第 3 章　工业互联网架构

本章从“工业互联网”概念的提出出发，阐述了工业互联体系架构、技术体系以及标准体系 3 部分内容，深度剖析了目前美国、德国、日本以及中国发布的工业互联网参考架构的内涵及差异。本章知识图谱如图 3. 1 所示。

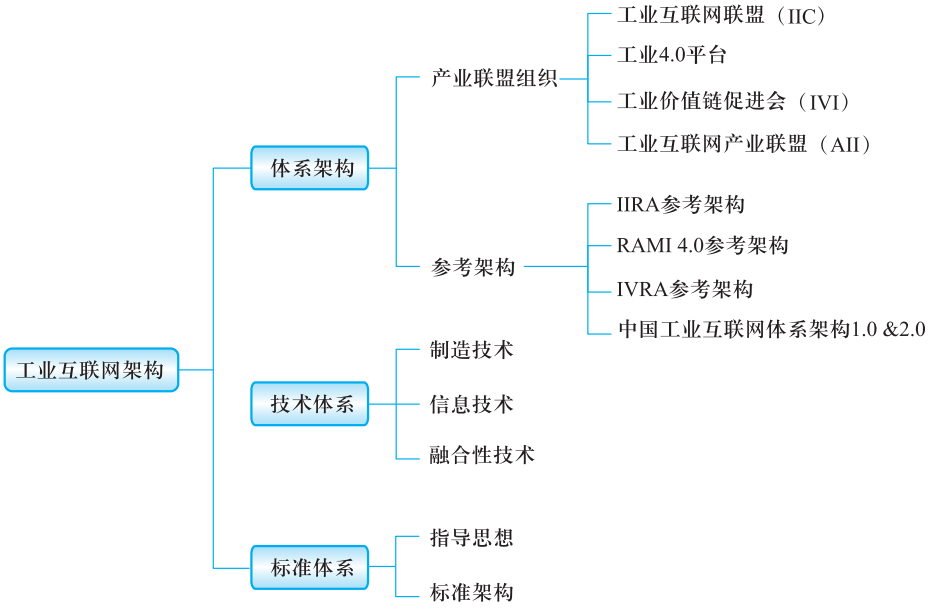


图 3. 1　第 3 章知识图谱

笔 记

2011 年，创立于 1892 年的“百年老店”美国通用电气公司，在美国硅谷成立了软件研发中心，启动平台、应用、数据分析等方面的开发工作。

2012 年，通用电气公司（GE）发布了《工业互联网：突破智慧和机器的界限》白皮书，拉开了工业数字化转型的帷幕。在白皮书中，“工业互联网”的概念首次被提出，书中写道：“我们审视了新一波生产力水平提高的潜在可能性。特别强调将工业革命的成果

及其带来的机器和物理网络，与近期的互联网的成果——智能设备、智能网络和智能决策融合到一起。我们将此融合称作‘工业互联网’。”

任何新生事物的发展都是前进性和曲折性的辩证统一，工业互联网的诞生与发展亦不例外。作为新一代信息技术与工业系统融合的产物，工业互联网产业与技术的关系密切而复杂。

从技术层面来看，工业互联网与通信技术、计算机网络技术、人工智能技术、自动控制技术等各大学科都有关联，每一学科都包含了细分的门类，每一门类既涉及基础又涉及前沿，各学科之间又有交叉。

从产业层面来看，工业互联网包含了宏观经济、产业政策、企业管理、新经济等诸多方面。因此，目前工业互联网的架构和标准等并不统一，而是呈百花齐放、百家争鸣之势。

3.1 工业互联网体系架构

PPT：3-1 工业互联网体系架构

笔记

工业互联网是跨界融合的系统性工程，是与工业生产紧密相关的新型网络基础设施。

与消费互联网不同，工业互联网与生产设备、生产过程直接相关。它既关注新一代信息技术带来的便捷性，也关注传统工业自动化、数字化中“信息孤岛”间的互联互通，更强调满足工业生产的可靠性、安全性要求。

“先发展后治理”的方式不适合工业互联网的规模化发展，因此必须从开始就加强顶层设计，不能放手市场任由其自由发展，这就需要政府和产业联盟共同参与顶层设计。

工业互联网的目标是在建立一张将机器、物料、人、控制系统与信息系统全面联通的网络基础之上，通过对工业数据的全面深度感知、实时动态传输及高级建模分析，形成智能决策与控制，驱动整个制造业的智能化发展。

1. 产业联盟组织

工业互联网的顶层设计，主要由各个国家的产业联盟组织完成，设计内容主要包括工业互联网架构组成、标准制定、运行逻辑、实现路径、发展目标、推进阶段等，并据此指导技术研发、标准研制、试验验证、系统集成和应用推广等工作。

顶层设计源自产业需求和企业的实践，必须能够体现绝大部分企业或产业的特征，能够反映工业互联网未来发展趋势。其设计过程是不同领域的主体、同一领域不同的主体间凝聚共识的过程，亦会随着实践的发展而不断完善。

在这场新一轮工业革命中，中美德日 4 个国家的工业互联网联盟和组织，都扮演着非常重要的角色。以下简要介绍 4 个国家的工业互联网联盟和组织。

（1）工业互联网联盟

工业互联网联盟（Industrial Internet Consortium，IIC），是目前在全球推动工业互联网发展最活跃、最具影响力的产业组织之一。

2014 年，由通用电气公司（GE）、美国电话电报公司（AT&T）、国际商业机器公司（IBM）、思科公司（Cisco）和英特尔公司（Intel）共同发起联盟，由 OMG① 进行管理，联盟标志如图 3.2 所示。

微课 3-1 工业互联网产业联盟

IIC 由最初的 86 个会员迅速扩展到来自 31 个国家和地区的 260 余个会员，其中包含微软、高通、思爱普、博世等一大批世界 500 强企业、全球知名品牌 100 强企业，以及约翰霍普金斯大学、宾夕法尼亚大学等知名高校。我国的中国信息通信研究院、华为、中兴、中国电信、中国移动等企业也都加入了 IIC。华为作为核心贡献企业，还进入了 IIC 的指导委员会。

IIC 成立了市场组、技术组、测试床组、安全组、商业战略与生命周期以及联络函 6 大工作组和若干任务组。通过测试床、应用案例等在全球范围内开展产业合作，对参考架构、关键技术和标准进行验证，孵化新产品，对外输出技术方法和解决方案。

（2）工业 4.0 平台

工业 4.0，又称生产力 4.0，是德国政府提出的一项高科技计划，工业 4.0 平台也是目前世界上较大、较成功的推进制造业企业数字化转型的平台之一。

2013 年，德国联邦教育及研究部和联邦经济及科技部将其纳入《高技术战略 2020》的十大未来项目，投资预计达 2 亿欧元，用以提升德国制造业的计算机化、数字化和智能化。工业 4.0 标志如图 3.3 所示。

笔 记

图 3.2 工业互联网联盟标志

图 3.3 工业 4.0 标志

“工业 4.0”一词，最早是在 2011 年的汉诺威工业博览会提出。2012 年 10 月由罗伯特·博世有限公司的戴斯，以及利奥波第那科学院的孔翰宁组成的工业 4.0 工作小组，向德国联邦政府提出了工业 4.0 的实施建议。

2013 年 4 月，德国机械及制造商协会、德国电气电子行业协会和信息技术协会联合成立工业 4.0 平台；2015 年 3 月，德国经济与能源部、德国教育和研究部接管工业 4.0 平台，使它成为德国政府决策层、商界、学界、工会等沟通的桥梁，平台吸纳包括博世、奥迪、巴斯夫、空中客车、布朗·勃维利（ABB）、GE 等一大批制造业知名厂商。

① OMG，对象管理组织（Object Management Group）是由软硬件厂商和用户组成的联合体。

工业 4.0 平台的核心是各个工作组通过各领域专家的协同、中小企业的支持以及组织开展国际合作，将各种专业知识汇聚在一起。

工业 4.0 共有 6 个工作组：

✓ 第 1 工作组主要是参与架构、标准和规范的制订，主席来自 ABB 集团。

✓ 第 2 工作组则是技术与应用场景，主席来自菲尼克斯。

✓ 第 3 工作组是互联系统的安全性，主席来自博世公司。

✓ 第 4 工作组是法律框架，主席来自蒂森克虏伯。

✓ 第 5 工作组是就业、教育与培训，主席来自德国金属工业协会。

✓ 第 6 工作组是工业 4.0 的数字化商业模型，主席来自埃森哲咨询公司。

（3）工业价值链促进会

工业价值链促进会（Industrial Value Chain Initiative），简称 IVI。“连接”是 IVI 的核心，包括物理世界与数字世界的连接、企业之间的连接以及模型架构之间的连接。

笔记

2015 年 6 月，在日本经济贸易产业和日本机械工程师协会的支持下，由 53 个制造业企业联合发起成立了日本工业价值链促进会 IVI，吸纳了丰田、尼桑、本田、东芝、富士通、索尼、尼康、欧姆龙、马扎克等大型公司，旨在推动“智能工厂”的实现。

IVI 致力于将制造业与信息技术融合，提出在宽松的标准下通过收集、借鉴、提炼不同公司的具体生产场景，形成一套生产范式，以提升企业之间的合作，应对未来制造过程中的各种不确定性。IVI 标志如图 3.4 所示。

IVI 有两大工作组，一个是商业场景工作组，另一个是平台工作组。前者连接不同企业，提炼真实生产案例，并将其转化为参考模型；后者涉及生产计划管理、供应链管理、质量管理、资产与设备管理、预测性维护管理、小企业服务等平台，这些涉及点与全球工业互联网平台关注的重点非常吻合。

（4）工业互联网产业联盟

工业互联网产业联盟（Alliance of Industrial Internet），简称 AII。为加快我国工业互联网发展，推进工业互联网产、学、研、用协同发展，在工业和信息化部的指导下，2016 年 2 月，由工业、信息通信业、互联网等领域百余家单位共同发起成立了中国工业互联网产业联盟，联盟标志如图 3.5 所示。

IVI Industrial Value Chain Initiative
つながる！ものづくり

图 3.4 工业价值链促进会标志

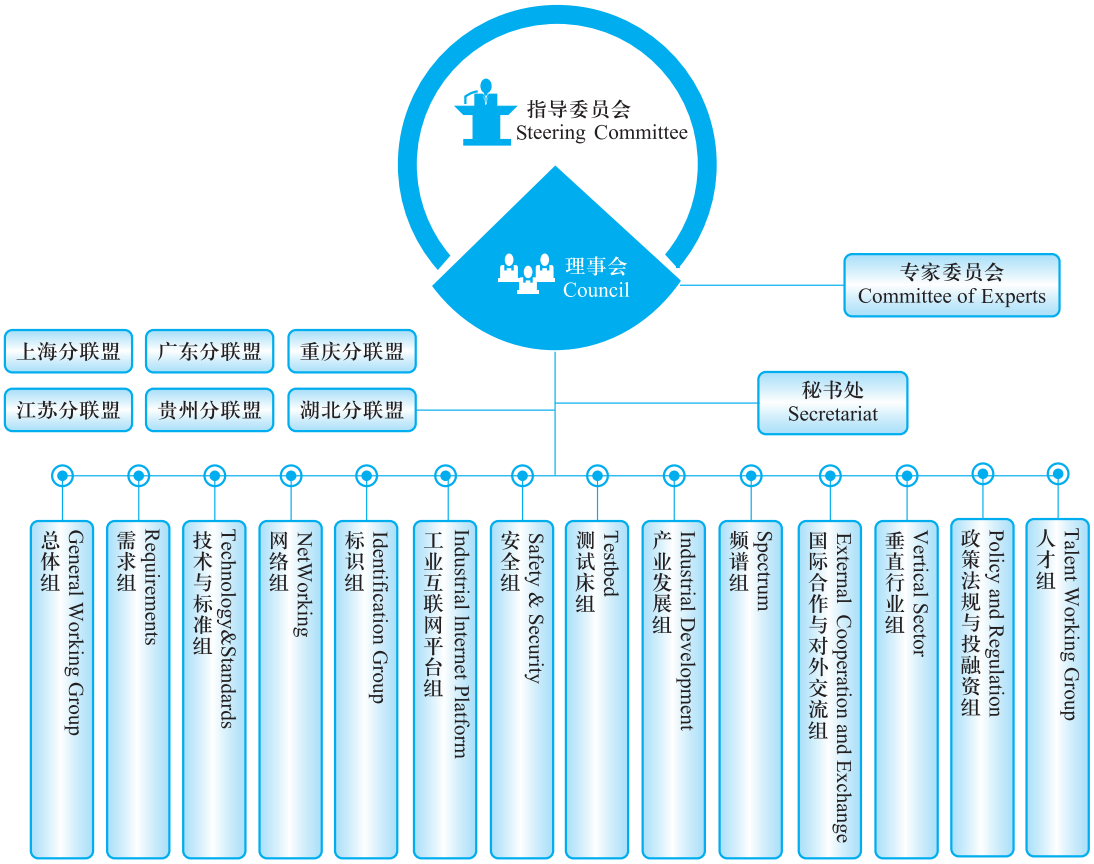
工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

图 3.5 工业互联网产业联盟标志

笔 记

中国信息通信研究院担任“工业互联网产业联盟”理事长；航天科工、中国电信、海尔及华为等 9 家单位为副理事长；三一重工、潍柴动力、中国移动及中国电科集团等 34 家单位任理事；首批成员单位有 143 家，其中包括 56 家工业企业、48 家信息通信企业、7 家信息通信安全公司、6 家协会、15 家高校级科研院所以及 11 家境外企业等。

目前，联盟成员数量超过 1600 家，设立了“14+14+X”组织架构，中国工业互联网产业联盟组织架构，如图 3.6 所示。在工业和信息化部的指导下，依托各工作组和特设组，与联盟成员单位共同努力，先后从工业互联网顶层设计、技术研发、标准制定、测试床、产业实践与国际合作等多方面开展工作，发布了工业互联网白皮书、工业互联网平台、测试床及优秀应用案例等系列成果，广泛参与国内外大型工业互联网相关活动，为政府决策、产业发展提供智力支持，联盟已经成为我国具有国际影响力的工业互联网产业生态载体。



来源：工业互联网产业联盟

图 3.6 工业互联网产业联盟组织架构

微课 3-2
工业互联网
参考架构

2. 参考架构

IIC、工业 4.0 平台、IVI 和 AII 都将工业互联网顶层设计摆在工作的首位，基于各自发展背景、发展目标、发展需求制订、发布工业互联网参考架构，为企业研发和工业互联网提供参照。以下简要介绍各联盟和组织发布的工业互联网参考架构。

（1）IIRA 参考架构

2015 年 6 月，IIC 发布了工业互联网参考架构（Industrial Internet Reference Architecture，IIRA）。该架构从控制、运营、信息、应用和商业 5 个维度，描述了工业互联网的系统功能组成。随后，根据技术产业的推进情况，2017 年 1 月，IIC 发布了新版的参考架构 V1.8 版本。

新版参考架构划分了商业视角、使用视角、功能视角和实现视角 4 个层级。其构建思路是从工业互联网系统要实现的商业目标出发，明确工业互联网系统运行和操作的主要任务，进而确定工业互联网的核心功能、关键系统模块及相互关系。IIRA 架构总体框架，如图 3.7 所示。

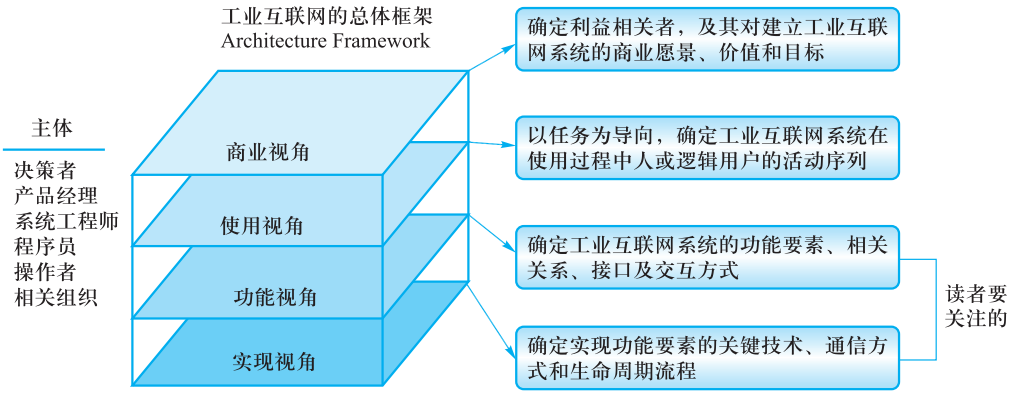


图 3.7 IIRA 总体框架

笔 记

（2）RAMI 4.0 参考模型

2015 年 4 月，德国工业 4.0 平台发布了工业互联网参考模型（RAdiation transfer Model Intercomparison，RAMI 4.0）。RAMI 4.0 总体视图包含 3 个维度，分别是功能维度、价值链维度和工业系统维度。其构建思路是从工业角度出发，结合已有的工业标准，将以“信息物理系统”为核心的智能化功能映射到产品全生命周期价值链和全层级工业系统中，突出以数据驱动的工业智能化愿景。RAMI 4.0 参考模型如图 3.8 所示。

（3）IVRA 参考架构

基于日本制造业的价值链，日本推出了工业价值链参考架构（Industrial Value Chain Reference Archit-ecture，IVRA）。IVRA 基本上与 RAMI 4.0 类似，也是一个三维模式。三

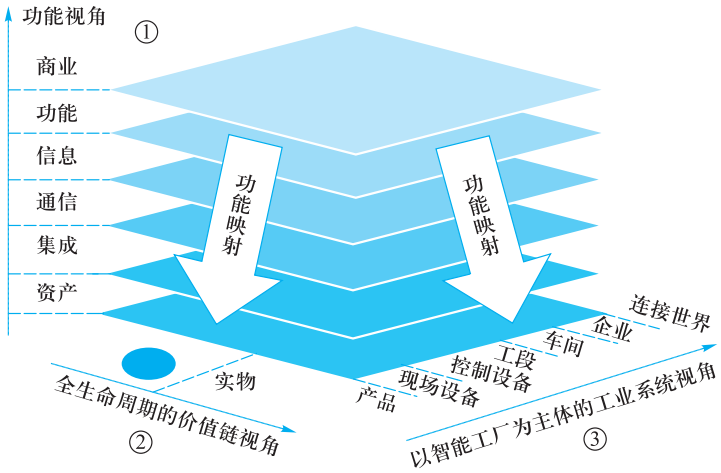


图 3.8 RAMI 4.0 参考模型

笔 记

维模式的每一个块被称为“智能制造单元（Smart Manufacturing Unit，SMU）”，将制造现场作为 1 个单元，通过 3 个轴进行判断。纵向作为“资源轴”，分为员工层、流程层、产品层和设备层；横向作为“执行轴”，分为计划、执行、检查与行动；内向作为“管理轴”，分为质量、成本、交货期与环境。IVRA 架构如图 3.9 所示。

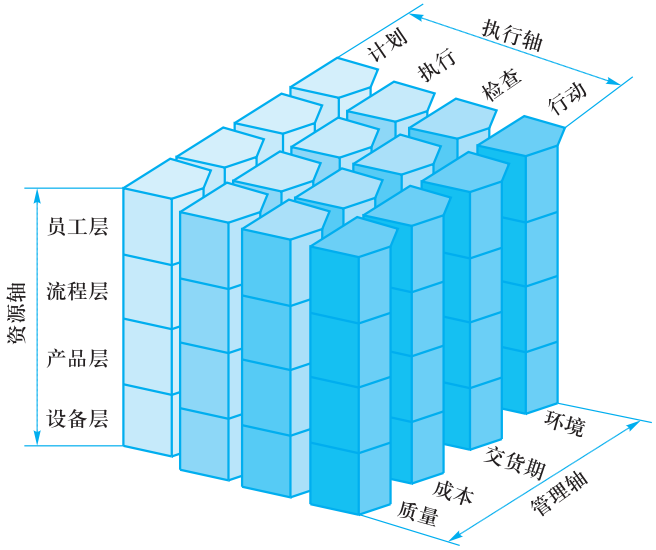


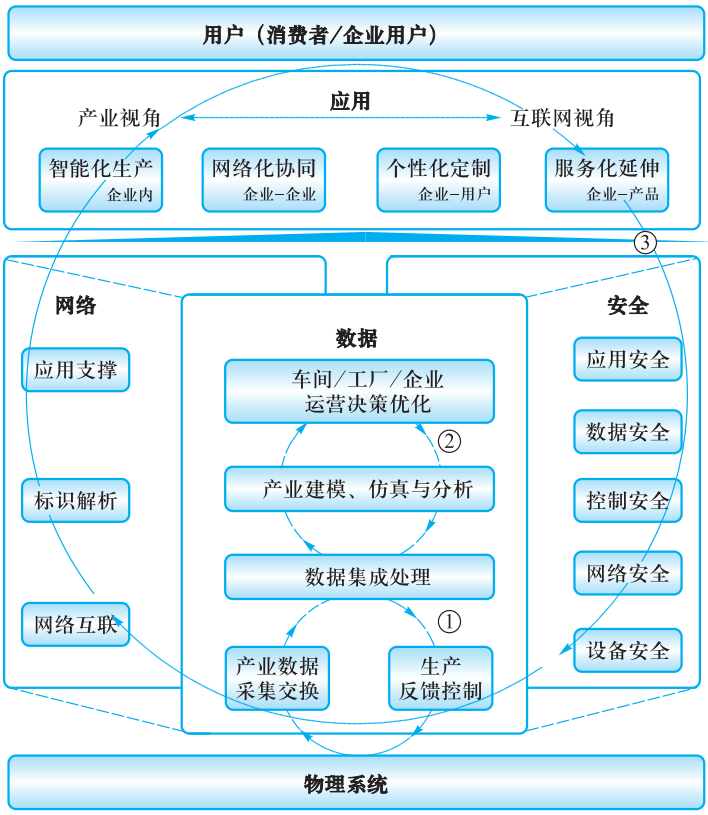
图 3.9 IVRA 参考架构

（4）工业互联网体系架构 1.0&2.0

2016 年 8 月，中国工业互联网产业联盟发布《工业互联网体系框架（版本 1.0）》，把网络、数据和安全作为工业互联网体系架构的三大核心体系，如图 3.10 所示。

架构（版本 1.0）提出工业互联网的核心是基于全面互联而形成数据驱动的智能，网络、数据、安全是工业和互联网两个视角的共性基础和支撑。从工业智能化发展的角度

出发，面向工业互联网构建基于网络、数据与安全的三大优化闭环。



来源：工业互联网产业联盟

图 3.10 工业互联网体系架构 1.0

笔 记

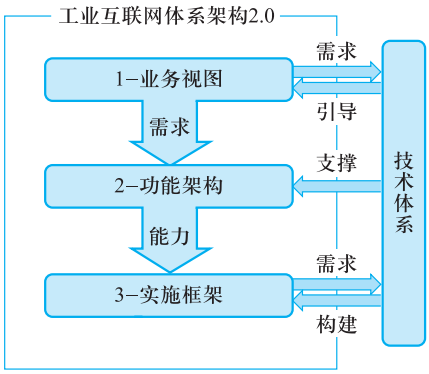
① 面向机器设备运行优化的闭环。

② 面向生产运营优化的闭环。

③ 面向企业协同、用户交互与产品服务优化的闭环。

工业互联网体系架构 1.0 发布 3 年多以来，工业互联网的概念与内涵已获得各界广泛认同，其发展也正由理念与技术验证走向规模化应用推广。在此背景下，2020 年 4 月，在继承版本 1.0 核心理念和功能体系的基础上，工业互联网产业联盟制定了《工业互联网体系架构（版本 2.0）》，通过业务、功能和实施 3 个视图重新定义了工业互联网的体系架构。

工业互联网体系架构（版本 2.0）充分继承了体系架构（版本 1.0）的核心思想。一是体系架构 2.0 仍突出数据作为核心要素；二是体系架构 2.0 仍强调数据智能化闭环的核心驱动及其在生产管理优化与组织模式变革方面的作用；三是体系架构 2.0 继承了 3 大功能体系。工业互联网体系架构（版本 2.0）总体框架如图 3.11 所示。



来源：工业互联网产业联盟

图 3.11 工业互联网体系架构 2.0 总体框架

笔 记

（5）架构对比

上述 4 个工业互联网参考架构与模型，它们的出发点、思考角度和所关注应用领域各有差异。例如，IIRA 侧重 IT 系统在工业中的应用；RAMI 4.0 深度聚焦制造过程和价值链的生命周期；IVRA 注重工业制造过程细节；我国的工业互联网体系架构则相对的更加宏观、通用，更具有产业应用的指导性。各国工业互联网体系架构性能侧重对比如图 3.12 所示。

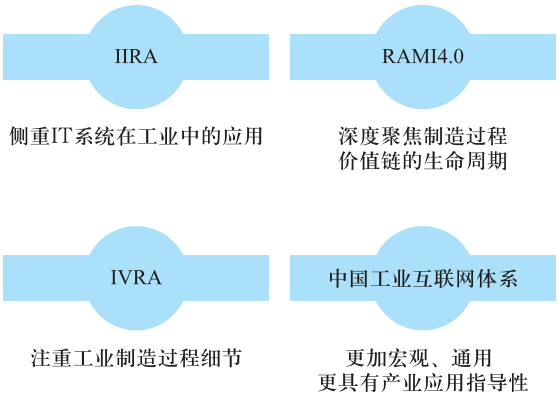


图 3.12 各工业互联网体系架构的差异

尽管各工业互联网参考架构与模型存在一些差异，但它们都围绕着对产业实现全面信息化的核心理念和技术基础。2017 年 12 月，IIC 与工业 4.0 平台共同发布了一份关于 IIRA 与 RAMI 4.0 对比分析的白皮书，指出两种参考架构在概念、方法和模型等方面有不少相互对应和相似之处，而差异之处则互补性很强，相互之间可以取长补短。因此，通过加强国际合作，对国内和国际工业互联网的发展都将大有裨益。

3.2 工业互联网技术体系

PPT：3-2 工业互联网技术体系

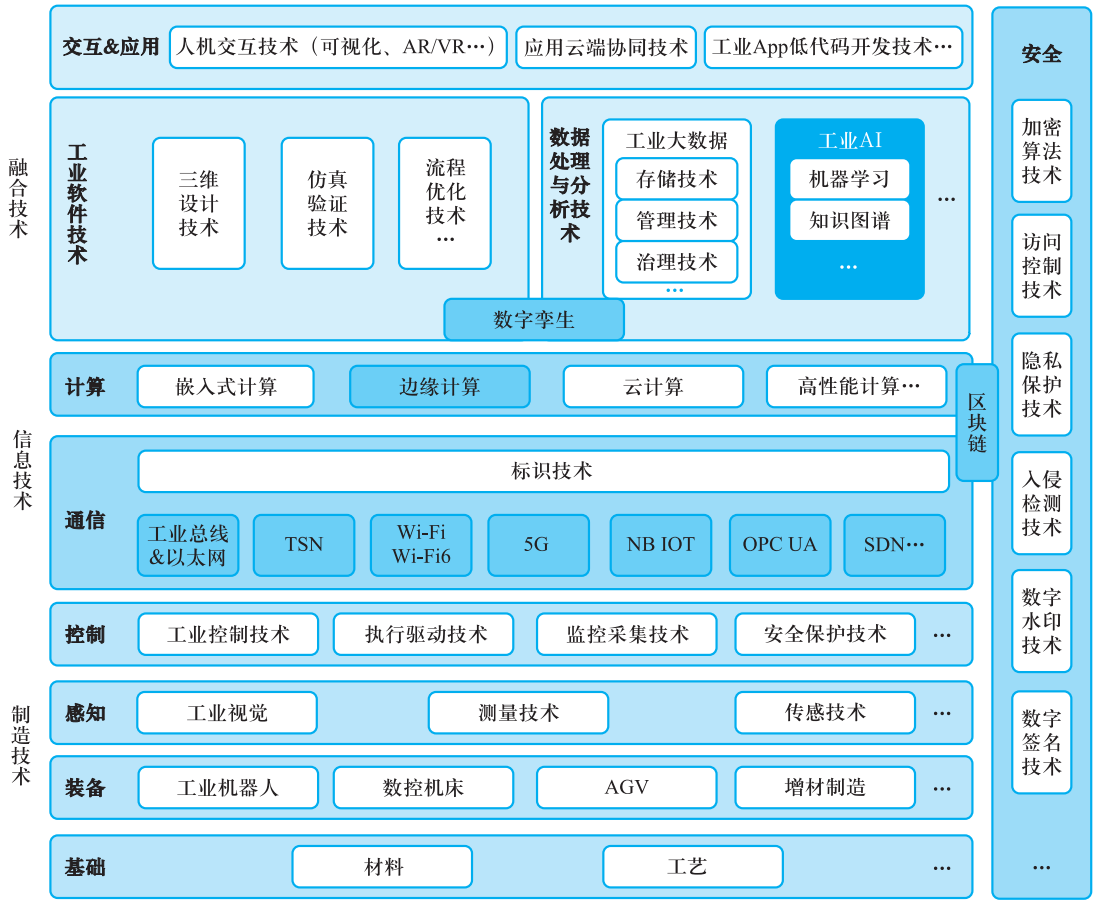
如果说体系架构是工业互联网的“灵魂”，那么技术体系就是工业互联网的“生命”，庞大的技术体系将使工业互联网由梦想变为现实。

工业互联网的核心是通过更大范围、更深层次的连接，实现对工业系统的全面感知，并通过对获取的海量工业数据进行建模分析，形成智能化决策。

工业互联网涉及相关技术复杂，需要将不同领域的独立技术进行融合运用，从而交织形成工业互联网技术体系。

工业互联网技术体系由制造技术、信息技术以及两大技术交织形成的融合性技术组成，工业互联网技术体系如图 3.13 所示。

微课 3-3 工业互联网技术体系



来源：工业互联网产业联盟

图 3.13 工业互联网技术体系

笔记

制造技术和信息技术的不断创新是工业互联网发展的基础。例如，增材制造、现代金属、复合材料等新材料和加工技术的出现将会不断拓展制造能力的边界；云计算、大数据、物联网及人工智能等信息技术，将会快速提升对数据获取、处理和分析的能力。

制造技术和信息技术的融合，将会实现工业互联网的赋能作用，并催生工业软件、工业大数据、工业人工智能等融合技术，使得机器、工艺、系统实时建模和仿真、产品工艺等创新应用成为可能，从而加速工业互联网的创新发展与可持续发展。工业互联网技术体系中 3 种技术之间的相互关系及作用如图 3.14 所示。

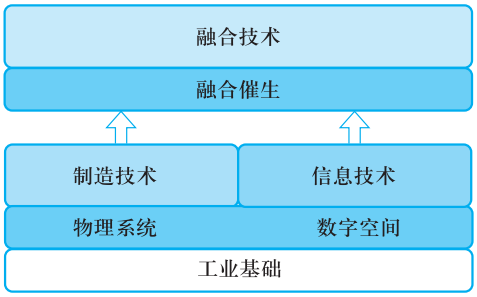


图 3.14 技术间关系及作用

制造技术构建了工业互联网的物理系统。从工业互联网视角来看，制造技术是工业互联网功能的出发点，是工业数字化应用优化闭环的起点和终点。

信息技术勾勒了工业互联网的数字空间。从工业互联网视角来看，信息技术是数据闭环优化的基础支撑体系，是贯通互联网领域与制造领域技术边界的突破者。

融合性技术驱动了工业互联网物理系统与数字空间全面互联与深度协同。从工业互联网视角来看，融合性技术是加速信息技术向工业核心环节渗透的推动者，是重新定义工业知识积累、使用方式的创新者。

3.3 工业互联网标准体系

PPT：3-3 工业互联网标准体系

标准体系是工业互联网的“法则”，工业互联网标准化工作是实现工业互联网的重要技术基础。

随着世界经济一体化的进展，国际标准对各国产业的国际竞争力的影响越来越大，如果某项具有战略性的技术标准被国际性的标准化组织承认或采纳，往往会带来巨大的经济利益，甚至决定一个行业的兴衰，影响国家的经济利益。在工业互联网发展的初期，为了争夺这份“标准”美羹，各国都在投入大量精力开展工业互联网标准制定工作。

微课 3-4
工业互联网
标准体系

（1）指导思想

“标准先行”，是德国工业 4.0 战略的突出特点。德国将标准化工作列为实现工业 4.0 的 8 项行动中的首位，同时在工业 4.0 平台下成立了一个工作组，专门处理标准化和参考架构方面的问题。

2013 年 12 月，德国电子电气和信息技术协会发布了工业 4.0 标准化路线图；2016 年 4 月，在柏林成立了德国工业 4.0 标准化委员会，目标是协调国际标准组织。

我国工业互联网的产业界亦达成共识，一致认可“工业互联网要标准先行”的指导思想，将标准化工作视为实现工业互联网的重要技术基础。

（2）标准架构

为解决现有工业互联网相关标准缺失、滞后及交叉重复等技术问题，工业互联网产业联盟于 2016 年 8 月发布了《工业互联网标准体系框架（版本 1.0）》。

为落实《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》，在全面总结工业互联网标准化需求的基础上，工业互联网产业联盟又于 2019 年 2 月发布了《工业互联网标准体系（版本 2.0）》。该版本修订了工业互联网标准体系框架及重点标准化方向，通过梳理已有工业互联网标准及未来要制定的联盟标准，建立了涵盖基础共性、总体和应用 3 大类标准的，统一、综合和开放的工业互联网标准体系。工业互联网标准体系 2.0 框架如图 3.15 所示。

以下简要介绍工业互联网标准体系（版本 2.0）中的总体标准、基础共性和应用标准。

笔记

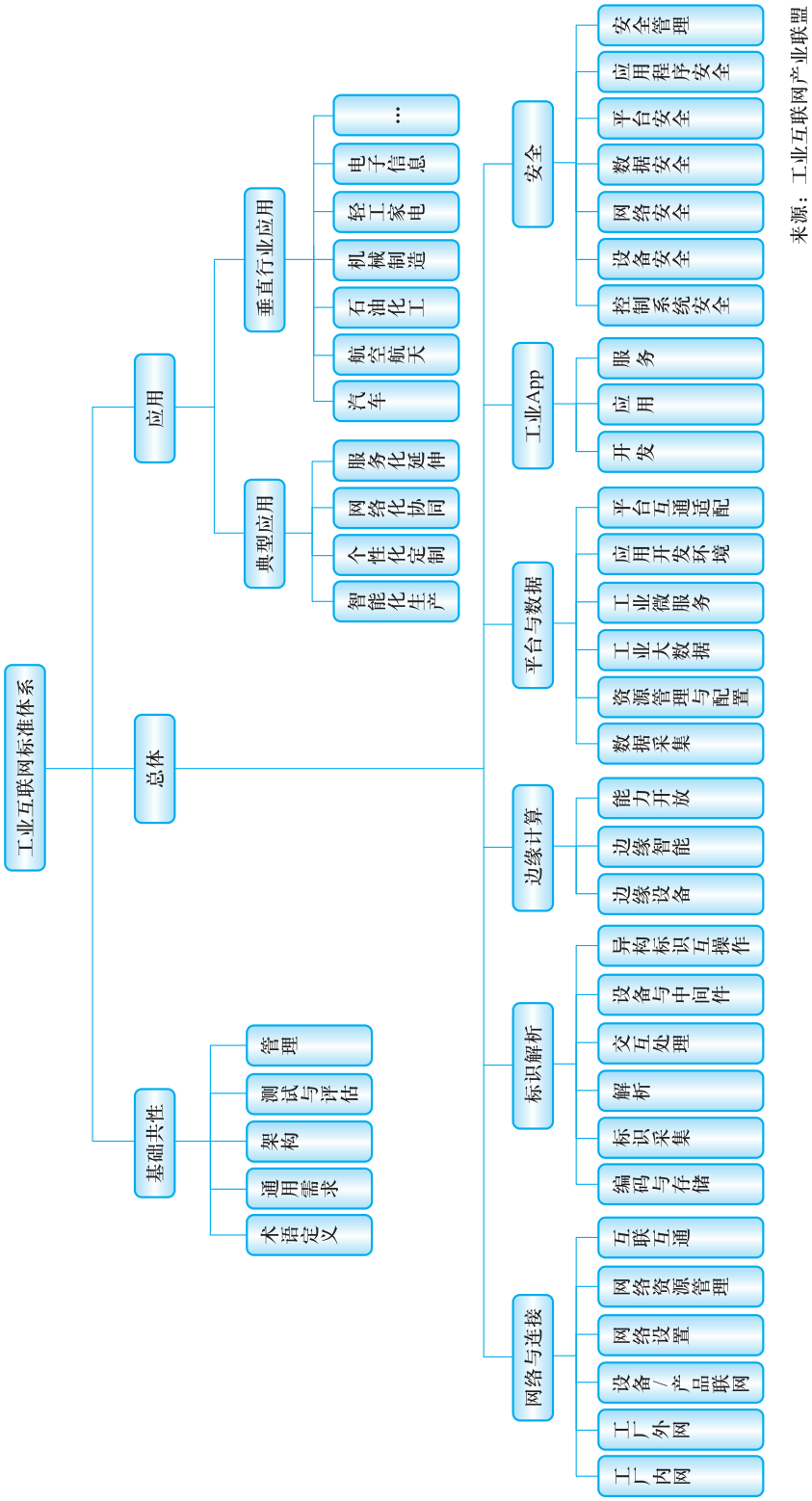
① 总体标准：主要规范工业互联网重点领域的标准，包括网络与连接标准、标识解析标准、边缘计算标准、平台与数据标准、工业 App 标准和安全标准。

② 基础共性标准：主要规范工业互联网的通用性、指导性标准，包括术语定义、通用需求、架构、测试与评估、管理等标准。

③ 应用标准：主要包括典型应用场景和垂直行业应用等。

典型应用场景包括智能化生产、个性化定制、网络化协同及服务化延伸。其中智能化生产主要面向工业企业的生产制造环节等场景；个性化定制主要面向个性化、差异化的客户需求等场景；网络化协同主要面向协同设计、协同制造、供应链协同等场景；服务化延伸主要面向产品远程运维、基于大数据的增值服务等场景。典型应用场景内容如图 3.16 所示。

垂直行业应用，包括依据基础共性标准、总体标准和典型应用标准，面向汽车、航空航天、石油化工、机械制造、轻工家电、电子信息等重点行业领域的工业互联网应用，开发行业应用导则、特定技术标准和管理规范。



来源：工业互联网产业联盟

图 3.15 工业互联网标准体系2.0框架

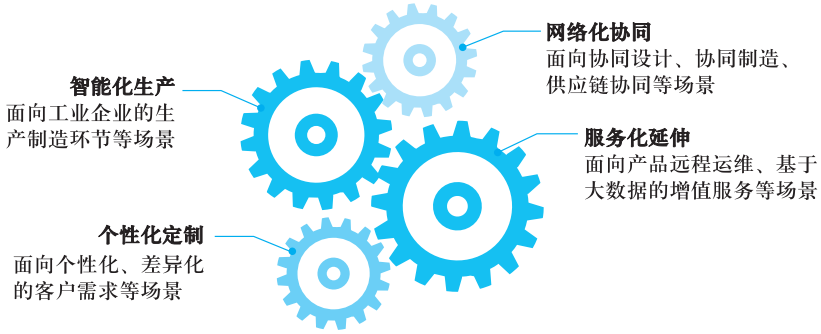


图 3.16 典型应用标准区别

本章小结

笔记

工业互联网的目标是，在建立一个将机器、物料、人、控制系统与信息系统全面连通的网络基础之上，通过对工业数据的全面深度感知、实时动态传输及高级建模分析，形成智能决策与控制，驱动整个制造业的智能化发展。

工业互联网与消费互联网不同，工业互联网与生产设备、生产过程直接相关。它既关注新一代信息技术带来的便捷性，又关注传统工业自动化、数字化中“信息孤岛”间的互联互通，更强调满足工业生产的可靠性、安全性要求。

工业互联网是跨界融合的系统性工程，是与工业生产紧密相关的新型网络基础设施。因此，“先发展后治理”的方式不适合工业互联网的规模化发展，必须要政府和产业联盟共同参与顶层设计。

尽管各国的工业互联网参考架构与模型存在一些差异，但它们都围绕着对产业实现全面信息化的核心理念。

此外，随着世界经济一体化的进展，国际标准对各国产业的国际竞争的影响越来越大，工业互联网标准化工作的推进进程，甚至会决定一个行业的兴衰，影响国家的经济利益。

所以，只有深入了解行业企业需求，不断优化顶层设计，加快标准制定进程，以及加强国际合作，才能实现我国的工业互联网的创新发展和可持续发展。

习题

文本：参考答案

一、选择题

1. “工业互联网”的概念是由（　　）首次提出的。

A. 英特尔公司　　B. 通用电气公司　　C. 微软公司　　D. 华为公司

2. 工业互联网既关注新一代信息技术带来的便捷性，也关注传统工业自动化、数字

化中“(　　)”间的互联互通，更强调满足工业生产的可靠性、安全性要求。

A. 信息孤岛　　B. 信息平台　　C. 操作系统　　D. 操作软件

3. 工业互联网联盟简称(　　)，是目前在全球推动工业互联网发展最活跃、最具影响力的产业组织之一。

A. IIC　　B. IVI　　C. AII　　D. IIRA

4. 工业 4.0 平台，是(　　)推进制造业企业数字化转型的平台。

A. 美国　　B. 德国　　C. 中国　　D. 日本

5. 工业互联网产业联盟，简称 AII，是(　　)推动工业互联网产业生态建设的重要载体。

A. 美国　　B. 德国　　C. 中国　　D. 日本

6. 2020 年 4 月，在继承版本 1.0 核心理念和功能体系的基础上，工业互联网产业联盟制定了(　　)。

A. IIRA　　B. RAMI4.0

C. IVRA　　D. 工业互联网体系架构(版本 2.0)

7. 工业互联网体系架构(版本 2.0)，通过(　　)、功能、实施 3 个视角重新定义了工业互联网的体系架构。

A. 业务　　B. 需求　　C. 分析　　D. 能力

8. 制造技术构建了工业互联网的(　　)系统。

A. 空间　　B. 物理　　C. 时空　　D. 信息

9. 信息技术勾勒了工业互联网的(　　)空间。

A. 空间　　B. 物理　　C. 时空　　D. 数字

10. 融合性技术驱动了工业互联网物理系统与数字空间全面(　　)与深度协同。

A. 隔离　　B. 合并　　C. 支撑　　D. 互联

二、判断题

1. 作为新一代信息技术与工业系统融合的产物，工业互联网产业与技术交织复杂。(　　)

2. 从产业层面来看，工业互联网包含了宏观经济、产业政策、企业管理、新经济等诸多方面。(　　)

3. 从技术层面来看，工业互联网与通信技术、计算机网络技术、人工智能技术及自动控制技术等各大学科都有关联。(　　)

4. 工业互联网是跨界融合的系统性工程，是与工业生产紧密相关的新型网络基础设施。(　　)

5. 与消费互联网相同，工业互联网与生产设备、生产过程无相关。(　　)

6. 标准是工业互联网的“法则”，工业互联网标准化工作是实现工业互联网的重要技术基础。(　　)

7. 我国工业互联网产业各界亦达成共识，一致认可“工业互联网要标准先行”的指

导思想，将标准化工作视为实现工业互联网的重要技术基础。（　　）

8. 基础共性标准，主要规范工业互联网的通用性、指导性标准。其包括术语定义、通用需求、架构、测试与评估以及管理等标准。（　　）

9. 总体标准主要规范工业互联网重点领域的标准，包括网络与连接标准、标识解析标准、边缘计算标准、平台与数据标准、工业 App 标准和安全标准。（　　）

10. 应用标准主要包括典型应用标准和垂直行业应用标准等。（　　）

三、简答题

1. 简述工业互联网的目标。
2. 简述美国的工业互联网参考架构 IIRA 划分的 4 个层级。
3. 简述我国工业互联网体系架构（版本 2.0）的总体框架内容。
4. 简述工业互联网技术体系的 3 方面技术组成。
5. 简述工业互联网技术体系中融合技术的作用。