

关于智慧制造的思考

▣ 魏东

我们为什么提智慧制造

过去的十年里，美国提出了先进制造与工业互联网的概念，德国提出了工业 4.0，这些概念引起中国国内不少企业、院校的追捧。上述概念是美德两国为自己的制造业制定的战略，笔者认为，中国的国情与美德两国差异太大，过度追捧工业互联网和工业 4.0，无异于拿他人的药方治自己的病。我们可以借鉴美德两国的方法，而非照抄照搬。因此，我们科技自动化联盟的几位同仁在 2014 年提出了智慧制造的概念。

我们不妨分析一下美国和德国提出先进制造、工业互联网与工业 4.0 的大背景。

2008 年的全球性金融危机让美国反思了实体经济的重要性。对比了德国经济在金融危机的表现后，美国重新认识到制造业在国民经济、进出口贸易、就业岗位和国家竞争力，甚至国家安全等方面的重要意义。2000-2010 年的十年间，美国制造业从业人口从 1700 万人降至 1100 万。在入主白宫还不到三个月的 2009 年 4 月，美国总统奥巴马在乔治城大学的讲话中第一次提出重振美国制造业，让制造业回归美国。2009 年 12 月奥巴马签署了一个“重振美国制造业的框架方案”，在此文件中重振制造业和确保先进制造业优势地位被立为国家战略。2012 年美国国家科技委员会发布了《国家先进制造战略计划》，提出要优化政府投资，完善先进制造业创新政策，加快先进制造技术创新，加速新技术的市场应用。一系列战略部署为美国制造业发展营造了更有利的政策环境，为先进制造技术开发和制造业发展注入了新动力。

制造业对德国而言是经济的基石，是立国之本。2010 年左右，德国政府认为，德国制造业正面临一系列“内忧外患”。“内忧”来源于“德国制造”正在

魏东，1991 届清华大学电机工程系本科；长期从事工业自动化领域的理论及应用研究，取得了一系列在国际上有影响的独创性成果，是 cyber-resilient ICS 模型的创立者之一。

2019 年 6 月加入清华大学河北经济发展研究院，任咨询研究中心主任，智能机器人产业发展中心副主任，国智清创智能机器人研究院院长。



面临的巨大挑战：IT 技术和生产制造技术不能有效整合，制造业企业缺乏创新活力，国内市场需求疲软，制造业从业人员新鲜血液不足。“外患”主要来自中国和美国，首先是中国制造业的竞争。2010 年中国成为世界第一制造业大国，挤占了全球的中低端市场，而中国政府在“十二五”规划中对高端装备制造雄心勃勃，非常可能成为德国在中高端制造业最大的竞争对手之一。其次是美国奥巴马政府提出向制造业强势回归，美国先后提出“再工业化战略”和“先进制造伙伴战略”等一系列政策层面的措施。德国担心美国会利用其在 IT 技术与创新能力上的巨大优势重新夺回国际上工业产品的市场份额。

进入本世纪以来，全球工业界的普遍共识是，工业化与信息化的深度融合是大势所趋。基于自身在软件方面的优势，美国提出的先进制造系统（NIST NISTIR 8107）提出通过 IT 技术对制造系统进行三个维度的整合，纵向方面是从底层的传感器 / 执行器，PLC/DCS 到 MES、ERP、CRM、PLM 及 PDM；横向方面涉及上下游制造过程；端到端是从设计到原料到

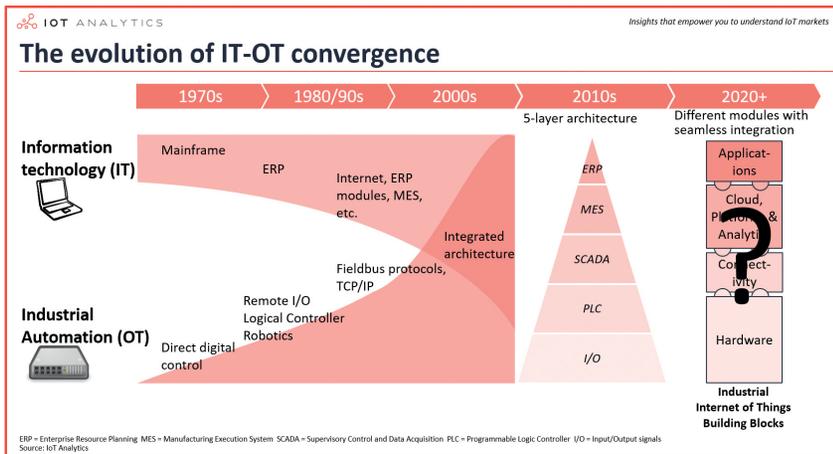


图 1：工业化与信息化融合趋势示意图

产品再到报废回收。美国的一些巨头企业，如 GE、Intel、AT&T、Cisco 等，提出了工业互联网的概念。他们也是从美国的优势领域——互联网出发，自上而下地去整合信息化与工业化技术，强调的是互联网和软件。

德国工业 4.0 战略的制订是从自身的优势——工业装备和工业基础出发，自下而上地进行信息化与工

业化技术的整合，它强调的是工业和硬件。我们可以看出，美德两国的战略思维相似，都是立足本国的优势来应对信息化与工业化深度融合的趋势。

我国的工业基础及信息产业与德美两国还存在差异，我们并不具备德国的工业基础，也没有美国的信息技术优势及强大的创新能力。我们可以借鉴他们的战略思维，而不能一味盲从。

以中国目前的市场体量和制造业规模，我们应该在制定新的制造业标准上有足够的话语权，甚至应该去力求主导话语权，进而在行业里占领战略上的制高点。

我国制造业的优势如下：

一、市场体量巨大。

二、制造业门类最齐全——我国制造业涵盖了联合国产业分类中定义的所有 41 个工业大类、191 个中类、525 个小类。

三、制造业规模最大——占超过全球 25% 的产值，从 2010 年开始一直占据世界第一的宝座。根据 2019 年 7 月麦肯锡报告“中国与世界——理解变化中的经济联系”，中国贡献了全球制造业总产出的 35%。

四、体制优势——政府的支持力度，尤其是政府的行政执行力以及各级政府的协同能力。

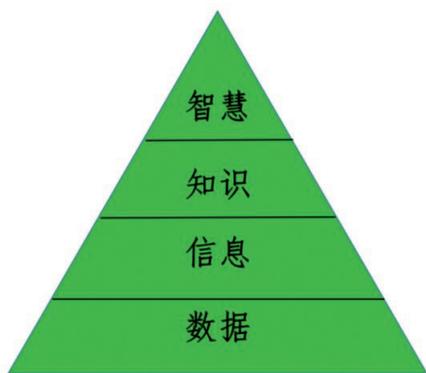
五、人才红利——每年有超过 800 万大学毕业生，其中超过 400 万的理工科大学毕业生进入就业市场。这个数字接近排第二（印度）、第三（美国）、第四（俄罗斯）到第十的国家的总和。2016 年中国理工科大学毕业生 470 万人，印度 260 万人。美国 2016 年



图 2：德国工业 4.0 战略示意图

是 57 万人，2019 年 44 万人，其中超过一半的是国际学生。

前四个优势是公认的，而人才红利的优势往往被忽略。人才红利上的巨大优势是我们对正在发生的制造业变革思考的出发点。制造业离不开人，它是靠人参与，也是为人服务的。智慧制造的核心是人，因为拥有智慧的是人而不是机器。“智能制造”概念里智能的主体是机器、设备，“智慧制造”里智慧的主体是人。“形而下谓之器，形而上谓之‘道’”——智能制造是在“器”的层面，而智慧制造是在“道”的层面，即思维方式、方法论的层面。



数据是没有单位的数字，如 1、0、123；信息是有意义的数字，如温度 31.7℃，速度 12 米 / 秒；知识是去理解自然现象中的机理，各变量的相互关系；而智慧是人应用掌握的知识去解决问题，产生希望看到的结果。人在制造业里是闭环中的一个不可或缺的、最重要的节点。所有的机器设备和技术都是为人服务的。

工业 4.0 的核心是 CPS (Cyber-Physical-System)，而智慧制造的核心是 HCPS (Human-Cyber-Physical-System)。

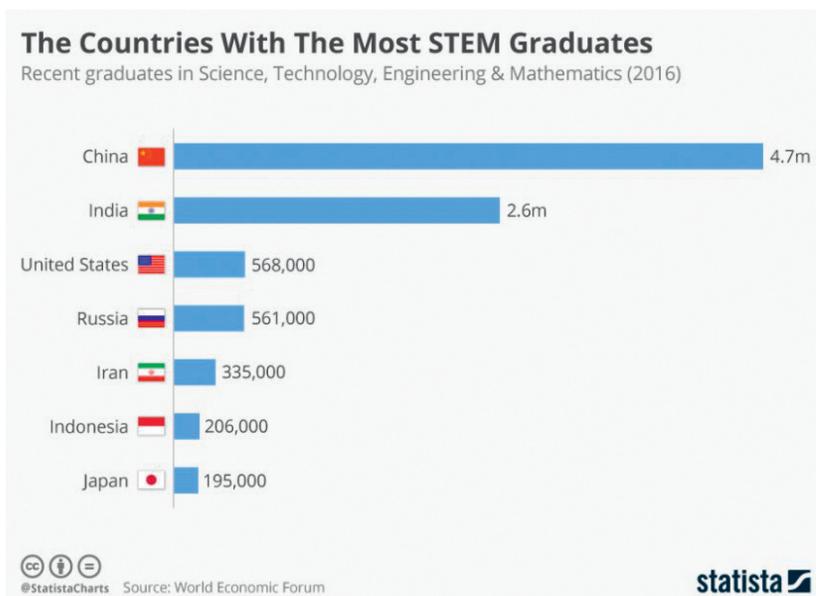


图 3：2016 年几国理工科大学毕业生人数统计

智慧制造与传统制造的关系

智慧制造与传统制造的关系可以用 iPhone 和传统 phone 的关系作类比。

传统 phone 唯一的功能是语音通话，后来加入了语音留言，但其主要功能还是语音的交流。而 iPhone 完全重新定义了电话，试想我们在使用 iPhone 时有多少时间是在语音通信？据美国苹果公司（Apple）统计显示，仅不到 5%。其它功能如上网、微信、照相、录音及收发电子邮件等等占用了绝大多数时间。换言之，大多数时间大家只是把 iPhone 当一个设备或平台来使用其他非传统电话功能。

未来的智慧制造就像智能手机一样提供一个平台，在这个平台上制造过程本身只是制造产业链条上的一环。最后的结果是制造过程本身只是智慧制造中占比很小的一部分，如同语音通话在 iPhone 的功能中占比一样。而围绕着制造的设计开发，服务会占到 90% 以上。

图 4（见下页）所示是 Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA)，有人把工业云计算放在 level 6。在 PERA 里：1) 层级结构，数据交换只发生在同一层

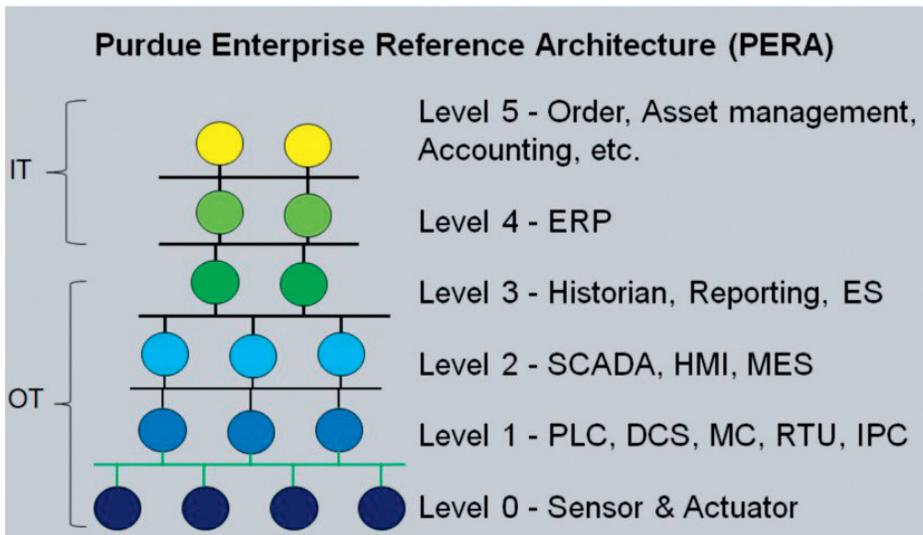


图 4: IT 与 OT 的深度融合趋势

级 (level) 的设备及相邻 level 的设备之间; 2) IT 与 OT 有明确的边界, 即在 Level 3 与 4 之间; 3) level 0 上的设备之间的数据交换及 level 0 与 level 1 之间的数据交换使用现场工业总线, 注重时效性。除此之外基本上用以太网、光纤及无线通讯, 生产规划与调度数据自上而下, 逐层传递; 而生产过程中采集的数据自下而上, 逐层传递。数据传输基本上不越过中间层级。这是当下的现状。

从 2000 年以来, 制造业中近 90% 的创新发明与计算机技术、通信技术紧密相关, 在笔者看来, 以后十几二十年也会如此。从上世纪九十年代以后, 制造业自动化 (简称 OT) 的创新主要分为两类, 一是将新发展的 IT 技术引入到工厂自动化, 如图像处理的 GPU 用于物料传输与移动; 目前是云计算、互联网、移动计算及大数据与人工智能正被开发用于 OT 的应用上。二是将自动化的一些主要功能不断在不同设备上重新组合或移动。一个例子是通用的运动控制器是将传统数控与逻辑控制有机结合起来在同一 CPU 上运行; 另一个例子是生产优化。原来在 MES 上运行以达到全局优化, 这些功能有逐渐被下放到 level 1 设备上的趋势, 成为分布式控制, 虽然是局部优化, 但生产系统鲁棒

性更强, 弹性更强。

随着生产工艺复杂度与产品个性化的增加, 对生产过程数据的开放性与易得性的需求越来越高, 同时还不能弱化现场总线的实时性与安全性, 这是目前的一大挑战。

另一个共识是产品的使用会越来越容易, 就像智能手机。

而产品的复杂度会越来越高, 制造业产业链附加值会分流到两端, 一端是在上游的设计, 另一端是下游的服务。制造过程本身的附加值会被削弱是一个共识。

大概是五六年前, 业界与学术界开始讨论未来的制造业自动化架构应该是什么样的, 共识是 IT 与 OT 会深度交汇融合, 图 4 阐述的是这一趋势。

另一个共识是下面的以普渡大学参考架构为基础的工业自动化金字塔结构将不复存在。这是科隆工学院的一个老师提出来的, 目前被广泛认可。未来的 IT-OT 架构中会消除普渡模型里层级的概念, 会趋向扁平化的全网状结构。应该是设备与设备, 设备与服务, 以及服务与服务的直接数据交换。

目前的架构如图 5 所示, 底层通信是现场总线, 注重实时性与安全性, 往上依次为工业以太网、企业内网及互联网。生产规划与调度数据自上而下, 逐层传递; 而生产过程中采集的数据自下而上, 逐层传递, 数据传输基本上不越过中间层级。这是当下的现状。

未来的 IT-OT 架构中会消除普渡模型里层级的概念。应该是设备与设备, 设备与服务, 以及服务与服务的直接数据交换。这才是 IT 与 OT 的深度交汇融合。

综上所述, 对制造业企业, 尤其是设备制造商而言, 应考虑如何将自己的产品设计与服务的附加值最

大化，对它们来说，设计和服务是新的价值增长点。

制造业企业的升级转型不仅仅是设备与技术的升级换代。近十年来，工业 4.0，工业互联网和智能制造是国内制造业热议的话题。大家似乎认为只要通过加装传感器将生产过程数字化，通过加装网络设备实现网络化，通过安装 MES、ERP、PLM 等软件就能实现自动化和智能化，企业的升级转型就顺利完成了，笔者认为这是远远不够的。企业的升级转型不仅仅是上述那些设备与技术的升级，还有思维方式、管理模式以及员工知识技能的升级。在企业的升级转型中，后者的重要性比前者更大，而后者往往被忽视。另外，企业的升级转型不能仅仅从智慧制造的概念出发，不顾国内的实际情况，一定要建立在自身的产业基础之上，否则只会花费不小而实效不大。

笔者通过以下几个项目案例来说明自己的观点。

上世纪九十年代初，作为国家 863 重点应用工厂之一，上海某国有大型纺织机械成套设备公司支付上亿人民币引入国外的计算机集成制造系统（CIMS），它包括了计算机制图软件（CAD），计算机辅助质量管理系统（CAQM），底层自动化系统以及制造资源规划系统（MRP2）。

当时引进的 CAD 软件是美国 EDS 公司的产品，该产品与 Oracle 数据库相连。企业所有与生产相关的数据由数据库来存储、分析和管理的。但当时绝大多数有经验的老工程师们都毕业于五六十年代，只能在图纸上作设计而不会使用计算机。所以为了使用 CAD 软件，只能是一个老工程师作设计，带一个年轻的工程师

将设计转化到计算机软件里，效率大打折扣。因此老工程师们对计算机软件在设计中的使用是非常抵触的。引进的 MRP 软件当时在美国已得到广泛应用，Allen Bradley 的一家电控柜厂只有 500 多位员工，能够在一周内生产 1500 个电柜。它使用的 MRP2 是基于数据作决策，可以为每一个电柜自动生成零配件与材料表格并发给上游各供应商，而供应商可以根据表格将零配件和材料精确地送到每一个工位。该厂可以做到零配件和材料的零库存。而该软件的使用在中国遇到了问题，因为上游供应商并没有相应的计算机信息系统，还是通过纸质的零配件和材料表来对接。当时在上海的一家排名前三名的纺织电气厂有员工 1500 多人，也是该 863 项目成员，在引入该软件后并没有看到实效，因为几乎没人能够彻底掌握并充分使用该软件。运营管理方式还是每天早晨开例会，根据纸质表格分配领取零配件及材料，而非基于 MRP2 的数据作管理，它一年组装的电柜也就在 1500 台左右。同样的工具由于中美产业基础的不同，员工知识技能、思维模式及管理方式的差异，产生的效果不相径庭。

笔者曾经参加过一个针对美国第二大速冷食品公司能效管理系统的规划会。按当时的规划，安装大量

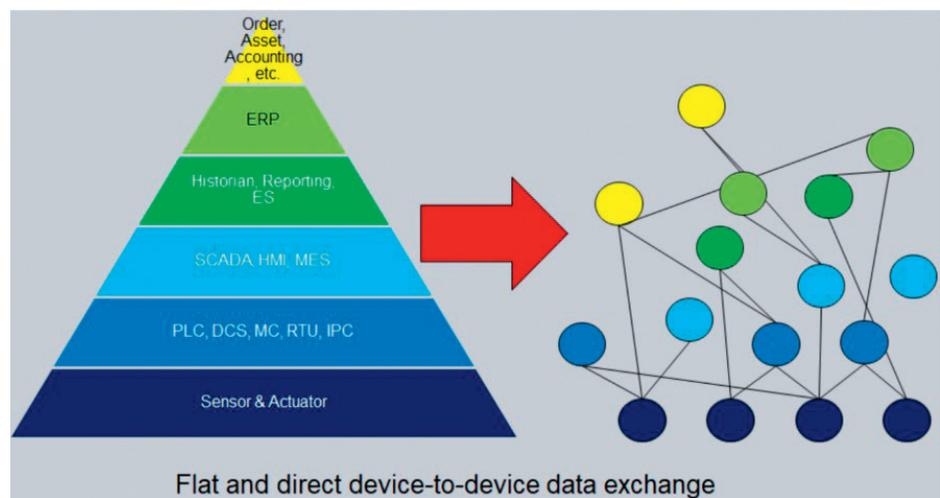


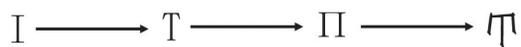
图 5：目前的制造业自动化架构示意图

的传感器将各生产工艺流程数字化，并通过敷设大量网线和网络设备将所有数据传到云端。这些海量数据可以用来详尽分析每台设备、每个流程、每个班次及每一类产品的能耗，并将结果可视化。但后来的问题是如何将数据分析的结果应用到生产过程形成闭环，提高整个生产的能效，这一点我们并没有找到满意的答案。在这个案例中，人的生产工艺专业知识是形成闭环的重要因素。

三年前，中国工程院周济院长在 CPS 的概念基础上提出 HCPS (Human-Cyber-Physical System)，笔者非常赞同。人是制造环节不可或缺的重要因素，人是诸多制造流程形成大闭环的最重要环节。

综上所述，制造业企业的升级转型不仅仅是设备与技术的升级，思维方式、管理模式以及员工知识技能也要随之升级，此外还要考虑到自身的产业基础。没有后者，升级转型只能是空谈，所以思维方式、管理模式以及员工知识技能的升级在产业升级中不能被忽视。

制造业新型人才的要求



以前国内对大学生的要求是“又红又专”。“专”是指在自己所从事的专业上有深厚的理论知识功底和丰富的实践经验。这也是西方所说的“T”型人才。“T”型人才，T上的一竖是指专业知识深厚，一横指的是对其他的非本领域知识也有一些了解，知识面相对较宽。

笔者在上世纪九十年代参加工作，从事冶金行业基础自动化（PLC、HMI、MES 与传动系统）的设计、编程与调试。参加工作的第一天，负责带我的一位五十年代初毕业于上海交大电机系的老师傅告诉我：“自动化是为工艺服务的，所以自动化工程师最后比

拼的不是自己本专业，而是对生产工艺的理解。”这句话让我终身受益。

后来才明白这就是西方人所说的“II”（派）型人才，首先是对本专业有着深厚的理论知识功底和丰富的实践经验；其次对所服务的专业也有着一定的理论知识和实践经验；再次视野开阔，知识面有一定广度。正像华尔街上从事 IT 的人士，比拼的不仅仅是编程水平，还有对金融业知识的理解。

进入本世纪以来，一些新技术，如人工智能、大数据、云计算对各行各业产生了深远的影响。以华尔街上从事 IT 的人士为例，现在除了要求他们掌握本专业编程技术及金融知识外，还要求他们会使用人工智能、大数据等新技术。

笔者认为这可以称为倒“山”字型人才，首先对本专业有着深厚的理论知识功底和丰富的实践经验；其次对所服务的专业有着一定的理论知识和实践经验；再次对上游新技术也有着一定的理论知识和实践经验；最后视野开阔，知识面有一定的广度。

回到制造业，人工智能、大数据、云计算等新技术会使本行业发生深刻的变革，对一个自动化工程师而言，面临的挑战是巨大的。一个优秀的自动化工程师应该是这样一个倒“山”字型人才：

首先，对自动控制有着深厚的理论知识功底和丰富的实践经验（PLC，DCS，MC，HMI，机器人等）；

其次，对生产工艺有着一定的理论知识和实践经验，如装配、连铸、连轧、注塑等；

再次，对上游新技术也有着一定的理论知识和实践经验，如机器学习、大数据、云计算、互联网等；

最后，视野开阔，知识面有一定的广度。

总之，智慧制造不仅仅是设备、软件、技术上的升级转型，也是企业管理模式、工程技术人员知识结构等的升级转型，更是工业企业从管理到员工的全员思维模式的转变。