

基于5G网络切片技术的工业互联网资源调度优化研究

侯万歧

232301*****2719

摘要: 工业互联网作为制造业数字化转型的核心载体,其多业务场景对网络带宽、时延、可靠性的差异化需求,与传统网络一刀切的资源分配模式形成突出矛盾。5G网络切片技术通过将物理网络虚拟化拆分为多个逻辑独立的专用切片,为不同工业业务提供定制化网络服务,成为破解工业互联网资源调度难题的关键技术。本文首先分析5G网络切片与工业互联网的融合基础,剖析当前工业互联网资源调度存在的核心问题;随后设计基于5G网络切片的多目标资源调度优化方案,引入改进算法实现资源的动态分配与高效利用;最后通过仿真实验验证方案在时延、带宽利用率、业务可靠性方面的优化效果,为工业互联网的高质量发展提供技术参考。

关键词: 5G网络切片;工业互联网;资源调度

DOI: 10.69979/3041-0673.26.05.063

引言

随着工业4.0理念的深度落地,工业互联网已实现生产设备、传感器、控制系统与云端平台的全面互联,催生了柔性生产、远程运维、机器视觉检测、海量设备监控等多元化业务场景。不同工业业务对网络服务的需求差异显著:高精度机床控制需1ms级时延和99.999%的可靠性,大规模传感器采集需百万级连接密度,高清机器视觉检测需Gbps级上行带宽,而企业办公类业务则更注重成本效益。传统工业网络多采用以太网、WiFi等技术,存在架构封闭、资源分配僵化、QoS保障不足等缺陷,难以在同一张网络中同时承载这些差异化业务,进而导致资源浪费与业务服务质量下降的双重问题。

1 相关技术基础

1.1 5G网络切片技术

5G网络切片是指通过SDN、NFV等技术,将5G物理网络的无线接入网(RAN)、核心网(CN)、传输网(TN)资源进行虚拟化拆分,形成多个逻辑独立、功能完整的虚拟网络。每个切片拥有独立的网络资源、协议栈与管理机制,切片之间实现物理隔离与逻辑隔离,可确保不同业务的运行互不干扰。根据工业业务的需求差异,5G网络切片可分为三类核心类型:uRLLC切片适用于工业控制、远程手术等低时延、高可靠场景,端到端时延可控制在1ms以内,可靠性达99.999%;eMBB切片适用于高清视频传输、机器视觉检测等大带宽场景,峰值速率可达10Gbps以上;mMTC切片适用于海量传感器接入、环境监测等场景,每平方公里可支持100万个设备连接。

5G网络切片的全生命周期管理涵盖切片创建、资源分配、动态调整与销毁四个阶段,其核心优势在于灵活性与定制化:通过SDN技术可实现网络流量的灵活

调度,通过NFV技术可实现网络功能的虚拟化部署与弹性扩展,能够根据工业业务的实时需求动态调整切片资源配置,从而提升网络资源的利用率。

1.2 工业互联网资源调度核心需求

工业互联网资源调度的核心目标是实现网络资源、计算资源与存储资源的高效分配,在满足不同工业业务差异化QoS需求的同时,提升资源利用率、降低运营成本。其核心需求主要体现在三个方面:一是差异化QoS保障,需根据业务类型分配匹配的资源,确保工业控制等高优先级业务的时延与可靠性需求得到满足;二是动态性调度,工业业务负载存在明显的时间波动性,资源调度需实时感知业务负载变化,动态调整资源分配策略;三是资源利用率优化,在满足业务需求的前提下,最大化利用网络、计算与存储资源,避免资源闲置。

1.3 5G切片与工业互联网融合架构

5G网络切片与工业互联网的融合架构主要分为三层:终端层、切片网络层与应用层。终端层包含工业生产设备、传感器、控制器等终端设备,主要负责采集生产数据与执行控制指令;切片网络层是融合架构的核心,包括RAN切片、核心网切片与传输网切片,通过SDN控制器与NFV管理平台实现切片的创建、资源分配与动态调整;应用层涵盖工业控制、远程运维、机器视觉等各类工业应用,每个应用对应一个或多个专用切片,通过切片接口获取定制化网络服务。

该融合架构的核心优势在于实现网业协同:工业应用根据自身需求向切片管理平台提出资源申请,切片管理平台结合业务优先级与资源状况,动态分配切片资源,实现网络资源与工业应用需求的精准匹配;同时通过边缘计算节点的部署,将计算任务下沉至工业现场,有效减少数据传输时延,提升业务响应速度。

2 工业互联网资源调度现存问题分析

资源分配与业务需求不匹配:传统工业互联网资源调度采用静态分配模式,未考虑业务差异化 QoS 需求与负载动态变化。如为工业控制与办公业务分配相同资源,会致工业控制业务低时延需求无法满足,办公业务资源闲置;业务负载激增时无法及时调度闲置资源,导致业务服务质量下降甚至中断。且现有方案多聚焦单一资源分配,忽略资源协同调度,整体利用率低。

切片资源调度效率低下:5G 网络切片资源调度需协同分配 RAN、核心网、传输网,但多数方案采用分层调度,缺乏全局统筹,切片间资源竞争激烈、调度效率低。如 RAN 切片带宽分配未考虑核心网处理能力,会导致数据拥塞。同时,调度多采用传统算法,存在收敛慢、易局部最优问题,无法满足实时调度需求。

QoS 保障能力不足:工业互联网高优先级业务对时延、可靠性要求高,但当前切片资源调度方案缺乏完善 QoS 感知与保障机制。一方面无法实时监测切片运行状态,难以及时发现 QoS 下降问题;另一方面缺乏快速切片切换与资源补充分配机制,易导致业务中断或服务下降。此外,切片间隔离性不足,高负载切片会影响低优先级业务运行。

3 基于 5G 网络切片的工业互联网资源调度优化方案

3.1 优化目标与约束条件

3.1.1 优化目标

本文设计的资源调度优化方案以多目标协同优化为核心,兼顾业务 QoS 保障与资源利用率提升,具体优化目标包括:一是时延最小化,确保工业控制等高优先级工业业务的端到端时延不超过预设阈值;二是资源利用率最大化,在满足业务 QoS 需求的前提下,最大化利用网络、计算、存储资源,减少资源闲置;三是业务可靠性最大化,降低切片故障与资源不足导致的业务中断概率,确保高优先级业务的可靠性达到 99.999% 以上。

3.1.2 约束条件

为实现上述优化目标,需满足以下约束条件:一是资源约束,切片分配的网络带宽、计算资源、存储资源不得超过物理网络的总资源容量;二是 QoS 约束,不同类型业务的时延、带宽、可靠性需满足预设阈值(如 uRLLC 切片时延 $\leq 1\text{ms}$, eMBB 切片带宽 $\geq 1\text{Gbps}$);三是隔离性约束,不同切片之间的资源相互隔离,不得出现资源抢占现象;四是动态约束,资源调度需能够实时响应业务负载变化,实现资源的动态调整。

3.2 优化方案总体设计

基于 5G 网络切片的工业互联网资源调度优化方案,采用全局统筹+动态感知+智能调度的架构,主要包含三个核心模块:业务需求感知模块、切片资源调度模块与 QoS 监测与调整模块。

业务需求感知模块负责实时采集各类工业业务的运行参数,包括业务类型、负载大小、QoS 需求(时延、带宽、可靠性)等,通过数据预处理与分类,为资源调度提供精准的数据支撑;切片资源调度模块是方案的核心,采用改进的智能算法,实现网络、计算、存储资源的全局协同分配,并根据业务优先级与负载变化动态调整切片资源配置;QoS 监测与调整模块负责实时监测各切片的运行状态,当切片 QoS 指标不满足需求或资源利用率过低时,触发动态调整机制,优化资源分配策略。

3.3 改进的切片资源调度算法设计

针对传统调度算法收敛速度慢、易陷入局部最优的问题,本文引入改进的粒子群优化(PSO)算法,结合工业业务的优先级与 QoS 需求,实现多目标资源调度优化。改进 PSO 算法的核心优化内容包括以下三点:

一是引入业务优先级权重,根据工业业务的重要程度(如工业控制 $>$ 远程运维 $>$ 办公业务)分配不同的优先级权重,在资源分配过程中优先保障高优先级业务的 QoS 需求;二是优化适应度函数,将时延、资源利用率、可靠性三个优化目标融入适应度函数,通过权重系数调整各目标的重要程度,实现多目标协同优化;三是改进粒子更新策略,引入惯性权重动态调整机制,在算法迭代初期增大惯性权重以提升全局搜索能力,在迭代后期减小惯性权重以提升局部搜索精度,避免算法陷入局部最优。

改进 PSO 算法的调度流程如下:1)初始化粒子群参数,包括粒子数量、惯性权重、学习因子等,将每个粒子作为一种资源分配方案;2)采集业务需求与资源状态数据,确定各业务的 QoS 约束与优先级权重;3)计算每个粒子的适应度值,评估对应资源分配方案的优劣;4)更新粒子的速度与位置,保留适应度值最优的粒子;5)判断是否达到迭代终止条件,若达到则输出最优资源分配方案,否则重复步骤 3-4。

3.4 动态调整机制设计

为适应工业业务负载的动态变化,本文设计切片资源动态调整机制,主要包含三个环节:一是负载监测,业务需求感知模块实时监测各切片的业务负载变化,当负载变化率超过预设阈值(如 20%)时,触发动态调整流程;二是资源重分配,切片资源调度模块根据最新的负载数据,通过改进 PSO 算法重新优化资源分配方案,调整各切片的资源配置;三是切片切换,当某一切片出现故障或资源严重不足时,快速将业务切换至备用切片,

确保业务连续运行,同时对故障切片进行修复与资源补充。

4 实验验证与分析

4.1 实验环境搭建

为验证本文提出的资源调度优化方案的有效性,采用 NS-3 仿真工具搭建实验环境,模拟 5G 网络切片与工业互联网的融合场景。实验参数设置如下:物理网络总带宽为 10Gbps,计算资源为 1000CPU 核心,存储资源为 10TB;工业业务分为 3 类,即 uRLLC 类(工业控制)、eMBB 类(机器视觉)、mMTC 类(传感器采集),各类业务的 QoS 约束如下文所述;对比方案选取传统贪心算法调度方案与标准 PSO 算法调度方案,实验核心指标包括端到端时延、资源利用率、业务可靠性。

各类业务的 QoS 约束具体如下:uRLLC 类(工业控制)业务,时延约束 $\leq 1\text{ms}$,带宽需求 $\geq 100\text{Mbps}$,可靠性约束 $\geq 99.999\%$;eMBB 类(机器视觉)业务,时延约束 $\leq 50\text{ms}$,带宽需求 $\geq 1000\text{Mbps}$,可靠性约束 $\geq 99.9\%$;mMTC 类(传感器采集)业务,时延约束 $\leq 100\text{ms}$,带宽需求 $\geq 10\text{Mbps}$,可靠性约束 $\geq 99\%$ 。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 端到端时延分析

不同调度方案下各类业务的端到端时延实验结果如图 1 所示(此处省略图表,以文字描述)。实验结果显示,本文提出的改进 PSO 算法调度方案中,uRLLC 类业务的平均时延为 0.82ms,eMBB 类业务的平均时延为 32.5ms,mMTC 类业务的平均时延为 78.3ms,均满足预设的 QoS 时延约束;传统贪心算法方案的 uRLLC 类业务平均时延为 1.56ms,超出时延约束,且 eMBB 与 mMTC 类业务的时延均高于改进 PSO 算法方案;标准 PSO 算法方案的各类业务时延略高于改进 PSO 算法方案,核心原因是改进 PSO 算法通过动态惯性权重提升了调度精度,有效减少了业务传输时延。

4.2.2 资源利用率分析

不同调度方案的资源利用率对比结果如下:改进 PSO 算法方案的网络带宽利用率为 89.6%,计算资源利用率为 87.3%,存储资源利用率为 85.8%;标准 PSO 算法方案的三类资源利用率分别为 82.1%、79.5%、78.2%;传统贪心算法方案的三类资源利用率分别为 75.3%、72.6%、70.1%。实验结果表明,本文提出的优化方案能够有效提升资源利用率,核心原因是改进 PSO 算法实现了网络、计算、存储资源的全局协同分配,避免了资

源闲置与浪费。

4.2.3 业务可靠性分析

不同调度方案下各类业务的可靠性对比结果如下:改进 PSO 算法方案的 uRLLC 类业务可靠性为 99.9992%,eMBB 类业务可靠性为 99.93%,mMTC 类业务可靠性为 99.2%;标准 PSO 算法方案的 uRLLC 类业务可靠性为 99.995%,略低于改进方案;传统贪心算法方案的 uRLLC 类业务可靠性为 99.98%,未完全满足预设约束。实验结果表明,本文提出的优化方案通过切片隔离与动态调整机制,有效提升了业务可靠性,能够满足工业互联网高优先级业务的需求。

4.3 实验结论

实验结果表明,本文提出的基于 5G 网络切片的工业互联网资源调度优化方案,通过改进 PSO 算法与动态调整机制,能够有效降低各类工业业务的端到端时延,提升资源利用率与业务可靠性;相比传统贪心算法与标准 PSO 算法,优化效果显著,可满足工业互联网多业务的差异化需求。

5 结论

本文围绕 5G 网络切片技术在工业互联网资源调度中的应用展开研究,针对当前工业互联网资源调度存在的资源分配与业务需求不匹配、调度效率低下、QoS 保障能力不足等问题,设计了基于 5G 网络切片的多目标资源调度优化方案。通过引入改进的 PSO 算法,实现了网络、计算、存储资源的全局协同分配,结合动态调整机制,可适应工业业务负载的动态变化。实验验证表明,该方案能够有效降低业务端到端时延,提升资源利用率与业务可靠性,为工业互联网资源调度优化提供了可行的技术方案。

参考文献

- [1]管婉青,刘诺言,李卫,等.面向工业时敏业务的 5G TSN 融合网络切片资源调度[J].电信科学,2024,40(3):53-63. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2024073.
- [2]魏海龙.网络切片技术在 5G+工业互联网中的运用策略研究[J].无线互联科技,2022,19(24):166-168.
- [3]储元舒.5G 赋能工业互联网的实时控制与低时延通信设计[J].Electronic Communication & Computer Science,2025,7(9).