

工业设备入云的连接模型研究

谢鹏志, 杨 威, 曹 巍

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 随着云计算的发展,云制造技术成为制造资源集成与分配的重要手段。工业设备入云(接入云平台)是云制造的基础,由于工业设备存在异构设备通信协议种类繁多、数据安全保障复杂和数据接口标准不统一等问题,使得工业设备入云变得困难。设计了以工业消息中间件(IMQ)为枢纽的工业设备接入云的连接模型。该模型定义了IMQ、IMQ适配器的能力,使异构设备可以入云;约定了IMQ适配协议与数据发布协议,使设备与云进行通信的数据接口标准得以统一,数据安全得到保障。该模型为工业设备入云提供新思路。

关键词: 云制造;工业消息中间件(IQM);适配器;工业设备入云;连接模型;数据通信

Research on Connection Model of Industrial Device to Cloud Platform

XIE Pengzhi, YANG Wei, CAO Wei

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] With the development of cloud computing, cloud manufacturing technology has become an important means to integrate and distribute manufacturing resource. The application of the cloud manufacturing is grounded on the technology of industrial device connection to the cloud platform. However, problems as a wide variety of communication protocols for heterogeneous devices, the complexity of data security guarantee and inconsistent data interface standards make it difficult for industrial equipment to connect to the cloud platform. This paper has designed such a connection model with IMQ (Industrial Message Queue) as the pivot, which provides the industrial device an access to cloud platform. This model has defined the capabilities of IMQ and IMQ adapters making it possible for heterogeneous devices to connect to the cloud platform. Besides, it has set up an agreed protocol for IMQ adaptation and data publishing which can unify data interface standards and ensure data security. This connection model puts forward new ideas and new methods for industrial device connection to the cloud platform in the future.

Keywords: Cloud manufacturing; Industrial message queue (IMQ); Adapter; Industrial device connection to the cloud platform; Connection model; Data communication

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.07.079

随着工业互联网时代的到来和云计算技术的日趋成熟,一种面向服务的网络化制造技术——云制造成为研究热点^[1]。云制造以云计算为理论基础,将“基础设施即服务(IaaS)”、“平台即服务(PaaS)”、“软件即服务(SaaS)”理论衍生到“制造即服务”^[2]。而设备接入云平台,并能够与云应用安全高效地通信是云制造的基础,在国家工业信息安全发展研究中心研究员李君等^[3]提出的工业互联网参考架构中,设备入云被认为是PaaS的基础资源。然而工业设备入云普遍面临3个问题^[4]:(1)异构设备通讯协议标准繁多;(2)数据安全保障复杂;(3)上云数据的接口标准不统一。

为了解决上述问题,学者们进行了大量相关研究与

实践。付翔^[2]提出了CARA(Cloud Access Resource Adapter)数控设备入云方法,如图1所示,CARA接入系统分为采集端和服务端,其中采集端为软硬一体设备,可采集RS-232接口、LCD接口、USB接口、GPS模块、数据存储模块等多种协议数据,并通过Socket通信输出数据;服务端为软件系统,具备接收采集端数据、存储数据和提供WEB服务3种功能。万海峰等^[5]研究了利用Modbus TCP协议实现单机功率设备能耗“上云”技术,实现了云端管理异构设备能耗的功能,并保证了数据完整性。陈国金等^[6]提出了分布式数控(DNC)数据采集系统通信结构,使分散的数控设备能够联入企业以太网。

Lee 等^[7]设计了一套数据实时采集系统,实现了远程设备参数采集。Lojka 等^[8]研究通过 SCADA/HMI(监控与数据采集/人机界面)、SOA(面向服务的体系结构)实现设备入云,该方法着重研究了 SCADA 采集设备数据与设备入云物理拓扑。Li 等^[9]研究了利用 RFID(Radio Frequency Identification)技术远程采集数据的方法,实现对非设备本身数据(如物流信息、物料信息等)的远程采集与入云。

上述方法均不同程度地实现了异构设备入云,但未对入云数据的安全与接口标准作出说明。本文设计了以工业消息中间件(Industrial Message Queue, IMQ)为枢纽的工业设备接入云的连接模型,一方面,模型中定义了 IMQ、IMQ 适配器的能力,从而保证了异构设备入云的可行性;另一方面,模型中定义了 IMQ 的适配协议与数据发布协议,从而保证了入云数据的安全和接口标准统一。

1 基于 IMQ 的工业设备入云的连接模型

基于 IMQ 的工业设备入云的连接模型如图 2 所示,包括工业设备、IMQ 适配协议、IMQ 数据发布协议、IMQ、云应用 5 个部分,其中工业设备端的适配器、适配协议、数据发布协议和 IMQ 是模型的核心构件。

工业设备依靠 IMQ 适配器接入工业中间件。IMQ 适配器是采集设备数据和给设备发送指令的软件模块。适配器支持用一种或多种协议(如 OPC、Modbus TCP 等)采集设备数据和发送指令。

IMQ 适配协议是适配器与中间件建立连接、身份认

证与双向通信的通信协议。

IMQ 数据发布协议是云应用与中间件建立连接、身份认证与双向通信的通信协议。

IMQ 是为工业设备与云提供安全可靠的即时通讯的软件。它允许设备通过授权的适配器接入,接收适配器采集的收据,给适配器下发指令,并对接入的设备进行管理。对于接收到的数据,中间件用适配协议解析数据结构、认证数据安全。解析后的数据可以根据设定规则进行过滤和存储,并按照数据发布协议进行格式化。中间件为设备提供 Socket、Web Socket 和 Web Service 这 3 种接入云的途径,其中 Socket、Web Socket 两种途径提供消息队列和发布订阅服务,将格式化数据推送上云; Web Service 途径提供 RESTful API 与 SOAP^[10](Simple Object Access Protocol) API 服务,将格式化数据封装,供云端调用。设备通过适配器接入中间件,或者云应用访问 IMQ 服务,均需要经过授权认证。此外,为了便于维护数据,IMQ 应具有完备的日志记录能力。

云应用是部署在云平台中的应用程序。云应用依据数据发布协议与中间件双向通信。

图 3 给出了模型中设备入云的步骤:首先,设备与云应用向 IMQ 请求建立连接;然后,待连接建立,设备与云应用向 IMQ 请求身份认证;最后,待身份认证通

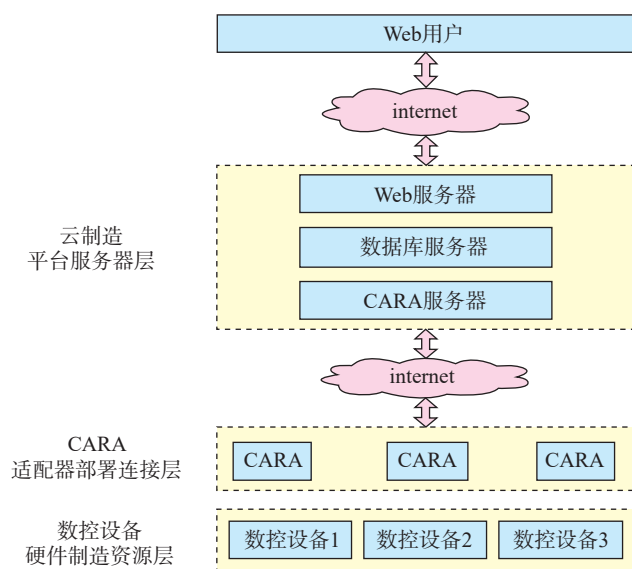


图1 CARA接入云平台的模型

Fig.1 CARA connection model to cloud platform

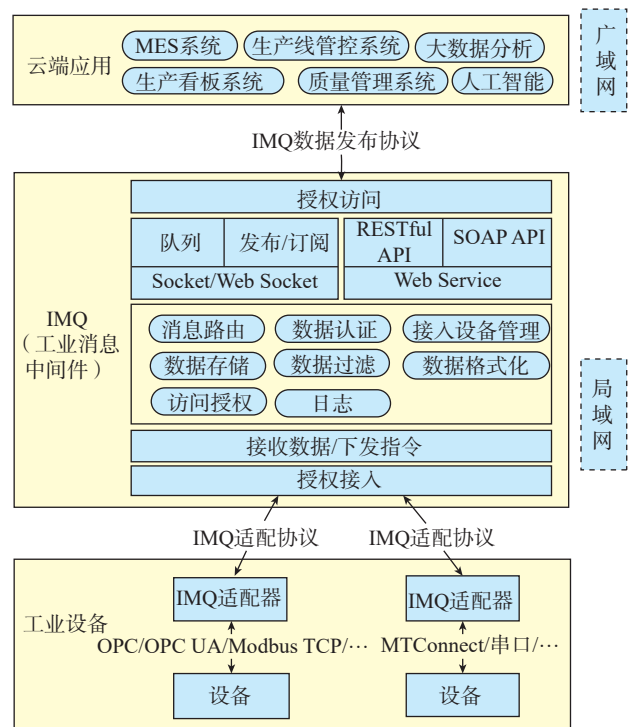


图2 基于IMQ的工业设备入云的连接模型

Fig.2 Connection model of industrial device to cloud platform based on IMQ

过,云应用与设备利用 IMQ 进行双向通信。

IMQ 与普通消息中间件的区别有两点,即生产者不同和通信方式不同,如图 4 所示。

(1)生产者不同。

普通消息中间件的生产者一般为数据提供者,中间件为每一个生产者提供独立的数据传输队列,中间件只负责将生产者生产的数据路由到消费者,不优化更改数据内容;IMQ 的生产者不是数据提供者,IMQ 首先接收适配器的数据,并将数据放入缓存池,然后对数据过滤和分类,最后由 IMQ 将过滤和分类后的数据发布成服务。IMQ 的消息生产模式,使得同一个数据队列中可以包含任意多个设备的数据,从而打破了设备之间的数据壁垒。

(2)通信方式不同。

如果普通消息中间件的消费者向生产者发送指令,则需要将消费者也变成一个指令的生产者,并将生产者变成指令的消费者,方能实现全双工通信。IMQ 是针对工业设备进行数据采集与指令发送的专业工具,它利用数据队列实现设备数据的实时采集,利用 RESTful 与 SOAP 协议的 API 实现设备指令的下发。

1.1 工业消息中间件 (IMQ)

工业消息中间件是为工业设备与云提供安全可靠的即时通讯的软件。它需要具备访问授权、数据和指令接发、数据认证、数据过滤、数据格式化、数据存储、数据路由、数据服务发布、接入设备管理和日志记录等能力。

访问授权指中间件可以给设备和云应用进行授权。只有经过授权的设备才能通过适配器接入中间件;只有经过授权的云应用才能访问中间件发布的队列、发布/订阅和 Web Service 等服务。其中授权方式采用 SSH

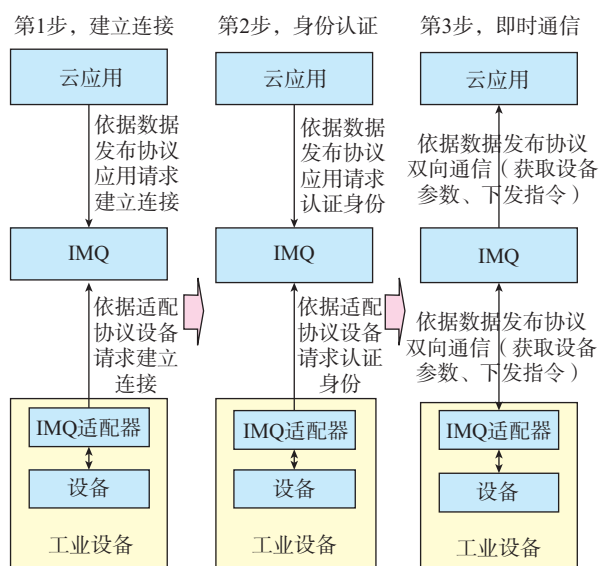


图3 模型中设备入云步骤

Fig.3 Steps of device connection to cloud platform

(Secure Shell) 协议^[1]。

数据和指令接发如图 5 所示,指中间件可以实时接收适配器采集的设备参数和下发云应用的指令。设备参数经过过滤和格式化后,被路由到中间件发布的服务,供云应用调用;中间件接收云应用的指令,并将指令下发给适配器,最后由适配器下发给设备执行。

数据认证指中间件能够按照适配协议解析适配器采集的设备参数,按照数据发布协议解析云应用下发的指令,并验证解析后数据的完整性。

数据过滤指中间件能够对适配器采集的设备参数进行过滤分类。适配器采集的设备参数往往种类繁多,价值各异,因此需要对参数进行过滤分类。以数控设备为例,可将其参数分为基础数据、工艺设定数据、实际加工数据和异常数据 4 类,如表 1 所示;参数价值分为高、低两个级别。其中基础数据是数控设备的通用参数,包括开关待(开机、关机、待机)状态、能耗等参数,这类参数一般不影响设备健康与产品质量,因此价值较低;工艺设定参数和实际加工参数分别包括了加工设备的主轴转速、温度、压力等的工艺设定值和实际加工值,这类参数与产品质量息息相关,具备高价值;异常数据包括设备在生产过程发生的异常和报警信息,这类信息对于设备本身的维护和产品的质量的控制均有高价值。

数据格式化指中间件能够对接收到的设备参数和指令进行格式化编码。一方面便于数据的存储,另一方面便于按照适配协议与数据发布协议进行输出。

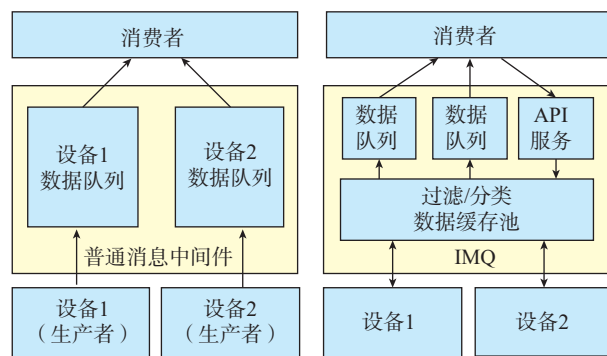


图4 普通消息中间件与IMQ的通信模型对比

Fig.4 Comparison of communication models between general message queue and IMQ

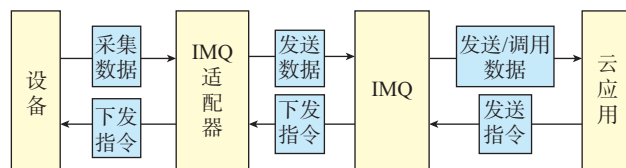


图5 数据和指令接发

Fig.5 Receiving and sending data and instructions

数据存储指中间件能够对接收到的设备参数和指令进行缓存和持久化存储。其中缓存指中间件可以将设备参数和指令存储在内存或磁盘,待订阅设备参数的云应用和接收指令的适配器与中间件建立通信后,再将设备参数与指令分别发送给云应用与适配器,保证了数据通信的可靠性;持久化存储指中间件可以将格式化后的设备参数与指令存储到文件或数据库,以供历史查询,保障了数据的完整性与安全性。

数据路由指中间件能够根据设定,将设备参数和指令分别准确地发送到对应的云应用与设备。如图6所示,中间件中创建了两个队列服务和一个WS(Web Service)服务,其中队列服务1发布设备开关机状态参数,队列服务2发布设备主轴转速参数,WS服务可下发指令。从图4可知,适配器a、b的开关机状态参数路由到队列服务1,主轴转速路由到队列服务2,然后分别被队列服务1、2准确发送到不同的云应用。同时,云应用的指令也路由到指定的适配器,从而准确地发送给设备执行。

数据服务发布,如表2所示,指中间件可以将设备参数以消息队列、发布/订阅、RESTful API和SOAP API这4种服务模式发布。其中消息队列与发布/订阅支持Socket和Web Socket两种协议;RESTful API和SOAP API支持下发云应用指令。

接入设备管理指中间件具有给设备授权,控制设备

表1 数控设备参数分类

Table 1 Classification of NC equipment parameters

数据类型	参数	价值
I 基础数据	开关待机状态、能耗参数等	低
II 工艺设定参数	各轴承转速、温度、压力等加工设定值	高
III 实际加工参数	各轴承转速、温度、压力等加工实际值	高
IV 异常数据	设备的异常、报警信息等	高

表2 数据服务发布能力

Table 2 Ability of data service publishing

服务	协议	功能	适用范围
消息队列	Socket	一对一同步/异步发送采集的设备参数	本地应用、Web 服务端
	Web Socket	一对一同步/异步发送采集的设备参数	HTML5 客户端
发布/订阅	Socket	一对多同步/异步发送采集的设备参数	本地应用、Web 服务端
	Web Socket	一对多同步/异步发送采集的设备参数	HTML5 客户端
RESTful API	HTTP	查询某时刻设备参数;查询历史设备参数与指令;发送设备指令	不限
SOAP API	SOAP	查询当前设备实时参数;查询历史设备参数与指令;实时发送设备指令	不限

接入状态,监控设备采集参数等能力。中间件与设备是一对多的关系,必然需要管理大量接入的设备。

日志记录指中间件能够记录创建服务、管理设备等重要操作和异常信息。这便于中间件的升级与维护。

1.2 IMQ适配协议

为了保证适配器与中间件的数据安全、通信安全和通信效率,本文定义了IMQ适配协议,如表3所示。该协议包含握手方式、授权认证、数据编码、数据加密和心跳检查5部分。其中建立连接采用TCP/IP协议实现;授权认证采用SSH协议,授权通过后适配器方可与中间件通信;数据编码需要设计字节编码格式,准则是最大限度去除编码中的冗余信息,尽可能提高通信效率;数据加密需要设计或选择加密算法,如RSA、AES(Advanced Encryption Standard)算法等,对编码数据进

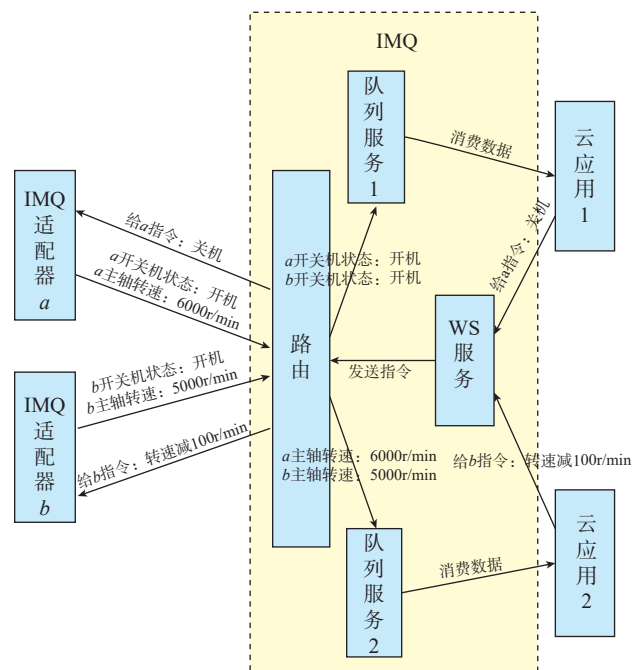


图6 数据路由

Fig.6 Data routing

表3 IMQ适配协议定义

Table 3 Definition of IMQ adaptation protocol

建立连接	TCP/IP	是否必须
授权认证	Secure Shell 授权协议	必须
数据编码	字节编码格式	必须
数据加密	加密算法(RSA、AES等)	非必须
心跳检测	检测机制	必须

行加密和解密;心跳检测需定义检测机制,保证适配器与中间件的网络通畅。设计字节编码格式与检测机制属于IMQ的具体实现,而本文旨在讨论IMQ模型,因此不在本文论述范围内。

1.3 IMQ数据发布协议

为了保证中间件与云应用的数据安全通信安全和通信效率,本文定义了IMQ数据发布协议。该协议针对消息队列、订阅/发布服务与RESTful、SOAP服务各不相同。

消息队列、订阅/发布服务的通信方式类似于适配器与中间件的通信方式,因此适配协议可用做其数据发布协议。

RESTful与SOAP服务数据发布协议定义如表4所示。RESTful与SOAP基于HTTP协议建立连接,授权认证采用口令认证,认证通过后获得Token令牌,用于授权调用。数据编码采用JSON编码(HTTP协议不适用于实时监听,接收实时数据效率不高,因此不需要特殊编码,且JSON可读性高,综合考虑采用JSON编码),数据加密可采用RSA、AES等算法。

1.4 IMQ适配器

IMQ适配器是设备按照适配协议的定义与中间件建立连接和通信的软件模块。它需要具备数据采集、授权请求、指令解析和数据格式化等能力。

数据采集指适配器应该具备以一种或多种协议(如OPC、Modbus TCP等)连接设备、采集数据和发送指令的能力。

授权请求指适配器能够依据适配协议向中间件请求接入授权。

指令解析指适配器能够依据适配协议解密、解码中间件下发的指令。

数据格式化指适配器能够依据适配器协议编码、加密设备参数,并发送该数据到中间件。

由于异构设备的信息化水平、数据开放程度与通信协议各不相同,因此针对不同的设备需要提供不同的适配器,只要适配器满足上述4种能力,便可接入IMQ,实现设备入云。

表4 RESTful与SOAP服务数据发布协议定义

Table 4 Definition of RESTful and SOAP service data publishing protocol

建立连接	HTTP	是否必须
授权认证	口令认证	必须
授权调用	Token 认证	必须
数据编码	JSON	必须
数据加密	加密算法(RSA、AES等)	非必须

2 连接模型的应用

本文设计的连接模型主要应用于车间级设备接入公有云、私有云、公有传统服务器、私有传统服务器的应用场景。适用于车间级设备入云的原因至少包含以下3点:

(1)生产车间一般包含多台设备,且设备型号、功能与信息化水平各异;

(2)生产车间的设备参数包含了工艺过程参数及执行数据,信息价值高,需要保证数据存储与传输的安全性;

(3)生产车间作为生产组织的基础单元,具备相对独立的生产资源,此时IMQ提供入云设备管理以车间为单位,系统复杂程度适中,方便管理。

基于该模型开发的实时监控系統,已经成功在某金属热成型车间实施,通过OPC协议连接设备的适配器,将超塑成型、热校型、磨削等类型在内的15台异构生产设备连入了私有传统服务器,并提供了安全可靠的数据通信,实现了对设备参数的实时采集。

2.1 IMQ适配协议的应用

实时监控系统中IMQ适配协议得以实现,其中,连接的建立利用TCP/IP协议实现;授权认证通过密钥认证实现;数据编码的设计如图7所示,包括数据头JSON编码与数据值字节编码两部分;数据加密采用异或算法实现;心跳检测利用中间件每30s发送心跳帧轮询适配器的方法实现。

2.2 IMQ数据发布协议的应用

实时监控系统中消息队列的数据发布协议与IMQ适配协议相同。RESTful、SOAP协议中连接的建立采用HTTP协议实现;授权认证采用密钥认证实现;授权调用采用JWT(JSON Web Token)技术实现;数据编码采用JSON编码,如图8所示;数据未加密。

2.3 IMQ的应用

实时监控系统中IMQ配置socket队列服务的界面如图9所示。IMQ接收设备1与设备2的数据,并将数

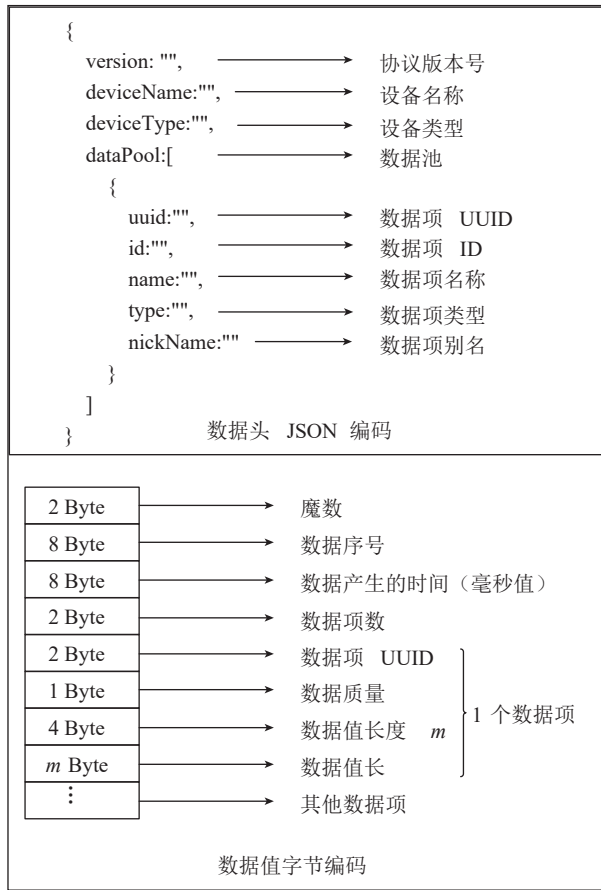


图7 IMQ适配协议数据编码
Fig.7 Data coding of IMQ adaptation protocol

据存放在数据缓存池中,然后从数据池中选中设备 1 与设备 2 的 I 基础数据(表 1),构建“设备 I 级参数”服务。

3 结论

在云制造环境下,为了实现异构设备接入云平台,并保障入云的数据安全与数据接口统一,本文设计了以 IMQ 为枢纽的设备入云的连接模型。该模型涉及工业设备、适配协议、数据发布协议、IMQ 和云应用 5 部分内容,其中工业设备端的适配器、适配协议、数据发布协议和 IMQ 是模型的核心构件。工业设备可通过适配器接入 IMQ,然后上传设备参数,中间件再过滤、路由数据,最终发送到云应用。同时,云应用可以下发指令到中间件,中间件再将指令路由到设备的适配器,最终下发给设备执行,从而实现云端指令下派。模型中的数据均按照适配协议与数据协议传输,以此保证设备参数上云的安全性。该模型为工业设备接入云平台提供了新思路,具备借鉴意义。

参考文献

[1] 李伯虎,张霖,王时龙,等.云制造——面向服务的网络化制

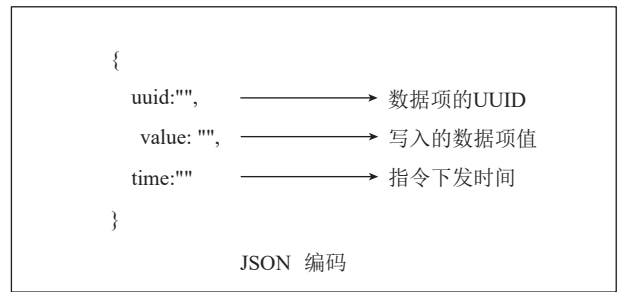


图8 RESTful、SOAP数据发布协议编码
Fig.8 Data coding of RESTful and SOAP service data publishing protocol



图9 实时监控系统中IMQ配置socket队列服务
Fig.9 Configuring socket queue by IMQ in real-time monitoring system

造新模式[J].计算机集成制造系统,2010,16(1):1-7.

LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(1): 1-7.

[2] 付翔.云制造数控设备适配接入系统的研究与开发[D].杭州:浙江大学,2013.

FU Xiang. Research and development on CNC equipment adaptive access system for cloud manufacturing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[3] 李君,邱君降,窦克勤.工业互联网平台参考架构、核心功能与应用价值研究[J].制造业自动化,2018,40(6):103-106,126.

LI Jun, QIU Junjiang, DOU Keqin. Research on the reference architecture, core function and application value of industrial Internet platform[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(6): 103-106, 126.

[4] 邱君降,李君,成雨,等.制造业与互联网融合背景下工业设备“上云”的现状、问题与路径研究[J].制造业自动化,2018,40(10):37-41.

QIU Junjiang, LI Jun, CHENG Yu, et al. Research on the current situation, problems and paths of industrial equipment networking under the background of the integration of manufacturing industry and Internet[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(10): 37-41.

[5] 万海峰,彭来湖,史伟民,等.单机功率设备能耗“上云”

技术研究[J]. 成组技术与生产现代化, 2017, 34(4): 19–25.

WAN Haifeng, PENG Laihu SHI Weimin, et al. Research on single power equipment energy consumption of “connect the cloud” [J]. Group Technology & Production Modernization, 2017, 34(4): 19–25.

[6] 陈国金, 王召鹏. 数控设备数据采集方法研究[J]. 机电工程, 2005, 22(9): 29–32.

CHEN Guojin, WANG Zhaopeng. Research on data acquisition method to numerical control equipment[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2005, 22(9): 29–32.

[7] LEE S, NAM S J, LEE J K. Real-time data acquisition system and HMI for MES[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(8): 2381–2388.

[8] LOJKA T, ZOLOTOVÁ I. Improvement of human-plant interactivity via industrial cloud-based supervisory control and data acquisition system[M]//Progress in pattern recognition, image analysis, computer vision, and applications. Cham: Springer International Publishing, 2014: 83–90. DOI:10.1007/978-3-662-44733-8_11.

[9] LI X J, WANG P, HUANG X. Design of data acquisition system in MES based on RFID[J]. Advanced Materials Research, 2011, 201/202/203: 852–856.

[10] ROY T F. Architectural styles and the design of network-based software architectures architectures[D]. Irvine: University of California, 2000.

[11] BARRETT D J, SILVERMAN R E, BYRNES R G. SSH, The Secure Shell: The Definitive Guide[M]. New York: O'reilly, 2005.

通讯作者: 谢鹏志, 硕士, 工程师, 研究方向为软件工程、软件架构设计、MES、数字孪生, E-mail: xpzsoft@126.com。

(责编 阳光)

(上接第78页)

[68] MITRA S. Elevated temperature mechanical properties of a rapidly solidified Al-Fe-V-Si alloy[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1992, 27(5): 521–526.

[69] REYNOLDS A P. Elevated temperature fatigue of P/M aluminum alloy 8009[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 28(2): 201–206.

[70] REYNOLDS A, BAXTER S. Kinematic hardening in a dispersion strengthened aluminum alloy: experiment and modeling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 285(1/2): 265–279.

[71] LENG Y, PORR W C J, GANGLOFF R P. Time dependent crack growth in P/M Al-Fe-V-Si at elevated temperatures[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(4): 895–900.

[72] KIM Y W. Processing microstructure properties of Al-Fe-Ce powder alloys[C]//Proceedings of Dispersion Strengthened Aluminum Alloys. Warrendale, 1988.

[73] RAYBOULD D. Forming of rapidly solidified elevated temperature aluminum alloys produced by planar flow casting[C]//Proceedings of Dispersion Strengthened Aluminum Alloys. Warrendale, 1988.

[74] CHLUPOVA A, CHLUP Z, KRUML T. Fatigue properties and microstructure of quasicrystalline AlFeCrTi alloy[J]. International

Journal of Fatigue, 2016, 91: 251–256.

[75] GILMAN P S, DAS S K. Rapidly solidified aluminum alloys for high temperature/high stiffness applications[C]//Proceedings of International Conference on P/M Aerospace Materials (PM AEROSPACE MATERIALS 87). Shrewsbury, 1987.

[76] HASSAN H A, LEWANDOWSKI J J. Effects of changes in notch radius and test temperature on the toughness of a nano-crystalline aluminum alloy composite produced via extrusion of amorphous aluminum alloy powders[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 497(1/2): 212–215.

[77] ZEDALIS M S, BRYANT J D, GILMAN P S, et al. High-temperature discontinuously reinforced aluminum[J]. JOM, 1991, 43(8): 29–31.

[78] PENG L M, ZHU S J, MA Z Y, et al. High temperature creep deformation of an Al-Fe-V-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 259(1): 25–33.

[79] KIM I S, KIM N J, NAM S W. Temperature dependence of the optimum particle size for the dislocation detachment controlled creep of Al-Fe-V-Si/SiC_p composite[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(11): 1813–1819.

[80] PENG L M, ZHU S J, MA Z Y, et al. The effect of Si₃N₄ whiskers on the high-temperature creep behavior of an Al-Fe-V-Si alloy matrix composite[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(5): 769–773.

[81] CARREÑO F, GONZÁLEZ-DONCEL G, RUANO O A. High temperature deformation behavior of an Al-Fe-V-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1993, 164(1/2): 216–219.

[82] SPIGARELLI S. Interpretation of creep behaviour of dispersion-strengthened Al-Fe-V-Si alloys in terms of detachment mechanisms: an overview[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 337(1/2): 306–314.

[83] MA Z, TJONG S. High-temperature creep behavior of SiC particulate reinforced Al-Fe-V-Si alloy composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 278(1/2): 5–15.

[84] ZHU S J, PENG L M, MA Z Y, et al. High temperature creep behavior of SiC whisker-reinforced AlFeVSi composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 215(1/2): 120–124.

[85] PENG L, ZHU S, MA Z, et al. High temperature creep deformation of Al₁₈B₄O₃₃ whisker-reinforced 8009 Al composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 265(1/2): 63–70.

[86] LI P Y, DAI S L, CHAI S C, et al. High damping Al-Fe-Mo-Si/Zn-Al composites produced by rapidly solidified powder metallurgy process[J]. Scripta Materialia, 2000, 42(10): 955–960.

[87] LEE J C, LEE S, LEE D Y, et al. On the embrittlement of a rapidly solidified Al-Fe-V-Si alloy after high-temperature exposure[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(4): 853–858.

[88] KAWAMURA Y, INOUE A, TAKAGI M, et al. Rapidly solidified powder metallurgy of Al-Ti-Fe-X alloys[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(10): 1131–1137.

[89] GILMAN P S, ZEDALIS M S, PELTIER J M, et al. New rapidly solidified Al-Fe-V-Si alloys for aerospace applications (450–700°F) [J]. Industrial Heating, 1989, 2: 30–34.

通讯作者: 李沛勇, 研究员, 研究方向为气体雾化/粉末冶金技术、粉末铝合金及铝基复合材料、镁合金等, E-mail: pyl@vip.163.com。

(责编 李丹)