

基于主从链和边缘计算的 MES 生产调度模型

刘 炜^{1,2,3}, 夏玉洁^{1,2}, 贾 骏⁴, 郭灵贝^{1,2}, 余 维^{1,2,3}, 田 钊^{1,2}

(1. 郑州大学 网络空间安全学院 河南 郑州 450002; 2. 郑州市区块链与数据智能重点实验室 河南 郑州 450002; 3. 郑州大学互联网医疗与健康服务河南省协同创新中心 河南 郑州 450052; 4. 郑州大学第一附属医院 河南 郑州 450000)

摘要: 智能工厂存在大量的物联网设备,设备之间通过工业物联网实现信息和指令的实时交互。物联网设备产生的海量数据需要上传,导致中心服务器压力过大、数据处理耗时过长,且设备之间的通信存在安全隐患。提出一种基于主从链和边缘计算的制造执行系统生产调度模型。首先,设计主从链架构模型,将制造执行系统模块化并集成到边缘节点,减少数据传输和降低泄露风险;其次,设计一种基于属性基的智能合约访问控制策略,实现设备和节点之间的安全通信;最后,设计生产调度算法完成跨节点、跨车间调度任务,实现去中心化的生产调度方式。实验结果表明,所提模型与传统工业制造系统相比,保证了数据安全性,提高了响应速度。

关键词: 区块链; 边缘计算; MES; 智能合约; 工业物联网

中图分类号: TP303

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2023)03-0014-08

DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2022101

MES Production Scheduling Model Based on Master-Slave Chain and Edge Computing

LIU Wei^{1,2,3}, XIA Yujie^{1,2}, JIA Jun⁴, GUO Lingbei^{1,2}, SHE Wei^{1,2,3}, TIAN Zhao^{1,2}

(1. School of Cyber Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhengzhou Key Laboratory of Blockchain and Data Intelligence, Zhengzhou 450002, China;

3. Henan Cooperative Innovation Center for Internet Medical and Health Services, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 4. The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: There were a large number of Internet of Things devices in the smart factory, and the devices interacted with each other to realize real-time interaction of information and instructions through the Industrial Internet of Things. The massive data were generated by Internet of Things devices and uploaded to the servers, resulting in excessive pressure on the central server, time-consuming data processing, and security risks in communication between devices. A production scheduling model of manufacturing execution systems based on the master-slave chain and edge computing was proposed. Firstly, the design of a master-slave chain architecture model that could modularize and integrate manufacturing execution systems into edge nodes to reduce redundant data transfers, and decrease the risk of leakage. Secondly, a smart contract access control strategy based on an attribute base was designed to achieve secure communication between devices and nodes. Finally, production scheduling algorithms were designed to accomplish cross-node and cross-workshop scheduling tasks, and a decentralised production scheduling approach was implemented. Experimental results demonstrated that data security was ensured and response speed was

收稿日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62176239); 河南省重点研发与推广专项(212102310039, 212102310554); 河南省高校科技创新人才支持计划(21HASTIT031); 河南省重大公益专项(201300210300); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS018); 郑州大学教育教学改革研究与实践项目(2021ZZUJGLX168)。

第一作者: 刘炜(1981—), 男, 副教授, 主要从事区块链、信息安全、智慧医疗研究, E-mail: wliu@zzu.edu.cn。

通信作者: 田钊(1985—), 男, 讲师, 主要从事信息安全、区块链、智能交通研究, E-mail: tianzhao@zzu.edu.cn。

improved, compared with that in traditional industrial manufacturing systems.

Key words: blockchain; edge computing; MES; smart contract; Industrial Internet of Things

0 引言

随着工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)的发展,工业4.0时代正在出现新的设计与挑战,传统工业在智能制造模式上进行转变,致力于优化整体生产价值和提高生产率^[1]。在工业物联网中引入制造执行系统(manufacturing execution system, MES)实现生产任务调度,并通过容器技术、虚拟化技术连接成一个集成的系统,实现底层设备之间的信息交互。

MES包含大量的感知设备和制造设备,设备采集数据并上传到云端服务器,处理过程对网络带宽、服务器计算和存储能力要求较高。此外,MES主要进行生产调度任务,通过连接可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)系统来管理和调配各种制造设备以保证自动化生产流程正常运行,当前大多数MES调度算法的复杂程度较高,各种设备之间独立性较强,无法稳定调配且生产调度任务不符合实际需求常有发生^[2]。

现如今已有许多成熟的工业物联网云平台为智能工厂提供服务,然而由于工业物联网云平台的可靠性问题,如何实现智能工厂数据安全存储、访问控制已成为迫切要解决的问题^[3]。文献[4]提出将传统工业进行数字化转型,结合工业物联网实现工业自动化。文献[5]提出将传统中心化架构的MES过渡到去中心化架构,并且设想车间能够实现不借助任何中心化控制完成生产调度等操作,传统的MES与最新提出的工业4.0概念不兼容。文献[6]提出一个去中心化的MES架构,将当前MES应用程序拆分成多个服务,各服务之间互相协调、互相配合,每个服务独立运行,采用轻量级的通信机制互相通信。文献[7]提出将MES应用程序进行模块化,各个模块之间相互独立、相互协作。文献[8]提出新一代MES的架构与企业资源计划系统紧密耦合,在出现故障时通过数字孪生技术进行动态规划和生产调度。文献[9]提出一种基于区块链的制造联盟系统,结合网络将传统静态联盟模式转变为动态联盟模式。文献[10]提出一种基于精益供应链MES,包含从原材料采购到成品入库的生产过程进行实时数据采集、控制和监控,实现生产控制、产品追踪追溯、实时数据传输与处理等功能。文献[11]提出一种

支持可追溯性和可撤销性的区块链增强安全访问控制方案,保证了系统的安全性,能够抵抗多种攻击。

由于传统工业制造系统中设备产生的海量数据处理耗时过长,上述文献提出将制造执行系统模块化,但是没有考虑设备间如何安全通信的问题;有些研究采用区块链来确保设备通信安全和数据安全,由于区块链网络的本身通信机制原因,没有考虑区块链应用到工业物联网中导致网络带宽占用过高、通信时延过长的的问题。

综上所述,本文构建一种基于主从链和边缘计算的制造执行系统生产调度模型(manufacturing execution system based on master-slave blockchain and edge computing, BECMES),采用主从链架构解决区块链网络随着数据量增加、共识过程中网络带宽占用过高的问题;将MES功能模块部署到边缘节点,设备采集的数据实时处理,轻量级封装上传到区块链网络,有效地解决了中心服务器压力过大、传输和处理时延过长的的问题;通过智能合约实现设备细粒度访问控制,确保设备安全可靠。

1 相关技术

1.1 MES

MES是一套面向制造车间的生产信息化管理系统,有承上启下的作用。MES通常用于协调企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)层和过程控制系统(process control system, PCS)层^[12]。

ERP系统属于企业管理级,MES属于工厂管理级以及车间控制级,PCS属于过程控制级和设备控制级。ERP系统对MES下发订单,由MES将具体的事务信息传递给PCS系统,使PCS系统完成自动化生产^[13]。PCS系统将生产前、生产中、生产后的设备状态数据、产品质量数据、生产车间环境安全数据等海量数据传递给MES,MES对数据进行计算处理,将订单的完成情况、工厂生产状况等处理好的信息传递给ERP系统,使管理级人员对工厂的生产、环境、仓储信息有更好地了解,为决策提供帮助。

1.2 区块链技术

区块链技术起源于比特币(Bitcoin)^[14],其作为底层技术,研究与应用呈现爆发式增长。区块链是一种由多方参与、共同维护的分布式共享账本技术,具有去中心化、安全可靠、不可篡改、可追溯等特

点^[15]。超级账本(hyper ledger fabric)是首个面向企业应用场景的开源分布式账本平台,引入权限管理,设计上支持可插拔、可扩展,是面向联盟链场景的开源项目^[16]。相比于以太坊与其他区块链系统,最大的不同点在于超级账本是被许可的区块链,不允许未知身份参与超级账本网络,要求协议验证事务并确保网络的安全^[17]。

1.3 边缘计算

边缘计算指在数据产生源附近分析、处理数据^[18]。边缘网络包括汇聚层网络和接入层网络的部分或全部,是接入用户的最后一公里网络。而边缘节点就是在数据产生源头和云中心之间具有计算资源和网络资源的节点。因为靠近数据源,减少数据的流转,从而减少网络带宽占用。将数据放在边缘节点进行计算,从而有效地缓解云中心的计算压力^[19]。工业物联网的实时性要求系统能够在特定时间内完成任务,大多数云中心物联网框架响应较慢,但是采用边缘计算,将数据放在网络边缘进行处理可以减少数据上传和交互过程,既能够很好地满足工业物联网实时性的需求,又避免数据在发送过

程中被用户恶意阻截和篡改的可能,保证了数据安全^[20]。

2 BECMES 模型

通过对传统工业制造系统的研究与分析,本文构建了基于主从链和边缘计算的MES生产调度模型。主从链架构能够解决区块链网络带宽占用过高和数据泄漏的问题,边缘节点能够在靠近数据源侧快速分析并响应请求,减少数据传输;设计基于属性基的智能合约细粒度访问控制和生产调度算法,既保证了设备安全可靠又能够提高生产效率。

2.1 模型架构

BECMES结构由四层组成,其层次结构如图1所示,自底向上分别为物理设备层、边缘计算层、区块链层、应用层。相比传统制造执行系统,增加了区块链层和边缘计算层,实现工业物联网设备间生产任务的自调度,减少数据传输和节点交互次数,保障数据安全可靠。

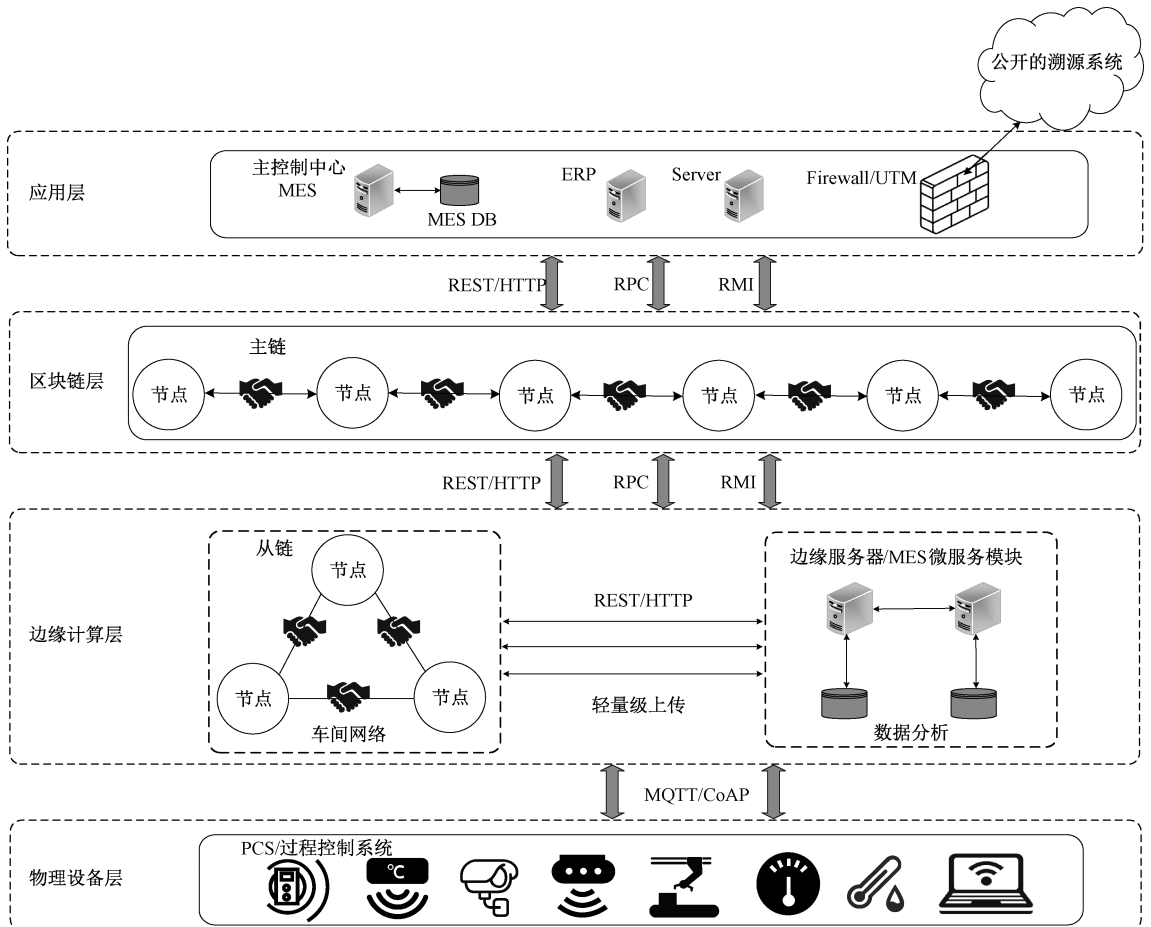


图1 BECMES 层次结构

Figure 1 BECMES hierarchy

1) 物理设备层。物理设备层是所有的边缘设备的集合,主要包括感知设备、制造设备和计算设备。其中:感知和制造设备是指摄像头、传感器、机械臂、机床等具有感知和生产功能的设备,主要为制造流程提供感知功能;而计算设备是指 IOT 网关、路由器、手机、计算机等具有计算功能的设备,可以为底层架构提供计算能力。此外 IOT 网关不仅可以提升工业物联网的本地存储和计算能力,而且为设备之间互联提供了条件。

2) 边缘计算层。在物理设备层上方部署边缘节点,利用边缘节点将下层采集的数据进行存储和分析,通过 MES 模块判断当前请求是否能够在车间内完成任务调度,将数据上传到从链网络存证。MES 模块结合边缘计算实时处理,响应车间生产调度任务。

3) 区块链层。在传统的 MES 中,底层节点之间互相调度需要将请求发送到中心服务器,让中心服务器完成对节点的调度,而 BECMES 增加区块链层,区块链网络采用主从链结构,使用智能合约来监管和执行节点之间任务调度,设备仅需将请求通过边缘节点处理后发送到区块链层,生产调度合约完成节点生产调度任务,并且该笔交易会通过共识算法在网络中存储和同步,保障数据的安全性。

4) 应用层。应用层负责重要事务处理,整合其他企业信息系统,实现多层次的应用,对外提供访问请求,为客户提供产品信息溯源等操作。

2.2 主从链结构

在传统区块链网络中,当有交易数据产生时,同一条链的所有节点需要通过共识算法进行数据同步,进而保证数据的一致性。全网节点存储所有数据,存在容量、安全和隔离性上的问题,当某个节点被攻击,将会导致整个网络的所有数据出现泄露,在网络规模较大的情况下,随着生产过程中节点的交易数量增加,将会导致整个区块链网络的通信带宽占用过高,进而影响整个网络的吞吐量。

本文主从链结构启发于 HyperLedger Fabric 2.X 多通道方案,如图 2 所示,在 BECMES 模型中引入主从链结构。主链通过智能合约和各个从链进行数据交互,将下层网络上报的异常信息反馈到主控 MES 中心;从链预定义任务和功能,完成各自生产车间的生产任务信息记录和调度;主链和从链通过数据哈希锚定方式完成数据交互。因此在工业生产过程中由传统单链网络结构扩展到多链网络结构,多链之间可以同时进行交易信息处理,并且仅在每条链内进行数据同步,能有效减缓网络通信压力。

2.3 智能合约设计

BECMES 模型在生产过程中涉及不同阶段的请求与响应,而这些操作都是由区块链内部自动执行。因此,在设计模型时需要提前设计智能合约相关接口,通过调用智能合约预定义的接口,实现在区块链内部进行数据读与写操作,生产车间在没有第三方参与的情况下,也可以控制交易的行为。

根据业务场景实际情况,预定义各个节点角色权限等级,当物理设备层节点在生产过程中发起请求时,通过权限判断合约进行权限验证。若验证通过,则请求生产调度合约,完成去中心化的生产调度任务;若验证失败,则进行异常上报合约,将信息存储到从链网络,然后同步到主链网络,最后反馈到主控中心 MES。因此,基于节点角色完成智能合约设计,节点权限验证流程如图 3 所示。

1) 权限管理合约 (authority manager contract, AMC) { 硬件地址, 位置信息, 公钥信息, 资源信息, 读写权限, 时间戳 }。AMC 用于管理工业设备和节点的访问权限策略。首先进行初始化操作,通过智能合约将设备和节点信息的硬件地址、位置信息、公钥信息、资源列表信息和访问权限存储到区块链网络,不同资源对应不同权限,权限划分为读取、写入等。智能合约中预定义接口如下。

PermissionSelect(): 用于设备或节点资源请求时查询权限信息。

PermissionAdd(): 用于设备或节点资源请求时添加权限信息。

PermissionUpdate(): 用于设备或节点资源请求时更新权限信息。

PermissionDelete(): 用于设备或节点资源请求时删除权限信息。

2) 权限判断合约 (authority judge contract, AJC) { 主键, 请求资源列表, 数字签名, 读写权限, 时间戳 }。AJC 用于判断工业设备或节点的访问权限策略。设备或节点发送请求携带硬件地址、请求资源信息、数字签名。首先,收到请求后先验证签名信息,判断数字签名是否验证通过,其次,根据硬件信息和资源类型查询该设备或节点是否有读写操作权限,若有权限则完成该次请求。智能合约中预定义接口如下。

VerifySignature(): 用于设备或节点资源请求时验证签名正确性。

ResReqJudge(): 用于设备或节点资源请求时验证权限。

AbnormalCall(): 用于设备或节点资源请求时失败调用。

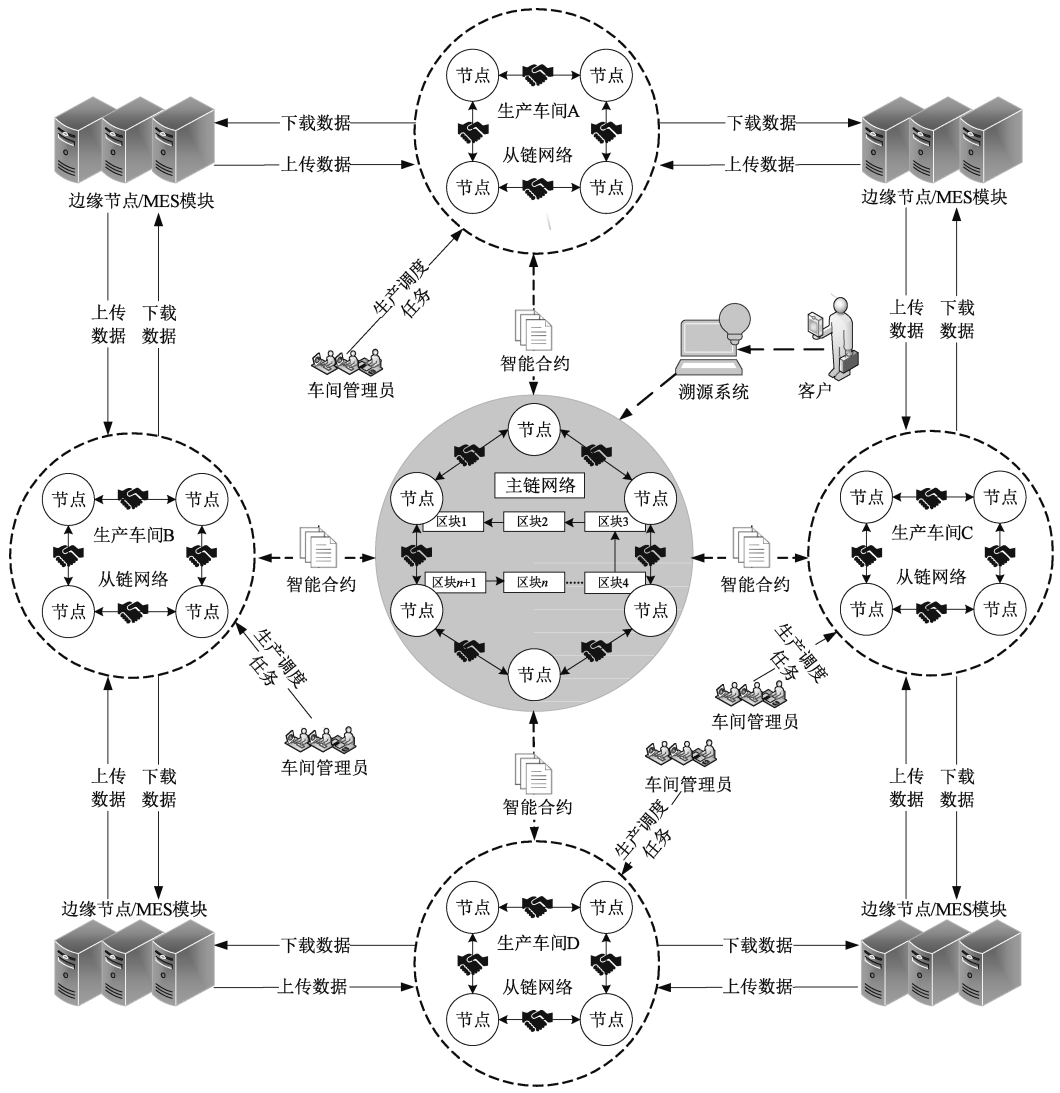


图 2 主从链网络结构

Figure 2 Master-slave blockchain network architecture

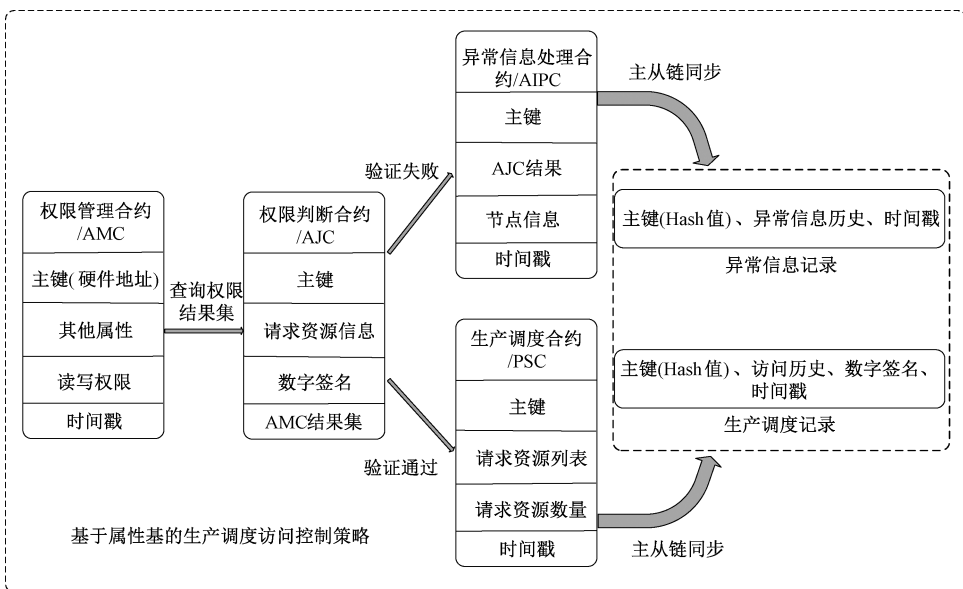


图 3 节点权限判断流程

Figure 3 Process for determining node rights

3) 异常信息处理合约 (abnormal information processing contract, AIPC) {主键, 节点信息, AJC 结果, 时间戳}。AIPC 用于进行异常发生时数据上报。通过 AJC 请求触发, 此时, 在生产过程中主要存在两种情况, 第一种情况是设备或节点验证没有通过, 此时可能存在攻击行为, 则需要将该信息进行上报到 MES 主控平台, 以便管理人员及时发现安全问题, 排除被攻击的风险; 第二种情况是设备或节点请求资源权限不足, 当发现请求资源权限不符合预定义的权限, 则进行上报, 根据实际情况解决问题。智能合约中预定义接口如下。

SignatureError(): 用于身份验证错误异常上报。

PermissionError(): 用于权限不足异常上报。

4) 生产调度合约 (production scheduling contract, PSC) {主键, 请求资源列表, 请求资源数量, 时间戳}。PSC 用于完成生产调度工作。AJC 决策后, 此时节点请求是合法的, 则无须控制中心管理, 结合边缘节点上的 MES 功能模块, 通过 PSC 完成生产调度任务。智能合约中预定义接口如下。

GetAllNode(): 用于节点查询通道其他节点信息。

NodeExists(): 用于判断节点是否存在。

ReadNode(): 用于查询节点信息。

UpdateNode(): 用于更新节点信息。

ResScheduling(): 用于资源调用, 更新资源参数。

2.4 生产调度算法

BECMES 系统作为 ERP 系统和 PLC 系统的桥梁, 首先由管理层人员下发生产任务给 BECMES 系统应用层。BECMES 系统接收到生产任务, 通过应用层将数据逐层传递至边缘节点进行任务分发, 底层设备接收到生产任务后进行生产。此时, 需求模块需要供应模块为其提供服务或者资源; 首先由需求模块发起生产任务请求, 发送到所在的边缘节点, 该节点上的 MES 功能模块验证请求内容后, 向区块链网络层传递请求, 触发权限判断合约执行, 合约验证通过则触发生产调度合约执行, 合约验证失败则触发异常上报合约执行; 其次供应模块所在的边缘节点接收到生产调度合约请求并验证, 则开始生产调度任务。

智能工厂进行生产任务调度时, 设计生产调度算法如算法 1 所示。

算法 1 生产调度算法

输入: 请求资源类型 T , 请求资源参数 N

输出: 布尔值

1) 初始化资源数量: $\alpha \leftarrow \varphi a, \beta \leftarrow \lambda b, \gamma \leftarrow \eta c$

2) 产品 c 构成: $u \leftarrow \mu_1 a, v \leftarrow \mu_2 b$

3) 节点 C 需求生产: ξc

4) If 供应节点资源数 \geq 需求节点资源数 then

5) ResScheduling($u\xi, v\xi$)

6) Else

7) ProductResAB($u\xi - \alpha, v\xi - \beta$)

8) End If

9) 判断生产情况 JudgeProductScheduling()

10) If 供应节点资源是否按需生产完成 then

11) 更新节点 UpdateNode()

12) Return true

13) Else

14) 异常上报 AIPC. ProductSchedulingFail (ErrInfo)

15) Return false

16) End If

假设三个节点分别为 A, B, C 。初始化资源数量, A 节点初始值为 φ 个 a , B 节点初始值为 λ 个 b , C 节点初始值为 η 个 c 。生产流程如下。

1) 生产 1 个 c 需要 μ_1 个 a, μ_2 个 b 。 C 向外发送广播信息, 现在需要生产 ξ 个 c , 需要 $(\mu_1 * \xi)$ 个 $a, (\mu_2 * \xi)$ 个 b 。

2) A, B 节点收到 C 节点广播信息, 需要 $(\mu_1 * \xi)$ 个 a 和 $(\mu_2 * \xi)$ 个 b 消息, A, B 节点通过边缘节点查看并计算自己的数量是否满足, 如果满足, 则向外广播消息, 可以完成交易。

3) 当节点 C 收到所有资源节点广播信息, 则开始生产, 否则不允许生产。

3 实验与分析

3.1 实验环境

为评估基于主从链和边缘计算的 MES 生产调度模型, 使用 Java 语言调用 Fabric SDK 实现客户端 Fabric 接口封装, Go 语言实现智能合约开发。实验环境系统采用 Centos7.9, Docker 20.10.10 构建节点镜像, 内存为 16 GB, Intel I7-9400F CPU, 使用 Hyperledger Fabric 2.1 来搭建主从链网络, 实验结果使用 Matlab 处理分析。

3.2 实验分析

本实验联盟链拓扑规划为搭建一主四从链网络, 从链下存在一个或多个组织和 Peer 节点。

在 BECMES 模型中, 节点通过调用智能合约进行数据交互, 使得生产调度模型能够无差错的在主从链上运行。基于主从链和边缘计算的 MES 生产

调度模型从并发请求时间、网络节点数和数据块大小进行消融实验,并将本文模型和传统工业物联网基于云架构的方式进行实验对比。

在数据块大小为 1 kB 时,依次递增网络节点数,对比三种不同的并发数量下的平均响应时间,实验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出当节点数量为 14 个和并发请求量为 600 次的情况下,平均响应时间接近 6 s,因为区块链网络节点之间需要进行共识,在区块链网络中广播交易,节点数量越多时平均响应时间就越长;由于区块链节点在收到客户端请求时,需要将每一次的请求都进行广播,导致区块链网络通信量增加,网络通信时延增长,但是当采用主从链结构时,从链之间相互隔离,从链内的节点数保持在一定范围内,能够支撑高并发量的请求,而平均响应时间并不会增加过多。本文提出的网络模型在一定范围内的节点数和并发数量时,区块链网络同步时间仍然较少,能够完成工业车间生产调度的实时性要求。

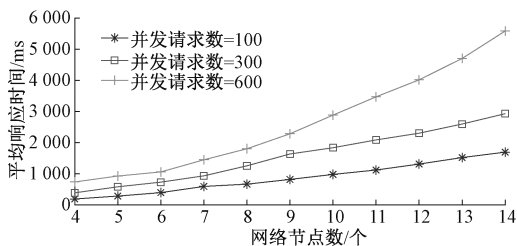


图 4 不同并发请求数的平均响应时间

Figure 4 Average response time for different number of concurrent requests

在并发请求数量为 100 次的条件下,依次递增数据块大小,对比三种不同节点数下的平均响应时间,实验结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,当区块链网络节点数量分别为 14 个和 8 个的时候,平均响应时间会随着网络节点数量的增加而增加,当客户端请求携带数据量在 1 MB 字节内,对网络整体影响不会太大,平均响应时间增加较少。本文构建的模型中,区块链网络节点数量和并发数量对网络通信产生较大影响,但是当在边缘节点进行数据处理轻量化封装后上传到区块链网络,对区块链网络发送不超过 1 MB 字节的数据,此时网络的平均响应时间并不会过大,因此 BECMES 模型将 MES 进行模块化并集成到边缘节点,不仅有效地避免了大量数据传输,还为客户端数据上传到区块链网络提供准备。

将本文构建的模型和基于云架构的物联网设备管理平台进行实验对比,控制并发请求数量都为

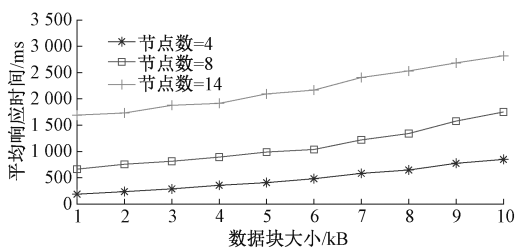


图 5 不同网络节点数的平均响应时间

Figure 5 Average response time of different network nodes

100 次,本文模型在采用网络节点数为 4 个的条件下,依次递增数据块大小,将数据本地化处理和数据上传云端后进行处理,平均响应时间做对比,实验结果如图 6 所示。由图 6 可以看出在一定的并发请求量下,数据传输到云端进行处理,平均响应时间明显会随着数据块增加而增加,很大一部分时延是由于数据传输带来的,本文提出的网络模型优于基于云架构方案。

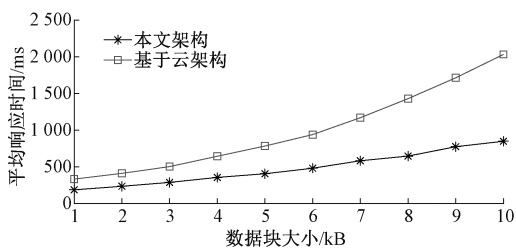


图 6 两种架构请求平均响应时间

Figure 6 Average request response time for both architectures

4 总结

本文针对传统工业制造系统中心服务器压力大,数据处理耗时长,设备之间通信存在安全隐患等问题,提出了一种基于主从链和边缘计算的 MES 生产调度模型。BECMES 采用主从链架构,有效解决了共识导致的通信开销过大和数据泄露的风险,将 MES 服务拆分成多个服务并集成到边缘节点,在数据源侧完成数据处理并将轻量化后的数据上传到区块链网络,确保数据安全可信。实验结果验证了该生产调度模型满足工业生产任务需求,在不影响 MES 生产调度任务的情况下,能够确保生产数据存储安全、边缘设备自计算及直接通信的目标。

然而,基于主从链和边缘节点的 MES 生产调度模型仍然存在一些不足,在生产过程中,接入设备所属边缘网络相对固定,有的从链网络短时间内承受高并发量,而有的相对空闲,后续工作中,会针对接入设备所属边缘网络进行动态划分,接入到状态最

优的边缘节点,减少跨链请求,实现最优响应时间。

参考文献:

- [1] 顾佳晨, 刘晓强, 孙彦广. 流程工业MES的现状与发展[J]. 冶金自动化, 2003, 27(4): 9-12.
GU J C, LIU X Q, SUN Y G. Actuality and trend of MES[J]. Metallurgical industry automation, 2003, 27(4): 9-12.
- [2] MANTRAVADI S, MØLLER C, LI C, et al. Design choices for next-generation IIoT-connected MES/MOM: an empirical study on smart factories[J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2022, 73: 102225.
- [3] NEGRI E, BERARDI S, FUMAGALLI L, et al. MES-integrated digital twin frameworks[J]. Journal of manufacturing systems, 2020, 56: 58-71.
- [4] KOERBER B, FREUND H, KASAH T, et al. Leveraging industrial software stack advancement for digital transformation: how to capture impact at scale with IIoT platforms in the industrial equipment and machinery space[J]. Digital McKinsey, 2018, 15: 1-50.
- [5] ALMADA-LOBO F. The industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES)[J]. Journal of innovation management, 2016, 3(4): 16-21.
- [6] WUNCK C. Towards a microservice architecture for the manufacturing operations layer[EB/OL]. (2019-09-26) [2022-01-12]. <https://easychair.org/publications/paper/9ht1>.
- [7] JEON B W, UM J, YOON S C, et al. An architecture design for smart manufacturing execution system[J]. Computer-aided design and applications, 2017, 14(4): 472-485.
- [8] NOVÁK P, VYSKOČIL J, KADERA P. Plan executor MES: manufacturing execution system combined with a planner for industry 4.0 production systems[C]//Industrial Applications of Holonic and Multi-agent Systems. Cham: Springer, 2019: 67-80.
- [9] 邓汝春, 郭孔快. 基于精益供应链的制造执行系统MES的研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(4): 114-120.
DENG R C, GUO K K. The study of manufacturing execution system (MES) based on lean supply chains[J]. Industrial engineering and management, 2012, 17(4): 114-120.
- [10] YU K P, TAN L, ALOQAILY M, et al. Blockchain-enhanced data sharing with traceable and direct revocation in IIoT[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2021, 17(11): 7669-7678.
- [11] 洪小玲, 万虎, 肖晓, 等. 基于区块链的制造联盟系统[J]. 计算机科学, 2020, 47(S1): 369-374.
HONG X L, WAN H, XIAO X, et al. Manufacturing alliance system based on block chain[J]. Computer science, 2020, 47(S1): 369-374.
- [12] 赵小强, 荣冈. 流程工业生产调度问题综述[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(6): 8-13.
ZHAO X Q, RONG G. Survey of production scheduling in the process industry[J]. Control and instruments in chemical industry, 2004, 31(6): 8-13.
- [13] JURGEN K, Manufacturing execution system MES[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [14] NAKAMOTO S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2022-01-13]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [15] 刘炜, 彭宇飞, 田钊, 等. 基于区块链的医疗信息隐私保护研究综述[J]. 郑州大学学报(理学版), 2021, 53(2): 1-18.
LIU W, PENG Y F, TIAN Z, et al. A survey on medical information privacy protection based on blockchain[J]. Journal of Zhengzhou university (natural science edition), 2021, 53(2): 1-18.
- [16] ANDROULAKI E, BARGER A, BORTNIKOV V, et al. Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains[EB/OL]. (2018-04-23) [2022-01-13]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3190508.3190538>.
- [17] VALENTA M, SANDNER P. Comparison of Ethereum, hyperledger fabric and corda[EB/OL]. (2019-07-01) [2021-12-25]. http://www.smallake.kr/wp-content/uploads/2017/07/2017_Comparison-of-Ethereum-Hyperledger-Corda.pdf.
- [18] RAHMAN M A, HOSSAIN M S, LOUKAS G, et al. Blockchain-based mobile edge computing framework for secure therapy applications[J]. IEEE access, 2018, 6: 72469-72478.
- [19] 王其朝, 金光淑, 李庆, 等. 工业边缘计算研究现状与展望[J]. 信息与控制, 2021, 50(3): 257-274.
WANG Q Z, JIN G S, LI Q, et al. Industrial edge computing: vision and challenges[J]. Information and control, 2021, 50(3): 257-274.
- [20] ZHANG Z, HONG Z C, CHEN W H, et al. Joint computation offloading and coin loaning for blockchain-empowered mobile-edge computing[J]. IEEE Internet of Things journal, 2019, 6(6): 9934-9950.