

# MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<https://www.cmes.org/>

2021 年第 4 期 总第 215 期

## “卡脖子”难题如何求解

——对发展“专精特新”中小企业的思考 p1

知识工程是制造业创新的坚固基石和科学方法

——《制造业知识工程》解读 p10

工业机器人技术现状：新兴技术、挑战与重点研究方向 p22

数字化转型的十面旗帜二十字方针 p37

# 目录

## CONTENTS



### 机械工程导报

### MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊  
2021 年第 4 期 (总第 215 期)  
2021 年 8 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: <https://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

- “卡脖子”难题如何求解  
——对发展“专精特新”中小企业的思考 1



#### 专家视点 EXPERT OPINION

- 知识工程是制造业创新的坚固基石和科学方法  
——《制造业知识工程》解读 10
- 工业机器人技术现状: 新兴技术、挑战与重点研究方向 22
- 数字化转型的十面旗帜二十字方针 37

# “卡脖子”难题如何求解

## ——对发展“专精特新”中小企业的思考\*



中制智库 王蕾

### 导语

中共中央政治局7月30日召开会议，分析研究当前经济形势，部署下半年经济工作。中共中央总书记习近平强调，要强化科技创新和产业链供应链韧性，加强基础研究，推动应用研究，开展补链强链专项行动，加快解决“卡脖子”难题，发展专精特新中小企业。此前，7月27日，中共中央政治局委员、国务院副总理刘鹤以视频方式出席全国“专精特新”中小企业高峰论坛时强调，“专精特新”的灵魂是创新，企业家要以“专精特新”

为方向，聚焦主业、苦练内功、强化创新，把企业打造成为掌握独门绝技的“单打冠军”或者“配套专家”。

### 一、中国工业化进程仍在路上，脱实向虚是危险倾向

“专精特新”，即鼓励创新，做到专业化、精细化、特色化。这个概念在我国已经发展了很长阶段，家喻户晓了。早在2012年4月26日，国务院发布《国务院关于进一步支持小型微型企业健康发展的意见》，首次提出

鼓励小型微型企业走专业化、精细化、特色化和新颖化的“专精特新”的和与大企业协作配套发展的道路，而这也是国家层面首次为中小企业发展方向定调。此后工信部出台了多次意见和通知，鼓励各地支持“专精特新”小企业发展，今年联合财政部安排专项奖补资金支持1000余家国家级专精特新“小巨人”企业加大创新投入。

国家层面支持“专精特新”已经有9年了，7月30日“专精特新”首次出现在政治局会议上。中央鼓励发展专精特新中小企业，这是振兴我国实体经济、

注：本文来源于中制智库公众号，是作者对中制智库理事长焦新望博士的采访改编。

夯实工业化基础、加快工业化进程的又一重大举措。

在新发展阶段、新发展理念和新发展格局的背景下，有必要重新检视一下中国的实体经济、中国的工业和制造业。过去这些年，房地产、互联网、金融、教培等等，一浪高过一浪，强调的多是新兴产业，是信息化，是结构调整、去产能。搞实体经济尤其办工厂、做制造的有些灰头土脸，被边缘化。现在回头看，脱实向虚是一个危险的倾向。

十九大之后，国家再次明确了实体经济立国的思想。总书记说，“实体经济是国家的本钱”，“制造业是实体经济的基础”。总书记的讲话用统计数据来理解，即实体经济的80%是工业，工业的87%是制造业。我们讲农业现代化、科技现代化、国防现代化，都要靠工业现代化来支撑。譬如说，中国已是军事大国，背后靠的就是中国成为世界第一制造大国的支撑。

国内现在广泛存在着现代化与后工业化关系的误解。现代化分为两个阶段，先是工业化，再是知识化，中国的特点是两者同时进行，且二者不可偏废。我们要实现百年目标，建设社会主义现代化强国，必须先建成世界制造强国。制造强国是现代化强国的先决条件。按照“中国制

造2025”的规划，再有4年，即2025年，中国就要进入世界制造强国行列，2035年全面实现工业化，我们距离完成工业化还有14年时间。道路漫长，任务艰巨，后工业化对中国而言为时尚早。“十四五”规划有一个新的提法，值得我们引起高度重视，“保持制造业比重基本稳定，巩固壮大实体经济根基”。也就是说，要警惕制造业比重下降过快。

制造业发展的一个特点和趋势就是专业化，以及专业化基础上的社会化。随着竞争的展开，市场的拓展，制造业分工越来越细。所以，振兴实体经济，振兴制造业，必须从专业化公司、专业化制造开始抓起。

总体来讲，发展专精特新中小企业要放在振兴实体经济、夯实工业化基础这个大背景之下来看，要放在2008年金融危机之后，先行工业化的西方各国开始再次提出“回归制造业”“再工业化”这个全球经济格局重塑的大背景下来看。中国对实体经济和制造业的振兴，将是一个与以往有所不同的重大的政策转变，这是顶层设计，是习近平经济思想的一个重要特点。也因此，大家要明白，对制造业的支持，对硬科技的支持，对专精特新企业的支持，将是一整套政策体系，不是零敲碎打；是长期战略，不是临时策

略。

中国是制造大国，但还不是制造强国。制造业由大变强，是新阶段制造业高质量发展的主要任务。我们说中国已是制造大国，是说规模世界第一。我们说中国还不是制造强国，是因为制造业发展以质量、结构、可持续来衡量，还与强国有较大差距。我们什么都能造，而且产量很大，但质量不高，合格率、寿命、安全性、可靠性、品质、品牌还不行，这些指标大约是美德日的五分之一到三分之一，尤其是零部件，国内整装厂宁愿花五倍价格也要进口零部件。我们的制造业产品结构上，原创产品少、高端产品少，尤其是出口产品中，主要是普通制造、传统制造。我们的专利产品少、研发投入少，可持续发展后劲有待提高。我们在工业软件、航空发动机、芯片、农业机械等方面与先进国家差距巨大，在传感器、实验精密设备、高压柱塞泵、高端电容电阻、高端轴承钢、精密抛光等等专业制造领域仍被国外垄断，而且，这些都不是靠大企业和科研机构可以解决的，也不是可以都靠规模化或举国体制来解决的，而是需要在量大面广的中小制造业企业中脱颖而出的专精特新企业中诞生。所以，也可以这么说，中小企业专精特新政策是2015年发布的“中国制

造 2025”的延续和深化，是中国制造由大到强的必由之路，也是建设制造强国的题中应有之义。

## 二、中小企业发展改善财富分配

一系列支持专精特新中小企业政策的出台，是对大企业、大平台、大财团和托拉斯崇拜的一次告别，也可以看作是中国企业发展策略一次大的反思和调整。从国家整治所谓产融结合的资本大鳄，到最近的平台企业反垄断，我们就能感受到这一点。大而不倒、赢者通吃、流量为王的游戏规则正在得到矫正；一个大的行业或地区，过度依赖一两个大企业带来的系统性风险，必须得到遏制。一味扩张、一味求大，必然出问题。从北大方正、上海电气、蚂蚁金服、恒大集团等等最近发生的风险敞口就可以看到这一点。

自从福特式工厂诞生以来，在肯定“规模经济”的同时，就有经济学家同时提出“规模不经济”。集中生产和大规模生产，的确可以带来交易成本降低和基础设施利用率的提高，但也带来效率损失、垄断、腐败和浪费等问题。1973年英国经济学家舒马赫写的一本书《小的就是美好的》，倡导小规模、专业化，日

本人也有“小而美”的说法。当然，德国管理学家西蒙的《隐形冠军：全球最佳 500 名公司的成功之道》一书更是为人们所熟知，该书 2005 年引进中国，全世界已有 20 多种译本。美国学者伯林翰 2005 年写了一本畅销书《小巨人》，主张不扩张也能成功的企业经营新境界，具有企业魅力的公司，如何抵制规模增长的诱惑，潜心追求卓越品质。美国有学者提出，要像爱护家里最小的孩子那样爱护中小企业。美国有一整套完备的中小企业保护法和促进法，有完备的维护竞争法和反垄断法。

刘鹤副总理在长沙召开的专精特新中小企业高峰论坛致辞中说：中小企业好，则中国经济好。再进一步讲，中小企业强，则中国经济强。中国经济发展最快最好的四个省份是广东、福建、浙江、江苏，这四个省的共同特点是一大批中小制造业企业成为经济基本盘。尤其浙江和台湾地区，中小企业发达，财富分配呈现出均富特征，中等收入家庭成为社会主流。这两年在议论的南北经济差距拉大，实质是南北方县域经济差距大，而县域经济的主角是中小民营企业，是中小民营企业基础上的块状经济、产业集群。南北差距，本质上就是中小企业发育好不好、民营经济发展好不

好的差距。总书记有长期在福建、浙江工作的经历，深知中小民营企业的重要性，习总书记强调发展专精特新中小企业，事出必然，顺理成章。

## 三、产业链竞争需要“专精特新”来卡位

过去有一个说法，国家间的竞争是跨国公司的竞争。现在我们可以修正一下，国家之间的竞争是产业链的竞争。国家既要有强大的链头企业，即跨国公司，但其链条上也要有一批专精特新的中小企业来把守、卡位。链头和链身，缺一不可。由同类或关联的中小企业扎堆而成的企业群落，就是产业集群。产业集群的大小、强弱，将是未来地区竞争和国家竞争的秘密武器。这就是中小企业凝聚起的力量。

改革开放以来，我们奉行引进、消化、模仿的技术跟随战略，即所谓后发优势。现阶段，中国的国际环境发生了逆转性变化。其一，美国为首的西方国家，在高科技和先进制造上采取小院高墙的隔绝策略，精准脱钩，从贸易战延伸到技术战和产业链战。以芯片为例，美国半导体联盟赤裸裸对中国卡脖子，已经严重影响到中国制造业各个行业，造成中国经济循环不畅；其二，疫情

后各国都开始追求产业链的自主可控，产业链全球布局的要素价格问题和生产成本问题成为次要的考量，产业链的自主可控成为一个国家生死攸关的经济安全问题，全球产业链开始收缩；其三，中国在某些制造领域与西方已在同一起跑线，正如任正非先生所说，大家都到了无人区，你不能参考我，我也没法参考你，都要靠自己摸索了。未来，中国先进制造业发展必须以自主创新为主，引进吸收为辅。新的形势要求中国必须要有一批自己的专精特新企业。

中国制造经历近 40 年快速而粗放的发展，目前正出现一个历史性转变，即从集成制造转向基础制造。改革开放之初，为了满足人民群众的生活需要，先解决有没有的问题，最终产品的制造实则是组装。至于是进口配件组装还是国产配件组装，不是最为紧迫的问题。汽车、手机、飞机莫不如此。集成思维最为典型的是汽车。进口整车高税，但零配件免税；新能源整车有补贴，零配件无补贴。直到去年上海引进特斯拉，才注意到零配件的国产率问题。

集成思维造成了装配虚胖，零配件太瘦，整个制造业没油水、没韧性。从原料到制成品，我们缺中场技术，缺中间制造。西方

先行工业化国家是先分工协作制造零部件，最后再发展集成组装。我们则倒过来，先有集成组装，现在再反过来发展细分领域的零配件制造，补上零部件制造的基础课。“十四五”规划提出产业基础高级化，产业链现代化，就是有补课的意思。制造业的产业基础是六个“基”，即基础零部件、基础材料、基础工艺、基础设备、基础芯片、共性技术基础。这些既要靠国家科研机构 and 大型企业，更要靠一大批专精特新中小企业。

#### 四、补短板是应急，锻长板才是长远之策

从行业格局看，专精特新企业的分布领域主要是三个方面。一是与工业强基有关的，就是我们上面说的六个基；二是与“中国制造 2025”中规划的十大重点领域相关的，所谓十大领域是指新一代信息技术、高档数控机床和机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、新材料、生物医药及高性能医疗器械、农业机械装备；三是与卡脖子技术和产品相关的，如我们上面提到的芯片、传感器等等。

以往东南沿海制造业的出口

加工和组装集成，被长期压制在全球价值链底端，难以实现创新发展。未来，细分领域的隐形冠军企业多了，不仅可以大大优化内需产业链、供应链，而且可以提升中国制造在全球价值链的位置。专精特新企业的成长，不仅可以强链、铸链，促进中国制造走向全球价值链的中高端，而且对于推进国内产业链逐步融入全球创新链，将创造更多机会，赢得更大主动权。

专精特新企业主导产品通常都有“补短板”“锻长板”“填空白”的作用，在国内细分行业中拥有较高的市场份额。从长远看，一个经济体永远不可能把所有的短板都补完，除非是自绝于全球分工贸易体系。补短板是应急，锻长板才是长远之策。经过几年坚持不懈的专精特新企业发展积累，必将形成我们自己的产业长板、产品长板。到那时，别人卡你的脖子，你就可以攻他的软肋，戳他的眼睛。

#### 五、支持“专精特新”，中央和地方都动了真格

我国将“培育‘专精特新’小巨人企业”写入了“十四五”规划的“深入实施制造强国战略”之中，可见其属于制造业。国家和地方对专精特新的专业化、精

细化、特色化、新颖化定义，有一些共同性规定和内涵。如专业化主要是产品在细分市场有较高占有率；精细化主要是拥有一定专利和知识产权收益，研发投入比重高；特色化指独门绝技，以及商标知名度；新颖化是技术创新、管理创新或商业模式创新。

国家级专精特新“小巨人”企业的基本条件，主要是四个指标：经济效益、专业化程度、创新能力和企业管理。从目前评比的情况看，各地报送企业积极踊跃，最终遴选时，市场占有率可以放宽，但细分行业专注度和产品的不可替代性将占优势。

目前，对中小企业的支持政策已呈现连续性、梯度性。既有各地培育的一般专精特新中小企业，亦有各级政府认定的专精特新企业小巨人企业、隐形冠军企业。在工信部体系，有三个序列，一是中小企业局主导的专精特新小巨人序列，二是产业政策法规司和中国工业经济联合会主导的单项冠军序列，三是科技司主导的新兴产业领航企业序列，这个块头稍大一些。各地评选培育的独角兽、瞪羚，类似于新兴产业领航企业，只是体量较小。

目前全国共有 11.3 万家“专精特新”入库培育企业、3.7 万家省级“专精特”中小企业、4992 家专精特新“小巨人”企业、

1832 家国家级专精特新“小巨人”企业（中央财政重点支持的有 727 家）、596 家单项冠军企业。

“十四五”期间，工信部将形成“百十万千”专精特新企业群体，通过“双创”带动百万家创新型中小企业、10 万家省级的专精特新企业、1 万多家专精特新“小巨人”企业以及 1000 家单项冠军企业。同时在资金保障上，工信部联合财政部在“十四五”时期将通过中小企业发展专项资金累计安排约 100 亿元奖补资金，分三批重点支持 1000 余家国家级专精特新“小巨人”企业高质量发展。

## 六、抓“专精特新” 需要有个强有力的牵头部门

德国、日本、美国等发达国家在支持“专精特新”一类企业方面都有成功的先例可寻。这些“专精特新”企业不仅给全社会创造了财富，更提升了所在国家的产业竞争力。

因为不直接面向消费市场，“专精特新”企业的许多细分领域甚至不为人所知，中间产品居多，ToB 居多。我们最耳熟能详的是德国的“隐形冠军”。

德国管理学家西蒙对那些不知名却又占据本行业头部地位

的企业，称为“隐形冠军”。西蒙对隐形冠军企业另一个定义是“利基企业”，即拥有行业内定价权，可以决定本行业平均利润的企业。

按照西蒙的口径，德国是世界级隐形冠军企业最多的国家，约占全球一半左右。德国经济总量不及美国的五分之一，外贸出口额却与美国旗鼓相当。秘密就在于，德国有一大批竞争力极强的中小企业，构成了德国制造和出口贸易的中坚和脊梁。

德国隐形冠军的培育成长，已形成一整套成熟经验。主要是五条。一是突出企业主业，制定长远战略，咬定青山不放松；二是通过“二元制模式”（学校+工厂）输送有效的专业人才、领军人才；三是标准先行，追求品质，倡导极端制造、高强度研发；四是以工业园区为载体，集群式发展；五是重视技术组织，以马普学会、弗劳恩霍夫协会、亥姆霍兹国家研究中心联合会和莱布尼茨科学联合会四大机构为代表。这些“四不像”机构打通市场技术和中间制造，是科研与市场的纽带，有力的催生了中小企业商业化成熟工艺和产品。

专精特新企业的寿命一般较长，但也有其生命周期。专精特新企业要密切关注新一代信息技术和技术变革，关注跨界创新和

技术替代，一些新技术的出现可能带来整个行业的消失。

德国、日本、美国，包括我国的台湾地区，都有专门国家级的中小企业促进机构，有的是正部级，或至少副部。台湾的中小企业局和各地中小企业技术中心，发挥了积极作用，已连续举办30年的台湾磐石奖专门奖励有贡献有特色的中小企业，效果很好。

我国对中小企业的管理比较分散，一度处于九龙治水状态。小微企业归口市场监管总局，县以下中小企业归口农业农村部乡镇企业局，一般中小企业归口工信部中小企业局。曾经有专家建议成立一个副部级的中小企业局，统管中小企业发展，但一直停留在纸面上。工信部抓专精特新中小企业，干了一件好事，也干了一件大事，牵住了发展中小企业的牛鼻子，非常及时，意义十分重大。

## 七、“专精特新”政策的含金量越来越高

2002年6月，为改善中小企业经营环境，促进中小企业健康发展，扩大城乡就业，发挥中小企业在国民经济和社会发展中的重要作用，九届全国人大通过（2017年9月再次修订）《中小

企业促进法》。

2011年9月，工信部发布的《“十二五”中小企业成长规划》，提出将专精特新发展方向作为中小企业转型升级、转变发展方式的重要途径，形成一批“小而优”、“小而强”的企业，推动中小企业和大企业协调发展。

2012年4月，国务院发布《关于进一步支持小型微型企业健康发展的意见》，首次提出“鼓励小型微型企业发展现代服务业、战略性新兴产业、现代农业和文化产业，走专精特新和与大企业协作配套发展的道路”。

2013年7月，工信部发布《关于促进中小企业“专精特新”发展的指导意见》《工信部企业（2013）264号，要求加强对专精特新中小企业的培育和支持，促进中小企业走专业化、精细化、特色化、新颖化发展之路。

2019年8月，中央财经委员会第五次会议指出“要发挥企业家精神和工匠精神，培育一批专精特新中小企业”。

2020年7月，工信部、发改委、科技部、财政部等17个部门联合发布《关于健全支持中小企业发展制度的若干意见》提出“健全专精特新中小企业、专精特新小巨人企业和制造业单项冠军企业梯度培育体系、标准体系和评价机制，引导中小企业走专

精特新之路。完善大中小企业和各类主体协同创新和融通发展制度，发挥大企业引领支撑作用，提高中小企业专业化能力和水平。”

2021年1月，财政部、工信部联合发布《关于支持“专精特新”中小企业高质量发展的通知》，明确“十四五”期中央财政将累计安排100亿元以上奖补资金，重点支持1000余家国家级专精特新“小巨人”企业高质量发展。

2021年3月颁布的《十四五规划》提出，“推动中小企业提升专业化优势，培育专精特新小巨人企业和制造业单项冠军企业。”

2021年7月份，工信部、科技部等六部门联合发布《关于加快培育发展制造业优质企业的指导意见》，明确完善金融财政和人才政策措施，用好现有资金渠道，支持“专精特新”中小企业高质量发展。

7月30日政治局会议，要求“开展补链强链专项行动，加快解决“卡脖子”难题，发展专精特新中小企业。”

## 八、中小民营企业遭疫情冲击，不应“落井下石”

“专精特新”企业都是民营企业，很容易受到经济周期的影响，如2008年经济危机、前两年股权质押融资杠杆太高引发的国进民退等。2020年新冠肺炎疫情，对民营企业造成很大的冲击。

中小企业和民营经济是一枚硬币的两面，是同一回事，有时也叫民营中小企业、中小民营企业。我们现在听到的都是专精特新中小企业，而没有专精特新国有企业和专精特新大型企业的说法。国有企业很少有专精特新企业，是因为专精特新企业都高度专业化，不追求规模化，专精特新企业依赖于独门绝技和技术发明，依赖于个人创造力。由于国有企业很难为这种依托于个体的创新要素定价，而高级人力资本要求产权明晰，回报明确，因此中小民营企业更适合专精特新要素的配置。

疫情对中小制造业企业的冲击非常严重。一大批的中小企业消失了，网上有各种统计数据，虽然口径不一，但可以参考。受影响最大的当然是流通行业、餐饮、旅游、电影、会展等第三产业，但第三产业中一般包含有50%以上的制造业，因此中小制造企业也受到间接影响，尤其是交通中断，运输成本猛涨，国外疫情蔓延造成产业链断裂，需求萎缩，轻纺、家具等等一般制造业普遍

减产、亏损，国内除防疫物资之外的外向型中小微制造企业普遍出现困难。

当前，疫情仍在持续当中，下半年经济下行压力加大，六保、六稳仍然是首要的经济工作。稳就业、稳民营企业和中小企业的预期是重中之重。目前情况下，我们反对一些大资本趁机抄底，落井下石，而应该扶危济困，雪中送炭。可以料定，对于处在困难中的民营企业，缺乏信任和机制不能打通的混改，不会有太好的结果。

## 九、“内循环”呼唤“精英制造”

“专精特新”属于制造业，此前改革开放40年中，在我国外贸高度发达的背景下，制造业也高速发展。在“十三五”期间，随着全球制造业的相对饱和，尤其是中美经贸摩擦背景下引发的逆全球化思潮下，制造业发展遇阻。当前我国进入新发展阶段，加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，对“专精特新”企业的发展将带来新的挑战和机遇。

入世十年，从2001到2011，是中国制造业飞速发展的黄金十年，中国制造业企业充分享受了全球化红利，一举成为世

界工厂。时过境迁，规则正在重构，数字经济时代的全球化新规则正在酝酿当中，WTO的红利已经见顶，美欧等西方国家对华遏制，高科技和先进制造精准脱钩，全球化会不会变成两套规则的半全球化，仍有待观察。

机遇也同时存在。一方面，对冲逆全球化，内循环为主是一个必然选择。但另一方面，中国内需市场开始发力，借助于电商和新基建，国内统一大市场快速形成，在继中国制造、中国基建、中国高铁之后，一张新名片正在被擦亮，这就是中国市场。内循环为主体、内外循环互促的新发展格局，将是专精特新企业的春天。

未来中国经济发展的动能将主要靠消费拉动和创新驱动。中国的中产阶层在壮大，接近4亿人，甚至超过美国人口。从商品零售额来看，目前中国已是全球最大消费市场。85后从事新兴产业的就业人群和近两年退休的老年人群，是中国市场的消费新势力，他们追求生活品质，也有很强的消费能力。消费升级将传导到制造业，推动制造升级。传统制造业企业走专精特新之路成为必然选择。在强调中小企业作用的时候，呼吁从大规模制造转向大众制造，现在还需要从大众制造转向精英制造。

## 十、保护好中小企业就是保护我们自己

高层一直以来呼吁要从政策、制度上增加对民营中小企业的支持，为中小企业发展创造良好环境。

总书记曾说道，“民营企业 and 民营企业家是我们自己人”，因为我国的中小民营企业提供了 50% 以上的税收、创造了 60% 以上的国内生产总值、完成了 70% 以上的发明专利、提供了 80% 以上的就业岗位、占企业总数的 90% 以上，并容纳 90% 以上的新增就业。中国的民营中小企业太不容易了，太珍贵了，创造更好的投资环境、营商环境，保护好中小企业，就是保护我们自己，也是应对国际变局的根本途径。

关于民营经济的产权保护和企业家权益保护，近年已经出台了一系列政策法规。2016 年中共中央、国务院《关于完善产权保护制度，依法保护产权的意见》；2017 年中央《关于营造企业家健康成长环境，弘扬优秀企业家精神，更好发挥企业家作用的意见》；2018 年 11 月 1 日习近平总书记召开民营企业座谈会提出从六个方面落实好关于民营经济发展的政策举措，之后全国人大、最高院在全国范围开展执法

大检查，最高院对司法解释涉及民营企业的不平等规定一律废止。这意味着民营经济发展的政策法规和营商环境越来越完善，越来越优化。

让市场在资源配置当中起到决定性作用，就是在资源配置上打破公有和非公的界限，倡导所有制中性、竞争中性和平等竞争。未来，还应该像《外商投资法》一样，以法律的形式推进民营企业营商环境、投资环境的建设，使营商环境和投资环境法治化、透明化、平等化。

## 十一、如何破解金融支持中小企业的世界性难题

近年来，资本市场为支持创新创业起到了重要的资本形成的作用。近期有一个数据显示，工信部发布第三批“专精特新”小巨人企业公示名单，共有 2930 家企业，其中有 213 家新三板公司入围名单。有 6 家精选层企业，分别是：星辰科技、德瑞锂电、万通液压、观典防务、长虹能源、泰祥股份；71 家处于创新层，包括安达科技、润成科技等；136 家处于基础层，包括驿路通、金冠科技等。然而，当前“专精特新”企业在寻找股权投资、在资本市

场上市、发展、或者寻求并购过程中仍存在痛点。

对中小企业的金融支持是一个世界性难题，主要难点是信息不对称，信用定价难。金融支持更是中国中小企业发展的一条瘸腿。这与中国金融制度最初的设计有关，一是间接融资为主，银行比重独大，二是为大企业为国有企业提供金融服务为主，对中小企业的金融供给严重不足。发展专精特新企业，迫切需要一揽子体系化的创新性政策和制度设计。

问题解决层面，硅谷探索出了对高成长性中小科技企业以风险投资为主的金融支持体系，值得借鉴。风投公司往往是和合伙企业结合，是有限合伙，只拿钱的叫 LP，合伙企业内部的人，是 GP，叫普通合伙人。普通合伙人既要承担无限责任，还要承担连带责任。这些早期的 GP，也拿不出很多钱，为了吸引和稳定团队，可以拿一个期权，上市以后可以兑现。当然还有可转债、技术股权化或人力资本股权化等形式。

国内资本市场已经具备为专精特新中小企业发展提供金融支持的基本条件，主板市场、创业板、科创板、新三板等上市的已经有一些专精特新企业。尤其

是借助于科创板，一些企业已经由小变大，由小变强，成为行业翘楚或头部企业。资本市场对制造业细分领域头部企业的价值也开始给予充分认可，硬科技、小巨人类的上市企业呈现出高成长性、高吸引力；债券市场通过采取增信措施，支持“专精特新”中小企业通过发行债券获得更多中长期融资，也有不少成功范例；银行与创投机构合作，投贷联动，债权融资+股权融资。“专精特新”中小企业融资方式和渠道正在不断拓宽。

## 十二、密织“专精特新”资金保障网，科技金融亟待入场

近年来随着商业银行对中小企业的支持，也逐渐注重对“专精特新”的支持。建行、中行、邮储、浦发等多家银行都对“专精特新”提供专项金融支持。比如中国银行河北分行三年来累计对接“专精特新”中小企业近1600家。深入分析“专精特新”企业特点，量身定制《“专精特新”工企贷》专属服务方案，截至目前，已累计为“专精特新”企业提供信贷支持近80亿元。总体来说，随着一系列支持专精特新企业政策的出台，各地金融机构

尤其银行，开始分层次、分批次、多元化支持专精特新企业。

目前，银行仍然是中小企业资金来源的主渠道。所谓贷款难、贷款贵，就是融资主渠道不畅，其核心问题是担保。提高银行对中小企业的贷款投放能力，必须建设全国中小企业征信系统。当然企业也要按银行要求，管理规范、技术扎实、财务数据真实。

银行对中小企业，一方面是提高信用贷款的占比，降低对担保和抵押物的依赖，另一方面也可以提高首贷率发展保理业务和供应链金融，金融机构要基于专精特新中小企业实际和需要，开辟新业务、新平台、新产品，帮助中小企业缓解资金压力。

服务专精特新企业，科技金融类服务机构更有优势。新金融机构可以利用信息技术和大数据，构建科技平台，打通信息链、信用链、资金链，促进企业与金融机构成交并共同发展。

## 十三、打造中国版隐形冠军的核心竞争力

对于企业发展而言，最终还是需要靠企业家精神和自身努力。对于“专精特新”企业自身来说，在当前经济转型大背景和政策大力支持下，打造持续的核

心竞争力在未来十分重要。

中制智库在第六届中国制造强国论坛上启动了《隐形冠军》项目，旨在发现、培育、宣传制造业细分领域的隐形冠军。中制智库与德国隐形冠军协会、浙江大学隐形冠军国际研究中心联合推出了中国制造业企业隐形冠军的评价体系，引导专精特新企业持续打造核心竞争力。

我们从四个方面来衡量、评价和培育国内隐形冠军企业的核心竞争力。

一是从产品角度。强调产品的专用性和不可替代性，深耕细分市场，性价比高，有独创，难模仿；

二是从市场角度。是指产品市场占有率或首位度具有较大优势，在所处行业中具有领导地位，有行业标准制定权和定价话语权；

三是企业角度。敢于从无到有，潜心若干年做出一个市场。企业的持久性强，传承性好，对多元发展持谨慎态度；

四是企业家角度。是指该企业的主要负责人是具有工匠精神和科学精神特质的企业家，偏执，苛刻，有足够战略定力与意志力。

以上四点，简略来说即为“四个专”：专用、专业、专注、专家。MT

# 知识工程是制造业创新的坚固基石和科学方法

## ——《制造业知识工程》解读



安世亚太科技股份有限公司 国家工业软件与先进设计研究院 田锋

【编者按】“智能制造系列丛书”是“十三五”国家重点图书出版规划项目，由中国机械工程学会和清华大学出版社合作，组织国内智能制造细分领域的权威专家编写，旨在将智能制造领域的相关知识和实践成果全方位、多维度地展现给读者。本刊将连续刊登对这套丛书的介绍与解读，为阅读这套丛书的读者提供参考。

中国制造业正在经历去产能、调结构、产业升级的阵痛，中国制造在走向中国创造的过程中，一直在寻求创新的手段和方法。知识工程在加速人员培养、弥补科技人才断层、促进企业的智力资产保值增值、驱动企业研发创新等方面具有重要的应用价值，为制造业的创新铺就了坚固的基石，“智能制造系列丛书”之《制造业知识工程》一书是田锋先生及其团队对多年知识工程实践工作的总结。在国家大力倡导“创新”的关键时刻，该书中总结和提炼的制造业知识工程建

设方法对中国制造业的知识传承、积淀，解决人才断层的难题，以及对企业基于知识的创新发展都具有重要的意义。

### 一、制造业知识工程建设的背景

研究发现，中国企业存在较为严重的“人才断层”现象。我国企业在用一批非常年轻的队伍进行越来越复杂系统的研制，其中潜藏着巨大的风险，人才断层已成为企业不得不直面并重点解决的问题。解决人才断层问题不

能寄希望于返老还童丹和长生不老药。人才的核心价值是经验与知识，当我们把人才断层定义为知识和经验的断层时，发现“灵丹妙药”真的存在，那就是“知识工程”。

企业强大之处往往不在于引进了多少先进技术，而在于真实积累了多少现有成果。知识和经验的传承本来是一件自然的事情，但是中国企业的人才断层现状要求我们必须通过特殊手段来强制完成这一使命，这个特殊手段就是知识工程。

从知识与创新的关系来看，

当前正是我国大力倡导“创新”的关键时期，中国企业一直在寻求转型升级之道，希望在短时间内进入发展快车道。产品通过引进消化可以跨越年代，但企业的技术积累无法跨越，企业的技术发展模式主要是“持续进化”，而不是“突变式创新”。企业的生产力和竞争力由两个能力构成：创新能力和仿制复制能力。创新能力决定了企业能做多强，仿制复制能力（知识共享）决定了企业能做多大，两者缺一不可，它们的乘积决定了企业发展能力，因此，创新和知识具有明显的共生关系。不基于知识积累的创新，是缺乏生命力的创新；脑筋急转弯式的创新，是给人做嫁衣的好点子；不进行复制重用的创新是无效益的创新，是科研体系中的最大浪费。

中国企业与国际一流企业的差距，不仅在于对创新和知识的驾驭能力，更在于对“知识与创新共生关系”的认知。实施知识工程不仅让企业的创新拥有了坚固的基石，更是为企业实施创新提供了最有效的科学方法与路径。

《制造业知识工程》（以下简称“本书”）一书内容分为三大篇：知识工程框架与蓝图、知识增值加工技术，以及知识工程实践与案例。以下将展开本书核心内容的介绍和解读。

## 二、制造业知识工程体系的脉络

本书知识工程框架与蓝图篇旨在从顶层视角建立知识工程的框架，提出知识工程的规划与建设方略，并展望知识工程的应用蓝图——智慧研制。

### 1. 面向流程的知识工程实践

在笔者团队提出精益研发理念时，知识管理是其中一项重要组成部分，但到底如何做，在当时是一道难题，因为我们发现很多中国企业都进行过知识管理相关工作，但大部分都没有发挥作用。我们通过研究发现，多数企业的知识管理工作明显存在以下三大困局：

（1）无知识。资深员工不知如何将知识共享出来，甚至意识不到自己有知识。当我们请即将离岗的专家将他们的知识梳理出来的时候，专家们往往是一脸茫然。

（2）弱知识。由于知识的梳理和挖掘存在问题，所以知识管理软件中的知识过于泛泛，与工作连接关系较弱。另外，知识的强弱是相对而言的，知识只有放在正确的位置才能称得上知识，否则就是冗余信息。

（3）死知识。即使平台中

有一些有用的知识，但在遇到问题时却反倒找不到这些知识。研制人员通常是通过搜索方式来寻找知识，往往发现要么搜索出来太多无关知识，要么搜索出来很少的知识，难以支持研制工作。

以上困局使得即使是开展过知识工程工作的企业，知识也没有融入产品研制过程，没有对研制活动起到支撑作用，存在知识与研制两张皮现象。为此，我们提出一个新的解决方案，那就是知识与研制流程伴随。该方案是一个两层结构：底层结构与普通的知识管理做法相同——知识库+知识管理系统；上层结构是业务流程（或研制流程）及业务活动（工作包）。这样可以利用研制业务活动进行知识的产生、组织、管理、应用和创新。这个方案的以下特点可以很好地解决前述“三大困局”：

（1）有知识——让专家意识到自己确实有知识，且让专家在知识挖掘和整理的过程中有章可循。当专家明确了要梳理自己擅长的工作包相关的知识和资源时，他们都表现得驾轻就熟。

（2）强知识——所有知识都与工作直接强相关。无论用何种方法获得知识，都是雪中送炭的知识，而不是锦上添花的知识。工作包中的知识只可能是与完成本工作包相关的知识，其他知识没有机制和机会出现于此。

（3）活知识——在业务需

要的时候，知识就出现了。变“人找知识”为“知识找人”，让知识主动推送到研制人员的工作桌面上。工作人员领取到工作包的时候，知识就同时获得。

该方案思路清晰，方法具体，一经提出，便得到了企业的认可，只要企业持之以恒，知识工程便可落地。我们把这个方案称为“面向流程的知识工程”，该方案在知识工程的企业落地中起到了关键作用。

## 2. 知识工程三层结构

虽然面向流程的知识工程在企业受到欢迎，但仍然有一些问题尚未得到好的解决，那就是知识本身的问题，包括以下两方面：

(1) 远知识——知识似乎

与工作有关，但距离业务应用太远，使用起来不直接、不方便；同一条知识，不同的人理解不同，应用效果也相去甚远。

(2) 浅知识——只关注显性知识的表面价值，看不到隐性知识的深层智慧。

为此，我们提出以下两项要求，作为知识工程下一步发展的重要方向：

(1) 近知识——所有的知识可以像工具那样直接使用，无需二次加工，无论用何种方法获得知识，在应用系统中可以即插即用。工具化的知识具有自动化和智能化特征，将人为因素降到最低。

(2) 深知识——提炼归纳分析知识的隐性价值。利用智慧分析方法，将隐性知识按照业务

应用情景显性化，在研制人员工作过程中获得智慧导航。通过以上的理论发展，我们对两层结构进行优化和扩展，形成由三个层次构成的知识工程体系，如图1所示。

三层结构中的中间层是传统的知识管理体系，它将已有知识按照业务需要进行分门别类管理，支撑业务人员的查询和搜索。

知识管理向上发展是面向流程的知识工程的重点，向下发展是知识工程下一步发展的重点。

知识管理向上，梳理研制流程，将知识与研制流程的工作包伴随，将知识融入流程。

知识管理向下，深挖设计过程中的知识，根据知识的类别，选择合适工具进行增值加工。通过软件的知识建模工具生成数字

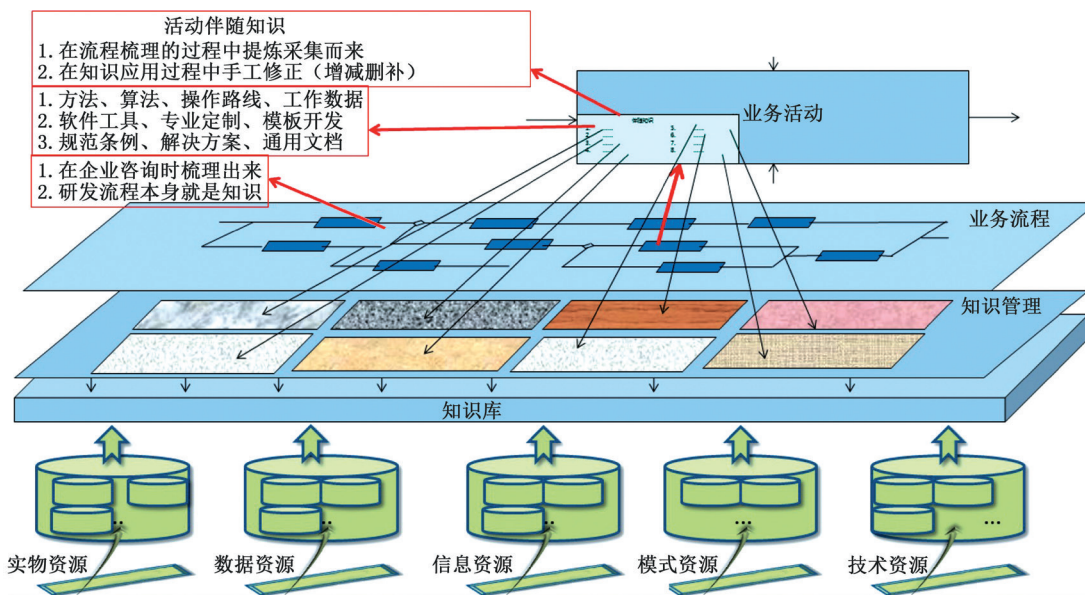


图1 制造业知识工程体系的三层结构

化和工具化的知识，并直接与相关研制工具建立关联，使这些知识天然具有与业务工作环境互动的特点，直接启动应用，使知识与设计活动紧密融合，直接支持设计工作。另外，这种方式也提供了随用随积累、随用随创新的知识积累与应用模式。

### 3. 知识资源增值是核心

谈及知识工程，我们首先要回答的一个问题是“什么是知识”。学术上关于“知识”的定义其实有很多，但实践中要按照这些定义进行知识工程工作却并不容易。在工程应用中，我们需要的是一个具有“实践”意义的知识定义。要回答这一问题，我们需先回到企业经营的本质来寻找知识的本质。

一家正常经营的企业，一定有三条线并行：一是“主营业务”，二是“业务管理”，三是“业务资源（知识）”。

“主营业务”是企业生存的主线。研发型企业的主营业务是产品和技术研发。主营业务是一个过程，通过这个过程，企业将原材料变成满足客户需求的产品，因此，主营业务的目标是产品，主营业务的本质是“满足客户需求”。

“业务管理”的目的是保障主营业务按照既定的时间、路线和质量达成既定的目标——产出

满足客户需求的产品，管理的本质是让业务单位和业务人员“有诺必践，有行必果”。

“业务资源（知识）”的目的是保障主营业务具有可行性和高效率。业务人员一定会想方设法寻找参考物，让工作一次做对，这些参考物在企业称为“资源”，起着知识的作用。在企业中，知识的本质是“参考资源”，这种资源是经过整理、加工、增值之后具有参考价值的资源。对于科技型企业来说，知识是“增值的科技资源”，知识工程的一项重要过程就是科技资源的增值过程。

结合通用的科技资源划分法和中国企业的实际，我们将工业企业的科技资源分为九类：硬件资源、软件资源、设备资源、人力资源、数据资源、信息资源、模式资源、技术资源、产品资源。

任何企业一经创建，总是会源源不断地创建和产生资源，这些资源的自然利用是企业应用知

识的最初级形式。如果我们对资源进行改造加工，提升其显性化、共享化、智能化程度，则可使资源更接近业务，就更具有知识特征，因此，知识是被增值加工后的资源。

依据载体形式和加工手段特征的不同，进一步将以上九类知识（资源）归纳为五类（表1），并依据价值差异对其划分层级：技术类、模式类、信息类、数据类、实物类，不同资源类型采用不同技术加工手段，提升其知识特征，是制造业知识工程的核心所在。

这五类知识也具有层次递进的特征。针对此，本书提出五种知识层级提升方法，即增值加工方法：数字化、标准化、结构化、范式化和模型化。在智能制造时代，大数据分析方法的出现为知识层级的提升开辟了一种新方法——智慧分析法，使得我们可以获得全息化的知识，因此，全息化是第六种知识加工方法。知识增值是知识工程体系的灵魂，

表1 九类资源归类和加工后的知识化特征

| 编号 | 资源小类 | 资源大类 | 资源层级 | 加工方法 | 知识特征 |
|----|------|------|------|------|------|
| 1  | 产品资源 | 技术类  | 4    | 模型化  | 智能化  |
| 2  | 技术资源 |      |      |      |      |
| 3  | 模式资源 | 模式类  | 3    | 范式化  | 自动化  |
| 4  | 信息资源 | 信息类  | 2    | 结构化  | 共享化  |
| 5  | 数据资源 | 数据类  | 1    | 标准化  | 有序化  |
| 6  | 人力资源 | 实物类  | 0    | 数字化  | 显性化  |
| 7  | 设备资源 |      |      |      |      |
| 8  | 软件资源 |      |      |      |      |
| 9  | 硬件资源 |      |      |      |      |

是知识效益化和企业智慧化的关键。

#### 4. 知识工程体系蓝图和框架

围绕知识的智慧化加工及其工程化应用，形成相应的技术、工具、流程、标准、规范、人才、组织以及这些要素的载体——知识工程平台，共同构成知识工程体系，如图2所示。

知识工程体系是典型的社会技术学体系，因此，我们采用社会技术学模型设计知识工程的体系模型（图3）。

知识工程体系建设以“知识提升企业智慧”为战略，从人才、组织、流程、标准、规范、技术、工具、方法以及平台等方面综合考虑，制定长期规划和建设方案。

在技术方面，重点是知识工

程加工技术、搜索引擎技术、分类聚类算法等；在流程方面，重点是知识伴随、采集、聚集、加工、应用等相关的流程、规范和标准等；在人才、组织方面，重点是知识工程的团队组织、任职资格体系、考核激励和人员培养等；在平台方面，利用知识工程框架和企业的各类知识加工和应用系统，搭建集成信息化平台，承载整个知识工程体系。

将社会技术学模型展开形成知识工程完整体系框架，如图4所示。

#### 5. 知识工程成熟度

知识工程体系的建立不可能一蹴而就，需要先对企业进行成熟度评估，科学地设立成熟度进化路线，长远规划，分步实施。我们用“知识工程成熟度”来衡

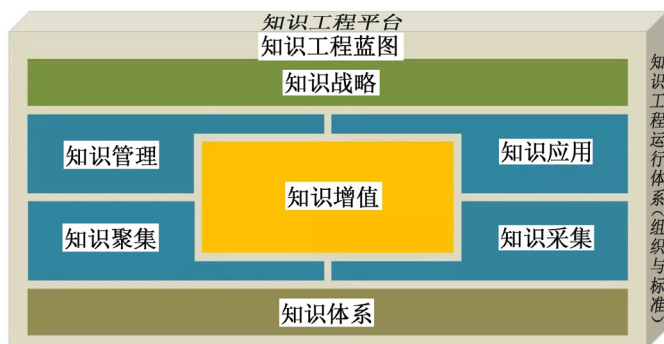


图2 知识工程体系蓝图

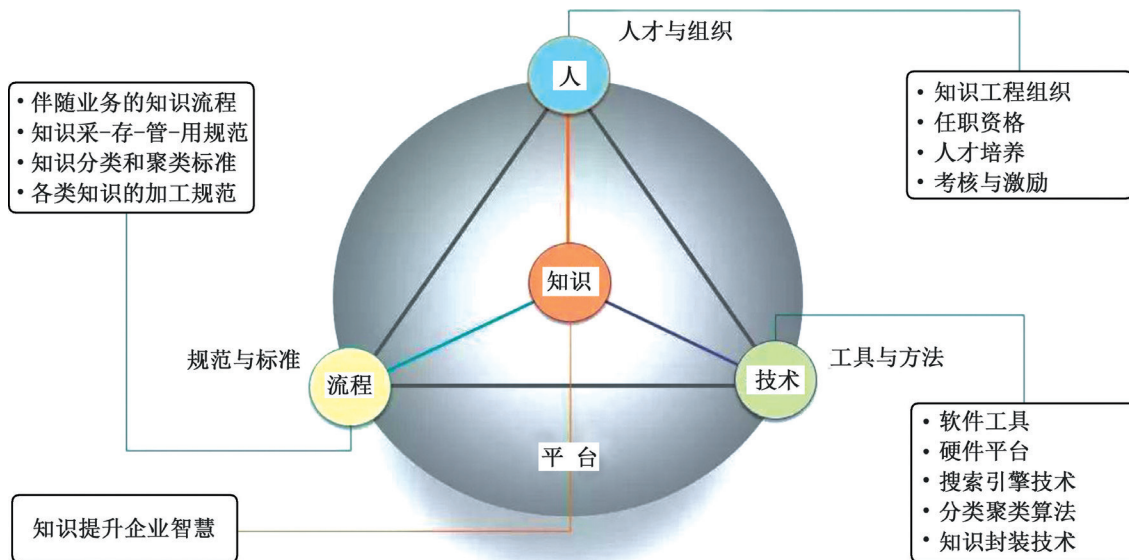


图3 基于社会技术学模型的知识工程体系模型

量一个企业识别和显性化知识、增值和应用知识，以及实现业务目标的能力。

前文将知识分为五类：实物、数据、信息、模式和技术。知识工程的实施过程就是将各类资源逐步知识化的过程。我们建议按照图 5 所示层级依序进行这个过程，以降低工作的复杂性。这样，知识工程成熟度可根据这些资源增值加工后的知识化特征定义为五个级别，分别为 1-有序级、2-共享级、3-自动级、4-智能级和 5-智慧级。此外，我们增加“0-显性级”，这个级别并不是知识工程的正式级别，但该状态又是企业知识工程的基础，所以用 0 级表示。知识工程成熟度每提升一级，就接入一类新知识，对其进行增值加工，而不是在每一层级对所有类别的知识进行加工。这种建设方法类似于 CMMI（软件能力成熟度集成模型）方法中的“阶段式”而非“连续式”。

知识工程的成熟度级别越高，企业的智慧级别越高，驾驭知识、运用智慧的能力越强，企业的体系管理能力和业务预测能力也越强。

## 6. 知识工程规划与建设

“总体规划，分步实施”是社会技术体系建设的通用原则，知识工程也是如此。规划和建设

是知识体系在企业落地需要顺序进行的两个重要过程。“规划”是从长远视角来看知识工程未来蓝图如何确定，到达路线如何设计；而“建设”则是沿着这条路

线进发时需要做哪些工作来实现规划的蓝图。图 6 示出了知识工程体系规划与建设的三步走战略。

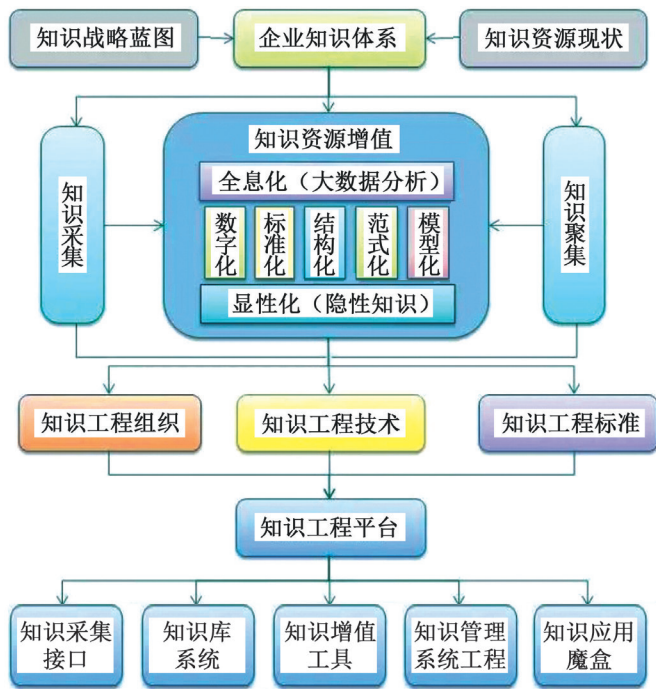


图 4 知识工程体系框架

| 维度   | 0级成熟度 | 一级成熟度 | 二级成熟度 | 三级成熟度 | 四级成熟度 | 五级成熟度 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 级别名称 | 显性级   | 有序级   | 共享级   | 自动级   | 智能级   | 智慧级   |
| 知识对象 | 实物    | 数据    | 信息    | 模式    | 技术    | 所有    |
| 增值策略 | 数字化   | 标准化   | 结构化   | 范式化   | 模型化   | 全息化   |

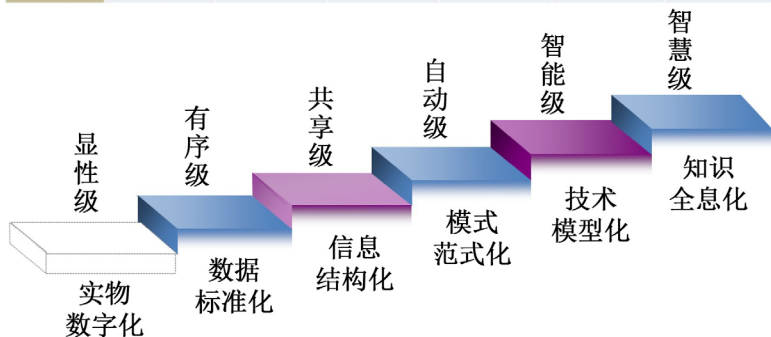


图 5 知识工程成熟度模型

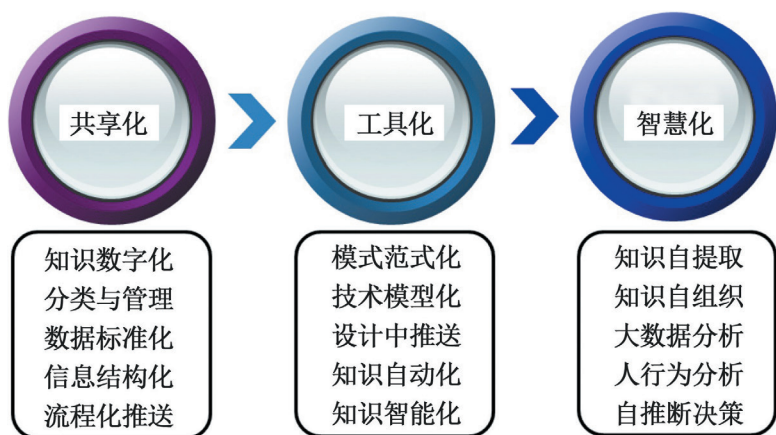


图6 知识工程体系规划与建设的三步走战略

### 三、知识增值加工的工作方案——知识加工“六把刀”

知识增值加工是制造业知识工程的核心。本书知识增值加工技术篇给出了知识工程核心内容（知识的增值加工）的工作方案，同时提供了知识加工“六把刀”（6种方法，即隐性知识的显性化、数据知识的标准化、信息知识的结构化、模式知识的范式化、技术知识的模型化、知识资源的全息化）。

#### 1. 隐性知识的显性化

知识体系显性化是知识工程的基础工作，是一切知识显性化的首要工作。以业务特征及形态为经纬的知识体系结构设计包括三种常见的架构方式：基于专业的知识体系架构方式、基于流程的知识体系架构方式和基于产品

的知识体系架构方式。

推进隐性知识的显性化，建立激励机制，保证知识的转化和共享非常重要。知识创新具有高成本性、高风险性以及收益和分配的不确定性，使得创新成功后知识的拥有者为了回收成本，会有意垄断所拥有的知识，而传统的激励机制只能加剧个体的这种垄断。因此，企业需要建立恰当激励机制，合理满足隐性知识拥有者的利益要求，激发他们分享知识的愿望。一方面，应该承认员工个人隐性知识的独创性和专有性，建立恰当的评价指标和以知识贡献率为衡量标准的评价体系，使企业成员得到知识共享的实惠；另一方面，要为员工提供成长机会，引导员工进行隐性知识的交流与共享，促使员工获得不断创新和发展的动力，这对推动员工隐性知识的交流与共享十分重要。

我们根据互联网思维提出一

种“知识IPO”的激励机制与算法，可有效激励企业员工提升知识贡献和学习的积极性，并促进知识应用效果。该方法不仅能判断知识的有效性，也能提升大众对知识的贡献热情。必须对优质知识的贡献者给予鼓励，才能提升贡献热情，所以，首先需要识别知识的优劣。知识IPO中，将一条知识看作一只股票，知识发布者相当于股票发行者。大众看到了这只股票，可对它进行投资。企业对内部大众派发一定量的虚拟货币，大众的责任就是将自己的虚拟货币经过对知识的投资赚更多的虚拟货币来体现其对知识的贡献。这种贡献也许是伯乐式（对知识点赞投资）的，也许是千里马式（贡献知识）的。当然我们有算法来杜绝其中的腐败和拉票行为。

#### 2. 数据知识的标准化

企业的研制数据在各种业务过程和项目中产生，且以不同形式和格式保存。数据的不标准化特点使得数据的可读性较差。一项业务或一个项目的数据只有本业务或本项目的人熟悉其格式特征，能较快理解，其他业务或项目的人员很难读懂，所以大家往往很不情愿地阅读其他业务或项目的数据，更不可能从这些数据中提炼和总结知识。很多企业的—一个常见现象就是：数据一经产

生就变成尘封档案。通过数据资源的标准化,设法统一数据的形式和格式,从纷繁复杂的数据中提炼共性数据,这些工作不仅可以促进数据的有序化,而且可以促进业务的有序和协同。

研制型企业的数据通常包含综合数据和专业数据。综合数据是在特定业务(或项目)开展过程中的完整数据,是以业务进展过程为主线,将所有数据综合在一起的数据集合。专业数据则是企业进行专业化分工的结果,不同专业的人员和部门对业务数据的关注视角和掌握领域不同。专业数据往往不是以项目或业务进展为主线,而是以专业特征为视角予以关注。

对于综合数据,将业务(项目)数据的某个有参考价值的断面、最终数据,甚至完整过程(项目)形成约定格式或统一形式的数据库,以促进数据的标准化。对于专业数据(如仿真、试验、制造、运维等数据),以某种有参考价值的视角进行提取、组合、保存、再计算,形成可供参考查阅的标准化数据。仿真数据管理和试验数据管理是专业数据标准化的实例,这在很多企业中仍然是新鲜事物。

### 3. 信息知识的结构化

信息知识指的是在产品研制工作中对工作成果进行总结形成

的文档类报告(如论证报告、设计报告、仿真报告、试验报告等)和对这些报告进一步总结的知识(如设计指南、作业指导书等)以及在对外学习交流过程中积累下来的文档类信息(如科技情报、专利信息、档案文献等)。信息类知识对业务的支持体现为对研制工作的参考、指导或约束,其特点是以文档方式成文,但其格式和结构并不相同,从中快速获取信息和知识的难度较高。

信息知识通常都分散保存,有的保存于不同的信息管理系统,有的由不同的部门/科室集中保存在文件系统中,有的则由设计工程师个人保存。而且,这些知识的保存方式和存储结构也各不相同,即使可以无障碍地访问这些系统,也无法快速找到自己需要的文档。因此,有必要对这些知识进行结构化处理以促进其应用。

对于信息类知识的结构化,常用的方法有以下几种:提纲与目录、自动摘要、知识分类、知识聚类、组合查询、基于流程的结构化(便于知识对业务的主动推送)。

### 4. 模式知识的范式化

模式是指在人们长期工作过程中总结形成的被验证有效的工作过程。模式的特点是,不需要质疑过程本身,只需要按照过

程的要求完成即可得到预期的结果。这一特点使得我们可以将不同形态、形式和特征的模式归一化、普适化和标准化,进而利用计算机技术实现范式化。范式的作用是将最佳实践制成榜样,成为普通工作者的参考。

常见的可范式化的模式资源包括:

(1) 研制流程(也称为研制管控模式)。将在多个型号或项目中成功应用的流程范式化,通过软件进行流程建模,形成可自动驱动研制活动流转的范式。

(2) 工作流(也称为设计协同模式)。将在多个产品或过程中成功应用的多人协同流程范式化,通过软件进行流程建模,形成多人之间协同工作的范式。

(3) 工具流(也称为仿真集成模式)。将在多个产品或过程中成功应用的多工具集成流程范式化,通过软件进行流程建模,形成可自动驱动工具运算与流转的范式。

(4) 技术流(将在多个产品或过程中成功应用的工具内的应用步骤范式化)。通过封装工具制成组件或模板,可以在工具应用时直接调用,可以降低软件的使用难度,提高使用效率及正确性。

(5) 质量过程(也称为质量管理模式)。在多个型号或项目中成功应用的质量策划、管控和归零流程范式化,在软件中植

入标准和规范，无需人为参与而自动执行标准和规范。

(6) 项目实施。将在多个型号或项目中成功应用的成熟项目实施运行的过程归一化、普适化和标准化，在软件中固化形成企业的标准项目过程。在此过程中实现知识、质量、工具与项目工作的融合以及数据的自动管理。

研制模式通常用流程来表达，它主张对产品研制进行工作分解、逻辑定义和流程管理。研制流程的范式化表达最常见的是树形结构，称为 WBS。WBS 反映研制工作所有任务的集合，但不反映任务之间的关系，如图 7 所示。WBS 是最简洁的研制流程表达形式，也是研制流程其他表达形式的基础，所以应用非常广泛。本书中通常将 WBS 等同于研制流程。

## 5. 技术知识的模型化

技术资源指的是在产品研制过程中形成的产品设计成果和技术研究成果，这些成果可以在未来的产品设计或技术研究中重用。产品成果包括产品的零件、部件、子系统、整机，以及与之伴随的设计、仿真、试验和工艺相关的模型及过程；技术成果包括通用技术、独特技术、核心技术等。这些资源通常存在于特定产品研制过程和成果中，因产品不同而形态各异。

这些资源的原始创造者（或者其他有经验的研制人员）从其他项目成果中可以提取出来相关成果，根据两个项目的差异性，作针对性的改变而形成新项目的成果。而其他人员就很难对其进行重用，重用过程往往并不比自己新做一个设计简单。其实，新做一个类似的设计就像重新发明

轮子，所带来的问题绝不仅仅是一点新增的工作量，而是给研发和制造全过程均带来复杂性和可靠性问题，由其引发的成本和浪费更是惊人和难以计量。

技术资源的模型化就是将这些业已创造的成果进行标准化、统一化从而形成产品模型或技术模型，在未来的产品设计或技术研究中，通过对参数进行适当调整即可形成新的设计。

模型是一种区别于自然语言的工程语言，它对资源对象的表达不仅更为直观、科学、全面、准确、无二义性，而且信息更为丰富、更具动态性。

对于不同类型的技术资源，其模型特征、模型化方法及应用方案也大相径庭。常见的技术资源模型化方法及应用方案包括：产品技术平台、基于模型的系统工程、基于模型的快速设计与论证、基于仿真模型的虚拟试验、

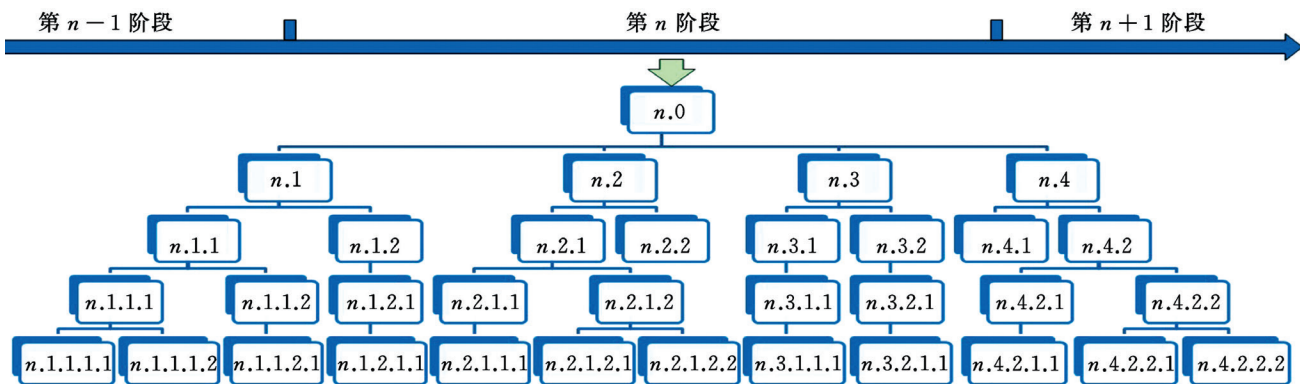


图 7 研制流程的 WBS 表达

基于模型的定义 (MBD) 等。这几种方法是应用于产品研制的不同过程和专业的模型化方法。近年来, 业界提出了更为综合的模型化方法和应用方案: 基于模型的产品全生命周期 (MBPLM) 和基于模型的企业 (MBE), 这是将技术资源模型化这种知识增值方法大而化之的成果。

## 6. 知识资源的全息化

看似显性化的知识, 其中仍然蓄含着丰富的隐性知识, 特别是大量知识聚集在一起的时候, 能反映出更为复杂的知识和智慧。在许多看似杂乱无章、称不上是知识的数据海洋中, 也会发现有用的知识, 这一点在近几年的大数据技术和应用领域得到了验证。

另外, 我们不论用何种方法来分类、加工和应用知识, 其实都只能触及到知识有限的几个角

度、维度或层次。通过大数据技术有可能从更为广泛的角度和层次来洞察数据, 获得更为丰富和全面的知识。虽然本书主张知识分为实物、数据、信息、模式和技术等类别, 但归根结底, 这些知识都是以“数据”这种形式来表达, 这就开辟了一条“利用大数据智能分析方法进一步挖掘各类知识中更多隐形知识”的道路, 我们把这个过程称为知识资源的全息化。

基于大数据的智慧分析方法是一项前瞻性的技术, 关于工业大数据分析价值示意图见图 8。将这一前瞻技术收入本书, 作为知识工程未来发展之展望。

## 四、知识工程实践与案例

知识工程的成功实践在我国制造业不同行业领域已结出硕果, 其中, 知识工程在航空航天、

兵器船舶等行业的实施效果尤为明显。

精选三个案例——既来自不同类型的企业, 也是不同类型的案例, 从不同角度展示知识工程在企业的实践方法。

### 1. 知识工程体系规划案例

发动机产品研制是一项复杂的系统工程, 也是知识密集型工作。某发动机研究所经几十年发展, 在产品研制方面积累了大量知识, 包括设计规范、研制业务指南、仿真规范、仿真数据、仿真模板、专家经验等, 为了使这些知识发挥更大价值, 近年来, 该所一直在探索管理和应用这些知识的方法, 并已付诸实践, 也取得了一定成果, 但是仍存在一些不足。具体表现在: 知识工程的方法工具较为简单; 知识积累和分享没有成为全员行为; 对知识工程的认识不统一; 知识工程的广度与深度还不够; 缺乏对知识工程的整体规划。

基于以上原因, 该所希望规划一套能够支撑产品研制的知识工程方案, 涵盖知识工程发展战略、知识工程内容、知识工程系统以及知识工程制度等各个方面。

通过评估该所知识工程现状, 总结存在问题, 我们对该所现有知识工程体系提出改进措

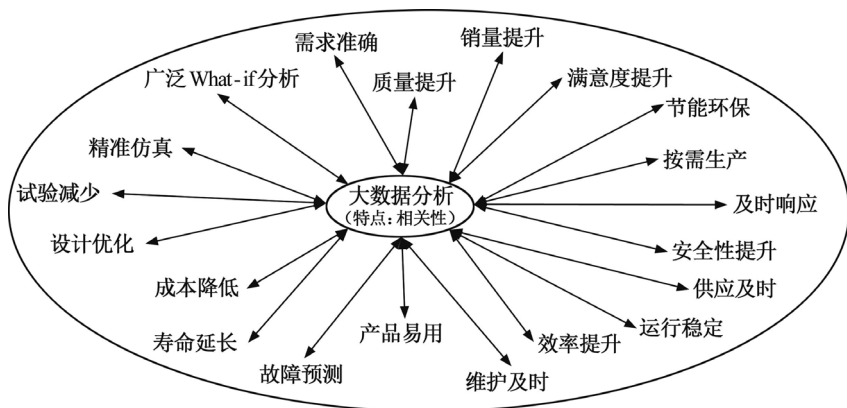


图 8 工业大数据分析价值示意

施,为该所未来知识工程发展制定了长远规划。核心内容如下:

(1) 知识体系规划。根据企业现有知识工程内容的架构,结合产品研制业务特点及未来发展战略的需要,开展知识内容分析,构建知识分类体系,挖掘蕴含在个人及组织内的知识,实现隐性知识显性化;基于标签体系规划的知识体系,实现不同领域知识的系统化和结构化;基于业务流程建立知识地图,实现知识与业务的强关联。

(2) 知识平台规划。对知识平台进行规划,包括规划原则、规划的整体思路与系统定位、知识平台架构与组成、系统功能以及拟采用的关键技术。

(3) 制度规划。基于现有知识工程制度,评估其在经验技术的共享与传承方面发挥的作用,给出知识工程推行策略建议,以及可以使用的管理方法和工具,以保证工作快速见效、夯实基础。

## 2. 基于流程的知识工程案例

航空行业某研究所为适应产品研制模式由仿制改型发展到自主创新的转变,应对新一代产品研制周期大幅度压缩的要求,解决产品研制队伍年轻化带来的能力建设和知识传承问题,实现局限于专业内的平台建设向覆盖跨

专业流程的平台建设的转变,需要进行基于知识面向流程的产品综合研制平台建设。面向流程的知识工程则是这个平台的建设基础。

基于该所的知识管理需求,我们提出知识工程的建设方案并进行实施,建设内容包括:构建飞机产品的研制流程,将知识与研制流程相伴随,构建航空行业的领域本体以及飞机产品设计知识库,建立产品多领域知识工程平台。通过产品领域本体技术的研究及数字化实现,为研制知识和研制流程的有机融合、知识的智能扩展以及创新打下良好的基础。

知识工程体系的建立,使该所可以按设计流程来开展产品研制工作,按设计准则进行产品设计工作,使产品的设计规范化,从而大大提高产品研制的效率和正确性。复杂产品和系统的研制活动的构建,以及研制流程的数字化实现,可规范所有研制任务的执行,大大缩短研制设计周期,提高研制效率。

## 3. 基于知识的精益研发案例

在国家“创新驱动发展战略”的引领下,某船舶工业研究院积极启动双轮驱动发展模式,全面实施以装备体系顶层研究为牵引,持续探索与推动科研模式

的转型从“经验主导型”向“知识主导型”转变工作。

该院通过切实提高自身研发能力和信息化建设水平,打造基于知识工程的精益设计与敏捷管理的先进研发平台,形成覆盖面广、渗透性强的数字化研发能力和信息化管理体系,提高自主创新能力和核心竞争力,力图解决业务不断发展与人力资源、设计手段严重不足之间的矛盾。

总体来说,信息化技术给该院研发设计带来的巨大效能还远未发挥。与发达国家乃至国内先进的同类单位相比,该院还存在较大差距,比如美国某项目采用一体化产品与过程设计模式,将系统工程方法和质量工程方法相结合,并应用一系列决策支持过程,通过集成形成综合的计算机支撑环境,从而有效提升产品的质量。基于上述分析,该院希望逐步建立基于系统工程设计理论的正向设计体系,解决流程、知识和质量的关联问题,采纳仿真体系建设方法,最终建成满足该院长远发展的、融入精益研发理念的支撑平台。

基于原有精益研发应用架构,结合业务工作实际,该院进行了精益研发体系建设,其内容分为总体建设内容和单项体系建设内容(协同开发体系、知识工程体系和质量管理体系),知识工程体系是精益研发体系建设重点。

通过基于知识的精益研发体系建设,该院建设了跨专业的系统集成设计科研工作平台,实现了型号项目研发的有序、可控、可追溯,并集成了科研任务所需要的全部基本要素,通过科研活动的三伴随(知识、工具、质量),实现系统集成设计的精准化、精细化、高效率 and 优质成果,保证了规范化开展跨专业的科研工作。

## 五、结束语

知识工程的应用价值包括加速人员培养、弥补科技人才断层、促进企业的智力资产保值增值、驱动企业研制创新、变革企业研制模式。本书的出版,意在为中国制造企业推进知识工程建设、提高创新能力提供助力。在本书序言中,中航工业沈阳飞机设计研究所原副所长、中航工业咨询知识工程首席专家施荣明指出:“《制造业知识工程》是我国知识工程工作实践到目前为止最好的总结和提炼,是全国所有企事

业单位实施创新具体有效的方法和途径。”

书中的讨论对象和举例多以研发企业或研发过程为背景,这是因为研发过程是知识密集度最高、知识产出最丰富、知识应用最深入的过程,并不代表本书所提的方法不适用于非研发型企业。非研发型企业或非研发过程的知识工程方法是本书所提方法的子集,大部分方法经适应性改造即可适用于这些企业或过程。MT

### 作者简介:

田锋,男,1971年生。  
安世亚太科技股份有限公司高级副总裁,国家工业软件与先进设计研究院常务副院长,北京市综合仿真工程实验室主任。出版《苦旅寻真》《精益研发2.0》《知识工程2.0》《制造业知识工程》等专著,发表论文40余篇。



# 工业机器人技术现状：新兴技术、挑战与重点研究方向



麻省理工学院 Lindsay Sanneman, Christopher Fourie, Julie Shah

【编者按】本文为麻省理工学院未来工作特别工作组成员、航空航天系博士生（第一、二作者）、副教授（第三作者）2020年11月发布的研究简报。介绍了工业机器人技术的发展现状，对未来发展趋势进行介绍并提出建议。本刊翻译刊登，为国内广大相关从业者提供参考。

## 摘要

在过去的十年里，欧洲的国家和企业，尤其是德国和德国企业，一直在努力通过将最新的机器人技术和相关技术融入其制造过程来获得制造业的竞争优势。例如，协作机器人（cobots）可以更直接地与工人一起工作，而不是出于安全原因被防护笼隔开，提供了一种可以在不显著降低就业率的情况下提高生产率的手段。然而，出于多方原因，欧洲工厂升级转型的成效和努力程度不佳，一直处于停滞、不均衡的状态。

首先，要使用这些新技术，需对机器人的性质和用途进行深刻的考量，同时清除技术和经济障碍。传统的工业机器人技术主要用于高度重复的生产制造任务，在生产线的寿命周期内，这些任务通常不会发生更改，无需人工干预即可稳定地执行。在一定程度上，这是由于传统的工业机器人相对不灵活，需要借助大量的设计和编程才能集成到生产线上。而集成商，也就是执行这种集成过程的企业，通常需要对生产线进行微小的更新，导致技术集成过程趋于时间和资本密集型。此外，机器人编程接口和通

信协议目前不是标准化的，这一点，再加上各企业的机器人硬件和规格不同，增加了集成的挑战性。每个不同的系统都需要不同的知识和专门知识，才能与其他技术结合使用。因此，从经济角度出发，工业机器人往往只适用于大型制造企业的大批量生产；而对专注于产品品类丰富、生产批量低的中小型企业来说，其经济意义较低。

其次，最新技术本身仍有局限性。轻型机器人或协作机器人可能面临工作速度太慢、有效负荷有限的问题，故而不适用于部分工业应用。机器人编程接口通

常使用难度较高，并且需要广泛的编程知识，这导致生产线工人难以轻松地变换机器人用途来提升效率，也难以满足不断变化的制造过程需求。此外，新技术、新软件以及新兴技术、新兴软件仍然不能完成一些关键任务。例如，机器人在包括抓取物体的操作方面仍远不如人类，如拣货过程，机器人在工厂环境中用于周围环境感知的传感系统稳健性仍有不足。在其他方面，最新技术可能提供的功能略显多余，这些技术的确提供了大量的信息数据，但从其中提取有意义的信息并获取切实的收益也是一大挑战，限制了人们对物联网（IoT）和云系统的投资和使用。

有趣的是，工人的抵制似乎并未有效减缓新技术的采用，一方面是因为欧洲对工人的保护政策限制了裁员，一方面是因为行业领军的企业已经认识到，通过让工人参与并决定生产线的重新设计，既能得到更好的技术决策（借助工人的知识），也能更好地接受新技术。

本简报详细介绍了我们采访机器人制造商、使用机器人技术的原始设备制造商以及欧洲工业研究机构的发现。我们对以上内容进行了扩展，并就工业机器人技术的未来重点领域提出建议。

## 一、导言

工业机器人学的领域包括研究、设计和应用于制造业的机器人系统，以及如何将它们集成于生产线上。过去的几十年间，该领域一直在稳步发展。而近年来，工业 4.0 这一致力于自动化变革的行业大势有望为工业机器人的功能与设计带来重大变化。

工业 4.0，也被称为“第四次工业革命”。通过提供数字化制造框架、融合新技术与传统技术等手段，工业 4.0 可以影响许多行业的价值和供应链。

依靠新兴技术，并借助信息技术、智能通信领域突破的推动，工业 4.0 有望催生出研究人员所说的“智能工厂”——一种将物理和虚拟基础设施相结合的工厂，能够利用物联网和大数据无缝地使用协作机器人技术、智能计算和数字网络，来创建智能价值链，优化生产。

我们调查研究了工业 4.0 对机器人生态系统的改造程度。在本简报中，我们分享了收集到的行业见解，阐述了走向工业 4.0 需面临的挑战，最后提供了研究建议，并对未来做出了全面的概述。

### 1. 什么是工业机器人

国际机器人联合会（International Federation of Robotics）将工业机器人定义为：

“可在三个或更多轴上编程的自动控制、可重新编程的多用途机械手”。其中轴指的是可移动关节的数量。工业机器人的设计目的在于，完成制造企业内部的、特定的自动化应用程序，如拾拾和放置物体、装配和包装、熨烫、切割焊接、产品检验等。传统机器人的编程目的是满足部署它们的工厂或企业的特定需求。大部分传统机器人都是为了代替人类工人执行“枯燥、肮脏或危险”的操作而专门设计的。

传统工业机器人是大型、笨重的自动化机器，通常在安全笼里执行重复性的日常杂务。近年来，协作机器人的设计能够使其在工厂环境中摆脱安全笼，与人类工人安全地进行交互，并逐渐成为潜在的、更轻量级、算法能力更强、更经济的机器人解决方案。

协作机器人可通过配备传感器或其他先进视觉技术来探测人类位置。理想情况下，人们可以将其重新编程，以用于执行新的任务，提供新的服务。协作机器人通常为机器人手臂。虽然它们不像传统机器人那样得到了广泛应用，但这些全新的、多功能的协作机器人系统能够让小型企

业以低成本走向自动化，因此有望推动行业变革。

## 2. 工业 4.0：先进制造业的战略推动力

2011 年，德国政府提出了“工业 4.0”一词，用于描述制造业发展的战略愿景——通过连接数字化系统和物理系统，连接工业环境中传统和先进的技术、产品和服务，推动制造业发展。工业 4.0 以数字化和通信为基础，促进工厂互联，通过实时分析收集到的数据优化生产。

工业 4.0 的框架与战略的出现，是德国政府认可制造业数字化并做出反应举措的结果，其目的在于引发制造业创新领域的突破。人们希望工业 4.0 能够成为推动全球制造业数字化进程的经济和技术推动力，因此工业 4.0 很快被欧洲的其他国家和国际社会所采纳。

德国领导了工业 4.0 进程，许多德国的组织与发达国家及发展中国家的组织展开合作，以确保双方做好准备，顺利过渡工业 4.0。这也使那些能进一步赋能信息物理系统（CPS）的技术得到了发展。

信息物理系统是生产制造过程中的物理和工程流程，通过一个由计算机算法、通信和网络技

术构成的互联网络进行监控、协调、控制和集成。这些系统通常“与周围的物理世界及其正在进行的流程紧密相连，提供了同时也使用着互联网上可用的数据访问和数据处理服务”。

信息物理系统对工业 4.0 实践至关重要。人们认为信息物理系统能够提高操作效率、提升生产力、加紧工厂内部联系，因此能够提高产量，进而促进整体经济增长。德国创建的工业 4.0 框架以及信息物理系统的核心在于机器人技术及基于物联网的前沿互联技术。

## 二、研究目的

在这部分简述中，我们给出了来自欧洲的机器人领域重点企业和来自德国、法国和意大利的其他相关组织的思考和见解。我们选择的受访单位包括机器人制造商和集成商、使用机器人技术进行制造的原始设备制造商以及应用工业研究机构。其中，应用工业研究机构投资于工业 4.0 核心新技术的相关研究，我们在研究过程中，也就这些新技术进行了采访。

我们观察研究的内容包括：制造商努力解决的问题；他们试验了哪些新兴技术；他们为提升机器人灵活性、机动性所采用过

的或希望采用的不同交互形式；在工厂和研究环境中，人和机器之间的协作在多大程度上是可行的；最后，他们对一些先进技术和场景的应用有哪些要求。

我们研究的主要目的是回过头来，调查这些企业使用的最先进的工业机器人和协作机器人技术以及基于物联网的互联技术，以评估这些技术的使用在过去 10 年（自工业 4.0 引入以来）的发展程度，创新的主要驱动力是什么，企业在引入新技术时面临了什么瓶颈，以及企业需要考虑的未来挑战和下一步方向。

我们探讨了这些问题的许多方面：是什么推动了向自动化的转变？这些转变在生产力、效率或质量方面带来了哪些可衡量的改进？

这些企业评估机器人集成价值的指标是什么？

这些企业面临的最大挑战是什么？他们是如何调整技术来满足需求的？在机器人集成方面还存在哪些亟待解决的问题？机器人行业和研究人員如何合作解决这些问题？

此外，我们研究了将机器人技术及相关技术——如安全系统、传感和感知机制、深度学习、虚拟和增强现实以及云计算——引入生产制造过程和生产线的过程。我们还向这些企业询问了他

们最初的期望、长期以来的担忧、集成机器人系统和优化生产时面临的障碍，以及他们在机器人、物联网方面正在探索的一些近期前景较好的技术途径。许多企业共同关心的主要问题是，即便机器人本身的价格正在下降，将机器人技术集成到生产线上的成本依然很高。企业主对集成过程所需的时间财力成本表示担忧。

我们还分析了标准化或标准化缺乏对企业采用技术意愿的影响。标准化是确保同一行业中使用的硬件和软件都符合同一套指导方针的过程。标准能够确保操作的连贯性、一致性、安全性、互操作性和兼容性。技术总是在进化。但我们注意到，例如，由于缺乏设计和安全标准，许多企业无法充分体验许多新技术的好处，也无法证明投资风险的合理性。缺乏统一的编程语言、接口或硬件通信协议是与此相关的一大挑战。

物联网和云系统的技术互联仍然十分有限，传感、感知、视觉技术和抓握技术方面的瓶颈仍然存在。此外，需要更好的数据基础设施和数据处理流程，以使通过物联网技术收集的数据发挥其全部潜力。这一点似乎也是对自动化应用至关重要的因素之一。

以下内容详述了研究中的一些

关键见解，包括对业内先锋的采访和对制造企业的访问。我们的完整研究，包括研究方法，过程和建议，可在我们即将发表在《机器人学基础和趋势》上的论文中阅读。

## 1. 机器人技术与行业的发展

今天，许多行业都依赖于机器人和制造设施自动化。随着机器人及其运营管理技术的发展，各种挑战随之出现，比如如何使用机器人安全性更高、适应性更强、更容易为较低技能工人所用、对环境和周围工人反应更灵敏、更深地融入生产周期、更好地集成于生产线等。

这一领域的突破和新发明不断出现，许多制造商希望简化、精简和降低在现有和新的基础设施中引入自动化和新机器人系统的成本。通信和信息技术的进步使机器人与周围环境、机器人和机器人更好地互联，此外，研究人员一直在努力克服机器人在功能、速度、移动性和灵活性方面的限制。

但是，对于能够吸收当前的、不断进步的、未来的技术（无论是轻型机械臂，还是自动导引车），并将这些技术纳入到更广泛的业务中去的行业来说，这个

过程必须是平稳、经济可行、高成本效益的。机器人本身及其功能只是这个复杂生态系统中的因素之一。

## 2. 整合的代价

从工业机器人学的角度而言，集成是指将机器人技术（包括硬件、外设、软件和支持技术）引入、合并到生产线或制造流水线之中，以实现自动化的过程。当企业决定将机器人集成到他们的生产线上时，他们的目标往往是优化性能，节省资金和时间，提高产品质量。

集成最简单的形式是在生产线上安装机械臂。集成过程包括对机器人进行编程，使其根据外部信号机制（如可编程逻辑控制器（PLC）或检测零部件的传感器）执行特定任务。在更高级的场景中，集成可能涉及在一条生产线上设置多个机器人，来完成一项复杂的任务，这可能需要多个机器人在一个大型产品上与其他机器人协同工作（例如，在汽车制造中的“白车身”过程中）。许多企业目前依赖外部集成商（其中许多是大型机器人制造商）来集成自动化和设计工作单元，工作单元通常包括机器人周围的安全笼，这些安全笼定义了机器人工作空间的参数。

虽然机器人硬件的价格已经变得更低廉，但机器人方面的成本只占将自动化引入生产线的整体开销的一小部分。一家大型企业，著名机器人和协作系统集成商，简单地指出：机器人现在很便宜，但集成不便宜。事实上，集成的过程可能是漫长、艰巨且昂贵的。要使机器人执行预期的功能，就必须配备有设计工作单元的集成商和具有广泛编程技能的工程师。生产线即便有微小改变，也可能要求集成商重新设计、改编机器人工作单元，以符合新任务的规格参数。

对于中小型企业来说，前期成本和维护成本都使机器人技术集成昂贵得令人望而却步。因此，对这些企业来说，可以重新配置、重新编程和重新测试的机器人是一个附加的好处，这样他们的机器人就可以随着时间的推移，在不同的制造过程和不同的生产线上重复使用。

根据我们大量的采访和研究，显而易见，企业在决定是否购买资本密集型新技术时，尤其关注集成成本和投资回报。许多企业认为集成的高成本是自动化部署的障碍。一方面，使用大型工业机器人的大型制造商，如果试图在同一条生产线上将现有的15至20年的技术和基础设施与新的创新机器人技术集成起来，

可能会遇到问题。另一方面，生产流程规模较小的中小型企业往往发现，由于生产批量较小，集成成本过高或不合理。这是因为，当前制造环境中的机器人主要被编程来完成特定的任务，装配过程中的任何变化通常都需要对机器人进行重新编程，甚至需要对集成生产线进行大规模的整修。

除了这些集成成本方面的具体问题，我们可以预见，关于是否决定采用自动化的问题，归根结底在于其他的一些经济因素，例如硬件购置的相关成本，以及在设置机器人、运输、编程和税收方面所投入的时间。在欧洲，强有力的劳动法减轻了工人因自动化而失业的风险（在那里，老龄工人面临更高的风险）。然而，我们采访过的一些企业提到，他们正面临劳动力短缺，并试图开发新的自动化方法，尤其是在他们老龄化劳动力的退休浪潮即将到来的情况下。劳动力老龄化也呼吁人们关注人机工程学方面的需求，因为更多辅助人们工作的自动化设备可以减少日常工作和体力消耗带来的伤害风险。

虽然许多企业提到，劳动力取代量仍在他们决定自动化的过程中发挥作用，但也有一些企业表示，这一指标已经过时，尤其是随着协作系统的出现。对许多企业来说，人机工程学、质量控

制和减少机器人占用的房地产也是重要的考虑因素，其重要性可能仅次于成本计算。

在决定自动化什么，以及如何集成自动化解决方案时，企业主要采用的方法有以下两种：一是“自上而下”的方法，这类方法倾向于调整任务，使其适应企业现有的自动化能力；二是“自下而上”的方法，这类方法对创新、对采用新兴自动化能力以满足企业工业需求，都保持开放的态度。“自下而上”的方法促使企业们在近年来采用了更多的新技术。采用这类战略的企业在按需调整技术时通常更具自发性和创造性。

自下而上的方法的成功和高效，原因似乎在于其能更好地与一线工人集成。一线工人通常对制造流程有更深知识，并能够判断创新是否有潜力。通过这种方法，生产线工人可以带头发现问题和挑战，找出效率低下的地方，指出如何将技术集成进来，并提供解决方案。

自上而下的方法似乎已经过时了，因为这种方法限制了制造任务中技术的角色（例如，机器人必须将高精度零件放在安全笼里的工作室内，远离人类工人）。采用自上而下的方法可能会导致我们遗漏新技术的要点或未能完全开发其潜力。比如，使用协作

机器人在安全笼内这种远离人类工人的地方执行高精度任务，但实际上它可以用于更接近人类的工作，执行更广泛的任务。

不管使用哪一类方法，制造企业似乎都对采用具有直观界面的机器人技术特别感兴趣。这样的操作界面可以提高灵活性，降低集成成本（特别是对复杂的、非重复性的任务）。这种类型的技术集成能够允许缺乏工程或高级编程专业知识的生产线工人操作或重新编程机器。

### 3. 工人的价值

我们采访的许多企业都强调了经验丰富的生产线工人的作用和能力十分重要。他们非常了解自己的生产流程，也知晓应当如何改进这些流程。工人的观点和意见似乎对整合自动化和协作机器人技术的过程至关重要，主要是在使用自下而上思维模式的大小企业中。这些企业主要关注如何利用新技术来发挥工人的创造力，而不是试图用这些新技术取代工人。

几家企业表示，他们认为，未来，拥有深厚制造工艺知识的工人不可能不参与其中。一家制造商特别指出：“当工厂熄灯时，创新就停止了。”另一家制造商在工厂内创建了“机器人体验中

心 (REC)” ，让工程师得以在生产线旁工作，在那里快速地与生产线工人沟通，而这些工人对于如何将机器人重新用于不同任务有很多想法。

一家应用研究机构为工业和服务机器人开发最先进技术，并与几个行业合作伙伴互动，该机构报告称，他们见过的“最令人印象深刻的机器人解决方案”是工厂工人通过共同创造调试的机器人解决方案。除了工人的意见对制造创新至关重要之外，一些任务，如在工作单元之间移动材料或清洗机器，由人来执行的话成本效益会更高。

没有工人参与技术设计和集成过程也带来了其他缺点。在一些企业，生产线工人并不是引入新机器人解决方案的核心，工人们往往不信任或不喜欢机器人。此外，企业指出，工人们担心引入新技术会对工人的活力和社会互动产生负面影响，并导致工人在快速生产线上工作时感到不适，或者因为机器人带来的变化产生普遍不适。

据报道，一些工人担心他们的错误被机器人系统的传感器数据跟踪，而另一些工人则对机器人驱动的生产线工作速度感到震惊。这并不少见，几项研究就人们对机器人的普遍不信任进行了报告。其中一项研究发现，如

果工人没有亲自操作和监督机器人，他们可能会将工作场所发生的事故归咎于机器人。

除依赖工人的专业知识外，一些企业，如一家专注于创新云技术和机器人教学方法的轻型机械臂小型制造商，表示与他们的客户合作是技术开发过程中的关键之一，这些客户是其所在领域的专家。这家小型机器人制造商创新了“机器人应用商店”，将其向工业客户和研究社区开放，这是一个合作空间，用户可以在这里分享针对不同任务开发并解决方案。他们的目标是使研究团体以及类似领域的企业之间能够快速共享机器人解决方案，从而产生更多可推广的解决方案。

### 4. 协作机器人技术和机器人应用难度降低

引入协作机器人技术和相关技术，有可能改善人与机器人的合作，并扩大自动化程度，以提高生产水平。我们采访的一家大型 OEM 厂商似乎热衷于“在生产过程中已经验证的部分维护标准工业机械臂”和“使用最先进的安全机械臂”之间找到微妙的平衡，以便在生产线附近更好、更快地制作自动化解决方案原型。他们的目标是，一旦这些解决方案经过测试，证明其具有经济价

值，就能够迅速被集成到组装过程中。

除了为大企业优化生产线之外，更便宜、更轻量、更易编程的机器人系统也让更多企业和用户能够更容易地使用机器人。在很大程度上，传统工业机器人对大型制造企业更具有经济价值，这些企业的过程涉及重复性任务和单一产品的大批量生产。在这些企业中，机器人专注于单一任务，通常难以重新利用。出于经济原因，大企业投资这种机器是合理的，他们还可以接触到许多工程师。而中小企业往往没有这种资本或内部能力。

机器人技术的新进展，加上对硬件和软件标准的推动，编程的便捷性，以及机器人技术的更大灵活性，可以全面地使机器人应用难度降低，从而简化自动化。一家大型机器人企业指出，易用性有可能使协作机器人的格局发生巨变，因为中小企业如果能够在不依赖集成商或大量的内部编程专业知识的情况下使用这项技术，就很可能推动市场发展。

与难度机器人应用降低相关的是“为任务编程而不是机器人编程”的理念。四家规模不一的机器人制造商交流了他们的想法——借助更易编程的机器人系统，“通过授权给与机器人一同工作的人权力，来授权给机器

人”。这些系统使工人能够直接重新编程，调整机器人的用途，以满足不断变化的生产需求，同时工人们无需具备大量的编程专业知识。易于编程的特点，使机器人得以快速地进行集成和再集成，进而快速重新设定用途——这是制造商和研究界都可以努力实现的目标。

## 5. 其它重要考虑因素

新技术的安全性和标准化也是企业亟待解决的问题之一。此外，令与我们交谈过的企业感兴趣的内容还有更稳健的安全性技术，经过改进的感知技术，更灵活的、适应性强、可重复使用的技术，以及可以与许多不同云平台通信的硬件。

各企业还强调，在引入新技术时，需要强有力的可靠性。异常和变化会导致整个生产停止。（例如，在照明方面的问题会影响机器人的感知。）“生产环境在经过自动化的优化后，机器人一分钟不运转，我们会损失一分钟的钱，”一家大型制造商表示。“这限制了制造业对新兴技术的吸收：虽然技术本身是可取的，但该技术的寿命和稳健性尚不明朗。”我们将在下一节详细阐述这些问题，并介绍这些企业尚在讨论中的或已集成的具体技

术。

在本简报中，我们虽未提出任何政策建议，但我们想强调正在使用的技术和硬件的开放性问题，并强调机器人学领域的关键研究方向。我们将讨论如何在工业环境中改进机器人技术和物联网技术的某些方面，以使这些技术能够在生产线上更快地集成和调整用途，并强化物联网系统中技术之间的互联。

本简报还阐明，为了增加技术的灵活性，进而鼓励、激励全工厂范围自动化互联和单一的新兴机器人技术的大规模应用与部署，我们需要努力加强机器人技术本身及技术发展的标准化。

## 6. 讨论：工厂基础设施和新兴技术

在过去十年间，机器和人类在制造业中的角色一直处于变化之中——研究证据表明，与人类工人和机器人分别独自作业相比，或与“熄灯”式全自动工厂相比，协作能带来更佳的结果和更流畅的操作。协作机器人的设计目的是在共享空间内与人类近距离互动，通常不设有安全笼，形成了一个“理想”未来工厂的愿景，在那里机器人和人类不需要分开工作。

此外，如果得到广泛采用，

物联网技术有望通过结合先进的计算和智能可靠的连接，将产品和服务相连接，推动创新达到下一个水平。例如，整条生产线上的制造工具和机器人可以将状态信息传送至中央数据库，然后由中央数据库将命令传回每个环节，优化并调整生产线上所有环节之间的生产工序。理想情况下，借助物联网，机器人技术将能够相互沟通，并与周围的基础设施沟通，这将进一步增强协作机器人的能力，并可能会通过协助工人工作来推动传统生产线转型。

工业机器人广泛应用于管理供应链和生产链，是能够在现实世界中采取行动的自主机器；它们可以沿不同方向和多个轴旋转和移动。工业机器人通常可以长时间运行——高达 16000 小时。有些产品可以持续允许 80000 小

时，而且不会出现故障，尤其是工业机械臂，使用寿命可长达七年。如前所述，工业机器人通常被大中型企业使用。工业机器人通常比新的轻型协作机器人体积更大、价格更昂贵。而轻型机器人，比如工业机械臂，体积更小、移动更灵活、更易集成，更简单的界面和编程使其能够更好地适应不同任务。

尽管目前存在局限性，但更轻量的协作机器人成本更低，可以更灵活地在任务之间移动，而且通常更容易获取。最重要的是它们具有重复使用和调整用途的功能，所以更容易集成到生产线中。尽管轻型机器人的有效载荷能力有所降低，但其安全系数的提高、易用且易编程的特性以及较低的集成相关费用，使其成为各规模企业扩大自动化应用的完

美过渡工具。

在我们的采访中，我们很好奇，那些已经投资于工业机器人开发和集成的企业，是如何接受推进协作环境和物联网式集成的新技术的。

前文提到，工业机器人技术的创新遵循着不同的方法。一些企业以过时的方式使用协作机器人，就像他们使用传统的工业机器人一样；而另一些企业选择了转型和创新。两种方向让这些企业收获了完全不同的新兴技术集成经验。后文将在谈到技术方面时将这些集成经验提供给大家。我们采访的许多老牌企业看重的，是那些不太可能破坏现有基础设施，或无需对旧设备进行彻底拆修的系统。

以下是我们采访的中小型制造商以及较大、较成熟的企业在其工厂中使用或采用的一些新兴技术，以及他们如何应对随之而来的一些技术、设计和经济方面的挑战。

### （1）安全系统

安全系统对于设计与工人一起工作或在工人安全距离内操作的机器人至关重要。传统上，工业机器人操作的生产单元四周的安全笼已经明确了安全范围，以确保工人不会无意中受到伤害。但这意味着为了提供这种保护，工厂的空间都被这些大型生产单



图 1 工厂车间里的自动机械臂。机器人被关在安全笼里，以确保附近人类的安全

元占用殆尽。新的安全系统，例如采用接触式检测的被动系统，以及使用传感器检测并避免与人碰撞的主动系统，无需使用安全笼，可释放出空间用于其他操作。

一些被动系统包括皮肤传感器，当机器人与人类或环境中的物体碰撞时，它会触发停止。一些主动系统包括传感器的集成，例如，当人类穿过时，迫使机器人断电的光幕或激光光幕，或者在机器人操作的安全笼内安装的近距离传感器，以检测人类与机器人的距离，或者覆盖在机器人身上的电容皮肤，即一种感知薄膜，可识别机器人周围短距离内的电场变化。

不管使用哪种安全系统，协工作单元通常要求符合安全标准，这些标准可限制机器人的总体速度和机器人与人交互的作用力。由于速度受到影响，这些企

业对于应用这些技术来创建共享工作空间和协作系统是否能够带来充足的收益进行了讨论。

“协作机器人技术是慢动作机器人技术，”其中一家企业评论道。该企业是一家生产各种消费品的大型 OEM 制造商。这家企业表示，机器人速度降低可能会使操作出现不必要的复杂化，但仍承认人们关于协作机器人的心态正在改变，同时也承认下列情况存在，即机器人的设计目的是帮助工人，提高他们的生产率，而不是直接取代他们。

传统的方法，如速度和有效载荷限制，不太适用于新兴的安全系统。例如，符合安全标准的小型、限制有效载荷的机械臂，可以限制其所能施加的力量。然而，另一种新的安全方法侧重于改进机械臂本身的设计，以避免与人碰撞。这就是将更多的工作

致力于提高协作机器人相关的安全标准的重要性所在。

## （2）轻型协作机械臂

轻型协作机械臂是工业机器人的一个范例，工人可以在周围安全地操作。

轻型机械臂是通常用来处理较小有效载荷的小型机械臂。协作机械臂是指专为在人类附近工作而设计的臂。鉴于安全标准对机器人速度和有效载荷的限制，目前许多协作机械臂的重量也较轻。由于轻型机械臂通常速度较慢，所以即使人类无意中撞到，也不太可能受伤，那么从这方面考虑，机器人的任务也是安全的。

我们接下来讨论轻型机械臂的顺应性。顺应性是一种被动的检测碰撞的方法，它允许机械臂在遇到意外障碍物时转向。例如，如果一个顺应性机器人与人类发生碰撞，它将检测到碰撞并减少它所施加的力，从而减少伤害的可能性。在这种情况下，顺应性机器人是一种保证安全的合理方法，而对于非常大型或速度非常快的机器人来说可能不适用，因为它们可能会在最初的碰撞中就让人受伤。顺应性机器人中的扭矩传感器允许它们对制造过程中遇到的力做出反应，使它们能够执行传统机器人无法完成的任务。例如，传统的机器人放置螺栓时会损坏工件，或者不能

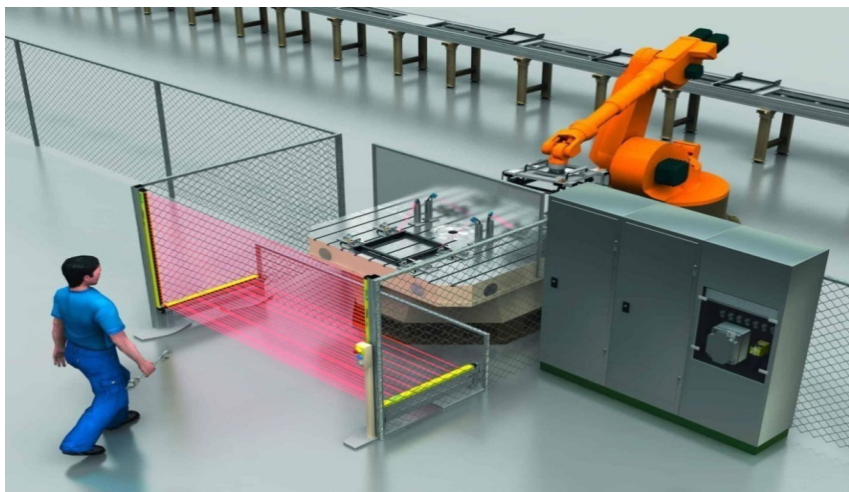


图2 安全光幕及围绕大型机械臂设置的故障保护主动安全系统

精确定位螺栓和螺栓孔。而顺应性机械臂在放置螺栓时，能够基于其遇到的作用力调整机械臂的动作，从而完成这一任务。

轻型或协作机器人无需使用安全笼，虽然增加了可用空间，但它们有限的有效载荷令它们的吸引力大打折扣。由于在很大程度上，机器人还没有被用于与人类在同一工件上直接协作，所以一些企业仍然喜欢安全笼而不是协作系统，因为安全笼也可以防止人类扰乱或降低机器人操作的速度。

此外，一家大型制造商指出，当工人与机器人协作或在其周围操作时，不仅要确保机器人的安全性，而且要确保整个系统的安全性。机器人执行的一些任务很危险，如移动边缘锋利的物体。事实上，许多机器人的设计初衷就是完成对人类来说不安全的任

务。这自然也限制了工人和机器人之间的协作程度，并影响了应用安全系统的设计和范围。一家大型机器人制造商评论说：“机器人的安全程度取决于它所执行的任务。”

对于那些机器人执行起来相对安全的任务来说，工人与机器人协作仍然可行。这些协作场景主要包括当人类伙伴从工作单元收集完成零部件时，机器人减速或停止工作。随着协作机械臂的感知和算法能力的提高，这些企业希望将机械臂的用途在目前的应用基础上进行扩展。

### （3）顺应性机械臂

顺应性机械臂利用集成扭矩传感器，以提高交互能力，并可用于被动安全（即在碰撞时检测人类）以及复杂的任务。

机械臂的发展近况包括企业使用这些设备来执行复杂的任

务，这些任务需要操纵松散的部件。此外，它们还被用作新的协作系统的一部分，这些系统通过设计能够实现更安全的近距离人一机器人协作。虽然它们被用于执行一些新任务和提高安全性，但关于使用顺应性机械臂的报告却喜忧参半。这项技术可以克服一些与敏感操作有关的限制，但仍有一些任务遥不可及。然而，人们似乎一致认为，这项技术很有价值，但要充分发挥其潜力，还需要继续开发。

### （4）机器人的抓握能力

机器人的抓握能力仍然远远落后于人类的抓握能力。我们采访的一家大型机器人制造商将物理抓握硬件描述为一个巨大的挑战。企业和研究机构引用的先进技术和提高硬件灵活性的先进方法，为这项挑战带来了希望，因为这一技术可能从深度学习或更加稳健的传感系统等新兴创新技术中受益，而这些创新技术可以提高抓握能力。一家大型跨国工业电子产品制造商还使用了低成本的增材制造（AM）技术，为零件快速定制物美价廉的夹具。

### （5）传感和感知、数据处理和预测维护

传感和感知、数据处理和预测维护这类技术的发展潜力和应用密切相关。特别是传感、感知和数据处理共同作用，以改善机



图3 可以安全地与人类一起工作的协作机械臂

器人对物理环境、其他机器人和工人、以及生产过程的感知。一个领域的进步，例如装有传感器的机器人的有用性，依赖于强大的数据基础设施来处理数据，以显著提高整体生产的能力。

例如，根据一家专注于机床和自动化的应用研究机构的说法，虽然传感通过先进的感知算法提高了工厂车间的自动导引车辆（AGVs）的能力，但在其他环境中，尤其是在稳健性方面，它还不足以满足需求，比如在大型高速工业机器人的操作环境中，这些机器人需要快速感知能力来确保安全。

与此同时，我们采访的企业目前收集的数据的一个主要用途是预测性维护——将关于工具状况的实时数据整合起来以安排维护计划的过程，节省了资金并确保设备的平稳运行。但是企业希望其收集的所有原始大数据能够产生更多价值。换句话说，获取的数据量是巨大的，但是能够利用这些数据的解决方案却很少。一家大型机器人制造商将这个问题称为“从大数据中获得智能数据”。

虽然很难从原始数据中以可用信息的形式产生价值，但信息是智能工厂的基础，也是许多新兴集成技术的关键推动因素之一，这类技术主要依赖于对这些

数据的研究和利用。

#### （6）改进的编程和通信接口

改进的编程和通信接口可以使几乎没有编程经验的人类控制机器人执行多种任务，而通信接口则使机器人能够与其他硬件和软件进行通信。

约从十年前开始，被宣传为易于编程的机器人引起了各企业对协作机器人技术的关注。十年后，对于我们采访的大多数企业来说，对编程易用性的关注依旧；协作机器人的采用仍然伴随着对界面开发和设计的日益关注；是否准备好使用这些机器人取决于编程、原型制作、灵活性和集成速度的容易程度。

虽然各企业对编写协作机器人程序的容易程度报道各不相同，但较小的企业，如我们参观的一家初创企业，通过提出自己的开发解决方案来应对这一挑战。例如，他们创建了平台，使用户能够使用 Java 和 C++ 等传统语言或他们内部开发的图形编程语言进行编码，使机器人编程为更广泛的从业者所用。我们采访的企业之一，一家制造中小载荷工业机器人的中型企业解释说，不同企业生产的机器人拥有各自不同的编程语言和通信协议，目前使用的语言有 17 到 20 种，其中大部分是专有语言。一家生产

各种豪华汽车的大型汽车制造商表示，机器人操作系统（ROS）已经成为工业上的一个可选的标准编程框架。与其他技术一样，这里也强调了通信接口标准化的必要性。

#### （7）自动导引车辆（AGVs）

自动导引车辆是一种移动服务机器人，装有能够在工厂车间内导航的传感器，以及可用于移动材料的车轮，并可以自主控制行驶。在我们采访的九家企业中，有七家企业无论是用于生产还是演示服务，或者计划在不久的将来进行集成，都已经以某种方式采用了自动导引车辆。虽然自动导引车辆具备相关能力，并且是基于位置和映射算法提供支持，但这种形式的技术却因缺乏标准而使发展受阻。例如，缺乏标准导致无法采用智能车队管理，这是一种主要依赖于连接性、网络服务和分层数据架构的制造操作和生产流程管理形式，它兼顾存储数据和实时数据，以预测工厂车间的物流情况和优化自动导引车辆调度。正如我们采访的一个大型制造商指出的那样，包括汽车行业在内的其他行业都有新标准涌现，这些行业对此类系统的需求很高。

#### （8）工业物联网（IoT）

工业物联网（IoT）是完全基于云技术进行集成的典型必要

条件，但尚未被企业充分采用，仍处于“前期开发阶段”。它被隐私问题、数据所有权和自主权问题以及安全问题弄得一团糟。

“人们还没有准备好将他们的工厂向互联网或云开放，”一家中小型工业机器人制造商表示。由于物联网的实现依赖于数据的收集和传输，一家大型机器人企业还对跨境传输信息涉及的政治问题表示担忧，以及计算应该集中在本地计算机中还是完全转移到云中，也是其关心的一个问题。

物联网这个案例或许也可以说明，标准的缺乏再加上数据基础设施的限制会阻碍具有发展前景的新技术的完全一体化，并抑制对这些技术的投资。如果不清楚自动化中物联网集成和数据管理的潜力，以及企业可从中获取哪些收益（以及这些收益是否证明投资成本的合理性），那么企业将继续犹豫不决，不愿在构成

物联网系统的基础设施上投入资金，这是可以理解的。

### （9）机器人仿真

机器人仿真或它们如何在价值流中发挥作用可以为制造商节省时间和金钱，因为它可以根据机器人的能力来决定企业所需的最佳机器人类型。它可以帮助预判将某些机器人集成到现有生产线的可行性；企业可以用它计算不同生产装配的经济附加值（EVA），以及机器人整个生命周期内机器人解决方案的成本；它还可以帮助用户研究人机界面，并为以人为中心的设计流程提供信息。无论是在制造工厂还是在单个工作单元，它都已经成为自动化的重要组成部分，以至于一家企业将仿真描述为“我们的生活方式”，而一家面向消费者的跨国企业将自动化和仿真描述为“同一枚硬币的两面”，并补充说，在许多情况下，如果不

首先对他们的自动化解方案进行仿真，那么自动化的风险太大。一家大型制造商表示，它现在拥有整个生产线的三维模型。

然而，随着科技的不断创新，仿真能力也随之得到提升。如数字孪生，它帮助企业创建完整的三维环境——工厂真实情况的副本，以及增强和虚拟现实系统，我们将在下面讨论。机械臂的某个动作的仿真与其在现实世界动态环境中的动作不同，在现实世界中，碰撞之类的事件必须被考虑在内。这就是一些能够提高仿真能力的技术的意义所在，如能够考虑动态环境因素的数字孪生技术。据报道，一些企业已经使用数字孪生技术对包括系统、设备、流程等在内的工厂环境进行数字化复制，从而验证生产线性能、模拟工具行为、并允许用户了解生产线中的组件以及进行互动。一家大型跨国消费品（包括电动工具）制造商报告称，他们将数字孪生技术作为一种“使能”技术，可以通过将集成时间从几周减少到几天来支持灵活的自动化，并使企业能够快速评估多种可能的集成解决方案。

各企业还表示了对虚拟现实（VR）的兴趣，虚拟现实可以模拟真实条件，并结合现实物理环境，创建沉浸式或半沉浸式的三维环境。增强现实（AR）是一种

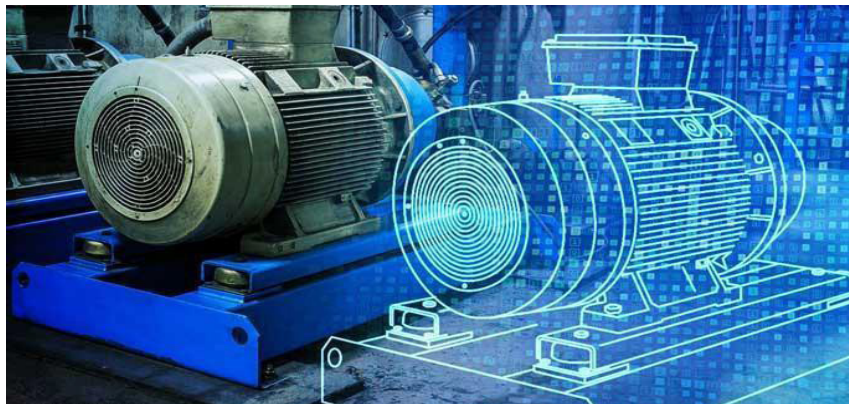


图4 数字孪生，即工业资产的虚拟副本，允许物理组件在数字环境中表示。其价值在于可以帮助进行仿真和集成

将计算机生成的信息覆盖到现实环境中的人机交互形式，尽管容量不如虚拟现实，但各企业对此也颇感兴趣。目前的挑战在于高保真度仿真的开发、多级抽象的集成和计算的改进，只有克服这些挑战，仿真才能够预测复杂环境中的挑战以及集成对机器人本身的影响，并最终实施更好的预测性维护。到目前为止，某些环境要素还没有实现完美建模，我们所说的虚拟现实系统和仿真也只是在初始阶段有所应用。

#### (10) 云系统

互联网上的云系统和计算资源受到隐私和知识产权问题的困扰，以及缺乏标准化的通信协议。物联网和云连接是工业 4.0 的支柱领域。受访的大型企业表示，他们必须开发自己的云平台，以便能够将所有技术与之集成，

通常会开发替代解决方案来满足旧硬件的需求，而小企业则使用大企业开发的系统，因为它们内部没有专业人员来开发自己的平台。一些制造商报告说，他们使用的遗留系统要么难以迁移到云上，要么根本无法连接。通过云系统进行通信的可靠性也仍然是一个问题。

生产控制是工业 4.0 的一个主要愿景，它包括为了充分协调生产而与工厂连接的云计算。因为工厂内的系统通常不互连，也没有捷径将其整合到一个统一的框架中（“孤岛问题”），导致这种技术还未实现，但一旦实现，这种技术将可以对涵盖各种基础设施的整个生产线进行控制和优化。它被许多企业视为当前和未来的目标，其实现仍然依赖于数据基础设施的增强、数据处理的

改善以及云系统的重大改进，正如一家企业所说，云系统将负责“自动实现自动化”。

### 三、反思：挑战总结和结论

我们注意到，以下技术和设计方面的挑战影响了制造商将新的协作和交互技术纳入其制造过程的能力。这些考虑因素广泛适用于制造商，但对于希望引进新技术的中小企业来说，它们可能是望而却步的。

- 机器人技术的许多方面缺乏标准化，这使得一些企业难以充分利用具有发展前景的技术，或将新型机器人纳入生产线。一些企业多年来自主开发系统和功能，他们希望继续使用。其他企业，通常是较小的企业，正在从头开始设计生产线或购买新技术。每种类型的机器人都需要不同的编程语言、接口或通信协议的知识才能使用。除了安全标准和硬件以外，标准化应该将这些考虑因素都涵盖在内。“标准化并不像人们想象的那么容易，”一家大型机器人企业在采访中说道。“我们可以听取很多专家的意见。标准化的实现与哪些技术能够完成哪些事情以及对它们所参与的过程的理解密切相关。”

- 目前的机器人技术不能

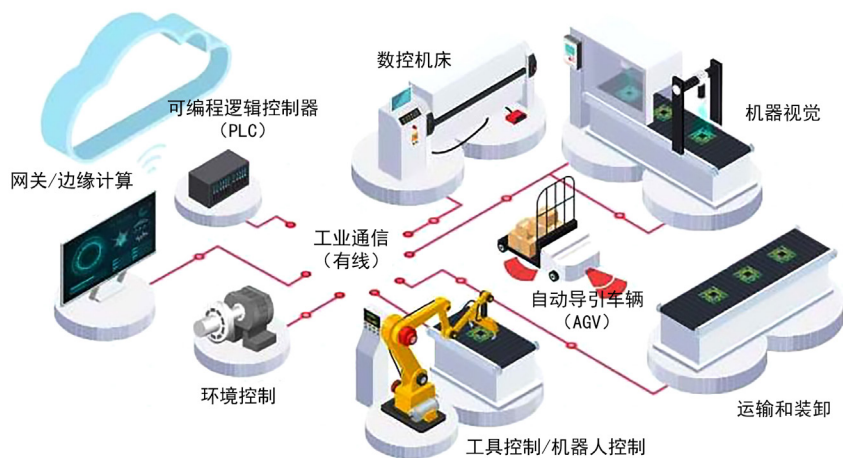


图 5 使用物联网和云系统来连接生产单元的组件并充分协调生产单元的案例

做到迅速调整后重新使用，这一事实限制了机器人的潜在应用，以及经验丰富的生产线工人利用他们的深度领域知识，通过直接重新使用机器人来改进制造过程的能力。灵活性对于提高机器人技术对下列不同生产水平的适用性也很重要，包括多品种小批量生产；加快整合和重新整合的时间；可重构的工作单元和生产线；允许在一条生产线上生产多种产品，从而节省工厂空间；以及实现机器人的可重用性。

虽然技术互联性被认为是实现物联网全面一体化的关键，但将工厂连接到云上所涉及的安全和隐私问题仍然存在，还有通过云计算系统进行通信的可靠性以及如何组织和存储数据的问题。据我们所知，物联网和云系统目前仅限于机器人之间的信息交换，尚未扩展到生产优化应用，或用于实现监控和集中管理，一些企业将其作为当前或未来自动化的目标。

- 卓越的稳健性、更快的集成速度以及消除传感、感知和把握方面的技术瓶颈对于鼓励自动化的投资和大规模采用至关重要。

- 随着越来越多的制造工具、工作单元和产品装载传感工具，大量的原始数据不断被收集。然而，许多企业发现这些数据除

了用于维护目的之外，很难从中提取有用的信息。（我们将在下一节中进一步讨论这个问题。）

- 视觉技术虽然在确保机器人安全和降低质量检查成本方面有很大的前景，但要实现最佳化仍然任重道远。数据和系统稳健性方面的挑战在这一领域也同样适用。研究表明，视觉系统和相应的算法通常在研究环境或其他控制良好的环境中表现良好，但在工厂里实际应用时，它们会出现各种故障。如果没有坚如磐石的可靠性，算法方面的最新进展（如基于深度学习的架构）就不够稳健，无法使用。

- 轻型机器人的有效载荷较低，所以更安全。在安全系统发生故障时，相比于威力足以压坏或严重伤害工人的工业机器人，轻型机器人的“自动防故障装置”对人类安全的影响就小多了。但在某些环境中，轻型机器人的应用仍然有限，因为大型企业更喜欢速度而不是与人类的协作，尤其是一些任务也不适合轻型机器人完成。安全、速度和多功能性之间的平衡将成为轻型机器人的投资方向。

- 虽然一些人认为自动导引车辆有利于物流应用，但它们在工厂内的集成应用可能会因价值定位不明确而受到阻碍。更稳定、更可靠的传感系统的采用，以及

物联网和云计算的融合，可以帮助企业扩大自动导引车辆的基础设施规模，以引入智能车队管理，改善生产流程。

- 最后，优化数据基础设施可以帮助企业“从大数据中获取智能数据”，正如一家大型跨国企业所说。目前，企业对投资这些基础设施持抵制态度，因为现在还未产生显著的收益。

#### 四、未来发展：研究方向、解决方案和建议

根据我们对这些企业如何试验和集成这些技术的研究，我们在以下八个领域提出改进建议：

1. **感知：**这些技术在现有系统的稳健性和在下游子系统（如抓取）中的使用都构成了一个关键的限制。我们认为，研究人员应该集中精力提高工厂环境中感知能力的稳健性，特别是将最近的研究进展（如涉及深度学习的方法）迁移到工厂车间，使其更加有效。因为在这种领域中不太可能有大量的数据，所以这种迁移需要采用一些方法进行适当调整，并确保对环境变化（如光照变化）的稳健性。关于数字孪生，感知方面的改善可以改进数字环境的大规模表示方式，从而更准确地模拟工厂工作单元，并突出异常或次优操作。

**2. 智能抓握：**拿起和放下是机器人的一项重要任务。然而，在约束较少的工厂环境中操纵物体或允许零件的大小和形态变化，需要机器人高度智能化。全自动化的箱中取物通用系统是许多企业关注的一个领域，也是一个已经得到部分解决的问题。为了使系统有效地工作，机器人的视觉和感官知觉需要足够灵敏，才能够从一堆随机摆放或散乱的物体中进行处理并捡起物体。在工厂环境中，研究灵巧手的操作，改进触觉感知和箱中取物技术，包括夹具设计和抓握计划，是一个重要的研究方向，因为这些技术对更灵活的操作至关重要。鉴于感知方面存在挑战，所以抓取仍然是当今工厂自动化的最大限制因素之一。

**3. 安全协作机器人：**这里有几个改进的领域，包括将人类行为预测集成到机器人路径规划中，以提高安全性和协作性；改善动态工作空间中的跟踪技术；通过可行的工作模型，展示协作工作单元的优势和机器人对人类主导的操作的辅助作用。同样，确保包括人类执行的任务在内的整个机器人系统的安全性应该是优先事项。

**4. 自动导引车辆：**自动导引

车辆可以使用一种名为即时定位与地图构建（SLAM）的导航技术，取代传统的导航技术，在空间内定位自己。然而，目前该技术在工业上的应用还处于起步阶段。虽然这一技术提供了稳健的或多功能的数据关联，即将检测到的特征或地标（如墙或其他障碍物）与以前的测量相关联的行为，但仍然很难量化它对物流操作的改善作用。为了充分实现自动导引车辆为物流带来的好处，仍然需要制定车队管理的标准。此外，当前的即时定位与地图构建功能还需要增强，以使该技术满足移动操作（例如机器人安装在车辆上）的应用需求。

**5. 接口和编程：**编程机器人是一项困难且高成本的任务，需要时间投入和特殊的专业知识。对人—机器人交互和简化机器人示教或编程方法的研究，特别是那些统一机器人行为的研究意义重大，如通过演示和其他不以先前或重要的编程专业知识为条件的方法进行编程。这些研究可以降低技能要求，进而减少集成成本，促进机器人技术的更广泛应用。值得考虑的一个可行的研究方向是，使用户能够用工作流程、工件和工作单元的语义描述以及图形编程界面来编程机器人。

**6. 仿真：**增强数字仿真技术需要做大量工作，如数字孪生，对工作单元或生产线的仿真要更详细和精确。虽然虚拟现实和增强现实系统是很有前景的研究方向，但工厂可以更快地从保真度更高的模型中受益，这些模型通常会生成更好的原型，这非常重要，因为企业在现实世界中可以基于这些仿真来执行系统，而不需要在执行之前对操作机器人进行编程。

**7. 以工人为中心的设计：**为了支持轶事证据和经验证据，需要对工人的贡献如何影响设计和集成过程，以及如何影响性能和整个生产周期进行更多的研究。从长远来看，这可以为管理和评估工业环境中的人机交互创建一个工作框架。

**8. 云系统：**云系统承诺通过使用传感器数据来连接和控制工厂车间的操作。然而，到目前为止，这一愿景还没有实现。大规模的传感器集成会带来巨大的成本，并可能对企业基础设施进行彻底改革。在这一点上，许多企业表示很难理解他们从工厂中收集的操作数据，他们不知道如何从中提取和推断出有用的信息。因此，接下来的重点工作就是研究如何从数据中提取有意义的信息。MT

# 数字化转型的十面旗帜二十字方针



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

## 一、数字化转型，没有总决战

数字化转型正在成为工业升级的新宠，但有的参与者是一边涉足一边泼冷水。

很多大牌咨询公司一直在兜售“数字化焦虑症”。2018年，在麦肯锡的《数字化转型的成功秘籍》中，认为实施数字化转型的企业成功率，在2016年仅为20%，而2014年为26%，在2012年也同样仅为20%。这意味着，随着时间的推移，组织的能力并没有同步提高，失败率仍然很高。即使是精通数字技术的行业，例如高科技、媒体和电信，也都在挣扎。在这些行业中，成功率不超过26%。传统行业如石油天然气和汽车的数字化转型成功率更低得可怜。这是三年前的数据，即使到了现在，仍然有很多人在引用这个数据。更有甚者，还有人认为成功率不足10%。

很多咨询公司把数字化转型搞得云里雾里，潜台词无非就是

说，非邀请他们做顶层设计不行。兜售焦虑，获得收入是最典型的一种招法。但数字化转型，有很多细分的进展。它并非一定要以大决战的方式展开，不能轻易以简单的胜败做论断。

在过去的信息化进程中，也许有企业说ERP项目是失败的，但很少会说信息化失败。一个企业信息化怎么会失败呢？一个上千万元部署的ERP最后只被当成了财务软件使用，不能称之为失败，只能说未尽其用，形成浪费。从精益的角度来看，工厂里到处都是大马拉小车，浪费太多。机器设备利用率很低，不足40%的也很常见。但很少企业负责人会因为设备利用效率低而将其称之为失败。

数字化转型的一个失败案例来自德国。2016年3月29日是德国工业4.0工作组悲伤的一个日子。这一天在德国东部城市德累斯顿，大众豪华车辉腾的数字化工厂正式停运。它是工业4.0的宠儿，从个性化订单开始，一

直到零库存拉动生产。

零部件都是无人驾驶，每个工位都有升降台确保人因工程的舒适性。而线边的工作台和所有工具都是数字化的，检测过程更是完全的智能化。然而，它最后被送进了历史博物馆。辉腾的定位失误，造成它根本没有订单，就这一点，所有其他的努力都被判死刑。但是，这个案例很难算是数字化转型的失败。

如果说ERP是信息化的标志性产品，虽然不严谨但也基本站得住脚。而数字化转型，谁能给出一个标志性的硬件或者软件吗？是物联网、传感器、软件，还是平台，或者某一种商业模式。一款SaaS化的软件，比如近来风头大盛市值超过老牌数据库Oracle的Salesforce，算是吗？一套综合性的工业互联网平台的落地，算是吗？部署了5G的黑灯工厂，算是吗？如果这些都不能算，那数字化转型一定是有着更宽泛的界定。

如果连一款旗舰型的代表作

品都没有，那么数字化转型可以说没有成与败，只有快与慢。数字化转型不是总决战，它是无数小战役、无数山头攻防战而形成的一个成果。反过来看，或许只有这种转型才是可靠的。期望毕其功于一役的大决战心理才可能真正导致失败。六年前 GE 发起的数字化转型总冲锋的号角，就是一个近在眼前的失败案例。它既高估了顶层设计的雄心壮志，又低估了一线现场的惯性和抵抗。将数字化转型作为口号宣贯，最终都会证明这不过是毫无生命力的营销手段而已。

这种大决战模式在管理史上并不缺乏大名鼎鼎的先例。20 世纪末，麻省理工学院的哈默教授提出了《企业再造》，对既有组织悍然发起了破坏性的重组，它始于对福特和通用公司等分工型组织的反省。哈默等人主张的是

破坏旧有流程的再造革命。

1993 年这本书出版，并在全球狂销 300 万册，世界 500 强趋之如鹜。但最后结果是，再造并没有被当做根本性的变革，而只是被用做事业精简和削减雇佣的工具了。下山老虎最后变成了小猫咪。而据统计 1995 年再造的项目 67% 基本都失败了。

管理者在推行数字化转型，显然需要避免这种因幻觉而引起的冲动。数字化技术并不是一项具体的技术，数字化转型也不是目标明确的终点站，它是综合性的持久推进。因此，数字化转型并不复杂，就是回归商业本质，这样就会发现决心和手段也就在身边。所谓“舒之弥四海，卷之不盈怀”，它的策略，在于收卷之间。

如此看来，数字化转型，就可以变得简单起来。从企业的商

业本质出发，可以用二十字加以概括：拓单爱客、合规去碳、提质降本、增速减存和改组换令。

就像十面旗帜，它围绕着一个企业所面临的商业模式、环境、运营、供应链和组织保障的挑战，逐一展开。前十六个字，都是通过数字化转型可以实现的目标；而最后四个字，则是数字化转型所必须要有的组织保障。胸怀青云之志者可以同步全面启动，而谨慎者也可以选择其一，小心推进，这些都是值得尊重的选择。

## 二、拓单爱客：第一面和第二面旗帜

商业模式是直接盈利手段，这是所有企业家都会坚守的信念。

但是，商业模式的变化，虽然不是要成为数字化转型要攻克的第一先头堡，但它的确是最有诱惑力的战场。这往往也是数字化雄心广泛燃起并且被认为可以胜过信息化的一个显著特点，人们希望数字化可以直接带来利润。从首席信息官 CIO，转向首席数字官 CDO，就是这种愿望的表达。毕竟数字化释放了大量的数据，而数据要素已经成为生产资料的一部分。为什么不能对数据进行软加工、软编排，从而形成利润呢？

答案是肯定的。

开拓订单和关爱客户，是数



图 1 十面旗帜：数字化转型罗盘

数字化转型在商业模式中突破的两面旗帜。前者是直接开发订单增加利润，而后者则形成了对客户的广泛关注，从而增强粘性，甚至扩大业务收入。

制造业服务化是高端制造的一种必然结果。即使在数字化手段并不丰富的过去，很多制造商已经开始纷纷寻找为已经售出的产品安置一个“倒钩服务”，依然可以把顾客牢牢抓住。昂贵的设备往往是最早找到了寻找盈利的方法。英国罗罗发动机在1998年建立了全球第一套需要远程发动机维护的服务体系TotalCare，开创了一个全新的数字化拓单局面。它并不只是单纯出售产品，而是在发动机售出之后，才开始进入另外一种收费模式：按小时飞行收费。借助于当时还略显稚嫩的传感器和数字分析技术，它找到了新的盈利方式。这一模式启发了另外两家发动机厂商，并开始快速扩散。全球排名第二的工程机械制造商日本小松，最早启动了挖掘机定位系统以防止偷盗现象，就是一种数字化技术关爱顾客的方式。它让拥有挖掘机的业主，再也不用担心机器会被司机开出去干私活。到如今，借助于工业互联网的平台，这种技术的细节早已被大大丰富。石家庄天远科技集团运行了这样一个庞大的工程机械平台，除了故障的监测和运维之外，还可以通过对现场挖掘场景

的监控，找到开发新产品的思路。而它的收入，很多都是来自服务。

数字化技术使得商业模式的改变强度往往依赖于产品的智能化程度。一个有着感知能力的产品（未必一定是智能化），就可以实现与原有制造商的交互。只要数据有回环流动的方式，这种产品就有可能实现增加收入，或者让客户满意的能力。

特斯拉电动车的电池爆炸在2016年曾经受到舆论的强力攻击，就是因为底盘撞在马路障碍物上。特斯拉后来的解决方法是，将底盘设置成可以上下浮动。当高速行驶的时候，底盘变低行车更稳；而车辆靠边或者检测到地面颠簸时，底盘自动提高降低撞击的可能性。这是一种通过数字化手段隐性关注用户满意度的方式。

数字化转型无疑会推动制造厂在商业模式的改变，最显著的一点就是产品功能的选择性采用“基本功能+收费功能”的组合。这种方式，在软件行业早已经流行多年。基础版价格很低，甚至是免费，但附加的功能，却是需要收费的。这像是一个水龙头开关，只有在打开的时候才开始计费。宝武钢铁集团正在推行的数字钢卷，它以一种精准定位的方式可以使得用户在下料的时候，准确估计用量，无需浪费更多钢材。

更深入一点，制造商需要郑重其事地思考：产品出厂之后的后半生，是如何运维的。以前，

出厂后的产品往往和制造商失去了联系，这是一种很常见的“产品孤儿”现象。这是一种长盛不衰的制造范式。而现在，产品的数字化，正在激发制造商改变“产品失联”的局面，通过产品，跟用户发生持久的联系。这种被称之为“长协服务”的方式，就是围绕设备的服务，购买方会继续向制造方购买长期服务。上海电气生产的地铁车厢，交给上海地铁公司之后就算完成了使命。而后续的检修和维护，往往是由地铁公司委托下属企业或者第三方。这中间产生很多的组织缝隙，使得实际运维过程中，漏洞百出。如果上海电气，以更低的价格将车厢出售给地铁公司，并且承担后续的检修、备件服务，那么双方的战略合作关系无疑才是铁板一块。友谊的小船，不用短期订单来考验；利益长期绑在一起的关系，才是真正的好兄弟。而数字化技术，则借助于数字主线，形成一条强有力的绳索，将产品的前半生、后半生捆绑在一起。

很多电气产品如变频器、控制器的设计，以前只是单独的功能型，而现在往往同时带着通讯功能和自诊断的能力，企业用户不再需要仓库来储存备件。当产品快失效的时候，会自动提醒需要维修或者下订单。而这些产品达到一定量的时候，就会需要一个工业互联网平台的连接。而平台上基于备品备件和维修保养

的整体分析就会形成一种收费机制。先功能硬件后平台服务，这是国外自动化厂商跟国内厂商做工业互联网平台最不同的地方，后者似乎走反了路。

对于石油化工等重资产行业还有更宏大的视角切换。以前企业的前端项目建设，设备投资都是一次性投入（所谓的Capex 资本费用），而现在企业更强调全生命周期的持续运营，从运营费用（Opex）来考虑问题。这反映了流程行业的一个重要变化，不再满足以前的交钥匙工程，而是更加重视资源的运营效率，包括备品备件管理、厂务的巡检、能耗的巡检等。这使得重资产行业对于数字化转型有着明显的需求。

从这个意义上讲，“没有售后的服务，就是最好的服务”，看似是一种令人赞许的质量自信。然而对这句话的鼓掌，只能鼓到一半。因为这仍然是一种经典的产品思维。尽管看似是质量做到了极限，让产品没有故障。但是这种想法却切断了和用户的联系，与“产品即服务”的数字化思维大相径庭。产品交到客户手中之后，怎么会切断联系呢？下一个服务收入的路程不是刚刚开始吗？

### 三、提质降本

提高质量和降低成本是企业运营最重要的内功。数字化技术

则增加了很多顺手的武器。

制造现场的质量管理问题经历了一百多年的发展，从休哈特的统计方式被福特流水线广泛运用开始，几代人的添砖加瓦，已经让质量体系成为一座宏伟的宫殿。无论是制造现场的精益改善，六西格玛，还是针对设计端的健壮性设计、六西格玛设计等，都是制造的常客。

随着物联网和数字化技术的发展，数字化质量也到了一个新的节点。但传统的5S、SPC理论依然没有实现大的突破。可以说将近100年前的休哈特所奠定的技术工具至今也未能进化，没有与数字化技术等形成很好的融合。

在当下的全检时代，以前抽检时代的理论产物和经验公式已经迫切需要改变。

长期以来，质量检验是企业对产品质量的最后一道把关口，也是一种无奈的选择。这种事后介入质量的方式，无疑就是守株待兔，或者干脆就是“死后验尸”。而现在，现场大量数据，可以实时检测和决策。工厂现场机器微不足道的异常，数据分析就是显影剂，完全可以实时捕捉缺陷的痕迹。

即使在低端工厂，数字化技术也在简明扼要地发挥作用。很多传统制造的工厂里，仍然有许多年纪较大、文化水平不高的操作人员，以前都是手工检点、自行记录的方式。出现质量问题很

难回溯，而现在只需要简单的扫码提交动作，质量的数据流就能开始呈现连贯的状态。质量异常这只隐藏多年的“老狐狸”，现在到处都会漏出马脚。笔者正在倡导发起的“新质量思维”，在数字化转型时期具有更加现实的意义。企业家可以从数字化的视角形成一套新质量思维，重新审视质量的战略价值。

与很多人的认识相反，低成本与高质量其实并不矛盾。低成本实现优质制造，非常适合中国制造的国情。但是低成本并非偷工减料，而是一种高科技的核心优势。它通过减少浪费、择优选取供应链、防止质量缺陷等，得以保证高质量。换言之，在产品高质量的实现过程中，最明显地成果就是会减少成本。每一个有质量缺陷的产品，都是成本最昂贵的代言人。

更宽泛的解释是来自2017年8月美国国家经济研究局发布的《数字经济学》报告。来自多伦多大学和麻省理工的两位教授，解释如何通过“比特”信息和原子“物理题”的结合，形成数字化的竞争力。数字技术本身或许意味着成本，但它至少降低了五种类型的成本，包括更低的搜寻、复制、运输、追踪和验证成本。

### 四、增速减存

提高交付速度在过去一直是

企业快速占领市场的法宝。加速研发，分秒必争夺周期，设计环节首当其冲。

摘下发动机这颗明珠，是中国制造最大的心事。它有很多难点，其中之一就是发动机最讲究数据验证。如果说发动机在飞行过程中离不开润滑油的润滑，那么发动机研制过程中，同样离不开大量试验数据的“润滑”支撑。发动机的可靠性是一个重要指标，例如GE的发动机要求每百万飞行小时要小于一次机毁的事故。这种概率，比单次中奖一亿元彩票都难。要达到这一点，必须要靠大量数据经年累月的积累。这些真实的飞行数据都会与研发数据进行回归，才能出来可靠性模型。而对于中国航空发动机旗下的商发集团而言，这些数据不可或缺。因为中国第一台自主研发商用大涵道比的涡扇发动机仍然处于研制之中，没有飞行数据可以用来回归计算，而军用飞机发动机数据基本不适用。那么落后者的追赶，路在哪里？

商发选择了集成研发平台，不仅建立完整的数字化研发体系，而且以集成平台作为载体。数字化转型是唯一的追赶车道。在平台上，通过仿真建立数据库，通过知识重用加速模块开发。从数据变成知识，需要高级猎手的捕捉。研发平台就是这样的数字化猎手。它将专业软件和设计方法，进行了有效的集成封装，大

大减少了学习曲线，节省了时间。数字化转型是对数据价值的重新认识。而集成研发平台是众人拾柴火焰高，通过数字化技术产生了集体知识加速度。

同样，数字孪生承载了加速设计研发的使命。由于它与物理实体的强关联，后者的运行数据，会作为经验值输入给设计端，让工程研发人员做到了心中有“数”。工程机械的工业互联网平台运营商石家庄天远科技集团，在比较了机械报警数量与实际需要维修之间的巨大差异和故障类型之后，得出了某些机械设计环节的极限值过度保守的结论，这一结论让自负的小松工程师大吃一惊。后者迅速改变了设计，并以更低价格推出了新版的同类产品。

成本，还可以沿着供应链上溯而形成整体瘦身。一些有实力的主机厂，会推动供应商的联动转型。如果供应商的水平还处于精益改善阶段，就派精益专家去辅导；而如果已经达到一定水平，那么就相互之间建立数字化转型伙伴，推动供应商采用同样的数字化机制，包括设备部分数据的共享，以减少双方的成本。例如上游厂家出厂质检的数据，可以直接作为企业的入厂质检，减少一道质量核查手续。为数据的跨厂无障碍流动，构成了有力的保障。

降低库存则是企业供应链改

善的一个长期命题。生产出来的产品，要么在顾客手中，要么在路上，怎么可能呆在库房里？因为这意味着资金的沉淀。按照日本制造根深蒂固的观念，“库存是罪恶之源”。20世纪70年代，大野耐一在总结丰田生产方式的七种浪费的时候，排在第一位的就是“库存”。

而数字化技术，让经营者可以有更好地解决库存的方式。美的旗下的美云智数，对整个工厂的物流系统进行了全方位的节点梳理。“时间都去哪儿了”，这是一场“物流时间大会战”。无论是原料产品的进厂出厂，还是运输途中，物流时间都被重新细化到每一分、每一秒。作为供货商，送货出工厂前点一下美的通APP，美的通过跟踪车辆位置，物流车进入工厂三公里范围之内，系统就开始自动预约卸货地点。半个小时之内需要在指定卸货位，卸货完毕，而所有进入车辆最多两个小时之内必须离厂。即使门口的保安，也参与了与时间赛跑的游戏，因为放行时间的这一细小的环节，也被纳入计算之中。而在以前，货进入工厂之后，都是现场联系装卸地点，无意义的物料移动和无所事事的原地等待。这些以前习以为常的现象，在当下滴答的秒表中成为一种丑陋和罪恶。而家电产品下线之后，迎接它们的不是仓库，而是直接去了目的地。“零库存保

卫战”借助于数字化技术的支撑，将“制造与物流”有机地融合在一起。

设计的巧妙，自然也是离不开的。为了应对每年上千种的规格、数百万产品的顺利出厂，一家电气工厂建立了四种订单与库存的对应模式，以应对企业对于不同产品的诉求。对于定制化的产品，设计师需要提前考虑进线、变频、水冷系统大类；在考虑大类之下不同的参数组合如电压、功率、电流等，最后与底层的物料清单表相对应。很多制造、物流的问题，到设计端都能找到解决的办法。它的极端情况是，一只有 100 多元的断路器，也能做到单件生产。

## 五、合规去碳

合规问题在中低端的制造场合很容易被一笔带过。合规一方面体现在设计端，一个好的设计研发工程师，需要能够快速识别所用材料是否满足市场的法规要求。很多软件往往带有这种数据库供选择。另一方面，工厂的合规，则涉及到了 HSE（安全、健康和环境）这一类颇为棘手的问题。国际制造商品牌往往赋予了 HSE 经理以“一票否决权”，可以直接命令厂长停止运营。很多国内独资企业的经营者，应该都领教过国外 HSE 专员巡厂时“颐指气使”的姿态，他们的权力太

大了。

即使如此，职业安全管理所出现的问题仍然防不胜防。能源及石化流程行业尤其明显。最近二十年通过治理措施的加码，国外的轻微事故（如跌倒伤害等）开始大幅度降低；但令人惊讶的是，重度伤害事件却基本上一直没有明显的变化。BP 石油在 2005 年和 2010 年都发生了巨大的油井爆炸事件，灾难深重。答案经常出奇简单，现场施工人员为了时间效率或者侥幸，而绕开安全流程，从而酿成大祸。

当时切尔诺贝利核电站的惨剧就是为了赶任务。检修前，来自莫斯科的继续供电指令让检修推迟了几个小时。而后来的操作人员为了抢回时间连夜操作。在几个连续致命的操作之后，都没有发挥系统锁定的作用，导致核

反应棒数量少于最低限，引发了最后的爆炸。

那么，谁能在危险的现场，独具慧眼识别千变万化的局势，并从数万条线索中找到最相关的因素呢？答案是数字化技术。荷兰一家本来只是做合规咨询业务的顾问型公司，通过连续并购法国一家数字化 HSE 平台，一家有作业许可的电子监控系统、以及设备逻辑强关联的机理分析软件，从而构建了一套屏障防范的自锁技术。这样，复杂设备的现场操作漏洞、相关因素前因后果，这些以前看不见的逻辑，现在都能通过数字孪生技术显现出来。安全管理数字化就是基于防护屏障的数字化，每一个威胁都有数据源跟踪，而每一道屏障都可以分析。可以说，现在人们可以轻松跨越这些看不见的黑机关。一



图2 重伤事故率依然保持高比例 (Source: 英国坎贝尔研究院)

旦违反规则，整个系统将会形成自防御机制。

而现场基于人员定位的电子围栏则是一种更加常见的风险防范。商飞的数字化工厂，借助于华龙讯达的数字孪生技术，将京东的物流、海康威视的视觉系统和商汤的天眼，集成在一起。系统可以自动识别保密级别，使得人员只能在规定的范围内作业。

去碳，本来是合规的一种。但当前是如此炙热，以致于必须单独列项。这源自中国“2030 碳达峰和 2060 年碳中和”的雄心目标。绿色制造多年来一直被看成是对企业优等生的奖品，它像是一项比赛结束后会发给胜利者的花冠。平庸企业似乎无需关注。而现在，人人都有份。绿色制造成为一种潜在的具有竞争力的技术，低碳成为关键性约束因素。

双碳革命，看上去是一个“天塌下来让高个子先顶着”的现实版寓言。电力热力行业首当其冲，压力最大。碳交易市场的首批入场选手中，2000 多家都是来自电力行业。而碳排放贡献份额排名第二到第五的分别是钢铁、化工、水泥、有色金属，后面则跟着制造业、建筑和交通。梯次下降，先知先觉者已经将挑战看成机会。正如特斯拉电动车 2020 年的利润是 7 亿美元，但碳配额所形成的收入则一举超过了 16 亿美元。

这样的事情，会不会在工业

领域内发生呢？

碳革命首先要从流程行业开始。这需要先进行碳家底的摸查，然后是投资分析，最后是数字化平台的落地。施耐德电气的绿色能源管理咨询，已经开始提供从数字运维、数字能源管理，到综合能源服务的一体化去碳架构。而数字化技术，则起到了至关重要的作用。

流程行业中，以节能减排为目标的能源管理系统，早就开始发挥作用，如今精神抖擞百倍。而作为各种仪表的连接端，分布式控制系统 DCS 的数据采集重要性也开始凸显。它的数据记录，不仅仅是数据的来源，而且很快会成为碳排放监测的一个界面。近年来，它的脱硫脱硝数据已经直接连接到环保局，中间不允许更改。

而碳排放将来显然也会走同样的路径，这样才能确保工艺数据的可透明、可访问、可监督。同样，现场 SCADA 数据库的时序数据和事件数据，都对碳足迹的追踪和碳增过程的评估，起到决定性的作用。只要借助于专业人员的介入，一张清晰可见的碳足迹就会随时真实可见。如果说碳是小偷，那么数字化技术就是黑猫警长的跟踪器。

同样，电气配电与工艺仪表这两个部门，也需要开始思考各自的边界。能耗，是配电部门所关注；而生产效率，则是运营

如仪控班所掌控的。二者以往往往都是各自规划，只通过有限的交集进行沟通。然而，双碳目标提出来一个棘手的问题，那就是既不能因为能耗与脱碳方面太激进而影响运营，损失利润；也不能运营效率太高而导致碳排放居高不下，会形成碳税的惩罚。于是，配电与过程自动化的无缝融合变得恰如其时，而且十分迫切。将电气班和仪表班的运营系统打通，在中控室，运营人员可以同时看到电力网的数据，在关注工艺优化的同时，也随时洞察到设备能耗数据，实现碳排放的可见、可控和可为。

国内富有雄心的水泥企业如祁连山水泥、金隅等，已经开始从先进过程分析和实时优化的专家系统入手，加上能源管理系统合力去碳。而作为国内光伏产业的老大，西安隆鑫则开始向供应链上游，发出去碳令，上游供应商产品必须提供碳排放合格的证明。中国 2019 年光伏硅片、组件已经占全球产量的 98% 和 77% 以上，更要担心国外祭起的碳收割器。欧盟市场的碳标准都在制定之中，一旦落实，苛刻的碳税将会是一把全新而锋利的利润削刀，指向中国制造业。

整个行业也都被强迫性收紧。软件行业 2019 年在欧洲加入社会环境治理行动计划后，已强制要求将工业软件的每个研制模块进行绿色化处理。软件模块

能自动计算设计对象的三个碳排放指标，包括设计者本身、制造过程及未来使用过程中。你不算碳，碳来算你。碳行动方案，无处不跟数字化转型关联在一起。

## 六、改组换令：第九面和第十面旗帜

组织跟随战略，战略一旦启动，组织应当跟随。但是很不幸，组织的变化，会非常非常慢。对于数字化转型而言，改组意味着更新组织，换令意味着重置既有指令，这都是最基础的保障。但二者的实施是艰难的，因为它是在向既有的习惯宣战。与此同时，二者都是隐形的。人们对于组织的改变难度永远会低估，而不配套的组织和那些过期指令，往往是数字化最大的绊马索。

就一个企业的基因而言，组织是最重要的承载者。要充分认识组织的惰性，恐龙的兴衰，似乎是一个不错的故事。

先说恐龙如何称霸。恐龙开始活跃的时代，大概是 2.5 亿年前，地球还是一个完整板块。彼时地壳不稳，天天火山喷发，地球缺氧（氧气浓度只有现在的一半）。而恐龙能够开始繁荣是因为它有独到的气囊系统，更适合低氧环境。当时各种生物的竞争，不依赖外部有多少铠甲或者有多少角，而是看内部构造是否适应呼吸。

这意味着一个物种，一个企业的胜利，是靠内系统的构造，比如呼吸系统；而非外部构造，诸如长角、肌肉等。这正是一个组织的隐喻。企业文化、结构、基因等“内部构造”，决定了它的竞争力。

而恐龙的灭亡，则同样是内部结构所致。陨星撞击地球之后，大量粉尘遮挡了阳光，植物物种 80% 灭绝。食物链金字塔崩塌。谁吃的少，谁更容易活下来。这个分界线，大概是 20kg 的质量。作为大型动物，恐龙逐渐走向灭亡。它最具优势的大型化成为它必死的理由。

美国著名的企业经营史大师钱德勒的成名之作《组织跟随战略》一书就提到：一个组织，是很难快速跟上企业的战略变化的。外部环境一变，组织最容易变得迟钝。数字化转型的道路上，最令决策者踌躇的就是对组织结构的调整。而没有组织变革就很难在数字化转型道路上走得太远，就像没有航空母舰编队的舰群，是无法实施远海战略的。

这几年，集成产品研发 IPD 的组织形态正在受到复杂装备制造商的青睐。IPD 研发是并行工程的一种，简单而言就像是华罗庚的统筹法应用。多个项目小组平行前进，以共同的瓶颈点为节点。波音飞机很早就开始采用这种方式。而国内最好的实践者，应当属于从 IBM 学习的华为。十几年过去了，

华为正在承担师傅的角色，在中国制造广泛传播这种理念。而中国制造的卓越者也在紧紧跟上。身挑两机专项重任之一的中国重型燃机，创建了“技术集成与实物构造一体化”理念，全面推行科研工程化，而 IPD 就是其中重要一环。这种“强矩阵”的组织运作模式，是从董事长开始亲自落实。即使是这样，没有组织的改变，数字化攻坚将会很难持久。

当然，改变组织是困难的，叠加组织似乎相对容易。于是，并购也是一种方式。日本横河电机作为流程行业自动化的老牌劲旅，每三年会更新一下企业战略。最近 6 年来的战略布局，一直都是围绕着数字化转型而来。2015 年发布的“2017 转型”计划中，正式向高级解决方案进军。这是数字化转型的战略意识觉醒，也是此前三十年企业最大的一次跨越。为此，三年 30 亿元人民币的并购预算也成为战略计划之一。2016 年成为横河电机并购历史上最为忙碌的一年，它收购了一系列公司，其中最重要的是收购了一家英国工程咨询公司以及它所拥有的炼油厂全流程模拟软件。围绕这些数字化新公司，横河开始继续重新改组企业组织，既有知识包与软件相结合的咨询方案，又有自动化仪表和控制系统。这种努力得到了回报，中国能源工程集团旗下的山东省东营广饶县六家炼油厂，很快就借助

于横河电机的咨询与实施一体化方案，进行产量整合和效益最大化。山东省有许多小型炼油厂，分散纷乱现象随处可见，设备升级和运营整合自然必不可少。而数字化技术则提供了深刻的洞察力，和小船联营的能力。

一些激进企业不仅建立专门的数字化转型团队，更是在此之上，推动了高效组织 HPO 的改革。这些团队，不仅推动内部转型，还对外服务，实现内部专业知识的外溢。传统的信息化部门，是否能够胜任数字化转型的任务。答案十分不确定，尽管人们会想当然地将做这样的推理。但是目前来看，十多年前的信息化公司，似乎已显疲态。无论是宝钢成立的宝信，或者中石化下属的石化盈科，或者是一汽的启明星，要么显得气喘吁吁，要么心不在焉。集团内部能做的事情太多了，而且轻车熟路，为何要迎接全新的挑战呢？强势的优越感，似乎掩盖了力不从心的硬伤。春风自在围墙外，新锐数字化公司已经杀出来。中车成立了数字化团队，对内提供服务，而对外则只瞄准重工行业，匹配自己的优势业务基因。在工业互联网的热浪中，三一重工、TCL 等都单独成立了数字化转型公司，并且以追求集团之外的业务占比能够超过 50% 为目标。这些公司往往跳出原有的行业，瞄准其他行业行动稍慢的头部企业，提供数字化转型的

服务。这种“快鱼拖慢鱼”的现象已经非常普遍。基因的重塑，组织的再造，是这类公司首先面临的挑战。

改变组织，是企业最难下决心的一手棋。但有的时候，也是不得不变。九江石化采用了数字化技术，将原有分散的 35 个设备操作室集中到一个中控室。原来视频安防、能源管理和运营等不同的信息，现在都集中到一起，大大开阔了中层决策者的视野。一个中央数据库，把所有的生产数据都集中在一起。这种运营一体化中心，既压缩了现场决策的层级，也改变了工作岗位的性质。原来盯屏幕的人员减少了，而参与数据分析和调度的人则开始增多，组织的结构出现了自我优化的局面。

当然还有稍微轻松一点的，则是涉及到规章制度的修改。这也是数字化转型必不可少的保障。

企业在数字化转型的时候，分配预算经常会碰到意想不到的困难。比如设备运维的大数据分析，这是属于技改项目吗？

按照原来的规章制度，它不是。由于没有先例，小心翼翼的财务人员，就会封堵上这个口子。于是明明是解决工程应用的数据分析，就只能变成创新课题。技改项目，就可以动用数百万甚至上千万的费用；但创新项目，则就只有几十万元，而且得层层审

批。大数据分析公司也只能暗暗叫苦。

创新大动作，却只能草草以小把戏收场。原来习以为常的规章和指令，成功地放慢了数字化转型的步伐。

在宝武，传统的点检定修、设备管理都是按照经验而来的。这些五花八门的指令，有的可能来自新日铁的经验，有的来自西门子的设备。而现在，数字化技术可以实现远程监控、分析预测等，原有的条例制度现在来看很多就不合时宜。例如以前的维修人员，按照规定每天要做十多个账本，涉及到不同设备的点检、备件、采购和维修计划。但这种制度，是按照一台设备一个物理形态而遗留下来的。而现在物理对象都在逐渐以数字孪生形态来表达，多个数据要素自有关联，一本账就可以搞定。

这意味着原有制度和指令，很多正在捆绑着创新的活力。管理制度需要来一次轻量化，删除大量不合理的指令，从而为数字化转型保驾护航。

## 小结

数字化转型，与其说是一种技术的更迭，不如说是一种思维模式的转换。它有着迎风飘扬的十面旗帜，引导着企业家追随的步伐。而人的意愿，则超越了技术的驱动，呈现出更大的力量。MT

# 2022 深圳再相聚

MEET AGAIN IN SHENZHEN 2022

BEW2022

## 第26届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 26<sup>th</sup> BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR

珠三角经济发展提速  
Accelerated Economic Development of Pearl River Delta

东南亚市场开拓活跃  
Active Market Exploration in Southeast Asia

“一带一路”东风强劲  
Strong Wind of “Belt and Road”



关注我们的微信公众号，  
可获取更多展会信息。



2022年6月7-10日

深圳国际会展中心

June 7-10, 2022

Shenzhen World

International Exhibition & Convention Centre



[www.beijing-essen-welding.com](http://www.beijing-essen-welding.com)

[www.埃森焊接展.com](http://www.埃森焊接展.com)