

工业软件发展趋势展望 p1

数字孪生应用的十大关键问题 p9

制造业的新现实——利用增强现实技术应对工厂车间挑战 p25

中国机床之路，为什么越走越窄 p33

我国机床行业发展坎坷之原因探究 p43

中国工厂离“柔性制造”还有多远 p48



目录

CONTENTS



机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2020 年第 3 期 (总第 208 期)
2020 年 6 月 28 日出版

主办: 中国机械工程学会工作总部
地址: 北京市海淀区首体南路9号
主语国际4号楼11层
邮编: 100048
电话: 010-68799036 (编辑部)
传真: 010-68799050
E-mail: zhongyg@cmes.org
网址: www.cmes.org
主编: 陈超志
责任编辑: 钟永刚
出版: 《机械工程导报》编辑部
发行: 中国机械工程学会工作总部



热点关注 CURRENT POINT

- | | |
|--------------------|----|
| 工业软件发展趋势展望 | 1 |
| 数字孪生应用的十大关键问题 | 9 |
| 制造业的新现实 | |
| ——利用增强现实技术应对工厂车间挑战 | 25 |



专家视点 EXPERT OPINION

- | | |
|-----------------|----|
| 中国机床之路, 为什么越走越窄 | 33 |
| 我国机床行业发展坎坷之原因探究 | 43 |
| 中国工厂离“柔性制造”还有多远 | 48 |

工业软件发展趋势展望



上海索辰信息科技股份有限公司 原力

开始写这篇文章的日子是2020年5月21日，这一天COVID-19全球确诊病例超过500万例，同一天中国两会开幕显示国内正在恢复正常。2天前即5月19日习近平总书记在世卫大会提出六项建议、五大举措展现大国风范，而同一天美国出台出口管制新规，举美国之力来打击华为公司……这么多具有里程碑的事件集中在一起，也许这个5月代表着现行世界的改变。

完全阻断华为供应链的事件，又一次在工业软件圈里掀起讨论，不仅是寻找华为的出路，尤为紧迫的是寻找国内工业软件的出路和方向，这些都是值得每一个工业软件人思索和努力的。

激动、愤怒、沮丧、希望的各种感情混杂在一起，每个人的体会都五味杂陈，在各种意见、

见解下，我重新拾起了3个月前想搞明白的一件事情：从事工业软件供应的国际大厂商在这些年来大举并购到底是怎样的商业目标和愿景，这些行动到底隐含着工业软件什么样的趋势，我们不能在这些有着时代必然的行为中探寻到一丝脉络，而这种蛛丝马迹是否能像一道光一样对国内工业软件的发展和趋势带来启示。

当下各种概念裹挟着先进使能技术像巨浪一样奔涌而来时，作为羸弱的国产工业软件怎样才能游动起来，而不是像石头一样下沉……

一、愿景和现实的落差

2012年以来，世界范围内

的主要工业国家相继发表了面向2030年到2050年的工业发展战略路线图，美国2012年推出了《先进制造业国家战略计划》；英国提出了《英国工业2050战略》；日本于2019年由亚洲生产组织提出《行业创新3.0》；德国2013年提出了工业4.0战略倡议，并于2019年正式发表《2030年国家工业战略——德国和欧洲产业政策战略方针》；中国2015年印发了《中国制造2025》。还有许多其他国家也推出了类似的计划，以鼓励拥抱智能制造。这是全球主要工业国家聚焦工业4.0概念并发布各自工业发展战略最为密集的10年。

当我们把时钟拨回到1990年，会发现“智能制造”、“工业4.0”、“数字化转型”是迄今30年来兴起的三个重要的相

注：本文来源于“工业软件行业观察”公众号，获得授权转载。

辅相承的工业变革概念。

日本从1990年4月倡导“智能制造系统IMS”国际合作研究计划开始，许多发达国家和地区如美国、当时的欧共体、加拿大、澳大利亚等参加了该项计划。该计划当时共预算投资10亿美元，对100个项目实施前期科研资助。这样算起来“智能制造”概念提出距今已有30年时间。

2000年，基于数字化的转型开始被更广泛地用作政府全面引入信息化技术的概念和论据，大量增加了互联网和IT在各个层面的使用。同时在一般商业环境中也开始了类似的引用，这进一步提高了对这一概念和相应市场机会的认知。2011年凯捷咨询公司发布了一篇市场报告《数字化转型：十亿美元组织的路线图》。提出数字化转型概念推动社会和产业变革距今差不多有20年时间。

2013年汉诺威工业博览会上正式推出了“工业4.0”概念；2014年德勤发表《工业4.0：数字化转型与指数级技术使用的挑战与解决方案》。

2015年“世界经济论坛”启动了“工业数字化转型(DTI)”项目，它支持围绕第四次工业革命主题开展更广泛的活动，并由

埃森哲于2016年发布《世界经济论坛白皮书——工业数字化转型：数字企业》报告。从提出工业4.0，到工业4.0与数字化转型合流形成“工业数字化转型”概念，距今大概有10年时间。

我们经常说，“10年一轮回”，工业的变革思想从“智能制造”、“工业4.0”、“数字化转型”已经经过了3个轮回，现在发布的一些回顾性分析有了样本和统计数据支撑。

不得不说的是，从智能制造到工业4.0，以及现在所开展的工业数字化转型的概念上来看，其愿景期许的效益似乎显而易见和易于理解，但从现实实践的角度来看，则体现出“愿景很美好，现实很骨干”的现实差距。

2015年9月10日，工业和信息化部公布了2015年智能制造试点示范项目名单，全国范围内遴选出的46个智能制造试点示范项目进入该名单，其涉及了38个行业、21个地区。在2019年中国工程院发布的《2035年制造业战略研究》报告，反应了开展智能制造计划和战略方针所共同面临的一个问题：“许多制造企业在几十年内采用连续升级战略（逐步），跨越三个技术范式，从数字制造到智能制造，然后采

用新一代智能制造技术……然而智能制造技术被很多制造商视为是高度不确定和昂贵的……”

近期穆胜的一篇《工业4.0还有春天吗？》的文章比较详实的从市场规模、融资情况、企业营销情况探讨了工业4.0先行企业的境遇，从A股54家工业4.0概念股分析得到三个结论：毛利率并未明显上升；库存商品占营业收入的比例并未明显下降；库存商品占存货的比例并未明显下降。文中还列举了西门子数字化工厂技术集团(DF)通过MindSphere实现利润稳步增长，而GE的Predix却未能成为GE的王牌。并且对工业4.0唱衰的分析文章在国际上也不鲜见。

对于新概念主导工业变革的愿景与现实的巨大落差，反映出当前的工业转型并未像早先德勤预测“数字化转型能使工业遵循‘摩尔定律’产生‘指数级增长’”那样发展：而是发生了2019年一篇题为《谁从工业4.0中获利？》的论文中，来自经济学和商业世界团队所强调的“价值转移”现象。“价值转移”被定义为当抓住了价值变化就会随之发生的过程。在最新的一则分析文章《工业4.0——大型科技与特斯拉2020年Q1展现实力背

后的火花》中佐证了这个观点，分析表明采用工业 4.0 的特斯拉在 COVID-19 影响下保持了高速增长，而其它化石燃料汽车厂商则境遇大不相同。

也许化石燃料汽车向电动汽车产生的“价值转移”能够成为工业变革的一个好的样本，文中强调了数字化，尤其是工业软件的驱动力作用：“由于动力系统的不断创新和行业商业模式的转型，现在化石燃料汽车面临着重大的生存挑战。推动汽车转型的技术驱动力包括传动系统的电气化和运输过程的数字化。事实上，汽车发展过程高度复杂，在建模、计算、分析等方面的需求越来越大，也越来越多样化。2019 年第十四届生态汽车与可再生能源国际会议上，特别介绍了在电动汽车领域越来越多的仿真方法的使用，涉及推进系统、电源和热管理等领域。”

个人总结一下：工业变革中新的概念和范式并不是保证成功的唯一要素，深入与工业使能数字化技术（工业软件及工业大数据）相融合，并对生产、经营模式及产品消费模式带来整体性转型，才能在企业间“价值转移”中获得主动权。

二、工业软件界并购重组的趋势

2019 年达索系统斥巨资并购 Medidata（一家临床试验数据分析公司）的行动，让我大吃一惊。一家在航空航天、汽车行业具有优势的传统工业软件企业为什么会购买一家这样的公司？而且所花费的 58 亿美元，远超西门子并购 UGS 的 35 亿，也超过了西门子并购 Mentor 的 45 亿美元。也许同样的疑问会萦绕在工业软件人的脑海，而 2020 年发生的另一次并购可能会回答这个问题。

2020 年 5 月 19 日，专业服务公司埃森哲 (Accenture) 宣布计划收购意大利系统集成商 PLM Systems 公司，以扩大了其在数字工程领域的版图。总部位于都灵的 PLM 是一家专门为汽车、工业设备、国防和航空航天企业设计和构建产品生命周期管理的 IT 系统公司，收购后其人员和业务将加入埃森哲在意大利的“工业 X.0 创新中心”。

这是埃森哲在过去 12 个月内收购的第四家工业数字化咨询、服务和解决方案提供商，其它还包括加拿大的 Callisto Integration、法国的 Silveo 和

爱尔兰的 Enterprise System Partners。

让我们先把埃森哲的并购行动放在一边，回头看看近些年和工业软件有关的并购重组行动会呈现出什么样的含义。

先看看 IT 界的巨擎 IBM，查阅了一下 IBM 近年的收购案件，除了 2019 年花费令人瞩目的 340 亿美元收购 Redhat 公司以外，IBM 让人印象深刻的收购发生的 2015 年，连续购买了几家生物医药分析公司，而 IBM 近年更多的是出售资产而不是买入。

西门子则在收购上谨慎的多，除了 2017 年收购 Mentor 和 2016 年收购 CD-adapco 外，2018 年收购低代码软件编程公司 Mendix 公司则略显清奇。而西门子日前将其在印度上市子公司西门子 (Siemens Ltd, 能源业务) 总价值约为 24% 的股份，超过 8500 亿卢比的股票出售给另一家集团企业西门子天然气和电力控股 BV。至此，西门子集团有了两大板块业务：一是以能源和电力为主的能源业务板块；另一是以自动化和数字化领域、医学诊断组成的工业解决方案业务板块。

海克斯康 (Hexagon AB) 公司则在 2020 年入手了 CAEFatigue，一家提供结构寿

命分析的公司，此外还收购了露天矿爆破运动监测和分析领域的先驱者 Blast Movement Technology (BMT) 公司；收购了 Geopraevent AG 公司，这是一家领先的自然灾害监测和报警系统供应商，可对山体滑坡、岩崩和雪崩等危险事件进行早期监测和预警；收购了工业计算机断层扫描市场的领导者 Volume Graphics 公司，断层扫描主要面向金属结构或岩土结构进行扫描和诊断。加上 2017 年收购的 MSC，海克斯康的业务愿景就比较清楚了。

还有一家虽然体量相比较小，但在工业软件领域具有很大影响力的 Ansys 科技公司日前也爆出消息：“为了帮助加速基于物理学的数字孪生技术在多个行业中的采用和实施，Ansys 科技将加入包含微软、戴尔和联实集团组成的数字孪生联盟指导委员会。该联盟代表了一个由先锋技术专家组成的国际生态系统，影响着数字孪生的开发、使用和标准要求。”

此外，对于企业并购重组，5 月 21 日华尔街日报的一则分析文章称：“大型科技公司准备大举收购——未来几年，许多大型 IT 供应商将寻求填补空白或扩展

到新市场，部分目标是针对陷入困境的初创公司。收购目标包括云计算、协作、访问管理和其他业务连续性工具等领域，这些领域在疫情隔离期间需求激增。”

把这一系列近些年和未来几年在工业软件领域，或技术工具领域发生和将要发生的并购重组综合起来看，显示了行业隐含着什么样的转变和趋势？

三、“旗帜”企业的转型

工业软件相关企业发生的并购重组所隐含的发展趋势，或者商业模式的转型可以从工业软件行业的“旗帜”企业转型情况来看一下。

1. 达索系统至今经历的发展阶段和转型

第一个阶段大概在达索系统成立的 1981 年到 1998 年间，达索的主要业务是以 CATIA 为中心的 CAD-CAM，简单来说就是供应三维设计和工艺工具，达索当时的口号是“3D for ALL”。

第二个阶段大概从 1998 年达索收购 IBM 的 PDM 产品为基础创立 ENOVIA 品牌，到 2008 年收

购 IBM 的 PLM 业务板块。达索在这一阶段进行了以工业流程为中心的产品转型，并提出了口号“PLM Online for ALL”。

第三个阶段从 2007 年以达索系统在工业软件行业率先推出 3DS 云计算开始，到 2019 年通过收购 Medidata 及其临床和商业解决方案，达索系统通过为生命科学行业提供端到端的研究和开发方法的集成业务体验平台，巩固其作为科学公司的地位。加上借助其以帮助企业在创造价值的过程中创建个性业务体验的工业业务平台 3D EXPERIENCE。达索系统重新更正了目标：“成为一家科学公司”。

在达索的三个发展阶段和转型中，我们能够看到一个链条：“软件—服务—价值转移”。

2. 西门子数字化业务的转型

西门子是一家典型的家族式企业，其业务从创始时的电报业务，到现在覆盖工业、电力能源、医疗诊断、数字化领域的全球实力企业，其内部的业务构成错综复杂，业务板块、子公司和股权结构也是一团乱麻，完全不是我这样的旁观者

可以说清的。不过我们可以从西门子的业务划分和历史上的一些行动把其涉及工业软件的业务大概划分一下。

第一阶段是1991年西门子收购Nixdorf开始生产个人计算机进入IT领域；后续收购了德州仪器的工业系统部门，IBM通讯设备部门ROLM；到2005年西门子向明基出售移动制造业务，并于2011年出售西门子通信子公司给诺基亚，从而彻底退出电信市场。这个阶段西门子向数字化硬件设备进行了转型。

第二阶段从2001年开始，收购主要从事工业过程优化、咨询和其它工厂服务的巴西化学技术集团开始，还收购了一系列包括Indx软件、PTI、Myrio、英国邵氏集团、UGS集团等软件和工程服务企业。而与2009年向富士通出售了计算机业务、2010年底西门子向Atos出售了其IT解决方案，从而基本退出了IT市场。这个阶段西门子退出数字化硬件设备制造而转向数字化软件和服务领域。

第三阶段从2011年开始，西门子收购了LMS、Mentor、Mendix、J2等一大堆大大小小的工业软件、工程服务或智能创新公司，加上其原有的UGS、邵氏等软件及工程服务业务，从而转向为工业提供自动化和数字化领

域的解决方案和服务。其中具有里程碑意义的是其2018年在AWS上发布的MandSphere3.0——开放式物联网操作系统云平台，在GE寻求出售Predix业务时，西门子的MindSphere平台则在工业界取得了一定的成功。

对于现在的西门子，从其官方网站上简短的“西门子一览”可以看到其业务板块划分：自动化和数字化领域、医疗诊断、清洁能源电力，还有一块鸡肋业务是为了拯救阿尔斯通而收购的运输业务。

从另一个角度则显示西门子业务转型的现状就一目了然了：在现在的西门子董事会6位成员中除去CEO、CTO和CFO外，其他三席董事中数字产业、智能基础设施占了两席。前文也曾提到西门子正努力把其能源电力业务从其混乱的子公司业务中剥离出去。

从西门子发展阶段和转型上其实也能比较清晰的发现其转型的脉络：“硬件—软件—服务—价值转移”。

3. 海克斯康的转型

海克斯康(Hexagon)为人所知的是作为一家在瑞典的知名传感器和测量设备供应商。海克斯康是一家成立于1992年的非

常新的公司，成立不到30年间，海克斯康的转型应该说非常明确，基本分为三个阶段：第一阶段，以制造工业计量设备为主，第二阶段以收购ERDAS Imagine（从事地理信息系统）公司开始其地理空间服务，第三阶段是从收购MSC、CAE Fatigue和Autonomous Stuff（自动驾驶解决方案）开始。

海克斯康作为一家“后浪”企业，截止目前，集团已经发展成拥有18000名员工的大型工业/工程数字化咨询和服务公司，其对自身的介绍非常简洁有力：

“海克斯康是传感器、软件和自主解决方案领域的全球领导者。我们正在将数据用于提高工业、制造、基础设施、安全和移动应用的效率、生产力和质量”，这个介绍完整的体现海克斯康在工业数字化转型机遇中的愿景和野心。

海克斯康发展的三个阶段特点或业务转型思路非常明确，目标就是利用其在传感器、计量设备上的领先优势，努力扩大其在当下工业互联网及工业数字化转型中的地位，并专注于和地理信息密切相关的结构工程服务（如采矿）和自动驾驶行业提供数字化服务。海克斯康的转型路线是：“设备—工程服务—数字化价值转移”。

4. 埃森哲的转型

埃森哲注册地在爱尔兰但其实质是一家美国公司，其脱胎于安达信会计事务所的技术咨询部门，于1989年成立，2001年改名“埃森哲”。在2009年为了避税需要在爱尔兰注册，到2019年，其全球员工数量达到惊人的492000名，超过IBM的352600名员工近14万人。

埃森哲作为IT咨询和服务公司，自创立起就只卖服务（人力）而不卖产品，所以说埃森哲只存在业务聚焦的转移，并不能说它在业务转型。不过埃森哲的历史也大致可以这样划分：

第一阶段作为美国联邦和其它西方国家政府主要的IT承包和服务商。埃森哲从美、英等国获得了大量的政府和公共事业IT合同，以帮助相关政府机构进行IT建设和运维。

第二阶段是为例如壳牌石油、中国“三桶油”为代表的国际头部企业提供IT建设和运维，主要集中在企业以ERP、CRM、财务为核心构建的企业运营信息化咨询和服务。

第三阶段是与其近12个月来进行的多次并购为代表的为推动企业数字化转型（工业和医疗）提供咨询和服务的业务转

型，如收购意大利PLM系统集团、汽车嵌入式软件供应商ESR Labs、数字制造供应商Callisto Integration、数字化制造和智能供应链供应商Silveo。这些并购活动显示其在推动工业（产业）数字化转型并提供广泛服务的野心。

跟埃森哲打过交道的人可能会有所了解，埃森哲既没有产品也没有核心技术，它最重要的资产就是“人”，其业务脉络也很清楚：“IT服务—工程服务—价值转移”。

5. Ansys科技的转型

Ansys科技公司作为工业软件，尤其是仿真软件的领头羊企业，一直以来都按照一家老牌且传统软件企业在发展，总结其发展脉络，可能“跟随战术”多于“引领”。Ansys公司的转型乏善可陈，也没有太多可供借鉴的地方，不过这里还是稍微整理一下。

第一阶段是Ansys其创始人斯旺森创立公司的1970年，到斯旺森出售其股权给私募基金TAA公司的1993年，在这个阶段，Ansys是一家具有创新精神的科学技术公司。

第二阶段是没有斯旺森而由资本运作的Ansys。从1993年到现在，Ansys科技公司最多能称

之为“一家常规软件细分市场的商业公司”。之所以Ansys能够成为仿真行业的领头羊，相较其他友商能更成功一点的因素是：较早且成功的引入资本和职业经理人而不是由科学家来掌控公司。

第三阶段大致是2000年，Ansys改变了其商业模式，从销售软件许可证转型到依靠工程服务。其许可证收入下降，而服务收入显著增长（这一点在国内几乎没有任何体现），这相对于抱着核心技术，“一招鲜，吃遍天”的其它仿真软件公司有了巨大的改变。在2015年，为了应对Simscale等云仿真计算服务的竞争，Ansys曾半推半就的推出过云计算服务，结果是不了了之。

Ansys的发展道路代表着科技公司老套的商业模式，有点封闭，还带着点傲娇。但至少它做对了一点，那就是做了一次成功的转型：“软件—服务”。而Ansys近期搭着微软、戴尔的车加入数字孪生联盟应该算是其再次转型的征兆，即“软件—服务—价值转移”。

上面列举了可能对工业软件发展趋势起到重要启示的“旗帜”企业，它们自身的转型和模式转变脉络，可能预示的工业软件发展趋势的方向和模式。这个趋势有两个重要的方向：

第一是，工业软件界外的行业巨头作为破坏者，借助自身充足的货币资源和实践资源加速进入原本封闭的工业软件领域。

第二是，在智能制造、工业 4.0、工业数字化转型的需求和相关技术驱动下，以软件产品为主的商业模式将发生较大的转变，而这一点对传统模式的工业软件企业来说尤为不利，即“供应专业服务以实现价值转移的模式会取代软件产品”。

四、工业软件发展趋势的思考与展望

本文用了较大篇幅来列举国际上在工业软件供应及应用领域近年发生的一些事情，结合一些行业头部企业的并购重组和转型案例来试图寻找工业软件发展的脉络和趋势。文章选取的视角主要集中在企业商业运营角度，限于个人能力和精力未能全面研究企业发展中涉及的各个方面，如技术、财务、人力资源等等，这可能会让文章的主要结论存在片面。

当前由于 COVID-19 疫情对全球经济和供应链产生的巨大影响、新自由主义的消退、中美贸易争端向中美对抗发展、世界领导角色的竞争等变化和矛盾激烈的集中和碰撞在一起，加之工业

4.0 及数字化转型，以及相关使能技术对传统经济和生产模式的冲击和破坏正在加速，这些不仅对中国的工业软件行业带来挑战，也同样挑战着世界范围的相关行业。所以工业软件行业的发展，个人认为在未来几年内有较为激烈的变化。

我们从发展趋势上进行展望，有以下几点思考值得参考。

1. 软件许可分发方式会被服务性收费所取代

20 世纪 90 年代末国际上受互联网思想和技术手段的影响，软件许可的分发方式普遍发生了转变，从成套的货架产品定价策略转向了按需订阅的许可证分发方式，主要表现形态就是按年租赁付费（这一点在国内因国企财务制度限制，在市场上未能获得体现，这也是国内市场上进口工业软件利润巨大，在各种利益诉求下，形成了进口工业软件的依赖的一个因素）。按需付费的软件分发方式在国际工业软件这样规模有限且专业细分的市场上实际产生的效果不是行业增长而是萎靡。

所以类似 Ansys、达索系统这样的头部企业更倾向于通过对用户直接提供专业服务来扩大规模而不是渠道销售。这是工业软件从许可证分发向提供服务模式

变革的一个因素。因为对于服务提供来说，其专业和工程的深度结合更有利于供应商的定价权和持续销售。

2. 离散、柔性和连续制造产生的需求对工业软件商业模式提出了新要求

智能制造更多侧重于独立设施；工业 4.0 则侧重在生产网络配置和合作；而工业数字化转型则指向了生产经营的高度弹性。无论那种概念，其实都是围绕着离散生产、柔性制造以及产品迭代中连续制造来构建生产模式和价值链条的。这些生产经营模式对工业软件的服务响应提出了专业化和融合化要求，仅仅作为软件产品已经不能满足这种需求，更重要的是提供满足用户需求的专业化和工程化服务。

3. 去中心化会进一步促进工业精细分工，这是工业软件发展的主要驱动力

现代的工业生产已经不是 100 年前福特汽车所引领的中心化大工业，而是由资本、消费导向、产品策划、产品设计、产品工程、产品生产、产品运维等精细分工所形成的生产网络构成，这其实就是一种去中心化的生产

模式。极端点的情况存在除了品牌和渠道，其它一切都可委托外部完成的可能。这种去中心化，极致强化了对业务细分和合作的专业化要求，这不仅强力驱动工业软件向更适配的专业和工程化转变，更多的是对服务和价值（如，知识）转移的刚需。

4. 工业企业间的价值转移会驱动工业软件以价值方案向用户转移

智能制造、工业 4.0、工业数字化转型当前并未如预期的那样产生制造的指数级增长，而是体现出行业内价值转移的特征。采用新模式和新技术作为工业企业间争夺价值转移主动权的一种技术手段，实质上加重了行业内及跨行业的竞争。从这一点上来看，通用工业软件商品是无法满足促进企业争夺价值转移所需特异性要求的，这要求工业软件在商品层面附加更多的专业溢价，从而能够把掌握在软件供应商手中的专业价值以及掌握在服务供应商手中的工程价值转移给用户。这是工程服务转向价值转移的一种趋势。

5. 核心技术或商业化产品已不是工业软件供应商追求的核心竞争力

国内工业软件界目前更多的还纠结于核心技术，商业化产品上，如算法、知识产权、软件成熟度等方面，这跟国内过去和现在的现实情况有关，也不能说这样走的道路不对。如果从国际视野来看，工业软件供应商现在则倾向通过服务和价值转移来追求规模和效益的溢价，核心技术、商品化或 IP 已经不是体现企业核心竞争力的主要标志，也不是供应商追求的核心价值。

那么当前国际上工业软件供应商追求的核心竞争力是什么呢？应该是努力扩大的人力资源。举个例子，埃森哲拥有 49 万名员工，同时进行成百上千直接服务的工业项目所体现出来的竞争力，而像 Ansys 这样传统工业软件企业，如何与之在工业化市场上竞争呢？

6. 通过服务体现价值来增加用户黏性成为工业软件供应商追求持续利润的主要模式

当一款工业软件对用户而言是可被选择时，我们只能称之为软件。而当工业软件成为用户必须依赖的工具时，我们可视之为生产力工具。两者的区别是当有同类软件时，用户有选择换一种软件的权力；而当软件成为生

产力工具时，用户只能选择更新，而不是换一种。工业软件成为生产力工具需要大量附加价值，而且这些附加价值是为特定用户定制或提供服务的，简单来说就是工业软件直接参与用户生产而不仅仅作为工具提供方，这就是工业软件体现的用户黏性。进口软件曾经在国内开展过的所有行动，都可视为在不断增加用户使用的黏性。用户黏性这个术语来自于互联网，对工业软件而言，通过软件工程服务来体现专业价值在特定用户身上产生黏性，是工业软件不断挖掘用户潜在价值和扩大利润的主要途径和模式。

总结一下，工业软件发展趋势简单的可以描述为“软件—服务—价值转移”。这个趋势我认为未来若干年工业软件供应商成长和发展的主要趋势和转型模式。

最后，面对国内工业软件的挑战和机遇，无论怎样的发展，作为中国的工业软件人，我们必须也必然能够成功，这是个人的美好愿望和信念。这里以北岛的诗作为结束：“执着于理想，纯粹于当下”。**MT**

数字孪生应用的十大关键问题



武汉制信科技有限公司 黄培

当前，数字孪生（Digital twin）是各界关注的热点，全球著名 IT 研究机构 Gartner 曾在 2017 年至 2019 年连续三年将数字孪生列为十大新兴技术之一。北京航空航天大学陶飞教授团队对数字孪生技术进行了长期的深入研究，撰写了一批国际水准的学术论文。近期，美国工业互联网联盟（IIC）、IDC、埃森哲、中国信通院、赛迪等研究机构相继发表了相关白皮书，我国从政府主管部门到企业也十分关注数字孪生技术。

但是，当前业界对于数字孪生技术还存在一些模糊甚至错误的认识，给数字孪生技术披上了一层神秘的面纱。e-works（注：作者所在公司网站“数字化企业网”的简称）认为，如果不能正确理解数字孪生技术的基本内涵就囫圇吞枣地应用数字孪生技

术，很可能会“走入歧途”。为此，本文希望结合工业界的应用需求与实践，厘清对数字孪生的基本认识，引导企业正确理解和应用数字孪生技术。

一、关于数字孪生的内涵

很多业界主流公司都对数字孪生给出了自己的理解和定义，对于数字孪生的来源，本文不再赘述。这里首先对 Gartner 在过去三年对数字孪生的论述进行解读。

2017 年，Gartner 在十大新兴技术的专题对数字孪生的解释是：数字孪生是实物或系统的动态软件模型，在三到五年内，数十亿计的实物将通过数字孪生来表达。通过应用实物的零部件运行和对环境做出反应的物理数

据，以及来自传感器的数据，数字孪生可用于分析和模拟实际运行状况，应对变化，改善运营，实现增值。数字孪生所发挥的作用就像一个专业技师和传统的监控和控制器（例如压力表）的结合体。推进数字孪生应用需要进行文化变革，结合设备维护专家、数据科学家和 IT 专家的优势。将设备的数字孪生模型与生产设施、环境，以及人、业务和流程的数字表达结合起来，以实现与现实世界更加精确的数字表达，从而实现仿真、分析和控制。^[1]

在 Gartner 2017 年发布的新兴技术成熟度曲线（图 1）中，数字孪生处于创新萌发期，距离成熟应用还有 5-10 年时间。

2018 年，Gartner 在十大新兴技术专题中对数字孪生的解释是：数字孪生是现实世界实物或系统的数字化表达。随着物联

网的广泛应用，数字孪生可以连接现实世界的对象，提供其状态信息，响应变化，改善运营并增加价值。到2020年，估计将有210亿个传感器和末端接入点连接在一起，在不久的将来，数十亿计物体将拥有数字孪生模型。Gartner公司副总裁David Cearley指出，通过维修、维护与运营（MRO）以及通过物联网提升设备运营绩效，有望节省数十亿美元。^[2]

短期内，数字孪生将有助于资产管理，但最终将通过洞察产品使用情况，以及有哪些改善途径，从而最终让企业提升运营绩效。

除了通过物联网连接“物”，数字孪生连接的对象还有更多。“随着时间的推移，我们这个世界万事万物几乎都可以与其数字对象动态地相互连接，并能够基于AI实现高级仿真、运营和分析，”Cearley指出。“从长远来看，从事城市规划、数字营销、医疗保健和工业规划的专业人士都将在向集成的数字孪生世界转型中获益。”例如，未来的人类数字模型可以提供生物识别和医疗数据，而整个城市的数字孪生模型将能够实现高级模拟。

从2018年Gartner发布的新兴技术成熟度曲线（图2）中可以看出，数字孪生已经进入了过热期，其建设和预期出现了高

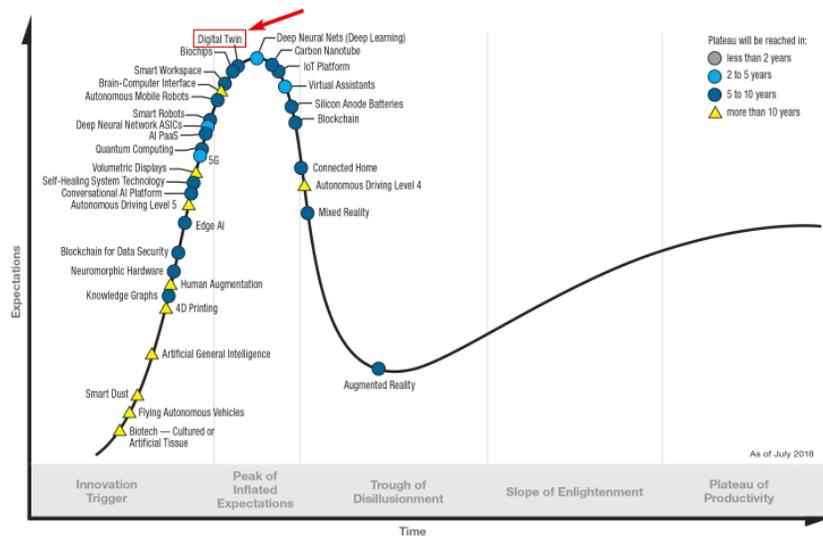
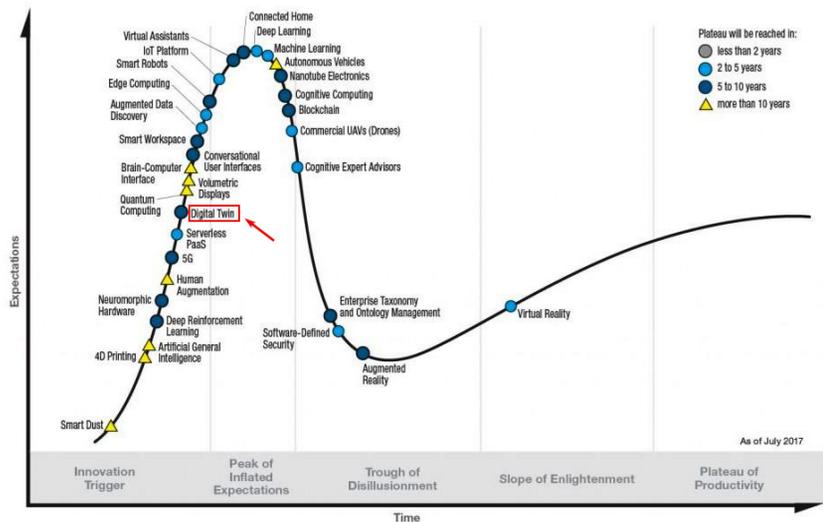
峰，超出其当前能力，会形成投资泡沫。

2019年，Gartner在十大新兴技术专题中对数字孪生的解释如下：

数字孪生是现实生活中物体、流程或系统的数字镜像。大型系统，例如发电厂或城市也可

以创建其数字孪生模型。数字孪生的想法并不新，可以回溯到用计算机辅助设计来表述产品，或者建立客户的在线档案，但是如今的数字孪生有以下四点不同：^[3]

- 模型的健壮性，聚焦于如何支持特定的业务成果；
- 与现实世界的连接，具有



实现实时监控和控制的潜力；

- 应用高级大数据分析和人工智能技术来获取新的商机；

- 数字孪生模型与实物模型的交互，并评估各种场景如何应对的能力。

当前的重点是基于物联网应用的数字孪生，可以通过提供维护和可靠性信息，洞察产品如何更有效地运行和有关新产品和提高效率的数据，以改善企业决策。组织的数字孪生正在兴起，以通过创建组织的流程模型，可以进行实时监控并提高流程效率。

从上述分析中可以看出，Gartner 对于数字孪生的理解也有一个不断演进的过程，而数字孪生的应用主体也不局限于基于物联网来洞察和提升产品的运行绩效，而是延伸到更广阔的领域，例如工厂的数字孪生、城市的数字孪生，甚至组织的数字孪生。

全球著名 PLM 研究机构 CIMdata 认为：数字孪生模型不可能单独存在；可以有多个针对不同用途的数字孪生模型，每个都有其特定的特征，例如数据分析数字孪生模型、MRO 数字孪生模型、财务数字孪生模型、工程孪生模型以及工程仿真数据孪生模型；每个数字孪生模型必须有一个对应的物理实体，数字孪生模型可以而且应该先于物理实体而存在；物理实体可以是工厂、船舶、基础设施、汽车或任何类型的产品；每个数字孪生模型必

须与其对应物理实体有某些形式的交互，但不必是实时或电子形式。

GE Digital 认为：数字孪生是资产和流程的软件表示，用于理解、预测和优化绩效以改善业务成果。数字孪生由三部分组成：数据模型、一组分析工具或算法，以及知识。^[4]

西门子认为：数字孪生是物理产品或流程的虚拟表示，用于理解和预测物理对象或产品的性能特征。数字孪生用于在整个生命周期，在物理原型和资产投资之前模拟、预测和优化产品和生产系统。^[5]

SAP 认为：数字孪生是物理对象或系统的虚拟表示，但其远远不仅是一个高科技的外观。数字孪生使用数据、机器学习和物联网来帮助企业优化、创新和提供新服务。^[6]

PTC 认为：数字孪生（PTC 翻译为数字映射）正在成为企业从数字化转型举措中获益的最佳途径。对于工业企业，数字孪生主要应用于产品的工程设计、运营和服务，带来重要的商业价值，并为整个企业的数字化转型奠定基础。^[7]

陶飞教授指出：当前对数字孪生存在多种不同认识和理解，目前尚未形成统一共识的定义，但物理实体、虚拟模型、数据、连接和服务是数字孪生的核心要素。不同阶段（如产品的不同生

命周期）的数字孪生呈现出不同的特点，对数字孪生的认识与实践离不开具体对象、具体应用与具体需求。从应用和解决实际需求的角度出发，实际应用过程中不一定要求所建立的“数字孪生”具备所有理想特征，能满足用户的具体需求即可。

在赵敏先生和宁振波先生撰写的《铸魂：软件定义制造》一书中指出，数字孪生是实践先行，概念后成；数字孪生模型可以与实物模型高度相像，而不可能相等；数字孪生模型和实物模型也不是一个简单的一对一的对应关系，而可能存在一对多，多对一、多对多，甚至一对少，一对零和零对一等多种对应关系。

结合学术界的研究和工业界的实践，e-works 认为，数字孪生并不是一种单一的数字化技术，而是在多种使能技术迅速发展和交叉融合基础上，通过构建物理实体所对应的数字孪生模型，并对数字孪生模型进行可视化、调试、体验、分析与优化，从而提升物理实体性能和运行绩效的综合性技术策略，是企业推进数字化转型的核心战略举措之一。

二、数字孪生的基本特征

数字孪生的基本特征是虚实映射。通过对物理实体构建数字

孪生模型，实现物理模型和数字孪生模型的双向映射。构建数字孪生模型不是目的，而是手段，需要通过对数字孪生模型的分析与优化，来改善其对应的物理实体的性能和运行绩效。

任何物理实体都可以创建其数字孪生模型，一个零件、一个部件、一个产品、一台设备、一把加工刀具、一条生产线、一个车间、一座工厂、一个建筑、一座城市，乃至一颗心脏、一个人体等。对于不同的物理实体，其数字孪生模型的用途和侧重点差异很大。

例如，达索系统帮助新加坡构建了数字城市（图3），建立了一座城市的数字孪生模型，不仅包括了地理信息的三维模型，各种建筑的三维模型，还包括了各种地下管线的三维模型。该模型作为城市的数字化档案，可以用于优化城市交通，便于各种公共设施的维护。Biodigital公司创建了生物数字人体模拟演示的在线平台，可以帮助医生和科学家研究人体构造，进行模拟试验。在太空探索的过程中，科学家通过数字孪生模型对远在太空的航



图3 达索系统（新加坡数字城市）

天器，例如登陆火星的“好奇号”火星车进行远程监控、仿真与操控。显然，物理实体的结构越复杂，其对应的数字孪生模型也会越复杂，实现数字孪生应用的难度也更大。

三、数字孪生的关键使能技术

数字孪生迅速成为热潮，源于数字化设计、虚拟仿真和工业互联网（工业物联网）等关键使能技术的蓬勃发展与交叉融合。

数字化设计技术从早期的二维设计发展到三维建模，从三维线框造型进化到三维实体造型、特征造型，产生了诸如直接建模、同步建模、混合建模等技术，以及面向建筑与施工行业的BIM技术（建筑信息模型）。三维建模技术不光用于产品设计阶段，并且可以实现三维工艺设计。产品的三维模型中不仅包括几何信息、装配关系，还包括PMI（产品制造信息，包括尺寸、公差、形位公差、粗糙度和材料规格等信息）等制造信息，已经可以实现MBD（基于模型的产品定义）。

为了支持产品三维模型的快速浏览，可以从包含三维工艺特征的完整三维特征模型中，抽出仅包括几何信息的轻量化三维模型。基于三维造型和三维显示技术，虚拟现实技术（VR）取得了蓬勃发展，广泛用于汽车、飞

机、工厂等复杂对象的虚拟体验，包括沉浸式虚拟现实系统Cave，用于产品展示和市场推广的三维渲染技术，以及基于视景仿真的模拟驾驶技术等。近年来又发展起来增强现实技术（AR），其特点是可以将实物模型和数字化模型融合在一个可视化环境之中，从而实现传感器数据的可视化，还可以进行产品操作、装拆及维修过程的三维可视化，实现产品操作培训、维修维护等应用。

虚拟仿真技术从早期的有限元分析发展到对流场、热场、电磁场等多个物理场的仿真，多领域物理建模，对振动、碰撞、噪声、爆炸等各种物理现象的仿真，对产品的运动仿真，及材料力学、弹性力学和动力学仿真，对产品长期使用的疲劳仿真，对整个产品的系统仿真，以及针对注塑、铸造、焊接、折弯和冲压等各种加工工艺的仿真，以及装配仿真，帮助产品实现整体性能最优的多学科仿真与优化，针对数控加工和工业机器人的运动仿真（其中数控仿真又可以分为仅仿真刀具轨迹，以及仿真整个工件、工具和数控装备的运动），还有面向工厂的设备布局、产线、物流和人因工程仿真。如果从仿真的对象来区分，虚拟仿真技术可以分为产品性能仿真、制造工艺仿真和数字化工厂仿真。

在数字化设计技术和虚拟仿真技术发展和集成应用的过程

中，产生了数字原型(Digital Mockup, DMU)、数字样机(Digital Prototyping)、虚拟样机(Virtual Prototype)、全功能虚拟样机(Functional Virtual Prototype)等技术，主要是用于实现复杂产品的运动仿真、装配仿真和性能仿真。通过对数字样机进行虚拟试验，可以减少物理样机和物理试验的数量，从而降低产品研发和试制成本，提高研发效率。

另一方面，随着传感器技术和无线通信技术的发展，二十一世纪以来，物联网应用越来越广。除在消费领域应用之外，为了支持高价值工业设备的运行监控和维修维护，工业物联网(IIoT)开始受到业界广泛关注。IIoT采集的数据类型和采集频率比普通的物联网应用高得多，而应用的数学模型和分析方法也比普通的物联网应用复杂得多。

在学术界的研究和GE、西门子等工业巨头的示范效应驱动下，数字孪生技术开始受到广泛关注。2016年6月，我在美国参加西门子工业软件一年一度的全球媒体与分析会议时，西门子应用了Digital Twin、Digital Thread(数字主线)等术语。我当时建议他们对这些名词术语给予解释，后来西门子给我发来对十多个名词的解释，e-works专门对这些名词术语进行了翻译，发表了一篇文章。

从数字孪生技术的发展背景可以看出，数字孪生模型是相对于其物理模型而言的。可以先建立数字孪生模型，应用数字孪生模型来进行虚拟试验，但最终还是要建立物理模型，通过对数字孪生的分析，来优化物理模型的运行。

除了上述技术，工业大数据、人工智能等技术也是数字孪生的关键使能技术。

需要强调的是，数字孪生的关键使能技术在数字孪生诞生之前就已经存在。而数字孪生的应用，又促进了这些关键使能技术的进一步发展。

四、产品的数字孪生和工厂的数字孪生

不同物理实体的数字孪生应用重点差别很大。

产品数字孪生应用的重点在于复杂的机电软一体化装备，例如发电设备、工程机械、机械加工中心、高端医疗设备、航空发动机、飞机、卫星、船舶、轨道交通装备、电梯、通信设备，以及能够实现智能互联的通信终端产品。

在产品的设计制造生命周期，可以通过在实物样机上安装传感器，在样机测试的过程中，将传感器采集的数据传递到产品的数字孪生模型，通过对数字孪生模型进行仿真和优化，从而改

进和提升最终定型产品的性能；还可以通过半实物仿真的方式，部分零部件采用数字孪生模型，部分零件采用物理模型来进行实时仿真和试验，验证和优化产品性能。另一方面，在产品创新设计时，大多数零部件会重用前一代产品的零部件，如果老产品已经建立了关键零部件的数字孪生模型，同样也应当进行重用，从而提升新产品研发效率和质量。

产品服役的生命周期是产品的数字孪生应用最核心的阶段。尤其是对于长寿命的复杂装备，通过工业物联网采集设备运行数据，并与其数字孪生模型在相同工况下的仿真结果进行比对，可以分析出该设备的运行是否正常，运行绩效如何，是否需要更换零部件，并可以结合人工智能技术分析设备的健康程度，进行故障预测等。对于高端装备产品，其数字孪生模型应当包括每一个实物产品服役的全生命周期数字化档案。

在产品的报废回收再利用生命周期，可以根据产品的使用履历、维修BOM和更换备品备件记录，结合数字孪生模型的仿真结果，来判断哪些零件可以进行再利用和再制造。例如SpaceX公司的一级火箭实现了复用，结合数字孪生技术，可以更加准确地判断哪些零部件可以复用，从而大大降低了火箭发射的成本。

工厂的数字孪生应用也分为

三个方面：在新工厂建设之前，可以通过数字化工厂仿真技术来构建工厂的数字孪生模型，并对自动化控制系统和产线进行虚拟调试；在工厂建设期间，数字孪生模型可以作为现场施工的指南，还可以应用AR等技术在施工现场指导施工；而在工厂建成之后正式运行期间，可以通过其数字孪生模型对实体工厂的生产设备、物流设备、检测与试验设备、产线和仪表的运行状态与绩效，以及生产质量、产量、能耗、工业安全等关键数据进行可视化，在此基础上进行分析与优化，从而帮助工厂提高产能、提升质量、降低能耗，并消除安全隐患，避免安全事故。

目前，已有很多企业建立了生产监控与指挥系统，对车间进行视频监控，显示设备状态（停机、正常、预警和报警等），展示各种分析报表和图表等。构建数字孪生工厂可以进一步提升工厂运行的透明度。然而，要构建工厂完整的高保真数字孪生模型，需要工厂的建筑、产线、设备和产品的数字孪生模型，难度很大。设备和产线的数字孪生模型构建，有赖于厂商提供相关数据，仅仅通过立体相机拍照，通过逆向工程构建的车间三维模型精度很低，而且也只包括外观的三维模型。但是，即便是仅仅基本的示意性的低精度的工厂数字孪生模型，对于工厂管理者实时

洞察生产、质量和能耗情况，尽早发现设备隐患，避免非计划停机，也具有实用价值。

需要强调的是，对于一个已经建成投产的工厂，在工厂运行过程中，其数字孪生工厂所显示的所有数据和状态信息，均来自真实的物理工厂，而非仿真结果。毫无疑问，要构建数字孪生工厂，需要实现设备数据采集和车间联网（M2M）。

图4是美的集团的数字孪生工厂应用实例。



图4 美的集团数字孪生工厂应用实例

数字孪生工厂对于离散制造企业 and 流程制造企业都有十分重要的价值。在考察英国 Aveva 公司时，我们观摩了该公司对于化工厂和无人海上钻井平台的数字孪生应用展示，数字孪生应用对于工厂的安全运营具有重要意义。

产品数字孪生模型与工厂数字孪生模型在产品的制造过程中可以实现融合应用。在推进工厂的数字孪生应用时，如果有高保真的产品数字孪生模型，并且在此基础上能够构建产品的制造、装配、包装、测试等工艺的数字孪生模型，以及各种工具和工装

夹具的数字孪生模型，则可以在数字化工厂环境中，更加精准地对产品制造过程进行分析和优化。

五、产品数字孪生模型的演进和数字主线

产品的数字孪生模型是一个“不断生长、不断丰富”的过程，在整个产品生命周期中，从产品的需求信息、功能信息、材料信息、使用环境信息、结构信息、装配信息、工艺信息、测试信息到维护信息，不断扩展，不断丰富，不断完善。数字孪生模型越完整，就越能够逼近其对应的实体对象，从而对实体对象进行可视化、分析、优化。

如果把产品全生命周期各类数字孪生模型比喻为散乱的珍珠，那么将这些珍珠串起来的链子，就是数字主线（Digital Thread）。数字主线不仅可以串起各个阶段的数字孪生模型，也包括产品全生命周期的信息，确保在发生变更时，各类产品信息的一致性。

CIMdata 认为，数字主线是一种信息交互的框架，能够打通原来多个竖井式的业务视角，连通设备生命周期数据（也就是其数字孪生模型）的互联数据流和集成视图。数字主线通过强大的端到端的互联系统模型和基于模型的系统工程（MBSE）流程来支撑和支持。波音公司开展了数字

孪生和数字主线应用实践，提出基于模型企业（MBE）“钻石模型”（图 5）。

对产品数字孪生模型的仿真分析，可以发现产品出现了什么问题。但如果要探究为什么出现问题，还需要依靠数字主线把各个阶段的数字孪生模型串起（图 6），来进行整合分析。

埃森哲在其发表的《数字孪生：打造生力产品，重塑客户体

验》白皮书中非常强调数字主线和数字孪生的密切联系。所谓生力产品指的是 Live Product。埃森哲认为，数字主线是贯穿于公司各个职能部门和产品生命周期的信息流，涵盖产品构思、设计、供应链、制造、售后服务等各个环节，乃至外部的供应商、合作伙伴和客户产生的数据，使其能对产品及其运行提供全景的动态信息，赋能数字孪生的开发和更

新。数字主线使得产品设计、制造和运维过程中所使用的流程以及所产生的数据能够链接、追溯和管理；而数字孪生是在产品设计至运维的整个生命周期内，使用经过数字主线管控的数据对产品进行建模、对产品的性能、行为进行仿真、预测、诊断和反馈。

六、数字孪生在制造业的典型应用场景

数字孪生技术在各个行业有广泛的应用场景。陶飞教授团队在《计算机集成制造系统》2018 年第 1 期刊登的“数字孪生及其应用探索”一文中，归纳了 14 种应用场景，后来又在论文中介绍了数字孪生在航空航天、电力、汽车、石油天然气、健康医疗、船舶航运、城市管理、智慧农业、建筑建设、安全急救、环境保护等 11 个领域，45 个细分类的应用（图 7）。

e-works 认为，数字孪生在制造业的应用前景广阔。其中，产品的数字孪生应用覆盖产品的研发、工艺规划、制造、测试、运维等各个生命周期，可以帮助企业推进数字化营销和自助式服务，有助于企业提升维护服务收入，创新商业模式；工厂数字孪生在工厂设计、建造，生产线调试、安装，工厂运行监控、工业安全等方面都可以对企业带来价值；数字孪生在供应链管理领域

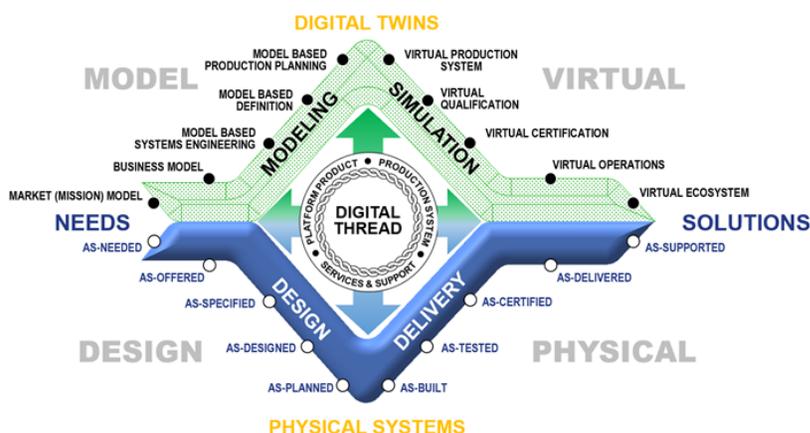


图 5 波音公司提出的基于模型企业的“钻石模型”

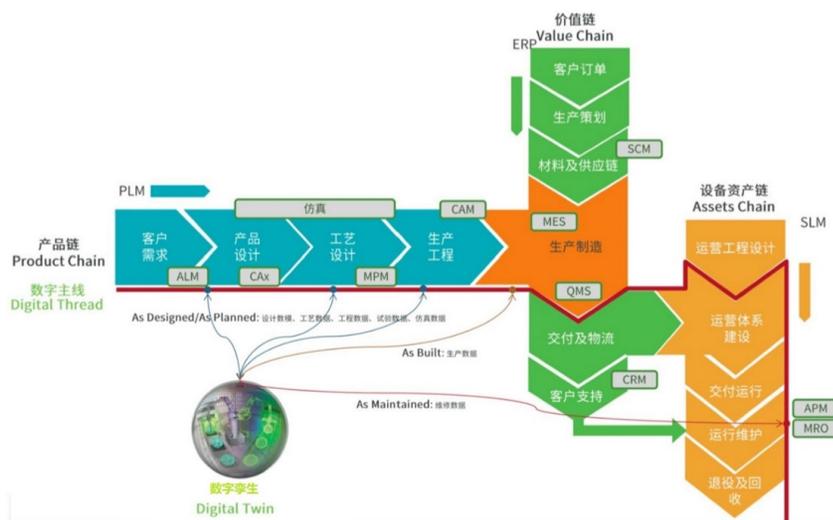


图 6 数字孪生与数字主线（来源：PTC）

也可以应用，例如车间物流调度、运输路径优化等。

以下介绍一些数字孪生在制造业的典型应用。

1. 产品的运行监控和智能运维

对于能够实现智能互联的复杂产品，尤其是高端智能装备，将实时采集的装备运行过程中的传感器数据传递到其数字孪生模型进行仿真分析，可以对装备的健康状态和故障征兆进行诊断，并进行故障预测；如果产品运行的工况发生改变，对于拟采取的调整措施，可以先对其数字孪生模型在仿真云平台上进行虚拟验证，如果没有问题，再对实际产品的运行参数进行调整。图8是Ansys的数字孪生技术在风电行业应用的案例。通过应用数字孪生技术，可以帮助风电企业避免非计划性停机，实现预测性维护和运行控制与优化。

对于航空发动机的数字孪生应用，由于每台发动机的飞行履历不同、飞行的环境不同、健康服役的寿命，以及维护历史差别很大，因此，应当对每台航空发动机建立其对应的数字孪生模型。GE航空对于正在空中运行的航空发动机进行实时监控，一旦出现故障隐患，可以通过对数字孪生模型的分析来预测风险等级，及时进行维修维护，显著提

升了飞行安全。GE航空通过数字孪生模型记录了每台航空发动机每个架次的飞行路线、承载量，以及不同飞行员的驾驶习惯和对

应的油耗，通过分析和优化，可以延长发动机的服役周期，并改进发动机的设计方案（图9）。

在数字孪生应用领域，GE与

11个领域，45个细分类



图7 数字孪生的工业应用（来源：陶飞教授）



图8 Ansys在风电行业的数字孪生应用案例



图9 GE航空的数字孪生应用

Ansys 公司开展了战略合作。通过数字孪生技术的应用，实现产品的健康管理、远程诊断、智能维护和共享服务。通过结合传感器数据和仿真技术，帮助客户分析特定的工作条件并预测故障，从而节约运维成本。GE 航空通过汇总设计、制造、运行、完整飞行周期的相关数据，预测航空发动机的性能表现：

- 将发动机传感器数据与性能模型结合，根据运行环境的变化和物理发动机性能的衰减，构建自适应模型，精准监测航空发动机的部件和整机性能；

- 将发动机历史维修数据中的故障模式注入三维结构模型和性能模型，构建故障模型，应用于故障诊断和预测；

- 将航空公司历史飞行数据与性能模型结合并融合数据驱动的方法，构建性能预测模型，预测整机性能和剩余寿命；

- 将局部线性化模型与飞机运行状态环境模型融合并构建控制优化模型，实现发动机控制性能寻优，使发动机在飞行过程中发挥更好的性能。

西门子将来自智能传感器的温度、加速度、压力和电磁场等信号和数据，以及来自数字孪生模型中的多物理场模型和电磁场仿真和温度场仿真结果传递到 Mindsphere 平台，通过进行对比和评估，来判断产品的可用性、运行绩效和是否需要更换备件

(图 10)。

在复杂装备的运维方面，可以通过 AR 技术，基于产品的数字孪生模型生成产品操作、装配或拆卸的三维动画。在实物环境下，透过各种穿戴设备或移动终端进行示教。PTC 提供了先进易用的 AR 应用平台。

2. 工厂运行状态的实时模拟和远程监控

对于正在运行的工厂，通过其数字孪生模型可以实现工厂运行的可视化。包括生产设备目前的状态，在加工什么订单，设备和产线的 OEE、产量、质量与能耗等，还可以定位每一台物流装备的位置和状态。对于出现故障的设备，可以显示出具体的故障类型。华龙讯达应用数字孪生技术，在烟草行业进行了工厂运行状态的实时模拟和远程监控实践，中烟集团在北京就可以实现

对分布各地的工厂进行远程监控。海尔、美的在工厂的数字孪生应用方面也开展了卓有成效的实践。

3. 生产线虚拟调试

在虚拟调试领域，西门子公司及上海智参、广州明珞等合作伙伴已开展了很多实践。虚拟调试技术在数字化环境中建立生产线的三维布局，包括工业机器人、自动化设备、PLC 和传感器等设备。在现场调试之前，可以直接在虚拟环境下，对生产线的数字孪生模型进行机械运动、工艺仿真和电气调试，让设备在未安装之前已经完成调试。

应用虚拟调试技术，在虚拟调试阶段，将控制设备连接到虚拟站/线；完成虚拟调试后，控制设备可以快速切换到实际生产线；可随时切换到虚拟环境，分析、修正和验证正在运行的生产



图 10 西门子的数字孪生应用案例

线上的问题，避免长时间且昂贵的生产停顿。

虚拟调试技术对企业的价值体现在：早期验证优化研发+工艺+制造的可行性，减少物理样机投入成本；减少去用户现场做机器人调试时间和出错率，节约出差成本；虚实融合后为整个工厂的数字孪生打好基础，工厂建成之后可以与 SCADA 系统融合，打造基于三维模型的可视化监控系统，实现工厂的数字孪生。

Maplesoft 公司的 MapleSim 平台提供了一体化的生产线虚拟调试解决方案（图 11）。2019 年，罗克韦尔自动化公司并购了 Emulate3D 软件，作为罗克韦尔 Factorytalk/DesignSuite 软件的一部分，可以实现对整个工厂自动化控制系统进行虚拟仿真和虚拟调试，还可以利用工厂的数字孪生模型对员工进行培训，降低工厂运营的风险。

美的集团旗下的美云智数的 MIoT.VC 系统提供了基于数字孪生的虚拟调试解决方案（图 12）。其组件库内置 1400 多个机器人组件，内置 KUKA、ABB、安川、川崎等各主流机器人协议；可以通过图形示教，快速进行机器人姿态设计、运动路径干涉检查和姿态合理性分析；支持机器人姿态和轨迹的离线编程与虚拟调试，与现场设备的实时联机；支持喷涂、焊接等机器人动作示教、离线编程及虚拟调试。该系

统支持 OPC-UA 和西门子 S7 两大工业协议。

4. 机电软一体化复杂产品研发

对于高度复杂的机电软一体化产品，可以在研发阶段通过构建产品的数字孪生模型，并通过工程仿真技术的应用加速产品的研发，帮助企业以更少的成本和更快的速度将创新技术推向市场。运用数字孪生技术，能够综合利用结构、热学、电磁、流体和控制等仿真软件进行单物理场仿真和多场耦合仿真，对产品进行设计优化、确认和验证，还可

以构建精确的综合仿真模型来分析实际产品的性能，实现持续创新。通过结合生成式设计技术 (Generative Design)、增材制造技术、半实物仿真技术，可以显著缩短产品上市周期。

GE 公司认为，从概念设计阶段开始推进航空发动机的数字孪生应用，更容易地将设计和结构模型与运行数据相关联，同时，还有助于优化设计，提高生产效率。精航伟泰测控仪器（北京）有限公司提供了基于模型的卫星数字孪生设计解决方案，可以最大程度地将验证后的设计模型自动转化为卫星的物理实现，例如可以根据相关设计模型自动生成

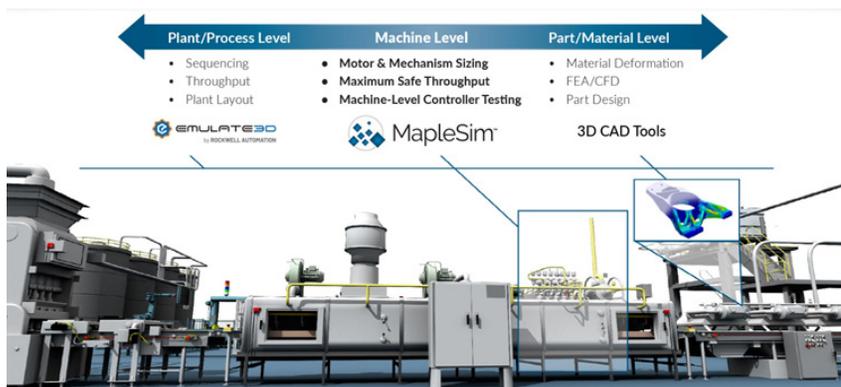


图 11 Emulate3D 和 MapleSim 虚拟调试平台



图 12 美云智数的 MIoT.VC 虚拟调试系统

星载软件的代码。

5. 数字营销

对于尚未上市的新产品，通过发布其概念阶段的数字孪生模型，让消费者选择更喜欢的设计方案，然后再进行详细设计和制造，这样有助于企业提升销售业绩。同时，通过构建基于数字孪生模型的在线配置器，可以帮助企业实现产品的在线选配，实现大批量定制。图 13 是比特视界（北京）科技有限公司（BITONE）为宝沃汽车开发的在线配置器，动感十足，可以查看各种配置的外观和内饰。

七、数字孪生对制造企业的 应用价值

IDC 在 2018 年 5 月发表的《数字孪生网络》报告中指出，到 2020 年底，65% 的制造企业将利用数字孪生运营产品和 / 或资产，降低质量缺陷成本和服务交付成本 25%（图 14）。

产品数字孪生应用的价值是通过虚实融合、虚实映射，持续改进产品的性能、为客户提供更好的体验，提高产品运行的安全性、可靠性、稳定性，提升产品运行的“健康度”，在此基础上提升产品在市场上的竞争力。同时，通过对产品的结构、材料、制造工艺等各方面的改进，降低

产品成本，帮助企业提高盈利能力；而工厂数字孪生应用的价值主要体现在构建透明工厂，提升工厂的运营管理水平，提高整体 OEE，降低能耗，促进安全生产等方面。要真正实现工厂数字孪生应用的价值，需要装备用户企业和装备制造企业进行深层次的合作。

GE 公司对数字孪生的应用价值给出了一段经典描述：数字孪生通过海量的设计、制造、检测、维修、在线传感器及运营数据来建立和获取信息，运用一系列高保真的计算的和基于物理实体的模型，以及高级分析方法来预测资产设备在其全生命周期的健康和绩效。数字孪生模型的准确率

度随着时间推移，通过更多数据来对模型进行精炼，以及类似设备部署其数字孪生应用而提升。模型随着数据的持续采集而不断修正。数字孪生模型提供了设备的详细知识，预测对各种可能场景的应对情况，并作为实时参照来构建各种应用系统，以实现优化各类服务，提高绩效和效率，改善运维、供应链和业务运营等业务价值。^[8]

数字孪生技术最早的倡导者之一，NASA 国家先进制造中心主任 John Vickers 认为：“数字孪生模型的最终目标是在虚拟环境中创建、测试和生产所需设备。只有当它满足我们的需求时，才进行实体生产。然后，又将实体



图 13 BITONE 开发的汽车在线配置器



图 14 数字孪生对制造企业的价值（IDC《数字孪生网络》报告）

生产过程通过传感器传递给数字孪生模型，以确保数字孪生模型包含我们对实体产品进行检测所能够获得的所有信息。”

另一篇 GE 发表于 2015 年的文章指出：数字孪生模型的优势是通过结合从设计到实时采集设备的数据等相关信息，来对设备在全生命周期进行优化。不仅可以降低原型设计或制造的成本，而且可以通过将实时数据导入数字孪生模型进行分析，从而预测故障，降低维护成本，减少停机时间。

八、数字孪生主流厂商和解决方案

当前，数字孪生领域在全球受到广泛关注。西门子、达索系统、PTC、Ansys、罗克韦尔自动化、Aveva、ESI、GE、SAP、Unity、微软、Altair、Maplesoft、Bentley、力控科技、华力创通、触角科技、优也科技、华龙讯达、美云智数、寄云科技、精航伟泰、比特视界和同元软控等国内外厂商提供了数字孪生的相关解决方案。

西门子的数字孪生解决方案覆盖全面，从设计工具、虚拟仿真、制造运营管理到工业自动化、物联网平台等关键技术，均提供相应的技术。为了建立更加完整的数字孪生应用模型，西门子在 CAD/PLM 等工业软件基础上，不

断加大投资，先后并购整合了质量管理、生产计划排程、制造执行、仿真分析等各领域领先的技术。

西门子的数字孪生应用分为产品数字孪生 (Product Digital Twin)、生产数字孪生 (Production Digital Twin) 和性能数字孪生 (Performance Digital Twin) 形成了一个完整的解决方案体系，并把西门子现有的产品及系统包揽其中，例如 Teamcenter、NX、Simcenter 等。

- 产品数字孪生：在产品的概念和设计阶段创建数字孪生后，使得工程师可以根据相应的要求仿真和验证产品属性：例如评估产品是否稳定，是否直观易用？汽车车身是否提供尽可能低的空气阻力？电子设备是否可靠？无论是涉及机械、电子、软件还是系统性能，数字孪生都可以用于提前测试和优化。

- 生产数字孪生：它涉及从工厂的机器、设备、传感器等整个生产环境的各个方面。通过在虚拟环境中仿真和调试，在实际操作开始之前，就可以识别错误和防止故障。

- 性能数字孪生：不断地从产品或生产线获得运行数据。这样可以持续监控来自机器的状态数据和制造系统的能耗数据等信息。这使得可以执行预测性维护维修，以防止停机并优化能耗。

Ansys Twin Builder 是一款

针对数字孪生的产品软件包，能帮助工程师快速构建、验证和部署物理产品的数字化表示形式。这款开放式解决方案可以集成任何 IIoT 平台，并且包含运行时部署功能，从而能够在运行过程中持续监控所用的每台资产设备。在 Ansys Twin Builder 的支持下，工业资产的连接功能与整体系统仿真充分结合，能帮助客户开展诊断和故障排除工作，确定理想的维护程序，优化每个资产设备的性能，并获得极富洞察力的数据，从而改进新一代产品。

最近，Ansys 与微软、戴尔、Lendlease 等联合推广数字孪生技术，共同组建了数字孪生联盟 (Digital Twin Consortium, www.digitaltwinconsortium.org)。Ansys 与众多伙伴的合作，表明仿真技术不再仅仅只是作为工程师设计更出色产品和降低物理测试成本的利器，通过打造数字孪生，仿真技术的应用扩展到各个运营领域，涵盖产品的健康管理、远程诊断、智能维护和共享服务等应用。

PTC 对于数字孪生 (数字映射) 的认知更强调数字世界与现实世界的联系。PTC 的数字孪生涵盖产品设计、制造、使用，再将使用数据回传进行监测分析，使得现实世界与数字世界之间的数据传递形成完整回路，加强现实世界与数字世界的连接。

随着工业企业生成越来越多的有关物理世界的的数据，PTC 将这些数据映射回定义其产品、流程和人员的 IT 系统，以增强数字主线。同时 PTC 的物联网平台 ThingWorx 和增强现实平台 Vuforia 等创造的数据，可以进一步发掘数字孪生应用的价值。

PTC 还与罗克韦尔、Ansys 等建立了合作关系。PTC 的 ThingWorx、Vuforia 与罗克韦尔自动化的 MES、FactoryTalk Analytics 以及 Industrial Automation 平台，可以简化企业的连接方式，实现更好的互联互通操作性。而在 ThingWorx 上快速添加 Ansys 工程仿真技术，通过两大技术平台之间建立联系，则有助于将原始数据转变为可采取行动的新型智能信息。

达索系统的数字孪生实现主要依托 3D EXPERIENCE 平台，将企业产品的开发、验证、生产、销售、运营全流程与企业项目管理流程整合，实现虚实融合与交互。3D EXPERIENCE 平台将相关技术和功能集成到一个统一的数字化创新环境中，创建数字孪生，从整个生态系统获取洞察力和专业知识，从而测量、评估和预测工业资产的表现，并以智能方式帮助企业优化自身运营。

达索系统与 ABB 建立了全球合作伙伴关系，为数字化工业客户提供独特的、从产品生命周期管理到资产健康的软件解

决方案组合。两家公司融合 ABB Ability 数字化解决方案和达索系统 3D EXPERIENCE 平台的优势，共同为客户提供先进的数字孪生解决方案，帮助客户以更高的整体效率、灵活性和可持续性运行。

Altair 作为全球仿真技术领先厂商之一，近年来进行一系列相关并购，制定了相应的数字孪生战略。Altair 数字孪生集成平台融合了物理和数据驱动的映射，以支持整个产品生命周期的优化。基于 Altair Activate，结合硬件在环和物联网功能，进行多学科系统建模，实现数字孪生技术。除此之外，Altair 与 ACROME 合作，基于 3D+1D 系统协同仿真引擎，推出了面向数字孪生概念的机电一体化仿真与实物实验平台相结合的专用教学套件。

SAP 在 2016 年发布了资产智能网络 AIN (Asset Intelligent Network)，并在 2018 年汉诺威工博会上发布数字孪生网络 (Networks of Digital Twins)，将制造商和运营商在产品的不同阶段的数字化映像数据真正打通。SAP 的数字孪生系统通过在数字世界中打造一个完整的数字化映射，实现了实时的工程和研发。在产品的使用阶段，SAP 数字孪生系统采集设备的运行状况，进行分析，得出产品的实际性能，再与需求设计的目标比较，形成产品研发的闭环体系。

这样的一个闭环体系，对于产品的数字化研发和产品创新有着非常重要的意义。

ESI 集团提出了混合孪生概念，可以对服务中的产品进行数值模拟，并得出可靠的预测性维护方案。Hybrid Twin 混合孪生模型的使用丰富了真实数据的虚拟样机并利用 AI 和机器学习使更准确的预测变得可行和实用。Hybrid Twin 监控系统实时变化，可准确预测各个产品特定行为的几率。通过构建 Hybrid Twin 混合孪生模型，ESI 集团帮助风电场的维护和监控成本平均降低了 30%。

Unity 基于自身实时 3D 技术和人机交互引擎，围绕数字孪生技术体系提供实时 3D 开发工具；同时面向特定应用场景，与合作伙伴共同推出完整解决方案。在 Unity 平台上，开发者可以完成从辅助产品设计、制造到最终产品上市的全生命周期，实现全流程的数字化。

微软 Azure 将数字孪生作为一项 IoT 服务，是一套构建可感知环境的 IoT 解决方案，帮助创建综合性的物理环境模型。它可创建空间智能图，对人员、空间和设备之间的关系和交互建模。从物理空间而非不同的传感器中查询数据。此外，它还能构建可重用、高度可缩放且可感知空间的体验，跨物理世界和数字世界将流式处理数据链接到一

起。

Bentley 面向数字孪生领域推出的 iTwin Services, 即数字孪生模型云服务, 可提供多范畴的对应服务, 其中包括概念创新、施工、检修、灾后重建、运营创新等服务。它可帮助持续审查项目状态, 且可向前或向后查询变更分类时间线上的任何请求的项目状态, 并实现任何项目时间线状态之间变化的可视化和分析可见性。

值得注意的是, Bentley 所提的数字孪生解决方案与 BIM 解决方案有明显的区别: 数字孪生服务于不同项目阶段的任务, 会遇到来自不同厂商、不同软件所创造的数据。打开和识别一个 BIM 模型, 往往需要原始的三维软件。而数字孪生技术给用户带来的效益是, 能直接查询不同软件创建的 BIM 模型, 直接对所有不同数据源的信息进行了解。

Maplesoft 提供用于虚拟调试的数字孪生解决方案。通过数字孪生实现基于仿真的电机选型、PLC 代码测试、离线和在线仿真等, 消除设备设计中的猜测。

力控科技数字孪生解决方案是通过集成三维可视化技术、快速建模技术、工厂设备实时状态监控技术、摄像监控技术等, 实现三维数字孪生工厂的整体管理。三维数字孪生工厂平台将车间三维高精度模型、工艺流程、设备属性、设备实时数据, 以及

工厂运营管理数据等进行融合, 直观地展示生产车间的工艺流程, 实现车间生产的远程控制管理, 提高车间的运营管理效率。同时为客户提供完整的、高附加值的产品解决方案, 实现企业的智能化与精细化管理。

华力创通提供产品的数字孪生解决方案, 服务 MBSE 驱动的多维度数字样机、复杂虚拟装配、复杂人机工效、多用途虚拟现实系统、数据质量管理和轻量化技术、高性能计算、工程模拟器、视景仿真可视化等业务。华力创通面向工厂的数字孪生解决方案, 则结合 MES、SCADA 等软件, 在通用虚拟现实平台软硬件支持下, 华力创通提供物理信息驱动下的实景三维工厂的虚拟现实人机交互体验系统, 通过全三维数据和业务数据的叠加, 实现基于虚拟现实增强现实的工厂数字孪生项目的落地。

美云智数提供了虚拟调试解决方案和数字孪生工厂解决方案, 在美的集团等企业应用, 取得显著效果。数字孪生工厂应用实现了设备联机、虚实结合、真实互动、设备故障预警和维修提醒。工厂审核效率提升 65%, 设备故障率下降超过 9%, 问题响应速度提升 30%。

寄云科技为大型制造企业构建了从单一装备到复杂系统的数字孪生, 通过对设备实时状态、检测和维护数据的智能分析, 实

现设备状态监测、预测性维护、生产效率分析、质量溯源和预测等多种智能应用。

优也科技的 Thingswise 工业互联网平台通过数字孪生技术可以面向生产全流程全周期来开发智能应用。

触角科技的数字孪生侧重应用新一代 MR/VR 头戴显示设备, 实时展示数字孪生三维场景与 IoT 动态数据, 并通过自然互动方式完成对场景中虚拟设备的多视角仿真操控; 结合真实工业生产环境与设备, 完成虚实融合的互动操作流程引导, 实现了新一代交互式电子指导手册; 全程录制面向数字孪生三维场景的仿真操作流程, 并作为资源共享给其他工作人员在同一三维场景中进行可视化回放, 用于特定任务的仿真验证与培训。

华龙迅达基于腾讯云推出木星数字孪生平台, 基于物理模型、传感器、运行历史等数据, 集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程的数据管理平台, 实现产品数据在虚拟空间中完成映射, 从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程数字将工厂物理空间的控制、运行、质量、物耗、能耗等数据在虚拟空间中建立实时镜像进行虚拟制造仿真, 并将仿真结果作用于物理空间现场, 助力企业提升资源优化配置能力、生产过程控制能力、均质生产保障能力、柔性制造能

力和敏捷生产能力。

同元软控面向航天领域，提供了数字伴飞和数字空间站等数字孪生应用方案。

精航伟泰则推出了基于模型的商业卫星设计验证平台。

九、数字孪生的推进策略

e-works 认为，数字孪生是制造业推进数字化转型和智能制造的战略举措和现实途径之一。对于制造企业而言，推进数字孪生应用需要建立明确的目标，以价值为导向，建立跨部门的推进组织，结合 IT、自动化、研发、仿真、工艺、测试、设备运维等部门的团队，并引入专业咨询机构，务实推进。

数字孪生应用是 IT/OT 融合的典型应用，要实现虚实映射，需要搭建工业互联网平台，明确应用对象的重点是企业生产的产品，还是工厂，亦或是供应链；面向产品的数字孪生应用重点是支持产品研发、市场推广还是运营维护；面向工厂的数字孪生应用重点是工厂或产线建设期间的虚拟调试，还是工厂运营阶段的可视化与优化。同时，企业需要建立全三维设计、仿真驱动设计的技术基础和组织体系。推进数字孪生需要制定整体规划，但结合具体目标，分步实施，不能

搞“大而全”的应用。推进数字孪生应用必须合理把控风险。

埃森哲《数字孪生：打造生力产品，重塑客户体验》白皮书提出了推进数字孪生应用的四个阶段（图 15）。

在数字孪生的实际应用当中，不可能也没有必要盲目追求所有数字孪生模型的“高保真”。因为保真度的提升意味着构建数字孪生模型的难度和成本的大幅度提升，同时，对数字孪生模型进行分析的复杂性和耗时也会迅速攀升。数字孪生模型越复杂，也就越难以实现虚实映射的实时性。在实际应用当中，对所有零部件的多物理场都进行复杂的三维仿真耗时很长，往往会进行降阶处理，通过一维仿真对产品的整体性能进行分析。因此，企业需要根据实际应用需求和性能价格比来选择构建不同保真度的数字孪生模型。

十、数字孪生在制造业的应用前景展望

近期，关于数字孪生的讨论和争论很多，这有利于制造业正确理解和推进数字孪生的应用。e-works 认为，数字孪生是一个既具有前瞻性，又易于被各界理解的创新理念，数字孪生这个术语本身的“生命周期”会很长，而不是短期流行的时髦词汇（Buzzword）。数字孪生理念经过概念炒作阶段之后，会逐渐走向务实推进的阶段。

目前，围绕数字孪生技术的讨论更多地还集中在概念探讨阶段，我国制造企业真正开展的实际应用还处于初期阶段。正如前一阶段各方面热议，工业互联网缺乏“杀手级”应用一样，企业也应该在产品数字孪生和工厂数字孪生领域找到自己的“杀手级”

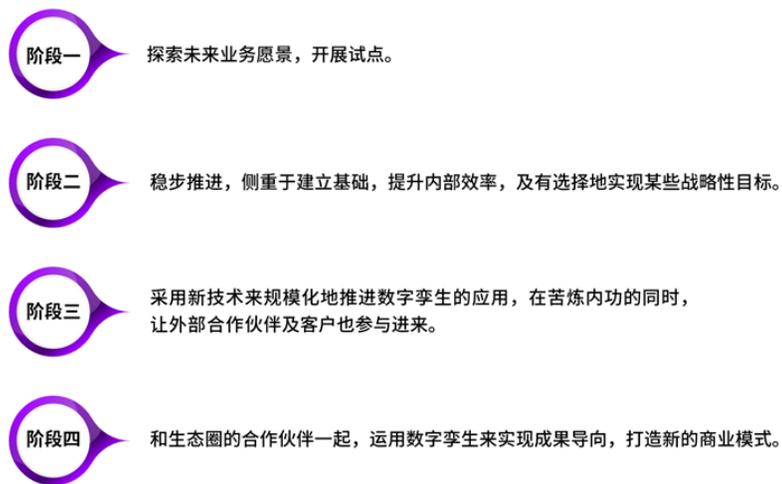


图 15 埃森哲：推进数字孪生应用的四个阶段

应用。

即使没有数字孪生，很多装备制造企业也已经开始通过工业互联网（工业物联网）平台，对正在服役的装备进行远程监控，并利用工业大数据和人工智能技术进行预测性维护。那么，通过数字孪生技术实现虚实融合，可以进一步通过对这些装备运行过程的实时仿真和优化，提升设备运行绩效，避免异常事故。同样，

即使没有数字孪生，很多制造企业也在建设生产监控与指挥系统，实现工厂的可视化、透明化。那么，通过数字孪生技术实现虚实映射，可以更加精准地把控工厂、车间、产线和设备的生产、能耗、质量、物流供应的实时状态，从而提升工厂的运行绩效，避免设备非计划性停机。因此，数字孪生应用给制造企业带来的价值是实实在在的。

e-works 建议，制造企业应当组织针对数字孪生的培训，深入研究数字孪生的理念，数字孪生相关产品和解决方案，结合自身的产业特点和实际需求，找到数字孪生应用的突破口。在此基础上，制定数字孪生应用规划。

数字孪生应用，长路漫漫，但路就在脚下！从数字孪生应用中获益的机会，属于有准备的企业！ **MT**

鸣谢：本文的第八部分主要由 e-works 首席记者王阳撰写。在本文撰写过程中，得到了李培根院士的指导，并多次向陶飞教授讨教，也与赵敏、彭慧等专家进行了探讨交流，在此深表感谢！

参考文献：

- [1] <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>
- [2] <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>
- [3] <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>
- [4] <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>
- [5] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>
- [6] <https://www.sap.com/products/digital-supply-chain/digital-twin.html>
- [7] <https://www.ptc.com/en/industry-insights/digital-twin>
- [8] <https://www.ge.com/research/offering/digital-twin-creation>

制造业的新现实

——利用增强现实应对工厂车间的挑战



美国机械工程师学会

编者按：本文为美国机械工程师学会（ASME）于2019年10月在其杂志《机械工程》上发布的技术专题报告，本刊获得授权翻译刊载。报告原文可以在其网站（go.asme.org/MEmagazine-special-reports）获取。

引言

提到增强现实（AR），多数人都会联想到游戏，或者联想到宜家那款能帮助消费者装配新家具的AR应用。然而现在，要求极高的制造业也要开始应用AR了。

增强现实是指在现实世界的视图中叠加图形、三维图像、文本、视频等数字信息。多年来，人们一直讨论在制造业中应用

AR，但是实际部署起来却进展缓慢。然而，从试点、试验阶段到大规模的日常AR使用，制造商对其工厂使用的技术不断进行探索，改变了这一情况

ARC 顾问集团（ARC Advisory Group）（位于马萨诸塞州戴德姆市）分析师因德里特·肖克尔（Inderpreet Shoker）认为，“AR在制造业的应用还处于起步阶段。但是如今业内有很多创新项目和活动正在

进行。我相信，在接下来四五年的时间里，AR会快速应用起来。”

“我们现在试图实现的愿景和大概20年前的愿景是一样的。但是当前技术的发展真的让它有可能实现了。”

AR在制造业中的出现并不单纯是重大技术突破的结果，而是众多组件技术不断发展进步的结果，包括传感器、照相机、定位与地图创建、CPU和显示器。肖克尔表示：“大量的技术进步使

得 AR 在制造业的应用更加可行。电池技术、语音识别、音频转文本和数据管理领域取得的进步都提升了 AR 的可行性。”

洛克韦尔自动化公司 (Rockwell Automation) (位于密尔沃基) 先进技术部总监大卫·瓦希科 (David Vasko) 表示：“我们和虚拟现实打交道已经二十多年了。但是相比之下增强现实是新技术，这在一定程度上是因为和虚拟现实相比，增强现实对计算能力的要求更高。”例如，微软公司 (Microsoft) 的 HoloLens 智能眼镜，就是一款 AR 眼镜，“它每秒能产生一万亿个像素。这样，你就可以在真实的空间里握住一个虚拟的物体，即使头动了，物体也能保持不动，”他解释道。

总之，瓦希科说道：“最近我们才发现这些工具具备 AR 需要的能力和通信带宽。我们现在试图实现的愿景和大概 20 年前的愿景是一样的。但是当前技术的发展真的让它有可能实现了。”

一、使用数据

技术的进步也为制造业带来了挑战。产品和流程变得更加复杂，对质量的要求越来越高。同

时，一大批婴儿潮出生的一代人到了退休年龄，他们要带着自己的知识离开制造业企业了。

据德勤咨询公司 (Deloitte) 统计，在未来的十年里，制造业总体上可能有 240 万个岗位空缺。

与此同时，各工厂的数字化和互联化程度加大，个人资产和大量物联网 (IoT) 传感器产生了遍布工厂网络的数据洪流。但是，数字革命带来的影响还未波及从事日常维护和运营的工作人员。他们工作的时候，仍在使用打印出的纸质文件和装订起来的说明书，而这样往往会延误工作，出现差错。

AR 为这些员工打开了数据使用的大门。

PTC 软件公司 (总部位于波士顿) 增强现实产品执行副总裁迈克尔·坎贝尔 (Michael Campbell) 说道：“制造商们通过 AR 技术，利用他们已有的工具，如物联网、计算机辅助设计 (CAD)、产品生命周期管理 (PLM) 和其他数字内容，以有助于人们工作的方式使用。而且，AR 是从工程投资中获得价值的另一种方式。诸如数字设计这样的方式蕴含着大量的价值。AR 将数据在物理世界中呈现出来，而不是显示在平板电脑上。”

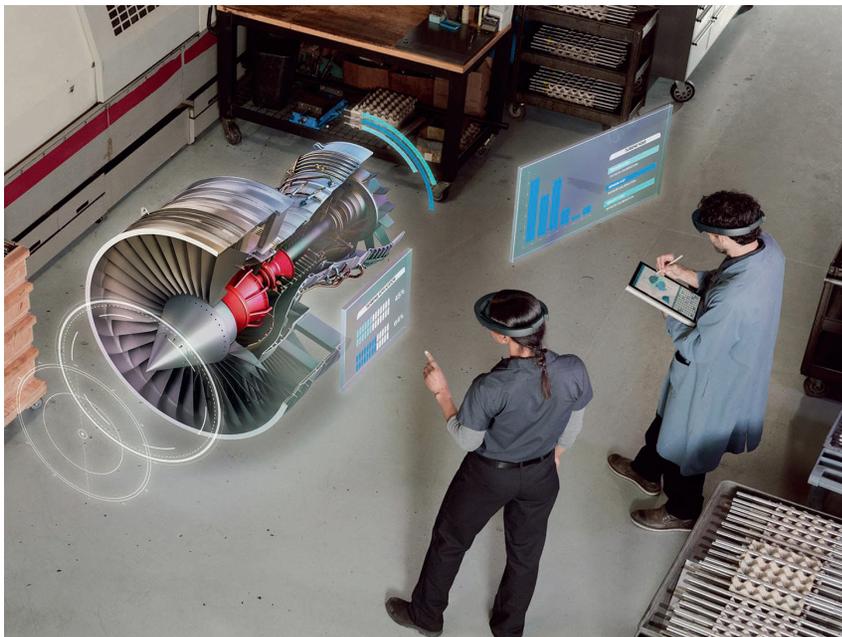
虚拟现实、增强现实和混合现实

虚拟现实 (VR) 是计算机生成的一种环境，它可以模拟真实世界或想象的世界中的物理存在。用户佩戴一个头戴式耳机，然后通过专门的软件和传感器，沉浸在 360 度的全景仿真世界中。

增强现实 (AR) 是用计算机生成的感官输入，例如声音、视频、图形或其他有用的信息，补充物理环境，其本质是将数字信息叠加在物理世界中。一些人认为，广受欢迎的智能手机游戏《精灵宝可梦 GO》就是消费者使用 AR 的一种形式：它能让玩家在真实世界中找到对应的虚拟角色。

混合现实 (MR 或 XR) 试图将 VR 和 AR 结合起来。通过合并现实和虚拟世界，产生新的可视化环境。在这个环境里物理和数字对象共存，并实时互动。虚拟对象 (全息影像) 被固定在现实空间的某些点上，这样用户就可以把它们看作是真实的对象了。

AR 也是将信息传递给工作人员的一种有效方式。位于旧金山的 Scope AR 公司专为工业公司提供 AR 解决方案，该公司 CEO 兼联合创始人斯科特·蒙哥马利 (Scott Montgomerie) 认为：“人们看着打印的 2D 说明书，



试着将其应用在 3D 工作中，在心里把一个东西匹配到另一个东西上的过程是非常困难的，通常会出现误解和错误。但若能以 3D 形式将事物的构建方式展现在你面前，错误就会少得多了。”

AR 还是一种从用户视角处理数据的工具。瓦希科认为：“制造商们正在努力处理海量数据。AR 技术可以让用户根据其职责获取所需的数据。这一点很重要，毕竟如果我们只为人们提供超出其所需信息一千倍的信息，也不会有什么好处。”

二、在工厂中使用 AR

使用 AR 的关键之一就是

配备先进的技术装置，包括智能手机和平板电脑，用以查看数字信息。其他类型的查看器无需工作人员手持，如 Google 眼镜等诸多样品，可将图像投射到眼中；再如微软的 HoloLens 智能眼镜，可以显示数字信息的全息影像。

多年来，AR 查看器也为制造商带来了诸多问题。佩戴 AR 眼镜和头戴式耳机，“有很多不同的折衷方案亟待敲定或权衡，”蒙哥马利说道，“为了提供沉浸式的体验，你想要视野更大更开阔。这就需要更大的显示器，也就意味着重量和耗电都会增加，还会降低佩戴的舒适度。所以，有很多折衷方案还一直在（和硬件制造商）商讨中。”

对于在工厂车间里长时间工作的人员来说，舒适度和功率是尤其困扰他们的问题。因此，AR 在制造业中的应用主要还是依赖于智能手机和平板电脑。

不过，多家公司一直在致力于解决上述问题，免提设备也在快速发展。坎贝尔表示：“数字眼镜一直是 AR 应用的一大瓶颈，但它也在朝着更好的方向发展。每个季度，数字眼镜领域都会出现一些重大的创新发明。”

很多观察员指出，新款微软 HoloLens 2 代眼镜具有更宽阔的视野，在设计上，长时间佩戴也很舒适，这是 AR 查看器发展的关键一步。

就其本身而言，RealWear 公司在其 HMT-1 眼镜的研发上采取了截然不同的方式。RealWear 公司位于华盛顿温哥华，主要提供知识转移平台，专为工业应用打造加固型可穿戴平板电脑。HMT-1 眼镜可以安装在安全帽、棒球帽或者防撞帽上，呈马蹄形，上面装有一个微型显示器，佩戴后位于使用者视线下方，距离使用者面部仅有几英寸，固定焦点 1 米。使用这款眼镜的感觉，就像是在看一台 7 英寸的平板电脑，或者汽车内距司机几英尺的仪表盘，RealWear 公司 CEO 兼联合创始人



安迪·洛厄里 (Andy Lowery) 如是说。

他解释道：“你可以低头快速地扫一眼屏幕，获取一些指令，然后抬头继续工作，就像开车时扫一眼仪表盘一样。”

该装置可通过语音控制操作，上面装有一个麦克风和用于记录工作的摄像机，内存 2GB，存储器 16GB（可扩展到 256GB），可通过蓝牙和无线网络连接。它专为解放双手设计，可以让工作人员安心地专注于现实世界中的工作——这是很多工业环境中非常重要的一个因素。和其他装置一样，工作人员能够用这款装置与主管和专家沟通，从而获得支持。

这项技术还具有其他特点，使其更适合在工厂使用。例如，在嘈杂环境下，RealWear 公司的 HMT-1 眼镜通过四个麦克风和高

级算法，使用其先进的降噪技术，能够从工厂的噪声中识别出工作人员的声音。

洛厄里表示：“我们在最大程度上消除外界的噪音，将所有背景噪音降到零，几乎达到静音状态。”

作为对降噪功能的补充，该装置具备一个语音接口，它使用特定的辅音和元音来识别简短且简单的指令，从而更容易在嘈杂

环境中提取出语音指令。

“如果技术人员不确定要拧哪些螺丝，专家只要在 Chalk 上圈出正确的那些，技术人员就能看见。”

与此同时，PTC 公司推出一款应用，叫做 Chalk。通过这款应用，工作人员可以和主管或专家实现远程共享实时音频以及正在接受维修的设备的视频，并在实际场景中标记出来，方便大家沟通。

坎贝尔说：“专家利用现场技术人员共享的视频进行远程指导，专家在这款应用中所做的注解可以‘贴’在实际的设备上。如果技术人员不确定要拧哪些螺丝，专家只要在 Chalk 上圈出正确的那些，技术人员就能看见。”此外，这款应用还可以定位和绘制正在讨论的区域，即使摄像机





三、在工作中使用 AR

AR 最常见的一种用法是无论工作人员身在何处，都能通过丰富的信息交流实现彼此之间的互联。肖克尔表示：“在目前的制造业中，远程通信是使用最频繁的 AR 应用之一。如果在距离较远的一处设施，有东西坏了，AR 能够轻松实现由专家远程指导现场人员解决问题。”

罗克韦尔自动化公司在其业务中第一次使用 AR 就采取了这种方法。他们的工厂遍布世界各地，使用的都是其控制系统。每当系统在一个工厂首次安装时，罗克韦尔公司都要确定系统运转是否正常。瓦希科说：“通常我们都是派人乘飞机到那个工厂去检查，很费时间，差旅费用也很高。”而现在，罗克韦尔公司会把 HoloLens 耳机寄给工厂，然后让工厂的制造专家、安全专家以虚拟的方式与罗克韦尔的专家合作，进行检查。“然后我们就记录下系统在那个时间的安装状态。这样不仅能快速完成工作，费用也很少。”他说道。

正是由于 AR 具备这样的能力，所以它适用于执行许多检查和维修任务，这也是 AR 最常应

的角度改变，画出的虚拟标记也还会显示在实时视频的正确位置。

PTC 公司还在其软件中添加了一种功能，称为高级 Model Targets 360。该功能利用云端的深度学习和神经网络来从各个角度自动识别对象。工作人员只要靠近对象，系统就会立刻开启识别程序。

一些公司也在发展能让 AR 更易使用的平台和工具。例如，一直以来，开发 AR 使用的内容就是一项耗费时间的工作，通常需要大量的专业知识。为

了简化这个过程，许多公司已经开发出了用于创建工作说明的工具，以及其他无需使用传统编码的内容。查看 Scope AR 的解决方案，“就像是在做 PPT，你可以把东西拖过来放在这”，蒙哥马利说道，“你可以拿来一个 3D 模型，添加简单的动画，演示如何执行任务——比如，用扳手卸掉一个螺栓。”

通过上述方法，各公司能够快速创建内容，无需高技能的 IT 人员来操作。

用的领域。只要维修人员能够掌握他们面前那台机器的相关信息，或者能够快速请求专家进行远程实时指导，他们就能迅速完成工作，从而避免因维修导致的停机时间或者缩短机器停止运行的时间。

瓦希科说道：“停机时间是一个极其关键的问题。在自动化装配过程中，设备出现意外停机，每停一分钟会耗费数万美元。所以，这就很容易知道实现更有效的维护和检查有多大的帮助了。”

AR还可以帮助减少这些过程中的文档错误。肖克尔表示：“制造业的很多检查都是使用纸质表格完成的。但是有时候，检查人员并不能记录下全部信息，或者写入了有误的内容，或者丢失了纸质记录。”利用AR，检查人员可以当场捕获检查信息，然后立即将其发回中央系统，并自动格式化报告。

很多公司也看到了AR在改善培训方面的巨大潜力。肖克尔说：“你可以用AR把流程的步骤，一步一步按顺序记录下来，生成指令，这样人们以后就按照这个步骤操作了。”

格芯公司（Global Foundries）是一家总部位于加利福尼亚州圣克拉拉市的集成电

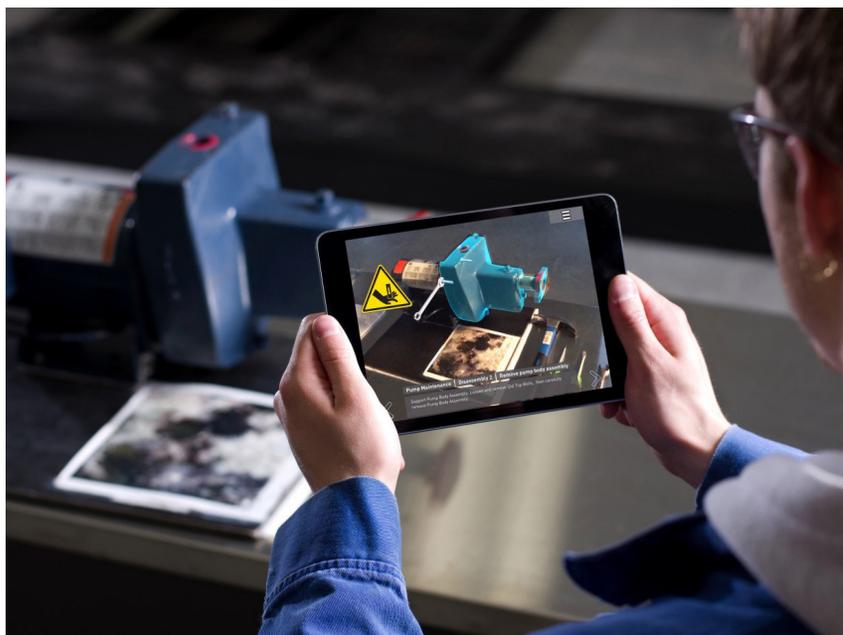
路制造商。他们一直使用PTC公司的Expert Capture AR软件记录工厂的标准作业程序（SOPs）。该公司的专家们在执行某项指定程序时，佩戴AR装置记录操作步骤；然后视频无缝流入编辑程序，几个小时后就可以发布了，而不是像传统的视频采集那样需要花费几天的时间。格芯公司首席信息官（CIO）办公室的全球创新主管DP·普拉卡什（DP Prakash）表示：“我们能够高速高质地创建这些SOP，所以，现在专家们可以用一种更加有效的方式进行教学。”

佩戴AR眼镜的技术人员用扭矩扳手将其拧紧，拍张照片，保证工作已适当完成，然后就去处理下一个紧固件了。该系统使

效率从42%提高至了46%。

之所以培训对格芯公司尤为重要，是因为“摩尔定律的淡出，”普拉卡什说道。也就是说，过去几十年里，芯片速度的持续增长和芯片尺寸的不断缩小不再是必然的了。他说：“我们不能还是只关注所谓可预测的创新。”相反，公司现在关注的是更加专业的芯片，这要求在制造业中具有更多的灵活性和生产力——而这一要求反过来需要快速有效的培训。

普拉卡什表示，在工厂车间的传统培训方式是“相关人员在相对嘈杂的环境中，为一线员工提供指导”。现在，格芯公司能用AR在工厂车间进行培训。最初做试点项目的时候，AR的使用



使培训时间减少了高达 50%，公司现在全面推出了基于 AR 的培训。他还指出，当问题出现的时候，能够让专家通过 AR 远程指导工作，这不仅是半导体行业在培训方面的一种变革，更是全世界其他领域的一种变革。“操作设备的人员能够继续每天接受培训，而且他们在工作中表现得越来越好。”普拉卡什如是说。

除了检查、维修和培训以外，AR 现在还参与到更多与生产有关的流程中。例如，波音（Boeing）公司，是在制造业使用 AR 的开创者。曾用 AR 指导员工完成新喷气式飞机 130 英里左右的线路安装的复杂流程。通过使用基于智能眼镜和 Upskill AR 软件的语音或方案，员工不用扭头看纸质的说明书或者笔记本电脑，就可以知道他们现在需要做什么。借此，波音公司的生产时间缩短了 25%，在这个流程中的错误率基本降低至零。

BAE 公司是一家总部位于伦敦的全球制造商。该公司使用 PTC 公司的 AR 技术指导员工为混合动力公交车组装电池。坎贝尔介绍说：“电池板和电池定位架需要按特定的顺序组装在一起。”公司用 HoloLens 查看器取代了

纸质说明书。根据操作人员的需要，HoloLens 可以将步骤信息以 3D 形式呈现在他们面前。这样就节省了组装电池的时间，缩短了产品进入市场的时间，并且将人员培训的效率提高了 40%。坎贝尔指出：“它能为 BAE 公司提供审计轨迹，显示其已经正确完成的工作。”

各种制造业务中都能使用 AR 技术。Scope AR 公司的蒙哥马利认为：“AR 技术对小批量、高强度的工作十分有帮助。”

比如，洛克希德·马丁公司（Lockheed Martin）在 NASA 的猎户座载人航天器上使用 Scope AR 公司的技术进行深空探测。以前执行紧固件程序，工作人员必须查阅冗长的说明书，才能准确定位到每个紧固件，然后将其拧紧。接下来，质量保证人员会过来，确保工作已妥善完成。“而现在，工作人员使用一副 AR 眼镜，就可以在 3D 空间里看到每个紧固件的实际位置以及所需的扭矩设置。他们用扭矩扳手将其拧紧，拍张照片，保证工作已妥善完成，然后就可以去处理下一个紧固件了。”使用 AR 让实际操作工作减少了 40%-50%。航天飞机有六万个紧固件，预计每个

紧固件能节省 38 美元左右。在识别电缆束紧固件位置或者对齐应变仪和传感器等程序中，洛克希德·马丁公司减少了 91%-93% 的实际操作工作。

而另一方面，AR 也适用于需要进行大量操作的制造商。在联合利华英国冰淇淋工厂的一个试点项目中，蒙哥马利表示，公司利用 AR，使通常在工厂周围巡查的管理者们远程协助工厂员工（他们中的很多人没有制造业工作经验）解决故障。该公司还使用基于 AR 的使用说明，便于员工更好地了解不同程序的操作方式。总之，“员工们的错误率大幅降低，而且，使用 AR 说明书工作时，意外的停机时间也减少了 50%。”他说道。

AR 还可以帮助制造商解决由于退休导致的劳动力短缺问题。通过和专家远程连线，让他们的经验和知识在更多操作中发挥作用。而且，比起到较远的地方出差，有经验的专家们可能更愿意留在工作岗位上。AR 能够轻松获取不同程序的信息并进行共享，“这样有助于公司获得某个领域的专业知识，而这些知识只能从经验中得到，我们正在失去的就是这些知识。”坎贝尔解释道。

四、从全局观中看 AR

除了 AR 的单点解决方案以外，一些制造商和 AR 供应商也在寻求其他方案，旨在确定如何将该技术与其他正在设法在工厂中使用的技术相结合。现在，所有公司都在发展数字工厂，充分利用 IoT、云、分析学、无线连接和虚拟现实等所有技术，而 AR 一定会在这一趋势中发挥关键作用。例如，配有 AR 装备的维修工人利用设备上的 IoT 传感器，能够实时看到他们面前某台设备的运行情况，以及机器内的所有零件。

人工智能（AI）和 AR 结合使用，潜力更是巨大。二者一起使用，有助于制造商们更加充分地利用预测性维护功能。或者，正如肖克尔所说，“也许 AI 可以用来指导某个培训新项目内容的创建，或者分析某台故障设备的数据和性能，从而为员工提供适当的维修说明。”

“你可以想象一下，如果把画面快进播放，在路过一家工厂时，你可以实时看到每台机器的

所有相关信息：当前的运行数据、相关说明、来历、周围机器的运行情况、谁负责操作或者谁负责维修。”

更广泛地讲，AR 能帮助制造商处理其日益增长的数据量。格芯公司的某个工厂有上万种工具，每种工具的众多传感器都会产生数据流。据 DP·普拉卡什表示，“我们收集了很多数据，但是用现有的方法，我们所能看到的只是其中的 5%，很多行业都是这个比率。”

AI 具备快速管理和分析更多数据的潜力，且几乎可以立刻将结果反馈给配有 AR 装备的员工。

他还表示：“我们预见到 AI 引擎持续工作，近乎实时地告诉工厂车间工作人员，所有数据中的哪些信号比较重要，哪些需要及时关注。车间里的工作人员佩戴着智能眼镜，就能得到重要指标的相关信息，这比以前快多了。”

总之，关于 AR，还有很多应用案例和技术值得制造商们考虑。格芯公司并没有全无章法地去探索，而是为 AR 的应用制定了发展路线图，一步一步实现增值。先是在文档中使用 AR，而后

在培训及解放双手的自动化操作中使用，最终将其与 AI 及“XR”（即 AR、虚拟现实和混合现实）结合应用。普拉卡什表示：“我们认为，最终的转型就是将 AR 与 AI 联系起来，这也为我们实现转型指明了方向。”

实际上，AR 为制造商们日益增加的数字化操作提供了一个强有力的工具。正如蒙哥马利所说：“AR 是一座跨越计算机性能和现实世界之间鸿沟的桥梁。”

坎贝尔说：“你可以想象一下，如果把画面快进播放，在路过一家工厂时，你可以实时看到每台机器的所有相关信息：当前的运行数据、相关说明、来历、周围机器的运行情况、谁负责操作或者谁负责维修。这才是我们努力的方向。”

这种愿景虽然还未实现，但是指日可待。瓦希科认为：“大家对 AR 还是很感兴趣的，因为它能够实现更加稳定的操作，增加运行时间，满足人们的需求。如果工厂中的每个人都有这样的一副耳机，那么在需要时，他们就可以借此寻求帮助了。制造业的生产力也会因此提升。所以，AR 技术将在制造业实现广泛的应用。” **MT**

中国机床之路，为什么越走越窄



北京联讯动力咨询有限公司 中国科协智能制造学会联合体 林雪萍

前言：十八罗汉陨落

随着中美科技战的升级，芯片断供像是推翻的多米诺骨牌，从芯片到软件，从材料到半导体设备，一张张底牌被翻出向上。担忧就像一层一层剥洋葱一样开始蔓延，不得不让人对我国的机床行业感到深深地担忧。作为工业母机，中国机床产业，一

直大而不强，不大反弱，高端设备的制造举步维艰，在中端领域则受到中国台湾机床的侵蚀。

中国机床的历史，和中国的工业体系紧密地联系在一起。一五期间的 156 工程项目和向西部地区挺进的大三线建设，基本确立了中国工业体系的框架。这其中，18 家国有机床厂，堪称是“十八罗汉”（图 1），曾经起

到定海神针、举足轻重的作用。

然而这个在计划经济下形成的体系，经过四十年的洗礼后，也已经摇摇晃晃，一直未得到认真的修补，许多地方甚至已被损害。而在加入 WTO 之后，开放的、需求激增的全球化市场，为这个体系注射了一剂强心针。一个全球化的补丁，让它又能向前狂奔十年。

中国机床十八罗汉发展历程图谱

©南山林雪萍



图 1 十八罗汉归宿图（自绘图，版权所有）

然而，这样的体系终究是脆弱的。在更深层次的市场竞争中，整体衰落，也是难免的。当年的中国机床行业十八罗汉，最后归宿基本是黯淡无光。要么被并入到大的工业集团里，要么被民企并购，要么破产倒闭，保全下来的仅剩济南第二机床厂。

除了济南二机床，中国十八罗汉基本全军覆没，这说明中国机床体系，已经走到尽头。中国机床需要重构一套全新的体系。

那么，全球机床在如何变化？中国机床之路，为什么越走越窄？

一、机床天下大势

美国 Gartner 公司对世界机床行业的统计调查显示，全球机床消费在 2019 年为 821 亿美元，这是自 2010 年世界开始从全球经济大衰退中恢复以来，机床市场的最低水平。在这个下降通道中，2019 年中国机床消费在全球的占比，十年来首次低于全球的 30%。

美国在全球经济下行的趋势中，2019 年消费了 97 亿美元的机床产品，同比降低不多。随着制造业向北美回归，美国机床消费，也呈现出回岸制造满足本土消费的特点。

德国产量虽有滑坡，但德国

和美国在全球机床生产的份额均有所增加。而其它机床生产排名前 15 位的国家和地区，在全球机床生产所占份额增长的国家只有意大利、法国、英国和加拿大，显示出了全球机床生产的重心从亚洲向欧洲转移的明显势头。

从 Gartner 的这些数据可以看到，机床消费正在从亚洲流失，中国力量变得更弱，而美国和欧洲都有所抬头。可以说，德国、日本的领头羊位置，牢不可破；瑞士偏守高端一隅，美国和中国台湾地区则是发展中的大变数。而中国机床，还有更大的心病，就是高端机床久攻不下。

十五年来，中国高端机床行业跟德日瑞士的机床差距越来越大（济南二机床是唯一的例外）。行业规模曾经全球第一、第二的沈阳机床和大连机床，都不得不债务重组，只是一个大局之下

的缩影。

二、起落：十年一次的反转周期

2001 年到 2012 年期间，入世十二年，正是中国机床行业突飞猛进的时代。而在金融危机的时候，中国一举跃升到全球第一大机床生产国，一直保持到现在（图 2）。2019 年中国机床产量 194 亿美元，全球份额仍然达到 23%。

然而，中国大陆机床行业处于严重的贸易逆差状态，2015 年进出口逆差达 54 亿美元（图 3）。中国机床的贸易逆差，全球排第 60 名。

根据 Gartner 的报告，全球第一大和第二大经济体，机床消耗量分别是第二和第一。然而具有讽刺意味的是，全球头 60 名进出口差额中，机床贸易逆差，

Production Share of Three Leaders

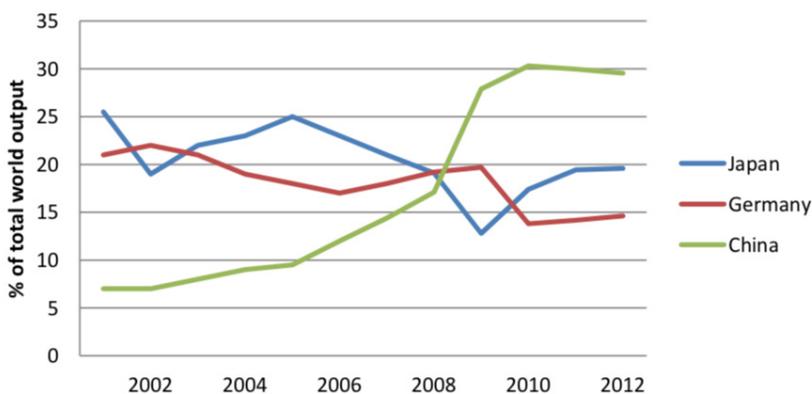


图 2 三大机床生产国的产值变化（2002—2012 年）
（来源：Gartner）

中国和美国分别名列倒数第一和第二（图4）。

在2017和2018年，中国贸易逆差仍然稳定在50多亿美元。直到2019年，这个数据才在大环境剧烈变动之下得到了缓和，贸易逆差降为28亿美元。

中国机床2019年出口占比大约为20%，但出口最重要的市场是越南（10.8%）和印度（8.8%）等。这和中国工厂向东南亚的搬迁，呈现了高度吻合的特征。

对于许多相信后发优势的人而言，“弯道超车”不仅没有出现，反而出现了“弯道脱轨”的现象。

三、国际化并购，从全面出击到一路下滑

在中国机床行业火爆发展的时候，国际化并购曾经被寄予扭转时局的厚望。

2004-2010年期间，中国采用全新的策略，走向海外市场，并购国际品牌，成为一场盛宴。除了秦川机床在美国收购了从事拉削机床生产的联合美国工业UAI，重庆机床并购英国PTG公司三个品牌获得了螺杆机床的技术，中国机床行业的重大海外并购，大多集中在德国。沈阳机床和北一机床分别收购了龙门铣床的顶级品牌希斯和瓦德里希科堡，而在平面磨床领域占据40%

2015年机床行业进出口对比（亿美元）

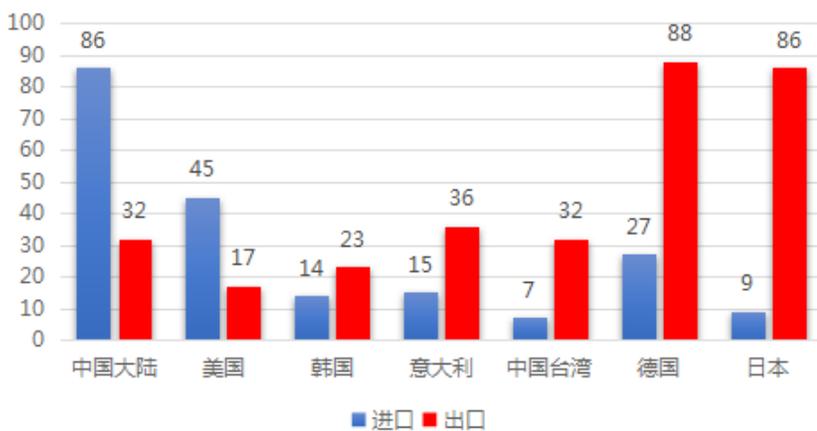


图3 中国逆差最大，日本顺差最大
(来源: Gartner 2016年机床报告)



TRADE BALANCE

2015

Country	Exports (USD)	Imports (USD)	Trade Balance (USD)
1. Japan	8,625.5	940.5	7,685.0
2. Germany	8,792.0	2,730.8	6,061.2
3. Taiwan	3,186.0	720.0	2,466.0
4. Italy	3,641.1	1,470.9	2,170.2
5. Switzerland	2,586.5	571.7	2,014.8
6. South Korea	2,342.0	1,407.0	935.0
7. Spain	850.9	442.8	408.1
8. Austria	697.1	396.3	300.8
9. Czech Republic	693.8	610.6	83.2
10. Singapore	366.0	305.7	60.3
11. Belgium	954.7	903.6	51.1
12. Finland	129.9	88.8	41.1
13. Hong Kong	750.0	744.0	6.0
14. Iran	0.0	0.0	0.0
15. Sweden	238.7	246.4	-7.7
16. Greece	26.4	36.8	-10.4
17. Ukraine	25.0	36.0	-11.0
18. Denmark	99.9	111.0	-11.1
19. Ghana	0.0	14.4	-14.4
20. Azerbaijan	0.1	23.0	-22.9
21. Venezuela	0.1	35.5	-35.4
22. Morocco	1.0	47.2	-46.2
23. Croatia	21.3	67.8	-46.5
24. Ireland	11.9	60.5	-48.6
25. Chile	3.5	56.4	-52.9
26. Bulgaria	42.1	102.3	-60.2
27. Slovenia	78.4	140.4	-62.0
28. Kazakhstan	0.8	63.5	-62.7
29. Netherlands	383.0	448.5	-65.5
30. Norway	18.4	84.4	-66.0
31. Colombia	3.0	82.0	-79.0
32. Egypt	0.2	82.0	-81.8
33. Portugal	48.8	136.5	-87.7
34. Israel	35.8	138.6	-102.8
35. Belarus	48.0	154.5	-106.5
36. Slovakia	129.9	248.6	-118.7
37. United Kingdom	660.5	785.7	-125.2
38. Philippines	15.6	160.6	-145.0
39. Argentina	11.2	156.3	-145.1
40. South Africa	25.0	184.6	-159.6
41. Australia	51.6	233.4	-181.8
42. Hungary	20.7	207.6	-186.9
43. UAE	25.0	228.0	-203.0
44. Romania	37.5	283.9	-246.4
45. Algeria	0.0	286.5	-286.5
46. Malaysia	145.9	442.4	-296.5
47. France	575.0	890.3	-315.3
48. Saudi Arabia	1.2	330.0	-328.8
49. Poland	244.0	608.6	-364.6
50. Brazil	130.7	594.7	-464.0
51. Turkey	459.0	1,031.0	-572.0
52. Canada	253.6	901.1	-647.5
53. Thailand	382.7	1,080.5	-697.8
54. Indonesia	12.2	778.6	-766.4
55. India	47.0	897.2	-850.2
56. Vietnam	25.0	960.0	-935.0
57. Russia	64.0	1,756.0	-1,692.0
58. Mexico	95.5	2,187.7	-2,092.2
59. United States	1,745.0	4,506.0	-2,761.0
60. China	3,200.0	8,600.0	-5,400.0

图4 2015年全球机床贸易情况

市场份额的杭州机床厂则收购了德国 abaz&b 磨床公司，大连机床厂控股了专注航天航空领域的高速铣床公司德国兹默曼，哈尔滨量具集团收购了德国测刀仪专家 KELCH，上海机床厂收购了德国 Wohlenberg 车床。一时间热闹无比。

然而这些并购最后结局却是另外一番景象。德国 abaz&b 磨床公司于 2010 年申请破产，被德国同行接收；KELCH 在 2010 年申请破产，重组后在德国新厂运营；瓦尔德里希科堡自 2011 年后连年亏损；大连机床被 F. Zimmermann 原股东于 2012 年收回股份。而希斯，则在 2019 年年年初申请破产。吃进嘴里的，几乎全部吐了出来。

十几年过去了，这些收购大多以失败告终。国际化并购的答卷，中国机床界几乎得了零分。在海外并购中纷纷折戟，反映了机床行业的残酷本性。

2008 年金融危机后，纺织机械出身的常州金昇实业收购德国前五大机床厂埃马克集团(EMAG) 50% 的股份，让这家以车床名闻天下的德国企业再次缓了一口气，重新大放光彩。而巨轮股份则控股电火花成形机床德国欧吉索(OPS)机床有限公司。但金昇和巨轮的主业都不是机床行业，缺乏并购后的深度整合，很难实现协同效益。实际上，金晟只是战

略投资者，并不插手经营管理层。随着 2010 年以后全球汽车行业的超长期景气，让埃马克(EMAG) 依然保持很好的发展，在 2019 年仍然名列世界机床前 10 名。

苏州信能 2010 年收购珩磨机床公司德国德根(DEGEN) 立式机械制造有限公司，但后者跟另外两家龙头企业德国格林(Gehring) 机床有限公司和德国纳格尔机械集团相比，技术实力和行业影响力相差还是太远。这些交易增加了胜利的记录，但并未造成决定性的胜利。

科大智能科技股份有限公司于 2018 年收购了生产专机机床的德国马卡(MAKA) 机床公司，后者在非硬质加工件如塑料、铝、碳纤维等方面，表现突出。虽然只有 100 多人，但有着独特的市场地位。然而，在后续的交易交割中，很不顺利。而最近中国投资者，正打算收购车铣加工中心德国惠勒喜勒公司。这家蒂森克虏伯的前公司，辗转出售，几家接盘者都未能重组成功。最后一次是从美国工业机床 MAG 公司卖给台湾友嘉集团。几番折腾，技术内涵早已耗尽。

然而也并非全无亮点。甘肃星火机床在 2009 年收购法国索玛(SOMAB) 公司，得以引进了精密复合多轴的数控车床技术。作为车床领域最早引入人造花岗

岩的企业，索玛与星火形成了全面的技术融合，大大地促进了星火的技术发展。而星火也牢牢地控制着董事会和管理层。国际并购是一门大学问，它背后需要精准的计算和文化的融合。

2012 年中国机床到达了一个巅峰。实际上，自 2011 年以来，我国机床市场萎缩占了全球的近一半。从那一刻开始，中国机床业绩的下滑，让高速增长所掩盖的深层次问题彻底暴露出来。机床软肋，终于成为包不住的火。而海外并购的诸多案例，表明了中国机床界，无法通过收购国外品牌来解决行业提升的问题。海外机床品牌，就像硬石子一样，没有鸵鸟的大胃，是很难消化的。而中国机床暂时还没有这样的胃口。

四、美国机床的陷落与重新崛起

美国如何丢失了机床阵地？

根据美国兰德公司的报告，美国机床业在二战后经历了黄金 50 年，直到 1998 年，局势才开始产生大变化。罗马城，并不是一日衰落的。1986 年时，美英曾经仔细审查了一下日本这个机床对手。那个时候看过去的近二十年，日本半导体、汽车、家电屡屡得手，轮番给美国留下了惊魂未定的印象。然而，美英联合报

告断定，尽管彼时日本机床产量高居世界第一，但很多技术仍然处于不合格的阶段（图5）。

而就在随后10年，看似弱小的日本机床彻底翻盘，成为机床业霸主。美国机床则被甩出机床的第一方阵。这个报告没有考虑到，大规模崛起的日本汽车背后，正是日本机床设备高速发展的黄金时段。日本公司在可靠便宜的产品（跟汽车如出一辙）和工艺生产（模块化生产）两方面均占据领先地位，通过生产率取得领先优势，并反向拓展了技术优势。

兰德公司在1992年给出的药方，今天听起来依然很熟悉。一是加强产业公地的建设，促使制造业生态之间的循环；二是提供充分资金，加强集团化运作；三

是加强出口引导，抢占国际市场。

应该说，美国机床界在第二条建议上，还是听取了兰德的建议。这也使得美国机床悄悄地、缓慢地走上了集团化的道路。

以车床和铣床而见长的美国哈挺公司，1995年在纳斯达克公开上市后，性情大变。借助于资本市场的实力，频频出击。同年就收购了具有80年历史的世界著名磨床生产厂家克林贝格（Klingelnberg GmbH），而后者也在市场进行了多次并购。有赖于这次并购，哈挺一举挺进全新的磨床领域。从2000年开始，哈挺继续收购了瑞士和德国6个品牌的磨床制造商HTT（Hauser tript Tschudin）公司。英国桥堡公司（Bridgeport）的加工中

心在中国颇有知名度，也在2004年被哈挺公司纳入旗下，丰富了哈挺公司的产品线。而最新一次的并购发生在2014年，哈挺公司从德国一家磨床手中，接管了瑞士的内圆磨公司。如今，哈挺公司除了既有的优势车床之外，已经成为超精密的代名词，在军工、航空航天有着不可撼动的优势。连同美国齿轮机床格里森（Gleason）公司一样，成为美国国防工业的根基。

哈挺公司作为一个超过百年的机床企业，借助于资本的力量，呈现了全新的活力。长袖善舞，直接进入了一个完全不同的磨床领域，并且建立了一个高度分工的品牌矩阵。更令人印象深刻的是，哈挺这一列的布局，几乎全部发生在欧洲。

美国机床制造商，以悄无声息地方式，采用分布式的方法，在全球机床版图谋局。最新的活跃分子，则是来自另外一家算是年轻的研磨机企业。通过最近10多年的并购，它已经成为微米级表面处理技术的集团，并更名为精密表面方案PPS集团。旗下拥有9个品牌，分布在表面及轮廓精加工、平面精加工、镗孔精加工等领域。而2019年刚刚收购的瑞士晶圆加工设备商，主要用于光伏和专用基板材料（用于半导体和蓝宝石行业）。

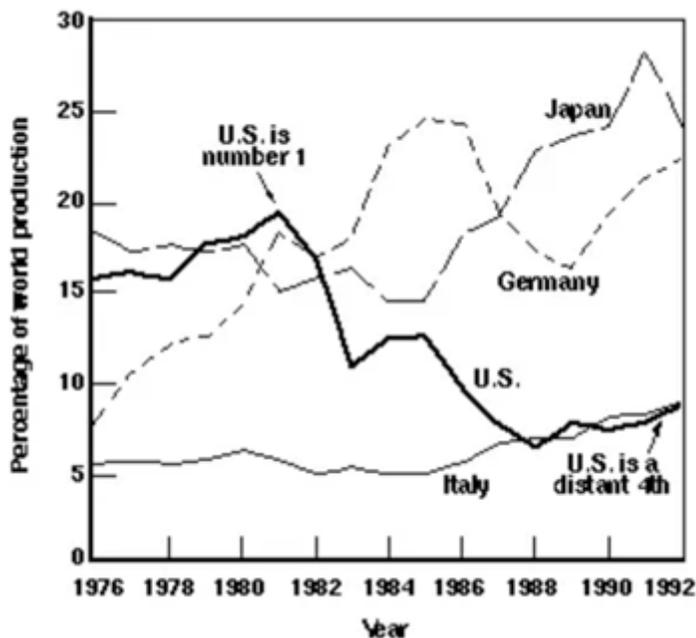


图5 20世纪七八十年代机床四强

它和另外一家全球排名第四的半导体设备公司美国泛林集团 (Lam Research)，形成了一定的补充和呼应。如果将来半导体供应链有更多的禁运，那么美国装备也会留下一个巨大的难以填补的坑。

美国机床企业通过并购各大品牌，布局占领全球市场，是美国近些年来制造业抬头的一个缩影。

五、机床是被 GDP 反复误解的行业

那么中国机床的许多活力，又是如何被削弱的？地方政府的业绩观，使得地方机床国企，不得不跟着规划走。而政府的急功近利主义和对机床产业的误判，杀伤力巨大。可以说，许多倒下的新旧十八罗汉们，背后都有地方政府伸手。

黄石机床厂（黄锻厂）凭借机械剪板机起家，依靠合资策略大量引进国外先进技术。20 世纪 90 年代与比利时锻压厂商 LVD 合作引进折弯机技术，并于 2006 年成功研发 6000 吨大型折弯机，打破了国外垄断格局。本来小日子活得也是滋润，当地非得要和三环集团捆绑上市。从此，黄锻多了一个上市公司，市场却少了一家技术独特的锻压厂。机床的心思，非一般经营者能够懂得。

黄锻厂被上市集团抽干榨净之后，如今已经奄奄一息。如果不是新冠疫情的拖延，今年黄锻厂应该已经被昔日黄金老搭档 LVD 公司所收购——这家多年的比利时伙伴一定是看得目瞪口呆。时空变换，猎物和猎人换了角色。

机床注定不是 GDP 的宠儿，许多机床都是国家安全的命脉，岂能以 GDP 论英雄。但是，地方政府非得让机床厂有 GDP 贡献，这种发展理念，完全无视机床的特殊性。迎合 GDP 和保持机床主业的健康发展，会导致地方国营企业的厂长，非常难办。

1998 年以软件园名义四处圈地的四川托普集团，以小小的代价，轻取刚刚上市三年的四川长征机床股份公司，借壳上市。这其中，地方政府期望做大的心愿，一看便知。而机床则成为难得的载体，厚重之身，正好中和了那些轻率的泡沫。后来托普软件身败名裂，四川长征机床在 2006 年以另外的方式重生，存续了当年北一机床西迁形成的“十八小罗汉”的衣钵。然而这段资本并购经历，开了一个非常糟糕的先河，给后续的地方产业发展，留下了一个隐晦的路牌。直到今天，仍然可以看到路牌下新鲜的足迹。

西部一家机床上市企业，虽然地处偏僻，却能潜心研究德美机床集团的矩阵品牌战略，通过

多样化的机床布局，深得民心。然而 2019 年领导突然被更换，一时间业界惊诧。虽说“企业亏损”这个原因，看上去很正常。但在这个年头，对于机床这种产业而言，一两年出现亏损是太常见了。排名 Top10 的美国 MAG 机床、德国埃马克机床等许多企业，都有过现金流断裂随时可能送命的时候。机床行业就是一个走钢丝的行业，随时可能被掀翻在地，企业家最需要胆战心惊。十年一个周期，不能以一两年的成绩论英雄。再细看过去，这家企业的接手者同时兼任当地一家国资委管辖的利润丰厚的机械企业领导，只是后者的重要股东却是来自其他省份。上市这个资质，或许就会成为一个当地抵御外省力量的关键筹码。真相还需要观察。如果果真如此，这家机床企业多年的精心布局，可能也会毁于一旦。这样的前车之鉴，已经太多了。

凡是成为地方顶梁柱的机床企业，多会被 GDP 放大镜盯紧放大，甚至透焦烤焦。或者捉去上市，或者业绩几年不振，就会被拿下。这就使得机床当家人不得不四处觅食，扩大规模，最后更容易摔下钢丝绳。

中国机床就是在这种氛围中，重复地原地踏步，在周而复始中回到原点。中国机床与日本、德国机床的差距，与七八十年代

相比,不是变小,而是变得更大了。

六、机床是个“老骨头汤”行业

往微观里看,机床自身也有独特的气质。作为加工机器的机器,机床是一个极其特殊的行业,尤其那些高端机床,绝不是普通的产品,它有着独特的行业气质。机床可以称之为“老骨头汤”行业。它啃的是硬骨头,喝的是老汤。

国外机床,尤其在德国、瑞士经常看到家族企业延绵不断。其实这种延续,传承的正是老汤的精髓。一锅老骨头汤要一直熬下来,百年老汤不能换,换汤就会死。日本发那科的机床数控系统和机器人都是行业先锋,而老社长是本土博士,更以铁腕的力量统治发那科三十年。儿子是博士,孙子还是博士,一直传承,相互熏陶。而围绕这些家族骨干的那些总工、助手则一直也没变。这些老人们就在一起熬呀熬,熬成了机床业的“老骨头”,也打造了一个无敌的研发体系。

长盛不衰的日本山崎马扎克,目前进入第三代家族领导人,已经领导二十年了。而此前的第二代,则执掌了山崎马扎克整整五十年的帅印。

再看看日本的大隈、牧野机床,老领导“老骨头”们都在精

神抖擞地工作。体力是不行了,但体系却一直在健康地运转。

而在中国的国企,企业家往往是“到点下车”,60岁正是国外机床掌门人的黄金时期。这说明,中国业界,还是没有认清机床作为“工业之母机”的特殊性。机床,跟其他许多制造业并不相同,它有许多传统工艺一直在发挥作用。比如手工刮研这道老掉牙的工序,在日本机床界基本上都保留下来作为最后一道工序。机床行业的许多规律,往往都是以十年作为周期闪现一次。外行人很难迅速悟透。或者说,机床是一匹桀骜不驯的战马,不骑上去,你是不知道它有多么难以驾驭。

最近几年,西部连续有两家国营机床厂的当家人换岗,令人倍感遗憾。这两家在国内排名一直领先,依靠着“老骨头”们十多年的精心煎熬、精准对标国外品牌,风风雨雨中都能活下来,或小康或温饱。业绩虽然未必一直都很好,但某些技术非常先进,成为王牌,加上其他产品的布局,也有利地支撑了当地上万人就业。或许只有行业里这一类的企业,才能在这种好周期坏周期起起落落的机床大潮中,一直屹立不倒吧。这些老厂长,往往都会紧盯国外对标企业的独门技术,“深憋一口气”,五年十年不敢松口。中国机床界,最需要的就是盯准某些品牌不放,

咬定青山不放松。这种死缠烂打的咬劲,非“老骨头”是很难理解的。然而老的领头人一旦换岗,多年布局就会毁于一旦。

这种心痛,旁人很难感受到。不挣钱的机床行业,地处西部,如果没有信念和希望的支撑,哪里还会有人待在这个行业?中国的机床企业,没有可以从外界吸收的生态养分,而是全靠企业的技术骨干来支撑。而一旦骨干开始流失,机床企业就会加速失血。而吸引人,往往也需要靠“老骨头”们的个人魅力。不得不说,机床行业也需要个人英雄主义。

为什么中国机床格外需要“老骨头”在岗?根本原因在于中国的基础孱弱,产业公地、行业共性技术几乎都为零,一个机床厂的支撑,全靠厂长使出个人浑身解数,勉强维持,弥补因恶劣生态导致的养分缺失。不懂机床产业的人,很难想象可以做好机床企业的一把手。

全球排名第六的日本大隈机床,2019年刚刚上任的社长在工厂已经工作35年,而前任社长则在工厂呆了整整55年。中国机床企业的领导面临的竞争对手,就是具备这样资历的人。他们不是一个人,是一群,每个企业都是一群。

高端机床的研发,伴随着昂贵的基础研究投资。美国曲面加

工之王格里森机床，背后要养着顶尖的数学家做基础研究。而作为全球几乎所有机床加工的内核技术提供者，德国 ModuleWorks 公司有 200 多人，75% 的人员都是研发工程师，通过数学、机械和 IT 的结合，研究刀具的运动轨迹。没有这样的敬畏之心，就完全无法理解机床这样一个产业。

中国机床厂，最怕换人、最怕折腾。换一拨领导人，就会换一套思路。新领导，需要在新的期望中，短时间内做出重大的业绩。这是明显违背机床行业发展规律的。当前已经完成重组的大连机床、沈阳机床，沉默五年不出大的动静，也会很正常。机床攻坚从来就是一场马拉松，不是百米冲刺。五年、十年的光阴，对一家机床厂的技术积累而言，其实是很短的时间，或者说并不够用。

当我们羡慕精度之王的瑞士和德国的机床业的时候，需要了解其家族企业、百年老店的真正内涵，那是由机床行业的“老骨头”的行业属性所决定的。美国军火商最为依赖的格里森滚齿机，世世代代的“老骨头”都献给了机床。第二代有一个儿子，是坐在办公室里去世的，彼时已经 94 岁的高龄，还在机床一线历练。至今执掌格里森的则是充满痴情的第二代传人的孙子。对于中国机床真正的企业家而言，不怕输技术，

就怕输人。最羡慕的不是国外这些机床技术的先进，而应该是羡慕日本、德国的负责人，可以痴情一辈子都抱着机床熬出老汤吧。

七、民营兵团带来的活力

虽然中国机床产业整体差距较大，但民营企业，依然带来了许多新鲜血液，让人眼前一亮。

大连光洋，走上了一条供应链创新的道路。最早是做数控系统出身，后来为了验证自家的数控系统，就推出了数控机床。而随着用户对机床的认可，企业进一步开始扩大部件的范畴，通过自研电主轴、转台和人造大理石床身，解决了机床的稳定性和精度问题；再后来，技术狂人的步伐已经停不下来了，电机、传感器和液压系统也都配套跟进。它的五轴机床，也取得了不错的口碑。

一台好的机床，需要全产业链的进步，基础部件决定了功能部件，而功能部件决定了主机的性能。这是一个倒挂金钟的过程，在这个过程中，机床会带动供应链，一起变得精彩。然而这些技术，都由一家来开发，也是吃不消的。整个机床产业，还需要有一个合理的布局，来实现专业化分工。

同样来自上海拓璞数控科技股份有限公司的教授们，也交上

来了令人称奇的答卷。这家以大学教授为骨干所组建的团队，最大的优势是跨学科，包括机械、自动化、计算机等，融合了机床设计、数控系统和五轴工艺。公司有 57% 的员工是研发人员，以技术为先导。这家成立于 2007 年的机床企业，通过硬核技术开发，卖出了单价为 8000 万的机床，创造了中国机床的历史最高记录。除了大机床，这家企业还挑战精密加工难题。研制的 6 米大跨度的五轴并联搅拌摩擦焊，实现了世界上载荷最大（轴向力 200kN）的突破，从而为运载火箭的推进剂贮箱，提供了总装焊接技术。

这些成就，让人大开眼界。机床科技的底蕴，也开始显现出来。位于台州温岭的北平机床有限公司，在磨床领域的成就也引起人们的关注。借助于浙江省重大科技专项，北平机床从 2008 年开始研发五轴数控工具磨床。一开始，这家民营企业就非常注意引进瑞士、德国、日本等企业的人才，和美国斯达公司、德国德克精密制造公司和德国哈斯马格磨床有限公司等磨削企业进行多次技术交流合作沟通。而在 2014 年收购德国施耐亚机床，则使北平机床如虎添翼。近几年借助中国 3C 市场的爆发，工具磨在挑战澳大利亚安卡（ANCA）

公司、瓦尔特等的过程中取得了不小的成就。仅仅十多年的光景，一家民营磨床企业能在行业大有斩获，名气甚至超过了上海机床、北二机床（后两者感觉真是没有睡醒的罗汉）。除了管理、营销之外，北平机床的技术人才战略是关键，整个设计研发团队中，国际人才居然能占到60%。对于民营企业而言，除了依靠人才，还能依靠什么？

八、机床集团化的矩阵品牌

然而，战场正在走向宽广，更大的兵团作战，需要仔细的审视和应对。全球机床业的发展，正在呈现一种“机床集团化”的特点。2019年全球Top10的企业中，日本企业占据半壁江山。而其他企业，多是通过并购的方式，进行市场扩张。日本的并购相对较少，除了德马吉森精机，其他品牌多是采用市场渗透和产品线进行自我扩张。

排名第二的通快有5个品牌，美国马格（MAG）和德马吉森精机各有7个；以倒置式立式加工中心而闻名的德国埃玛克，也进行了7次并购。与其他竞争对手不同，埃马克是典型的品牌杀手，并购来的品牌往往被雪藏，采用单一品牌进行营销。

发展机床集团，需要学会品牌群的管理。德国德马吉（DMG）没有顶尖的产品，量大面广，但营销做得很好，产品多为中档机床，却容易被认为是高档货；美誉度一般，但知名度很高。而美国马格、台湾友嘉集团都是大吞大吐式鲸吞法并购。大把吸进来，大把吐出去。2013年友嘉集团一口气吃下美国马格的五家欧洲品牌，将其旗下的机床品牌扩增至23个。

然而简单的加法，并没有实际意义。这种策略，对中国企业太具诱惑力了，但这也正是中国机床界最值得警惕的地方。集团化的背后，需要有明确的战略定力。集团化管理颇为精细的，当属德国斯来福临集团公司，现在已经更名为联合磨削集团。斯来福临的创始人，曾经有个判断：粗加工和半精加工，一定会转移到东方（中国大陆和中国台湾地区）。车床、铣床的技术含金量相对低一点，在德国和瑞士很难站得住脚。只有专注磨床，做最后一道工序的精加工，立足高精尖才是制胜策略。这个创始人的初心，持久地主导了这个品牌的长久发展。

立足于磨削，斯来福临的品牌分工非常清楚。表面和轮廓磨、圆磨和工具磨三大业务板块，各有品牌而互不交叉。即使圆磨有三家，也是各自明确自己的定位。有主做高精度万能内外圆磨，最多1.6

米；有专门面向凸轮轴等2米以上，还有专攻无心磨床。而另外两家工具磨，一个瑞士的一个德国的，也各自覆盖不同的领域。

有了精准的定位，即使是面临着并购的机会，斯来福临也不会轻易出手，为并购而并购。

这种细致的品牌管理，和用户认知标签的精心呵护，是国内机床业走向集团化最需要学习的。企业的产品线，需要有内在逻辑进行合理的布局。甘肃星火机床、陕西秦川机床在这方面都有过深刻的思考。星火提出来的“工艺相近、结构相似”，使得以前只是做车床的星火，在轧辊磨床异军突起，成为行业奇兵，而并购海外品牌则如虎添翼。秦川则围绕曲面加工的全套工艺解决方案，紧盯美国的格里森，进行了深度的产品组合，从而形成了完整的品牌布局。

九、屏住呼吸的聚焦：中通目前的态势分析

当前，中国通用技术集团，已经成为央企重整中国机床河山的关键。在完成大连机床重组之后，目前中国通用已经对沈阳机床完成了官员任命和稳定民心的过渡期。跟此前掌控的齐齐哈尔二机床集团有限责任公司、哈尔滨量具刃具集团有限责任公司、

北京机床所一样，都是昔日赫赫有名的大品牌。下一步确定机床发展战略，将是屏住呼吸的一刻。

这一步，其实很难。对于中国通用而言，既有高利润的医药板块，又有中等利润的纺织板块、仪器板块，还有驾轻就熟的贸易和成套工程出口，看上去还都不错。唯独机床板块，应该是一个又冷又硬的高投入、低回报的领域。齐二重型机床从2008年就被中国通用控股，但十多年也未能扭亏为盈。前景依然不明朗。而作为中国156援助工程项目中唯一一家量具刀具的企业，哈量也在2009年由中国通用接管。凭借跟日本合资公司的利润而小日子不错的北京机床所，则在两年后整体加入。如果说以前这些并购还都只是试水的话，那么重组十年前曾是业内第一和第三的两头大象，则意味着一盘大的棋局已经开始，运筹、移子、行健，改变中国机床格局的时机或许来了。

要么一事无成，要么惊天擂台。未来中国机床五年的厮杀，就等中国通用技术战略定位的那一刻，如何消化这硬着头皮啃下来的骨头，事关重大。

不能说没有机会。机床作为工业母机，也是靠行业用户用出来的。中国制造业翻天覆地的变化，包括汽车等蓬勃发展的市场，并没有给国产机床留下多少试错的空

间，这是最大的遗憾之一。而在当下，巨大的用户市场，如航空航天、船舶等仍然还在国资委手里，即使是在很难有突破空间的汽车领域，一汽、二汽也在国资委手里。如果这些用户能够给与包括民营机床在内的参与机会，将对战略性机床的发展，意义重大。机床04专项，中国民营企业也沾有露水。其中民营企业有二十多台立式加工中心，顺利进入航空加工生产线，效果非常不错。如何相马、赛马，尽管教训多的是，然而大变局之下，对国产机床深注信心的时刻，也该到了。

后记

中国机床，现在面临着一场系统战。

战略性机床，如何发展？毫无疑问，通用机床产品之外的战略性机床，是一个市场失灵的凶险之地。这是一个投资周期长，市场容量有限，很难短期看出经营业绩的市场。然而它跟国运却是密不可分。随着全球化画风已经大变，中国制造面临着百年大变局，工业母机更是首当其冲。日本森精机购买瑞士DIXI的精密镗床之后，迅速关闭了对中国的出口，对行业影响巨大。而精密镗床另外一家是日本安田，则明确规定不卖给中国。随着中国

装备制造日益走向高端，有些母机将来是否能买得到，都是一个越来越迫切的问题。

还有一个更大问题需要思考。全球机床版图中，中国的位置在哪里？在量大面广的通用产品中端领域，中国现在面对的竞争对手，肯定不是德国、瑞士、日本，甚至也不是意大利、韩国。最大的心腹大患，可能反而是来自中国台湾。双相PK勇者胜，大陆机床已经呈现了不利的局面。中国大大小小的机床企业，不能随心所欲地乱打一气。一套对于机床发展的完整战略和整体技术路线图，迫切需要出台。

而在这其中，最令人头疼的，还是产业公地的缺失。没有共性技术，没有人愿意浇灌产业公地，没有共享资源。中国数千家机床企业，基本都是各自为政。这种产业生态下的机床，将会是失去防护林保护的耕地，缓慢中的沙漠化，会一口一口地吞噬一片江山。

重塑中国机床体系，需要一场思想的深度碰撞，形成深度共识。唯有停顿下来，整理行囊，才能往前迈一步。宁慢勿快，多反思少规划，中国机床的未来十年，就在这一屏息时刻。■

（感谢对并购深有研究的崇德投资王炜先生，对国际化并购部分的内容支持）

我国机床行业发展坎坷之原因探究



德国莱兴巴赫—哈缪公司 (Reichenbacher Hamuel GmbH) 亚太区 吴昊阳

“机床”是个非常宽泛的定义。“长相”、结构、用途完全不同的机器可能都被叫做机床。就算同属一类机床，由于“应用场景”（套用现在的流行说法，制造业用语应称之为“加工对象”）不同，内部结构设计也相差十万八千里。例如图 1 所示这两台设备，都来自德国顶级机床

制造商 Reichenbacher Hamuel GmbH，两台设备都是五轴龙门结构加工中心，左边是重型龙门，右边是轻型龙门。虽然都是五轴龙门式机床，但两者的差别就像虎式坦克和保时捷，尽管出自同一个工程师，但几乎不可能行驶在同一条公路上。

前几天看到微信朋友圈转发

的机床行业排名，里面竟然把通快和 DMG 放到一起比较。前者是激光切割机床，后者是机械加工机床，两者几乎不构成竞争关系，所以这个排名就像把汽车、飞机、轮船都放在一起，搞了个“交通工具行业”企业竞争力排行榜。所以我国机床行业的发展就不用看这些分析机构的报告了。



图 1 两台五轴龙门机床

一、制造业提升的根本逻辑

对于普通产品而言，薄利多销是普遍可行的策略：商家可以低价获得大量订单，通过量产获得生产经验，并将利润的一部分投入到研发并升级设备和技术，然后再进一步获得更多的订单和更高的利润。满足这个良性循环需要一个先决条件：市场容量要足够大，同时技术进步不能太快。

只有市场容量足够大，薄利才能多销，总的利润才足以支撑技术投入；而只要技术进步速度不是太快，那么后来者就有可能逐渐赶超。我国民营制造企业如鞋帽、玩具、家电、手机、甚至5G通讯（尽管不能算作制造业，但也符合这个逻辑）等基本都是采用了这个套路才得以上市的。

相反，如果赶超者将通过薄利多销获得的利润投入到研发中之后，产生的技术进步仍然无法赶上行业领跑者的技术进步速度，那么在这个行业里就永远无法赶超，甚至差距会越来越大。

最明显的例子是汽车，技术进步速度快，而后来的竞争者也难以通过薄利多销扩大市场并快速积累财富，除非颠覆性技术的出现，否则将永远处于跟跑状态。日系车尽管已经“超英赶美”几十年，但在传统内燃机领域与欧洲汽车集团相比仍然存在差距。

是混合动力这个新技术给了日本汽车赶超的机会，现在的电动车也必将是中国车企的机会。

简单讲，在生产技术不发生革命性突破的前提下，制造业的提升就是靠经验的积累：生产的产品数量越多，经验越丰富，生产效率就越高，质量和可靠性也就越好。我国制造业的快速发展大多数是遵循了这样的逻辑。

二、我国机床行业发展坎坷之原因

然而，这个逻辑并不适合机床行业。

机床行业基本上都是面向专业市场的，而越是往高端发展，客户的专业化程度越高，市场细分也就越明显。即便是通用型机床，其产量也远低于该机床生产的产品。比如某零件的年产量是10万件，那么也许由5台机床组成的生产单元就满足要求了。假设这家机加工厂年产值100万，利润10%，按5年回收投资资本计算，他们选择50万的加工设备进行投资。设备质量还不错，用了20年后才淘汰。这20年里，机加产品的产值为2000万，而设备投资仅为50万（不算备件维修服务投入）。生产设备的市场规模仅为产品市场规模的2.5%，这还没算二手和翻新设备对新机生产的挤占。

总的来说，机床行业不发生

萎缩的前提是制造业扩充产能。一旦经济增速下降，那么机床行业就会衰退。确切地说，应该是新机生产需求下降，而二手机和翻新机市场活跃度会上升，因为生产订单减少的企业主会折价出售现有机床。对于大的机床品牌来说，这些业务往往由第三方维修服务公司承接；而小品牌机床公司则通过自己的技术和业务团队翻新和销售旧机床。因此，小型机床厂反而容易在衰退中存活。尽管缺少新机项目，但仅靠服务、备件和二手机销售、旧翻新等零星业务，也可以让这些小企业度过严冬。这也就解释了为何欧洲成百上千家小型机床厂历经风雨都还没有被淘汰的原因。

中国机床发展到今天，前路被难以逾越的高墙阻隔。由于市场容量有限这个先决条件的存在，所以薄利不能多销，因此中国制造业惯用的策略统统失效。换句话说，在一个技术密集市场容量又不大的市场，不存在后发优势，只有后发劣势。

1. 机床生产难以通过量产积累经验

因为机床的市场就那么丁点，即便对于通用型机床厂商来说，若某型号产量超过50台就算量产了。这么低的产量，普通企业并不能积累多少的经验，更不能积累财富并投入到研发。

沈阳机床之前的做法就是先通过低价跑量，无奈销量上去了之后总利润并没有多大提高，而市场也被低价竞争者挤满了。所以并没有如家电、3C等行业那样，出现价格战大洗牌后头部企业（继续套用互联网词汇）高速发展的情形。

对于机床这种行业，欧洲的咨询机构开出的药方不是薄利多销，而是走高端定制化路线，获取高额利润。虽然不见得适合我国国情，但至少战略方向是清晰的。

2. 无法通过自动化提高产品质量

客观地说，我国制造业工艺提升的重要渠道是国外的设备、工具厂商和自动化厂商。这些厂商在销售产品的同时也通过交钥匙工程提供了整套的工艺方案，这在汽车行业十分明显。对于一般的产品而言，只要生产设备好、辅助工具好，那么产品质量基本可以得到保证。

然而机床生产并不能实现自动化和少人化，所以我国的机床厂家就无法通过设备和工具保障质量（即便数控伺服以及检测系统及零部件厂家会给我们一些经验指导，但远远不足以帮助整个机床行业的赶超）。号称实现柔性自动化的仅仅是机床床身部件，设计、装配和调试才是最重

要的价值增加环节，而这里面的门道全在人的经验。现在被爆炒的“智能制造”，“工业4.0”等概念根本帮不了机床生产商。

用机器全自动地生产机器距离我们仍然遥远，用机器生产“用于生产的机器”就更加遥不可及。

3. 用户粘性导致低价策略失效

高端制造业的用户通常粘性较大，生产厂家不太容易因为价格更换设备供应商。因为对于零件生产商来说，投资设备的钱最后作为固定成本会摊销到每一个产品上。所以只要订单稳定，设备投资摊销占总成本比例并不大。而一旦设备“趴窝”，制造商的损失就难以估计了。所以设备并非越便宜越好，而是要看生产效率、运行稳定性、维护成本等因素。

所以对于发展稳定的制造业来说，设备一旦选定，制造商就不太会轻易更换。因为一旦新的设备供应商出问题，那么对整个生产造成的影响会非常大，所以高端制造商宁可选择合作时间较长，价格稍微贵，性能更稳定一些的设备。例如汽车行业，整车厂对零部件供应商的质量要求极为苛刻（当然，订单数额和利润率还是有保障的），所以汽车零部件供应商往往会选择价格和可靠性都较高的机床。

4. 低端市场陷入恶性循环

客户粘性造成的结果很像“阶级固化”：除非是没什么技术含量的非关键部件，低端制造很难通过低价辛苦经营进入到高附加值的高端制造俱乐部。由于缺乏稳定且高利润的加工订单，所以生产商对设备的采购价格就会非常敏感。为了提高设备利用率，生产商也会低价接单，造成行业生存状态更加恶劣。

刨除个别励志案例不提，低端制造的升级基本上需要整个行业的变迁，需要在形势下顺势而为。比如手机壳的制造：早在日韩手机和联发科系杂牌机大混战的年代，大多数给高端手机配套的生产商都会投资发那科，兄弟等日系机床，而国产杂牌机的配套商则对设备价格极其敏感，他们更多采购价格更低服务更好的国产机。随着华为、小米等国产手机逐渐一统江湖，手机壳生产商的订单也逐渐稳定下来，国产的精雕机床也取代日系机床成为手机壳加工必备设备。

机床等工业装备的产业提升，是随着整体制造业的升级而提升的。当广泛使用国产机床的低端制造商慢慢进入到中高端供应商俱乐部时，国产机床就自然得到业内认可了。所以，振兴我国机床产业，着力点并不在机床

本身，而是制造业。

5. 机床的劳动密集型产业属性

要快速组建一个机床厂其实并不需要什么设备投入：数控、伺服、床身，以及其他重要零部件全部可以外购，甚至可以委托“光机”制造商把基本的装配工作都做好。所以总的来说，机床的成本构成大部分都是变动成本：零部件成本及人工成本。

高端设备市场国产机床并没有太多的价格优势，因为国产的高端设备零部件大部分都要进口，所以国产设备只能通过床身结构件和剥削工人降低成本，在设计和功能上也没什么出彩的地方，所以进口机床占据高端市场也不足为怪。

由于工人的时间和精力都是有限的，所以在保证装配质量的前提下，机床的产量是有限的。再加上量产规模受限，所以也难以通过工序拆解让普通工人经过短期培训就对机床进行流水线式的生产。所以机床是一种“高技巧的劳动密集型产业”。

产业结构要与当地人员素质相配套才能发展。比如家电，手机、建筑、互联网外卖等普通民用产品的生产和服务需要消耗掉大量“农民工红利”；软件、半导体则需要“工程师红利”；

航空航天、核能等高端产业需要“科学家红利”。而机床、检测仪器、生产设备和自动化等是属于典型的需要“技工红利”的产业。只有拥有大量高性价比的高级技工，这个产业才能蓬勃发展。

目前欧洲、日本、韩国和中国台湾地区都拥有大量的高级技工人才。这类人才成本大约是月薪2万~5万元人民币。如果低于这个薪资待遇，机床厂就几乎无法吸引到足够的优秀人才，其产品也只能维系在中低端水平；如果收入超过这个区间，由于人工成本在机床总成本中占比过大，那么机床产业也会因造价过高而逐渐移出这个区域。

目前我国机床行业从业人员平均收入远低于2万，因此高端人才不可能搞机床，而是去了互联网、金融等多金行业。反观瑞士和美国，由于工程技术人员的工资很多高于这个水平，所以机床业就会因造价过高失去市场的竞争力。

尽管瑞士的机床行业仍然强大，但其实体已大量转移到捷克等东欧国家。瑞士机床集团的强大体现在其资本对德国等欧洲其他地区高端机床产业的控制以及高端特种设备的研发。美国除了几家特种定制化设备集团仍留在本土，老牌机床如辛辛那提早已经被欧洲财团收入囊中。当然，

这也可以视为一种大西洋两岸的工业战略平衡。

从全球视角观察，目前欧洲、日本、韩国和中国台湾地区的机床行业从业者的收入基本在这个区间，而它们也正是中高端机床的主要供应商。我国机床若要迈入高端俱乐部，先把从业者的收入提高到2万月薪以上再说。

6. 行业集中度低且细分市场专业化程度高

机床的自动化生产是很难实现的，所以机床产业就不适合以某地为中心搞生产基地。另外零件加工企业的需求千差万别，大型加工企业往往要求机床厂商配合其工艺流程设计加工单元或柔性自动化生产线，更高端的甚至会要求针对某零件定制开发专机。所以从整个机床大行业看，几乎不可能出现如互联网和影视传媒那种“赢者通吃”的局面，反而是百花齐放，百家争鸣。

然而，机床市场的微观层面却也体现出“赢者通吃”，只要是细分市场总可以找到一个全球性的隐形冠军。比如做大型曲轴的WFL，做高精度超硬叶片和叶片修复的Hamuel，这两家在规模上完全无法跟DMG相比，但是极具技术特色，都是各自高端市场的隐形冠军。

7. 资本难以驱动机床技术升级

金融资本最容易发挥效能的领域本质上是资源型市场，资本通过在局部时间或空间上控制资源获利。即便投资对象是技术，资本看重的也是技术可以带来的独占性的资源。就机床和各种工艺设备而言，其技术进步并不能带来商业暴利，更何况这些技术在行业外的投资人看来是难以理解的。

前文做过粗略的计算：机床的市场容量仅相当于其生产对象市场容量的 2.5%，而真实数据恐怕连 1% 都还不到。粗略估算，普通产品的技术创新所带来的收益大约是生产设备技术创新所带来的收益的 100 倍。这样看来，与直接投资产品技术相比，投资机床等生产设备的相关技术是不经济的，而与其研究机床本身，倒不如研究如何更好地利用机床。

这也从理论上说明了振兴机床产业需要长期且不计代价的战略投资，仅靠市场的力量是完全不够的，需要国家扶持。但是目前立标杆，批地、贷款、给政策，这种扶持重点企业的做法显然适得其反。

机床行业比较成功的资本

运作基本上都是业内的资源整合，而最好的整合方式就是“不管”：股东首先要深刻了解技术和产业，在行业衰退周期慷慨撒币，帮助旗下子公司度过难关，当行业景气周期来临时获取超额利润。

8. 集中力量也未必能办大事

如果作为科技攻坚战，那么我国的科研人员完全有能力打造一台世界级的机床。例如 625 所，北一机等大院大所就开发过不少优质的设备。但是做一台机床和做一个机床产业完全是两码事。机床与高铁、核电设备之类的装备制造有本质的不同：机床行业是完全市场化运营的，国家意志最多能够维持几家重点企业的经营，但发挥不了决定性作用。

空客法国的工厂就会首选法国 Line 的机床，西班牙的工厂就多用 MTorries 的设备。这些机床厂也不见得活得很舒服，但至少作为保军单位不会破产。几十年前，Hamuel 曾经造过一台 30 多米的超大超重型机床，全行程加工精度高达 0.01mm/m，即便在现在也是技术领先的。但是造价也是达到了惊人的 350 多万元。而这个型号最终也只造了一台，作为工作母机自用，没有市

场。而相关的技术资料在不久之后也卖给了不远处的另一家机床厂瓦德李希科堡，再过了十几年，这家公司被北一机收购。

如果倾尽全力不惜代价，那么国产机床厂家是有能力打造出一款超级精良的机床的，无非就是一丝一丝地去刮，一点一点地去测，再一点一点地去拧。《大国工匠》里宣扬的就是这种精神和情怀。但这种干法设备造价和交货期也可想而知，不惜代价打造出来的试点项目可以作为大国重器保障军工，但是投入到市场就显得缺乏竞争力。

三、结语

“机床是我国制造业之痛”，这话不假。机床业的尴尬处境其实正是中国制造业面临发展瓶颈的缩影。通往高端制造的前路是布满荆棘险象环生的，只不过被当下热炒的“智能制造”，“工业 4.0”等概念描绘成一条康庄大道。与机床类似的行业诸如各类工业检测设备、传感器、工艺设备、工控设备和与之配套的各类软件都是痛处。

中国制造从中低端向高端迈进的过程中，企业、政府和资本都应该转变思路，用更加务实的态度更加专业的方式支持我们的制造业和机床产业。MT

中国工厂离“柔性制造”还有多远



钛禾产业观察 李富强

1967年，英国 Molins 公司工程师迪奥·威廉姆逊研制出一种名为 Molins System-24 的系统——用 6 台模块化结构的多工序数控机床，实现无人条件下昼夜 24 小时连续加工。这个系统的推出，标志着人类工业史上“柔性制造”系统的正式诞生。

尽管这个划时代的系统最终由于资金和技术上的困难并未全部建成，但却为未来自动化、无人化工厂提供了演进的方向，成为日后各工业发达国家争相效仿和完善的技术。

疫情期间，中国各大工厂快速完成产线切换，转产口罩和防护服等抗疫物资、支援全球抗疫战场的新闻屡屡见诸媒体，让柔性制造再次成为行业关注的焦点。

根据海关总署发布的统计数据，3月1日-4月30日，全国共验放出口主要防疫物资口罩

278亿只，防护服1.3亿件，新冠病毒检测试剂盒7341万人份，红外测温仪1257万件，呼吸机4.91万台，近期日均出口防疫物资30亿元以上，一个月内持续增长逾3倍。这一长串亮眼数据的背后，除了原有厂家密集排产之外，通过柔性方式实现跨界转产的力量贡献巨大。

各路明星企业转产防疫物资，给国人造成一种错觉假象——认为中国制造已经具备相当强大的“柔性”实力。但实际上据我们在一线企业的调研观察，绝大多数的中国工厂，尤其是高端制造，离“柔性”其实还相当遥远。

一、以柔补刚

跨界转产防疫物资的编外力量中，不乏众多超级企业的身影。其中著名的如比亚迪。从一

月底开始调配资源，开发自动化口罩生产设备，半个多月即实现量产。几乎同时，中石化的业务范围也向下游延伸，开发了口罩、消毒液等生产线。以造战斗机著名的航空工业也玩起了跨界，集结集团旗下分布在6省市4家单位的力量，将原来生产飞机所用的数字化设计技术引入口罩生产，仅用3天时间设计，16天时间就完成样机制造，速度堪称惊人（图1）。这些新成立的生产线，普遍具备高度自动化特点，一个操作工人就可以同时维护两三条生产线的运转。



图1 航空工业研制的“1出2型”全自动口罩机

注：本文来源于“钛禾产业观察”公众号，获得授权转载。

疫情带来的不仅是国民经济的大考，也正在成为加速中国制造业变革的变量因素。无论是通过柔性方式实现对生产线的快速切换，还是用机器换人，通过无人技术大量替换人力，都是转型升级的中国制造行业需要攀越的重重大山。

这背后的一个基本逻辑是——“自制”和“外包”过程中越来越多的矛盾，需要靠柔性制造来调和解决。

批量越大，效率越高，这是工业 3.0 时代的普世原理。假如一个工厂只生产一种零件，那无论是从原材料采购、仓储管理、生产线运转、操作人员熟练程度等各个维度，均能实现效率最大化。然而，这样的工厂只能是理想状态下的乌托邦——需求的多元化，甚至个性化是无法抵挡的趋势。

作为科技进步的受益者，诸多行业也不得不面对由此而来的现实问题：产品复杂程度越来越高，生产流程变得越来越长。为了保障效率，我们把生产流程碎片化，依靠外包来解决多元化需求带来的效率影响。

于是，我们看到从原材料到成品的路径从单一企业的“马拉松式”生产，变成了各级供应商和主制造商的“接力式”生产。在这根越拉越长的链条上，每个成员集中精力冲刺一段赛道，每个阶段的效率得以维持。

但是随着外包程度的加深，工厂对供应链的依赖程度也日益提高，甚至经常有被“卡脖子”的风险。疫情突起，全球范围的大隔离至今未完全解除，车间停工、物流滞后、工厂倒闭，大量产业链因此受制于“人”，诸多行业面临着前所未有的断供危机。

过刚易折，自制和外包两条路都不能走上极端，而二者之间，需要一些“柔性”来中和。

作为工业 4.0 重要命题之一的柔性制造，其核心价值在于，既能够依靠自动化设备保障生产效率，又让生产线具有一定的延展性，可以根据市场变化和客户需求对产品进行适时调整。

从更宏观的视野角度来说，“柔性”概念其实已经在潜移默化地影响我们的日常生活。疫情期间，体育馆改建成了方舱医院，教师当起了网络主播，无人机被改造成五花八门的“空中机器人”……

但是，即使全社会都认可“柔性”的大趋势，也并不意味实现的容易。局部领域的柔性和智能化，也并不代表中国制造已经具备全面迈进工业 4.0 的能力。

近年来，“柔性制造”被行业提及的频率大幅度降低，其重要原因之一是——具备较高自动化水平的柔性生产线，对于绝大多数的中国工厂，尤其是高端制造工厂来说仍然是奢侈品。

中国机械工业联合会专家委名誉主任、工信部智能制造专家咨询委员会主任朱森第认为，相当一部分中国工厂还处于“工业 2.0”阶段：“中国制造业需要采取并行战略，即 2.0 补课、3.0 普及、4.0 示范。”

二、柔性制造有多难

1982 年，由 60 个 FMC（柔性制造单元）和一个立体仓库组成的自动化电机加工车间在日本发那科（FANUC）公司建成，依靠两台自动引导台车传送毛坯和工件。加工、装卸、传送过程不需要人工操作，此外，发那科还有一个无人化电机装配车间，同样能实现连续 24 小时运转。而同时期的中国，第一批个体户才刚刚尝到赚钱的甜头。搞导弹的科学家们，正在深墙大院里羡慕大街上“卖茶叶蛋的”。

柔性制造在中国的推广普及，与中国制造业的进化过程密不可分——其中始终绕不开的两个关键词，一是需求，二是技术。

从需求上来说，长期以来依靠廉价劳动力红利的中国企业，对自动化生产的需求并不迫切。虽然劳动力成本整体快速上涨，但是中国工人的普遍收入水平仍然无法和西方发达国家相比。根据国家统计局的数据，2018 年我国城镇制造业从业人员的平均年收入为 72088 元，分摊到小时计

算，平均时薪为 35 元，在 7 年内翻了两倍（图 2）。这个数字粗看貌似增长不错，且数字背后，基层从业人员收入“被平均”的现实和越来越频繁的加班加点却没有体现出来。

与此同期，美国从业人员的时薪为 21.5 美元，日本也有约 2000 日元，且这两国多年来的制造业工资水平并无大幅度增长。

对于大量中小制造企业甚至作坊式工厂来说，能通过人工解决的问题，就尽量不用昂贵设备——人走了可以再招，但是前置投入巨大，且“落地打八折”的机器设备，经过若干年折旧之后，可能只是一堆累赘资产。只有当人工无法解决一些生产问题，或者效率明显跟不上机器的时候，自动化替代才会成为企业刚需。

据我们研究观察，目前国内柔性制造和“无人工厂”普及率较高的行业，除了汽车、家电、

3C 数码等生产批量大、头部企业集中的行业，以及一些从事简单加工的行业等，其它制造企业与西方发达国家相比，更多的仍然是依靠“人海战术”。甚至在我国的产业结构中，一些越尖端的行业，越难以摆脱“手工作坊式”生产的影子。许多关键工序的实现还是要依赖操作者的熟练程度（图 3）。

从防疫物资的生产也可见一斑，口罩、防护服等低端产品的转产可以迅速跟上需求。但是生产难度较高的呼吸机时就开始露怯，大量的海外订单已经排到年底。

当然，并不能因此全面贬低中国制造的能力。即使是制造业发达的欧美国家，也只有通用、福特、特斯拉等几个为数不多的行业巨头，有能力迅速转产呼吸机或相关零件。

我国科技政策与管理研究泰斗、联合国大学新技术研究所高



图 3 国内大量机械加工，还处于高度依赖“人”的阶段

级研究员顾淑林女士曾对我们讲述一个细节。2018 年，一位留德的高级专家回到中国办厂，从事高精密的航天零部件加工。但是这位专家却发现，在德国学到的工业 4.0 知识根本用不到国内的产线上，仍然需要从 3.0，甚至 2.0 的课开始补起。

顾淑林认为，中国在尖端技术领域并不落后于世界强国，我们很早就能搞出世界领先的尖端武器和重大装备。但是却长期依赖于“人”，这些人一旦离开岗位，很多先进技术甚至面临“失传”风险。

“中国有一帮经验丰富的老工匠，但是目前最缺乏的，是把这些老工匠脑袋里的经验翻译成数字化公式、进行复制推广的新一代产业人。”

高端装备制造，是柔性制造要攻克的最最终堡垒，也是对“柔性”需求最强烈的领域。

这类行业的零部件批量小、品种多、结构复杂、加工难度大、装配工序繁琐，是最迫切希望保持速率优势，又期待生产弹性的

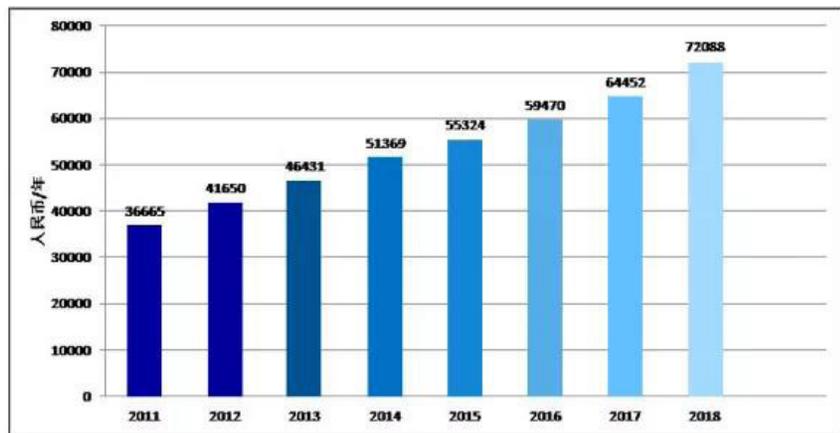


图 2 2011-2018 年中国城镇制造业从业人员工资增长情况
数据来源 / 国家统计局

领域。但恰恰是这些高端装备制造行业，加工工序过于复杂，工艺要求太高——没有长期工程技术经验的量化积累，就相当于地基不稳，智能化的柔性制造只能是空中楼阁。

压在企业头上的还有经济账——即使能全面实现柔性改造，购置生产线的额外成本也需要相当长的时间才能收回。

要想彻底改造这些“硬核直男”，还有相当长的路要走。

三、软肋和硬骨头

2015年，某重大装备制造央企曾经投入数千万元打造柔性制造样板车间，但是历时四年却进展缓慢。原因之一是软件问题，由于机器设备多为进口，在国外操作系统基础上再来编写国产流程控制软件，造成诸多运行逻辑出现冲突。

软件的研发，一直是中国制造业的软肋。

擅长于逆向开发的中国人，积累了大量响应需求的经验，能够高质高效的解决HOW（怎么做）的问题，但也容易形成思维局限——降低对WHAT（做什么）的敏感。这就相当于坐在副驾驶的位置上，其实永远学不会开车。

其二是硬件短板。例如，数控机床上一个工装夹具的加工精度无法满足要求，缺陷也会通过长链生产线逐层放大，导致整

个环节效率和产品质量的严重受制。同时，生产设备对不同软件系统的适应性差，也让总体效率大受掣肘。

硬件的能力，也是难啃的硬骨头。

1958年，在中国诞生了亚洲第一台数控机床（图4）。但是此后由于历史原因，中国机床行业陷入长达20多年的沉寂。与此同时，邻国日本却在工业化的道路上突飞猛进，在机床精度、转速和产品稳定性上精益求精，并建立了完备的产业体系。时至今日，国产数控机床仍然在大量

依靠价廉来换取市场占有率。

此外，“软硬融合”是柔性制造的最终钥匙——再高端的硬件如果过于“矫情”，与软件的兼容性差，只能越用越“死”，最终被更先进的设备淘汰。硬件的延展度和灵活度，在很大程度上决定了一套柔性系统的寿命值和生产能力。

软件功能需要硬件平台得以实现，硬件设备又依赖软件系统进行串联。而当下摆在中国制造业的现实困局是——软件开发尚未厘清头绪，硬件水平跟不上步伐，这个看似无解的莫比乌斯环，

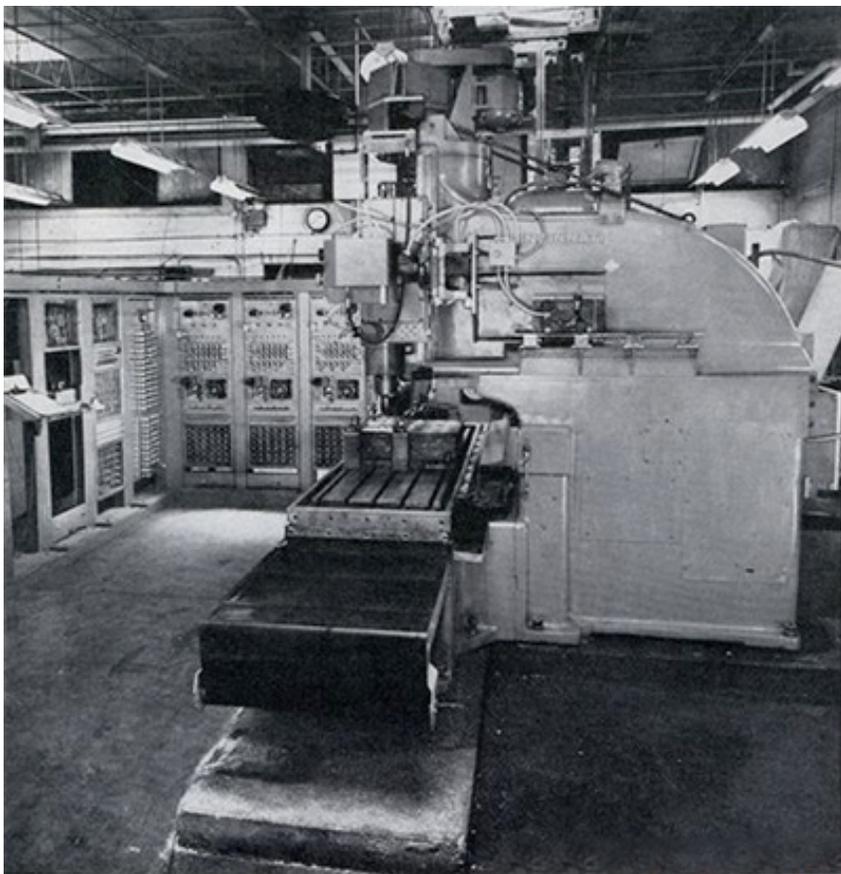


图4 亚洲第一台数控机床——北京第一机床厂与清华大学合作试制的X53K1三坐标数控机床

需要一点一点的撕开重组。

四、刚柔并济

用软件手段解决硬件问题，对非标设备进行调试和系统优化，是一种思路。

疫情期间，哈工大机器人集团（HRG）共派出5名骨干，用6天时间，对黑龙江省两家抗疫转型的生产企业临时采购的21台口罩生产设备进行调试，这些设备型号、规格各有不同，甚至有部分是“二手”。经过调试，共7条生产线释放了2倍的产能，并将合格率从80%提高到了95%。

反之，对标准化设备的系统进行个性化编辑，从而实现不同

的功能，是另外一种“柔性”思路。这类操作方式一般是：用规范化、模块化的硬件平台去承载不断迭代的软件系统，实现多重排列组合，适应不同的产品生产。这也是目前最经济的解决方案之一。

有经济实力和丰富经验的企业，可能会一次性投入巨资打造“刚柔并济”的未来车间，但这毕竟是极少数。

一个典型案例是三一重工位于长沙的18号工厂（图5），这个号称亚洲最大的智能化制造车间里，实现了生产中人、设备、物料、工艺等各要素的柔性融合。8条装配线，可以实现69种产品的混装柔性生产；在10万平方米的车间里，每一条生产线可以同时混装30多种的机械设备，

马力全开可支撑300亿产值。

软件和硬件，是如今柔性制造需要齐头并进，同步破解的两大难题。

软件的开发不能止步于IT部门，需要由企业最高决策者来部署和推动，贯穿整个组织和各大职能，并在运营环节落地。每一个生产环节通过信息化建立连接，并实现可视化。

硬件的标准化也非一日之功。不同的设备规范，一定程度上需要相互融合借鉴——这意味着工厂、企业，甚至大量行业都要逐步走出舒适圈，适应新的游戏规则。全球化的经济网络，也要求我们与国际接轨，充分考虑到国产设备与进口设备、零部件以及软件的可替代性和兼容



图5 18号工厂的柔性制造生产系统包含了大量数据信息：用户需求、产品信息、设备信息、生产计划等。依托工业互联网将这些大数据连接起来并通过三一的MES系统处理，能制定最合适的生产方案，最优的资源分配。

性，形成整个上下游产业链的疏通和规范化管理。

“多个庙就多个鬼”——自动化生产是减法思维，越简单越稳定；而柔性制造既要做减法，也要做加法。一条生产线上，用尽量少的设备和工具，实现生产更多产品的可能。

五、中体西用

清末洋务运动时期，洋务派就以“中学为体，西学为用”作为指导思想——主张以中国伦常经史之学为核心理念和原则方法，以西方先进技术作为辅助工具。

再先进的西方科技之术，也需要根植于中国的现实土壤，在中国智慧的浇灌下开花结果。

2018年，为了提升工具管理的自动化水平，某企业斥资上百万从海外引进了智能刀具立体库，然而运行一段时间却发现管理效率不升反降。

库房管理人员只是把刀具从普通库移入了智能库，但账目管理仍然是传统的 Excel 表格，并没有与信息系统对接，领用流程也仍然是纸质单据，而没有做到流转过程中的优化。

这套昂贵系统带来的唯一优点是，取用高处刀具不再需要搬梯子爬上爬下，用按钮解决存取问题。但是却常因多发的系统故障导致刀库卡住，维修人员迟迟不能到位影响生产进度——最终，这些立体库沦为了安置不常用、高价值刀具的“水晶棺材”。实现“工业 4.0”版本的柔

性制造，考验的绝不单是企业的技术能力，还有管理等各方面的软实力。而机制体制的问题，不是依靠引入一两项先进设备就能解决的——用一只昂贵的金鞍去配一匹老马，只会让老马更加不堪重负。

中国制造要真正实现从刚到柔的升级，也不能仅仅局限于对生产层面的关注，更需要全面开发上下游产业的柔性。以企业的制造能力和柔性程度为基础，结合供应链和市场，把产品的各个功能部件独立成单个模块，实现其任意组合和输出，而不同模块的生产流程和生产成本都柔性可控。

而这一系列复杂纷繁的排列组合，都只能依靠中国人自己的智慧，从漫长的实践过程中去寻找答案。MT

参考文献：

- [1] 邓宏筹.《面向 21 世纪的柔性制造技术》，2000
- [2] 肖永清.《柔性制造技术决定汽车工业的未来》，2009
- [3] 航空工业《航空品质的口罩机、压条机来了！》，2020
- [4] 潘锋.《国外柔性加工系统的发展状况、趋势及无人工厂的实践》，1983
- [5] 栾峻苇.《基于物联网的无人工厂技术探究》，2019
- [6] 中国电子报《朱森第：中国制造要补课 2.0，普及 3.0，示范 4.0》，2015
- [7] 比亚迪电子《日产 500 万的口罩工厂，比亚迪是如何打造的？》，2020
- [8] 黄旭东、陈卫福、康存锋.《数控机床与数控技术》，2000
- [9] 孟辛酉.《自动化技术在机械设计制造中的应用》，2020
- [10] 新华社，白田田.《“聪明工厂”助企业“精准复工”》，2020
- [11] 徐建立，姚湛.《柔性制造技术的应用与实践浅析》，2019
- [12] 李有兵.《柔性生产线智能控制系统设计》，2018
- [13] 李子宸.《三一重工：18 号厂房试验，从大厂房到智慧工厂》，2015

BEW2021



第25届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 25th BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR



2021年6月16-19日
上海新国际博览中心

Shanghai New International Expo Center
June 16-19, 2021



微信二维码



www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com