

面向“互联网+”的网络技术发展现状与未来趋势

王兴伟^{1,2} 李 婕² 谭振华¹ 马连博¹ 李福亮² 黄 敏³

¹(东北大学软件学院 沈阳 110819)

²(东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110819)

³(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

(wangxw@mail.neu.edu.cn)

The State of the Art and Future Tendency of “Internet+” Oriented Network Technology

Wang Xingwei^{1,2}, Li Jie², Tan Zhenhua¹, Ma Lianbo¹, Li Fuliang², and Huang Min³

¹(College of Software, Northeastern University, Shenyang 110819)

²(College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

³(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract “Internet+” is the sublimation and development of the Internet, which aims at promoting the Internet’s deep integration with economy and society to propel economic and social innovation and development. Under the “Internet+” circumstances, the Internet plays a role not only as a kind of information infrastructure, but also as a more important innovation element for improving production, trade and management of economic and social entities. Under such background, in this paper, the origin of “Internet+” and its meaning are analyzed, and the national actions to push it forward are described. From the aspects of promoting mass information interconnection and access, improving network management and network performance, supporting convenient network access and interaction, adapting to the integration of industrialization and informationization, and production-orientation, the various kinds of new networking paradigms are presented, which are suitable to “Internet+”. We then discuss the significant challenges faced by “Internet+” in the aspects of networking scalability, heterogeneity, performance and security as well as networked applications. In the end, we draw some conclusions.

Key words Internet; Internet+; network paradigm; network economy; networked application

摘 要 “互联网+”是对互联网的升华和发展,旨在促进互联网与经济社会的深度融合,推动经济社会的创新发展.在“互联网+”环境下,互联网不再仅仅发挥信息基础设施的作用,更为重要的是互联网将成为改进经济社会实体管理、生产和经营方式的创新要素.以此为背景,分析了“互联网+”的由来与内涵,描述了推动“互联网+”的国家行动;从方便海量信息互联与访问、改善网络管理与网络性能、支持

收稿日期:2015-12-21;修回日期:2016-02-24

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(61225012,71325002);国家自然科学基金项目(61572123,61502092,61402097);高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域项目(20120042130003);辽宁省百千万人才工程项目(2013921068)

This work was supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (61225012, 71325002), the National Natural Science Foundation of China (61572123,61502092,61402097), the Specialized Research Fund of the Doctoral Program of Higher Education for the Priority Development Areas (20120042130003), and Liaoning BaiQianWan Talents Program (2013921068).

便捷访问与交互、适应“两化”(工业化与信息化)融合、面向生产等角度,阐述了适合“互联网+”发展需要的网络范型;讨论了面向“互联网+”环境,网络在规模、异构、性能、安全、应用等方面需要应对的新的挑战.最后,给出结论.

关键词 互联网;互联网+;网络范型;网络经济;网络应用

中图法分类号 TP391

当前,以物联网(Internet of things, IoT)、云计算、大数据、机器人等为代表的新一代信息技术不断取得突破,创新应用风起云涌,催生新兴产业快速发展.电子商务、互联网金融和社交网络等互联网经济体的形成加速了产业价值链体系的重构.新一代信息技术与经济社会的融合不断深入,推动着各行各业的转型升级,人类的经济生产和社会生活方式正在发生深刻变革.协同、智能、绿色、服务型制造、个性化定制、透明供应链、众创、众包、众需、生产消费者等新理念、新模式、新角色等正在深刻影响着经济社会的核心价值取向,形成新的竞争优势和比较优势.跨界融合渗透已经成为经济社会发展的常态,从而催生新产业、新业态、新技术和新模式.

互联网在经济社会诸多领域的广泛应用,为其与行业的深度融合打下了坚实基础.互联网已经从以往的信息消费类领域逐步走向生产领域,从而进一步激活、释放和放大传统产业和服务业等领域的创新潜力.例如,基于物联网和云计算等的智能制造和能源共享等正在改变工业生产模式,基于互联网和大数据等的大规模协同和价值共享等正在成为经济社会发展的主流.经济社会活动的重点从材料的使用转向数据的使用,互联网正在成为经济社会发展的新引擎,推动经济社会发展从要素驱动向创新驱动的转变.

所谓“互联网+”^[1]就是把互联网的创新成果与经济社会各领域深度融合,推动技术进步、效率提升和组织变革,提升实体经济创新力和生产力,形成更广泛的以互联网为基础设施和创新要素的经济社会发展新形态.“互联网+”客观上要求充分利用互联网平台,基于信息通信技术,深度融合互联网和包括传统行业在内的各行各业,推动移动互联网、云计算、大数据、物联网等与现代制造业等相结合,促进工业互联网、互联网金融和电子商务等的健康发展,创造新的经济社会生态环境.因此,在“互联网+”环境下,需要把互联网作为经济社会发展的一个核心特征,持续强力推动跨行业融合,重塑产业结构,实现互联互通价值的最大化.

中国高度重视互联网的发展,2015年7月颁布了《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》(以下简称《指导意见》),这是充分发挥我国互联网的规模优势和应用优势、推动互联网由消费领域向生产领域拓展、加速提升产业发展水平、增强各行各业创新能力、构筑经济社会发展新优势和新动能的战略举措.《指导意见》指出,国家在“互联网+”创业创新、“互联网+”协同制造、“互联网+”现代农业、“互联网+”智慧能源、“互联网+”普惠金融、“互联网+”益民服务、“互联网+”高效物流、“互联网+”电子商务、“互联网+”便捷交通、“互联网+”绿色生态、“互联网+”人工智能等方面采取重点行动,推进“互联网+”的实施与发展.《指导意见》同时提出了推进“互联网+”的保障措施,即夯实发展基础、强化创新驱动、营造宽松环境、拓展海外合作、加强智力建设、加强引导支持、做好组织实施^[1].2015年12月进一步出台了《工业和信息化部关于贯彻落实〈国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见〉的行动计划(2015—2018年)》^[2],提出到2018年,互联网与制造业融合进一步深化,制造业数字化、网络化、智能化水平显著提高,信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)初步成为支撑智能制造发展的关键基础设施,互联网成为大众创业、万众创新的重要支撑平台,基本建成宽带、融合、泛在、安全的下一代国家信息基础设施,初步形成自主可控的新一代信息技术产业体系.

网络技术是“互联网+”最基本的支撑条件,也是其最基本的创新要素.本文概要总结面向“互联网+”的网络技术及其发展趋势.

1 面向“互联网+”的网络范型

网络是实现“互联网+”的基础设施和创新要素.本节从多个不同角度出发,简要介绍适合“互联网+”发展需要的新型网络范型,即方便海量信息互联与访问的信息中心网络(information-centric networking, ICN)^[3-4]、改善网络管理与网络性能的软件定义网络

(software defined network, SDN)^[5]、支持便捷访问与交互的移动互联网、适应“两化”(工业化与信息化)融合的物联网、面向生产的工业互联网。

1.1 方便海量信息互联与访问的 ICN

“互联网+”的目标是实现互联网与各行各业深度融合。这必然导致网络流量类型的多样化和流量的爆炸式增长,带来网络服务、网络应用和用户访问模式的深刻变化^[6]。在“互联网+”环境下,更加凸显用户通过应用访问网络的目的是获取所关心的内容而非指向内容的地址。作为近年来发展起来的新网络范型,ICN 可以更好地适应“互联网+”环境下海量信息互联以及用户访问与交流信息的需要。

ICN 以内容为中心,按名访问取代了按地址访问,依靠内容名以及相关描述进行内容检索。内容名可以直观反映用户需求,有利于资源开放与获取。这样做不仅可以提高资源的流动性,而且可以提高资源的获取效率。在 ICN 中,只有 2 种类型的分组,即兴趣分组和数据分组^[7]。消费者发出兴趣分组,请求所需的内容;提供者(内容的生产者和网内缓存)根据内容名,使用数据分组提供相应内容。节点依靠内容名进行兴趣分组和数据分组的转发。因此,ICN 是一种消费者驱动型网络^[8]。更重要的是,ICN 不关注内容的来源(从消费角度,ICN 支持内容的多副本缓存,只要有一个副本满足消费者的兴趣即可),也不关注兴趣的出处(从提供角度,ICN 是消费驱动,提供者只需知道消费者感兴趣的内容名)。消费者负责内容消费,提供者按名供给内容,这种资源供给与消费模式满足“互联网+”的发展理念。

对于 ICN 而言,每个内容都有唯一的标识,不论它何时移动以及移动到何地,内容本身都不会因为移动而发生变化(只有内容的生产者才有权更新内容)。在 ICN 中,消费者按名访问而非按地址访问内容,使其天然支持移动性。多副本的存在使其天然支持组播。ICN 支持兴趣分组的多路径转发^[9],一方面,可以显著降低消费者对路径的依赖,提高网络的容错、生存和负载均衡能力;另一方面,一旦从多条路径返回所需的内容,消费者就可以选择其中最满意的路径用于后续兴趣分组的转发,从而提高转发效率、改善响应时间。ICN 的上述特性使其非常适合“互联网+”环境下存在大量移动用户、移动应用和组播应用的情况以及用户及时获取信息的需要。

同当前的互联网相比,ICN 通过为命名内容签名的方式,构建了基本的安全模块^[10]。因此,ICN 明确支持内容安全,内容可以自动加密^[11]。不管经过

哪些网络区域和哪些网络节点,内容都能够得到保护而不受到损害、替换或被第三方窥探。内容可以在网络中的任何地方缓存,只要消费者有需要,内容可以随时随地安全高效地传送。

作为一种新型的基于内容和按名访问的网络体系结构,ICN 根本不同于传统的以主机为中心的网络体系结构。尽管 ICN 可以在一定程度上满足网络发展过程中出现的新的需求,但是也面临着诸多亟待解决的问题。例如,如何推进基于 ICN 的网络部署。现有的基于 IP 的互联网已经运行了几十年,部署范围广,运行稳定^[12]。欲使运营商放弃当前的互联网而重新构建基于 ICN 的网络,除非这样做可以为其带来巨大的商业利益,否则可能性极小甚至基本不可能。从用户角度看,除非基于 ICN 的网络可以提供比当前互联网更加便捷的访问、更加丰富的内容、更加易用的服务等,否则用户不会弃用其早已习惯且其需求得以满足的当前互联网而转用基于 ICN 的网络。网络伸缩性是 ICN 实用化过程中面临的另一个重大挑战。随着网络规模的扩大,以 IP 地址为中心的现有互联网已经面临严重的可伸缩性问题。相比之下,网络中内容的数量会比 IP 地址的数量高几个数量级,如果把按名访问的 ICN 应用于实际的互联网,其面临的伸缩性问题的严重程度可想而知。因此,对于 ICN,如何构建高效的命名管理系统和按名访问路由机制迫在眉睫。随着“互联网+”的展开和深入,各种异构的网络技术和新型的组网模式会不断涌现,如何将其有效地集成进 ICN,从而为“互联网+”提供普适遍在的网络基础设施也是值得研究的重要方向。

1.2 改善网络管理和网络性能的 SDN

“互联网+”的发展会为网络带来更多的用户,经济社会对互联网会更加依赖,相应地,对网络管理和网络性能也提出了更高的要求。SDN 的核心思想在于把网络设备的控制平面和数据平面解耦,转发功能保留在交换机上,控制功能交由掌握网络全局信息的控制器完成,控制器通过提供编程功能来实现策略的动态与个性化部署。因此,自提出以来,SDN 就以其简洁的网络架构和很强的兼容性,不仅受到学术界的关注,而且得到网络设备制造商的支持,成为网络领域研究与开发的重点。由于 SDN 解耦数据平面和控制平面,因此可以克服传统网络路由决策的盲目性,提高控制的针对性和效率,方便网络管理,提高网络利用率。SDN 的这些特点非常适合于

在发展“互联网+”的过程中克服网络管理复杂性和提高网络性能的需要。

SDN 主要由数据平面、控制平面和网络应用组成。数据平面由转发设备组成,负责收集网络状态信息,并发送到控制器,转发设备根据控制器下发的规则进行数据分组转发;控制平面由控制器构成,通过南向接口和北向接口连接数据平面和网络应用,基于从转发设备得到的网络状态信息,对网络中数据流的转发路径做出决策,并下发规则到转发设备中;网络应用通过控制平面提供的编程接口访问和控制转发设备。

传统网络将控制功能分布在路由器上,对网络进行分布式控制,同时,封闭的网络设备内置了过多的复杂协议,网络在部署一个全局业务策略时,网管需要通过设备的命令行接口对设备逐一配置和管理^[13]。随着网络规模的扩大和业务的更新,这样的网管方式不仅提高了网络管理和网络优化的难度,而且极易造成网络状态的不一致。SDN 将控制功能从网络设备中分离出来,集中到控制器,通过统一的标准接口(如 ForCES^[14] 和 Openflow^[15])与交换机进行通信,获取全网视图,不同的应用可以通过控制器,根据网络全局状态,对网络进行集中统一的配置和管控,从而方便网络管理。

网络运营的一个关键目标是充分利用网络基础设施能力,最大限度发挥网络性能。然而,由于网络中存在各种不同的技术和利益相关者,对网络性能进行整体优化比较困难^[16]。目前的方法往往基于局部的网络信息,侧重优化部分网络的性能、网络的部分性能指标或者部分网络服务的用户体验质量等,从而导致网络性能次优而非最优。相比之下,SDN 允许从全局视角对网络进行集中控制,并且可以根据网络中层间交换的信息进行反馈控制,因此 SDN 提供了全局优化网络性能的可能性,而且更容易实施。

当前 SDN 仍处于发展阶段,一些基本问题仍然没有得到很好地解决,其研发、部署和应用还主要局限于园区网络(如企业网与校园网等)和数据中心网络等。SDN 的标准化以及如何推进实际部署尤为迫切。尽管作为南向接口的 Openflow 得到学术界和工业界的广泛支持,但是北向接口尚无统一的标准。在实际部署方面,从传统网络到 SDN 的转变并非易事,需要解决 SDN 设备与传统网络设备的互操作性、SDN 集中式控制的性能瓶颈和安全防护等问题。更为重要的是,面向互联网、特别是“互联网+”环境这样的超大规模网络的 SDN 研究与开发工作

甚少,很多方面还属空白。面对“互联网+”环境下交互密集、流量巨大、特别是众多流量请求突发性到来等情况,SDN 控制器面临巨大压力,很可能成为严重的网络性能瓶颈;基于网络全局状态信息制定的策略的有效性依赖于状态信息的准确性和即时性,然而,大规模和超大规模的网络全局状态信息难以精确测量和准确收集,网络的动态变化可能导致网络策略的失效;经由控制器的决策生成机制可能对用户隐私构成威胁;控制器更易成为被攻点,带来严重的网络安全隐患;针对特定网络应用,网络采用何种部署方式和何种参数设置更为合适。诸如此类的问题,目前尚缺乏有效的解决方案,亟待基础理论和模型分析方法的突破。

1.3 支持便捷访问与交互的移动互联网

随着移动智能终端和宽带无线接入等技术的飞速发展,移动互联网进入高速发展阶段,可以支持用户随时随地对网络的便捷访问、获取服务和信息交流,在行业应用及个人用户市场中发挥巨大作用^[17]。一方面,移动互联网为“互联网+”的实施提供了更加便捷的用户接入模式;另一方面,“互联网+”的应用与普及也对移动互联网的发展提出了新的需求。

作为互联网技术与移动通信技术融合的产物,移动互联网是以移动与无线网络(3G、4G、5G、无线局域网和无线个域网等)作为接入网络的互联网及服务,包括移动终端、移动网络和应用服务 3 个要素^[18]。移动互联网以应用服务为核心,用户可以使用移动终端便捷地访问互联网,应用与终端的可移动性、可感知性、可定位性甚至可穿戴性功能特性相结合可以方便用户个性化地使用服务。

移动互联网自底向上分为 5 层^[19]:1)移动终端层支持用户界面、互联网接入和业务互操作等;2)移动网络层包括各种类型的把移动终端接入无线核心网的设施;3)网络接入网关层提供移动网络中的业务执行环境,识别业务信息、服务质量要求等,并可基于这些信息提供按业务和内容区分的资源控制和计费策略;4)服务接入网关层向第三方应用开放移动网络能力、应用编程接口和业务生成环境,实现对业务接入移动网络的认证与对内容的整合和适配;5)应用层提供各类移动应用,满足用户的多样化和个性化的需要。

移动互联网跨互联网、移动通信、无线网络、嵌入式系统等多个领域,涉及移动终端、接入网络、应用服务和安全隐私等一系列关键技术。

移动互联网的兴起使得人们能够随时随地获取信息和服务,手机作为移动互联网终端技术发展的

典型代表,已经从单纯的通讯设备演变成为一种集计算、感知与通讯等为一体的便携式个人智能终端——智能手机^[20].通过对感知数据的处理、分析和挖掘,智能手机会具备学习、理解和推理等能力,能够基于对用户的认知构建个性化的用户模型^[21].特别是,随着云计算、社交网络和物联网的发展,智能手机会成为打通“人—机—物”三元世界的重要载体,信息可从智能手机无缝平滑地转移到无处不在的云端平台,使其的信息存储和处理能力得到无限扩充,方便地实现跨设备跨平台的信息获取和共享.

无线接入是移动互联网实现用户便捷访问的主要技术.蜂窝网络、无线局域网、无线个域网、无线城域网和卫星网络等都是重要的无线接入方式.特别是,随着4G的普及和5G的出现,无线接入能力将得到极大地提高,移动应用的用户体验质量会得到极大地改善.移动性是移动互联网重要的特征,移动性管理至关重要,包括位置管理和切换控制.国际电信联盟从IP地址分配、用户信息管理、用户环境管理、身份认证、接入控制及认证等方面对移动性管理进行了定义.互联网工程任务组(Internet engineering task force, IETF)对移动性管理给出了比较全面的解决方案,先后发布了MIPv4, MIPv6, PMIPv6和HIP等主流协议^[19].

应用服务是移动互联网取得成功的关键.与此相关的关键技术主要包括用户行为分析、服务聚合、服务质量和体验质量控制、开放服务等.用户行为分析基于移动互联网社交、本地和移动等特征,目的是激发用户在教育中的互动性和参与性,精确聚焦用户需求,为用户提供个性化、差异化的服务^[22],实现服务定位、位置服务和商业推荐服务等应用.服务聚合的本质是通过组合来自不同源的标准化服务组件,形成符合用户情境化和个性化需求的新业务^[23],因此需要安全、友好、标准的应用程序接口和可运营、可管理、统一的服务聚合提供平台.随着移动互联网业务竞争的加剧,服务提供商需要采用合适的服务质量控制机制,提高用户对其业务的满意程度,改善用户对业务的体验质量,提高用户对其的忠诚度,确保用户对其产品或服务的黏性,从而吸引并留住用户,保持并提高其竞争优势.开放服务的目标是服务系统形成持续发展其提供的服务的能力,通过开放服务可有效地拓展其存储和计算等服务能力^[24].

安全和隐私保护涉及移动终端安全、移动与无线网络安全、应用安全、内容安全、位置隐私保护等一系列问题.安全防护技术自身存在的局限性、恶意

软件传播途径的日益多样化和隐蔽化以及窃听、监视和攻击等行为的更加难以监听与管控等,均已成为影响移动互联网进一步深度发展的制约因素,因此亟待发展高效实用的安全防护技术.可信移动平台(trusted mobile platform, TMP)^[25]、开放移动终端平台(open mobile terminal platform, OMTMP)^[26]、移动可信模块(mobile trusted module, MTM)^[27]等都是解决移动互联网安全和隐私保护问题的重要基础.

当前移动互联网还处于发展阶段,仍缺乏统一的技术标准.可穿戴化和高能效化的移动终端、透明且无缝的安全与隐私保护、普适遍在与绿色化的接入网络以及按需在线的服务定制与合成等诸多关键技术,均有待进一步突破.这些都要求学术界和业界提出新的联网范型,发展新的联网单元和组网技术,创新应用模式,从而推动移动互联网走向成熟.

1.4 适应两化融合的物联网

信息化和工业化的深度融合是中国走新型工业化道路的必然,也是实施“互联网+”的重要动因.“两化”融合的目的是将信息技术、自动化技术、管理技术与制造技术等相结合,带动产品设计方法与工具以及企业管理模式的创新,改善企业的经营、管理、产品开发和生产等各个环节,提高生产效率、产品质量和企业的创新能力,降低成本和消耗.物联网是由具有标识、感知和智能处理等能力的物理实体利用无线通信技术,在互联网或通信网络基础上构建的覆盖万物的网络^[28-30].在两化融合背景下,通过物联网,把原来没有联系或联系不紧密的系统有机整合为功能集成、联系紧密的新系统,实现“物物相连”,促进工业化和信息化的全面集成与协同发展.

物联网依托多种信息获取技术,包括传感器、射频识别(radio frequency identification, RFID)、二维码、多媒体采集技术等,其关键技术环节可以归纳为感知、传输、处理,数据处理和融合贯穿于物联网采集、控制、传输和上层应用的全过程.物联网的基本架构如图1所示^[31].感知层主要实现智能感知功能,包括信息采集、捕获和物体识别等,关键技术包括传感器、RFID、自组织网络、短距无线通信、低功耗组网等.网络层主要实现信息的传送和通信,可进一步细分为接入层和核心层.网络层可依托公众电信网和互联网,也可依托行业专用网,还可同时依托公众网和专用网,例如,接入层依托公众网、核心层依托专用网或接入层依托专用网、核心层依托公众网.应用层包括作为应用开发支撑的中间件和面向

用户的应用. 中间件主要提供网络层与物联网应用间的接口和能力调用, 包括对业务的智能分析、整合、共享、处理、管理等, 具体体现为各种类型的业务支撑平台、管理平台、信息处理平台、智能计算平台、

中间件平台等, 为物联网应用提供共性支撑、决策支持和协调控制等. 应用层向用户提供各类物联网应用, 例如工业监控、智能电网、智能家居、环境监测、公共安全、绿色农业等.

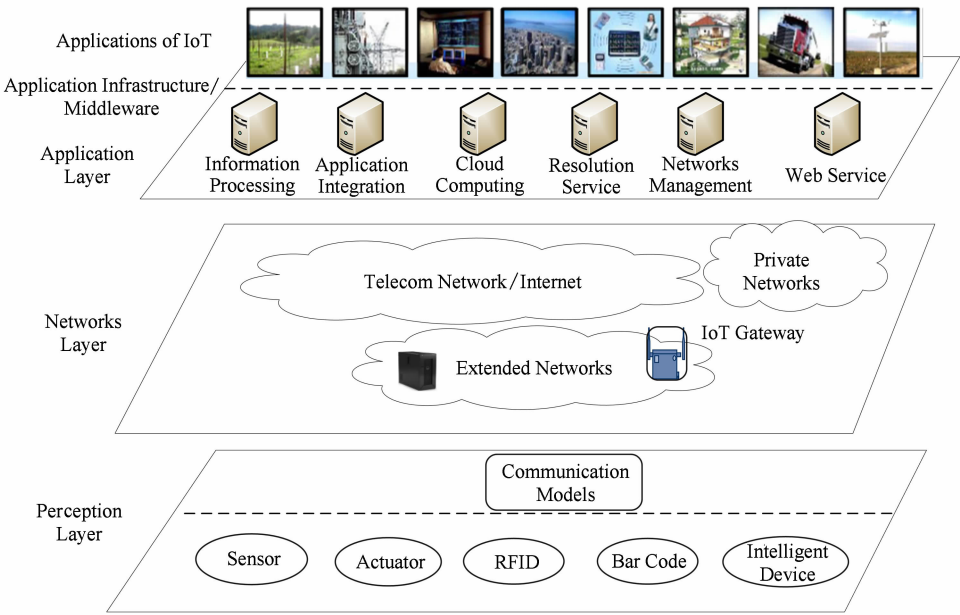


Fig. 1 Network framework of Internet of Things (IoT).

图 1 物联网的网络架构

物联网提供一体化的信息感知、传输与处理能力. 物联网通过同类或异类传感器协同感知被测目标获得丰富的感知数据, 通过局部信息处理和融合获得可靠的高精度感知信息, 在数据传输过程中还可对其进行必要的处理, 例如, 基于网络状态的感知信息聚合与融合、基于链路状态的自适应网络编码和传输优化、数据的加密安全传输以及加急与应急处理等. 此外, 由于物联网应用环境的复杂多样和物体自身状态的变化, 为了保证物联网运行的稳定与高效、特别是感知信息的可靠, 需要及时获取、融合和处理物联网自身的状态信息, 实现有效和高效的网络管理.

物联网应用既包括局部区域的独立应用, 如流程工业的能源控制系统、特定区域的环境监测系统, 也包括广域范围的统一应用, 如全球性的 RFID 物流和供应链系统等. 以冶金工业企业能源管理为例, 采用物联网技术可以实现传统技术手段无法实现的多测点、多变量、全面有效的能耗监测, 对各种能源介质进行集中监控、统一调度和平衡优化, 对无人看守站所设备进行远程操作和控制. 目前中国已有多家大型钢铁企业基于物联网技术建立了能源管理中心^[32-33], 通过无线、有线或混合方式组网, 将所

需的能源数据采集进系统, 通过网络传送到服务器进行处理, 实现了数据的在线采集、实时传输和及时处理, 可供监视、报警、数据分析、管理决策等用.

当前, 物联网在工业领域的发展还处于技术研发与现场应用的交接阶段, 在技术标准、核心器件、信息融合处理及安全防护方面仍存在亟待解决的关键问题, 诸如通信接口和数据模型的标准化、传感器芯片的高端制造、高可靠通信与智能控制、工业海量数据的感知与协同处理等关键技术, 均有待进一步攻克. 物联网中工业数据的高度关联性和用户信息的高度敏感性为物联网的安全及隐私保护提出了严峻的挑战, 然而受制于异构无线网络环境、海量终端传感设备、复杂应用场景等, 目前尚未形成综合全面的物联网安全体系^[34]. 这些问题都要求学术界和业界进行跨领域多学科的联合攻关才能取得突破, 从而推动物联网走向大规模工业应用.

1.5 面向生产的工业互联网

信息技术在推动全球新一轮科技革命的同时, 也正在推动新一轮工业革命. 当前工业生产系统越来越复杂, 集成度越来越高, 网络连接越来越广, 互联网与工业融合已经成为大势所趋. 利用信息技术加强系统间的互联互通和集成, 实现网络化、智能化、融合化

发展,改变传统的生产模式、提高管理水平和生产效率正是“互联网+”的目的所在.德国“工业 4.0”^[35]、美国“工业互联网”^[36]和“中国制造 2025”^[37]都是驱动传统工业转型升级、打造核心竞争力、抢夺未来制高点的国家战略之举.工业互联网正是面向互联网从消费领域走向生产领域的需要应运而生.

1.5.1 工业互联网定义

由美国通用电气公司(general electric company, GE)提出的“工业互联网”的目标是深度融合全球工业系统、先进计算、分析、传感技术和互联网等,结合软件和大数据分析,实现智能机器间互联并最终实现人机互联,以重构全球工业,提高生产效率,让工业生产更快捷、更安全、更清洁、更经济^[20].由于 GE 主要是从工业发展战略和生产方式革命的角度出发提出的工业互联网,我们不妨称之为广义的工业互联网.

本文所说的工业互联网更多地是指满足工业领域需求的互联网,即从消费领域走向生产领域的互联网,我们不妨称之为狭义的工业互联网.我们从工业互联网的网络功能和实现角度给出其描述如下:通过智能设备和工业物联网获取和传输网络状态信息以及工业生产过程的实时信息,依据工业生产过程需求,基于学习、推理和智能优化等技术,通过反馈控制使网络系统对变化的工业环境做出自适应的行为决策,支持工业系统在资源、服务质量和安全等方面的自主配置和自主管理,实现满足工业生产需求的网络性能最优化,支持工业生产系统运行的最优化.

显然,本文所说的工业互联网是物联网、智能分析、大数据和云计算等在工业领域高度融合的产物.面向工业领域需求,本文给出一种如图 2 所示的工业互联网参考架构和如图 3 所示的层次结构.

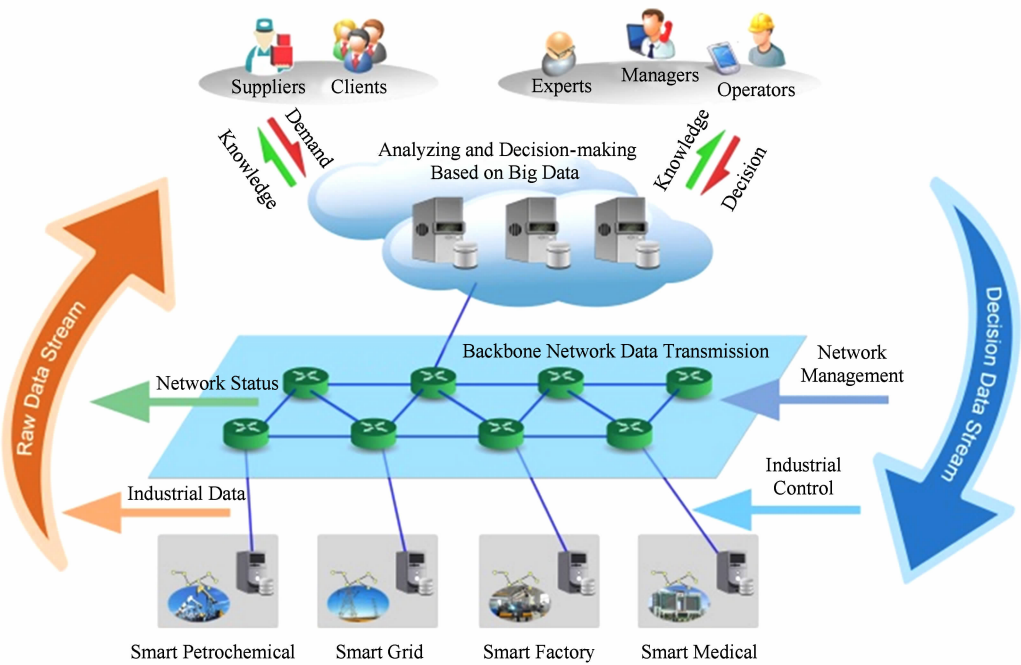


Fig. 2 Industrial Internet reference framework.

图 2 工业互联网参考架构

从图 2 可见,工业互联网通过传输网络实现工业管理网络、控制网络、传感网络与互联网络的融合,从而将工业基础设施、工业信息化系统、大数据分析决策系统和行业工作者等融为一个整体系统.从图 3 可见,一方面,感知层从工业物联网中获取网络状态信息和生产相关信息,提供给上层供分析决策;另一方面,执行来自上层的命令实现对工业生产和网络的管控.网络层从感知层获取网络状态信息,根据用户需求进行路由决策,实现信息流的高效可

靠传输,通过学习和推理机制进行网络性能优化.工业云通过虚拟化技术实现对工业环境中计算资源和存储资源等的动态管理和调配,提供平台、知识和数据等服务,实现生产、管理以及价值链相关业务的动态调度、匹配和组合.决策层依据下层提供的信息和上层用户的需求进行智能决策,实现满足工业生产需求的自动控制.服务层提供供应链管理(supply chain management, SCM)、客户关系管理(customer relationship management, CRM)、产品

数据管理(product data management, PDM)、企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统(manufacturing execution system, MES)、

分布式控制系统(distributed control system, DCS)等业务,支持用户对工业互联网的访问.最上层是用户层,包括设计、管理和操作人员、供应商和客户等.

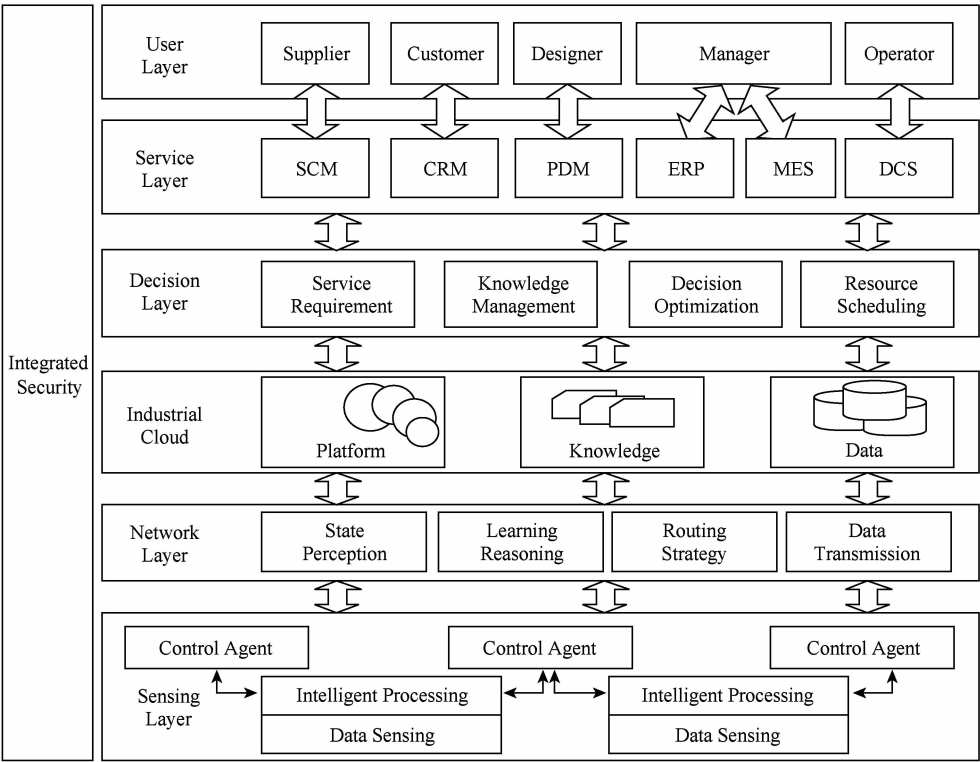


Fig. 3 Hierarchical structure of industrial Internet.
图3 工业互联网层次结构

安全机制贯穿工业互联网的所有层面,采用信息物理一体化安全技术,面向网络整体进行全方位安全风险监测,完成全域实时动态安全态势感知,实现设备、区域、边界、交换等的联动防卫.

1.5.2 工业互联网关键技术

工业互联网涉及很多关键技术,下面简要介绍工业以太网、工业无线网络、工业数据感知、工业主干网传输和数据存储、管理与解析以及安全技术等.

工业以太网将以太网技术应用到工业网络中.它可以提供灵活的响应式系统,并满足工业领域对实时性的需求,从而可用于控制数据和生产数据,支持设备级的互联、协作和集成^[38].由于传统以太网的通信机制无法保证实时性,因此针对其应用于工业领域的不足,工业以太网提供相应的补偿机制^[39].目前工业以太网系统主要有 Modbus-TCP^[40], Ethernet Powerlink^[41], EtherCAT^[42], TCnet^[43], TTEthernet^[44], CC-Link IE Field^[45], PROFINET^[46]和 SERCOS III^[47]等.但是,这些系统随着网络中数据量的持续增大,网络的性能会下降,从而变得难以保证通信的实时性.因此,随着工业互联网连接的智

能设备的日益增多,需要进一步改进现有的工业以太网解决方案,以满足工业互联网环境对实时性、可靠性、可伸缩性和灵活性等的需求.

工业无线网络技术大多是对无线传感器网络技术在工业领域的拓展和演进.目前已经开发出多种适合工业领域的无线网络技术和标准,如 ZigBee^[48], WirelessHART^[49], ISA 100.11a^[50]以及中国拥有自主知识产权的 WIA-PA^[51]等. ZigBee可以满足工业领域对安全性和能耗的需求,但难以满足工业网络可靠性和健壮性的需求. WirelessHART, ISA 100.11a和 WIA-PA可以为工业环境提供实时、可靠、可伸缩、安全和低能耗的通信支持,三者均为工业无线通信国际标准.

工业数据感知是工业互联网应用的基础,涉及的关键技术包括传感器技术和 RFID 技术等.工业互联网中的智能机器需要进行数据采集、通信和协同信息处理,通常装备有传感器和 RFID 标签等,可以监控机器的操作,感知机器温度、压力和震动等状态信息以及工业环境信息,并对感知结果做出反馈,实现智能控制.

保证低延迟、稳定连接和高速传输等是工业互联网应用对主干网传输技术的关键需求,需要实现支持工业企业纵向和横向网络集成的以服务为基础的实时可靠的数据传输。面向工业互联网数据流传输在实时、可靠、低延时和低功耗等方面的需求,需要依据实时获取的网络状态信息,通过学习和推理机制进行路由决策,自适应地执行路由和调度策略,按需高效实时分配网络资源,从而为业务动态建立合适的传输路径,保障全网范围内数据的高性能端到端传输。

数据是工业企业生产与经营的宝贵资产。工业互联网产生的海量工业数据需要进行本地与远程的分布式存储,因而需要基于虚拟化技术构建工业云,依据约定的服务等级协议向应用提供资源。资源分配既要满足业务需求,又要有利于最大化云资源利用率。由于工业环境中海量的数据在类型、结构、语义、组织、粒度和可访问性等方面高度异构,因此需要提供能够反映结构、层次和多样性等的数据表示方法,需要开发支持跨数据集互操作的集成技术。由于原始数据集存在大量冗余,因此需要开发不损毁数据价值的冗余缩减和数据压缩技术,以降低实时产生的工业大数据对存储和传输的压力。由于数据价值与数据新鲜度密切相关,因此需要开发数据生存周期管理技术并且提供相应的管理工具。高效实时地分析和处理工业生产过程产生的海量数据、特别是其中的半结构乃至非结构化数据,以便对生产过程做出及时的反馈和必要的调控,客观上要求工业互联网环境必须具备数据的实时解析能力,因此需要开发高效的分布与集中相结合的数据解析技术,以便在应用可接受的时限内给出正确的反馈和处理。人工智能和机器学习等是工业数据解析的重要技术基础,需要将行业特定的领域知识和专业经验等与数据分析和处理技术相结合,充分利用历史数据、即时数据和经验知识等,正确地解析工业数据,科学地做出预测与决策,从而使工业企业从数据中获取最大收益。

在工业互联网中,智能的人机物互联,企业的生产经营数据以及个人信息都可以被自动收集,导致针对工业互联网各种实体的攻击途径与方法明显增多。同现有互联网相比,工业互联网安全和隐私保护面临的形势更加严峻,出现的网络与安全事件不仅可能导致信息毁坏、声誉败坏和经济损失等恶果,而且可能导致机毁人亡等恶性事故甚至灾难。因此,需要在现有基础上,开发适合工业互联网需要的安全

保护技术,包括安全可信的采集技术、安全可信的数据清洗技术、安全可信的传输技术、安全可信的存储技术、安全可信的访问控制技术、安全可信的处理技术(包括数据加工、更新、删减等)、安全可信的隐私保护技术、安全可信的信任和声誉管理技术、安全可信的入侵检测技术、安全可信的被攻转移与反制技术、安全可信的容侵与灾备技术、安全可信的风险评估与安全等级设定技术、安全可信的人机物的保护与监控技术等。更为重要的是,要立足经济和社会发展的全局,从法律、道德、文化与技术等一体化角度出发,建立起工业互联网的安全防护体系,才能适应互联网从消费走向生产的安全需要。

工业互联网涉及计算机、通信、自动化、电子、机械、管理和经济等诸多学科和领域,目前还处于起步阶段,面临诸多挑战:工业互联网技术与管理的标准化,工业联网单元和组网技术,工业宽带网络基础设施,智能机器与机器智能化,工业数据解析与应用,安全可信高效的信息获取、存储、传输与处理技术,复杂工业流程网络化与智能化管控,高可信系统安全保障技术等。这些都需要跨领域多学科的联合攻关,才能取得突破。中国正处于经济发展换挡提质增效的关键时期,需要抓住工业互联网的发展机遇,赢得后发优势,从而缩小同发达国家的差距,早日进入工业强国的行列。

2 “互联网+”环境下网络面临的重大挑战

2.1 网络的超大规模

在“互联网+”环境下,随着互联网与各行各业深度融合,异构网络和异构终端设备大量接入互联网,新型业务不断出现,网络用户持续增加,网络流量急剧增长,网络数据激增,必然导致网络呈现超大规模,网络运行、控制与管理复杂性急剧提高,网络的可伸缩性面临巨大挑战。

网络的超大规模体现在网络用户和终端设备数量、网络应用领域与范围、网络流量与数据以及网络基础设施的超大规模等诸多方面。

随着“互联网+”的应用与普及,经济社会正在迈向人机物互联与万物互通的时代,用户规模必然迅速扩张,终端设备类型与数量不断增长,网络超大规模成为必然,迫切要求高效灵活的网络运行、控制与管理。互联网不再局限于信息消费领域,与传统的工业、商业、金融等的深度融合,不仅促进传统产业升级改造,而且孕育发展新兴产业,超大规模的应用

领域与范围前所未有,客观上要求互联网提供更加多样化的服务以满足不同的应用需求.经济社会的高度互联网化导致网络流量和网络数据的超大规模,一方面,需要网络提供高性能的传输机制和高效能的数据采集、处理、存储与访问机制;另一方面,需要网络提供灵活易用的可视化的大数据分析与呈现技术,实现从数据到信息、从信息到知识、从原料到资产的转变.

上述变化必然要求超大规模的网络基础设施提供支撑,如何应对由此可能带来的超高成本、超高能耗和超难管理等问题都是“互联网+”环境下网络理论研究与技术开发的重点与难点.基于数据驱动的网络体系结构提供了可能的解决思路.例如,在文献[52]中,基于数据驱动的思想,提出了一种由数据平面、控制平面、信息平面和市场平面构成的新型网络体系架构,以计算复杂性取代状态复杂性,通过数据智能支持用户选择且鼓励创新,通过数据关联分析解决网络中固有的难以优化的问题,提高网络服务质量,实现资源利用最优化.

2.2 网络的超级异构

面向“互联网+”的网络环境必然是各种网络技术混合组网,有线与无线、固定与移动、陆地与空天等高度融合,呈现出超级异构的形态.

对于物理实现技术的异构性,需要提供对异构信号的自适应检测、接收、传输和处理能力,解决由异构的服务质量、功率、速率等导致的适配与转换等问题.对于网络协议的异构性,需要解决异构的网络接口、数据链路层、网络层、传送层甚至应用层间的协议适配与转换等问题.对于网络覆盖和用户业务的异构性,需要提供在不同网络 and 不同业务之间无缝切换的能力,支持终端、会话、业务、应用、情境乃至网络等的平滑移动.

为了实现异构网络间的融合与协同,需要统一的互操作模型或体系结构作为指导,基于虚拟化技术实现异构网络资源的统一优化管控与调配,以保证覆盖范围、传输速率和承载业务等各异的不同网络间的互联互通互容互补,适应“互联网+”环境下既有和新兴的业务和应用的实际需要.

2.3 网络的超高性能

在“互联网+”环境下,很多行业应用会对网络性能提出超高要求.例如,在医疗行业,患者影像数据传输通常对网络的带宽、延迟和可靠性均非常敏感;在流程工业,很多企业现场条件非常恶劣,不仅常常存在高强的电磁干扰和噪声,而且往往处于高温、

高湿、高腐蚀等环境,但是应用通常要求数据必须做到可靠传输,闭环控制等应用还要求数据传输延迟应低于传感器采样时间的1.5倍,达到毫秒级^[53].

为了保证网络提供“互联网+”环境所需的超高性能,不仅需要构建宽带泛在的新一代网络基础设施,而且需要研究与开发更高性能的网络协议和传输机制等,网络能够根据其状态和用户需求选择合适的传输路径,按需在线实时组配适当的传输控制机制.例如,通过采用多路径传输机制,可以支持高可靠容错传输、网络负载均衡、路由迂回和路由容错等;通过采用主动队列管理机制,可以降低分组排队延迟,提高网络吞吐率,支持突发的实时业务的传输.

2.4 网络的超级安全

网络安全问题在“互联网+”环境下将变得更加复杂.由于与专门领域的结合,“互联网+”环境下的网络形态具备典型的多样性,经济社会实体会以组件、服务或者应用等形式映射到互联网中,从而使得经济社会实体的行为转化为网络行为,经济社会实体之间的关系转换为基于网络的交互与联系.因此,在现有安全体系基础上,不同领域的安全与风险控制需要在“互联网+X”的形态下得以体现.例如,对于“互联网+金融”环境下的信贷与融资,需要以组件或服务形式,在互联网已有安全体系基础上实施金融风险与信用等级评估等,从而为金融领域提供专门的安全保障.

从数据角度看,“互联网+”环境下的行业行为痕迹完整性要优于传统行业.采用基于交互关系网络的数据分析方法,可以更准确地分析企业和个体的行为,评估其安全风险等级.在互联网基本拓扑之上,可以构建面向不同领域的“互联网+X”多维拓扑.基于基本拓扑与多维拓扑之间的对应与交互,通过分析用户行为数据,可以更清晰地刻画用户之间的安全关系.因此,需要充分利用“互联网+”环境更加丰富的用户行为信息,结合行业领域知识,研究与开发适合“互联网+”发展需要的新的安全防护机制.

2.5 应用的多样化、个性化与定制化

在“互联网+”环境下,云计算、大数据、物联网、人工智能等作为新的驱动力,正在推动各行各业的创新发展^[54-55].随着互联网与行业的深度融合,新型应用会不断涌现,呈现多样化、个性化和定制化的样态.

“互联网+”应用正在突破传统应用的粗粒度划分、单一使用场景和封闭式开发的模式,开发呈现多粒度、多维化和开源化,从而实现应用的多样化.

传统的通用化的网络应用难以满足不同行业、单位和个人各异的需求,需要以行业垂直、地域垂直、单位垂直和个人垂直等模式,提供个性化的网络应用.结合不同用户的知识背景和使用情景,定制化开发网络应用,从而满足用户对应用的多样化和个性化需求.在“互联网+”环境下,可以基于丰富的用户行为数据,精准分析用户需求,为用户量身制作应用,从而促进应用的多样化、个性化和定制化.

3 结束语

面对新一轮科技与工业革命的需要,“互联网+”旨在通过促进互联网与行业领域的深度融合,推动产业升级和创新.在“互联网+”环境下,互联网不再仅仅发挥信息基础设施的作用,更为重要的是发挥不可或缺的创新要素和倍增器的作用.本文分析了“互联网+”的由来与内涵,介绍了适合“互联网+”需要的网络范型,阐述了“互联网+”发展过程中网络可能面临的巨大挑战.目前“互联网+”还处于发展的起步阶段,互联网与很多行业领域、特别是生产领域的融合还相当初级,现有技术尚不能充分满足“互联网+”对网络超大规模、超级异构、超高性能、超级安全以及应用多样化、个性化、定制化的要求.随着学术界和业界对“互联网+”的持续关注与投入,创新性的“互联网+”环境下的网络解决方案、关键技术和应用模式会不断涌现,从而促进“互联网+”的应用与发展.

参 考 文 献

- [1] RenMinNet. The state council on promoting action guidance for “Internet +”[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://cpc.people.com.cn/n/2015/0705/c64387-27255409.html> (in Chinese)
(人民网. 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://cpc.people.com.cn/n/2015/0705/c64387-27255409.html>)
- [2] Ministry of Industry and Information Technology. The Ministry of Industry and Information Technology to carry out the action plan of “The state council on promoting action guidance for ‘Internet +’”(2015-2018)[EB/OL]. [2015-07-05]. http://www.gov.cn/zhuanti/2016-02/18/content_5042926.htm (in Chinese)
(工业和信息化部. 工业和信息化部贯彻落实《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》的行动计划(2015—2018年)[EB/OL]. [2015-07-05]. http://www.gov.cn/zhuanti/2016-02/18/content_5042926.htm)
- [3] Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36
- [4] Xylomenos G, Ververidis C, Siris V, et al. A survey of information-centric networking research [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 1024-1049
- [5] Kreutz D, Ramos F M V, EstevesVerissimo P, et al. Software-defined networking: A comprehensive survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 10-13
- [6] Ren Jing, Lu Kejie, Wang Sheng, et al. VICN: A versatile deployment framework for information-centric networks [J]. IEEE Network, 2014, 28(3): 26-34
- [7] Wu Chao, Zhang Yaoyue, Zhou Yuezhi, et al. A survey for development of information-centric networking [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(3): 455-471 (in Chinese)
(吴超, 张尧学, 周悦芝, 等. 信息中心网络发展研究综述[J]. 计算机学报, 2015, 38(3): 455-471)
- [8] Claffy K, Polterock J, Afanasyev A, et al. The first named data networking community meeting [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(2): 32-37
- [9] Yi Cheng, Afanasyev A, Wang Lan, et al. Adaptive forwarding in named data networking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(3): 62-67
- [10] Bari M, Chowdhury S, Ahmed R, et al. A survey of naming and routing in information-centric networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12): 44-53
- [11] Jim K. Information-centric networking: The evolution from circuits to packets to content [J]. Computer Networks, 2014, 66: 112-120
- [12] Xia Chunmei, Xu Mingwei. Survey of information-centric networking [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2013, 7(6): 481-493 (in Chinese)
(夏春梅, 徐明伟. 信息中心网络研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2013, 7(6): 481-493)
- [13] Kim H, Feamster N. Improving network management with software defined networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 114-119
- [14] Yang L, Dantu R, Anderson T, et al. Forwarding and control element separation (ForCES) framework [R]. RFC 3746, 2004
- [15] Lara A, Kolasani A, Ramamurthy B. Network innovation using openflow: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 493-512
- [16] Xia Wenfeng, Wen Yonggang, Foh C H, et al. A survey on software-defined networking [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 27-51
- [17] Lin Jintong, Xu Xiaodong. The 5th generation of mobile Internet [J]. Telecommunications Science, 2015, 13(6): 1-9 (in Chinese)
(林金桐, 许晓东. 第五代移动互联网[J]. 电信科学, 2015, 13(6): 1-9)

- [18] China Academy of Telecommunication Research of MIIT. White paper of mobile Internet(2011)[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://data.catr.cn/bps/201203/P020120328368404373427.pdf> (in Chinese)
(工业和信息化部电信研究院. 移动互联网白皮书(2011年)[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://data.catr.cn/bps/201203/P020120328368404373427.pdf>)
- [19] Wu Jiyi, Li Wenjuan, Huang Jianping, et al. A survey of mobile Internet [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2015 (1): 30-36 (in Chinese)
(吴吉义, 李文娟, 黄剑平, 等. 移动互联网研究综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2015 (1): 30-36)
- [20] Chen Longbiao, Li Shijian, Pan Gang. Smartphone: Pervasive sensing and applications [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(2): 423-438 (in Chinese)
(陈龙彪, 李石坚, 潘纲. 智能手机: 普适感知与应用[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 423-438)
- [21] Wu Zhaohui, Pan Gang. SmartShadow: Models and Methods for Pervasive Computing [M]. Berlin: Springer, 2013
- [22] Zhang Yuzhong, Yuan Liyu, Xu Xiong. Application of personalized recommendation in mobile Internet [J]. Telecommunications Science, 2012, 28(3): 27-31 (in Chinese)
(张玉忠, 袁立宇, 徐雄. 个性化推荐在移动互联网业务中的应用[J]. 电信科学, 2012, 28(3): 27-31)
- [23] Zhu Hao. Architecutre and implementation method of based mobile Internet environment mashup [J]. Modern Science and Technology of Telecommunications, 2011, 41(11): 34-38 (in Chinese)
(朱浩. 基于移动互联网环境的网络服务聚合体系架构和实现方法[J]. 现代电信科技, 2011, 41(11): 34-38)
- [24] Ma Lin. Research on open service architecture for mobile Internet and some key technologies [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013 (in Chinese)
(马琳. 面向移动互联网的开放服务技术架构及若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013)
- [25] Aissi S. Trusted Mobile Platform protocol specification document [EB/OL]. [2015-07-05]. http://www.trustedmobile.org/TMP_Protocol_rev1_00.pdf
- [26] GSMA. OMTP advanced trusted environment; OMTP TR1 v1. 1 [EB/OL]. [2015-07-05]. <http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2012/03/omtpadvancedtrustedenvironmentomtptr1v1.1.pdf>
- [27] Ekberg J E, Kylanpaa M. Mobile Trusted Module(MTM)—An Introduction, 2007-015 [R]. Helsinki, Finland; Nokia Research Center Helsinki, 2007
- [28] Zhu Hongbo, Yang Longxiang, Zhu Qi. Survey on the Internet of things [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Nature Science), 2011, 31(1): 1-9 (in Chinese)
(朱洪波, 杨龙祥, 朱琦. 物联网技术进展与应用[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 1-9)
- [29] Welbourne E, Battle L, Cole G, et al. Building the Internet of things using RFID: The RFID ecosystem experience [J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(3): 48-55
- [30] Broll G, Paolucci M, Wagner M, et al. Pervasive service interaction with the Internet of things [J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(6): 74-81
- [31] China Academy of Telecommunication Research of MIIT. White Paper of Internet of Things (2011)[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://data.catr.cn/bps/201203P020120328368405538746.pdf> (in Chinese)
(工业和信息化部电信研究院. 物联网白皮书(2011年)[EB/OL]. [2015-07-05]. <http://data.catr.cn/bps/201203P020120328368405538746.pdf>)
- [32] Wang Zhongfeng, Yu Wenzhao, Zhu Zhen, et al. Application of Internet of things in energy management of metallurgical industry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(S2): 256-258 (in Chinese)
(王忠锋, 于文召, 朱珍, 等. 物联网在冶金工业能源管理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(S2): 256-258)
- [33] Lu Yongming, Qian Wangping, Deng Duohong, et al. Smart production management of iron and steel enterpises using Internet of things [J]. China Metallurgy, 2014(9): 1-5 (in Chinese)
(芦永明, 钱王平, 邓多洪, 等. 利用物联网技术实现钢铁企业智能化生产管理[J]. 中国冶金, 2014(9): 1-5)
- [34] Lin Qiaomin. Research on some key issues of security for privacy preservation in Internet of things [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014 (in Chinese)
(林巧民. 物联网安全及隐私保护中若干关键技术研究[D]. 南京邮电大学, 2014)
- [35] Berger R. Industry 4. 0—The new industrial revolution [EB/OL]. [2015-07-05]. https://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Industry_4_0_20140403.pdf
- [36] Accenture. Industrial Internet insights report for 2015 [EB/OL]. [2015-07-05]. https://www.accenture.com/us-en/_acnmedia/Accenture/next-gen/reassembling-industry/pdf/Accenture-Industrial-Internet-Changing-Competitive-Landscape-Industries.pdf
- [37] The State Council. Notice about print and distribute “Made in China 2025” [EB/OL]. [2015-05-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.html (in Chinese)
(中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. [2015-05-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.html)
- [38] Kay J, Entzminger R, Mazur D C. Industrial ethernet; Overview and application in the forest products industry [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, 21(1): 54-63
- [39] Felser M. Real time ethernet: Standardization and implementations [C] //Proc of IEEE Int Symp on Industrial Electronics (ISIE). Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 3766-3771

- [55] Int Conf on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). Piscataway, NJ: IEEE, 2014; 751-754
- [55] Hu Bo, Ma Yutao, Zhang Liangjie, et al. A key-value based application platform for enterprise big data [C] //Proc of IEEE Int Congress on Big Data (BigData Congress). Piscataway, NJ: IEEE, 2014; 446-453



Wang Xingwei, born in 1968, Professor and PhD supervisor. His research interests include future Internet and cloud computing, etc.



Li Jie, born in 1982. Lecturer. Her research interests include cognitive networks and mobile computing, etc.



Tan Zhenhua, born in 1980. Associate professor. His research interests include trust management for large scale distributed network, cloud storage security, and smart agent security, etc.



Ma Lianbo, born in 1981. Associate professor. His research interests include intelligence computing and machine learning, etc.



Li Fuliang, born in 1986. Lecturer. His research interests include network management and measurement, etc.



Huang Min, born in 1968. Professor and PhD supervisor. Her research interests include modeling and optimization for logistics and supply chain system, etc.