

基于 MQTT 的工业物联网通信系统研究与实现

贾凡^{1,2}, 熊刚^{1,3}, 朱凤华^{1,4}, 田滨^{1,4}, 韩双双^{1,4}, 陈世超^{1,4,5}

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;

2. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029;

3. 中国科学院云计算中心, 广东 东莞 523808;

4. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266109;

5. 澳门科技大学, 澳门 999078)

摘要: 工业物联网充分利用传感器、计算机网络、大数据处理等技术, 解决由传统工业系统运行封闭造成的“信息孤岛”问题, 使得系统之间可以快速、准确、可靠地进行数据交换。工业现场与云端如何建立高质量、低带宽需求的数据交换模式是实现智能制造的一大挑战。采用具有轻量级、配置灵活、应用广泛的消息队列遥测传输 (MQTT) 协议, 搭建了基于 MQTT 的工业物联网通信系统, 实现云端和工业现场的多源异构数据交换、设备状态的远程监测及用户服务订阅等功能, 以此研究 MQTT 协议在工业物联网通信系统中的性能及相关应用。

关键词: 工业互联网; 消息队列遥测传输; 多源异构数据

中图分类号: TN9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201928

Research and implementation of industrial Internet of things communication system based on MQTT

JIA Fan^{1,2}, XIONG Gang^{1,3}, ZHU Fenghua^{1,4}, TIAN Bin^{1,4}, HAN Shuangshuang^{1,4}, CHEN Shichao^{1,4,5}

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

3. Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808, China

4. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

5. Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China

Abstract: The industrial Internet of things makes full use of sensors, computer networks, big data process and other technologies to solve the problem of “information island” caused by the closed operation of traditional industrial systems, enabling the rapid and convenient data exchange between systems. How to establish high quality and low bandwidth data exchange mode in industrial field and cloud is a big challenge to realize intelligent manufacturing. MQTT protocol is widely used in the Internet of things system because of its lightweight and flexible configuration. MQTT-based industrial Internet of things communication system was built to realize multi-source and heterogeneous data exchange between cloud and industrial field, remote monitoring of device status, user service subscription and other functions, so that the performance and related applications of MQTT protocol in industrial Internet of things communication system could be studied.

Key words: IIoT, MQTT, multi-source heterogeneous data

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-08-15

通信作者: 陈世超, shichao.chen@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1702701, No.2018YFB1700202); 国家自然科学基金资助项目 (No.61773381, No.61773382, No.61872365); 北京市自然科学基金资助项目 (No.4182065)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1702701, No.2018YFB1700202), The National Natural Science Foundation of China (No.61773381, No. 61773382, No.61872365), Beijing Natural Science Foundation (No.4182065)

1 引言

工业控制系统经历了从 20 世纪六七十年代的模拟仪表控制系统 (ACS), 到 20 世纪 80 年代的集散控制系统 (DCS), 再到 21 世纪初的现场总线控制系统 (FCS) 的发展过程, 每一次变革都伴随着工业信息传输方式的改变^[1-3]。随着“工业 4.0”以及“中国制造 2025”等战略方针的确立, 实现工业生产过程的自动化、信息化、智能化是未来的发展方向。因此, 物联网、边缘计算、云计算、机器学习及平行智能等技术在工业领域的应用将日趋广泛^[4-9]。目前大多数传统工业企业仍处于“信息孤岛”的状态, 即使 DCS、FCS 能够在本地对工业传感器进行分散控制和集中管理, 但是从整体看, 工业系统仍运行于封闭的空间, 系统与系统之间的数据难以共享^[10-11]。另外, 由于现场控制网络的封闭性, 维护人员无法远程获取设备、产线的实时运行状态, 因此造成了设备维护难、成本高的难题。

工业物联网 (IIoT) 是工业领域的物联网技术, 其将具有感知能力的传感器、监控能力控制器以及移动通信、智能分析等技术融入工业生产过程的各个环节, 最终将传统工业提升到智能化的新阶段。依托大数据、云计算等技术发展的工业物联网云平台可以提供比工业现场更丰富的计算、存储及网络资源, 实现对工业现场海量监测数据的实时处理与分析, 解决工业“信息孤岛”等问题, 从而达到智能化生产、网络化协同、个性化定制与服务化延伸的目的。同时, 在云端数据中心, 可以利用机器学习等技术, 从海量数据中挖掘有价值的信息, 比如识别残次品、对硬件进行预测性维护及评估、预测生产过程中的风险系数以避免发生意外等^[12-14]。由此可见, 工业现场数据上云除了可以解决工业设备、产线间“信息孤岛”等问题, 还可以利用云平台的算力挖掘更多有价值的信息。因此实时、高效、可靠的云边协同通信系统成为研究热点, 也成为产业技术选择的方向。

我国制造业总体水平正处于从 2.0 至 3.0 过渡的阶段, 整体数字化水平较低, 国内阿里云、百度云等云服务供应商等已经着手布局工业物联网, 国外自动化厂商 (如西门子等) 已经构建了基于云的开放式物联网操作系统 (如 MindSphere 等)。在通信协议部分, 除了目前在互联网中应用广泛的超文本传输协议 (hypertext transfer protocol, HTTP),

针对物联网、消息推送等更加细化的应用场景, 也产生了消息队列遥测传输 (message queuing telemetry transport, MQTT)、约束应用协议 (constrained application protocol, CoAP)、高级消息队列协议 (advanced message queuing protocol, AMQP)、WebSocket 等在通信模式与通信质量上各有不同的协议。本文针对工业现场与工业云端实时、高效、可靠的数据通信需求, 基于 MQTT 协议构建工业物联网通信系统。详细分析了 MQTT 协议, 并与其他物联网 (IoT) 协议进行了对比; 同时, 以工业物联网架构为参考, 构建工业物联网通信系统, 实现工业现场多源异构数据的实时传输与分析; 然后, 详细地对系统的功能及性能进行测试, 结果显示, 基于 MQTT 的工业物联网通信系统非常适合小数据量、高并发的数据传输场景; 最后, 对本文的研究内容和未来的研究方向进行总结与说明。

2 MQTT 协议分析

MQTT 协议是较早的物联网通信协议之一, 由 IBM 公司于 1999 年开发, 是一个为解决在不良网络状况中设备间通信、基于订阅/发布机制的轻量级传输协议。在通过 MQTT 客户端发布消息至服务器的主题下, 任何订阅了该主题的 MQTT 客户端均可收到该消息, 并且客户端可以通过订阅多个主题接收多个主题下的消息。MQTT 是基于 TCP 的通信协议, 并且支持 TLS/SSL 加密, 其报文大小最小仅有 2 bit。对于工业领域云边通信的应用场景, 由于工业现场环境的复杂性和网络的不稳定性, 以及本地传感器大量接入的要求, 需要一种高质量、可靠、低带宽占用的数据交换协议。MQTT 协议因为其消息体积较小、基于发布/订阅的解耦通信模式、丰富的 QoS 选项及遗嘱 (LastWill) 机制, 非常适合硬件资源、带宽受限的应用场景^[15]。因此, MQTT 协议在工业物联网通信系统中的应用成为一种选择。

MQTT 提供遗嘱机制和 3 种灵活的 QoS 机制, 以满足数据传输过程中不同传输质量的要求。在工业物联网中, 普通的传感器数据可以采用 QoS 0 或 QoS 1 上传云端分析, 对于关键参数或者传感器可以采用 QoS 2 来保证传输数据的准确性和时效性。当传感器或网关异常离线时, 其他客户端也可以通过遗嘱机制及时获知异常状况, 如图 1 所示。

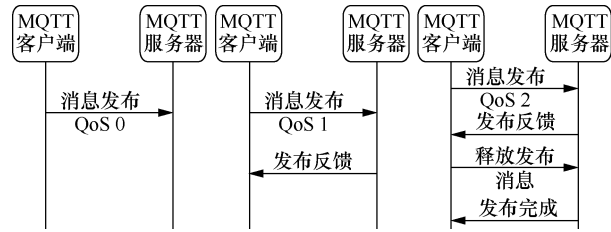


图1 MQTT 协议工作机制

表1为常用的物联网信息与通信技术（ICT）协议，相比其他的物联网 ICT 协议，MQTT 协议在支持发布/订阅的服务模式下提供了更多的服务质量选择，并且由于其消息体积较小，对于带宽的要求较低。同时，MQTT 协议基于 TCP 的消息传输保证了消息传输过程中的可靠性。因此本文以 MQTT 协议作为工业现场云边通信协议进行系统搭建。

3 基于 MQTT 协议的工业物联网通信系统

MQTT 作为工业物联网通信系统的 ICT 协议，实现了工业现场边缘节点、边缘智能网关以及工业物联网云平台之间的信息交换，在边缘节点与边缘智能网关之间，MQTT 主要负责多源异构数据的传输，而在边缘智能网关与工业物联网云平台之间，MQTT 作为云边协同的数据传输协议，主要负责实现云端与边缘端的数据通信。

3.1 系统架构

工业物联网是物联网在工业领域的具体应用，既具有物联网的分层架构，又具有适用于工业领域的特殊属性，其对系统通信时延、可靠性等性能指标有更高的要求^[16-19]。工业物联网系统融合了感知系统、控制系统、信息分析系统、工业信息安全系统等，实现了工业应用系统和人之间、工业系统与工业系统之间的信息互通和数据聚合，从而实现工业生产过程的按需执行、工业原材料的灵活分配、制造工艺的分析优化，使系统快速适应不同的生产

环境。同时，工业物联网通过工业云和工业大数据实现了由工业现场传感器产生的多源异构数据的存储、清洗和分析，实现了数据的挖掘，B2B 和 B2C 服务的个性化定制、延伸，以及端到端的数据流动^[20-24]。基于 MQTT 的工业物联网通信系统具有工业物联网的分层架构，如图2所示。

工业物联网整体上可以分为感知层、传输层、平台层及服务层^[25-29]。

（1）感知层

感知层是工业物联网数据的采集层，它采用射频识别（RFID）以及各类传感器网络技术等对工业现场环境、设备状态及产线调度信息等数据进行实时采集。感知层采集的数据不仅包括传统工业中的温度、液位、流量、压力等结构化数据，也包括音频、视频等半结构化和非结构化数据。

（2）传输层

传输层通过有线或者无线通信技术，实现工业现场数据的传输及工业现场到云端的数据传输，其包括工业现场的时间敏感网络（TSN）、工业现场到云端的有线 Internet 和无线 4G/5G 网络等。

（3）平台层

平台层包括云端的基础设施、资源部署与管理平台、服务支撑平台。其中云端基础设施包括云端的计算、存储等资源，以及虚拟化、数据仓库等技术^[30-31]；资源部署与管理平台包括设备管理、资源管理、运维管理和故障恢复；服务支撑平台包括大数据处理与分析、工业微服务、机器学习、可视化等模块^[32-36]。

（4）服务层

服务层能利用平台层提供的数据、模型和接口满足客户在设计、生产、管理等不同方面的应用服务需求^[37-40]。

本文以 MQTT 为通信协议来搭建系统，测试通

表1 不同协议对比

	MQTT	CoAP	AMQP	HTTP	WebSocket
年份	1999 年	2010 年	2003 年	1997 年	2008 年
机制	发布/订阅	发布/订阅、请求/响应	发布/订阅、请求/响应	请求/响应	请求/响应
服务质量	QoS 0、QoS 1、QoS 2	确定信息、不确定信息	类似于 QoS 0	/	/
标准	OASIS、Eclipse	IETF、IPSec	OASIS、ISO/IEC	IETF、W3C	IETF、W3C
传输协议	TCP	UDP、SCTP	TCP	TCP	TCP
编码类型	二进制	二进制	二进制	文本	文本/二进制
应用场景	物联网	物联网节点	楼宇自动化	超文本信息传输	超文本信息传输

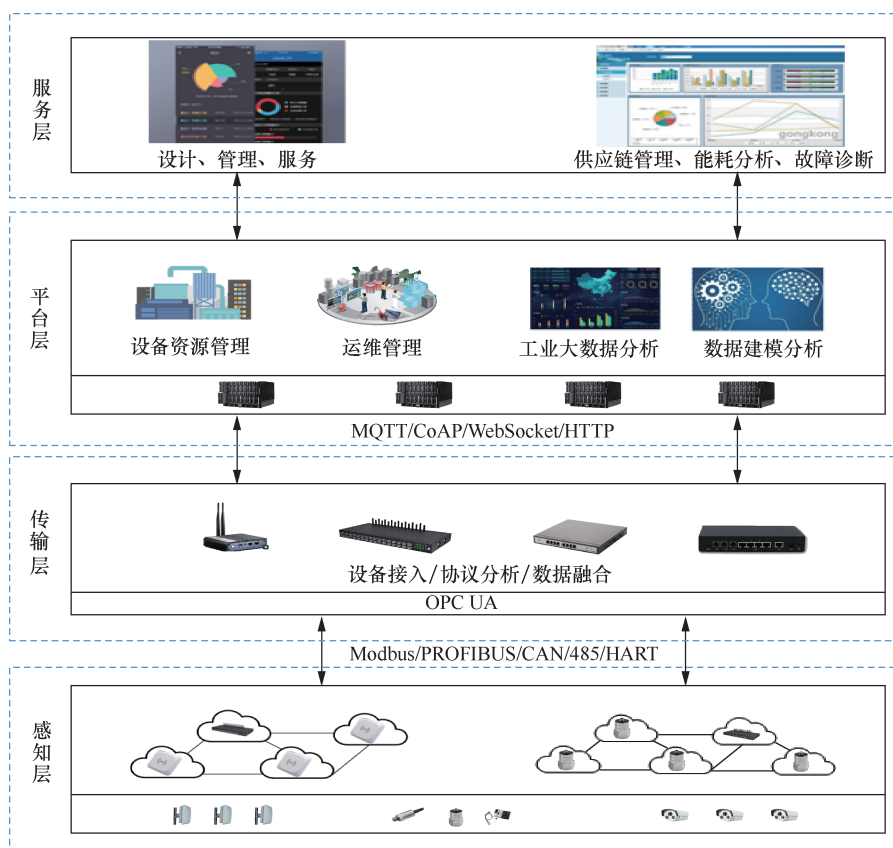


图2 工业物联网架构

信过程中的时延、可靠性等性能,探究 MQTT 在工业物联网的平台架构中从边缘层到云端的应用价值与可能性。

3.2 系统硬件设计与实现

依据工业物联网系统的架构,本文设计并实现了基于MQTT的工业物联网通信系统,如图3所示。本系统包含感知层、传输层、平台层、服务层。感知层包含工业现场的振动传感器和视频图像采集器、数据采集器以及智能网关;感知层的传感器与数据采集器组成边缘节点,与边缘网关组成系统的边缘端,通过传输层以 MQTT 协议与云端进行数据通信,其中,传输层采用 4G 网络实现工业现场与云端的数据通信;平台层采用阿里云服务器,部署服务器应用软件,实现对边缘工业现场的数据存储、分析处理与转发等,并对用户订阅服务进行解析^[41];服务层以 Qt 和 Paho 等技术为基础,在 PC 客户端开发应用软件,实现用户主题服务订阅与数据可视化展示。

传感器选用工业现场具有代表性的振动传感器,型号为 ZM-YB40-V/A,类型为三线制仪表,可选择模拟电压或电流信号输出。

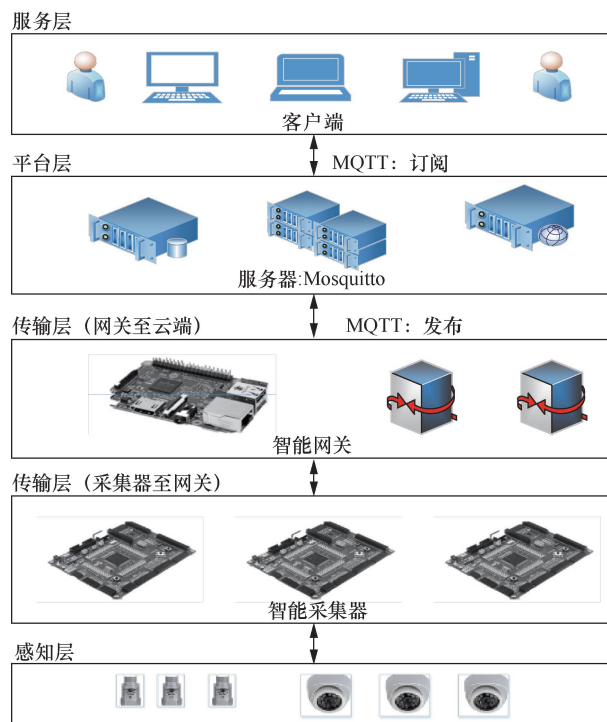


图3 系统硬件架构

数据采集器是以 STM32 处理器为核心的低功耗、多功能的采集板,本系统采用使用 STM32 的

模数转换模块实现传感器数据的采集。

智能网关的硬件载体是以 Cortex-A53 为核心的 Raspberry Pi。本系统中, Raspberry Pi 通过与采集器通信获取实时传感器数据, 实现多源异构数据的解析、融合及封装, 将数据实时发送至云端。

3.3 系统软件设计与实现

如图 4 所示, 本系统的软件系统包含 3 个子系统, 分别为边缘数据采集子系统、云边协同通信子系统、用户订阅服务子系统。

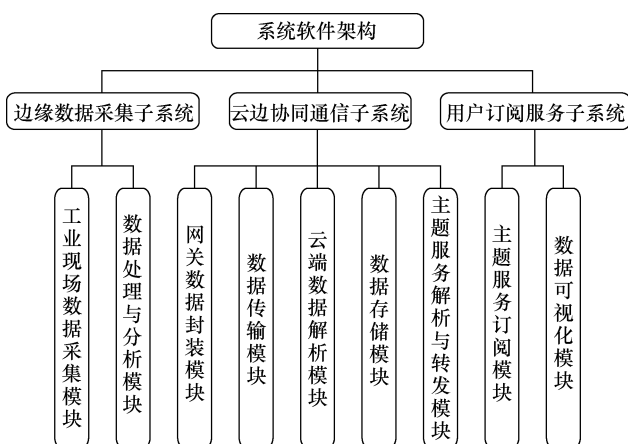


图 4 系统软件功能架构

- 边缘数据采集子系统包括工业现场数据采集以及数据处理与分析模块, 通过利用 STM32 片载 AD 功能实现对振动传感器的数据采集。数据采集器通过 RS232 与网关连接, 以串口通信的方式传输数据。

- 云边协同通信子系统主要实现云端与工业现场端的数据交互, 实现网关数据的封装、数据传输、云端数据解析、数据存储及主体服务解析与转发等。网关数据以 JSON 格式进行封装, 云端利用 MySQL 数据库工具实现数据的存储, 服务代理程序 Mosquitto 实现基于 MQTT 的通信的主题服务解

析与转发。

- 用户订阅服务子系统实现主题服务订阅与数据可视化, 具体为向云端发送订阅主题并接收与服务器相关的主题数据, 解析应答 MQTT 报文内容, 利用 Python+Qt 实现订阅客户端的数据可视化, 以及对异构数据的存储与显示。

4 系统测试与分析

本文将 PC 上由 Python+Qt 编写的客户端作为功能测试终端, MQTT Broker 端采用 Mosquitto, Mosquitto 运行于云服务器中, 开放 1883 端口为 MQTT 协议的通信端口, 将 STM32 作为数据采集器, Raspberry Pi 3B+ 为智能网关, 对采集到的数据以及工业现场的多源异构数据进行封装处理并实时上传至云端, 其硬件系统如图 5 所示。本系统中传输层的采集器与感知层的一体化振动变送器组成边缘节点, 边缘节点将采集到的信息传输至边缘网关, 边缘网关对数据进行初步处理后通过 MQTT 协议将数据上传至云端。

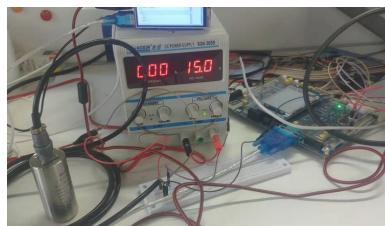


图 5 测试硬件系统

系统中的信息流向如图 6 所示。

本次试验采集现场的振动传感器及图像数据, 图像数据中只发送图片。系统实现工业现场多源异构数据的采集、处理、传输、云端数据的解析、客户端主题订阅服务等功能, 图 7 为系统功能测试界面。

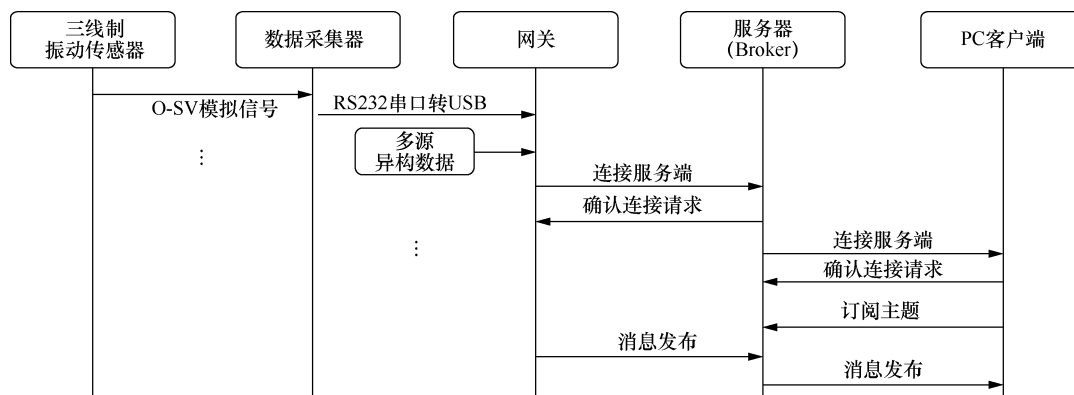


图 6 信息流向

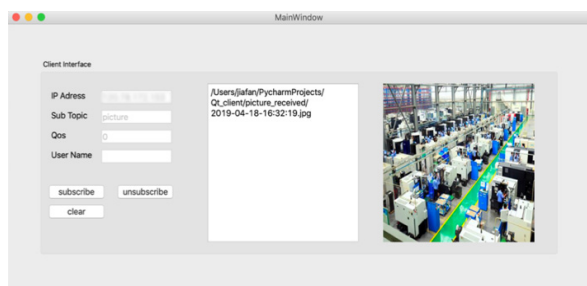


图 7 系统功能测试界面

针对基于 MQTT 的工业物联网通信系统的时延、可靠性等性能设置试验。

如图 8 所示,在时延测试中,数据从网关传输至云端的时间为 t_1 ,云端服务器对消息进行解析、存储、队列发送的时间为 Δt ,从云端传输至订阅客户端的时间为 t_2 ,则消息从网关传输至订阅端的总时间 t_3 由式 (1) 可得。

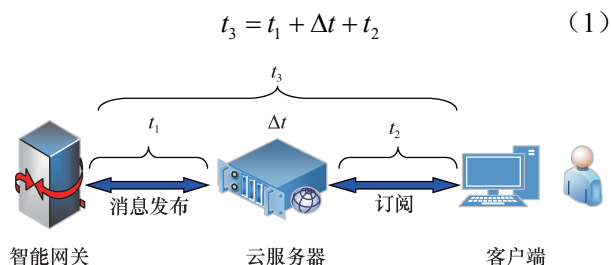


图 8 时延划分

考虑到实际情况,本文中测试所得的时间数据均为数据从网关传输至订阅端的总时间(即 t_3),数据标准差由式 (2) 可得:

$$\text{std.Deviation} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{\mu})^2} \quad (2)$$

其中, n 为每组测试的总次数, t_i 为每组的单次测量时延, t_{μ} 为该组的平均时延。为了确定服务器在客户端节点及消息负载体积逐渐增加情况下的时延表现,需要进行时延测试,测试工具为开源脚本 mqtt-malaria,该脚本可以模拟大量客户端对服务器进行并发连接,并可以设置 QoS、报文体积等参数。测试环境为实验室内,网络条件为电信 4G 无线网

络(为保证实验结果不受中国电信 4G 网络状况的影响,测试数据均在同一时间段测得),笔者分别在 PC 以及 Raspberry Pi 网关上运行脚本来模拟大量客户端对 Mosquitto 服务器建立连接、发送和接收报文。以客户端数量、报文体积为变量进行分组测试。PC 主机的配置为 8 GB 内存, Intel Core i5 (2.3 GHz), Raspberry Pi 硬件配置为 1 GB 内存, ARM Cortex-A53 (1.4 GHz)。首先进行基准测试,即一个客户端在发送 10 条报文、消息体积为 1 Byte 情况下的性能表现。基准测试数据见表 2。

表 3 为在不同客户端数量下,在 PC 端和 Raspberry Pi 测试的 10 条消息体积为 1 Byte 的报文的平均时延、最小时延和最大时延。图 8 是在不同客户端数量下,在 PC 端和 Raspberry Pi 测试的 10 条消息体积为 1 Byte 的报文的单次时延和平均时延。

图 9 (a) 为在 PC 上不同数量客户端在不同质量要求下发送 10 次数据分组时,每次发送数据分组所用的时间;图 9 (b) 为在 PC 上不同数量客户端在不同质量要求下发送 10 次数据分组的平均时延;图 9 (c) 为在 Raspberry Pi 上不同数量客户端在不同质量要求下发送 10 次数据分组时,每次发送数据分组所使用的时间;图 9 (d) 为在 Raspberry Pi 上不同数量客户端在不同质量要求下发送 10 次数据分组的平均时延。由表 3 可以看到,在不同客户端数量下, Raspberry Pi 和 PC 的测试结果均比较稳定,测试结果标准差较小,并且客户端的数量对于通信时延的影响比较小,200 个客户端的测试平均时延仅仅比 10 个客户端的时延增加了 20~90 ms。

另外,在网络状态良好时,消息发送与接收的成功率均为 100%,当客户端数量较少时(100 个以内),二者在通信时延方面表现相当,均保持在 250 ms 以内。由于 Raspberry Pi 的硬件资源相比于 PC 有限,当客户端数量继续上升达到 200 个时,由于算力与内存资源不足,通信时延比 PC 增加了 100 ms 左右。

从消息服务质量的角度来看,由于 QoS 2 比 QoS 1 多一次确认应答且需要更多的网络资源,其

表 2

基准测试数据

客户端硬件	QoS	平均传输时延/ms	标准差/ms	最小传输时延/ms	最大传输时延/ms
PC	QoS 1	73.42	32.45	44.43	135.56
	QoS 2	160.21	52.87	115.43	277.21
Raspberry Pi	QoS 1	77.98	18.32	45.23	120.21
	QoS 2	153.17	43.55	120.1	255.21

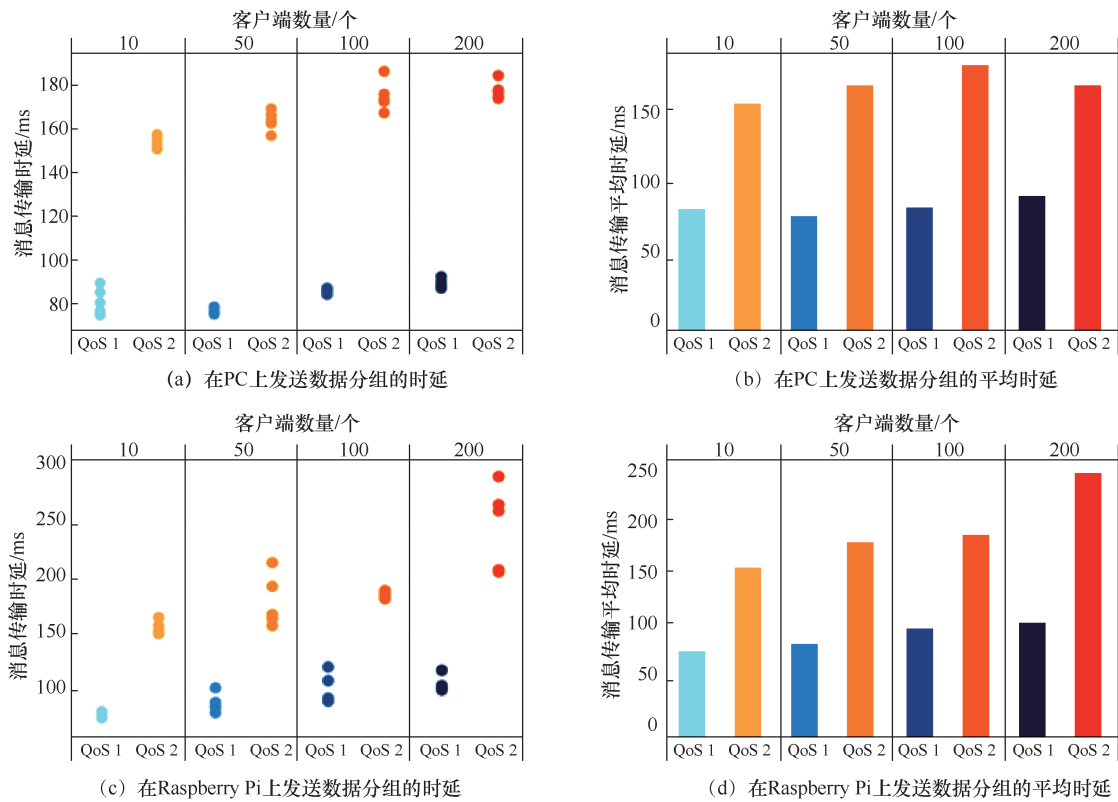


图9 并发测试数据分析

表3

客户端数量测试数据

客户端数量/个	硬件	QoS	平均传输时延/ms	标准差/ms	最小传输时延/ms	最大传输时延/ms
10	PC	QoS 1	81.51	33.66	55.95	164.27
		QoS 2	153.33	43.57	115.41	257.25
	Raspberry Pi	QoS 1	76.57	21.53	58.55	128.22
		QoS 2	155.71	62.98	119.83	322.84
50	PC	QoS 1	76.82	26.92	54.50	141.97
		QoS 2	163.52	48.10	119.04	277.51
	Raspberry Pi	QoS 1	87.01	35.53	60.23	175.39
		QoS 2	179.74	63.67	128.06	329.22
100	PC	QoS 1	85.84	33.77	57.54	168.10
		QoS 2	174.72	46.31	128.12	278.78
	Raspberry Pi	QoS 1	99.87	48.47	65.29	224.42
		QoS 2	186.12	51.15	141.68	304.80
200	PC	QoS 1	89.30	36.42	59.59	177.83
		QoS 2	177.25	48.76	129.9	287.28
	Raspberry Pi	QoS 1	104.20	42.49	70.78	207.86
		QoS 2	247.72	113.44	155.16	511.39

通信时延较 QoS 1 有明显的增大, 达到了 QoS 1 的 2~3 倍, 因此, 在通信网络质量可以保证的情况下, 可以使用 QoS 1, 以减少系统时延。

图 10 为在不同硬件端下, 单个客户端在不同质量要求、不同的报文体积下测试的 10 条报文的单次传输时延和平均传输时延。表 4 为在不同硬件

端下, 单个客户端在不同质量要求、不同的报文体积下测试的 10 条报文的平均时延、最小时延和最大时延。

图 10(a) 为 PC 上客户端在不同报文体积、不同质量要求下发送 10 次数据分组时, 每次发送数

据分组所用的时间; 图 10(b) 为 PC 上客户端在不同报文体积、不同质量要求下发送 10 次数据分组的平均时延; 图 10(c) 为 Raspberry Pi 上客户端在不同报文体积、不同质量要求下发送 10 次数据分组时, 每次发送数据分组所用的时间; 图 10(d)

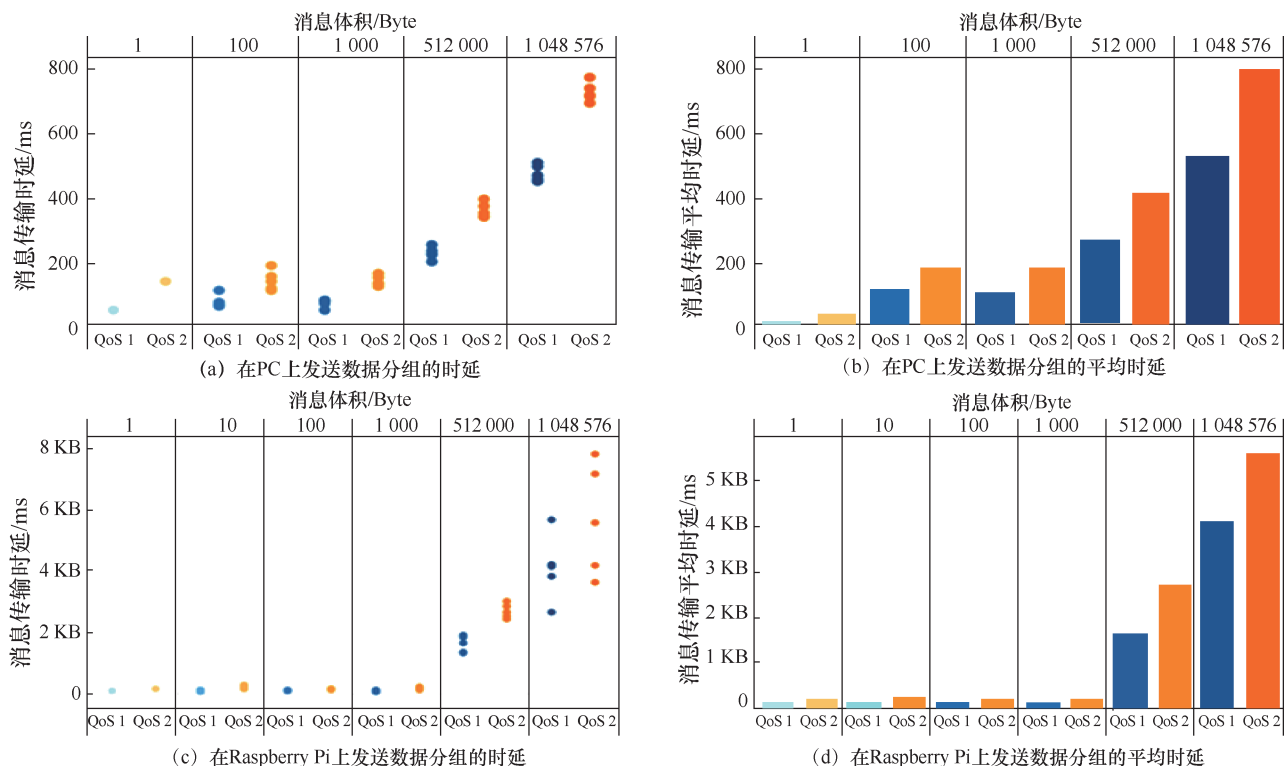


图 10 消息体积测试数据分析

表 4

消息体积测试数据

消息体积	硬件	QoS	平均传输时延/ms	标准差/ms	最小传输时延/ms	最大传输时延/ms
10 Byte	PC	QoS 1	100.18	52.84	59.35	216.43
		QoS 2	164.38	49.82	117.91	260.81
	Raspberry Pi	QoS 1	86.49	25.59	62.19	135.15
		QoS 2	153.70	31.85	123.59	219.31
1 KB	PC	QoS 1	95.424	57.72	61.91	302.49
		QoS 2	162.83	42.49	124.86	250.97
	Raspberry Pi	QoS 1	89.23	29.19	59.98	159.01
		QoS 2	169.59	49.58	127.75	281.54
500 KB	PC	QoS 1	246.55	156.16	158.99	652.61
		QoS 2	376.20	115.69	189.37	759.82
	Raspberry Pi	QoS 1	1 602.88	1 222.36	398.61	3 211.97
		QoS 2	2 679.88	1 797.99	419.97	5 983.95
1 MB	PC	QoS 1	487.96	203.48	326.9	957.18
		QoS 2	733.58	224.59	377.67	1 136.05
	Raspberry Pi	QoS 1	4 078.30	1 869.05	792.10	6 883.91
		QoS 2	5 630.02	3 167.08	831.82	11 533.82

为 Raspberry Pi 上客户端在不同报文体积、不同质量要求下, 发送 10 次数据分组的平均时延。

从结果可以看出, 在网络条件良好时, 消息成功传输的比例同样为 100%, 即没有出现信息丢失的现象。当消息体积较小 (1 KB 以内) 时, 在 QoS 1 和 QoS 2 的质量要求下, 不同的硬件的传输平均时延均在 200 ms 以内。当消息体积超过 1 KB 时, Raspberry Pi 的通信时延性能迅速变差, 且同样在 QoS 1 的情况下明显好于 QoS 2; PC 端下的通信时延变化较小, 这与其硬件资源有较大的关系。当消息体积增加到 500 KB 及以上时, 传输时间有明显的上升, PC 上 QoS2 质量下的传输时延达到了 600~800 ms。对于硬件资源较差的 Raspberry Pi, 在 QoS 2 的情况下传输 1 MB 数据平均需要 5.6 s, 并且根据表 4 可知, 在整个测试过程中消息体积较大的通信时延标准差较大, 说明传输速度不稳定。测试中最糟糕的情况, 即 Raspberry Pi 在 QoS 2 的条件下传输 1 MB 数据, 其用时达到了 11.5 s。

综上所述, 在相同的硬件资源下, 客户端的数量对于系统通信时延的影响较小; 但是在相同的硬件资源下, 增加报文体积会明显增加系统的通信时延 (尤其在报文体积大于 1 KB 时), 因此本系统适用于传输小数据分组、高并发接入的场景。同样, QoS 1 的传输质量要求可以满足工业物联网的通信可靠性要求。

5 结束语

本文结合工业物联网的发展趋势, 在 MQTT 普遍用于消费物联网的情况下探究了其应用于工业现场的前景, 通过构建基于 MQTT 的工业物联网通信系统, 搭建了云端与工业现场之间多源异构数据的稳定、可靠的通信系统。经过测试, 基于 MQTT 的工业物联网系统适合小数据分组传输、高并发接入的场景, 并在对通信时延要求不严格的情况下, 对于较大数据分组有较高的通信质量, 但是在通信时延要求比较高的情况下, 不具备优势。此外, 可以发现在对时延要求非常严格的场景中, 云计算的范式是不能满足要求的, 但是并不影响云边协同通信的实际需求, 云端的宏观态势感知、计算资源、存储资源等仍然具有不可替代的作用。未来, 云计算、边缘计算、工业物联网平台以及平行智能将在工业领域智能化方面有巨大的潜力和推动作用, 而云边协同的数据通信技术是保证系统稳定、可靠的基础。

参考文献:

- [1] FOSTER A. Messaging technologies for the industrial internet and the internet of things whitepaper [EB]. PrismTech, 2015.
- [2] 沈苏彬, 范曲立, 宗平, 等. 物联网的体系结构与相关技术研究[J]. 南京邮电大学学报, 2009, 29(6): 1-11.
SHEN S B, FAN Q L, ZONG P, et al. Research on the architecture and related technologies of Internet of things [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2009, 29(6): 1-11.
- [3] 周洪波. 物联网: 技术、应用、标准和商业模式[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
ZHOU H B. Internet of things: technology, applications, standards and business models[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [4] 李金华. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(5): 71-79.
LI J H. Comparison and inspiration between German “industry 4.0” and “made in China 2025”[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition), 2015, 15(5): 71-79.
- [5] 王飞跃. X5.0: 平行时代的平行智能体系[J]. 中国计算机学会通信, 2015, 11(5): 10-14.
WANG F Y. X5.0: parallel intelligence system in parallel times[J]. Communication of China Computer Society, 2015, 11(5): 10-14.
- [6] CHEN B T, WAN J F, SHU L, et al. Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges[J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 6505-6519.
- [7] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 1-3.
ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3.
- [8] 王晓, 要婷婷, 韩双双, 等. 平行车联网: 基于 ACP 的智能车辆网联管理与控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1391-1404.
WANG X, YAO T T, HAN S S, et al. Parallel vehicle networking: intelligent vehicle networking management and control based on ACP[J]. Journal of Automation, 2018, 44(8): 1391-1404.
- [9] HAN S, WANG X, ZHANG J J, et al. Parallel vehicular networks: a CPSS-based approach via multimodal big data in IoV[J]. Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 1079-1089.
- [10] CAO Y, JIANG T, HAN Z. A survey of emerging M2M systems: context, task, and objective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 1246-1258.
- [11] 王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 等. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构[J]. 中国科学: 信息科学, 2017(7): 5-25.
WANG F Y, YANG L Q, HU X Y, et al. Parallel network and network software: a new network architecture[J]. Scientia Sinica Informationis, 2017(7): 5-25.
- [12] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.
ZHANG S. Industry 4.0 and intelligent manufacturing [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 1-5.
- [13] 王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 529-547.
WANG W L, ZHANG Z J, GAO N, et al. Research progress of big data analysis method based on artificial intelligence technology[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(3): 529-547.

- [14] 迪安. 大数据挖掘与机器学习: 工业 4.0 时代重塑商业价值[M]. 林清怡, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- DEAN J. Big data mining and machine learning: reshaping business value in the industry 4.0 era [M]. Translated by LIN Q Y. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [15] MQTT Version 3.1.1 [EB]. OASIS Standard, 2014.
- [16] 康世龙, 杜中一, 雷咏梅, 等. 工业物联网研究概述[J]. 物联网技术, 2013(6): 80-82.
- KANG S L, DU Z Y, LEI Y M, et al. Overview of research on industrial Internet of things [J]. Internet of Things Technology, 2013(6): 80-82.
- [17] 贾召喜. 基于工业物联网的生产线远程监控系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- JIA Z X. Research on remote monitoring system of production line based on industrial Internet of things [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [18] EDEN P, BLYTH A, JONES K, et al. SCADA system forensic analysis within IIoT[M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2017.
- [19] 王飞跃, 高彦臣, 商秀芹, 等. 平行制造与工业 5.0: 从虚拟制造到智能制造[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 10-22.
- WANG F Y, GAO Y C, SHANG X Q, et al. Parallel manufacturing and industry 5.0: from virtual manufacturing to intelligent manufacturing[J]. Science and Technology Review, 2018, 36(21): 10-22.
- [20] 王平, 魏旻. 工业物联网标准及技术综述[J]. 自动化博览, 2012(s1): 44-46.
- WANG P, WEI M. Review of standards and technologies for industrial Internet of things [J]. Automation Expo, 2012(s1): 44-46.
- [21] SHA L, FU X, WEI C, et al. IIoT-SIDefender: detecting and defense against the sensitive information leakage in industry IoT[J]. World Wide Web-internet & Web Information Systems, 2017, 21(4): 1-30.
- [22] 王浩, 李玉, 秘明睿, 等. 一种基于监督机制的工业物联网安全数据融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 817-824.
- WANG H, LI Y, MI M R, et al. A safety data fusion method for industrial Internet of things based on supervision mechanism[J]. Chinese Journal of Instrumentation, 2013, 34(4): 817-824.
- [23] LIU R. 工业物联网带来怎样的机遇和挑战? 距离现实有多远[J]. 电子产品世界, 2018, 25(3): 15-17, 4.
- LIU R. What are the opportunities and challenges brought by the industrial Internet of things? How far from reality[J]. World of Electronic Products, 2008, 25(3): 15-17, 4.
- [24] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [25] BOYES H, HALLAQ B, CUNNINGHAM J, et al. The industrial internet of things (IIoT): an analysis framework[J]. Computers in Industry, 2018, 101: 1-12.
- [26] 李楠, 刘敏, 严隽薇. 面向钢铁连铸设备维护维修的工业物联网框架[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 413-418.
- LI N, LIU M, YAN J W. Industrial Internet of things framework for steel continuous casting equipment maintenance[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(2): 413-418.
- [27] 刘勇, 侯荣旭. 浅谈物联网的感知层[J]. 智能计算机与应用, 2010(5): 55.
- LIU Y, HOU R X. On the perception layer of Internet of things[J]. Intelligent Computer and Application, 2010(5): 55.
- [28] CHEN S C, XIONG G, XU J, et al. The smart street lighting system based on NB-IoT[C]//2018 Chinese Automation Congress, June 25-29, 2018, Halifax, Canada.[S.l.:s.n.], 2018: 1196-1200.
- [29] 陈红霞, 赵俊钰. 物联网感知层标准体系架构研究[J]. 电信科学, 2011, 27(9): 101-106.
- CHEN H X, ZHAO J Y. Research on the sensor layer standard architecture of Internet of things[J]. Telecommunication Science, 2011, 27(9): 101-106.
- [30] 曹伟杰, 贺建民, 孙志丹. IaaS 模式下虚拟机部署机制研究[J]. 计算机技术与发展, 2012(10): 105-108.
- CAO W J, HE J M, SUN Z D. Research on virtual machine deployment mechanism under IaaS model[J]. Computer Technology and Development, 2012(10): 105-108.
- [31] 梁钢, 茅秋吟. 云计算 IaaS 平台的信息安全和运维服务设计[J]. 电子技术应用, 2013, 39(7): 63-64.
- LIANG G, MAO Q Y. Information security and operation service design of cloud computing IaaS platform [J]. Application of Electronic Technology, 2013, 39(7): 63-64.
- [32] 李艳斐. 面向 IaaS 平台的用户自服务系统的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- LI Y F. Research and implementation of user-centered service system for IaaS platform[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [33] 王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 529-547.
- WANG W L, ZHANG Z J, GAO N, et al. Research progress of big data analysis method based on artificial intelligence technology [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(3): 529-547.
- [34] 黄福玉, 张真继, 刘古权. 基于 PaaS 模式的产业集群 IT 服务平台的构建[J]. 中国管理信息化, 2011(6): 28-31.
- HUANG F Y, ZHANG Z J, LIU G Q. Construction of industrial cluster IT service platform based on PaaS model [J]. China Management Informatization, 2011(6): 28-31.
- [35] 王保丰. 计算机视觉工业测量系统的建立与标定[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2004.
- WANG B F. Establishment and calibration of computer vision industrial measurement system [D]. Zhengzhou: PLA University of Information Engineering, 2004.
- [36] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.
- SONG Y Q, ZHOU G L, ZHU Y L. Status and challenges of large data processing technology for smart grid [J]. Power Grid Technology, 2013, 37(4): 927-935.
- [37] 沈大勇, 王晓, 刘胜. 平行装卸: 迈向智慧物流的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 34-39.
- SHEN D Y, WANG X, LIU S. Parallel loading and unloading: smart technology toward intelligent logistics[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 34-39.

- [38] 昌中作, 徐悦, 戴钢. 基于 SaaS 模式公共服务平台多用户数据结构的研究[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(2): 7-11.

CHANG Z Z, XU Y, DAI G. Research on multi-user data structure of public service platform based on SaaS model[J]. Computer System Application, 2008, 17(2): 7-11.

- [39] 杜澈. SaaS 模式的研究与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

DU C. Research and application of SaaS model[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.

- [40] 李春阳, 刘迪, 崔蔚, 等. 基于微服务架构的统一应用开发平台[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(4): 43-48.

LI C Y, LIU D, CUI W, et al. Unified application development platform based on micro-service architecture[J]. Computer System Applications, 2017, 26(4): 43-48.

- [41] SCHNEIDER S. The industrial Internet of things (IIoT)[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017.



朱凤华 (1976-), 男, 山东聊城人, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室高级工程师, 主要研究方向为人工交通系统、平行交通管理系统。

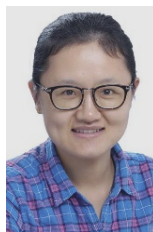


田滨 (1986-), 男, 山东济南人, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室副研究员, 主要研究方向为计算视觉、自动驾驶、智能交通。

[作者简介]



贾凡 (1996-), 男, 山西太原人, 北京化工大学信息科学与技术学院本科生, 主要研究方向为嵌入式系统、物联网等。



韩双双 (1984-), 女, 山东东营人, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员, 主要研究方向为智能网络、物联网、智能交通、无线通信关键技术等。



熊刚 (1969-), 男, 四川乐山人, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员, 主要研究方向为复杂系统平行控制、智能制造、智能交通。



陈世超 (1987-), 男, 山东日照人, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员, 主要研究方向为平行感知、工业物联网、机器学习、智能制造等。