 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11401

Research on Scheduling Optimization of Provincial Wired Transmission Links Oriented Towards Computing Power Scheduling

Yu Hua

China Post Construction Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 221100, China

Abstract

Currently, the provincial computing power network generally faces issues such as imbalanced link loads, high transmission delays, low resource utilization rates, and weak computing-network coordination capabilities, which affect the efficiency of global computing power scheduling. Therefore, this paper builds a computing-network coordinated scheduling architecture based on the characteristics of provincial computing power services, comprehensively considers constraints such as bandwidth and latency, employs a multi-objective optimization model for solution, and uses an improved genetic algorithm to overcome the shortcomings of traditional algorithms, such as being prone to local optima and weak ability to handle sudden tasks. Simulation results show that it can effectively balance network link loads, reduce network transmission delays, improve network resource utilization rates, and enhance scheduling stability, providing a feasible technical reference for the transmission optimization and computing power coordinated scheduling of provincial computing power networks.

Keywords

computing power scheduling; provincial computing power network; wired transmission link

面向算力调度的省域有线传输链路调度优化研究

华宇

中邮建技术有限公司，中国 · 江苏 南京 221100

摘　要

当前，该省域算力网络普遍存在链路负载失衡、传输时延偏高、资源利用率低、算网协同能力弱等问题影响了全域算力调度效率。因此，本文结合省域算力业务特点搭建算网协同调度架构，综合考虑带宽、时延等约束，采用多目标优化模型求解，并使用改进遗传算法求解，克服以往传统算法易陷入局部最优、应付突发任务能力弱等缺点。仿真结果表明，可有效平衡网络链路负载、缩减网络传输时延、提升网络资源利用率及调度稳定性，可为省域算力网络传输优化与算力协同调度提供可行的技术参考。

关键词

算力调度；省域算力网络；有线传输链路

1 引言

数字经济快速发展，随着“东数西算”战略的落地，国内对于算力的需求不断增加，各省逐渐形成了以省级枢纽 + 地市节点 + 边缘站点为层次的大规模的算力网络，跨区域进行算力调度是常态 [1]。光纤、OTN、SPN 等有线传输链路具有带宽高稳定性强，作为算力调度最重要的承载条件，目前省域算网存在算力调度与链路调度脱节问题，传统上采用只考虑算力在节点占用带宽情况下的调度模式，并没有根据所执行的算力任务时延和优先级等特征进行相应的适配调度，容易造成链路负载不平衡、传输时延过长、资源利用率低等现象，而且传统静态算法也难以满足突然产生的算力任务。因此分析现有的调度模式的弊端，结合每个链路运行特性搭建算网协同多目标优化模型设计智能调度算法进行仿真验证，可为提升省域有线传输链路智能调度提供理论依据和实践参考。

【作者简介】华宇（1981–），男，本科，工程师，从事通信有线传输研究。

2 省域算力调度与有线传输链路特性分析

2.1 省域算力网络架构与调度特征

省域算力网络是全国一体化算力网络的重要部分，由三级网络构成：省级核心枢纽、地市级骨干节点、县域边缘站点。其中省级核心枢纽负责管理全省高算力、低时延等核心业务，骨干节点承担着区域范围内中转和中型算力的任

务，边缘站点承担本地范围内轻量化实时业务，各节点均利用有线网络进行相互联系与协同调度。与全国性算力调度相比，省域调度更具有本地化特征，其调度范围集中且传输距离短，对时延的要求也较为严苛；调度任务类型丰富，不同任务对带宽、时延、稳定性等方面的需求也各不相同；算力需求动态波动大，突发调度场景多；节点的算力、存储设备及配套传输链路的参数均存在较大差异，资源异构显著。

2.2 省域有线传输链路运行特性

省域算力主要依托光纤、OTN、SPN 等有线链路传输数据。相较于无线传输，有线链路抗干扰能力强、运行稳定，可承载大容量算力数据；物理带宽固定，无法随业务需求动态扩容；传输时延由链路距离与设备损耗决定，数值稳定、波动小；链路按功能划分为骨干、汇聚、接入层级，不同链路承载的业务规模与优先级区分明确。

2.3 现有调度模式现存问题

目前省域链路基本采用静态均分或者被动按需调度的方式，无法适应算力业务运行要求。一是算网协同不够完善，由于在进行链路调度时只考虑带宽占用情况，没有结合任务属性和节点状态，容易出现高优先级的任务争抢资源，导致核心业务时延超标；二是负载分布不均衡，峰值时段骨干链路拥堵、低谷时段边缘链路闲置等，整体资源利用率偏低；三是响应迟缓，传统算法迭代速度慢，面对突发的算力任务很难快速重配资源，造成了任务排队、调度滞后现象；四是优化目标单一，目前大多数方案仅针对时延或利用率做优化，无法兼顾到负载均衡、任务成功率等因素，综合调度效果差 [2]。

3 省域有线传输链路调度优化架构设计

结合省域算力调度层级化、动态化、差异化的特点，以及现有调度模式存在的不足之处，本文搭建了由算力感知-资源建模 - 智能调度 - 动态反馈四层联动的算网协同调度架构，打通算力与链路调度的隔阂，精准匹配算力任务和有线传输链路。作为架构最底部的一个部分，算力感知层实时采集全域内各节点算力运行数据、任务信息等相关数据并及时更新有线链路负载、时延、损耗等状态，完成全域范围内资源数据库建立，可毫秒级识别突发问题，提高调度效率；另外利用收集到的数据对算力任务与传输链路进行标准化建模，将所需要完成的任务划分为核心实时、常规、批量迁移三类，设置其调度权重，明确每一个级别链路具体运行参数，形成算网资源映射关系 [2]；作为架构中核心部分的智能调度层，基于多目标优化模型和改进算法综合考虑了算力任务优先次序、链路负载、时延等约束条件，针对不同场景快速自适应地开展静态调度及动态自适应调度工作，降低出现链路拥堵、资源闲置的情况；而在反馈执行层中落地下达调度指令后，也会同步搜集运行数据回传至感知层完成相应工作，实现闭环迭代，持续优化调度策略，从而满足算力业务变化趋势的需求。

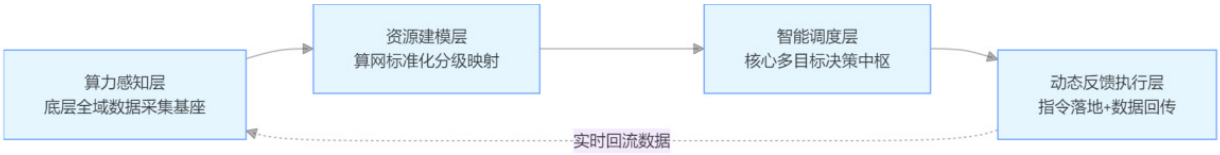


图 1: 算网协同调度流程图

4 调度优化模型构建与算法设计

4.1 模型假设与约束条件

在研究省域算力调度与有线传输链路联合优化时，为充分考虑模型本身的复杂程度和工程应用性，同时保证求解过程简单快捷、结果符合现场运行实际情况，根据我国省域算力网络层级架构、有线传输链路自身的运行规律以及算力任务的调度特征，对所需求解的场景进行合理前提假设：第一，能够将全部省域内所有算力节点、各级有线传输链路的运行状态通过相关监测系统可视化地采集到实时数据，且数据传输无明显延迟，使得调度中心可以同步掌握整个省域内的算网资源变动状况；第二，在研究周期间链路上不存在突然中断或硬件故障等异常工况，链路的传输损耗、信道特性稳定可控，不会因随机故障而导致调度策略受干扰；第三，单条有线传输链路满足并发承载多类型、多优先级算力任务的要求，严格按照任务优先级规则开展资源配置与排队调度 [3]。

为了保障调度方案合法合规、满足业务运行要求，本文拟设立以下四项约束条件。带宽约束：单条链路承载的全部算力任务带宽需求之和必须小于该链路额定最大可用带宽，从物理角度杜绝链路带宽溢出问题；时延约束：不同等级的算力任务对传输时延都做出一定阈值限制，且所有任务实际传输时延必须不超过这些任务的时延上限范围，确保实时类、核心类业务服务质量。负载约束：全域各条有线传输链路的负载率都必须保持在合理范围内，既要防止负载过高造成链路拥堵、数据丢包等问题，又要避免负载过低导致带宽资源长期闲置；优先级约束：为具备较好优先级的算力任务提供分配带宽少且稳定的优质链路资源，确保政务、应急、工业控制等核心业务平稳运 [3]。

4.2 多目标调度优化模型构建

省域有线传输链路调度属于典型的多目标优化问题，单一优化指标无法兼顾算力传输效率、链路运行状态与资源利用水平。本文立足省域算力调度实际需求，确定全网平均

传输时延最小、链路负载均衡度最优、链路资源利用率最高三大核心优化目标，结合前文约束条件搭建多目标调度优化模型。

第一，全网平均传输时延最小。省域算力任务传输时延主要由链路固有传输时延、任务排队时延以及设备转发时延三部分构成。由于省域内节点地理跨度有限，有线传输设备转发时延波动幅度小、占比低，因此本次优化重点针对链路传输时延与任务排队时延进行管控。对应目标函数为：)。式中：T 代表全网算力任务平均传输时延；为当前系统内待调度算力任务总数量；为第个任务的链路传输时延；为第个任务在链路端口的排队时延。

第二，链路负载均衡度最优。传统调度模式易出现骨干链路高负载、边缘链路低负载的两极分化现象，严重降低网络整体可靠性。本文以链路负载标准差衡量均衡水平，标准差数值越小，代表各链路负载差异越小、均衡效果越好。目标函数如下：

式中：为全域链路负载标准差；m 为省域范围内参与调度的有线传输链路总数；为第条链路的实时负载率；为所有链路的平均负载率。

第三，链路资源利用率最高。充分挖掘全域闲置带宽资源，提升有线传输网络整体承载能力，减少基础设施资源浪费。目标函数为：：式中：为全网链路综合资源利用率；为第条链路当前已占用带宽；为第条链路的额定总带宽。

由于三个目标函数量纲不同、优化方向存在差异，无法直接联立求解。本文采用加权归一化方法对多目标进行融合处理，消除量纲影响，构建综合优化目标函数，在多项约束条件下实现时延、负载、利用率的多维度协同最优 [4]。

4.3 改进遗传算法设计

遗传算法具有较强的全局搜索能力，通常应用于解决资源调度、路径规划等组合优化问题中，但是其直接应用到省域算力链路调度上存在着收敛慢、容易陷入局部最优和没有适配任务及链路特性的缺点，并不能很好的应对突发算力任务以及满足业务调度的需求。因此本文在适应度函数、初始种群、交叉变异三个方面对算法进行改进，在构建动态适应度函数的基础上，通过任务等级、时延、链路负载加权赋值的方式，优先保存能够保证核心业务且均衡负载的优质调度解；依托于算力感知的数据来筛选出符合规范的初始种群以减少无效迭代并加快收敛速度 [4]；使用了自适应交叉变异策略，前期采取较高的变异率较低的交叉率可以扩大搜索空间防止早熟现象发生，而后期则采取较高交叉率较小变异率精细化寻优从而逼近全局最优。最后利用改进后的算法配合多目标调度模型经过迭代求解得到了合规最优的链路调度方案，该方法能快速地适配算力任务的变化情况，实现了链路的智能精细调度，适配省域分层算力网络运行的要求。

5 仿真实验与结果分析

本文通过 MATLAB 平台建立省域算力网络仿真环境，设置由一个省级核心枢纽、3 个地市骨干节点、6 个边缘算力节点组成的层级结构、24 条覆盖不同骨干、汇聚、接入类型带宽有线链路，分别用于日常平稳、峰值批量、突发应急三种场景下对比拟合，选取优化方案与传统静态调度算法、基础遗传算法进行对照仿真，全程使用相关实验参数以保证对比公平性。实验中主要采用了全网平均传输时延、链路负载均衡度、链路资源利用率、任务调度成功率作为评价指标，在上述三种不同模式下测试表明：针对各自不同调度情况而言，本文方案可以将平均传输时延降低 12.3%，共降低 21.7%，最终达到 18.5%；链路负载标准差减小 35.2%，改善骨干链路拥堵、边缘链路闲置失衡现象；全网链路资源利用率提高 16.8%，减少不必要的带宽浪费；整体任务调度成功率提高 9.6%，核心实时算力任务调度成功率接近 100%。因此总结来看该优化方案适用不同算力调度场景且在控制时延、均衡负载、充分利用所需资源和运行稳定等方面具有显著优势，能够满足当前省域算力网络常态化、动态化、差异化的调度需求。

6 结论与展望

针对目前省域算力调度中存在的有线传输链路适配性差、负载失衡，资源利用率低、算网协同不足等问题，本文分析了算力和链路运行特征，建立了四层联动的算网协同调度模型，构造多约束多目标优化模型，采用改进遗传算法完成求解，仿真表明该方案能够降低传输时延、均衡链路负载、提高资源利用率与任务调度成功率，补齐了当前传统调度模式短板，可以为实现我国省域算力传输网络智能化改造与算力协同调度提供技术支撑。论文仅研究了静态、准动态调度场景，未考虑链路故障及大规模算力迁移等复杂工况，后续可引入故障自愈机制构建容错调度模型，增加能耗优化目标，打造绿色、高效、高可靠的省域算网调度体系。

参考文献

[1] 唐卓,蒋冰婷,张嘉鹏,等.算力网络调度基础理论与关键技术现状及展望[J].中国科学基金,2025,39(2):240-249.DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.20250320.003.

[2] 李逸博,李小平,王爽,等.面向算力网络的智慧调度综述[J].自动化学报,2024,50(6):1086-1103.DOI:10.16383/j.aas.c230196.

[3] 刘运奇,邓玲,冯铭能,等.算网大脑驱动的泛在算力调度架构设计与实践验证[J].邮电设计技术,2026,(3):24-28.

[4] 杨振东,冯铭能,陈善杰,等.基于OTN的灵活人算调度技术研究与实践[J].邮电设计技术,2025,(5):69-73.