

基于IP技术的工业物联网发展概述

1 工业物联网概述

网络改变着人类的生产和生活方式，网络技术已经在商业、金融业引起了巨大革命，物联网技术将推动工业自动化进入新境界。ISO/IEC JTC1 SWG5物联网工作组对物联网的定义是：物联网是一个将物体、人、系统和信息资源与智能服务相互连接的基础设施，可以利用它来处理物理世界和虚拟世界的信息并作出反应。

物联网能够实现物理的和虚拟的“物”的无缝整合。通过物联网技术“泛在感知”工业全流程、实施优化控制，已经成为企业提高设备可靠性和产品质量、降低人工成本与减少生产消耗、增强核心竞争力的主要手段，是降低自动化成本、提高自动化系统应用范围、实现工业化与信息化深度融合的最佳技术，也是未来几年工业自动化产业新的增长点。

2 工业物联网发展历程及各国发展情况概述

工业物联网作为一种在实时性与确定性、可靠性与环境适应性、互操作性与安全性、移动性与组网灵活性等方面满足工业自动化应用需求的无线通信技术，它为现场仪表、控制设备和操作人员间的信息交互提供了一种低成本的有效手段。

在计算机、通信、网络 and 嵌入式技术发展的推动下，经过几个阶段的发展，工业物联网技术正在逐渐成熟并被广泛应用。

第一阶段，20世纪60~70年代模拟仪表控制系统占主导地位，现场仪表之间使用二线制的4~20mA电流和1~5V电压标准的模拟信号通信，只是初步实现了信息的单向传递，其缺点是布线复杂、抗干扰性差。虽然目前仍有应用，但随着技术的进步，最终将被淘汰。

第二阶段，集散控制系统（Distributed Control System, DCS）于20世纪80~90年代占主导地位，实现分布式控制，各上下机之间通过控制网络互连实现相互之间的信息传递。现场控制站间的通信是数字化的，数据通信标准RS-232、RS-485等被广泛应用，克服了模拟仪表控制系统中模拟信号精度低的缺陷，提高了系统的抗干扰能力。

第三阶段，现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）在21世纪初占主导地位，FCS采用全数字、开放式的双向通信网络将现场各控制器与仪表设备互连，将控制功能彻底下放到现场，进一步提高了系统的可靠性和易用性。同时，随着以太网技术的迅速发展和广泛应用，FCS已从信息层渗透到控制层和设备层，工业以太网已经成为现场总线控制网络的重要成员，逐步向现场层延伸。

第四阶段，随着组网灵活、扩展方便、使用简单的工业无线通信技术的出现，智能终端、泛在计算、移动互连等技术被应用到工业生产的各个环节，实现了对工业生产实施全流程的“泛在感知”和优化控制，为提高设备可靠性与产品质量、降低生产与人工成本、节能降耗、建设资源节约与环境友好型社会、促进产业结构调整与产品优化升级等提供了有效手段。

2009年12月至2012年2月，美国先后拿出《重振美国制造业框架》、《先进制造业伙伴计划》和《先进制造业国家战略计划》三个方案，鼓励制造企业重返美国。同时，美国“智能制造领导联盟”发起倡议致力于制造业的未来，目标是让制造业的利益相关者形成协同研发、实作及推广的团体，可以发展出相关的方法、标准、平台及共享的基础架构，促进智能化制造的推动与广泛采用。通用电气发起工业互联网计划，将两次重大转型变革所带来的发展成果汇集在一起：工业革命所带来的众多机器、设备及制造业大军，与IT革命带来的运算、信息及通讯系统。

德国政府提出“工业4.0”战略，并在2013年4月的汉诺威工业博览会上正式推出，其目的是为了提高德国工业的竞争力，在新一轮工业革命中占领先机。该战略已经得到德国科研机构 and 产业界的广泛认同，弗劳恩霍夫协会将其下6~7个生产领域的研究所引入工业4.0概念，西门子公司已经开始将这一概念引入其工业软件开发和生产控制系统。德国学术界和产业界认为，“工业4.0”概念即是以智能制造为主导的第四次工业革命，或革命性的生产方法。该战略旨在通过充分利用信息通讯技术和网络空间虚拟系统——信息物理系统（Cyber-Physical System）相结合的手段，将制造业向智能化转型。

韩国政府则预见到以物联网为代表的信息技术产业与传统产业融合发展的广阔前景，持续推动融合创新。2014年，韩国贸易工业能源部和韩国未来创造科学部分别提出“智能制造创新3.0计划”和“互联智能工厂计划”。该计划提出利用信息技术与工业技术的高度融合，网络、计算机技术、信息技术、软件与自动化技术的深度交织产生新的价值模型，在制造领域为这种资源、信息、物品和人相互关联的智能制造全互联网系统。

近年来，党中央和国务院提出了大力推进信息化与工业化深度融合，走中国特色新型工业化道路，促进经济发展方式转变和工业转型升级的战略决策。2014年3月，国家主席习近平访问德国，在《法兰克福汇报》发表的署名文章中重点提到德国工业4.0战略。中德合作将会有更多契合点，获得新动力。2014年10月，李克强总理访问德国，宣布了中德两国将开展工业4.0合作。

2011年起,重庆邮电大学与总部设在德国的国际性过程工业自动化用户协会NAMUR在工业物联网领域展开合作,并翻译出版了NAMUR NE133“无线传感网:融合的统一标准用户需求”等文档。双方在工业无线融合标准,工业物联网领域保持了长期的合作关系。2015年,双方达成共识,将利用重庆邮电大学国家级工业物联网国际科技合作基地及NAMUR的平台,合作推动工业物联网及工业4.0的相关标准化工作,进一步推动中德工业物联网的合作和发展。

3 基于IP技术的工业物联网关键技术

3.1 工业物联网体系架构变革

针对物联网的通用体系架构研究成为国际关注的重点,欧盟在FP7中设立了两个关于物联网体系架构的项目,其中SENSEI项目目标是通过互联网将分布在全球的传感器与执行器网络连接起来,IoT-A项目目标是建立物联网体系结构参考模型。韩国电子与通信技术研究所(ETRI)提出了泛在传感器网络(Ubiquitous Sensor Network, USN)体系架构并已形成国际电信联盟(ITU-T)标准,目前正在进一步推动基于Web的物联网架构的国际标准化工作。ISO/IEC JTC1 WG10物联网工作组也正开展物联网架构标准方面的制定。

虽然通常传统控制系统的分层结构较好地满足了工业现场的应用需求,但却无法实现底层现场控制网与互联网的无缝融合,限制了现场层、MES、ERP的一体化信息集成。为此,国内外就建立服务于生产制造的全互联制造网络技术体系,使信息在真实世界和虚拟空间之间智能化流动,实现对生产制造的实时控制、精确管理和科学决策进行了大量的研究与探索。目前,国内外全互联制造网络的研究正在兴起,远未形成完备的技术体系,但相关支撑技术已经具备良好的研究基础。

针对工业需求,面向广域测控,研究突破传统控制系统的分层结构,以边界网关为桥梁,建立全网统一的设备描述架构、即时通信协议、资源管理模式、地址编码方式的总体技术架构,实现以XML组织的设备信息、数据信息、管理信息在基于IP技术的全互联制造网络内的自由流动;同时考虑与传统非IP工业网络的兼容性,设计与支持FDT技术的现场网络、工业无线网络等网络的集成架构,构建全面的底层物联网到互联网无缝融合和集成的技术体系。

3.2 工业无线技术共存发展

工业无线技术可以以较低的投资和使用成本实现对工业全流程的“泛在感知”,获取传统由于成本原因无法在线监测的重要工业过程参数,并以此为基础实施优化控制,来达到提高产品质量和节能降耗的目标。当前,在工业物联网领域已形成三大国际标准,分别是由我国自主研发的WIA-PA标准、由ISA国际自动化协会发布的ISA100.11a标准和由HART基金会发布的WirelessHART标准。

ISA100 (ISA100: Wireless Systems for Automation) 致力于通

过制定一系列标准规范和技术报告来确定工业自动化控制环境下的无线系统实现技术,是国际自动化协会(International Society of Automation, ISA)负责工业无线技术与系列标准制定的下属机构。考虑到其广泛的覆盖范围,ISA100成立了若干工作组分别从事不同的具体任务。其中,制定ISA100.11a标准是其核心工作;ISA100无线符合性测试机构(Wireless Compliance Institute, WCI)负责提供ISA100标准族的符合性认证服务。目前,IEC已于2014年4月投票通过其成为国际标准IEC 62734。

WirelessHART (Wireless HART) 标准是HART通讯协议的扩展,专为工业环境中的过程监视和控制等应用所设计。WirelessHART标准是在2007年6月经HART通讯基金会批准,作为HART 7技术规范的一部分,加进了总的HART通讯协议族中。国际电工委员会于2010年4月批准发布了完全国际化的WirelessHART标准IEC 62591 (Ed. 1.0),是第一个过程自动化领域的无线传感器网络国际标准。

WIA-PA(Wireless Networks for Industrial Automation-Process Automation)是我国拥有自主知识产权的工业无线标准,国家标准和国际标准制定工作同步进行,WIA-PA国际标准的正式发布标志着我国在工业物联网技术领域与世界的同步。WIA-PA已于2011年正式成为IEC 62601国际标准。它的研发成功,为我国推进工业化与信息化相融合提供了一种新的高端技术解决方案,也标志着我国在工业无线通信技术领域的研发已处于世界领先地位。WIA-PA协议与另外两种标准相比,在规模可扩展性、抗干扰性和低能耗运行等关键性能方面具有明显优势,在拓扑结构、自适应跳频、分簇报文聚合等方面具有创新性。

目前工业无线领域形成了ISA100.11a、无线HART、WIA-PA三个标准共存的局面,由此带来了标准之间互通性差、多标准支持设备研发周期长、成本高等问题。为此,以流程工业自动化用户协会NAMUR为首的用户组织经过研究发布了NE133(无线传感器网络:对现有标准的融合需求)报告,希望三种工业无线国际标准能够融合为单一的标准,从而方便全球工业物联网设备和网络的部署。

为了响应用户需求,业界于2010年8月在伦敦的希思罗(Heathrow)机场召开了第一次融合工作组会议,工作组即以Heathrow命名。Heathrow融合工作组通过总体组和技术组两个组开展工作。成员来自西门子、艾默生、横河等单位,中国参与的单位包括重庆邮电大学、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所和中国科学院沈阳自动化研究所等。

3.3 工业网络IP化步伐加快

单一的无线通信技术不能满足所有需求,IP协议的优势使其在自动化网络中的使用成为趋势。虽然目前无线传感网仍以非IP技术为主,但将IP技术,特别是下一代互联网协议IPv6技术延伸应用到感知层已经成为重要的趋势。IP网络连接实现物联网好处显著,全IP的工厂没有混乱的现场总线,基于互联网的工厂



联网将实现物联服务和物联网。

利用IP技术实现工业环境下物物相连，有以下优势：

- 突破传统控制系统的局限，实现自动化新的系统结构；
- 实现灵活的数据访问；
- 实现现场级、OPC、MES和ERP无缝集成；

IPv6技术的实施可以使工业网络上的每台设备都使用TCP(UDP)/IP与其他互联网连接的设备进行通信。6LoWPAN是IPv6的扩展，允许其在低功率无线设备和有限带宽的网络，特别是IEEE 802.15.4标准中使用。互联网工程任务组（ETF）积极推动轻量级IPv6技术在无线传感器网的应用，6LoWPAN、RoLL、CoAP等核心标准已经基本制定完成，其中6LoWPAN协议底层采用IEEE 802.15.4规定的物理层（PHY）和媒质接入控制（MAC）层协议，网络层则根据节点资源受限和低功耗等特点对IPv6协议进行了裁剪和优化。

工业无线标准ISA-100.11a已支持6LoWPAN协议。围绕轻量级IPv6的互操作性测试成为产业界推进重点，IPSO联盟、欧盟PROBE-IT项目分别在全球范围内组织开展了互操作性。ZigBee联盟的智能电力Smart Energy 2.0应用框架已经全面支持IP协议，同时联盟还成立了IP-stack工作组以制定IPv6协议在ZigBee中的应用方法。近日，通过IEC投票的工业以太网规范IEC/PAS 62953 ADS-net成为第一个支持IPv6的工业以太网协议。

在基于IP技术的全互联制造网络中，每个底层设备都有一个IP地址，能够将其自身的数据信息和管理信息以XML格式进行编码，并利用基于TCP/IP的协议进行传输。底层物联网设备之间利用XML进行信息交互，同时通过边界网关的转发，XML格式的数据信息和管理信息还能够自由流动到MES、ERP等系统。这样，MES、ERP等系统利用IPv6技术能够直接寻址到现场设备，并且无需经过控制网络中间层次的处理，就能够获取底层物联网节点的数据信息和管理信息，与现场智能设备之间在逻辑层面上实现了基于XML的直接信息交互，从而达到了底层物联网与互联网、智能设备与后台管理系统之间的无缝融合与集成的目标。工业以太网已经成为现场总线控制网络的重要成员，逐步向现场层延伸。

4 工业物联网的应用

4.1 工业无线方面的应用

目前工业无线美国和欧洲已经部署了一些基于ISA100.11a和WirelessHART的应用。国内，工业无线网络WIA-PA技术是由中科院沈阳自动化所、重庆邮电大学等单位联合研发的，具有自主知识产权的高可靠、超低功耗的工业无线技术，能够针对应用条件和环境的动态变化，保持网络性能的高可靠性和强稳定性。目前，WIA-PA的应用领域包括石油、石化、冶金、环保、污水处理等。

4.2 基于IPv6的工业物联网的应用

为了在底层物联网中实现IPv6技术，重庆邮电大学工业物联网与网络化教育部重点实验室自主研发了基于IPv6的工业物

联网系统，包括面向底层物联网应用的轻量级IPv6协议栈——6LoWSN，目前已通过IPv6 Ready Phase II国际认证（金色认证）。6LoWSN分为硬件抽象层、物理层、MAC层、适配层、网络层、传输层、应用层、网络管理、安全等多个组成单元。其中，硬件抽象层支持STM32、8051等多种微处理器，并支持433MHz、470MHz、780MHz、2.4GHz等多个频段及常用射频芯片；物理层和MAC层支持IEEE 802.15.42006标准和IEEE 802.15.4e标准；适配层支持6LoWPAN标准；网络层支持冗余树型路由协议和RPL全MESH路由协议，并具有移动性支持协议；传输层支持UDP协议；应用层同时支持面向对象的应用协议和COAP协议；网络管理和安全采用精简高效的轻量级传感网管理协议与安全协议。目前基于IPv6的工业物联网系统已在环境监视，流程自动化监控等应用场景进行应用验证。

4.3 工业物联网芯片

重庆邮电大学与台湾达盛联合研制了全球首颗工业无线通信核心芯片——渝芯一号（UZ/CY2420），突破了工业无线领域中精确时间同步、确定性调度、自适应跳信道等核心技术难题，技术水平处于国际前沿，主要技术具有领先性，有效推动了工业无线融合技术的发展与标准制定。建立工业物联网国际科技合作基地有望主导工业无线融合技术的研究与标准制定，引领国内外工业物联网行业的技术发展方向。

5 工业物联网的发展趋势

工业物联网的发展趋势表现在：工业物联网体系架构革命。形成管理、控制、生产一体化系统，突破传统控制系统的分层结构，建立全网统一的设备描述架构。现场设备全面的感知能力，拥有更小的体积，更高效的响应，处理设备将会拥有更快的响应和更加稳定的处理能力。工业网络网络化、IP化步伐加快，针对IPv6互联技术，探索基于IPv6的底层物联网到互联网统一编码技术，研究面向无线现场网络 and 智能设备的分段重组、路由等IPv6关键技术，建立基于IPv6的现场网络、骨干网络、控制网络互联互通体系结构，提出基于IPv6的现场网络与全网络互联安全方案。工业无线技术进一步发展，目前基于WIA-PA、ISA100等面向过程自动化的工业无线技术已经有了解决方案，工厂自动化的工业无线技术WIA-PA等正在推进，工业无线技术的发展将有力支撑和推进工业物联网的发展。

作者简介

魏旻（1982-），贵州贵阳人，韩国建国大学博士，韩国汉阳大学博士后，重庆邮电大学副教授，国家工业物联网国际科技合作基地副主任，ISO/IEC JTC1 WG10物联网工作组-网络层技术研究组(SRG2)召集人，ISO/IEC JTC1 SWG5物联网特别工作组专家，国家传感器网络标准工作组PG3 IPv6标准任务组组长，工业无线网络国际标准IEC 62601 WIA-PA起草人，工业无线融合标准工作组白皮书起草人，长期从事工业物联网项目的研究，负责国家重大专项子课题、重庆市科委基础与前沿项目等项目。