

面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架研究

蔡金莹¹, 向峰¹, 左颖², 钟雷¹, 周平¹

(1. 武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉 430081; 2. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

摘要: 面向服务型制造的工业互联网平台快速发展并落地应用, 其对工业数据深度感知、实时传输、快速计算分析、高度反馈响应的优势逐步凸显, 也为制造服务可靠协作的执行提供了平台支撑。提出了一种基于服务等级协议 (SLA, service level agreement) 的制造服务可靠协作轻量级框架, 包括协作服务通信与接口模块、服务等级协议数据管理模块、服务协作服务质量 (QoS, quality of service) 协商模块、“失效—失信—守信”评估模块、激励和惩罚机制模块, 同时给出了基于 SLA 的制造服务协作流程, 从服务可信发布、协作有效执行、任务守信完成 3 个方面保障制造服务协作的可靠实施。

关键词: 工业互联网; 制造服务; 服务等级协议; 服务质量

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00240

Research on a lightweight framework of industrial Internet-oriented manufacturing service collaboration level agreement

CAI Jinying¹, XIANG Feng¹, ZUO Ying², ZHONG Lei¹, ZHOU Ping¹

1. School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The industrial Internet platform for service-oriented manufacturing has been developing rapidly and put into use. Its advantages of deep perception of industrial data, real-time transmission, rapid calculation and analysis, and high feedback response are gradually highlighted. It also provides platform support for the implementation of manufacturing service reliable collaboration. A lightweight framework for manufacturing service reliable collaboration was proposed based on service level agreement (SLA), including collaboration service communication and interface modules, service level agreement data management module, service collaboration quality of service (QoS) negotiation module, "failure-distrust-trustworthiness" evaluation module, incentive and punishment mechanism module. The SLA-based manufacturing service collaboration process was also given. The reliability of manufacturing service collaboration was guaranteed from three aspects: reliable service release, effective execution of collaboration, and task trustworthy completion.

Key words: industrial Internet, manufacturing service, service level agreement, quality of service

1 引言

服务型制造也被称为基于制造的服务或面向服务的制造^[1], 是制造与服务深度融合的生产新模

式、新业态。发展服务型制造是重塑我国制造业价值链、推动产业转型升级的有效途径, 对于制造业高质量发展具有重要的推动作用。在新一代信息和通信技术的驱动下, 服务型制造通过制造服务协作

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-07-02

通信作者: 向峰, xiangfeng@wust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51975431, No.51805020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.51975431, No.51805020)

在制造企业内部各领域、各环节之间动态获取、共享和整合制造资源和制造能力,以追求更高效的资源利用、更个性化的按需制造和更大规模的协同制造,实现各协作体的价值共创,利益共享。Tao 等^[2]针对当前基于工业互联网平台的制造服务协作发展中存在的实体空间与网络空间互动不足和不信任的挑战,提出了面向工业互联网平台的数字孪生和区块链强化制造服务协同机制。陶熠等^[3]根据制造企业外协加工制造服务的特征,构建了制造服务协作链,并通过算例验证了服务协作链优化的可行性。为提高服务协作链的高效性和稳定性,庞世宝等^[4]建立了制造资源聚合模型来描述车间制造资源的聚集关系,并使用频繁子网络挖掘算法挖掘了频繁出现的服务协作链。然而,随着经济贸易活动向线上转移,大规模无序的合作使得信任代价更高,其中制造服务协作方之间信任的缺少和丢失,使得制造服务协作出现制造服务不可信、协作过程常失效、任务目标未完成等问题。

为了解决制造服务协作存在的问题,需要协作主体间达成协作协议。制造企业基于工业互联网开发的服务管理软件、新型工业云构件库与工业软件可实现更高频的数据联系,可以更动态地掌握用户的需求变化和产品的使用状况,提升企业间服务协作能力,保障协作全过程的可靠实施。随着信息系统研究的发展,制造领域的竞争日益向以平台为中心的生态系统转移。与传统的面对面交流方式相比,基于平台的制造服务协作是一种高效、低成本的制造协作方式。工业互联网平台也被称为工业物联网平台^[5],通过数据流和分析促进智能升级,在物理实体和网络组件全面互联的基础上形成新的模型和格式^[6]。随着工业互联网平台的逐步落地和对其深入挖掘,以及工业应用对于数据传输、分析计算、高度灵敏的反馈响应等需求,面向服务化制造的工业互联网平台为制造服务可靠协作的执行过程提供了平台支撑与保障。

服务等级协议(SLA, service level agreement)^[7]是用户和服务提供方经过一系列的协商后达成的协议,包括一系列服务条款。SLA 详细描述了提供服务的范围、服务价格、服务质量(QoS, quality of service)以及授权的用户,规约了供应方和用户之间的职责、权利和义务。SLA

文档详细描述了服务提供方在提供服务时承诺用户的服务性能标准,还规定了在违反 SLA 时的补救行动和性能低于承诺标准时的处罚约定。SLA 的实现过程比较复杂,不同的 SLA 实现框架规定了不同的 SLA 实现方法。孙文辉^[8]将 SLA 的概念引入 Web 服务体系架构,提出了一套基于 agent 的在动态服务环境下自适应的 SLA 协商机制。于阳等^[9]针对服务组合场景下基于 SLA 的 QoS 管理问题,提出了一个云计算背景下的动态 SLA 管理框架。胡铁楠等^[10]针对云制造模式中底层物理资源属性难以接入云制造平台的问题,提出了一种总线 SLA 以及与之配合的多协议转换模块。高云璐等^[11]针对企业用户和个人用户对质量属性的不同需求,提出一种基于 SLA 与用户评价的云计算信任模型。Torkashvan 等^[12]针对服务提供方是否有违规行为,提出了基于云的 SLA 管理,从已建立的 SLA 文档中定义云服务的 SLA 参数以监视和测量服务参数。

稳定的 QoS 是保障工业互联网平台制造服务协作可靠实施的重要前提, QoS 的保证依赖于 SLA 实现。当制造服务协作从线下向工业互联网平台迁移时,由于工业互联网平台的无边界性,平台的接入是免费的。但平台内的制造服务、协作环境、任务需求会不断变化,服务提供方必须提供满足用户需求且稳定的 QoS。因此, SLA 特别是轻量级协议框架对于工业互联网平台内的服务协作重构、快速部署以及任务完成等具有监督和促进的作用。针对制造服务协作中 QoS 控制不足、服务保障颗粒度不清晰、协作关系失效缺乏约束方法等问题,本文提出了一种基于 SLA 的制造服务可靠协作轻量级框架,同时给出了基于 SLA 的制造服务协作流程,从服务可信发布、协作有效执行、任务守信完成 3 个方面保障制造服务协作的可靠实施。

2 相关工作

2.1 工业互联网平台下制造服务协作特点与挑战

工业互联网平台下的制造资源具有分散性、自治性、异构性、多样性、动态性以及组合性等特点,使得制造服务协作呈现出多方共享与协同、动态可重构、微服务及轻量化的特征。

1) 多方共享与协同。工业互联网平台是一个开放的网络平台,聚合多种规模和功能的制造资源,

用户根据制造需求在制造平台的支持下灵活地、敏捷地选择制造服务。由于制造资源属于不同的管理方，资源所有者有时会为了自身利益而调整资源管理策略，恶意造成协作的失败，致使制造服务过程缺乏一定的可靠性。如何高效、高质量地共享制造资源、完成协作任务成为制造平台的重要挑战。

2) 动态可重构。工业互联网平台下的制造企业会依据市场趋势和用户需求的变化^[13]，跨企业、跨地区开展社交化制造服务协作，并伴随制造任务的发布和结束，动态地加入和退出协作平台。因此，如何保证制造资源、制造能力协同化以及用户使用保障达到有效平衡是当前面临的主要挑战。

3) 微服务及轻量化。在需求方制造任务的驱动下，工业互联网平台以轻量化的方式将复杂的制造任务分解成多个制造微服务^[14]，保障制造任务的部署效率和复用性。但微服务拆分细粒度不清晰、部署复杂性高可能会引起单个制造微服务的失效，从而导致整个制造任务的失效。如何设置和加强服务的制造服务等级目标 (MSLO, manufacture service level objective)，有效控制服务的细粒度是当前亟须解决的问题。

2.2 轻量级框架的概述

相较于“重量级”框架，“轻量级”框架具有占用系统资源少、部署简单、容易使用等优势，可以灵活应对，保障制造服务协作工作的成功率，降低企业的制造成本。在实际的应用过程中，不同于重量级框架注重整个复杂制造任务的部署及管控，轻量级框架只需考虑具有独立特征的制造协作微服务接口规范、服务等级目标、QoS 可靠性等因素。重量级框架和轻量级框架的对比如表 1 所示，从不同角度对二者进行了比较。

表 1 重量级框架和轻量级框架的对比

特征	重量级框架	轻量级框架
便捷性	较低	高
协定过程	较复杂	简单
平台依赖性	高	较低
开放性	较低	高
运行效率	偏低	较高
使用开销	较多	很少
处理能力	较强	较弱

3 面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架

根据关于制造服务协作的现有文献，结合工业互联网平台下制造服务协作的特点，本文提出一种面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架，如图 1 所示。该框架由协作服务通信与接口模块、服务等级协议数据管理模块、服务协作 QoS 协商模块、“失效—失信—守信”评估模块、激励和惩罚机制模块组成。

3.1 协作服务通信与接口模块

制造资源之间存在着跨层次和多粒度的协作关系，为保证其信息交互接口规范，协作服务通信和接口模块为协作方之间直接提供了人机交互接口、PC 接口、移动终端等专业应用接口，面向工业互联网的制造服务协作等级协议框架选择 WS-Agreement (Web Service Agreement)^[15]作为 SLA 的规约语言，对制造资源进行形式化描述，使用描述模版库和资源—服务映射器，实现资源服务化，封装操作简单化、自动化和规范化。

3.2 服务等级协议数据管理模块

SLA 数据管理模块以一份单独的文档形式存在于协议框架中，包含了角色管理、服务目录、QoS 属性、服务等级目标 (SLO, service level objective)、违约补偿和灾难恢复等。服务等级目标如表 2 所示，面向工业互联网的制造服务协作等级协议将用户最关心的服务可靠性、处理时间、可用程度、执行费用、安全等级、信誉值作为 QoS 属性，并对其进行语义描述、权重分配，并确定其制造服务等级目标区间范围，其中权重 $W=(w_1, w_2, \dots, w_6)$ ，且 $w_1 + w_2 + \dots + w_6 = 1$ 。

3.3 服务协作 QoS 协商模块

QoS 协商模块包含协商内容、协商协议、建议生成策略、让步策略。当服务提供方与用户之间需要合作但在 QoS 方面存在冲突时，可以通过协商的方式处理服务之间的 QoS 折中 (trade-off) 以最大化自身的利益。

1) 协商内容

协商内容拥有多个 QoS 属性及其服务等级指标取值范围、最大协商次数 T_{\max} ，协作方会在可能取值中寻找共同接受的方案。

2) 协商协议

包含双方协商 QoS 初始化条件、 SP_i 和 SP_j 的行为、协商流程。协商初始化条件包括双方的偏好、

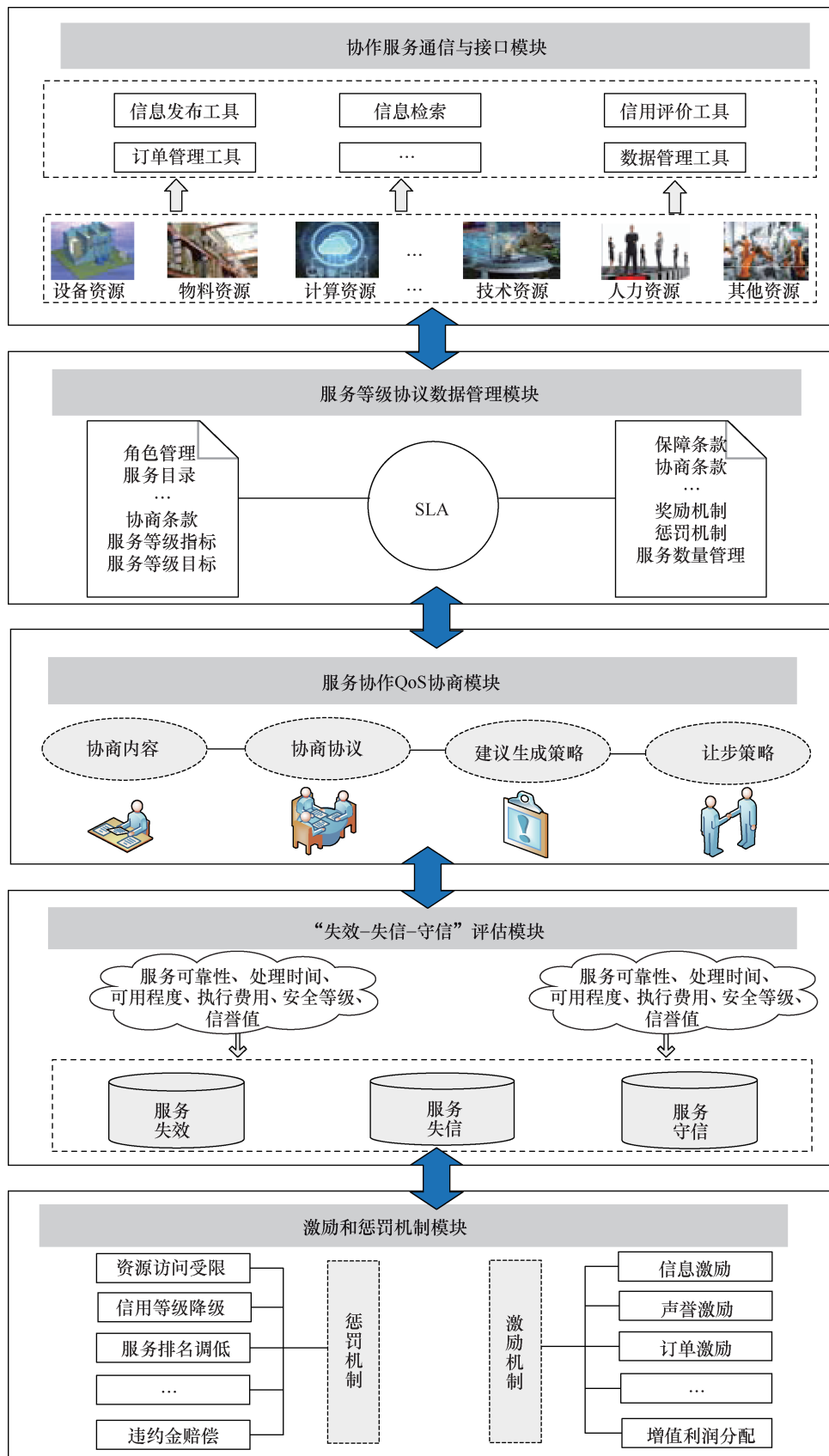


图1 面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架

表2 服务等级目标

QoS 属性	定义描述	权重	对应 MSLO 区间
服务可靠性	服务在规定的时间内成功执行的能力	w_1	$R_i \leq n < R_j$
处理时间	完成服务所需要的时间	w_2	$T_i \leq n < T_j$
可用程度	可以正常使用服务的程度	w_3	$A_i \leq n < A_j$
执行费用	服务所收取的相关服务费	w_4	$C_i \leq n < C_j$
安全等级 Level	服务的数据加密、认证和授权能力	w_5	$SL_i \leq n < SL_j$
信誉值	直接信誉度和推荐信誉度的综合评价	w_6	$Re_i \leq n < Re_j$

评价函数和属性的取值范围等。 SP_i 和 SP_j 行为包括满足何种条件接受对方提议、退出协商和提出新提议。协商流程为双方轮流对 QoS 定值的过程。

3) 建议生成策略

当 SP_i 和 SP_j 进行协商时，假如 SP_j 不接受 SP_i 所提出的方案，则 SP_i 需要根据制造任务自身的需求提出对应的方案。建议生成策略需要考虑协商议题的取值范围。

4) 让步策略

协作方为了达成协议，需要在协商中降低自己的利益做出适当的让步。设定一个值 D_{\min} 作为服务底线，若低于该底线则提前结束协商。协作方随着协商次数的增加而调整自身的让步空间。

3.4 “失效—失信—守信”评估模块

通过定性评价和定量评价两种方式对 QoS 进行“失效—失信—守信”评估。评估结果包括3种：服务协作失效、服务协作失信、服务协作守信。服务协作失效可表现为恶意失效和无意失效。若服务协作商有目的地降低或停止提供服务导致制造任务出现制造资源供应中断、数据传输失效、重要信息泄露等问题，则评估该服务协作恶意失效；若由灾难引起制造资源短缺和制造任务延迟完成，则评估该服务协作无意失效。服务协作失信表现为虽然服务提供方完成了制造任务，但并没有达到服务等级指标。服务协作守信表现为 SP_i 能够基于制造服务 SLA 正常执行协作流程并以高 QoS 达到双方协定的服务等级目标。

3.5 激励和惩罚机制模块

惩罚机制能够有效地抑制协作过程中可能出现的机会主义倾向，促进稳定的 QoS 协作。依据评估模块的结果判定制造服务协作状态，当协作状态出现服务失效和服务失信，导致违反 SLA，则依据 SLA 的惩罚机制对协作方 i 采取违约处罚措施，面向工业互联网的 SLA 的惩罚激励机制包含资源访

问受限、信用等级降低、违约金赔偿等，其中违约金额为线性函数，表示为

$$\text{ViolCost}^n = \alpha + P_i \times \text{MSCost}^n \quad (1)$$

其中， α 一般为常数， P_i 为违约处罚约束因子 ($0 < P_i \leq 1$)， MSCost^n 为完成制造任务 n 实际需要的开销。

有效的激励机制既可以保证服务提供方产品质量的优质和稳定，又可以与用户维持良好的协作关系。面向工业互联网的 SLA 的守信激励机制包含显性激励和隐性激励。显性激励包含增值利润分配、订单激励等；隐性激励是指信任激励、声誉激励、信息激励等。依据激励机制，服务提供方的增值利润分配为

$$\text{AddPro}^n = \eta + R_i \times \text{MSPro}^n \quad (2)$$

其中， η 一般为常数， R_i 为违约处罚约束因子 ($0 < R_i \leq 1$)， MSPro^n 为完成制造任务 n 实际获得的利润。

4 基于 SLA 的制造服务可靠协作流程

工业互联网平台下的制造服务数量繁多且多源异构。基于 SLA 的制造服务协作流程如图 2 所示，针对制造服务协作中 QoS 控制不足、服务保障颗粒度不清晰、协作关系失效缺乏约束方法等问题，给出了基于 SLA 的制造服务协作流程，从服务可信发布、协作有效执行、任务守信完成 3 个方面保障制造服务协作的可靠实施，以下进行描述。

1) 用户依据自身的制造需求在制造平台发布服务需求任务并提出 MSLO。各制造资源提供方将其拥有的制造资源服务目录、服务等级指标、保障条款、协商条款、违约处罚机制等内容接入制造平台，并根据服务需求分别划分为不同服务资源池。用户根据自身制造需求以及服务提供方资源能力、声誉等级等筛选出服务提供方 SP_i 与 SP_j 。

2) 基于用户提出的 MSLO，制造服务平台中

的 SP_i 与 SP_j 根据自身制造资源能力开展服务协作，并分别提供自身的 SLA 参数内容。双方基于所提供的 SLA 参数内容进行协商，若 SP_i 同意 SP_j 提交的 SLA 参数内容，则双方建立 SLA，并开启基于 SLA 的制造服务协作。

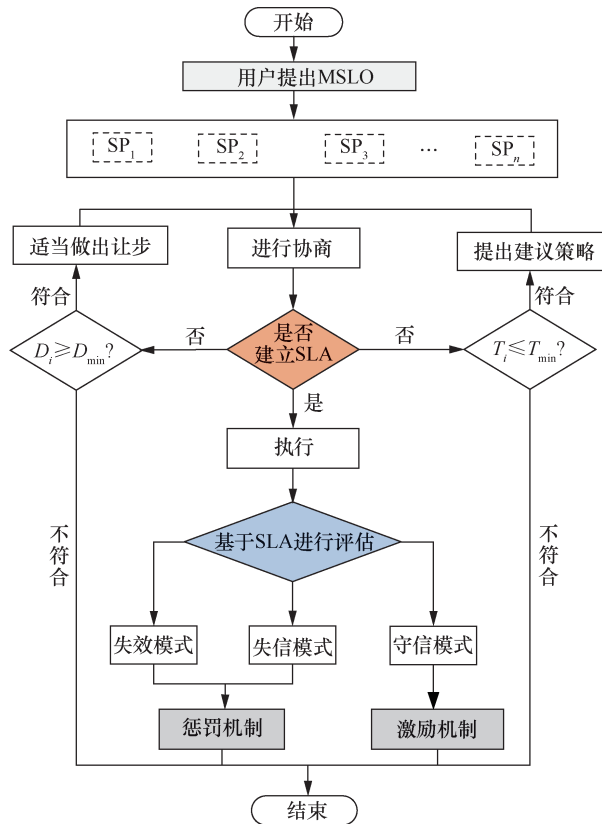


图 2 基于 SLA 的制造服务协作流程

3) 若 SP_i 对 SP_j 提交的 SLA 参数存在异议，则双方根据 SLA 中协商轮次 T 和协商底限 D 开展交互协商。当协商轮次 $T_i \leq T_{min}$ ，则 SP_i 根据制造任务的需求向 SP_j 提出让步策略；若 SP_i 提出的让步策略低于对方最小服务底线，即 $D_i < D_{min}$ ，则双方自动结束协商工作；若当前 SP_i 提出的让步策略高于对方最小服务底线，即 $D_i \geq D_{min}$ ，则为了促进协议的达成，协作双方需要在协商过程中降低自己的利益做出适当的让步，直至双方对此次协作各项内容无异；若双方协商轮次 $T_i > T_{max}$ ，则双方自动结束协商工作。

4) SP_i 和 SP_j 正式签订 SLA，并依据上述协商结果开始制造服务协作的工作。

5) 若制造任务没有完成或协作中断，平台则判定为服务失效；若服务提供方完成了制造任务，但没有达到服务等级目标，则判定为服务失信；若

制造任务能够基于 SLA 正常执行，并以高 QoS 达到双方协定的服务等级目标，则判定为服务守信。

6) 当制造任务结果被判定为失效或失信时，平台则依据 SLA 中的惩罚机制对服务提供方实行惩罚；当制造任务结果被判定为服务守信时，则依据 SLA 中的激励机制对服务提供方实行激励。

5 结束语

SLA 对工业互联网平台下的制造服务 QoS 的管理具有重要作用，它直接影响制造资源的质量、服务协作的秩序和用户对类似服务的选择。本文针对工业互联网平台下的制造服务协作的特征及挑战，提出了一种面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架并分析其应用流程，以保证制造服务协作方可靠的 QoS，对企业提高制造服务的执行效率和协作方满意度具有重要的理论意义，在实际的制造服务协作过程中也具有一定的应用价值。制造服务平台能够通过制造服务等级协议使用服务推荐算法为复杂的制造任务创建服务组合，制造资源提供方依据制造服务等级协议提前对制造任务进行编排以提高制造资源的利用率。

本文针对面向工业互联网的制造服务协作等级协议轻量级框架研究只是一个初步的尝试，未来将在制造服务任务的粒度划分、完善工业互联网平台的奖惩指标体系以及服务等级协议轻量级框架在服务应用的可靠性和安全性等角度进行深入研究。

参考文献:

- [1] ZUO Y, TAO F, NEE A Y C. An Internet of things and cloud-based approach for energy consumption evaluation and analysis for a product[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(4/5): 337-348.
- [2] TAO F, ZHANG Y P, CHENG Y, et al. Digital twin and blockchain enhanced smart manufacturing service collaboration and management[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020.
- [3] 陶熠, 吴佑波, 刘瀚元. 制造服务中服务协作链构建与优化研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2018, 35(6): 46-53.
TAO Y, WU Y B, LIU H Y. Study on construction and optimization of business collaboration chain in manufacturing service[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2018, 35(6): 46-53.
- [4] 庞世宝, 郭顺生, 王磊, 等. 面向大规模个性化制造的车间制造服务协作链构建方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(17): 2104-2111.
PANG S B, GUO S S, WANG L, et al. Construction method of workshop manufacturing service collaboration chains for mass personalization manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(17): 2104-2111.

- [5] 倪光南. 工业物联网安全与核心技术国产化[J]. 物联网学报, 2018, 2(2): 1-7.
NI G N. Security of the industrial Internet of things and localization of the core technology[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(2): 1-7.
- [6] TAO F, ANWER N, LIU A, et al. Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 1-2.
- [7] 向峰, 黄圆圆, 左颖, 等. 面向服务水平等级协议的制造服务能效评估[J]. 中国机械工程, 2018, 29(20): 2401-2407, 2415.
XIANG F, HUANG Y Y, ZUO Y, et al. SLA-oriented energy efficiency evaluation of manufacturing service[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(20): 2401-2407, 2415.
- [8] 孙文辉, 刘峰, 戴钢, 等. 面向服务的服务等级协议管理机制[C]//全国软件及其应用学术会议[出版地不详: 出版者不详], 2007.
SUN W H, LIU F, DAI G, et al. A service-oriented service level agreements management schema[C]//National Software and Application Academic Conference[S.l.:s.n.], 2007.
- [9] 于阳, 赵欣, 彭鑫, 等. 云计算背景下面向服务组合的 SLA 动态管理机制研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(9): 22-27.
YU Y, ZHAO X, PENG X, et al. Research on service composition-oriented dynamic SLA management mechanism in cloud computing[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(9): 22-27.
- [10] 胡铁楠, 吕云蕾, 刘亚秋. 可用于云制造环境的新型现场总线协议[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(2): 326-333.
HU T N, LYU Y L, LIU Y Q. New fieldbus protocol for cloud manufacturing environments[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(2): 326-333.
- [11] 高云璐, 沈备军, 孔华锋. 基于 SLA 与用户评价的云计算信任模型[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 28-30.
GAO Y L, SHEN B J, KONG H F. Trust model for cloud computing based on SLA and user ratings[J]. Computer Engineering, 2012, 38(7): 28-30.
- [12] TORKASHVAN M, HAGHIGHI H. CSLAM: a framework for cloud service level agreement management based on WSLA[C]//Proceedings of 6th International Symposium on Telecommunications (IST). Piscataway: IEEE, 2012: 577-585.
- [13] ZHOU J J, YAO X F. A hybrid approach combining modified artificial bee colony and cuckoo search algorithms for multi-objective cloud manufacturing service composition[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(16): 4765-4784.
- [14] 吴昌雨, 李云松, 刘青, 等. 基于微服务架构的物联网应用基础框架设计[J]. 宿州学院学报, 2015, 30(7): 88-92.
WU C Y, LI Y S, LIU Q, et al. Design of basic framework of Internet of things application based on microservice architecture[J]. Journal of Suzhou University, 2015, 30(7): 88-92.
- [15] CHUDASMA N, CHAUDHARY S. Service composition using service selection with WS-agreement[C]//Proceedings of the 2nd Bangalore

Annual Compute Conference on 2nd Bangalore Annual Compute Conference - COMPUTE '09. New York: ACM Press, 2009: 1-5.

[作者简介]



蔡金莹（1996- ），女，武汉科技大学机械自动化学院硕士生，主要研究方向为制造业信息化、面向服务的智能制造等。



向峰（1983- ），男，武汉科技大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为面向工业互联网服务的制造、数字孪生、机器视觉等。



左颖（1986- ），男，北京航空航天大学助理研究员、硕士生导师，主要研究方向为面向服务的智能制造、绿色智能制造服务及应用、产品能效评估/建模/仿真与优化等。



钟雷（1996- ），男，武汉科技大学机械自动化学院硕士生，主要研究方向为面向服务的制造、数字孪生、工业互联网等。



周平（1996- ），男，武汉科技大学机械自动化学院硕士生，主要研究方向为数字孪生、制造服务、复杂网络等。