

基于 RAMI 4.0 解读新一代智能制造

赵敏

(英诺维盛(北京)新技术发展有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了深入认识中国工程院“基于新一代人工智能的‘中国智能制造发展战略研究报告’”的重要意义, 笔者采取了解构和重构的方法, 对德国工业 4.0 参考架构模型 (RAMI 4.0) 进行了剖析, 并与中国工程院报告中提出的智能制造总体架构做了对比, 发现了彼此的相同和差异之处, 认为中国版智能制造总体架构在智能程度上更胜一筹, 这是中国人对智能制造发展的贡献。同时该分析过程亦加深了对二者的认识。

关键词: RAMI 4.0; 信息物理系统 (CPS); 基本范式; 新一代人工智能; 架构; 技术维; 组织维; 价值维

中图分类号: T-01 **文献标识码:** A

Understanding of a New Generation of Intelligent Manufacturing based on RAMI 4.0

Zhao Min

(Innovation (Beijing) New Technology Development Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to gain a deeper understanding of the significance of the Chinese Academy of Engineering's "China Intelligent Manufacturing Development Strategy Research Report Based on the New Generation of Artificial Intelligence", the author adopts the method of deconstruction and reconstruction, to analyze the Reference Architecture Model of Industrial 4.0 (RAMI 4.0) of Germany, and compared with the general architecture of intelligent manufacturing proposed in the report of the Chinese Academy of Engineering, and similarities and differences of each other are found. It is believed that the general architecture of the intelligent manufacturing in China is superior in intelligence. This is the Chinese contribution to the development of intelligent manufacturing. At the same time, the analysis deepens the understanding of the both architectures.

Keywords: RAMI 4.0; cyber-physics system (CPS); basic paradigm; new-generation artificial intelligence; architecture; technical dimension; organizational dimension; value dimension

一、前言

从 2017 年 5 月初起, 笔者开始多次参与中国工程院“基于新一代人工智能的‘中国智能制造发展战略

研究报告’”(以下简称“工程院报告”)项目的研讨与文本修订工作。

2017 年 12 月 7 日, 周济院士在南京“世界智能制造大会”上做了题为《关于中国智能制造发展战略

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-23

通讯作者: 赵敏, 英诺维盛(北京)新技术发展有限公司, 高级工程师, 主要研究方向为两化融合、智能制造和创新方法;
E-mail: mike_zhaomin@139.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代人工智能引领下的智能制造研究”(2017-ZD-08-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

的思考》的讲演，并于 2018 年 1 月在中国工程院再次做了同样题目的报告，系统地阐述了我国智能制造的发展战略。周济院士的报告引发了社会上极大的关注和热烈的反响。其中最重要的理论创新，是将智能制造的发展过程分成了三个阶段与三个基本范式 [1]，这在当前世界智能制造业内属于首创，特别是对于第三范式“新一代智能制造”的定义，更是在智能理论和内涵上超越了当前国际范围内的 11 个智能制造参考架构模型 [2]，成就了独树一帜的学术高地。

为了更好地认识该报告的重要意义，笔者剖析了架构相对比较完备的德国工业 4.0 参考架构模型 (RAMI 4.0) [3]，将其诸要素与工程院报告中的内容做了对比，既加深了对工程院报告提出的中国版智能制造总体架构和智能制造三个基本范式的认识，也深化了读者对 RAMI 4.0 的认识。

二、RAMI 4.0 概述

2013 年 4 月，世界传统工业强国——德国在汉诺威工业博览会上正式推出了“工业 4.0”的概念，同时成立了工业 4.0 平台。平台秘书处包括：德国信息技术、通信、新媒体协会 (BITKOM)，德国机械设备制造业联合会 (VDMA) 和德国电气和电子工业联合会 (ZVEI)。工业 4.0 平台于 2015 年 7 月发布了《工业 4.0 参考架构模型 (RAMI 4.0)》研究报告 [4]，ZVEI 于 2015 年 10 月 4 日发布了《参考架构模型 RAMI4.0 和工业 4.0 组建》研究报告，ZVEI 将其称之为是他们与合作伙伴共同在工业 4.0 标准化方面取得的重要里程碑，是“第一个精确描述符合工业 4.0 标

准的开发生产设备的工业 4.0 组件的版本”“为公司提供了开发未来产品和商业模式的基础” [3]。

RAMI 4.0 的原文稿，读起来晦涩难懂，有些词汇不宜直译，只能根据内容理解来转译，才能得其要领。笔者经过对 RAMI 4.0 一年多的持续学习，逐渐理解和掌握了 RAMI 4.0 的主线和基本内容，比较赞赏其精确性、实用性和适用性，认为它具有较大的弹性和发展空间，可以用它来理解、延伸和对接其他的智能制造模型，如对接工业互联网参考架构 (IIRA) 或对接中国工程院提出的“新一代智能制造发展战略”中的智能制造总体架构 [5]。

RAMI 4.0 是一个基于高度模型化的理念而构建的三维架构体系。RAMI 4.0 通过垂直轴层 (Layers)、左水平轴流 (Stream)、右水平轴级 (Levels) 三个维度，构建并连接了工业 4.0 中的基本单元——工业 4.0 组件。基于这一架构可以对工业 4.0 技术进行系统的分类与细化。理论上，任何级别的企业，都可以在这个三维架构中找到自己的业务位置——一个或多个可以被区分的、由工业 4.0 组件构成的管理区块。

工业 4.0 参考架构模型如图 1 所示。

从术语翻译来看，对于左水平轴流 (Stream) 的翻译，一般没有异议。对于右水平轴“系统级别 (Hierarchy Levels)”的翻译，大部分人采取了直译为“层次结构”或“层次”，不易区别于垂直轴“层 (Layers)”的翻译。其实，如果仔细看右水平轴上所描述的具体内容，就知道“Hierarchy Levels”在此处翻译为“级”比较合适，表示系统集成和控制的级别，符合国际标准 IEC 62264 (企业和控制系统集成系列国际标准) 的规定，而“Layers”是讲企业管理的内涵与层次。

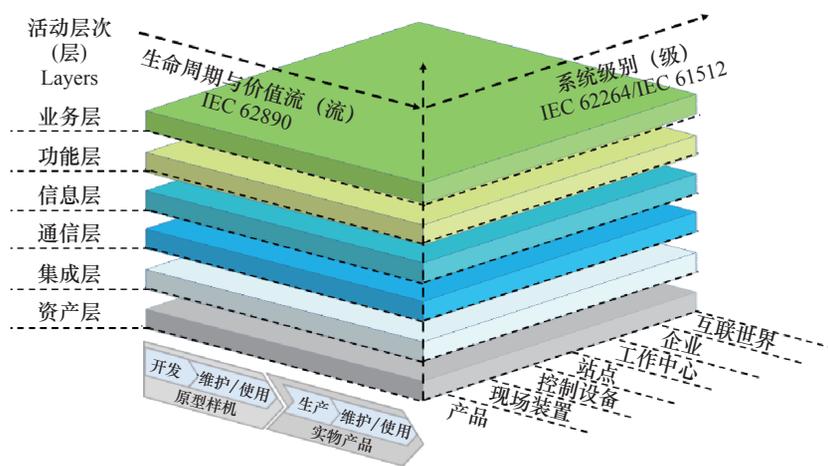


图 1 工业 4.0 参考架构模型

三、对 RAMI 4.0 的解构与重组

对于 RAMI 4.0 自下向上的资产层、集成层、通信层、信息层、功能层、业务层六层结构，既可以综合观察，也可以拆开逐层解读。而恰恰是逐层拆解再重组之后，让笔者看出了它的奥妙。这引发了笔者一个有趣的思考：标准的内容皆源于实践，是经过提炼后逐渐建立的，RAMI 4.0 也应该经历了一个不断提炼、抽象和优化的过程，那么，它能否传承一两百年前的工业基因，描述工业革命早期的企业管理状态？能否描述今天的第三次工业革命以及即将到来的第四次工业革命？

笔者将 RAMI 4.0 按照“层”的定义拆解并从最低层自底向上逐层重构，得到了如图 2 所展现的几种不同工业阶段的模型，发现了一些隐含在 RAMI 4.0 背后没有说明的内容。尽管这种拆解与重构未必完全体现德国人设计 RAMI 4.0 的初衷，未必精准匹配工业革命的历史发展过程，但是架构模型本身就是对工业发展模式的抽象与凝练，是要提取共性主旨内容并忽略枝梢末节差异的。笔者认为这是加深对 RAMI 4.0 理解的一个有效方式。

在图 2 中，资产层是企业经营的基础，尽管资产形式随着历史年代会有所不同，但是其基本性质不变。因此会在从图 2 (a) ~ 图 2 (d) 的四个模型中出现。

功能层在过去实际上也是存在的，尽管在那时甚至还没有出现明确的功能定义，但是在蒸汽机时代的工厂里，已经逐渐有了比较详细的分工生产，这种分工通常是按照产品结构件的功能来划分的。至于业务层，则从来不会缺位，自从有了“工厂”这个基本企业单元之后，厂内的活动规划，厂外的交易流程，都属于工厂业务层的管理范畴。

在图 2 (a) 工业 1.0 中，只有最基本的资产层、功能层（表现不明显）和业务层，企业活动层次少且管理上相对简单，机器普遍缺乏控制装置。如果以流的维度上的两大阶段（原型、实物）观察，产品研发以工程蓝图为表达，以实物样机为原型。所有的研发与生产都是串行过程，即一个环节完成之后，才能开始下一个环节。

在图 2 (b) 工业 2.0 中，集成层逐渐加入进来，因为有了电，机器有了逐渐增多的机电控制装置，企业在对生产活动中的控制能力有较大增强，原本必须手工调整的设备可以变成由机电控制装置来自动调整，企业活动层次增加，内容丰富了很多；产品研发以图纸及油泥 / 木模型来表达，以实物样机为原型。研发与生产都是串行过程。

在图 2 (c) 工业 3.0 中，信息层加入进来，极大地丰富了企业的管控手段。在产品和设备本身中有了诸如可编程逻辑控制器（PLC）、嵌入式系统等数字化

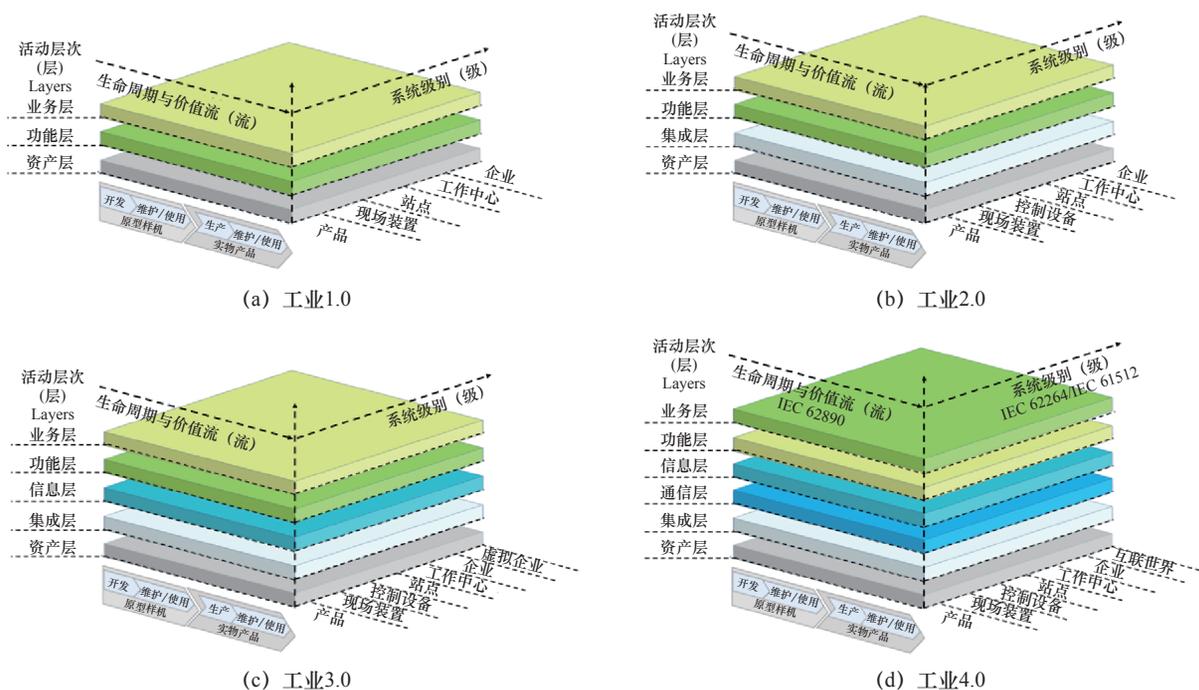


图 2 RAMI 4.0 解构并重组后的四种模型

装置,在设计工具上,企业开始有了 CAX 等数字化研发手段。在数字化、网络化的赋能和放大下,企业活动层次和水平都大为提升;产品研发开始以数字化 2D 绘图及 3D 造型来表达,以数字样机为原型,研发过程开始有了并行工程,数控设备在生产中逐步应用并普及。

在图 2 (d) 中,描述的是未来工业 4.0 愿景下的数字工厂 (DF) 或智能工厂 (SF)。以 DF 或 SF 为企业最小单元进行管控是工业 4.0 的基本思想。在系统级别的维度上,体现的是“纵向集成”;在流的维度上,体现的是基于产品(或装置、设备、工作站等)全生命周期的“端到端集成”;在“层”的维度上,体现的是“信息物理系统 (CPS)”;最难做到的一步是“横向集成”,需要从模型中的“互联世界”去找答案 [4],因为“横向集成”所表现的是不同行业的企业之间的集成,所有参与者需要对诸如协同(谁主导)、圈子(谁参与)、标准(用谁的)、利益分配(谁受益)之类的问题做出协商,在共识的基础上彼此做出妥协,协同高效工作,共创商业价值,合理分享利益。企业以“互联世界”集成的方式大致有两种,如图 3 所示。

图 3 (a) 所示的是典型的“央企”或大集团企业模式,图中的连接线表示了企业之间以“总部”为中心的业务指令和信息流的流动,不同央企集团之间的合作(即彼此联接)肯定属于“横向集成”,例如,航空母舰的研制必定涉及到多个央企国防军工集团之间的合作;图 3 (b) 所示的是更为一般化的互不隶属的同业企业或者各自独立的非同业企业之间的合作,彼此之间只有合作和信息流动而没有指令。非同业企业之间也可以因为共同开发某个大型复杂产品项目而形成“横向集成”。未来,在各种互联网的支撑与作用下,企业之间的协作方式往往是“图 3 (a)+ 图 3 (b)”

的混合模式,并且更趋向于向图 3 (b) 发展。

事实上,企业内、外的联网所构成的“互联世界”,已经构成了工业互联网(或工业物联网)。从这个意义上说,工业 4.0 与工业互联网两种不同的工业发展范式所使用的参考架构虽然不同,构建模型的出发点也未必一样,但是对企业来说,无论采用哪一种架构,最终结果是殊途同归的。

四、智能制造三个基本范式与 CPS

周济院士多次提到:德国工业 4.0 的模式,按照现有标准的描述和技术要素的支撑,完全可以达到工业 3.5 或稍高的水平,但是如果如果没有新一代人工智能的支持,是无法真正达到工业 4.0 的水平。因此,“真正意义上的‘工业 4.0’”概念就被正式提出来。这个要点也在工程院报告中有明确阐述:如果说数字化网络化制造是新一轮工业革命的开始,那么新一代智能制造的突破和广泛应用将推动形成这次工业革命的高潮,重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态,并将引领真正意义上的‘工业 4.0’,实现第四次工业革命 [1]。

在工程院报告中,定义了智能制造的三个基本范式,如图 4 所示。

关于“数字化制造”的第一范式,有关论述已经很多,本文不作讨论。按照工程院报告的定义,“数字化网络化制造(以下简称“数网化”)属于智能制造的第二发展阶段和第二范式。在该范式中,数网化技术都已经得到较大的发展,形形色色的“互联网(并非仅仅是因特网)”与制造业形成深度融合,CPS 成为智能制造的主流使能技术。

以《三体智能革命》中的“三体智能模型”观点

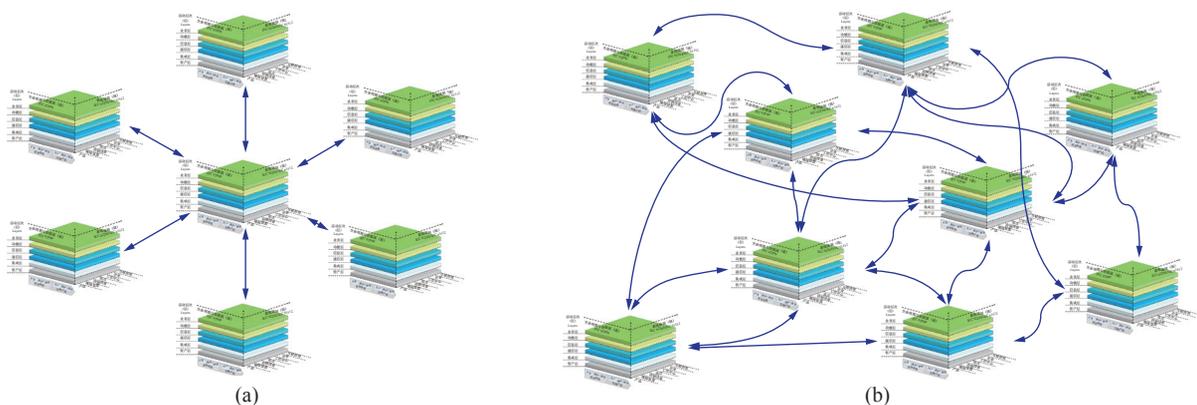


图 3 企业联接的两种基本模式

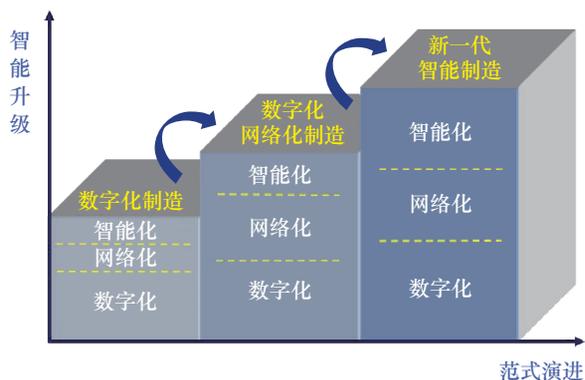


图4 智能制造基本范式的演进

来看，此时数字虚体（工程院报告写作“信息系统”）与物理实体（工程院报告写作“物理系统”）的交互融合形成了CPS [6]。CPS的面世具有里程碑式的意义。因为从20世纪80年代末到21世纪初，日本为发展人工智能而开发的第五代计算机项目和“智能制造系统(IMS)”项目失败，人工智能陷入第二次低谷。人们开始寻求一种新的科技手段来构建智能系统。于是在2006年，美国国家科学基金会(NSF)的海伦·吉尔提出了CPS构想，并且很快得到了德国等工业国家的积极响应。CPS作为一种数网化的智能体，是工业4.0、智能制造、工业互联网等落地的“最大公约数”和关键使能技术，甚至可以说，未来世界的形式就是CPS。

《三体智能革命》提出的“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行、学习提升”的20字箴言较好地表达了CPS智能体的基本逻辑 [6]，已经成为中华人民共和国工业和信息化部、中国电子技术标准化研究院发布的《信息物理系统白皮书(2017)》中的一个主要观点 [7]。

不同国家的研究团队对CPS有着不同的理解。从常理和表面上来理解，CPS是一种典型的C(数字虚体)和P(物理实体)两体相互作用，但是实际上，伴随着人脑中的隐性知识不断显性化，显性知识不断优化、筛选和积累，以知识为载体的“人类智能(人智)”不断数字化、编码化，转化到人造系统中，形成“机器智能(机智)”，在比例上，“机智”日益增多，其结果是人脑逐渐从“感知-分析-决策-执行”的系统回路中撤出，最终不在系统回路中出现，但是“人智”仍然以数字化软件的形式驻留在人造系统中，一直在系统回路中作为“知识引擎”来驱动智能系统(如智能制造)的实现。

在意识人体(工程院报告写作“人”，笔者将“人”

细分为人体、人脑、意识)对CPS影响的判断上，中国人的理解已经比美国、德国对CPS的理解更为丰富和宽泛。笔者认为，即使人脑离开系统回路，也会以更合理的分工方式专业从事知识生产，未来“人智”会源源不断进入数字虚体而促成越来越多的“机智”产生。貌似两体融合的CPS，实质上还是一种三体融合的结果。可以认为，人的影响力从未离开CPS，并且一直牢牢地主导着CPS的形成与发展。“人智”是智能制造事实上的主导和决定性因素(该观点与工程院报告的人-信息-物理系统(HCPS)内涵基本一致)。

软件是数字虚体的重要载体。软件在硬件许可的范围内，可以定义很多新规则和新事物。而“人智”恰恰就是以数字化知识的形式驻留在软件中，定义了软件的推理与判断规则。以软件的形式实现“人智在回路”从而替代了“人脑在回路”，是CPS作为一种数网化智能体的主要作用。可以将CPS的普遍应用作为判断是否实现了第二范式“数网化智能制造”的技术要素。

德国人提出的工业4.0是基于CPS来实现的，但是，要想实现工程院定义的“真正意义上的‘工业4.0’”，必须在基于CPS的数网化智能制造的基础上做进一步的技术升级和范式转换，即走向基于“新一代HCPS”技术的“新一代智能制造”。

五、RAMI 4.0 与中国智能制造架构的异同

王春喜等 [2] 经研究发现，智能制造的参考架构，以三维架构为主流，不管是德国的RAMI 4.0、美国的IIRA和短信业务(SMS)、日本的工业价值链参考架构(IVRA)、国内早先提出的IMS A、国际标准化组织提出的全局三维图等，大多数都是三维参考架构。因此工程院报告中给出的智能制造总体参考架构也顺应了这种架构建设主流趋势。

工程院报告认为：智能制造涵盖了产品、制造、服务全生命周期中所涉及的理论、方法、技术和应用，其总体架构可以从价值维、技术维和组织维三个维度描述，即以制造为主体的价值维、以两化融合为主线的技术维和以人为本的组织维。如图5所示 [5]。

在智能制造总体架构中三个维度的具体定义和简述是：

价值维——以制造为主体的价值实现维度。智能制造的价值实现主要体现在产品、生产、服务三个方面及其系统集成；

技术维——以两化融合为主线技术进化维度。智能制造从技术演变的角度体现为数字化制造、数字化网络化制造、新一代智能制造三个基本范式；

组织维——以人为本的组织系统维度。实施智能制造的组织系统包含智能单元、智能系统和系统之系统（SoS）三个层次 [5]。

因为智能制造总体架构也采用了三个维度，因此尽管在维度细节设计上与 RAMI 4.0 三个维度上的内容有一定的差异，但是彼此之间的绝大部分内容都可以实现直接对接或近似对接，如图 6 所示。

在左水平轴上，两个架构描述生命周期价值流的内容比较吻合，只是图 6 (a) 价值维中的“流”稍显隐蔽，嵌入在了“产品、生产、服务”这个全生命周期之中，而在全生命周期的三个阶段中，其实也都隐含了“原型、实物”两个阶段，而图 6 (b) 的“流”只给出了“原型、实物”两个阶段。

在右水平轴上，图 6 (a) 组织维给出了单元、系统、系统之系统三种系统级别，同时强调了以人为本的“人智”参与，即从单元到 SoS，都由 HCPS 组成，概念上显得抽象；图 6 (b) “级”中对系统级别划分得比较具体，提出了扩展的“互联世界”，但是

只谈及设备，不明确人是否参与。或者，另一种理解是 RAMI 4.0 在“资产层”中隐含了人的要素，将人作为一种被动的被管理要素，而不是一种主动的管理要素。

在垂直轴上，图 6 中 (a) 和 (b) 的差异就较大。图 6(a) 表示的是两化融合水平和系统智能化水平，是比较宏观抽象的概念，另外在第三范式中强调了导入“新一代人工智能”；图 6 (b) “层”中讲的是系统/组件实施的技术层次和企业管理层次，以及由此而形成的 CPS。因此，二者之间无法一一对应。只能说，二者之间的某些要素是同时具备的，例如图 6 (a) 的数字化、网络化一定与图 6 (b) 的集成层、通信层、信息层有较多的对应。而在图 6 (b) 中明确标出的资产层，在图 6 (a) 中就难以找到了，或者说在“组织维”上有，在“技术维”上也有。

总之，图 6 (a) 更具宏观和抽象性，面向包括但不限于智能工厂的广域适用范围，更符合中国两化融合、多范式并存的复杂情况；图 6 (b) 更具微观和具体性，面向智能功能工厂的建设，更聚焦在企业内部的数网化建设以及外部的“互联世界”。

尽管在对比中可以看到两个架构具有很多相同或类似的要素，但是 RAMI 4.0 明显少了对“新一代人工智能”的引入，也没有突出人的要素，而在智能制造总体架构中，这两点是清晰、明确的核心支撑要素。

这个对比启发笔者做了一个大胆设想，假如要 RAMI 4.0 成为一个“真正意义上的‘工业 4.0’”架构，可能要做出一点修改，至少要在“层”维度上明确给出与新一代人工智能有关的内容。为了形象表达这种改进后的架构对应关系，笔者做了一个假设的“RAMI 4.0-AI 版”，在信息层和功能层之间增加了一个 AI 算法层。在 RAMI 4.0 中，功能层的作用是实现功能的

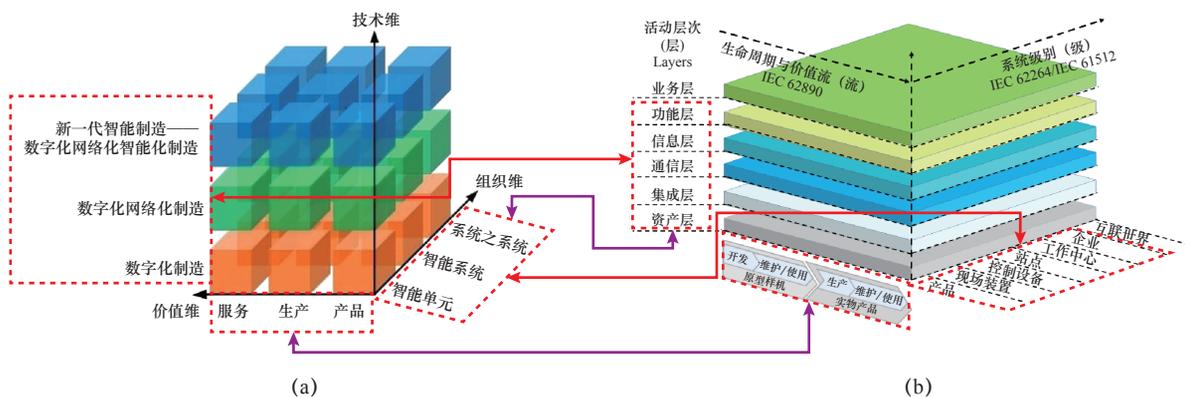
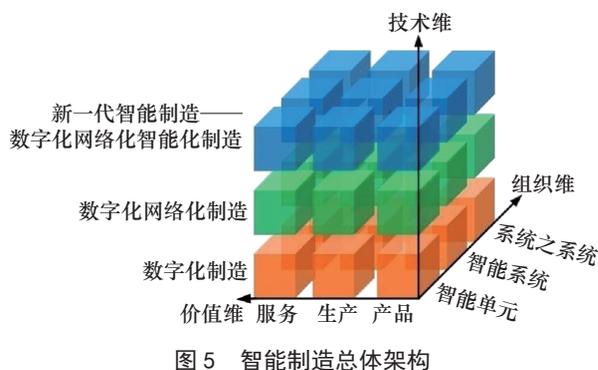


图 6 RAMI 4.0 与智能制造总体架构对接

形式化描述、根据下层的应用场景形成决策；信息层是规则和机理模型的形式化、数字化描述，并具体执行、运行与事件相关的规则和机理模型。信息层的载体是软件，所有的规则和机理模型（算法）都嵌入在软件中。众所周知，AI 通常以算法的形式体现出来，判断一个软件是否是 AI 软件，看其所采用的算法以及处理大规模数据的能力即可。算法既是 AI 的立足点，也是改进与变化最快的活跃要素。因此，在不对 RAMI 4.0 原有结构做较大改动的情况下，在信息层和功能层之间增设一个“AI 层”是比较快捷的改进方式，表示在现有软件中逐渐加入新一代人工智能算法，以实现“真正意义上的‘工业 4.0’”（新一代智能制造）。如图 7 所示。

不难看出，图 7 (a) 所表达的智能制造总体架构，与图 7 (b) 所假设的“RAMI 4.0-AI 版”，彼此之间有了更好的内容对应，由此也更好地理解了两个架构之间的异同。

六、结语

工程院报告中提出智能制造发展的三个阶段、三个基本范式，明确了智能制造的发展路径和技术规律，奠定了“真正意义上的‘工业 4.0’”架构，是中国人对智能制造发展的贡献。

RAMI 4.0 较好地体现了以 CPS 为主的“数网化智能制造”，但是因为没有新一代人工智能技术导入，没有新一代 HCPS 技术支撑，因此通常止步于第二范式。在实现智能制造方面，工程院的智能制造总体架构更胜一筹。

要想实现“新一代智能制造”第三范式，必须以“新一代人工智能”为技术内涵，以新一代 HCPS 为技术要素，参照工程院报告中提出的智能制造系统总体架构来建设。或者，也可以对现有的 RAMI 4.0 进行修订，以“RAMI 4.0-AI 版”向智能制造总体架构靠拢。

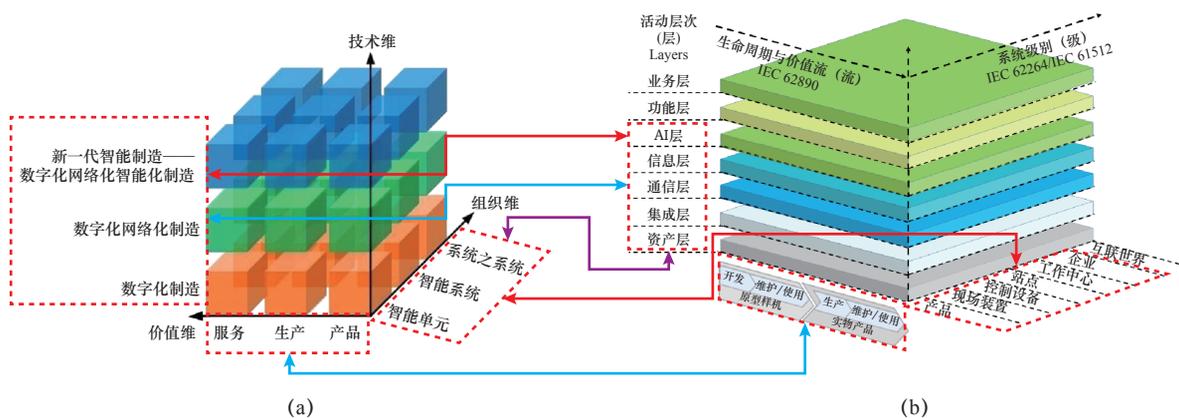


图 7 改进后的 RAMI 4.0-AI 与智能制造总体架构对接

参考文献

- [1] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1): 11–20.
- [2] 王春喜, 王成城, 汪烁. 智能制造参考模型对比研究 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2017 (4): 1–7.
Wang C X, Wang C C, Wang S. Comparative study of intelligent manufacturing reference model [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2017 (4): 1–7.
- [3] ZVEI. The Reference architectural model RAMI 4.0 and the industrie 4.0 component [R]. Frankfurt: ZVEI, 2015.
- [4] VDI, VDE, ZVEI. Reference architectural model industrie 4.0(RAMI4.0) [R]. Frankfurt: VDI, VDE, ZVEI, 2015.
- [5] 周济, 李培根, 董景辰, 等. 中国智能制造发展战略研究报告(征求意见稿) [R]. 北京: 中国工程院, 2018.
- [6] 胡虎, 赵敏, 宁振波, 等. 三体智能革命 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Hu H, Zhao M, Ning Z B, et al. Three-body intelligence revolution [M]. Beijing: China Mechine Press, 2016.
- [7] 中国信息物理系统发展论坛. 信息物理系统白皮书(2017) [R]. 北京: 中国信息物理系统发展论坛, 2017.
China CPS Development Forum. White paper on cyber-physics system (2017) [R]. Beijing: China CPS Development Forum, 2017.