无法适应动态变化的业务需求与网络负载，在业务突发场景下易出现资源不足或冗余，灵活性极差。基于启发式算法的分配方法虽能实现局部优化，但依赖人工设计的规则，在复杂业务场景下难以兼顾多目标优化，且求解效率随问题规模扩大而显著下降，无法满足电力 5G 网络的实时性要求。基于博弈论的分配方法试图通过建模切片间的竞争关系实现均衡，但对业务模型的假设过于理想化，难以匹配电力业务的复杂特性，且收敛速度慢，在动态环境中难以维持稳定的分配策略。此外，传统方法大多缺乏对网络状态的全局感知能力，仅能基于局部信息进行决策，易导致整体资源利用率低下，无法实现电力 5G 网络资源的全局优化配置。这些局限性使得传统方法难以满足电力 5G 切片资源分配的高动态性、强差异化需求，亟需新的技术框架提供解决方案。

2 基于深度强化学习的电力 5G 切片资源分配框架构建

基于深度强化学习的电力 5G 切片资源分配框架以智能决策闭环为核心，通过环境感知、策略优化与资源调度的有机融合，实现动态场景下的高效资源配置^[3]。框架整体采用分层架构设计，底层为环境交互层，负责实时采集电力业务特征与网络状态数据；中间层为强化学习引擎，承担状态建模、动作决策与策略更新任务；顶层为资源调度接口，将学习得到的优化策略转化为具体的资源分配指令，作用于物理网络基础设施。这种架构设计既保证了决策过程的自主性，又实现了与电力 5G 网络现有管理系统的兼容性。环境交互层通过分布式感知节点构建全域状态监测网络，采集的关键参数包括各切片的业务类型、实时带宽需求、时延阈值、优先级标签，以及物理网络的剩余计算资源、链路带宽、节点负载等。

强化学习引擎是框架的核心组件，采用深度确定

性策略梯度算法构建智能决策模型。状态空间设计融合电力业务特性与网络属性，将业务优先级、资源需求波动率、网络负载均衡度等参数进行归一化处理，形成高维状态向量。动作空间定义为资源分配矩阵，包含对计算资源、存储资源、链路带宽的量化分配方案，每个动作对应特定切片的资源配额调整^[4]。价值函数通过深度神经网络拟合，网络结构采用卷积层与全连接层的组合架构，卷积层负责提取状态特征的空间关联性，全连接层则实现从特征空间到动作价值的映射。奖励机制的设计直接影响策略优化方向，需兼顾多目标优化需求。以资源利用率最大化与业务 QoS 满意度为核心奖励项，当切片资源分配满足时延、丢包率等约束条件时，给予正向奖励；当出现资源过载或严重闲置时，触发惩罚机制。针对电力业务的优先级特性，奖励函数引入权重系数，对继电保护等关键业务的 QoS 保障给予更高奖励权重，确保决策策略符合电力系统的安全运行要求^[5]。此外，设置平滑奖励项抑制策略震荡，当连续决策的资源分配变化率低于阈值时，额外给予稳定性奖励，提升框架的鲁棒性。

学习与决策流程采用离线训练与在线微调相结合的模式。离线阶段利用历史运行数据构建仿真环境，通过蒙特卡洛树搜索生成高质量经验样本，采用经验回放机制训练深度神经网络，使模型初步掌握资源分配的基本规律。在线部署阶段，智能体通过与真实网络环境的持续交互获取新经验，采用增量学习算法动态更新模型参数，实现策略的实时优化。资源调度接口实现决策结果向网络配置指令的转换，支持与 SDN 控制器、NFV 管理系统的协同联动。根据强化学习引擎输出的资源分配矩阵，自动生成虚拟网络功能部署、链路带宽调整、计算节点负载迁移等具体操作指令，通过北向接口下发至物理网络。同时，接口层具备反馈机制，将指令执行后的网络状态变化回传至环境交互层，形成完整的决策闭环^[6]。这种端到端的框架设计，使深度强化学习的自主决策能力与电力 5G 网络的资源调度需求深度适配，为动态复杂场景下的切片资源优化分配提供了系统性解决方案。

3 电力 5G 切片资源分配深度强化学习框架的性能验证与优化

电力 5G 切片资源分配深度强化学习框架的性能验证需构建贴近实际电力场景的测试环境，通过多维度指标评估框架的有效性与稳定性。验证场景涵盖典型电力业务混合负载工况，包括继电保护、智能巡检、负荷监测等不同优先级业务的动态接入，模拟业务请

求强度随时间的波动特性,如早晚用电高峰时段的负荷监测数据激增,以及故障抢修时的应急通信业务突发。测试环境基于虚拟化技术搭建,可灵活配置物理网络资源规模,支持切片数量、资源配置的动态调整,为框架提供多样化的验证场景。性能验证的关键指标聚焦资源分配效率与业务 QoS 保障能力。资源利用率通过计算物理网络中计算、存储、带宽资源的实际占用率与理论最大容量的比值衡量,重点分析框架在业务负载剧烈变化时的资源动态调整效果。业务 QoS 指标包括时延达标率、丢包率控制水平及业务中断概率,其中继电保护等关键业务的时延需控制在严苛阈值内,以此验证框架对高优先级业务的保障能力。此外,框架的决策响应时间也是核心指标,需满足电力业务对实时性的要求,避免因决策延迟导致资源分配滞后。

对比实验将该框架与传统静态分配方法、启发式算法在相同测试场景下的表现进行量化分析。结果显示,在混合业务负载下,框架的资源利用率显著提升,尤其在业务突发时段,能快速将冗余资源调度至需求旺盛的切片,减少资源闲置;关键业务的时延达标率与传统方法相比有明显改善,丢包率控制更为稳定。但验证过程中也暴露出部分问题,如在多切片高优先级业务同时竞争资源时,框架的决策公平性有待提升,个别低优先级业务出现资源分配过度抑制的情况;在网络拓扑发生突变时,框架的策略收敛速度较慢,影响短期资源分配效率。针对验证中发现的问题,框架优化需从算法改进与机制设计两方面入手。在强化学习引擎中引入公平性约束因子,调整奖励函数的权重分配,当低优先级业务的资源保障率低于设定阈值时,适当降低高优先级业务的奖励权重,避免资源分配过度倾斜。改进深度神经网络的结构,增加注意力机制模块,使模型在状态特征提取时更关注网络拓扑变化信息,加速拓扑突变场景下的策略收敛速度,提升框架对动态网络环境的适应能力^[7]。

长期优化需建立性能反馈闭环,通过持续采集框架在实际运行中的性能数据,构建动态优化模型。基于业务类型与网络状态的关联分析,为不同场景预设初始策略参数,缩短框架的在线学习周期;结合电力业务的周期性特征,设计预见性学习机制,使框架能提前调整资源配置策略,应对可预测的业务负载波动^[8]。经过

多轮优化迭代,框架在资源分配效率、业务保障能力、决策公平性及环境适应性等方面得到综合提升,更贴合电力 5G 网络的实际运行需求。

4 结语

电力 5G 切片资源分配的深度强化学习框架,有效应对了动态网络环境下资源分配的复杂挑战。其通过智能决策机制实现了资源的高效利用与业务需求的精准匹配,性能验证表明该框架在资源利用率与 QoS 保障上优势显著。未来通过持续优化模型与算法,可进一步提升框架的适应性与稳定性,为电力 5G 网络的规模化应用奠定基础,助力电力系统数字化转型迈向新阶段。

参考文献

- [1] 张导,秦骁,周之楠,等.基于深度强化学习的 5G 电力虚拟专用光网络切片时延优化算法研究[J].半导体光电,2024, 45(06):977-985.
- [2] 李明锋.基于切片的电力 5G 虚拟专网组网研究[J].长江信息通信,2023,36(02):218-221.
- [3] 吴维农,莫婷,赵妍妍,等.5G 电力虚拟专网和数字孪生相结合的系统架构和构建[J].半导体光电,2023,44(05): 803-810.
- [4] 李锦煊,王维.基于智能电网的 5G 网络切片资源优化分配模型构建及仿真[J].自动化与仪表,2021,(11):36-39+44.
- [5] 郭枳邑.电力 5G 网络资源分配与 QoS 保障关键技术研究[D].华北电力大学(北京),2022.
- [6] 于浩,汪筱巍,王韬,等.基于 SDN 与 NFV 的电力 5G 网络切片差异化资源分配方案[J].电测与仪表,2021,58(09): 89-95.
- [7] 王子坤.基于机器学习的电力通信网切片资源分配与脉冲噪声削减方法[D].南京理工大学,2021.
- [8] 郭娘容.基于网络流量分析的 5G 切片管理系统研究与实现[D].广东工业大学,2022.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

