

物联网架构研究综述

李冬月¹ 杨刚² 千博¹

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)¹ (西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)²

摘要 物联网自提出以来,就引起了政府、企业、学者的广泛关注。相关标准组织或研究机构一直试图制定统一的标准来规范物联网应用,但由于物联网涉及范围广、涵盖内容多,其概念和融合技术也在不断更新和发展,因此目前物联网尚未有统一的标准。文中以 3 种思路总结了物联网架构的演变,并在此基础上分析了不同的物联网架构的设计模式及其优势,最后推测了物联网架构的研究热点。

关键词 物联网,架构,面向服务,云计算,社会物联网

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

Research on Architecture of Internet of Things

LI Dong-yue¹ YANG Gang² QIAN Bo¹

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)²

Abstract The Internet of things (IoT) raised widespread concern since it was proposed, including the government, enterprises and scholars. The relevant standards of organizations or research institutions have been trying to develop a unified standard for the Internet of Things applications. On the one hand, the Internet of things involves a wide range of contents. On the other hand, the concept of Internet of things and fusion technology are also constantly updating and developing. So there is a standard of IoT without accepted in the public. Based on the evolution of IOT architecture, this paper analyzed the design patterns and advantages of different IOT architectures in three ways. In the end, the trend of IoT in the future was speculated.

Keywords Internet of things, Architecture, SOA, Cloud computing, Social IoT

1 引言

麻省理工学院自动识别中心于 1999 年首次提出了物联网的概念^[1], Kevin Ashton 教授用物联网形容由 RFID (Radio Frequency Identification) 和其他传感器组成的全球标准系统,因此物联网的最初概念定义和应用是以 RFID 和传感器为核心的。2005 年,国际电信联盟发布的《ITU 互联网报告 2005:物联网》扩充了物联网的含义^[2],把物联网解析为互联网维度的延伸,并把 RFID、传感网技术、智能器件、纳米技术和小型化技术作为能够引导物联网发展的技术。智能器件、纳米技术和小型化技术都是针对智能设备的,物联网的物端从传感器提升为包括传感器在内的智能设备。

近些年来,随着物联网应用的普及和相关研究的深入,其概念和支撑技术都在不断发展。物联网的含义不仅包括将物体融入到网络中实现识别和控制^[3],还包括信息的传输和智能处理。物联网涵盖的技术也从最初的传感器相关的技术,提升为包括数据采集、传感器网络组网和协同信息处理在内的感知层技术,包括互联网、异构网融合、M2M (Machine-to-Machine) 无线接入等的网络层技术,以及包括支撑子层的物联网应用层技术。大数据、云计算、人工智能等新兴技术的提出为物联网提供了更加智能、优化的实现方案。物联网的宏

观理解也从 IoT (Internet of Things) 逐渐引申为 IoE (Internet of Everything), WoT (Web of Things), SIoT (Social IoT) 等。Jack Allen 解释 IoE 不仅是连接事物,还以用户友好和有用的方式连接人、过程和数据^[4]; WoT 是将连接的对象利用基于 Web 的语言和协议来达到互操作性,并为用户交互提供可能性^[5]; SIoT 是将社交网络的概念融入到物联网,以更有效的方式支持新的应用程序和网络服务^[6]。

物联网的研究热点也从早期的硬件网络和低层次的技术转向物联网架构、轻量级的协议、物联网安全和数据等^[7]。本文主要的研究内容是在概括物联网架构相关文献的基础上,总结物联网架构发展的思路并分析未来的技术要点。本文第 2 节对近些年与物联网架构相关的 IEEE 论文进行统计,梳理物联网架构中研究的热点和待解决的问题;第 3 节从不同的角度分析研究者设计的物联网架构及对应架构的改进或实现,选择的物联网架构包括面向服务的物联网架构、与云计算融合的物联网架构、社会物联网架构;最后,总结物联网架构的研究思路并推测未来的研究热点。

2 物联网架构的研究现状

参考体系架构的设计主要是应对相关软件工程在应用程序、设备、服务方面的挑战^[8-11],可移动的联网设备、异构设

备、层出不穷的服务都为软件的需求设计、开发的可靠性、程序的安全性带来了巨大的挑战。特殊的软件接口、灵活的组织结构和软件的可靠性需要特定的方法来保证安全性、可靠性和持续性。物联网参考架构主要处理的需求有设备管理、可伸缩性、安全性、数据的处理和服务信息的关联。物联网的研究和部署分布在全球范围内,在物联网发展初期,许多国家或地区均提出了相关计划。在国家战略层面,中国提出了“感知中国”理念,欧盟提出了《欧盟物联网行动计划》,日本提出了“U-Japan”战略,韩国提出了《物联网通信基础构建基本规划》;在技术层面,存在许多较为有名的物联网相关组织,比如欧盟的 FP7 项目、国内的物联网产业技术创新战略联盟、由企业主导的开放雾联盟等;推动建设物联网平台和概念实现的公司包括思科、微软、IBM 等行业翘楚。而在对文献进行分析的过程中发现,大部分论文出自于院校,少数出自于相关组织和企业。

在谷歌学术中以“物联网”和“架构”为关键词,选取关联度较高的文献 82 篇。对选取的文献做年份统计,论文发表时间分散在 2010—2018 年之间,如表 1 所列。2017 年相关文献数量最多,2016 次之,从论文数量的趋势可以简单地分析出物联网架构的研究热度平稳。

表 1 文献时间分析

年份/年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
数量/篇	4	3	4	4	10	10	14	22

以文献的主题将文献划分为架构综述、架构应用、架构设计、其他 4 类,它们的篇数分别为 21,15,41,5,如表 2 所列。在物联网架构设计研究中,以通用架构的改进和提出最多;架构应用文献分为用通用架构实现应用,以及针对具体应用提出的特定物联网架构两种。关于架构综述的文献,相关的内容包括物联网的关键技术、挑战和某一类架构的分析。但是,目前尚没有相关文献对物联网架构做整体的概括和分析。

表 2 文献类别分析

类别	架构设计	架构综述	架构应用	其他
比例/%	50	26	18	6

架构设计中的相关文献可以归纳为两类:1)以技术为出发点解决物联网架构中特定的问题;2)提出一种通用的物联网架构。类别 1)中主要解决的问题包括本体表达、人机交互、服务发现、数据处理、互操作、安全共 6 类问题,其中安全问题是受关注的。在类别 2)中提出的通用架构包括基于面向服务的物联网架构、基于微服务的物联网架构、基于云计算的物联网架构、基于雾计算的物联网架构、分布式物联网架构、社会物联网架构以及基于软件自定义的物联网架构等。在针对某一特定问题时,不同的研究者有不同的解决思路,如安全问题中的访问控制,解决方案包括模糊逻辑算法实现、区块链实现、细粒度角色实现等。在架构设计上,基于同一种架构理念设计的架构也存在不同之处,因此关于物联网架构的综述研究很有必要性。

3 物联网架构分析

物联网架构中的基础架构是 DCM (Devices, Connect, Manage) 架构,其在 2011 年由工业和信息化部电信研究院提

出。作为国际上第一个物联网总体性框架的参考标准,架构采用的是分层体系,并将物联网分为感知层、网络层、应用层 3 层,对应的层次特征分别是全面感知、可靠传递、智能处理。感知层的物体包括用于信息采集的传感器、RFID、二维码等和用于控制的智能设备、执行器等;网络层是接收感知层的数据并向应用层传输,同时也接收应用层返回的指令并传递给感知层,信息也会在网络层实现路由和控制;应用层包括中间件、应用基础设施和各种物联网应用,目的是为物联网应用提供接口。

在包括 DCM 架构在内的物联网分层架构中,各层都有特定的角色和功能,层次之间是相互独立的且某一层级的改变不影响其他跨越的层次。分层架构易于开发、可测试性高,但不易于部署、整体灵活性差。由于物联网应用的广泛性,许多研究人员尝试为物联网建立更合适的参考架构体系以统一各行各业的物联网应用。

3.1 基于 SOA 的物联网架构

3.1.1 基本架构模型

面向服务的架构(Service-Oriented Architecture, SOA)是将企业应用中的分散功能组织成基于标准的互操作服务;开发人员可快速地组合和重用这些服务,以满足业务需求。SOA 模式的核心是分离技术和服务,以实现服务复用。在 SOA 中,以服务提供者、服务注册和服务请求者 3 个角色划分。

SOA 与物联网的分层结构融合是 SOA 在物联网中应用的表现之一,基于 SOA 的物联网架构划分为三层架构、四层架构或五层架构。三层架构与 DCM 架构相同;四层架构的层次划分分别为感知层、网络层、平台层和应用层;五层架构的组成层次为传感层、访问层、网络层、中间件层和应用程序层。陈杨^[12]设计的基于 SOA 的物联网架构是四层架构,在平台层实现 SOA 思想,抽象出平台层的目的是提供标准数据格式、身份认证、平台的开发运行环境以及综合业务处理服务。物联网平台的层整体架构如图 1 所示。

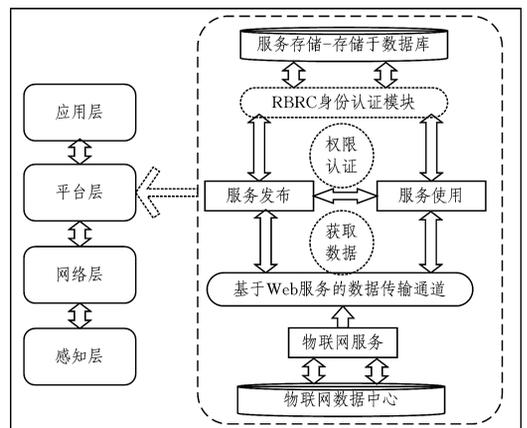


图 1 物联网平台层架构模型

物联网应用中引用了 SOA 思想,目的是把物联网物端的设备功能服务化,对外提供统一和通用的接口实现应用。SOA 架构支持跨平台、服务组合的特性,使物联网异构设备之间、设备与传统 Web 服务之间实现良好的交互。基于 SOA 的物联网架构有以下优点:1)更容易处理跨平台、跨语言的异构环境;2)将系统功能分解为适当力度并且重用的服务,可以

提高软件系统的适应性和效率。

3.1.2 基于 Event-Driven SOA 的物联网架构

Zhang 等^[13]等提出了一种基于事件驱动的面向服务的物联网架构。事件驱动的面向服务架构(Event-Driven SOA)是 SOA 的衍生,是在 SOA 架构中引入了事件驱动机制。事件驱动架构是一种异步分发事件架构模式,通常用于设计高度可扩展的应用。事件驱动架构模式由负责异步接收和处理事件的组件组成,这些组件具有高度解耦和单一目的。Zhang 等提出的整体架构共分为 3 部分:1)分布式资源池;2)基于 DEBS(分布式基于事件的系统)的服务环境;3)事件关系协同单元。基于 DEBS 的服务环境使用分布式事件作为定义服务接口、运行 IOT 服务、在服务之间交换交互信息的主要机制。Zhang 等提出的架构是通过以信息为中心的会话机制来描述分布式事件中的各种服务行为,并在论文中描述了如何构建事件驱动的 SOA 基础设施。

总体来讲,Event-Driven SOA 中两种架构的交互体现在两个方面:1)将事件处理的能力引入到 SOA;2)服务本身也可以产生事件。基于 Event-Driven SOA 的物联网架构的特点描述如下:

1)适用于异步环境,不适用于实时性较高的物联网应用。

2)适用于高要求的自动化系统。基于 Event-Driven SOA 的物联网软件体系结构引入了事件处理能力,每个服务都是由不同的事件驱动,当某个事件发生后,系统的不同服务就能够自发地进行触发。

3)由于事件驱动架构拥有长时间运行的处理能力,因此基于 Event-Driven SOA 的物联网架构在生命周期较长的物联网应用中弥补了基于 SOA 的物联网架构的不足。

4)系统弹性好,Event-Driven SOA 使得增加事件的角色易于实现,这样使得增加物联网软件系统的吞吐量变得简单。

3.1.3 基于微服务的物联网架构

微服务架构是为解决其他架构的不足而衍生出来的架构模式。微服务架构演化的来源主要有两种:1)由使用分层架构模式的单体应用演化而来;2)由使用面向服务架构的分布式应用演化而来。基于 SOA 的物联网架构相对于分层架构来讲有很多优势,提供了抽象级别、异构连接、服务编排的能力,并能够较为简单地调整业务^[14]。但是,SOA 模式在理解和实现上具有一定的难度,而微服务架构通过简化服务的概念来解决较为复杂的问题,比如编排需求、服务组件连接和访问。

Sun 等^[15]提出的基于微服务的物联网架构,主要用于解决系统异构、互操作性、系统扩展性的问题,在支持互操作性和容纳异构对象上有明显的优势。该架构将物联网系统分成定位微服务、安全微服务、多用户微服务、设备微服务、大数据微服务、自动化微服务、人工智能微服务、应用微服务和核心服务。

在 Sun 提出的架构中,所有 IoT 设备和对象都被抽象为系统中的资源插件,在架构中设备可以动态地安装或卸载插件,插件的升级也可以在不影响系统或模块的前提下免费更换,这样的物联网软件体系结构对系统提供了良好的服务,并且系统具有适应性和可扩展性。

3.1.4 架构分析

面向服务架构与物联网的融合是将成熟的架构模式运用

在物联网软件结构体系开发过程中,并做了一定的调整,以解决物联网传统分层结构的平台异构、设备异构、需求传递等问题。基于 Event-Driven SOA 的物联网架构与基于微服务的物联网架构同样也是将成熟的架构模式运用在物联网上,且基于事件驱动的面向服务架构和微服务架构都是为解决 SOA 的不足而衍生出来的架构模式。

SOA 更关注静态信息而不是动态信息,因此在动态业务匹配和不活跃的服务执行方面存在缺陷。在事件驱动架构系统中,事件可以在组件和服务之间传输,事件的生成可以触发一个或多个服务被调用。微服务架构中将服务切分成不同的独立单元,每个单元单独部署,单元之间可以通过有效、简化的传输通道进行通信。同时,由于应用和独立单元之间的高度解耦性,基于 SOA 的物联网架构还有很强的扩展性,使应用易于改变和实现。微服务架构和事件驱动架构都是分布式架构,因此存在一些共同的问题,包括系统的维护和管理、远程的可用性、访问身份认证和授权。

许多物联网平台的开发采用了 SOA 架构,比如 Ayla 平台。Ayla 提供的服务包括设备服务、用户服务、应用服务、数据与分析服务,平台中融合了云计算技术,并把云端作为中枢。

3.2 与云计算结合的物联网架构

物联网与云计算融合是物联网应用以可扩展和高性能的方式将数据流传输到云端,同时云端提供管理应用程序和数据流的手段。物联网和云计算的融合架构的衍生主要用于解决各式各样的物联网应用在程序数据流、服务上的兼容问题。比如在 OpenIoT 平台的实现中,使用 W3C 语义传感器网络(SSN)本体作为一个通用的基于标准的模型来实现各种物联网系统的语义统一,并提供了一个多功能的基础设施,用于从传感器中收集和语义注释数据,利用链接的数据概念来连接相关的传感器数据集^[16]。下文主要介绍两种与云计算融合相关的架构。

3.2.1 虚拟框架

虚拟化概念提出的目的是在屏蔽特性的基础上处理各种各样的请求,并提高传感器和用户的交互。针对解决物理机的硬件资源不能充分利用、资源浪费严重、服务器可扩展性差的问题,虚拟化技术被用来提供可行的解决方案,目的是提高物联网云的资源利用率^[17]。

Alam 等^[18]提出了一个基于 SenaaS 概念的物联网虚拟化框架,用于使用、处理和重用传感器收集的真实信息。该架构主要分为物理接入层、语义覆盖层、服务虚拟层 3 层。物理接入层提供了一个与底层 IoT 云的接口,这一层的主要目标之一是获取真实的信息,并将其带到上层进行进一步处理;该层还可以接收上层传输的操作消息,然后选择合适的适配器将其交付到底层的连接对象和执行器。语义覆盖层通过 IoT 本体、传感器本体、事件本体和服务访问策略,提供底层物联网云的语义模型。服务虚拟化层的目标是公开底层物联网云混合模型的功能和服务形式的信息。这一层的目标是提供基于访问权限的信息,该层执行各种任务:查询虚拟服务的知识库,并将其转换为语义增强的 Web 服务描述;生成可用 Web 服务的格式,以增加可用的传感器服务的可视性;通过服务协调器,利用可用的基本服务描述组合服务;负责通知所有特定

传感器事件的订阅者。

Ali等^[19]提出了基于传感器及服务的虚拟化物联网框架,以充分利用传感器功能的关系。架构通过使用传感器结构,最大限度地利用传感器的可用性和利用率,并使用语义技术增加其安全性。Ali等在基于OpenIOT开放平台的基础上提出的框架共分为4层,即传感器结构层、语义覆盖层、回溯算法BSA层、服务虚拟层。

3.2.2 Ahab 框架

在物联网应用中,除了需要借助云计算来实现按需分配的计算能力的要求之外,系统还需要具备快速和高效的处理能力。Vögler等^[20]提出的Ahab框架改善了底层设备的数据的处理能力。Ahab是一个分布式、基于云的流处理框架,它为运营商提供了一种统一的方式来更好地理解和管理基础设施,以应对连接的物联网设备、运行时边缘基础设施和整个应用程序的执行环境。

Ahab结构主要分两层:底层是流层,由Lambda结构实现,主要是处理数据流;上层是服务层,处理底层的数据,并分析、管理、调整已经注册的组件。

3.2.3 与雾计算结合的框架

雾计算是一个架构,它将计算、通信控制和存储分布到更接近终端用户的设备上。在过去的十年里,移动计算、控制和数据存储都是云计算的发展趋势,但是云计算与物联网架构面临以下几个基本挑战,严格的延时需求、网络带宽限制、物联网资源有限、系统的长时间安全运行。雾计算的优势可以总结如下:

- 1)在终端用户处或附近进行大量的数据存储;
- 2)对终端用户进行大量的计算和控制操作;
- 3)在终端用户上实现通信和联网功能。

雾和云相互补充,根据应用需求,在雾端或者云端实现计算、存储、控制和通信。在Bonomi等^[21]提出的物联网架构和雾计算的融合架构中,雾节点在边缘位置更靠近嵌入式系统和传感器,可以提供位置感知和低延迟;雾节点提供在线分析,并与云交互。

3.2.4 架构分析

物联网和云计算的发展是相辅相成的,云计算的成熟为物联网应用中的数据存储、处理提供了实现方案,物联网的实践和应用促进了云计算的发展。物联网应用的广泛性在一定程度上决定了架构的多样性,在Cloud-IOT中呈现出了许多不同的架构。文中提到的两种架构分别是针对物联网设备的异构性、系统实时性的问题而提出的,架构均在不同的层面上提升了物联网应用的性能。物联网拥有技术融合的理念,在数据处理方面,除了集中式计算,如云计算,也有分散式计算,如雾计算。终端设备的智能化和接入物联网设备的海量化,让雾计算成为了下一个发展热点。许多智能终端设备本身可以负担一定的计算任务,并且计算的边缘化也提升了实时性要求较高的物联网应用的性能。

3.3 社会物联网架构

3.3.1 概念

社会物联网(SIoT)是指在智能物体间建立社会关系,以智能地为物联网应用程序提供服务^[22]。社会物联网的概念类似于人的社交网络,只是对象不再是人,而是智能物体。社

会物联网架构可以分成客户端、服务器端两大部分,具体架构如图2所示。

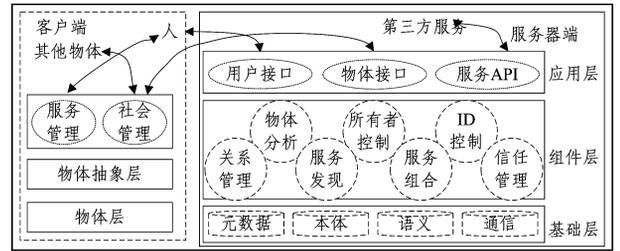


图2 社会物联网架构模型

社会物联网的服务器端主要包括基础层、组件层、应用层3部分。基础层可以实现物理对象的定位,物体间可以通过特定的接口通信;组件层的目的是实现各组件的功能;应用层的目的是实现物联网的各种应用程序或服务接口。

社会物联网的客户端包括物体层、物体抽象层、服务代理层。物体层类似于传统架构的感知层,由物联网设备和传感器组成;物体抽象层的目的是在不同设备间实现通信;服务代理层分为服务管理和社会管理两个部分,服务代理是用户与智能物体交互的接口,社会代理是用于物体间的通信以及物体与社会物联网服务器之间的通信。

3.3.2 架构分析

与其他架构不同,社会物联网架构考虑了物体与物体之间的关系,是物端的提升,也是层次内的提升。前文提到的基于SOA的物联网架构和基于云计算的物联网架构都是在业务服务层面的提升,是层次间的提升。

物联网终端设备的不断智能化,会使认知推理成为物联网发展的一大趋势。认知物联网是指将认知计算技术与互连设备产生的数据和这些设备可以执行的操作结合使用。认知的三大要素是理解、推理和学习。系统具有认知能力是指系统能够获取结构化和非结构化数据的意义,并自动寻求到问题的解决方案,同时也能够实现自我学习。

物联网定义可以概括为4个类别:智能对象、互联网的扩展、全球网络基础设施和信息的交互作用。物联网的初始概念包括了全球网络基础设施、互联网扩展的含义;社会物联网、认知物联网的提出,把智能对象作为物联网性能提高的重大因素,研究物体间的信息交互。

4 总结

本文所做的工作可以分为3部分:1)概述了物联网概念的发展;2)分析了物联网架构的研究现状;3)对物联网的发展趋势做了推测。物联网架构的研究是本文的核心,表4总结了本文提到的各物联网架构的优缺点。

表3 各物联网架构的优缺点分析

	优点	缺点	应用场景
传统物联网架构	易于开发 可测试性高	不易于部署 整体灵活性差	一般性、局域性、 家庭网的应用
基于SOA的 物联网架构	支持跨平台 可组合、重用服务	对于小型系统, 会增加维护成本	大中型系统
与云计算结合的 物联网架构	可扩展性强 语义兼容	依赖可靠网络 连接	大规模行业应用

本文首先概括了传统分层物联网架构;其次依据成熟架构与物联网融合的思路,分析了基于SOA的物联网架构、基

于 Event-Driven SOA 的物联网架构、基于微服务的物联网架构,其中 Event-Driven SOA 与微服务架构都是 SOA 架构的衍生;同时依据技术融合的思路,分析了基于云计算的物联网架构和基于雾计算的物联网架构,云计算和雾计算是相互补充、相互依存的关系;最后分析了社会物联网架构,并推测了认知物联网是物联网的发展趋势。

结束语 物联网架构从最初的分层架构不断改进和创新以解决架构本身的问题,同时也在不断寻求更适用于物联网概念的软件体系结构。成熟软件架构与物联网的融合使物联网软件体系结构更易于扩展、灵活性更强。云计算、雾计算与物联网结构的融合分别提升了物联网系统的集中、分散数据处理性能。社会物联网和认知物联网更加注重智能物体之间的关系,是物联网概念在质上的升华,正如 Daniel Burrus 所说的:“物联网创造的真正价值在于既能够收集数据,又能够利用这些数据。”

尽管物联网架构设计多样,但任何一种相关架构都只能作为一种参考体系^[23]。物联网的广泛性,使得很难出现一种架构可以包括各行各业、解决各种问题^[24-26]。软件架构一直处于发展的状态,能与实际应用场景契合的架构就是最适用的架构。

参 考 文 献

- [1] FLEISCH E. What is the Internet of Things? [J]. Auto-ID Labs White Paper WP-BIZAPP-053,2010,241(6):1-4.
- [2] International Telecommunication Union. Internet Reports 2005: The Internet of things[R]. Geneva:ITU,2005.
- [3] KUMAR P M,GANDHI U D. A novel three-tier Internet of Things architecture with machine learning algorithm for early detection of heart diseases[J]. Computers & Electrical Engineering,2018,65(1):222-235.
- [4] CISCO. The Internet of Everything[EB/OL]. <http://newsroom.cisco.com/ioe>.
- [5] MARISSA M,MEDIN L,JAMONT J P. Semantic Discovery and Invocation of Functionalities for the Web of Things[C]//WET-ICE Conference. Parma,Italy:IEEE,2014:281-286.
- [6] ATZORI L,IERA A,MORABITO G, et al. When social networks meet the Internet of Things: Concept, architecture and network characterization [J]. Computer Networks,2012,56(16):3594-3608.
- [7] CHERNYSHEV M,BAIGZ Z,BELLO O,et al. Internet of Things (IoT): Research, Simulators, and Testbeds[J]. IEEE Internet of Things Journal,2017,PP(99):1-1.
- [8] 杨斌,张卫冬,张利欣,等. 基于 SOA 的物联网应用基础框架[J]. 计算机工程,2010,36(17):95-97.
- [9] WU M,LU T J,LING F Y,et al. Research on the architecture of Internet of Things[C]// International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. Chengdu, China: IEEE,2010:484-487.
- [10] WEYRICH M,EBERT C. Reference Architectures for the Internet of Things[J]. IEEE Software,2015,33(1):112-116.
- [11] ZHANG H,ZHU L. Internet of Things: Key technology, architecture and challenging problems[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. Shanghai,China:IEEE,2011:507-512.
- [12] 陈杨. 基于 SOA 的物联网智慧服务系统的设计与实现[D]. 南京:南京邮电大学,2016.
- [13] ZHANG Y,DUAN L,CHEN J L. Event-Driven SOA for IoT Services[C]//IEEE International Conference on Services Computing. Anchorage, AK, USA:IEEE,2014:629-636.
- [14] FAMILIAR B. IoT and Microservices[M]. New York, USA: Apress,2015:133-163.
- [15] SUN L,LI Y,MEHON R A. An Open IoT Framework Based on Microservices Architecture [J]. China Communications,2017,14(2):154-162.
- [16] SOLDATOS J,KEFALAKI N,HAUSWIRTH M,et al. Open-IoT: Open Source Internet of Things in the Cloud[M]. Switzerland:Springer International Publishing,2015:13-25.
- [17] HOU L,ZHAO S,XIONG X,et al. Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation [J]. IEEE Communications Standards,2016,54(11):32-39.
- [18] ALAM S,CHOWDHURY M M R,NOLL J. SenaaS: An event-driven sensor virtualization approach for Internet of Things cloud[C]//IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications. Suzhou, China: IEEE,2010:1-6.
- [19] ALI Z H,ALI H A,BADAWY M M. A New Proposed the Internet of Things (IoT) Virtualization Framework Based on Sensor-as-a-Service Concept[J]. Wireless Personal Communications,2017,97(1):1419-1443.
- [20] VOGLER M,SCHLEICHER J M,INZINGER C,et al. Ahab: A cloud-based distributed big data analytics framework for the Internet of Things[J]. Software Practice & Experience,2017,47(3):443-454.
- [21] BONOMI F,MILITO R,ZHU J,et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. Helsinki, Finland: ACM,2012:13-16.
- [22] 赵婷婷. 面向社会物联网的信息关联建模技术研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.
- [23] RICHARDS M. Software Architecture Patterns[J]. O'Reilly Media,2015,32(S56):1-53.
- [24] AMATO A,CORONATO A. An IoT-Aware Architecture for Smart Healthcare Coaching Systems[C]// International Conference on Advanced Information NETWORKING and Applications. Taiwan:IEEE,2017:1027-1034.
- [25] QIU T,WU D O,PRATHAP P. Introduction to the special section on Software Architecture and Modeling for Industrial Internet of Things[J]. Computers & Electrical Engineering,2017,58(1):241-243.
- [26] GANCHEV I,JI Z,O'DROMA M. A generic IoT architecture for smart cities[C]//Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies. Limerick City, Ireland: IET,2014:196-199.