

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.019

基于微服务的网络化协同制造资源优化配置方法研究

张阿龙¹, 张浩², 朱海华¹, 张毅¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210016)

摘 要: 针对传统航天高端装备分布式制造过程资源整合难、调配难、管控难等问题, 设计面向航天复杂装备产品的网络化协同制造系统平台。基于微服务思想设计系统架构, 提升系统拓展与维护能力; 采用边缘计算技术提升数据感知与集成的实时性, 使用深度强化学习算法求解资源优化配置问题。实现了供应链上下游离散资源的高效统一管理调度, 为航天装备制造供应链构建智能化生态奠定基础。

关键词: 航天装备; 资源优化; 配置方法; 微服务; 强化学习

中图分类号: TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0100-06

Research on Resource Optimization Configuration in Networked Collaborative Manufacturing Based on Microservices

ZHANG Along¹, ZHANG Hao², ZHU Haihua¹, ZHANG Yi¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Company, Nanjing 210016, China)

Abstract: To deal with the difficulty of resource integration, deployment, and management and control in the distributed manufacturing process of traditional high-end aerospace equipment, a networked collaborative manufacturing system platform for complex aerospace equipment products was designed. The system architecture was designed based on microservice concept to improve system expansion and maintenance capabilities. Edge computing technology was applied to improve the real-time performance of data perception and integration, and deep reinforcement learning algorithms was used to solve resource optimization allocation problems. The designed system achieves efficient unified management and dispatch of discrete resources upstream and downstream of the supply chain, laying the foundation for building an intelligent ecosystem for aerospace equipment manufacturing supply chain.

Keywords: aerospace equipment; resource optimization; configuration; microservices; reinforcement learning

0 引言

为解决航天领域传统协同生产模式中供应链管控难、资源利用率低的弊端, 我国航天工业正着力构建“小核心、大协作、开放型”的高效航天产业链协同研制体系^[1]。新一代信息技术与制造业的深度融合, 正驱动着传统制造业的数字化、智能化转型发展及业务模式的深刻变革^[2]。

目前, 网络化协同制造模式已经成为学术界和产业界的研究热点, 主要集中在网络化协同生产系统架构设计和供应商制造资源优化配置算法研究两个方面。在网络化协同制造平台架构设计研究方面, 冯俊等^[3]设计了一个 5 层三维可视化监控系统的体系架构, 实现对离散制造车间的实

时三维可视化监控。YANG 等^[4]提出了基于微服务和云边协同技术处理海量工业数据的物联网制造平台架构, 采用微服务技术提升系统可拓展性、引入云边协同技术提升数据的实时传输。在制造资源优化配置方面, LIANG 等^[5]提出了基于斡旋搜索算法 VS 和人工蜂群算法 ABC 的混合搜索算法, 并以时间、成本、可靠性构建服务组合评价指标, 求解云制造环境下的服务组合问题。ZHANG 等^[6]提出了不确定环境下两阶段多任务面向制造服务组合模型, 以及一种染色体长度可调的超启发式算法, 证明了其算法的有效性和鲁棒性。LIANG 等^[7]针对云制造环境中服务组合问题, 设计了一种考虑物流服务组合模型, 并采用深度强化学习算法求解模型, 证明了强化学习算法在解

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB11716300)

第一作者简介: 张阿龙(1998—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为网络化协同制造, 18325836329@163.com。

决资源优化配置问题的有效性。

尽管研究人员在网络化协同制造系统研究方面已经取得了一定的成就,但针对航天领域的网络化协同制造系统研究较少,并且现有系统架构存在耦合严重、数据处理实时性差、分布式制造资源的调度效率低等问题。

本研究基于微服务思想设计了一种面向航天制造领域的网络化协同制造体系架构,采用云边协同技术感知处理多元异构设备运行状态数据,提高数据感知实时性;采用深度强化学习算法进行资源的优化配置,相对于启发式算法,强化学习算法模型可提前训练模型,求解优化配置问题时通过实时数据驱动,提升算法求解的速度。

1 系统架构设计

1.1 基于微服务与云边协同架构设计

航天装备产品零部件众多、工艺复杂,涉及到产业链上下游几十家企业,整个制造过程跨设计所-主机厂-配套厂并行协同研制,涉及任务分解、资源匹配、资源配置等关键环节,而实现分布式企业制造资源接入、信息集成、质量追溯等功能是上述关键环节的重要支撑。

航天装备的研制依托于网络化协同制造系统,是一个由多业务域、多主体、多层次制造系统强耦合而成的分布式复杂制造系统,因此对系统的性能和承载能力带来巨大的挑战。一个好的网络化协同制造系统架构要能够满足海量数据的低时延传输、系统功能迭代与拓展迅速、制造任务快速响应的需求,才能够体现出网络化协同制造的优势所在,进而提升整个供应链的生产效率。

微服务是一种开发软件的架构和组织方法,通过将一个功能复杂、耦合严重的系统拆分成多个独立的、功能单一的业务模块进行单独的开发和部署,可以有效地提升系统可拓展性、可维护性,非常适用于面向航天的网络化制造系统的开发和设计。边缘计算是一种分散式运算的架构,将应用程序和数据运算由网络中心节点移往靠近数据源头的边缘节点来处理,加快了数据的处理和传输速度并减小延迟,十分适合处理冗余的海量工业数据,提升工业数据集成的实时性。

因此为满足面向航天的网络化协同制造系统海量数据的低时延传输、系统功能迭代与拓展迅速、制造任务快速响应的需求,基于微服务和边缘计算设计了一个4层系统架构,如图1所示。

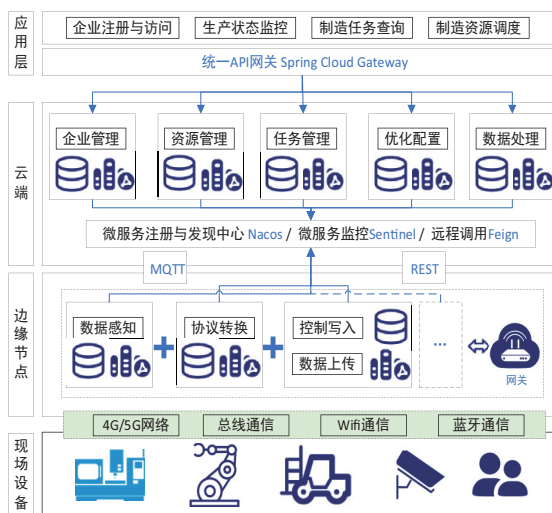


图1 基于微服务和云边协同下的系统总体框架

1) 制造资源层:由所有物理实体制造资源所组成,如各种加工设备、运输和仓储设备、生产原料等。

2) 边缘计算层:基于物联网技术,适配多种工业传输协议,感知制造资源层的生产状态数据,并对数据进行预处理和存储,将关键数据传输到云计算层。边缘节点根据业务功能可设计开发数据感知、协议转换、控制写入、数据上传等微服务。

3) 云计算层:云计算层是系统中最核心部分,利用强大的计算能力完成数据挖掘、模型训练求解、节点管理等功能。根据业务功能可设计开发企业用户管理、资源管理、任务管理、优化配置、数据感知等微服务。

4) 应用层:基于物理实体资源的感知模块,结合可视化技术实现对制造任务生产全流程可视化监控;基于数据传输和存储,实现生产状态的历史追溯;提供制造任务发布、资源发布、企业注册交互界面等。

1.2 云与边缘微服务设计与部署

合理的设计和划分微服务功能与粒度能够有效提升系统的可维护性、敏捷开发和部署能力。根据1.1节分析的云计算层和边缘计算层的业务职责进行划分设计云与边缘节点的关键制造微服务模块功能。

1) 网络化协同制造系统的微服务设计

根据边缘节点的业务职责设计了如下微服务模块。

a) 设备感知微服务:适配多种工业数据传输协议,接入物理实体资源,感知和控制设备运行

状态。

b) 数据预处理微服务:对感知数据进行数据清理和数据预处理操作,降低上传至云中心的数据规模。

c) 数据传输微服务:将预处理后数据进行统一格式化封装,基于 MQTT 协议上传云端并接收云端的控制指令。

根据云中心的业务职责设计了如下微服务模块。

①制造任务管理微服务:管理制造总体任务和分解后的子任务信息以及优化配置后子任务加工信息。

②任务分解微服务:实现制造总任务分解成多个子任务,将分解后的子任务信息发送给制造任务管理微服务。

③企业管理微服务:实现供应商上下游企业的注册和管理,对企业制造资源信息进行接入、记录和管理。

④优化配置微服务:调用优化配置算法,为分解后的每个子任务配置一个合理的制造服务企业,实现最优的服务组合方案。

⑤数据感知微服务:接收边缘云发送的设备状态信息并存储,将设备控制命令发送给边缘节点。

⑥节点管理微服务:管理所有的边缘节点基本信息和节点以及节点运行状态监控。

各个制造微服务间基于 HTTP 协议和 REST API 相互调用,调用关系如图 2 所示。每个服务可独立开发、部署,可根据实际业务需求快速开发、拓展新微服务模块。

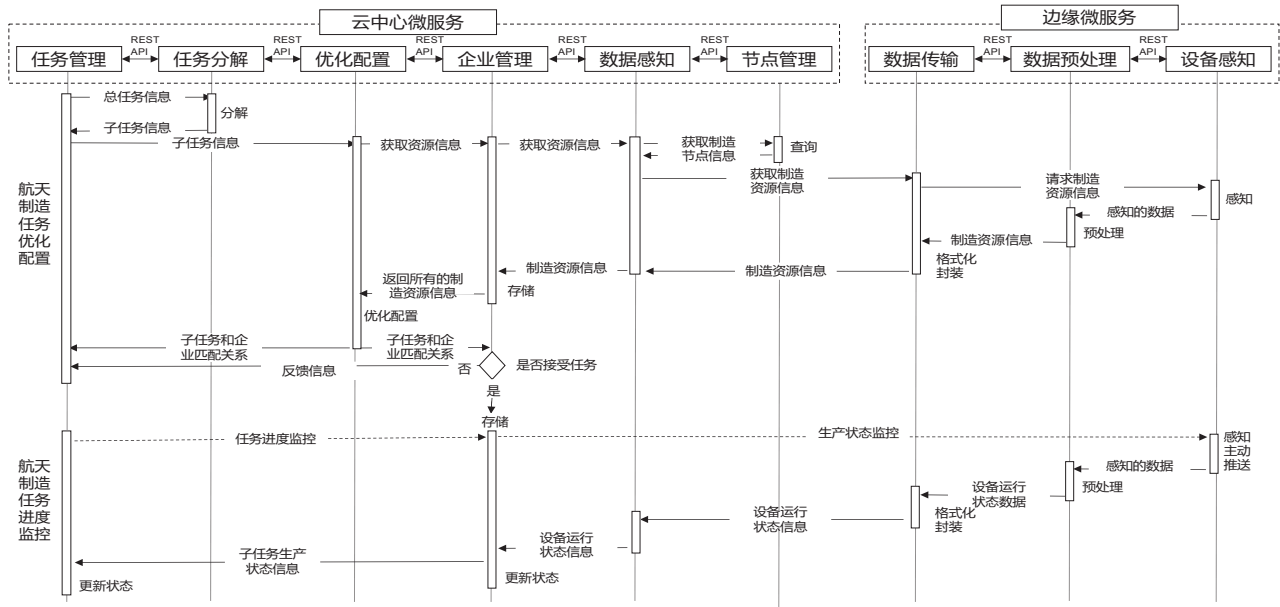


图2 制造微服务模块间调用流程

2) 容器化微服务部署

前面在云与边缘节点设计了多个制造微服务模块,每个微服务模块需要单独部署、运维,对网络化协同制造平台制造微服务模块的部署和管理带来了困难与挑战。因此,为了提升网络化协同制造系统云与边缘节点制造微服务模块的部署和管理效率,采用 Docker 和 Kubernetes (K8s) 技术进行微服务的部署。Docker 是一种轻量级的容器化技术,具有“一次构建,到处运行”的特性。K8s 是基于容器的集群管理平台,可轻松实现自动部署和管理“容器化应用程序”。基于云边协同网络化协同制造系统的 K8s 集群架构如图 3 所示。

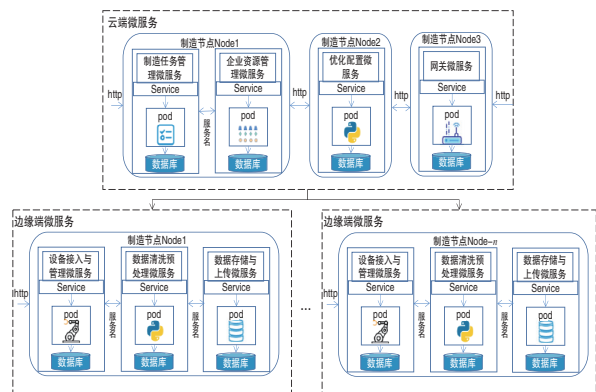


图3 云边协同下 K8s 制造微服务集群架构

基于云边协同网络化协同制造系统的 K8s 集群中所有的组件都是通过操作 Pod 来实现特定的功能要求,Pod 是 K8s 技术核心,通过灵活地组合多个相同功能或者不同功能容器服务形成一个制造微服务模块对外提供服务。在面向航天的网络化协同制造系统中,每个边缘制造节点负责一个制造工厂,Pod 中只运行一个容器服务来构建一个制造微服务模块。因此 K8s 对 Pod 的统一管理实现了快速部署和卸载云与边缘端的每一个制造微服务模块。

2 数据感知与云边数据协同

面向航天的网络化协同制造系统中,数据的实时性传输是生产质量把控和求解资源优化配置模型的关键,本节采用边缘计算技术并开发部署数据感知等微服务,提升资源状态数据的感知与传输的实时性。

2.1 边缘节点数据感知与集成

在航天装备生产过程中,设备产生的大量数据若都汇集到云中心,会给云端带来巨大压力,通过在边缘端部署数据感知微服务,适配各种协议并对底层设备状态数据进行感知,数据清洗预处理后上传云端,则有效降低网络资源使用和云端压力,感知过程如图 4 所示。

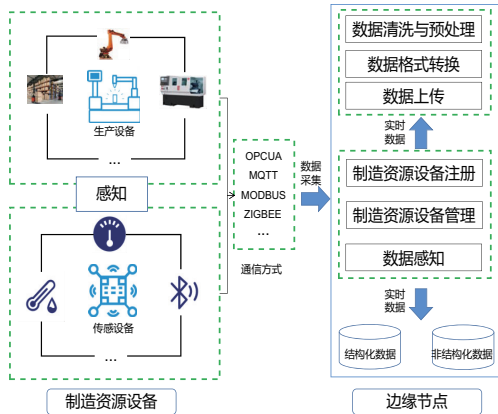


图 4 边缘节点数据感知与集成

2.2 云中心和边缘节点数据协同

边缘节点将感知的数据进行清洗、转换、格式化等操作再通过 MQTT 协议上传到云端,云中心利用边缘节点传输的数据进行任务分解和优化配置等算法模型的训练、优化与求解,并将优化完成的模型或求解结果下发给边缘节点,进而驱动边缘节点执行相应的操作达到云边协同效果,其基本流程如图 5 所示。

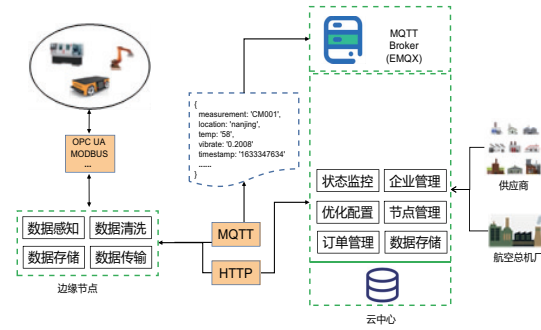


图 5 云边协同数据协同流程

云边数据协同有效提升了分布式制造资源数据感知的实时性,为网络化协同制造优化配置环节提供了高质量数据支撑。

3 优化配置算法设计

优化配置是网络化协同制造系统的最关键环节,配置的速度和结果优劣决定了航天装备生产的效率和质量。

本节设计了一个基于深度强化学习的制造资源优化配置模型,根据分布式制造资源配置过程的时间、成本和可靠性等因素进行数学建模,利用深度强化学习算法进行求解得到最优的资源配置方案。

3.1 模型建立

在分布式资源优化配置问题中,存在 M 个服务供应商,共提供 N 种制造服务,每种制造服务可满足一种子任务的加工需求。每个供应商可提供 N_i 种制造服务,提供的服务集合为 $M_{s,i} = \{m_{s,i,j} | 1 \leq j \leq N_i\}$ 。制造任务可以被分解成 T 个子任务, $M_T = \{s_{t,i} | 1 \leq i \leq T\}$ 。每个子任务 $s_{t,i}$ 需从候选资源池中选择出一个制造服务 $m_{s,i,j}$ 执行加工任务。由于制造过程涉及工件转运,需要考虑物流时间和成本,可表示为 $L = \{l_t, l_c\}$, l_t 表示单位距离花费时间, l_c 表示单位距离花费成本。

3.2 优化目标

配置目标是找到最短的时间、最少的成本和较高的服务质量的服务组合方案。

1) 时间包含加工时间和物流时间。子任务 $s_{t,k}$ 选择服务 $m_{s,i,j}$, 加工时间为 $m_{t,k}$, 两企业间物流时间 $l_{t,k}$; 总加工时间 $M_T = \sum_{k=1}^n m_{t,k}$, 总物流时间 $L_T = \sum_{k=1}^{n-1} l_{t,k}$; 总消耗时间 $T = M_T + L_T$ 。

2) 成本包含物流成本和加工成本。子任务 $s_{t,k}$ 选择服务 $m_{s,i,j}$, 加工成本为 $m_{c,k}$; 物流成本设为

$l_{e,k}$;总加工成本 $M_C = \sum_{k=1}^n m_{e,k}$, 总物流成本 $L_C = \sum_{k=1}^n l_{e,k}$;所以总的成本 $C = M_C + L_C$ 。

3) 可靠性描述了这个企业提供的服务正常使用的概率,可靠性只和企业相关。总可靠性 $R_{el} = \sum_{k=1}^n r_{el,k}$, $r_{el,k}$ 表示子任务 k 选择加工的企业可靠性。

由于每个指标的量化单位与大小不一,采用归一化处理,时间和成本归一化如式(1)所示,可靠性归一化如式(2)所示。

$$n(x) = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, x \in \{T, C\} \quad (1)$$

$$n(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, x = R_{el} \quad (2)$$

因此优化目标为

$$O = \max(w_t \times n(T) + w_c \times n(C) + w_{rel} \times n(R_{el})) \quad (3)$$

式中 w_t 、 w_c 和 w_{rel} 分别表示指标权重,满足 $w_c + w_t + w_{rel} = 1$,根据制造任务需求设置各个权重值大小。

3.3 算法设计

本文采用 DQN 求解优化配置问题,它是融合了神经网络和 Q-learning 的算法。本节将根据任务和资源特征设计状态空间、动作空间和奖励函数。

1) 状态空间和动作空间

状态空间将设计成包含子任务特征和企业特征。对于子任务 $s_{t,i}$ 有是、否两种状态 $\{s_{t,i}^{se}, s_{t,i}^{un}\}$, 每个企业 $m_{e,i} = \{r_{el}, d_{i,j}, b_{uf}\}$, $m_{e,i}$ 有是、否被选择两种状态 $\{m_{e,i}^{se}, m_{e,i}^{un}\}$, $d_{i,j}$ 表示当前企业和前置任务加工企业距离, b_{uf} 表示待加工任务数量。从状态 s_t 转移到 s_{t+1} 后,一项子任务就匹配成功一个制造企业,过程如图 6 所示。

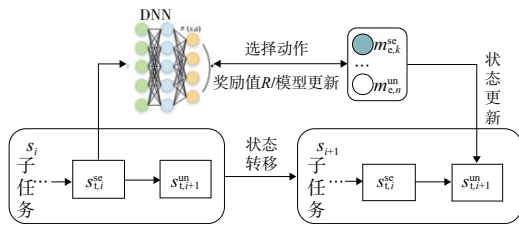


图 6 状态空间转移过程

设置动作空间为固定数量的企业,每次状态转移时选择一个企业作为输出动作。

2) 奖励函数

根据确定的优化目标,奖励函数设置为

$$R = n(T) + n(C) + n(R_{el}) \quad (4)$$

3) 算法运行过程

DQN 算法中包含了两个结构相同的神经网络模型,其中目标神经网络模型的参数保持不变,评估神经网络模型通过从经验回放池中选择过往案例对网络参数不断地更新,并每隔一定的步数将优化后的参数更新到目标神经网络模型中。通过式(5)和式(6)计算神经网络模型输出结果的损失值 l_{oss} 。

$$y_i = r_j + \gamma \times Q_{\max}(s_{j+1}, a_{j+1}; \theta') \quad (5)$$

$$l_{oss} = (y_i - Q(s_j, a_j; \theta))^2 \quad (6)$$

式中: r_j 表示在 j 时刻决策模块执行动作实际奖励值; $Q_{\max}(s_{j+1}, a_{j+1}; \theta')$ 表示在 $j+1$ 时刻目标神经网络模型预测输出中最大的 Q 值; γ 表示折扣率; y_i 表示目标网络模型对该状态下执行该动作的评估值; $Q(s_j, a_j; \theta)$ 表示评估神经网络模型在状态 s_j 下选择动作 a_j 的 Q 值,计算该值与 y_i 差值的平方获得损失值。经过一定步数后将评估网络模型更新到目标网络模型中。

模型训练完后将其开发部署为一个制造微服务模块,然后调用数据感知微服务模块获取实时数据求解模型,最终得到了一个基于制造资源状态的资源配置方案。

4 系统开发与验证

4.1 实验条件

生产车间如图 7 所示。该车间拥有数台数控机床、数台 AGV 小车、数台机械臂、一个自动仓储设备、一个边缘节点服务器等。

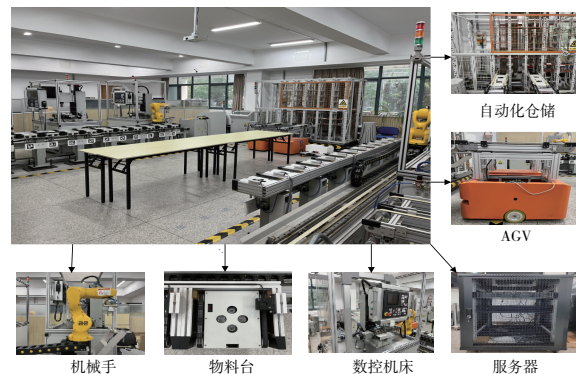


图 7 模拟航天供应商制造车间

4.2 系统开发验证

1) 微服务开发与注册

制造微服务的开发采用阿里微服务框架

SpringCloudAlibaba。以 Nacos 组件为微服务发现与注册中心,使用 OpenFeign 组件实现各微服务模块之间的 REST API 接口调用。

2) 设备接入、感知与云边交互

以感知数控机床振动为例。数控机床安装传感器设备后,经 RS485 接入到 ModbusTCP 后统一接入到边缘服务器。数据采集时,边缘节点向 ModbusTCP 发送设备数据采集指令;边缘节点对数据进行预处理后通过 MQTT 协议上传到云端并可视化状态数据,各环节实现如图 8 所示。

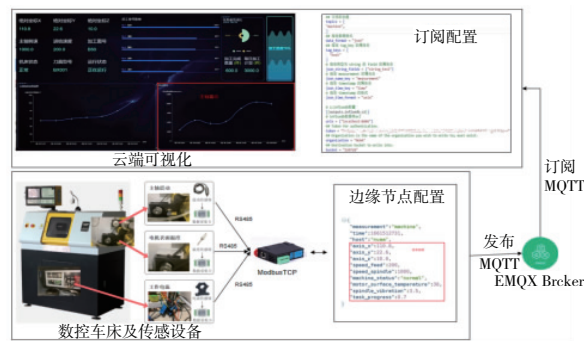


图 8 设备接入与数据集成流程

进行 100 次采样和配置测试,单一云和云边协同系统响应情况如表 1 所示,优化配置响应速度如图 9 所示。验证了云边协同下数据传输的实时性和 DQN 算法求解的快速性。

表 1 响应时间情况对比表 单位:ms

响应模块	单一云系统	云边协同系统
修改设备信息 响应时间	90~120	60~70
数据感知时间	200~300	30~50
设备响应时间	800~1 200	300~500

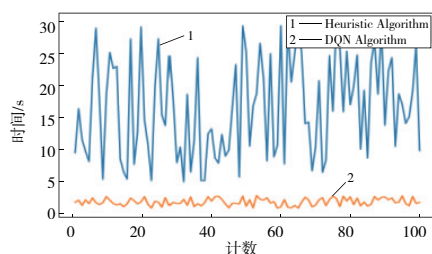


图 9 启发式算法和 DQN 算法响应时间

5 结语

本文设计了一个面向航天的基于微服务和云边协同的网络化协同制造系统,设计并开发了云与边缘端的微服务模块,提升了系统可拓展性和可维护性,并验证了云边协同下数据传输的实时性;使用 DQN 算法对优化配置问题进行求解,以实时感知数据为驱动,提升了优化配置模型求解的速度。

参考文献:

- [1] 王勇斌.充分发挥地方管理部门作用 构建先进国防科技工业体系[J].国防科技工业,2019(10):51-53.
- [2] 姚锡凡,景轩,张剑铭,等.走向新工业革命的智能制造[J].计算机集成制造系统,2020,26(9):2299-2320.
- [3] 冯俊,唐敦兵,朱海华,等.面向离散车间生产过程的三维可视化监控系统研究[J].机械制造与自动化,2021,50(5):152-155.
- [4] YANG H B,ONG S K,NEE A Y C,et al. Microservices-based cloud-edge collaborative condition monitoring platform for smart manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(24):7492-7501.
- [5] LIANG D,WANG J Y,BHAMRA R,et al. A multi-service composition model for tasks in cloud manufacturing based on VS-ABC algorithm[J]. Mathematics,2022,10(21):3968.
- [6] ZHANG S,XU Y B,ZHANG W Y. Multitask-oriented manufacturing service composition in an uncertain environment using a hyper-heuristic algorithm[J]. Journal of Manufacturing Systems,2021,60:138-151.
- [7] LIANG H,WEN X,LIU Y,et al. Logistics-involved QoS-aware service composition in cloud manufacturing with deep reinforcement learning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67:101991.

收稿日期:2023-11-17