

中国工程院
李伯虎院士
作序

工业互联网技术与实践是全球范围内正在进行的人与机器、机器与机器连接的新一轮技术革命。

工业互联网 技术与实践

魏毅寅 柴旭东◎著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

工业互联网

技术与实践
魏毅寅 柴旭东◎著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

工业互联网：技术与实践 / 魏毅寅，柴旭东著. —北京：电子工业出版社，2017.8
ISBN 978-7-121-31697-5

I. ①工… II. ①魏… ②柴… III. ①互联网络—应用—工业发展—研究
IV. ①F403-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 120602 号

策划编辑：刘声峰

责任编辑：刘声峰 特约编辑：徐学锋

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：720×1 000 1/16 印张：16.75 字数：216 千字

版 次：2017 年 8 月第 1 版

印 次：2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：39852583（QQ）。

推荐序 >

李伯虎

中国工程院 院士

美国 GE 公司在 2012 年最早提出了工业互联网的理念。目前,它已成为许多国家制造业向智能制造转型升级的一种重要的制造模式、手段与业态。针对由制造大国向制造强国发展战略需求,我国也提出了类似的理念,如制造云和工业云等。宏观上讲,这些理念均是基于互联网,将人、产品、制造装备、数据、智能分析系统等智能地连接在一起,构成一个赛博空间与物理空间融合的智能制造系统,从而大大提高制造业的创新能力、制造能力和服务能力,实现工业的再次革命。当进一步深入分析各种工业互联网的模式、手段和业态时,将发现各自提出并实现的系统又具有各自不同的背景与特色。在本书中重点论述的由中国航天科工集团公司研制开发的制造云就是一种基于我国学者提出的智慧云制造的模式、手段和业态构成的智能制造系统。智慧云制造的内涵是基于泛在网络,借助新兴的制造科学技术、信息通信科学技术、智能科学技术及制造应用领域技术等四类技术深度融合的数字化、网络化、智能化技术手段,构成以用户为中心的统一经营的智慧制造资源与能力的服务云(网),使用户通过智慧终端及智慧云制造服务平台便能随时随地按需获取智慧制造资源与能力,对制造全系统、全生命周期活动(产业链)中的人、机、物、环境、信息进行自主智慧地感知、互联、协同、学习、分析、认知、决策、控制与执行,促使制造全系统及全生命周期活动中的

人/组织、经营管理、技术/设备（三要素）及信息流、物流、资金流、知识流、服务流（五流）的集成优化，最终形成互联化、服务化、协同化、个性化（定制化）、柔性化、社会化的智慧制造新模式和“泛在互联、数据驱动、共享服务、跨界融合、自主智慧、万众创新”的新业态，进而高效、优质、节省、绿色、柔性地制造产品和服务用户，提高企业（或集团）的市场竞争能力。

中国航天科工集团公司开发的制造云——“航天云网”，是一种具有中国特色的工业互联网。它围绕提高制造企业市场竞争力的目标，以工业化与信息化融合为主线，基于中国制造业信息化工作，突出了以大国向强国迈进转型升级的需求牵引制造系统的建设，突出了以建立智慧云制造新模式、新手段、新生态为核心，突出了工业 2.0/3.0/4.0 同步发展为途径，突出了发挥“政、产、学、研、金、用”的团队力量，构建了“众智、众包、众扶、众筹”的“万众创新、大众创业”新局面，进而实现了高效、优质、节省、绿色、柔性地制造产品和服务用户，达到了提高企业市场竞争能力的目标。实践表明，“航天云网”是实施我国“中国制造 2025”战略规划和“互联网+”行动计划的一个典型范例。

“航天云网”中的 INDICS 平台是我国自主研发打造的中国首个、世界首批工业互联网平台。它集产业互联网、开放创业和生产性服务业于一体，以云制造为核心业务模式，通过国内外产业要素与优质资源的高效横向整合和共享，支持构建“线上与线下相结合、制造与服务相结合、创新与创业相结合”，适应互联网经济新业态的云端生态；它通过打造面向企业的创新平台，支持构建数字化工厂和智能制造系统。

本书作者基于他们及其团队的探索与实践，较完整地论述了工业互联网的总体技术、基础技术及应用技术，研究了工业互联网、信息物理系统以及智能制造的概念以及三者间的关系，介绍了相关产业、应用生态、行业的成功案例，阐明了工业互联网在推动企业转型、行业变革与生态提升的重要意义。毋庸置疑，本

书对深入揭示工业互联网的技术本质具有重要的意义和参考价值，它将有力地推动“中国制造 2025”战略规划的落地实施，为全球制造业转型升级发展和产业变革的实现做出积极的贡献。

我与本书的作者及他们的团队相熟多年，并一直保持密切合作。魏毅寅教授多年从事复杂大系统工程研制工作，他作为国际宇航科学院院士，拥有深厚的理论基础和独到的观点。柴旭东教授长期从事复杂产品多学科虚拟样机工程、智慧云制造等领域技术研究，有着丰富的行业工作经验。我见证和亲历了中国航天科工集团有限公司在工业互联网领域的开创性实践，并深为他们的严谨治学和只争朝夕的拼搏精神所感动。

我很高兴，也很激动地看到作者就工业互联网最新理论和实践以成书形式与大家分享，我期待并相信本书能够为读者更全面地了解工业互联网以及为促进工业互联网更深入的研究、应用与发展提供重要的参考和全新的体验。

Handwritten signature in black ink, reading '李旭东' (Li Xudong).

2017年3月

序 >

互联网的发展深刻地改变了人类的生活方式，提高了人们沟通交流的效率。我们通过各种连接在互联网上的终端，迅速便捷地沟通着生活、工作、商务、科技的纷繁信息，发送和接收各种与我们日常活动相关联的数据，并从中取得所期望的极大便利。在人类不断追求技术进步和经济增长的进程中，互联网正在全面地覆盖经济金融、社会管理的方方面面。特别是，互联网的应用正在不断地渗透到更为复杂的工业领域，进入到产业运行过程中，成为提高生产效率、产品质量、服务品质，降低成本和改变商业模式的引擎，逐步上升为产业竞争力的重要手段和发展方向。因此，工业互联网（或者产业互联网）应运而生，并正在以其强大的生命力迅速发展。

工业互联网还处于发展的早期阶段，主要的技术基础来源于互联网和正在蓬勃发展的工业物联网。随着通信技术的快速发展和日趋成熟，新型高速网络也在移动通信技术的带动下快速更新，更好地适应着新兴的复杂需求，大量的基础设施将随着通信技术、云计算、大数据的发展而逐步形成；基于物联网的技术基础正在建立过程中，工业物联网是物联网技术发展的主要推动力之一。围绕工业技术进步而产生的专用数据中心、无线通信网络、嵌入式智能装置等制造过程的在线设施将支撑工业过程的实时性需求，构成发展工业物联网的基本条件，为工业互联网的发展构筑基础层面的技术架构，形成围绕制造过程的核心技术体系。

发展工业互联网的必要性是显而易见的。

由于工业互联网的技术必须适应并符合工业产业的发展规律，因此工业企业的技术特点、管理偏好和工业产品（包括服务产品）的应用特性将直接影响到工业互联网的技术特点，甚至工业企业的活动方式（如商业模式）对工业互联网技术亦将产生重大影响。这种影响反映在工业互联网的每个环节，尤其在系统架构上更加突出。工业互联网的架构从各种不同类型的应用视角反映了具体的技术类型和差异，从实践的角度看有必要根据行业和企业的应用特点加以区别选择，从商业模式的角度看这种区别尤为重要。

发展工业互联网是一种全球性的产业竞争，是新一轮产业革命的战略。前不久，美国 GE 公司在中国正式发布了 Predix 工业互联网平台，同时对工业互联网的战略目的做出了全面的阐述。

德国西门子公司正在推出 Mindsphere 工业互联网云平台，以其在工业自动化领域的基础和优势，为制造业企业提供基于制造过程和全生命周期管理的云服务，把数字化工厂和智能制造的理念融入工业互联网，充分体现了德国工业 4.0 的战略内涵。

2015 年 6 月，中国航天科工集团宣布 INDICS 航天云网上线运行，高红卫董事长提出把“信息互通，资源共享，能力协同，开放合作，互利共赢”作为中国工业互联网的发展理念，并致力于创造一个“创新与创业相结合、线上与线下相结合、制造与服务相结合”的新业态形式。航天云网以服务于企业的经营管理活动为主线，致力于对企业的自动化、信息化、智能化改造升级，创造跨企业的互联互通、资源共享条件，为各类企业提供工业云协议中构建柔性的制造排产、物流分配、设计研发、委托验证的智慧制造能力，形成在技术、装备、网络基础、云计算服务等方面的共享环境。航天云网植根于企业内部的制造系统，在现场网络构建、工艺流程优化、数据采集分析、设备状态监控、终端执行控制、人机交

互管理、企业资源管理等环节和层次，提供基于智能制造理念的解决方案和硬件软件支持；在系统架构上，发展了企业专有云内部控制和互联网公共云外部互联的网络结构，通过航天云网的云服务提供 IaaS、PaaS、SaaS 的工业网络云服务；在采取充分可靠的网络安全措施的前提下，构建完整、稳定、可定制服务的工业互联网环境。

2016年2月1日，工业互联网产业联盟在北京举行成立大会。在国家工业与信息部的指导下，工业互联网产业联盟立足于推动《中国制造2025》和“互联网+”行动计划等国家振兴制造业的重大战略的实施，由145家单位联合发起，将在工业互联网架构、应用场景下的技术标准、推广行业/企业应用等方面共同协商，发挥引导和组织、协调作用。中国的工业互联网发展已经进入形成业界共识、促进产业进步、研究应用结合、构建技术体系的重要阶段。中国航天科工集团作为我国工业互联网的先期探索实践者，已经在 INDICS 的研发中积累了技术和应用的宝贵经验，在产业联盟中作为副理事长单位发挥了十分重要的作用，参与了工业互联网体系架构的制定，并承担了系统技术标准的制定工作。先期的研究和实践正在转化成具有系统意义的共性成果。

在此之前，一些学者和业界人士对发展工业互联网的重要性、主要技术特征和趋势、产业应用的主要形式开展过大量研究工作，著有多种著作。这些著作多数以宏观分析和概要介绍为主，对产业作用分析、企业应用场景、商业模式构想、产业生态关系等进行宏观分析，较少对如何构建工业互联网的技术架构、系统实施方案、关键技术解析等进行深入的技术探讨，提供的企业实践案例多数引自国外专家学者的介绍，对于国内企业和科研机构成功案例的评述数量较少，系统性的研究更是难得见到。

然而，工业互联网时代才刚刚开启，无论是在技术还是产业应用方面，都有巨大的发展空间，研究和应用工业互联网的企业或机构可以在现有的网络、计算、

通信、制造信息化等方面发挥创造力，丰富其中的技术内涵和应用模式，为新的互联网时代的工业进步探索更有效率的发展途径。当然，工业互联网不仅仅是简单的对互联网的应用，工业技术与产业在互联网的环境中还可以建立更加具有革命性的体系，借助为发展互联网、移动通信、云计算而建立的全社会的基础设施资源，把工业体系与相关联的渠道和系统联系起来，构建一个可以相互融合、互为作用、相互服务的高效网络，为工业产品制造、应用运行、全生命周期状态等过程提供更加丰富的数据，为全方位的系统优化提供依据，并为在线服务创造技术条件。工业互联网对工业领域自身的革命性影响也必将是深远的，以制造业为例，正在酝酿和发展的基于网络和数据智能制造正在深刻地影响着制造技术和制造过程的组织模式，正在从解放生产力中获得更加高效和低成本的生产能力。

因此，对工业互联网开展持续的深入研究是十分必要的，需要企业界、科研机构和相关领域的有识之士积极参与。为了能够与致力于工业互联网发展的各界人士分享我们在研究和应用中的体会，提供技术交流和模式探讨的渠道，在此我们就工业互联网的发展方向、系统架构、关键技术、典型案例等方面进行整理、研究，并试图编成以技术应用为特色的文件资料。

由于作者的研究实践受应用领域的局限，在研究的水平、广度和深度上还不够，其中的错误和不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

2017年3月

目 录

CONTENTS

第一章 ▶ 概述

- 1.1 工业互联网的发展与影响 //002
- 1.2 工业互联网的内涵与特征 //008
- 1.3 工业互联网发展现状 //012

第二章 ▶ 工业互联网总体技术

- 2.1 工业互联网技术体系 //021
- 2.2 工业互联网体系架构 //022
- 2.3 工业互联网标准体系 //024
- 2.4 工业互联网产业模式 //031

第三章 ▶ 工业互联网基础技术

- 3.1 物联网技术 //041
- 3.2 网络通信技术 //044
- 3.3 云计算技术 //054
- 3.4 工业大数据技术 //063
- 3.5 信息安全技术 //071

第四章 ▶ 工业互联网应用技术

- 4.1 网络化协同制造技术 //081
- 4.2 智能制造技术 //089
- 4.3 云制造技术 //098

第五章 ▶ 工业互联网与 CPS、智能制造的关系

- 5.1 信息物理系统 CPS //115
- 5.2 CPS 是工业互联网的重要使能 //121
- 5.3 智能制造是工业互联网的关键应用 //125

第六章 ▶ 工业互联网应用解决方案

- 6.1 基于云平台的智能云工厂解决方案 //133
- 6.2 面向行业应用的行业云解决方案 //143
- 6.3 面向区域应用的工业云解决方案 //149

第七章 ▶ 国内外主流工业互联网平台分析

- 7.1 国外主流工业互联网平台 //160
- 7.2 国内主流工业互联网平台 //165

第八章 ▶ 航天云网

- 8.1 INDICS 总体架构 //173
- 8.2 核心关键技术 //175
- 8.3 核心产品 //177
- 8.4 产品服务体系 //190
- 8.5 应用情况 //193

第九章 ▶ 工业互联网应用案例

- 9.1 企业应用案例 //199
- 9.2 行业应用案例 //210
- 9.3 工业云应用案例 //223

第十章 ▶ 工业互联网展望

- 10.1 工业互联网技术体系不断完善 //240
- 10.2 工业互联网不断推动产业变革 //242

参考文献 //245

致谢 //251

∞ 第一章 ∞

概述

工业互联网的发展与影响

工业互联网的内涵与特征

工业互联网发展现状

工业互联网技术与实践是全球范围内正在进行的人与机器、机器与机器连接的新一轮技术革命。工业互联网技术在美、德、中三大主要制造业国家依据各自产业技术优势沿着不同的演进路径迅速扩散。工业互联网实践则以全面互（物）联与定制化为共性特点形成制造范式，深刻影响着研发、生产和服务等各个环节。工业互联网的内涵日渐丰富，传感器互联（物联）与综合集成、虚拟化技术、大规模海量数据挖掘预测等信息技术应用呈现出更为多样的工业系统智能化特征。基于工业互联网的商业与管理创新所集聚形成的产业生态将构建新型的生产组织方式，也将改变产品的技术品质和生产效率，进而从根本上颠覆制造业的发展模式和进程。

1.1 工业互联网的发展与影响

1.1.1 工业互联网的诞生

2012 年以来，美国政府将重塑先进制造业核心竞争力上升为国家战略。美国政府、企业及相关组织发布了《先进制造业国家战略计划》、《高端制造业合作伙伴计划》（Advanced Manufacturing Partnership, AMP）等

一系列纲领性政策文件，旨在推动建立本土创新机构网络，借助新型信息技术和自动化技术，促进及增强本国企业研发活动和制造技术方面的创新与升级。在此背景下，深耕美国高端制造业多年的美国通用电气公司（General Electric Company, GE）提出了“工业互联网”的新概念。GE公司将工业互联网视为物联网之上的全球性行业开放式应用，是优化工业设施和机器的运行和维护，提升资产运营绩效、实现降低成本目标的重要资产。^[1]

透过技术看本质，工业互联网不仅连接人、数据、智能资产和设备，而且融合了远程控制和大数据分析等模型算法，同时建立针对传统工业设备制造业提供增值服务的完整体系，有着应用工业大数据改善运营成本、运营回报等清晰的业务逻辑。应用工业互联网的企业，正在开始新一轮的工业革命。^[2, 3]纵观装备制造行业，建立工业知识储备和软件分析能力已经成为核心技术路径，提供分析和预测服务获得新业务市场则是战略转型的新模式。

1.1.2 工业互联网的发展

工业互联网源自 GE 航空发动机预测性维护模式。在美国政府及企业的推动下，GE 为航空、医疗、生物制药、半导体芯片、材料等先进制造领域演绎了提高制造业效率、资产和运营优化的各种典型范例。其中的基础支撑和动力，正是 GE 整合 AT&T、思科、IBM、英特尔等信息龙头企业资源，联手组建了带有鲜明“跨界融合”特色的工业互联网联盟，随后吸引了全球制造、通信、软件等行业 159 家骨干企业加入。这些企业资源覆盖了电信服务、通信设备、工业制造、数据分析和芯片技术领域的产品和服务。

工业互联网联盟利用新一代信息通信技术的通用标准激活传统工业过程，突破了 GE 一家公司的业务局限，内涵拓宽至整个工业领域。