

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<http://www.cmes.org>

2020 年第 5 期 总第 210 期

我国工业互联网发展近况 p1

振兴人机交互 促进社会进步 p7

全开放的工业自动化系统正喷薄而出——论 IEC 61499 的历史责任和应用前景 p39

从造得了到造得好，中国还需走几步？ p47



目 录

CONTENTS



机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2020 年第 5 期（总第 210 期）
2020 年 10 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

- | | |
|---------------|---|
| 我国工业互联网发展近况 | 1 |
| 振兴人机交互 促进社会进步 | 7 |



专家视点 EXPERT OPINION

- | | |
|--------------------------|----|
| 全开放的工业自动化系统正喷薄而出 | |
| ——论 IEC 61499 的历史责任和应用前景 | 39 |
| 从造得了到造得好，中国还需走几步 | 47 |

我国工业互联网发展近况 *



《财经国家周刊》记者 陈浩杰 张安彤

近一段时期以来，北京、重庆、山东等地纷纷出台措施加快工业互联网发展，作为“新基建”重要的组成部分，工业互联网正释放出巨大的发展活力和潜能。

今年以来，在助力企业战“疫”和复工复产等方面，工业互联网发挥了重要作用，与此同时，疫情的催化也加速我国工业化进程赛道转换：传统生产模式正在退场，工业互联网走向舞台中央。

当下，为抢抓新一轮科技革命和产业变革的重大历史机遇，世界主要国家和地区纷纷加强制造业数字化转型和工业互联网战略布局，全球领先企业积极行动，抢占这一新的产业竞争高地。

作为全球生产中心和供应枢纽，我国也迎来全球价值链重构

的战略机遇期。中央提出构建“双循环”新发展格局，“新基建”是数字经济时代打通“双循环”的关键。

加快发展工业互联网，是党中央着眼全局、面向未来做出的重大决策部署。习近平总书记多次指示。今年2月21日，中央政治局会议再次强调，要推动工业互联网加快发展。

2017年《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》发布，掀开了我国工业互联网创新发展的序幕。2018年6月工信部印发《工业互联网发展行动计划（2018—2020年）》，提出到2020年底我国将实现“初步建成工业互联网基础设施和产业体系”的发展目标。

2020年是工业互联网发展三年行动计划的收官之年，也是开启国家“十四五”发展新征程的关键之年。三年过去了，我国工业互联网发展情况如何？三年行动计划提出的目标是否实现？近日，《财经国家周刊》记者专访了工信部信息技术发展司一级巡视员李颖。

一、工业互联网重塑制造业

《财经国家周刊》：结合此次战“疫”看，工业互联网对我国制造业高质量发展具体起到了哪些作用？

李颖：工业互联网对推动制造业高质量发展的作用主要体现在以下几个方面：

注：本文来源于《财经国家周刊》2020年10月3日公众号，本刊获得授权转载。原标题为“中国制造的惊险一跃！这一国家行动如何收官？”

一是通过制造资源在线汇聚与复用，培育制造业发展新动能。工业互联网通过对工业设备、产品、系统、服务的全面连接，打通消费与生产、供应与制造、产品与服务之间的数据流，实现研发设计、生产制造、运维服务等海量制造资源的在线汇聚和沉淀，通过工业知识的模型化和软件化加快关键核心技术创新突破，推动制造业加速迈向万物互联、数据驱动、软件定义、平台支撑、智能主导的高质量发展新阶段。

二是通过新技术新产品新模式新业态培育，开辟制造业发展新空间。工业互联网平台有助于加快培育网络化协同、个性化定制、服务化延伸、智能化生产、数字化管理等新模式新业态，孵化智能产品、智能设备、智能服务等数字化新产业，有力推动新技术的创新、新产品的培育、新业态的扩散和新模式的应用，形成数字化转型新路径，开辟制造业发展新空间，形成经济新的增长点。在疫情期间，阿里云、华为等通过开放计算能力、汇聚优质资源、运用相关模型，为药物筛选与研制起到了重要促进作用，也为疫情防控争取到了宝贵时间。

三是通过制造能力开放共享与动态配置，形成制造业协同发展新格局。依托工业互联网平台，聚合制造商、供应商、消费者、开发者等主体，实现更大范围的数据流动，形成基于平台的业务协同、能力共享、市场拓展等开放式发展方式，促进社会化资源的网络化动态配置，通过提升柔性转产能力等方式补齐当前产业链断点，构建柔性、灵活、稳定的产业链供应链，促进形成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。例如，富士康在疫情期间利用工业互联网平台进行了医疗物资的快速柔性转产，仅仅三天就建成口罩生产线，为缓解口罩供给压力提供了重要支持。

《财经国家周刊》：有统计显示，2019年我国工业互联网产业经济规模达2.1万亿元，对经济增长的贡献达到9.9%。工业互联网对经济增长的贡献主要体现在哪些方面？

李颖：目前工业互联网企业创新加速涌现、行业应用不断深化，对经济增长的促进作用显著增强，具体主要体现为数字产业化和产业数字化两个方面。

在数字产业化方面，工业互联网平台业态快速发展，基于平台还催生了一大批创新创业主体，加速了新技术新产品迭代升级和新模式新业态的发展壮大。

一方面，工业互联网平台加速发展，在工业互联网整体产业中，平台部分的核心产业规模为2486亿元，同比增长29.2%，成为工业互联网核心产业增长的主要驱动力量。

另一方面，工业互联网平台孕育大批市场新主体，显著带动创新创业发展。一批行业龙头企业以平台产品开发与运营为业务，整合资源赋能创新创业企业加速发展，激发市场新活力。

在产业数字化方面，基于工业互联网平台，大型企业、中小微企业以及各类服务企业的数字化转型加速推进、协同发展，通过不断深化信息技术与制造业的深度融合，全面改造提升传统动能，培育发展新动能，助力产业加速实现新发展。

二、从概念走向落地

《财经国家周刊》：经过这几年建设，我国工业互联网取得了哪些突出成果？和发达国家相比，我国工业互联网的发展还有哪些不足？

李颖：近年来，政府和企业共同发力，中央和地方紧密协同，依托重大工程实施、试点示范推广、政策宣贯动员等举措，推动工业互联网建设取得系统性、全局性、突破性进展。主要体现为：

网络基础设施持续完善。“东西南北中”标识解析国家顶级节点初步建立，60余个行业二级节点普及推广，“5G+工业互联网”建设加快推进。

多层次平台体系基本形成。“平台+重点行业”“平台+新技术”融合进程提速，平台创新解决方案和新型工业APP加速涌现，平台对企业转型升级赋能效果逐步凸显，基于平台的多方协同生态日趋成熟。

多级联动安全保障体系建设稳步推进。建设国家、省、企业三级协同的安全监测服务体系，与21个省级平台对接，覆盖8个重要工业领域，初步实现工业互联网安全态势可感可知。

融合创新应用持续深化。石

化、钢铁、机械、电子、服装等行业涌现一批融合发展新模式新业态，形成龙头“点状”突破、行业“线状”推广、区域“面状”普及的良好态势。

总的来看，我国工业互联网发展正处在从概念框架到落地深耕的关键阶段，产业创新日趋活跃、应用生态逐渐壮大，已经成为我国工业数字化转型和两化深度融合发展的关键抓手。

但同时也要看到，发展工业互联网是一项长期且艰巨的系统工程，虽然我国发展工业互联网与国外同时起步，但传统工业网络技术中的主流技术、标准、产业被经历前三次工业革命的美欧日企业把控，我国工业互联网产业发展受制于工业基础薄弱、数字化水平参差不齐等诸多因素，与发达国家相比还存在一定差距，面临不进则退、慢进亦退的风险。下一步，亟需进一步创新举措、统筹布局，持续推进工业互联网系统建设、有效应用和普及推广。

《财经国家周刊》：网络、平台、安全是工业互联网的三大功能体系，其中平台是核心。目

前全国工业互联网平台发展呈现出哪些特点？

李颖：近年来，我国工业互联网平台快速发展，目前全国具有一定影响力的平台已经超过70个，初步形成了“综合型+特色型+专业型”平台体系，示范带动作用日益凸显，赋能产业加速形成系统全面、层次分明、重点突出的良好发展格局，主要表现为以下三个方面：

第一，跨行业跨领域综合型平台引领作用不断增强。2019年遴选出的海尔、东方国信、用友、浪潮、航天云网等十大跨行业跨领域工业互联网平台，推动资金、人才、技术等要素跨部门、跨企业自由流通，资源富集、创新活跃、开放共享的产业生态加速构建，海量用户和海量应用双向迭代的格局正在形成。疫情期间，徐工汉云平台为武汉火神山医院建设紧急调配了在线设备进行驰援，通过实时监测72台工程机械，有效开展“云监工”。三一云平台也为西安、广西等地的应急医院建设提供了重要技术支持，通过对工程设备开展远程监控，最大限度加快了施工进度。

第二，面向行业和区域的

特色型平台应用不断深化。在工业互联网平台从概念走向落地的过程中，涌现出了一批面向特定行业和区域应用落地的特色型平台，有力推动了平台与实体经济的深度融合。在行业应用方面，工业互联网平台已广泛应用到包括工程机械、钢铁、石化等在内的 30 余个国民经济重点行业。在区域落地方面，北京、长三角、粤港澳大湾区等结合当地优势产业，因地制宜，探索形成基于工业互联网平台的“块状经济”产业集聚区推进模式。

第三，聚焦关键技术的专业型平台技术融合不断创新。一批专业型工业互联网平台，聚焦研发设计、生产制造、经营管理等产品全生命周期的特定环节，基于深厚的经验积累，深度应用大数据、人工智能、区块链等新兴技术，加快工业工艺、原理、知识的显性化、代码化和软件化进程，不断提高技术融合创新能力。

当前，我国工业互联网平台建设发展虽然取得了阶段性成效，但也存在工业设备联网率不高、工业机理模型积累不足、“杀手级”工业 APP 缺乏等问题。下一步，将通过加强专项资金支持

和开展试点示范等工作，多措并举推动工业互联网平台发展迈向更高水平。

《财经国家周刊》：经过短短三年的推动，全国各地已掀起了发展工业互联网的热潮，正在从专业领域的话题扩散到大众媒体的视野。下一步工信部推进工业互联网平台发展的总体思路是什么？

李颖：工信部在推进工业互联网平台建设发展的过程中，始终坚持政府引导和市场主导相协调、建平台和用平台相结合的原则，使市场在资源配置中起决定性作用和更好发挥政府作用，充分汇聚政产学研各方力量，形成工作合力。近年来，工信部聚焦平台建设、服务提升、生态构建，加快打造基于工业互联网平台的制造业发展新格局。

一是打造多层次平台发展体系。培育一批跨行业跨领域综合型工业互联网平台、重点领域和区域特色型平台以及特定领域技术专业型平台，深化工业数据、技术、工具、资金、人才等资源要素的平台化汇聚、数字化管理和在线化开放，打造网络化组织

形态，提升制造资源配置效率，优化和变革企业生产方式、组织形式和商业模式。

二是构建系统性服务保障体系。加快建成一批平台应用创新推广体验中心和工程实训基地，开展多层次人才培养，推动关键技术协同攻关。遴选一批工业互联网国家示范区，打造区域一体化工业互联网公共服务平台，推动工业互联网平台由点及线到面应用普及，带动区域产业提质增效。加快工业互联网大数据中心和分中心建设，促进工业数据资源的汇聚、共享与增值服务。

三是健全融合型生态发展体系。加快工业互联网平台新模式应用等相关标准研制，构建工业互联网平台监测分析体系，开展工业互联网发展运行分析，促进大中小企业、一二三产业融通发展。搭建工业互联网产融合作交流平台，深化工业互联网平台与信创、工业软件、金融服务等融合发展，打造基于平台的制造业发展新生态。

三、不敢用、不会用、用不起

《财经国家周刊》：发展工业互联网是推动制造业高质量发展的关键驱动，也是推动传统产业转型升级的重要抓手。对于传统制造企业而言，应如何打造基于工业互联网平台的制造新生态？

李颖：制造企业打造基于工业互联网平台的制造新生态，应坚持“存量优化+增量培育”双轮驱动。

一方面，坚持存量优化，加快企业全链条数字化改造。加快工业网络改造，积极应用大带宽、低时延、高可靠的 5G 网络技术进行工厂基础网络改造，构建网络连通、数据贯通、边云协同的工业生态体系，优化企业运转效率。推动制造资源云端迁移，加快高耗能、高价值、通用型工业设备上云用云，促进制造资源的平台共享，提高制造资源动态配置效率，大幅降低企业成本。加强各业务环节的数字化应用和数据的集成共享，面向产品全生命周期打造数字孪生系统，提高产品质量和服务水平。

另一方面，坚持增量培育，发展新模式新业态。新模式新业态是企业应用工业互联网平台的

关键成效，是推动企业内部价值链和外部产业链分工与重组的重要路径。基于工业互联网平台打通生产制造全过程、产品全生命周期数据，培育网络化协同、个性化定制、智能化生产、服务化延伸、数字化管理等新模式。基于工业互联网平台加快制造业与科技、金融等领域的数据互联互通，深度挖掘跨界融合创新业务，发展工业电子商务、共享制造、现代供应链、产业链金融等新业态。

《财经国家周刊》：无论是工业互联网本身，还是工业互联网生态系统的建设，目前都还处于初级阶段。与消费互联网的快速发展不同，工业“触网”进程比较缓慢。主要原因是什么？

李颖：与消费互联网不同，工业互联网连接的是设备、产品，面向的是差异化的工业场景，消费互联网打造的通用服务模式并不适用高度专业化、价值化以及日益个性化的工业需求。企业拥抱工业互联网，还面临着不敢用、不会用、用不起的三个核心问题。

一是“不敢用”。我国工业互联网平台发展的基础支撑产业薄弱，50%左右的工业 PaaS 平台

采用国外开源架构，90% 以上的 CAD、CAE、PLM 高端工业软件市场被欧美企业垄断，工业机理模型和“杀手级”工业 APP 匮乏，导致平台解决方案数量、质量及安全可靠能力不足。同时，由于工业互联网平台相关的数据分级分类、流转交易等方面的标准或规范尚不健全，工业信息安全防护手段和机制不完善，导致企业普遍对于数据上云后的数据资产流失、数据安全风险存在顾虑，亟待进一步完善标准规范，确保平台安全可用。

二是“不会用”。与消费互联网不同，工业互联网平台解决方案在落地过程中需要投入大量二次开发和系统集成工作，难度超出企业预期。目前，由于特定细分行业的平台应用方法论仍处于构建完善阶段，大部分企业对于平台应用模式和路径尚缺乏掌控力。

三是“用不起”。特别是量大面广的中小企业在信息化方面投入能力不足。同时，由于缺少相对明确的工业互联网平台应用价值测算方法，部分企业对于工业互联网平台成效缺乏认知，平台建设投入举棋不定，制约着平

台的进一步推广普及。

四、鼓励争创工业互联网示范区

《财经国家周刊》：目前很多地方都把工业互联网作为推动高质量发展的战略选择，工信部对我国工业互联网的区域发展是如何布局的？

李颖：全国许多省市逐步建立起以工业互联网助力产业高质量发展的新格局，不断加强工业互联网平台建设应用的部省合作、区域合作、跨领域合作。在此基础上，一些发展较好的地方充分发挥基础资源丰富、领军企业带动力强、区域一体化合作水平高等独特优势，形成了多样化的工业互联网发展模式。

一是依托基础资源优势，打造工业互联网产业供给高地。例如北京、上海等地，充分利用工业互联网标识解析国家顶级节点等基础设施资源，新一代信息技术研发应用、人才供给等创新资源，以及多家重点跨行业跨领域工业互联网平台企业等服务资源，打造产业引领、开放合作的工业互联网创新发展高地。

二是以重点平台企业为引领，带动工业互联网产业协同发展。例如，青岛依托卡奥斯等工业互联网平台，构建领军企业输出、示范梯队跟进、业态创新突出的工业互联网发展模式。苏州则提出“工业互联网平台1+N战略”，培育一个跨行业、跨领域、具有国际水准的国家级工业互联网平台，以及一批行业级、区域级、企业级等多级本地合作伙伴。

三是发挥示范区集聚效应，加快工业互联网区域一体化发展。例如上海联合江苏、浙江、安徽等省份，协同推进长三角工业互联网一体化发展示范区建设，打造工业互联网创新驱动、融合应用的“生态区”，技术牵引、机制创新的“试验区”，聚焦痛点、精准发力的“攻坚区”，协同共促、先行先试的“样板区”，助力长三角地区先进制造业高质量发展。

总的来看，全国许多地方充分发挥自身优势，以多样化的发展模式，推动工业互联网发展取得了阶段性的进展和成效，这是值得认可和鼓励的。

《财经国家周刊》：工信部提出“促进工业互联网区域协同

发展”，引导和支持长三角等地区创建工业互联网示范区。工业互联网示范区建设有何具体规划和要求？

李颖：工信部正在积极引导各地方建设工业互联网示范区，目的是调动各地方特别是先发地区的积极性，支持他们发挥先发优势，在创新体制机制、突破区域阻隔、激发数据活力、深化信息技术应用创新和培育新模式新业态等方面开展先行先试，打造一批产业优势互补、协同效应显著、辐射带动能力强劲的工业互联网发展高地。

下一步将开展以下几项工作：一是研究制定关于工业互联网示范区的建设指南，明确申请、建设、管理等流程，加强对工业互联网示范区的管理。二是进一步推动工业互联网示范区的建设，鼓励有条件的地区先行先试、系统推进，按照“质量为先、总量控制、宁缺毋滥”的原则，建设高水平、高质量的工业互联网示范区。三是提升工业互联网创新发展能力，形成一批可复制可推广的发展经验，突出示范区的创新引领作用，发挥辐射带动作用，推动区域协同发展。MT

振兴人机交互 促进社会进步



德国工程院

【编者按】本报告由德国工程院今年5月发布，主要探讨在德国和日本人口老龄化前提下如何通过振兴人机交互来缓解这一问题，进而解决工业生产人力资源日趋老化、后备不足的问题。报告认为人机交互的新方法和解决方案，将对社会持续发展产生巨大影响。本刊全文翻译刊登，为国内学者专家提供参考。

前言

“工业4.0”是为了应对2009年全球经济危机及其深远的经济社会影响而提出的。其目的是利用第二次数字化浪潮的机会，提高产品、工艺和组织结构的适应能力，从而确保经济活动的竞争力和韧性。

此外，“工业4.0”谋求建立一个可持续的增长阶段，旨在解决各种生态问题（如循环经济）、社会问题（如工作的未来），并应对这些问题所带来的经济影响。当然，第四次工业革命的变

革过程首先必须为每位用户和公民创造具体的效益。由于自然智能和人工智能（AI）之间的相互影响不断加深，人机交互（HMI）技术在这一过程中将起到核心和关键的作用。

2016年，德国国家工程院在《冲击》系列《人机交互的创新潜力》一文中已经阐明：“人机交互技术的重点正在转向人类用户”。因此，我们很乐于采纳日本伙伴的建议，在解决社会问题的背景下审视人机交互技术。

日本和德国正面临着相似的社会问题（如人口老龄化、技能短缺等），但由于社会趋势不同，

而且解决问题时存在文化层面上的差异，因而两国的解决方案也不尽相同。我们必须理解这些差异并加以分析。

本文的一个重要成果是指明并强调德、日两国在人机交互背景下人机交互具体观点的异同，以确定未来德、日两国举措的共同合作领域。

Henning Kagermann 博士、教授，
项目负责人

德国国家工程院（acatech）董
事会主席、前院长

“工业4.0平台”的全球代表
兼顾问

人类想要建设可持续发展的社会，但面临着一些全球性的挑战，包括资源枯竭、环境问题、出生率下降和人口老龄化等问题。日本也很关注这些问题，这是因为日本正感受着这些社会发展问题所带来的现实冲击，例如，由于操作失误和 / 或机器老化而导致的制造事故。

在第四次工业革命的时代，我们觉得仅仅界定这些问题以及它们对当今社会和未来社会的影响是远远不够的。许多著作倾向于引入新技术，如人工智能(AI)、软件定义控制(SDC)、5G通信等，但它们并不是从社会学和组织结构的角来关注这些挑战和政策的。德、日两国同仁聚在一起开展这个项目，就是想改变这一点。

为此，本文根据德、日两国发布的案例研究中的定量研究和假设，重点探讨相关的挑战和政策。关于如何把握这一问题，德、日两国的观点既有相似之处，也存在不同，感受这种异同对我们而言是非常宝贵的经验。即便我们有着相同的目标，但德、日两国的历史背景和社会结构不同，这会影响各自所采用的方法。

我们希望这篇报告有助于深入了解我们面临的日常问题所产生的社会影响，愿我们的日常活动能为建立一个可持续发展的社会做出更积极的贡献。

Youichi Nonaka 博士，项目联合负责人

日立公司研发部生产工程——技术创新中心资深首席研究员“机器人革命与工业物联网计划”成员

执行摘要

在德国、日本这样的国家，社会劳动力成熟，而机器和基础设施不断老化，这可能会引发各种社会问题。为了解决这些问题，维持较高的制造效率，建立一个可持续发展的社会，这些国家越来越多地转向发展数字化技术，例如信息物理系统(CPS)、人工智能和机器人技术。这些新一代的增长引擎得到了德国的“工业 4.0”和日本的“社会 5.0”等各种创新计划的资助。

在数字化社会，与机器的交互越来越像是与人在交互。因此，人与机器之间的差距正在不断缩小。在当今的技术发展中，这种变革性的力量被应用于生活的方方面面，并对人机交互产生了深远的影响。常规工作流程和就业条件也受到了影响。本文针对日本和德国如何应对这些变化，就一些特别的问题进行了探讨：

- 未来工作（以及工作场所）将会如何发展？
- 企业需要如何发展其员工队伍？
- 企业需要如何发展其组织结构及工作流程？

为回答这些问题，本报告结

构如下：

第一部分首先以简短的引言，介绍了本文的背景和重点。

第二部分指出了智能制造方面的新问题，特别是通过参考德国与日本的社会边界条件以及环境。

第三部分探讨了未来在“工业 4.0”背景下工作的方式，以及就业、工作方式和人力资源发展等方面的社会问题。本部分还给出了劳动力人口、质量和生产率方面的统计数据，同时预估了德国和日本的劳动力结构变化。

第四部分阐释了在不久的将来，人类和机器的多样性预计都会增加，并提出了在产品和服务的整个生命周期中实现可持续创新的解决策略。在这一背景下，本部分探讨了因多样性而产生的差距，并讨论了管理现实世界和网络世界时面临的机遇和挑战。本章还指出了具有多样性的可持续创新，并借鉴了具体国家的案例研究。

第五部分着重讨论了智能制造背景下的人机协作及其对未来制造业的影响。潜在的解决方案可能会催生新的互动方式。此外，人与自学习机器的融合也要求操作与管理具有灵活性和适应性。这可能会创造出更好、更令人满意的工作。

最后，本文在第六部分给出了结论。

总的来说，人们期望利用数

数字化技术来解决某些社会难题。然而，以前由人来完成的某些常规性认知任务，未来将由数字化技术来完成，因此社会也需要转型，来适应这种变化。从本质上讲，要想建立一个可持续发展的社会，人类必须不断创造高附加值的工作，并且能够随时从可能过时的工作转向高附加值的工作。同时，机器不仅要完成一些低附加值的工作，而且还要与人互动，从而形成一种创造高附加值工作的机制。根据这些要求，数字化转型将形成一种新型的以人为中心的制造系统，在这样的系统中，人需要关注的是终生技能的提高，并不断创造高附加值的工作。从本质上说，这样的系统振兴了人机交互，使人和机器均能在共同塑造数字化社会时发挥作用。

最终，我们应该增强公众对数字化社会的兴趣，分享从人机交互中获得的知识，努力构建一个关注人类福祉的可持续发展社会。我们鼓励普通大众共同考虑和讨论未来社会的场景以及所应采取的行动。

德、日两国的这一合作项目有其价值，它考虑到了两国在处理眼下各种问题时的异同。尽管两国的目标相似，但两国的历史背景和社会结构存在差异，这会影响到它们解决问题时采取的方法以及关注的领域。最后，我们鼓励开展多国开放性讨论，为

建立一个可持续发展的社会而努力。

1. 引言

迄今为止发生了3次工业革命，每次工业革命都加快了全球化进程，为了就业，许多人跨过了国家和地区边界。德国人和日本人乐于异地安家，这是两国经济能够快速增长的基础。当儿童（0至14岁）在总人口中的比例低于30%，而老年（65岁及以上）人口占比不到15%时，一个经济体有望迅猛增长。这种增长潜力期被称为“人口机会窗口”。根据国家情报委员会（National Intelligence Council）（2012年）的数据，德国的窗口期始于1950年之前，结束于1990年；日本的窗口期是从1965年至1995年；美国的窗口期是从1970年至2015年；中国的窗口期是从1990年至2025年。这些数据表明，德国和日本等发达国家目前正处于后窗口期。我们需要的是一个不依赖于窗口期的经济增长刺激因素。实际上，这类社会所面临的问题可能会导致社会劳动力成熟、而机器与基础设施老化等方面的各种社会难题。此外在老龄化社会，由于视力下降、反应速度变慢、体力变弱，生产率将会下降。以日本为例，由于操作失误和/或机器老化，事故越来越

频繁。

为了解决这些问题，维持较高效率，建立可持续发展的社会，这些国家正在转向发展数字化技术，如信息物理系统、人工智能和机器人技术。这些新一代的增长引擎得到了德国的“工业4.0”和日本的“社会5.0”等各种创新计划的资助。这两项计划的目的是解决各种社会问题和刺激经济增长，最终目标是整合网络空间与物理空间，建立一个以人为中心的社会，以实现联合国可持续发展目标（SDGs）。数字化程度的提高，也伴随着能耗的增加，因此社会的可持续发展也必须考虑到相关的环境后果（如二氧化碳排放）。

本文关注的是员工的老龄化、出生率的不断下降以及年轻工人的技能问题，以及由此给未来工厂带来的挑战。通过讨论，希望明确如何界定这些问题，以及人机交互领域的哪些新方法有助于实现可持续发展社会的目标。在与机器的交互中，人的行为和个人能力往往受限于基于标准化机器接口的传统结构和系统。在人与机器都发生了质变的背景下，我们假设需要定义一种新的人机共存模式，其中涉及到不同的人群，既有老年人，也有年轻人，还有残疾人，不同文化背景的人；既有旧机器，也有新机器，甚至不同规格的机器。此外，

还需要开发新的战略和技术来协调和振兴人机交互技术。

本项研究旨在通过德、日两国科学界和工业界各方的合作，解决这些问题，提出若干讨论方向，并从这两国的角度提出解决问题的差异化方法。

2. 智能制造领域的新问题

目前，没有任何技术发展像数字化进程那样改变着我们的生活和思维方式。这一现象正在影响整个经济活动以及我们的工作方式。

“工业 4.0”一词包含了生产领域中一些由技术所引起的、影响深远的变革。信息物理系统（传感器、执行器）的引入，实现了单一组件和整个生产系统的全面（相互）连接。结果，人们不仅可以利用传统生产流程中的优化潜力，还可以实现灵活的增值网络和创新性的商业模式。人工智能，特别是机器学习（ML），进一步加快了这一变革进程。

这是一个影响深远的、颠覆性的变革过程，将深刻影响我们与周围机器的关系，尽管如此，今天我们尚处于这一进程的初期。这一变革的核心是，机器必须服务于人类和社会。人机交互技术的中心正在转向人类用户，具有学习能力的机器（以及自主学习机器）越来越能适应用户个人

能力、用户任务以及用户需求，而不再要求用户固守一成不变且固定的控制方案。

因此，与机器的交互变得越来越像是与人进行交流。因而，人与机器之间的差距正在永久性地缩小。其实，我们每个人已经接触了人机交互技术，甚至是在我们的私人生活中。日常生活中，与技术设备的交互无处不在，助听器、可穿戴式传感器和协作机器人就是几个典型例子。

然而，预计当前技术发展的变革性力量会被应用于生活的方方面面，特别是人工智能领域的发展，以及人机交互技术的创新性概念及应用。为以往类似的（生产）设施或系统增加集成式处理和通信功能，将会影响技术系统与机器（M2M）之间的交互。此外，它还会对人类与技术之间的互动产生重大影响。这反过来又会影响员工的一般工作流程和工作条件。

所有这些结果在很大程度上取决于社会边界条件和环境。本项研究描绘了日本和德国的情况，配以各种各样的实例和案例研究，以说明这两个社会是如何面对即将到来的变革的。

接下来的一部分，我们将探讨以下问题，并看看日本和德国是如何应对这些问题的：

- 未来工作（和工作场所）将会如何发展？
- 企业需要如何发展其员工

队伍？

- 企业需要如何发展他们的组织结构及工作流程？

3. 工作的未来

在德国，“工业 4.0”中的工作方法被称为“劳动 4.0”或“工作 4.0”。这里考虑了数字化和其他趋势，比如全球化、人口统计数据、文化和社会变革，包括培训和共同决议制等多个方面。各社会参与方，如工作委员会或工会以及企业管理层，已经意识到未来的工作方式对员工、协作方式、企业组织架构都有着重大影响。数字化转型的结果是，员工在工作 and 协作方式上面临着重大变革，其中既包括与人的协作，也包括与机器的协作。此外，它还会影响到工作质量、工作满意度、身体健康和工作技能。

因此，本部分将重点放在就业、工作方法和人力资源开发等社会问题上。我们给出了劳动力人口、质量和生产率方面的统计数据，并预测了劳动力结构方面发生的变化。

3.1 人口变化、劳动力市场、生产率和工作质量

与世界平均水平相比，日本和德国的总体生育率较低（见表 1），两国人口正在快速下降，导致了社会进入老龄化阶段。目

前，工作人口数量已经开始减少。始，德国的人口增长率就呈现出我们观察到如下原因：较低水平甚至是负增长。

- 从 20 世纪 70 年代早期开
- 日本是世界上第一个 64 岁

以上人口占比超过 20% 的国家。

- 德、日两国都在学习如何应对相关的社会挑战。

- 德国与日本之间有一点不同，就是移民背景。

在德国，23% 以上的人口具有移民背景，而日本的这一数据不到总人口的 2%。

总体而言，数字化转型的过程从根本上改变了社会。但根据经济合作与发展组织（OECD，下文简称经合组织）发布的经济展望，过去几年中，大多数经合组织国家的劳动生产率总体增长率是下降的。德国和日本两国便略有下降（见图 1）。

造成生产率下降的原因有很多且相互关联，特别是金融危机的影响，金融危机后全球经济复苏缓慢。

表 1：一些主要国家的人口变化（来源：Atkinson2019 年的文章，第 24 页）

国别	人口（单位：千人）		
	2016	2060	增减率（%）
美国	322,180	403,504	25.2
中国	1,403,500	1,276,757	-9.0
日本	127,749	86,737	-32.1
德国	81,915	71,391	-12.8
英国	65,789	77,255	17.4
法国	64,721	72,061	11.3
印度	1,324,171	1,745,182	31.8
意大利	59,430	54,387	-8.5
巴西	207,653	236,014	13.7
加拿大	36,290	45,534	25.5
韩国	50,792	47,926	-5.6
俄罗斯	143,965	124,604	-13.4
澳大利亚	24,126	35,780	48.3
西班牙	46,348	43,114	-7.0
墨西哥	127,540	166,111	30.2
全世界	7,466,964	10,165,231	36.1

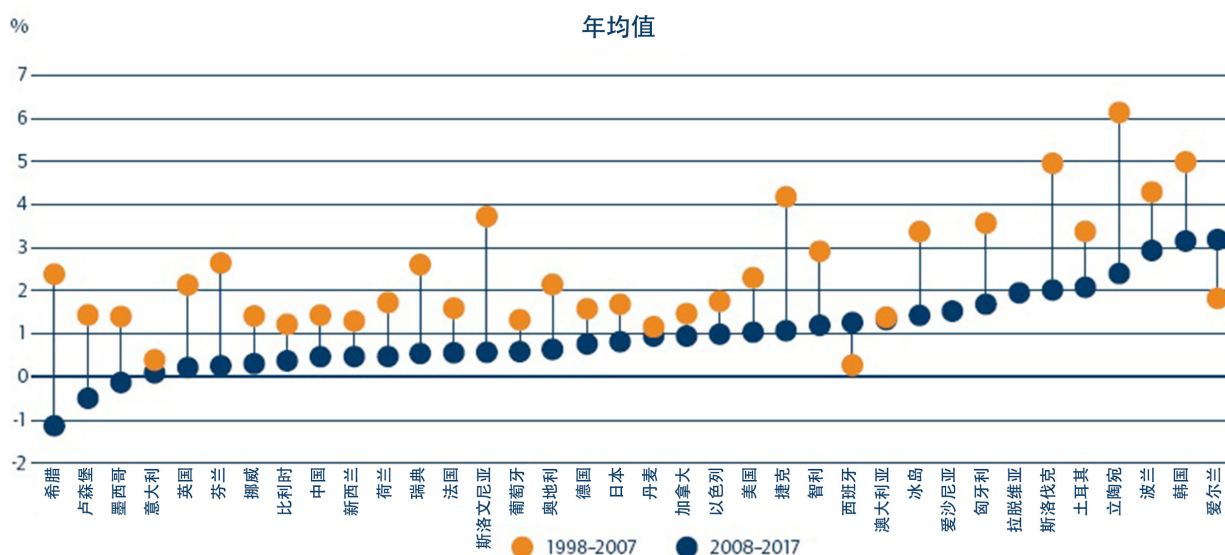


图 1 经合组织各国的劳动生产率增长数据（来源：经合组织 2019 年的文章，第 57 页）

图2显示了制造业单位劳动力成本的全球排名。该比较性指数（德国标准为100）表明德国的单位劳动力成本较高；而日本的此类成本在2016年比德国大约低了18%。即使德国的生产力水平较高，也无法完全弥补单位劳动力成本高的缺陷，这可能会对竞争力造成不利影响。在日元弱势、其他国家的技术不断进步的时代，日本制造业的生产率在衰落，从全球视角来观察，其地位也在稳步下滑。

表2为人力资源质量排名情况，日本排名第4，德国排第11名。

1. 变革及自动化的风险

根据经合组织Arntz等人的结论，2016年的工人面临两种风险：“任务转变”会带来50%~70%的风险，而“任务自动化”会带来70%~100%的风险。Nedelkoska和Quintini于2018年发布了对经合组织国家发生此类风险的最新估算数据（图3）。

德国劳动力的16%，日本劳动力的13%，美国劳动力的9%，面临着70%~100%的替代风险，而经合组织国家平均为14%。

这一估算数据得到了全世界专家的认可。

至于日本，根据日本总务省（Japanese Ministry of General Affairs）《2017年劳动力调查》的数据，日本劳动力人数为6720万人。这意味着有870万名工人面临着被替代的风险（计算： $6720 \text{万} \times 0.13 = 870 \text{万}$ ）。

2016年的制造业，德国为标准值100

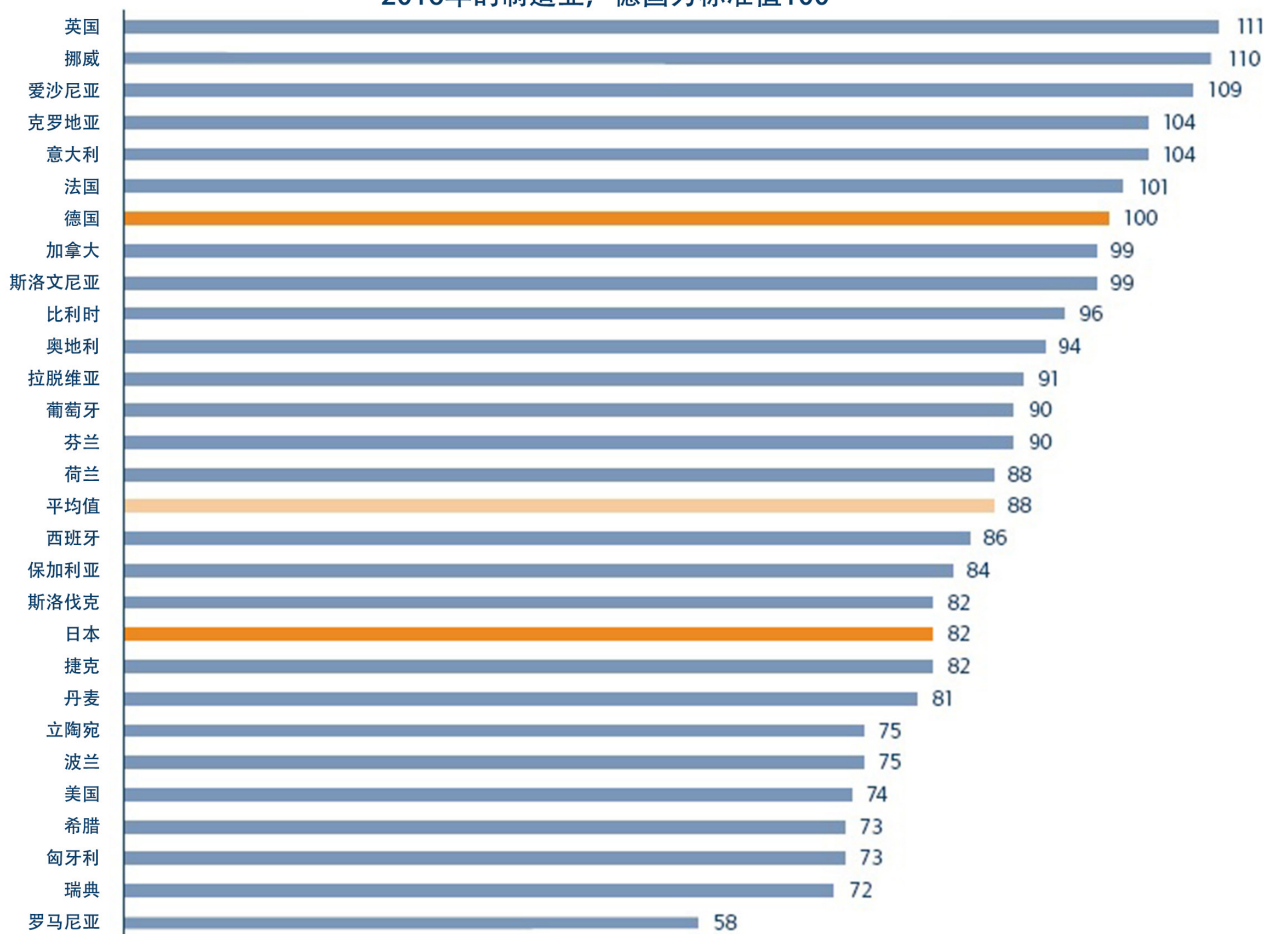


图2 制造业单位劳动力成本的国际比较（来源：Schröder2017年的文章，第78页）

表 2: 人力资源质量
(来源 Atkinson 2019 年的文章, 第 80 页)

排名	国别	分值
1	芬兰	85.86
2	挪威	84.54
3	瑞士	84.51
4	日本	83.44
5	瑞典	83.29
6	新西兰	82.79
7	丹麦	82.47
8	荷兰	82.18
9	加拿大	81.95
10	比利时	81.59
11	德国	81.56
12	奥地利	81.52
13	新加坡	80.94
14	爱尔兰	80.79
15	爱沙尼亚	80.63
16	斯洛文尼亚	80.33
17	法国	80.32
18	澳大利亚	80.08
19	英国	80.04
20	冰岛	79.74
24	美国	78.86
32	韩国	76.89
34	意大利	75.85
44	希腊	73.64
45	西班牙	72.79

德国和日本需要提高国民的技能, 从而提高劳动生产率。在此背景下, 德、日两国可以通过数字化提高工人的技能, 从而排除人口减少、劳动力结构不断发生变化的影响, 确保产业竞争力。

为了实现高效的可持续增长, 必须提高创新水平和投资水平。

数字化有助于为潜在员工创造更多高附加值的工作, 并提高行业本身的价值。人可以将更适于机器完成的任务分配给机器, 从而释放人的创造力和人力资本。

社会需要支持这种变革, 使人和机器能够和谐地共同发展。人们需要深入思考这样的工作环境应该是什么样子。下列案例研究描述了德、日两国的劳动力结

构现状, 以及所需的技能变化。

2. 日本案例研究: 信息通信技术 (ICT) 投资的经济差异——来自美国研究的启示

美国麻省理工学院 (MIT) 的 David H. Autor 教授揭示了导致就业领域发生结构性改变的机制和过程。对信息通信技术 (ICT, 见图 4) 的积极投资促发了机器取代工人的过程, 并造成了经济差距。日本未开展比较分析, 但就业领域发生结构性改变背后的机制和过程, 以及机器替代人的过程, 被认为与美国的情况几乎一样。这项研究是“工作的未来”系列研究中最重要成果, 并对后续的许多研究产生了重大影响。

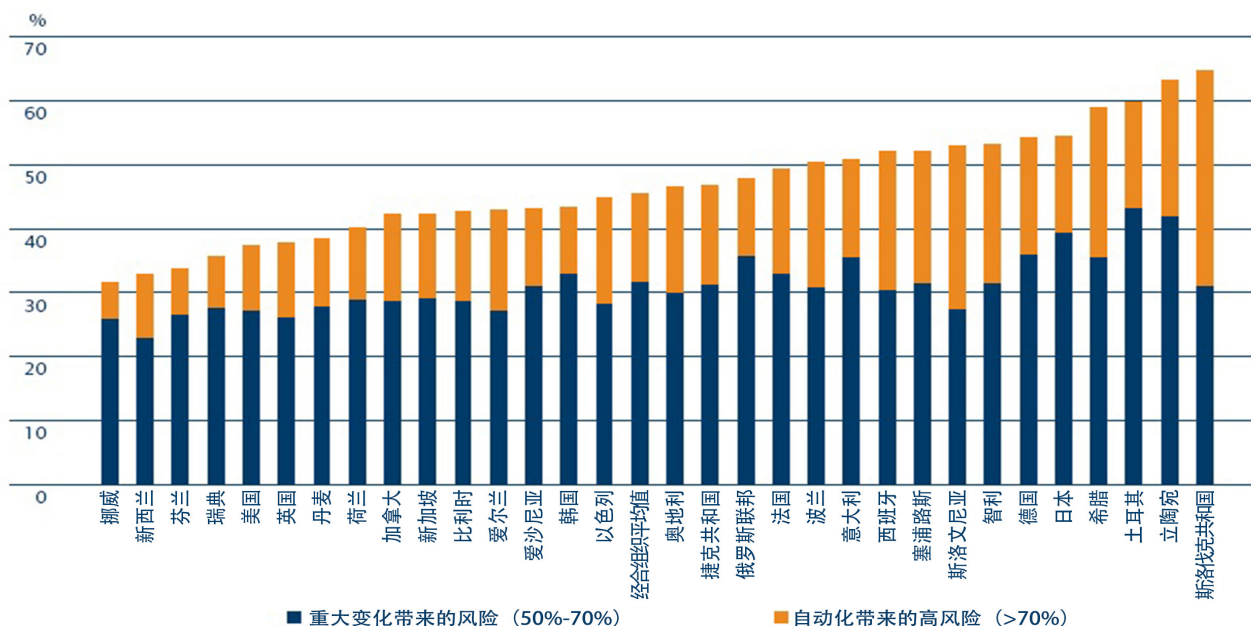


图 3: 工作自动化的国别差异, 按风险程度划分的高风险工作的百分比
(来源: Nedelkoska/Quintini 2018 年的文章, 第 49 页)

Autor 解释说，积极的信息通信技术投资在 13 年前就已经对就业结构产生了影响，使其发生变化。常规性认知任务已被计算机取代。未来，同样的现象将在方方面面不断出现。即便某些常规性认知任务的难度很高，甚至是人类也需要多年的培训才能学会掌握，但它们也可以根据逻辑进行编程。（注：在学术上，常规性任务可分为认知任务和手动任务。计算机正在取代前者，

后者将被机器人取代）。

在美国，由于信息通信技术方面的投资，拥有中等技能职业的员工被计算机取代。失业的威胁正在向高技能职位蔓延。

随着无经验工人的数量不断增长，对信息通信技术的投资将加快对工人替代的速度。高技能工人的数量将持续增长，但增长速度较低。可以作如下分析：随着技术的进步，各企业对高技能工人的需求迅速增长，而劳动力

市场上满足这些企业需求的高技能工人的供应量却在减少。由于高技能工人的数量减少，因此其薪酬就会增加。大多数失去工作的中等技能工人会转而从事低技能工作。然而，低技能工作岗位的总量保持不变，因此，其工资继续保持在较低水平，就业状况变得不稳定。

Autor 还解释说，“自动化也补充了劳动力，提高了产出，并导致对劳动力的需求加大，自

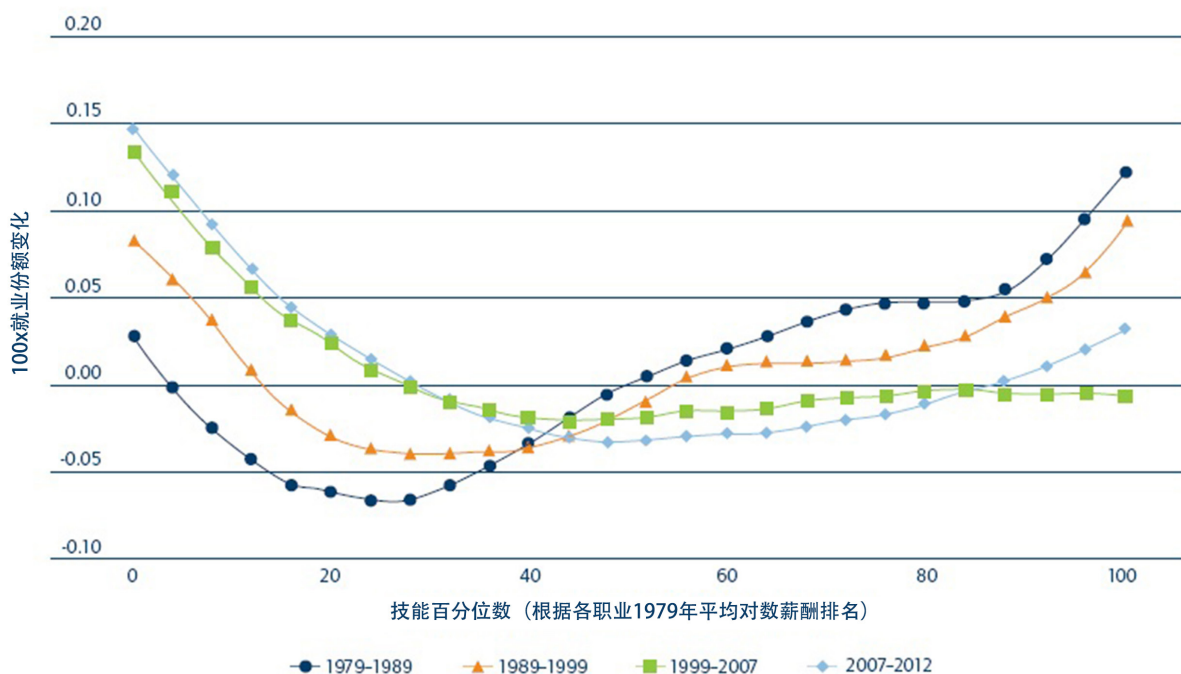


图 4：由职业技能百分比表示的 1979–2012 年平滑就业变化（来源：Autor2015 年的文章，第 20 页）

数据：2015 年 Autor 使用 1980 年、1990 年和 2000 年的人口普查世界人口微观共享数据库（IPUMS）计算得出。

Autor 对“技能百分位”的定义如下：该图使用局部加权平滑回归（带宽 0.8, 100 个观察值）根据“技能百分位”排名绘制，其中“技能百分位”是基于 1980 年的人口普查世界人口微观共享数据库 5% 抽取样本对各职业的平均对数薪酬进行就业加权百分位排名得出的。样本包括工作年龄（15–64 岁）内的非制度化平民人口，每年工作 48 周以上，每周正常工作 35 小时以上。周薪按年收入除以工作周数计算。在下文中，我们用“低技能”或“无经验”来表示技能百分位较低的情况，依此类推。

动化还与劳动力供应方面的调整相互影响”。他认为，劳动力市场的两极分化“在可预见的未来不可能持续很久”。

3. 德国案例研究：“就业的未来”

2013 年，Frey 和 Osborne 在其著名的研究“就业的未来”中得出结论，在美国，日常任务将由机器替代人来完成。而且，他们还估计，美国总就业量中的 47% 已经处于 >70% 的风险类别，这意味着十几年后这些岗位可能实现自动化。Frey 和 Osborne 的研究结果有两点需要注意：首先是指出了技术上的可能性。例如，即使自动驾驶在技术上可以实现，要替换美国所有的职业司机也需要几十年的时间。尽管如此，这类案例也被看作是机器可能替代人的情况。其次，没有考虑新兴产业所创造的新就业机会。Frey 和 Osborne 还计算了目前有工作、未来可能失去工作的工人数量，并将基于计算结果得出的数据纳入估算数据中。他们没有考虑未来新兴产业将会创造的新岗位的数据。

Frey 和 Osborne 的估计刚刚公布，德国政府的劳动和社会事务部就启动了“劳动 4.0”或称“工作 4.0”。他们委托莱布尼茨欧洲经济研究中心（ZEW）来完成这项分析。其论文指出，截

至 2015 年 6 月，德国的风险指数为 12%。美国的风险指数为 9%，而 Frey 和 Osborne 得出的风险指数为 47%。之所以存在这种差异，原因在于双方采用的估算方法不同。

欧洲经济研究中心对工作和任务加以区分，将工作分解为一系列任务。他们认为机器所完成的任务份额将是逐步增长的，到最后，一项原本由人完成的工作可能由机器取而代之。Frey 和 Osborne 的估测方法与之不同，他们假设一项人类工作会在某单一阶段由机器取代人来完成，这被认为是高估的情况。

德国弗劳恩霍夫协会工业工程研究所（Fraunhofer IAO）对于机器代替人的过程进行了详细的研究分析。首先，该研究所调查了多家德国企业，但发现不存在一致性。其次，该研究所调查了德国各个企业的趋势，发现存在如下的一致性：

（1）机器是用来帮助人的。

（2）企业为员工提供技能培训，员工将努力增强自身的技能。然而，随着技术的飞速发展，一些企业为了降低成本，将用机器代替人。

（3）在最后阶段，员工和企业都不再尝试提高员工技能。

4. 日本案例研究：就业的未来

目前已经出现了一种现象，就是将一系列任务分解为由机器

执行的任务和由人类执行的任务。随着这种分解的深入，人类收到的任务都是些必须由人来完成的任务。这类任务通常非常精细，是非常规性任务，需要创造性。因此，人类需要掌握更高的技能。几年来，AI 工程师一直在开发技术来进行一些具有艺术性、文化性和感性的活动，这类活动被认为是人类创造力的产物。但仔细观察这些活动，我们发现它们包含许多常规性的（认知和手动）任务。

随着技术的进步，机器已经能够承担一些以往只能由人来完成的常规性的（手动）任务、体力劳动和苦工。这就是技术发展的历史，未来还会延续。为了应对这些变化，人类必须终生进行自我培训。

日本经济产业研究所（RIETI）高级研究员 K. Iwamoto 对一些日本企业进行了多次采访，就机器取代人类的过程提出了以下假设：

（1）第一阶段，由机器代替人来完成一些人类不愿做的艰苦劳动。使用机器的目的是为了帮助人，人们受此激励而去创造更好的机器。

（2）随着使用的机器越来越多，人们需要从事技能水平更高的工作，各企业也要在人力资源开发方面增加投资。

（3）机器使用率不断提高，管理层开始更换人手，企业裁员。

(4) 最终, 所有的人都被机器取代。

从全球视角来看, 根据麦肯锡全球研究院 (McKinsey Global Institute) 2017 年的估测数据, 到 2030 年, 将有 4 亿~8 亿个工作岗位实现自动化, 有 7500 万~3.75 亿名工人 (占全球劳动力的 3%~14%) 需要重新进行培训, 或者学习从事新工作, 掌握一项新技能。

日本经济产业研究所的假设与德国弗劳恩霍夫协会工业工程研究所的研究结果都从日本和德国的角度分别建立了机器替代人的发展过程, 而且二者过程相似。

总的来说, 这项关于未来就业形势的研究和分析基于如下三点:

(1) 随着技术的进步, 甚至需要更高技巧的常规性认知任务, 都将被机器取代。

(2) 低技能工人的数量将会继续增加。如果他们提高技能的速度赶不上机器性能提高的速度, 那么他们很可能被机器所取代。因此, 我们必须为的人和机器设计一些协调一致的系

统, 让机器来协助无经验的工人加快提高其技能的速度, 跟上机器的进度。这将形成人与机器同步发展的局面。

(3) 高技能工人的数量将继续增加, 企业对高技能工人的需求也将增加。如果需求量超过了高技能工人的供给量, 则高技

能工人与低技能工人之间的薪酬差距将不断扩大。

3.2 对数字化转型所引发的劳动力结构变化的估计

世界各国的专家测定了常规性任务的占比。De la Rica 和 Gortazar 于 2016 年发布了经合组织国家例常性任务强度 (RTI) 方面的结果。

RTI 定义为:

$$RTI_i = R_i - A_i - M_i$$

其中 R_i 、 A_i 、 M_i 分别对应于常规性任务 (包括认知方面和手动方面的常规性任务) 指数、抽象任务 (包括认知方面和人际方面的非常规性任务) 指数和手动任务 (非常规性的手动任务) 指数。 RTI 衡量了各国在去常规性任务进程中所处的阶段。举例说, 美国是一个去常规性任务程度很高的国家 ($RTI=-0.39$)。德国的 $RTI=-0.12$, 与其他中欧国家相似, 是一个中等的去常规性任务的国家。而日本的 $RTI=0.26$, 属于去常规性任务程度较低的国家。

最严重的问题是那些即使经过一系列再培训和再学习过程后仍不能或者不愿提高技能的低技能工人, 他们怎么办。德国和日本都在寻求能够被社会所接受的办法来解决这一问题。

1. 德国案例研究: 可能被替代的部分劳动力

对欧洲宏观经济劳动力市场所做的多项研究中也采用了部分劳动力可能被机器所替代的假设, 所得出的结论认为, 由于新活动不可能在短期内补偿被替代的就业岗位, 因此就业率将会下降。

类似的结论在德国也是成立的。如果完成某任务所需的知识水平较高, 则被替代的风险通常会降低。图 5 显示了哪些需求水平的人员最有可能被技术系统替代。从 2013 年至 2016 年, 高需求水平和低需求水平之间的差距变得更大。

各种研究还预测, 某些需要较高创造力与交互能力的高素质非常规性工作也存在被替代的风险, 至少从短期来看是如此。不仅仅工业部门的车间中有这样的工作岗位, 行政、开发和管理部门中也有类似的工作岗位。甚至有些人预测德国就业人数可能减少近 60% (减少的主要是常规性工作岗位)。按行业划分, 对可能发生机器替代人的情况进行估测, 其结果概况见图 6。同样, 可以看到, 受到影响的不仅是“工业 4.0”中的制造业, 还有服务业。

数字化转型将使企业能够更快、更精准地对不断变化的客户需求 and 新的市场条件做出反应。众所周知, 在全球竞争背景下要想取得成功, 快速实施基于数据的商业模式至关重要, 而且组织机构及员工要具有高度的灵活性

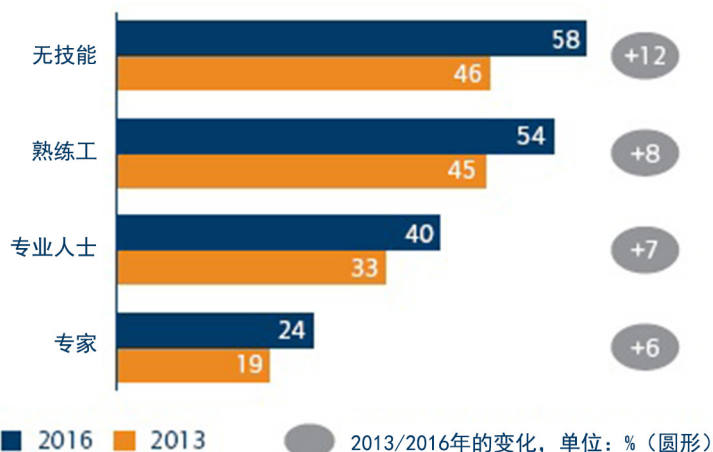


图5 2013-2016年按所需知识水平划分德国可能发生的机器替代人的情况（单位：%）（来源：Dengler/Matthes2018年的文章，第1页）

和适应性，要有变革的意愿。成功引入“工业4.0”的关键因素包括员工接受新技术，此外还要设计有吸引力的工作形式。

同时，更高的灵活度反过来也为员工创造了机会，使他们能够在更高层次上实现工作与生活的平衡，而且通过个性化的再学习和技能提升措施，其长期就业能力也得到了保障。在这种情况下，员工在整个职业生涯中的学习（和再培训）能力是确保其未来就业能力的关键（终生学习）。企业有义务提供相应的教育和培训，显然员工将受益于这些措施。

存在机器替代人风险的不仅仅是对资质要求不高的常规性工作和任务，下面的日本案例研究就介绍了人工智能在日本医疗领域的应用。

2. 日本案例研究：人工智能在医疗领域的应用

此案例研究出自日本医学会学术促进会的第9届学术促进会报告，介绍了人工智能在医院中的应用。人工智能可以“学习”全世界的治疗结果，并就患者的治疗向医生提出建议。人工智能的作用是为人类“提供建议”，由人类负责最终评估。

该报告指出，日本的人口老龄化程度空前，可以利用人工智能技术引领尖端的医疗保健，为世界做出贡献。进一步的报告显示，医生采用人工智能技术后，误诊率下降了85%。在2016年转移性乳腺癌诊断挑战赛（Camelyon大挑战赛）中，人工智能技术的误诊率为7.5%，病理学家的误诊率为3.5%。而通过人工智能技术和病理学家的合作，误诊率降低为0.5%。

该报告还解释说，“即使开发出了独特的人工智能技术，在其有效性和安全性得到充分保障

前，也不应将其投入实际应用。尤其是医疗领域关系到人的生命安全，确保有效性和安全性是至关重要的。无论人工智能的技能有多么高超，医生仍然是必要的。但是医生的工作内容可能会发生深刻变化。”报告中，岛根大学（Shimane University）的Tsumoto教授指出，当人工智能支持某项医疗业务时，该项业务自身就会发生相应的变化。

在工厂，也存在同样的情况，人工智能技术提供“建议”，由人做出最终的评估。此类场景可以在人工智能和人类之间建立良好的关系。

当上述的人工智能或机器人取代人完成的是“需要较高技能的常规性认知任务”时，社会上的经济差距将会扩大。这将造成低技术、低收入劳动力市场中的雇员总量上升，工资停滞，就业不稳定。当中等技能雇员的工作岗位流失，使他们流入低技能岗位，而低技能工作岗位的总量保持不变时，就会发生这种情况。从事低技能职业的员工数量一直在不断增加，而且呈加速趋势。

3. 日本案例研究：可能被替代的部分劳动力

至于日本，日本政府内阁府2018年发布了一份《经济财政白皮书》，其中包括2018年2月开展的一次企业调查的结果。根

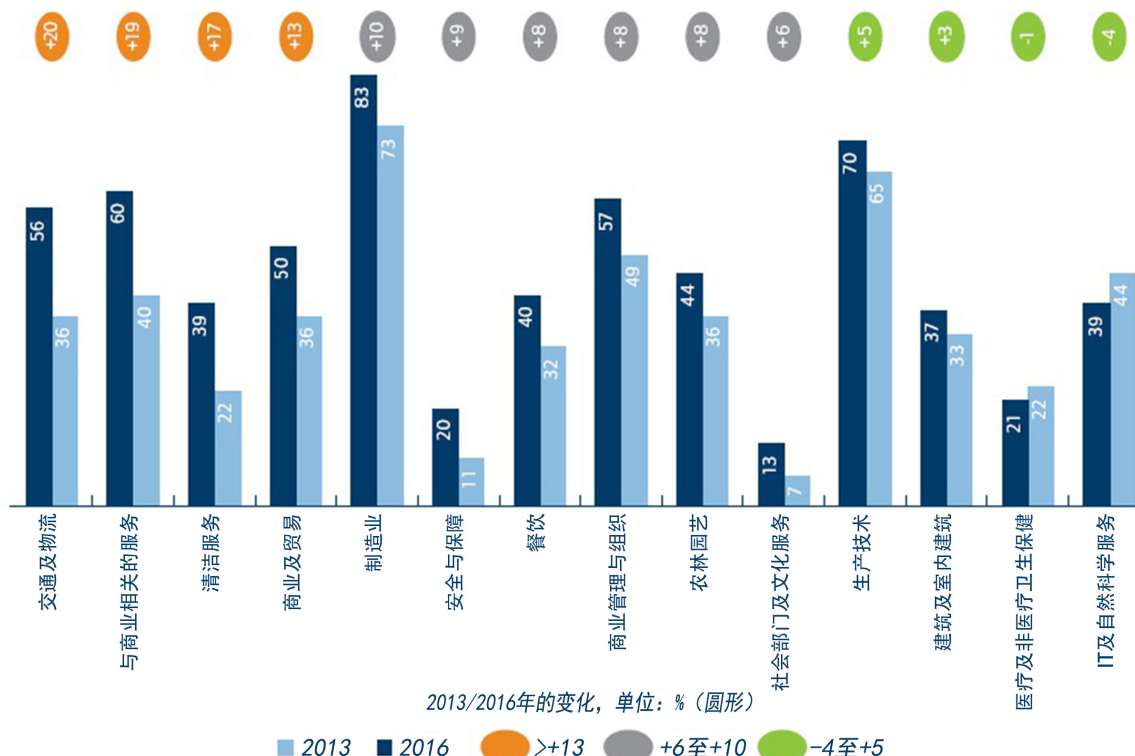


图6 2013-2016年按行业划分德国可能发生的机器替代人的情况（单位：%）
（来源：Dengler/Matthes2018年的文章，第6页）

据这份白皮书，随着物联网和人工智能技术的引入，某些工作岗位将会增加或减少（见图7）。

图8给出了企业预期将被人工智能技术取代的职业。随着物联网和人工智能技术的发展，日本企业的管理层预计，工厂的技术工人将会减少，仅次于办公室职员。

根据日本的基尼系数，到目前为止，各发达国家的发展趋势中，经济差距随时间的变化一直比较小。但随着RPA（机器人流程自动化）的全面普及，经济差距有可能迅速扩大。

4. 日本案例研究：办公室工作人员所需技能的变化

目前，一些日本企业正在利用机器人流程自动化技术来完成管理职能中的常规性认知任务。特别是，银行金融业受到的影响最大。根据三家大银行最近发布的新闻公告，信息通信技术方面的投资预计将导致约3万个职位被撤消。执行常规性认知任务的人既有正式员工也有非正式员工，主要是从事文书工作。随着机器人流程自动化技术的发展，

日本企业可能会通过人事调整的方式留下正式员工，而非正式员工将被解雇。

2019年春季应届毕业生招聘统计数据表明，银行大幅减少了文员岗位的正式员工招聘数量。

除了银行金融业，地方政府也在积极实施机器人流程自动化。地方政府有些常规性认知任务涉及到规定的格式，其中许多可以采用机器人流程自动化技术替代完成。由于预算不足，地方政府迫切需要削减薪酬支出。

日本制造业企业也开始采用机器人流程自动化技术。例

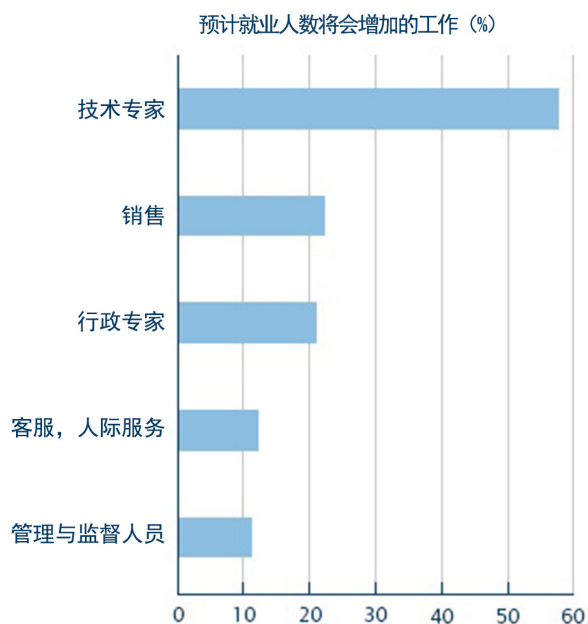


图 7 预计随着人工智能和物联网的实施推进而出现的就业人数增减情况
(来源: 内阁府 2018 年的文章, 第 141 页)

* 行政人员是指调查分析或法律等方面的人员。技术专家是指从事研发、系统设计等工作的人员。关于行政专家/行政人员和客服/人际服务, 各企业的预期有增有减。因此, 这些类别出现在两个表中。

如, 配电盘制造商日东 (Nitto Denki) 电气公司, 共有 150 名员工, 它将机器人流程自动化技术引入到设计图的印刷流程, 此任务原来是由设计工程师完成的, 引入机器人流程自动化技术后每个月可以节省 20 小时的印刷时间。此例子说明, 即使是制造企业, 它的某些常规性办公室工作也可以利用机器人流程自动化技术替代完成。

在日本, 银行金融业以及地方政府正在带头实施机器人流程自动化。最终, 制造业和其他行业也将采用这种技术。需要较高技能的办公室常规性认知工作将由计算机替代完成。为了谋生, 相关员工可能要到劳动力市场找些对技能要求不高的低收入工作。在这个低技能、低收入劳动力市场上, 失业的日本工人将与居留在日本的外籍工人争夺工作机会。

5. 德国案例研究: 车间工人所需技能的变化

在某些方面, 自主系统可以减轻操作员的负担, 例如单调的日常作业调度操作。但与此同时, 复杂任务的规模也在增长。因此, 人们都表现出掌握新技能的强烈意愿, 以便适应不断变化的需求, 例如借助各种辅助系统或者是进一步的资格认证计划和概念。参与生产过程的所有员工必须更多

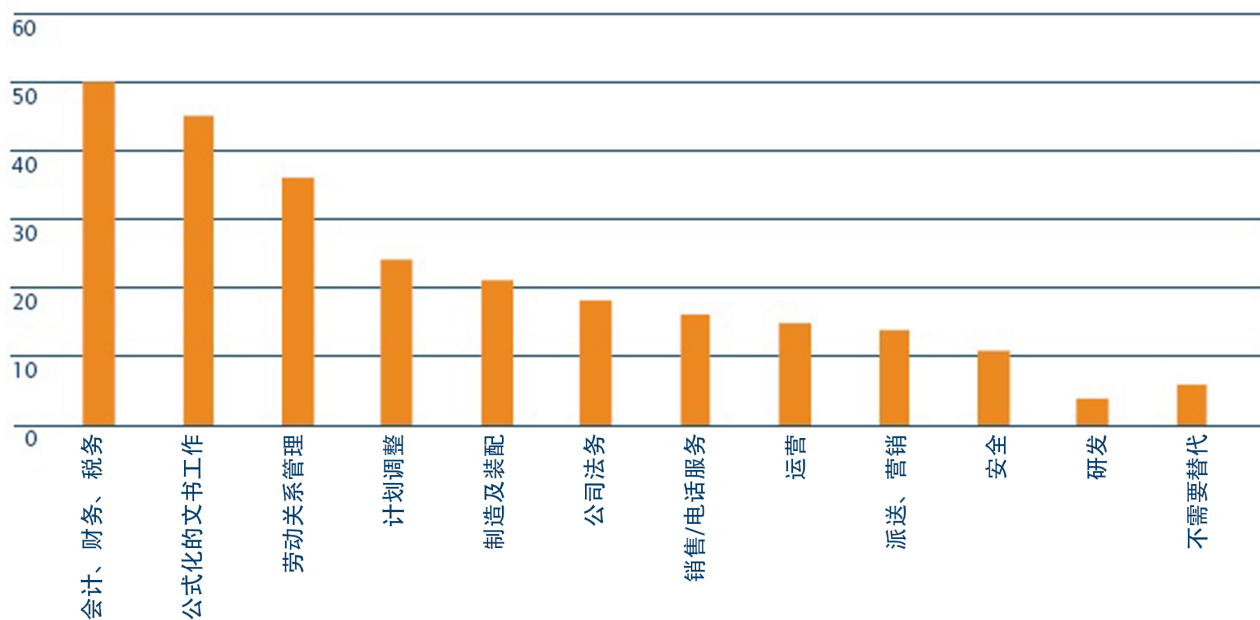


图8 可能被人工智能取代的职业 (%) (来源: 内阁府 2018 年的文章, 第 142 页)

地采用跨学科的工作形式。这是因为工作中需要开展合作,特别是借助信息技术开展合作。此外,很明显,需求很可能从工头转向信息技术专家。

过去,几乎每一项技术发展或进步都伴随着新的技能需求。在数字化转型、“工业 4.0”和新形式的人机交互技术的背景下,这类需求的变化速度越来越快,各企业都面临着这样的挑战。此外,几乎所有的活动都会受到影响。由于创新周期短而且需求不断变化,因此必须对员工开展针对性的培训活动。所以,全面地分析一名工人或员工所掌握的技能是至关重要的。第二步,需要确定哪些技能是必需的。资格认证与教育方面的各项学习措施

都应加以改进,以实现职业发展方法的系统化和个性化,使其既能满足员工个人的需求,也能满足整个企业的需求。在构思一个适当的资格认证(再认证)及学习策略时,必须考虑各种可能存在的差异(尤其是年轻人和老年人之间的差异)。就技术方面的相关技能而言,必须发展信息技术能力,尤其是人工智能方面的能力。然而,这一观点目前尚未得到德国经济界和劳方的完全认可。虽然“工业 4.0”一词的传播提高了人们对数字化的关注程度,但仍有一些企业在做技能培训和资格认证的工作时未能把握其需求。因此快速、脚踏实地地开展培训和再培训对于成功转型至关重要,只要这样才能完成企

业的部署,提高员工就业能力,创造出“好工作”。

为了使劳动力(包括作为未来劳动力的学生)获取更高的工作资质,可以采取各种策略和措施(例如研讨会、研习班、商业游戏以及与实践相关的案例研究)。而且,在过去的几年里,发展了一种很有前途的方法,称为学习型工厂。特别是,欧洲已经建立了多种不同的学习型工厂,它们具有特定的形式、重点和目的。然而,所有学习型工厂都有一个共同点,就是将理论与实践相结合的实际操作能力。与实际生产环境相比,学习型工厂的一个关键优势是开展特定的培训和演示活动时不会导致生产停工。最近,越来越多的学习型工

厂和实验室开始关注与“工业4.0”相关的课题。然而，这些方法大多未能将人类和机器的学习结合起来。

6. 日本案例研究：车间工人所需技能的变化

日本工厂有珍视熟练车间工人的传统。目前日本工厂正在引入新兴的数字技术，这不是要用计算机取代工人，而是要利用这些技术来发挥熟练工人的全部能力。物联网技术的引入使工人们获得了新的技能，但他们在这个过程中所接受的培训却很少，因此在日本，车间工人的再教育或再培训问题并不突出。相反，日本的重点是在几年内引入人工智能技术。目前，日本工厂正在引入的新兴数字技术是“可视化”系统，这意味着熟练工人仍然负责照看所显示的可视化数据，查明生产机器发生故障的原因，并制订相应的处理措施。然而，在不久的将来，根据所显示的数据进行判断并基于先例（例如对先例的学习）开展操作这样的事情将由人工智能来负责。

在日本，只有少数几家大型制造商全面引进了新技术，提高产出。富士通（Fujitsu）企业高管认为，重点是用新兴数字技术“增强人类能力”，从而减轻员工的负担。该企业的物联网系统弥补了车间工人的数量不足，

以及因员工老龄化而导致的技能退化，同时还帮助工人适应当前生产多种小批量产品的局面。三菱电机企业的高管表示，20世纪90年代，投资主要集中在机械化、自动化和节省劳动力等措施上。但现在的重点是用机器来完成适合机器完成的工作，其他工作继续由人完成，并维持其他适合人类的工作，也就是说实现“人与机器之间的和谐统一”。丰田供应商电装（DENSO）株式会社的高管强调，“电装企业物联网系统的理念是以人为本的”。电装企业将熟练工人定位为能为企业创造竞争力的资产。值得指出的是，仅通过数字技术进行可视化是不足以让熟练工人在车间做出优异表现的。他们还表示，重要的是要实际测出生产设备的缺陷，并找到办法由熟练工人来解决这些缺陷。三菱电机企业的e-F@ctory以及日立公司的Lumada，是日本具有代表性的物联网平台，它们也是基于同样的理念设计的。此外，新日铁（Nippon Steel Co.）企业的高管们强调，他们“继续投资于工厂技术工人数量迅速减少并且难以确保制造质量的领域”。从这些案例中可以看出，维持和拓展人的工作能力是日本企业数字化投资的主要目标之一。

为了解物联网技术在日本产业界的发展趋势，日本经济产业研究所于2017年8月至10月对

10075家日本企业进行了调查；从1372家企业收到了回复，回复率为13.62%。34家企业回复引入新兴数字技术后员工人数“减少”，43家企业回复“增加”。操作新的数字系统需要技术专家，如数据工程师。调查显示，对技术专家以及管理技术专家的管理者和支撑技术专家的办公室职员的需求量不断增长。与此同时，在银行金融业以及其他一些行业的行政部门，常规性认知任务正在实现计算机化，导致办公室职员不断减少。对当前的员工增减情况的比较表明，增长量大于减少量。可以推断，在日本企业中，工厂比办公室更渴望实现数字化。无论如何，未来的趋势都需要仔细监控。

7. 德国案例研究：与以往讨论截然不同的积极情形

德国存在一种情况，就是替代潜力大并不等同于发生替代的概率就高。此外，目前在人机交互领域实施现代技术或“工业4.0”解决方案以及自动化项目的结果表明，现在德国还不能以合理的成本实现某些活动的完全自动化。悲观的观点强调对人类的潜在替代效应以及工业劳动的贬值；乐观的观点则强调实施现代技术和“工业4.0”系统所具有潜力或者可能得到的积极结果，例如提升竞争力和生活质量，

改善工作与生活的平衡等等。

这种乐观情形预期会对劳动力市场产生积极的影响。例如，波士顿咨询公司（Boston Consulting Group）的一项研究预测，未来十年德国的就业增长率为6%。之所以会产生这样的积极影响，主要是因为机械工程行业、汽车行业和电气工程行业对高素质产业工人的需求不断增加。产业界相对温和的技术变革以及新技术对工作和生产流程的不断丰富完善，通常被视为是这一发展过程的基础。还有观点认为，即使是低技能工人，也是有社会需求的，而且几乎所有种类的常规性工作都包含一些非常规性的要素，例如经验知识就很难被技术系统所取代。此外，人们普遍高估了技术潜力及其影响，进而会得出一些可能是误导性的结论，这在悲观情形和乐观情形中都有描述。

乐观派还以一种新视角来看待人与机器之间的相互作用，以及技术系统和人力系统之间控制权和/或责任的相关分配。高素质的技术人员是各技术系统的协调人，是工业生产系统的核心。一旦出现问题或出现故障，他们可以利用以往的经验进行干预。总而言之，有资质的工作人员完全掌控整个工作和生产流程。必要时，技术辅助系统可以提供灵活、有效的支撑。

新的交流与协作形式使人与

技术之间的互动发生了改变，因此有必要对工作进行重组。而且，员工还需要进行终生学习，这样他们才有能力控制不断变化的信息物理系统。这类辅助系统是维持和不断提高人类的生理和心理能力的先决条件。

今天，人们普遍认为，一个人的生产能力主要不是取决于其实际年龄，更大程度上是取决于其生理年龄。特别是，辅助系统能够实现机器与工人的互动，使工作更为轻松。除了工作设计和核心能力开发方面的相关活动外，人与人之间以及人与技术系统之间的交互式合作也为企业创造了新机遇，使其能够从人口变化中获益。在技术工人短缺而员工多样性（年龄、性别、文化背景）上升的时代，“工业4.0”可以实现多样化和灵活的职业模式，进而实现生产率的可持续增长。

总之，这种积极的情况也得到了预测结果的支持，相关预测结果表明各种活动和资质都要提升。根据 Ittermann/Niehaus 的文章这种提升可以理解为不断丰富相关活动、提高能力的过程，它会影响所有的员工群体。

8. 德国案例研究：人、机器人和虚拟智能体在生产环境中的混合编组

德国进行了一项研究——在信息物理环境中开展长期合作的

混合社会编组（HySociaTea），该项目的成果表明，与任何一种替代风险不同，人机交互技术所取得的新进展有助于在混合编组中实现新的合作形式。该项目得到了德国联邦教育及研究部（BMBF）的资助，德国人工智能研究中心（DFKI）的专家们参与了该项目，其目的是实现和检验人与自主机器人、虚拟对象以及软件机器人（SoftBots）的协作，来完成日常任务，满足高复杂度、高柔性的未来生产的需求。

该项目不仅分析了技术方面的可行性，还分析了（机器人）编组能力和多智能体行为的发展。各智能体在生产过程中能够主动协助工人，可以视为无需直接指导的合作伙伴。这反过来又对团队组织和配置方面的（未来）决策具有重要的影响。

人的特点是具有高级认知能力，灵活性好，是混合编组的核心，而机器人则负责完成有体力要求的任务。在虚拟智能体的界面上提供了数字化的信息。SoftBots 汇集其他团队成员生成的数据，更新数据库，并提供经过提炼的有意义的数据。

4 多样化及可持续创新政策的推行导致差距显现

本部分将讨论：在不久的将来，工人和机器的多样化预计会

增加，并倡导在产品和服务的整个生命周期中推行可持续创新政策。

4.1 多样化导致的差距显现

自工业革命以来，各企业都致力于实现生产标准化，达到高速高产的目的。然而，标准化已经达到了极限。人口减少导致制造业劳动力多样化，且能力各异。此外，老旧的机床正在与 AI 机器人一起使用（图 9）。

这些发展造成了分工不协调、工人和机器实际能力不协调的问题，可能导致商业机会流失。

在日本，人口下降一直在促进劳动力多样化，使更多的妇女、老年人和外籍人员进入就业市场（见表 3）。同时，制造业当前的自动化进程正在改变各岗位的工作范畴以及工作场所中的人机交互方式。

此外，许多企业每年都在延长其设施的寿命。特别是 1990 年以后，制造类设施的平均寿命增加到 16 年以上，如表 4 所示。

德国还面临着一些社会和技术挑战。如表 5 所示，这些挑战导致了就业变化。此外，各企业不得不考虑工作场所中，以前任职人数不足的群体，包括残疾人、有移民背景的人群以及知识经验丰富的老年人。

此外，科学、技术、工程和数学（STEM）以及护理方面的技

术工人也存在不足。这类趋势持续已久，早在“工业 4.0”提出之前就已经开始。虽然工作概况和要求可能有变，但并不意味着找不到具有必要资质的工人，也

不能说明如今的职业培训不足。然而，工人必须跟上不断变化的技能需求。德国由于职业培训体系具备适应性和灵活性，只需对职业概况稍作调整。

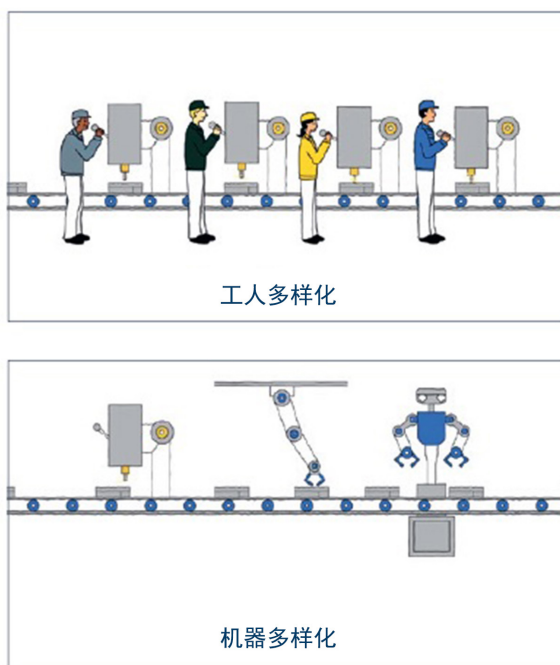


图 9 工厂工人和机器可能发生的变化（来源：2019 年日立品牌频道）

表 3 日本就业趋势（来源：2019 年日本厚生劳动省 MIC 2019b 内部演示文稿）

时代趋势			
妇女就业率（年龄段： 25-44 周岁）	61 [%] (2000)	66 [%] (2010) +0.5 [%]/ 年	72.7 [%] (2016) +1.1 [%]/ 年
老年人就业率（年龄段： 65-69 周岁）	36.2 [%] (2000)	36.4 [%] (2010) +0.02 [%]/ 年	44.3 [%] (2017) +1.1 [%]/ 年
外籍员工数	486000 (2008)	718000 (2013) +50000/ 年	1279000 (2017) +140000/ 年

表 4 日本设备平均使用寿命趋势

（来源：2016 年 Hamagin 研究实验室内部演示文稿）

时代趋势			
平均（使用）寿命	8 年 (1971)	10 年 (1991) +2 [年]	16 年 (2016) + 6 [年]

表 5：德国就业趋势

（来源：2019 年欧盟统计局，2018b 德国统计局及 2018 年德国联邦就业局内部演示文稿）

时代趋势			
妇女就业率（年龄段：20-64 周岁）	60.8 [%] (2000)	69.7 [%] (2010) +0.89 [%]/ 年	75.2 [%] (2017) +0.79 [%]/ 年
老年人就业率（年龄段：65-69 周岁）	3.9 [%] (2010)	5.9 [%] (2015) +0.40 [%]/ 年	7 [%] (2017) +0.55 [%]/ 年
外籍员工数	2219000 (2012)	2919000 (2015) +233000/ 年	3470000 (2017) +275000/ 年

表 6：基于质量和绩效差异的人机能力对比

（来源：2018a, Ansari 等人的个人演示文稿，第 119 页）

			人工	机器
能力	质量差异	机械工作	- 高度的个体间差异和多样化 - 可通过培训和工作满意度来提高 - 高度的个体差异和多样化取决于解决问题的能力、特长、经验和资格水平 - 个人、社会和机构的利益可能会影响人类决策	- 极低 - 由于维护不当，会随时间推移而退化 - 由低到高取决于数据质量（受干扰和噪声影响）、算法的精确性、人为准备的程度以及问题域的复杂性 - 在使用（相对较大）数据集训练系统后，可以提高质量
		决策	- 决策可能会受本身复杂性和敏感性（风险）影响 - 相对较高（取决于个人能力、动机和承诺） - 工作疲劳和工作不满意的可能性很高	极低（取决于寿命，相关退化率和服务质量）
	绩效差异	执行任务		

在人机交互的背景下，我们不仅要关注人类或机器如何学习，还要关注二者如何通过相互学习来提高自身技能。如今，人类和机器遵循着不同的学习理念。然而在未来，学习理念的混合将是实现相互学习成功的必要条件。

Ansari 等人 (Ansari et al. 2018a) 将相互学习定义为“一种双向过程，其中涉及人机协作时的相互交流、依赖、行为或影响，其结果是创造新的意义或概念，丰富现有的意义或概念，或提高与每组学习者相关的技能和能力”。

这受到人和机器执行不同任务时不同能力的影响，如表 6 所示。

学习过程既可以是独立的（每组都有不同的训练），也可以是依赖性的（通过执行一个共同的任务来共同学习）。目前，有一种强烈的倾向，即倾向于独特训练，而缺乏对与人机共同学习的探索。

1. 日本案例研究：制造业中的习得性不使用现象

未来，AI 机器人技术将越来越多地被引入制造系统，以获

得高性能，以低成本生产高质量的商品。但从长远来看，AI 机器人技术会在多大程度上影响人类呢？采取简单的方式引入 AI 机器人技术可能会对人类的熟练程度产生负面影响。这可能是因为，人类可能会习惯于在制造过程中无需使用任何技能的情况。我们需要考虑 AI 机器人技术出现恶性循环以及人类技能相应下降的可能性（图 10 左侧）。

在脑科学领域，严重的神经损伤通常会引起恶性循环，导致患肢“习得性不使用”。在自动化与人类的关系方面，也有类似的讨论。

关于克服习得性不使用现象的方法，在脑科学和康复医学中提出了约束诱导运动疗法（CI 疗法）。通过训练程序，对连续几周使用患肢的患者进行系统的奖励。

此外，可以限制未受累肢体的使用，这样一来，除非试图使用患肢，否则受试者几乎无法用力。类似的方法或可用于生产场所。为了让人类和 AI 机器人在未来的生产场所共同工作，需要满足两个要求：

1. 通过人类和 AI 机器人配合，高效完成任务；
 2. 通过培训提升人工技能。
- 一种可能是构建管理系统（可以基于人工智能）来实现人机交互的系统统一，来对双方进行仲裁（图 10 右侧）。

4.2 现实世界与网络世界的管理

特别是在研发领域，制造企业传统上被传统的工程角色所主导，尤其是在机械和电气工程领域。事实上，自 19 世纪以来，机械和电气工程一直是制造业创新活动的核心，并对我们今天所熟知的工业产生了巨大影响。

然而，在过去的几十年里，软件已经成为机械和电气 / 电子产品创新的重要驱动力。软件创新主要发生在嵌入式系统中，物理上局限于单个机器。

同时，在过去的几十年里，软件行业以不断增长的速度取得了长足发展，愈来愈多地出现在日常生活、业务流程的各个方面。

软件本身是抽象实体，理解其内部运作需要比理解机械工程问题更高的抽象程度。日益增加的复杂性和新软件层数的叠加，使软件工程领域有了自己的方法、工具、独特的过程以及组织程序。

“工业 4.0” 的出现预示着两个世界的连接与融合。于是在这个重叠的世界里，一个全新的创新领域便出现了，它利用了网络世界的方法和程序，以及经典的工程技术。

制造业企业现在面临着敏捷开发、Scrum 开发、配对编程等方法，这些方法不同于瀑布（开发）方法和详细的工程规范。此外，十人团队和扁平化等级制度等组织原则是软件公司的典型特征，制造企业需要采用这些原则

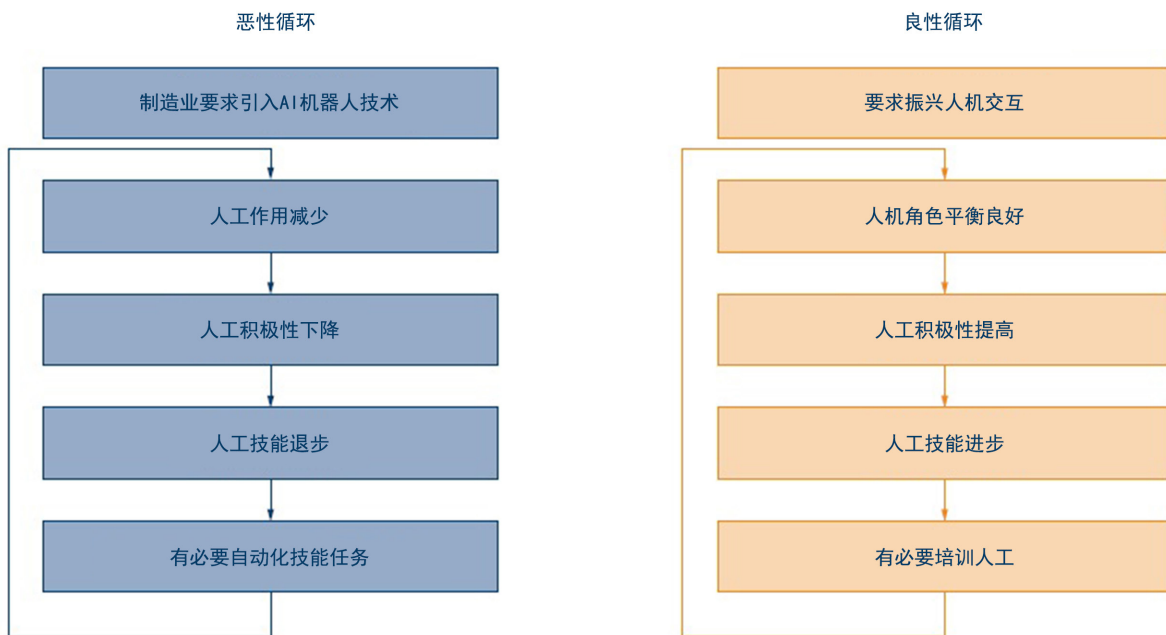


图 10：人类和 AI 机器人系统的恶性循环和良性循环（来源：东京大学内部演示文稿）

来变得敏捷（并被潜在的软件人才所感知）。考虑到传统的方法和制造企业悠久的历史，做出这种调整是巨大的挑战。但这些变化不会消失，企业必须在员工队伍、组织原则和管理程序中积极应对。

软件开发局限于计算机和服务器的虚拟世界，是一种基于桌面的活动。这为迄今仍在很大程度上被排除在劳动力队伍之外的人打开了职业发展的大门。本文将于下一章给出相关案例。此外，开发嵌入机械中的软件，不仅需要软件技能，还需要对要集成软件的生产机器有深刻的了解。因此，在软件开发方面获得额外资格的技术工人，凭借他们在机械和生产技术方面的见解和数十年的经验，显得尤为珍贵。

总而言之，现实世界和网络世界与“工业 4.0”相融合，为新的创新领域让路，新的工具、方法和原则是其成功的基础。然而，这些新工具必须与现有的流程、技术路径以及宝贵的制造资质及经验相结合。制造企业必须在运用其独特制造专长的同时，积极熟悉新挑战，采取新技术。

4.3 具备多样化的可持续创新

德国和日本都面临着技术工人短缺和劳动力老龄化问题，导致工业劳动力结构在年龄、性

别和技能方面更加多样化。为在紧张的劳动力市场中吸引最优秀的员工，包容性的工作环境将成为更重要的竞争差异化因素和企业成功的动力。事实证明，包容性能够提高员工的参与度和创造力。此外，当员工结构反映出客户的社会阶层时，他们的需求可以被更好地理解 and 满足。毕竟，持有不同观点的同事进行合作，会产生更多的想法，刺激创新。

1. 德国案例研究：思爱普（SAP）——自闭症患者工作计划（Autism at Work, AaW）

本案例研究讲述了欧洲最大的软件公司——思爱普公司基于多样性、包容性认识的组织文化是如何为自闭症患者融入员工队伍奠定基础的。思爱普的项目可以作为其他公司扩大人才库的范例。此外，它还让制造企业为他们可能在软件公司（如思爱普——向“工业 4.0”转型的关键合作伙伴）找到的员工结构类型做好准备。

软件行业从一开始就是快节奏变化的行业，以高速发展为特点，因此人才招聘成为其成功的关键因素。在这场“人才争夺战”中，思爱普很早就面临着信息技术行业劳动力短缺的前景。既要应对多变的市场趋势，又要获得优秀的员工，这促使公司为多元化的员工队伍创造包容、便

利的工作环境。员工的多样性带来了广泛的视角，被视为创新的重要来源，也是应对复杂技术挑战的必要条件。此外，由于思爱普软件被全球广泛的社会群体所使用，让员工队伍反映出具有不同能力、需求客户的多样性，是招聘战略的另一商业驱动力。

这种开放的心态是启动自闭症患者工作计划的关键前提，该计划将自闭症患者纳入公司的员工队伍。借此，思爱普公司能够利用到劳动力市场尚未发掘的人才库。

自闭症患者工作计划于 2013 年正式启动。截至 2019 年第二季度，思爱普有超过 155 名自闭症员工。他们来自 13 个国家，在 26 种不同的岗位上工作，留职率超过 90%。该计划通过思爱普印度公司当地的项目启动，收集了自闭症谱系障碍患者的第一手经验。这些员工出色的表现让公司相信，自闭症患者可以为软件开发做出卓越的贡献。

自闭症属于神经障碍疾病，会给社交、情感和沟通技能带来挑战。据估计，全球约有 1% 的人口患有自闭症，其中 90% 的人处于未就业或就业不完全状态。自闭症患者通常墨守常规、一成不变，难以适应陌生环境或被打破的常规。但思爱普自身与自闭症同事相处的经验表明，这只是问题的一面。创造满足自闭症员工需求的环境，有助于发挥他们

独有的优势和技能，其中包括：

- 一丝不苟、注重细节和模式识别的能力；
- 长时间专注于一项任务的能力；
- 分析能力与逻辑思维能力；
- 检测非常规现象的技能。

稳定和开放的工作条件是让自闭症员工产生归属感的重要前提。这是通过每个项目所在地的一组内部和外部人员来实现的，他们在工作中雇佣、吸纳、支持并指导自闭症同事。虽然这需要投资，但大多数同事能够快速在新的工作场所独立工作，实现了真正的投资回报——为公司和整个社会节约了社会福利成本，增强了社会凝聚力。毕竟，稳定的

结构对于以可持续和可扩展的方式运行该计划至关重要。

思爱普公司在招聘阶段就已做出必要的调整。一般的招聘流程往往寻找的是具备良好沟通能力和团队合作精神的人，而自闭症候选人通常不符合这些条件。为此，思爱普公司调整了其招聘方法，重点关注自闭症候选人的激情，并将实际任务纳入面试过程。

为了帮助该计划取得成功，思爱普建立了一个包括非政府组织、研究机构和政府机构在内的合作伙伴网络，以支持公司接触到潜在的自闭症员工。这些利益相关者帮助确定可能的候选人，并为公司提供支持自闭症同事顺利融入公司的建议。在已经考虑

到未来员工流的情况下，思爱普还主动与部分高中和大学合作，让自闭症学生了解公司的工作机会。许多自闭症患者习惯于被传统的招聘计划所忽视，因此，让他们意识到自己的技能受到青睐十分有必要。

协调各种人机间的互动，不仅是简单地弥补功能的缺失或同步，还可以通过尊重个体性格，互相帮助、互相提升，得到极佳的成果。

为确保经济可持续增长，我们必须创造一个人类在工作中找到成就感，同时与机器携手共进的世界。图 12 讨论了人机交互的相应转换。

前一种模式（图 12 左）是传统的技术模式，基本应用于人

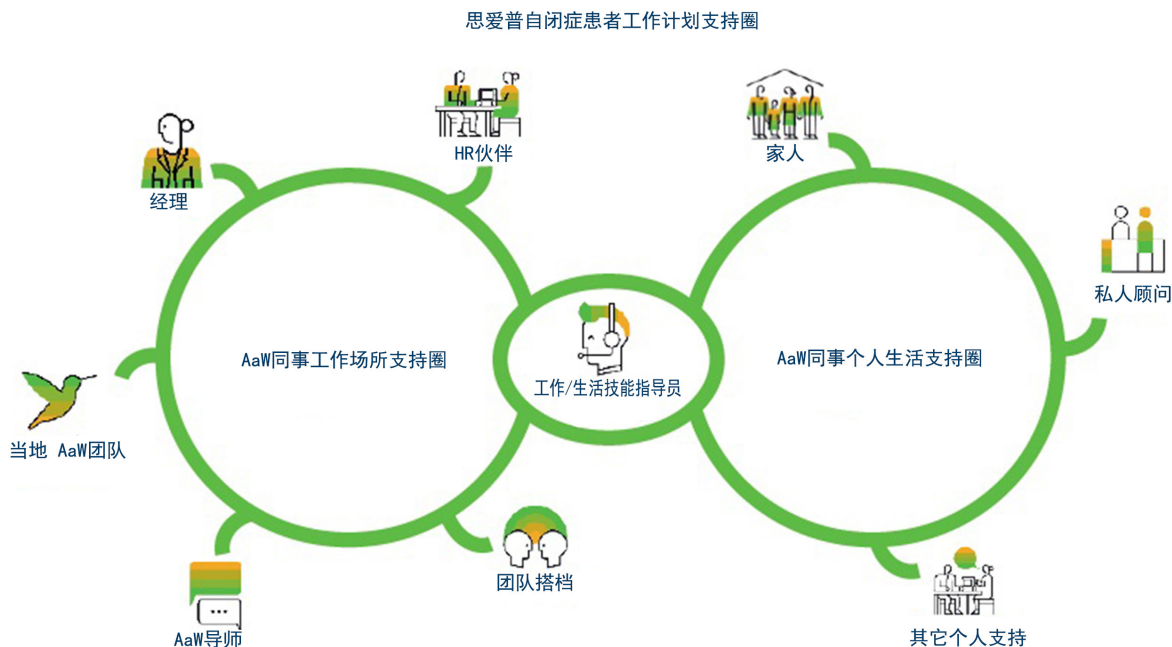


图 11 思爱普公司的自闭症患者工作计划（来源：思爱普公司）

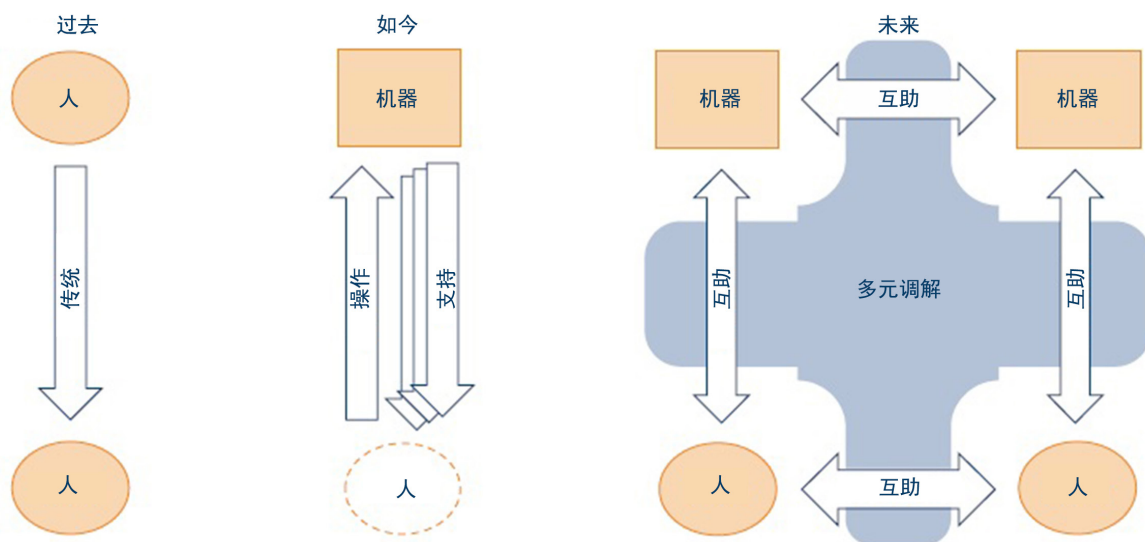


图 12 互动模式转换（来源：日立公司内部演示文稿）

类，一个师傅教一个学徒。由于有合适的师傅可用，可扩展性便成为了潜在的挑战。

现象的增加，人类反过来也面临着失去一项关键技能的风险。

2. 日本案例研究：过度帮助的问题

1. 日本案例研究：技术传统

在日本，漆器等传统工艺仍主要通过学徒制学习。制造工艺也是如此，例如换热器（空调器的主要部件）所需的钎焊工作。将细铜管焊接在一起十分困难，对于熟练的师傅来说，如何有效地训练初学者已经成为主要问题。

如今的制造模型（图 12 中）是机器辅助人类的模式。这意味着人类不需要像以前那样接受同等程度的训练。机器提供相关的指令和自动支持来弥补人类技能的差距。然而，过多的计算机辅助工具可能会导致习得性不使用

在日本，许多加工过程，如钻孔、车削，是由数控（NC）操作的。有时，操作员很难理解由熟练操作员或 AI 设置的参数背后的道理，例如，切削刀具的进给量和切削量。工业机器人被广泛用于家用电器组装和汽车车身点焊。有时，机器人程序的变化会导致流程链中出现瓶颈，这同样是因为，操作员很难理解由熟练操作员或 AI 设置的程序参数背后的道理。

因此，未来的人机交互系统化协调模式将有一个人与机器之间的多元调解过程（图 12 右），

在数字化知识的基础上，将人与人、人与机器以及机器与机器之间的交互调整为互助关系，从而实现人与机器的可持续改善。

这种未来的模式不仅能观察到人与人、人与机器、机器与机器之间的互动，还能累积观察到的信息。就技术工人而言，调解过程确定了可能导致互助调整的潜在改进。

关注人（1号）、人（2号）、机器三者间的互动，基于这种未来模式，企业需要采取以下策略：

（1）重新审视传统的劳动力结构，为更多的人才创造包容性的环境，这些人才的特点可能与现有员工群体中的大多数人不同。

（2）系统衡量同一工厂中人和机器的技能和能力，随后，协调任务计划并调整智能机器的

编程，使其能以最佳方式帮助对应的人。

第一步，调解过程和数据共享应该在公司内部进行。第二步，这一程序应该转移到整个社会。对于关注人类福祉的可持续社会而言，只要不侵犯知识产权，从人与机器之间的互动中获得的知识就可以向公众开放。

下一个案例研究描述了日立公司在人机交互系统协调方面的活动，称为“多元无障碍”（Multiverse Barrier Free）活动。

3. 日本案例研究：日立——“多元无障碍”（Multiverse Barrier Free）活动

在日本，工人的多样性不断加强，主要原因在于出生率下降以及人口老龄化。此外，机器的多样性也在进步，这意味着在经济高速增长时期引进的旧机器与近年来引进的最新机器人一起在工厂中运作。日立正在推动开发一种灵活的生产系统，利用人机合作优化人机间的工作分配。

在传统的工作场所，工人由

专家教授，按专家模式进行工作。但是，随着工人的多样化，他们的能力也随之多样化。因此，即使接受统一的工作和指导，他们的工作能力也会有所不同。因此，他们无法按照指示工作，可能会出现产生压力、工作量加大、生产率下降、失去发展机会等问题。

在机器日益多样化的工厂里，存在着人类工作被机器取代的潜在风险。

这反过来又会降低工人的积极性。另一个问题则是，机器对工人的支持力度过大，致使工人

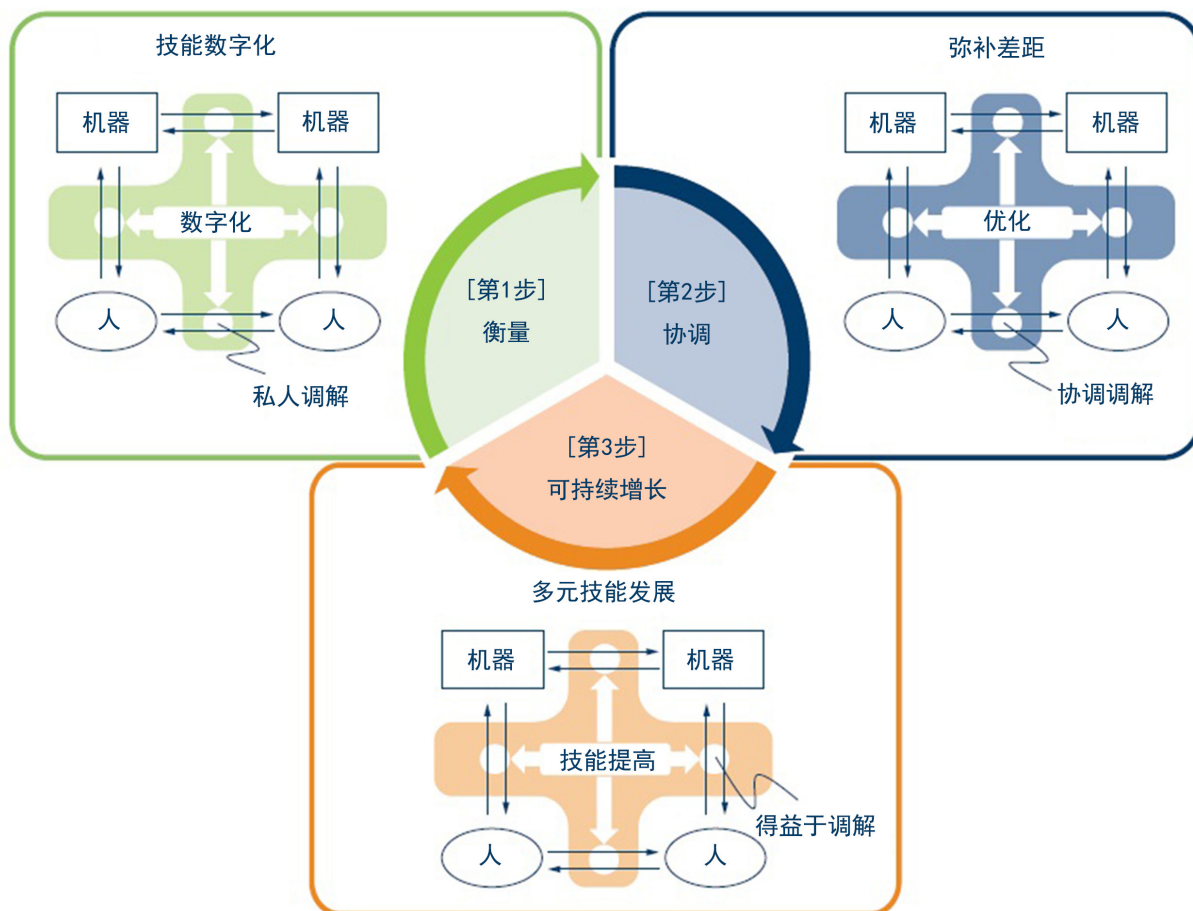


图 13 日立“多元无障碍”活动的三大关键步骤（来源：日立公司内部演示文稿）

能力落后，难以获得发展机会。这一点，本文在制造业中习得性不使用现象的案例研究中已经提到过。

鉴于上述问题，日立提出了“多元无障碍”的概念。这是一种利用人和机器各自的特点，而非过度支持，促进可持续发展的机制。在这一概念中，人与人、人与机器、机器与机器之间的互动，按照图 13 所示的三个步骤进行调解（图 12 中已经提及）。

• 第一步：衡量

人机接口的特点是数字化，并针对每一次的交互建立私人调解。日立假设人机交互由 4M（人、机器、材料和方法）实体组成，通过对 4M 行为的交叉分析，提取人机接口的关键提示。而后，日立与大隈（OKUMA）合作，提取机床制造的关键提示，实现制造效率的最大化。

• 第二步：协调

在这一步骤中，调解生成适当的人机交互政策，以补偿性能瓶颈。例如，调解促进人和机器实现任务的优化组织计划，从机器到人的合适支持菜单，从人到机器的合适操作策略。诸如机器状况等因素都被考虑在内。在该政策指导下，日立公司开发了优化生产线配置和产品设计的技能。由于产品设计规范赋予了工人和机器人生产能力，而工人和机器人的能力在重量、细度等方面限制了产品设计规范，因此在

设备自动制造中便得以建立经过检验的协调技术。

• 第三步：可持续增长

为实现人和机器的发展，需要为每个人和每台机器提供互助。根据这一政策，日立正与大金（Daikin）公司合作，促进钎焊人机交互的可持续发展。他们在合作中，为现有的空调换热器铜管钎焊系统增加了一个全新的过程可视化功能，并利用该功能，制定了一个提高工人钎焊技能方案。

综上所述，日立“多元无障碍”概念的本质价值在于：

（1）帮助人类和机器不断发展自身创造力。

（2）尽可能用自动控制取代已过时的操作，将人类从繁琐的工作中解放出来。

（3）这种创造性的不断表达，有助于在可持续发展的社会中维护并发展机器。

日立在 2018 年日立社会创新论坛（Hitachi Social Innovation Forum 2018）上发布了“多元无障碍”这一概念，并在 YouTube 上发布了概念视频。日立为创造多元化的人机共同成长的社会做出了贡献。

5. 人机协作新范例面临的挑战

数字革命为工业和社会带来了显著影响。随着人口增多和社

会的繁荣发展，产品与服务的全市场交易量预计将有所增长，定制化产品需求量或将加大。然而，全球制造业劳动力将会减少。

为应对上述趋势，工业领域整体做出了改变，开始趋向多样化、复杂化发展。

例如，“工业 4.0”的基础并非是完全自动化的制造流程，而是可用于小批量生产的、适应能力强的个性化流程，因此，制造业领域离不开下一代人机交互技术。

工业制造的新范例可根据客户需求，快速调整信息物理系统。对客户响应能力在人机协作中最为明显，也更高效，能够赋予企业获得竞争优势的机会。那么人类和机器将如何互动，人类的思想将在其中扮演何等角色？

本部分着重讨论了智能制造环境下的人机协作及其对未来制造业的影响。潜在的解决方案可能会催生新的交互方式。此外，人与自学习机器的融合也要求操作与管理具有灵活性和适应性。这可能会创造出更好、更令人满意的工作机会。

5.1 现状

为使机器更为智能、具备自学功能，人类做出了许多努力，来为机器配备传感技术或 AI 技术。现状如图 14 所示，智能机器和机器人适应常规性认知任务

的效率更高，传统机器却需要更多努力。此外，工人必须适应更新换代的机器，管理人员则要为快速革新的生产流程做好准备。

5.2 未来的发展

建议采取以下方法，妥善应对未来的挑战：

- 增加认知技术和人机交互的强度；
- 在知识共享管理的同时，实现车间内人工智能信息收集；
- 将人工智能与流程管理中的 CPS 和学习相结合；
- 培养熟练技能工人的协作机器人技术能力和行为识别能力（见“德国与日本合作案例研究：DFKI 与日立——工人行为的识别、评估与转移”）；
- 增强监管技能，从而发挥员工潜能，提升企业管理的可视化程度。

5.3 人机协作新范例

新范例（图 15）可视为对图 13 的概括。

在不断引进自学机器的工作环境中，使用这些技术系统的工人必须熟练掌握统计优化、动态优化、过程管理学习、数字技术支持的知识共享管理等内容。因此，企业必须采取人机协作的新范例。

下文的案例研究介绍了一些

新的方面。

1. 日本案例研究：三菱电机——集体智慧

集体智慧是建立在企业、组织或社会成员的经验教训、思想基础上的。集体智慧不仅有助于

“持续改善”（指对产品和生产的连续改善），还有助于创新，如横向思维和发明问题解决理论（TRIZ）。

然而，由于生产力人口的减少，工人从工作场所收集的知识、经验和想法随之减少，进而导致持续改善（Kaizen）和创新的速

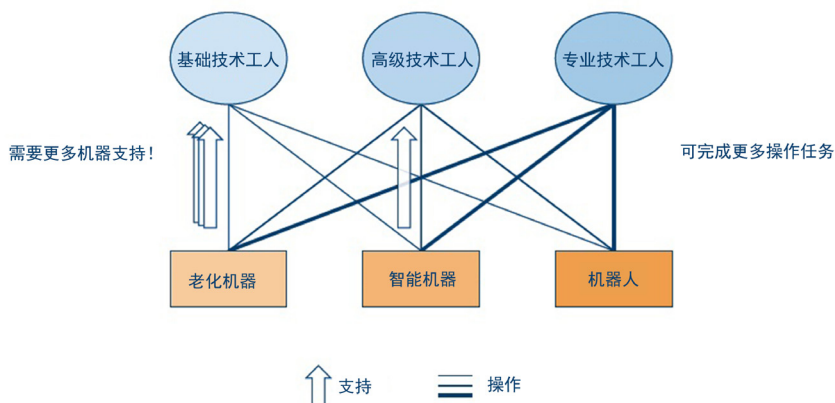


图 14：制造业现状（来源：三菱电机公司报告）

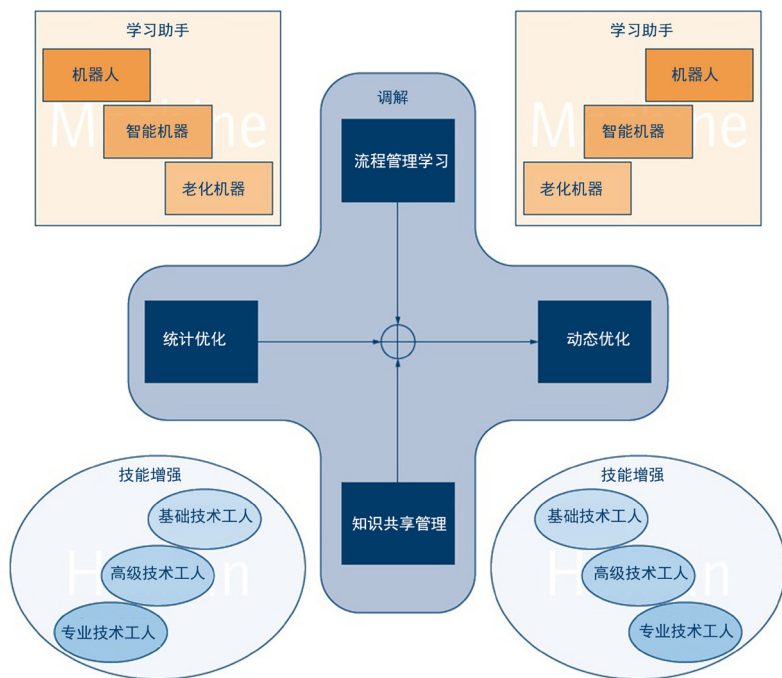
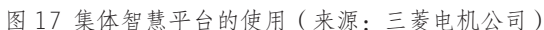
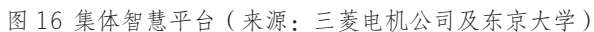


图 15 人机协作新范例（来源：三菱电机公司报告）

如图 17 所示，集体智慧平台可从机器系统、交流平台两处获取数据，对经验教训做出解释，并根据不断积累的知识库中的数据提出意见与建议。集体智慧平台借助 AI 技术来评估并关联数据，比较方法，对想法进行原型设计。从 AI 分析中获取的信息作为技能和知识，以应用案例的形式存储于知识数据库中。平台



成员将通过用于按需教育、想法评估、模拟的交流平台分享这些技能和知识，促使成员更快地提出想法。此外，通过在集体智能平台中对关键绩效指标对技能和知识进行分类，可以提供指导并适应技能和知识的实际转换周期，从而成功促进智能制造的成熟。

利用集体智慧实现制造业多样性对企业而言是一种突破，如单元生产系统。以三菱电机的电磁开关装配作业为例，大部分的制造流程由一名工人与机器人共同负责，完成装配。其中，机器人弥补了人工的缺陷，而工人的价值在于对制造流程的判断。借助集体智慧管理，单一生产单元内获取的知识可被更快地应用到工作中去。管理人员可以借此评估投资回报和时间规划。

在集体智慧平台的加持下，现场工作人员可高效利用技能和知识，实现产品制造创新。

2. 日本案例研究：东京大学——数字三胞胎

鼓励工作现场的工程师和技术人员在手册及主管规定的日常工作外，主动开发执行工程活动的新方式，是促进以人为中心制造的重要手段之一。这是日本制造商使用的一种传统的持续改善方法。这意味着信息物理生产系统（CPPS）应该配备该项功能，

但实际还尚未实现。本小节中讨论的数字三胞胎即为将此功能添加到 CPPS 中的概念模型。

制造业工程师和车间技术人员追求精益生产的持续改善（Kaizen）对高质量制造而言至关重要。尽管如此，由于许多工程师和技术人员无法跟上数字化转型步伐，CPPS 中的持续改善活动并未被数字化为“智能”。随着制造系统的不断数字化，我们面临的问题是需要怎样的下一代系统来支持工程师在制造过程中创造最高价值，而不仅是将工程师的活动“自动化”。

本节讨论的情况是，在传统日本制造企业中，制造系统工程师往往扎根车间，与工人一起不断改进制造系统。他们进行的工程活动包括制造系统的操作、问题解决、精益生产持续改善以及

新制造系统开发。

为了解决这一问题，我们提出了“数字三胞胎”这一概念。数字三胞胎致力于协助工程师解决问题并在产品全生命周期内创造价值。作为 CPPS 的一种，数字三胞胎鼓励工程师主动开发执行工程活动的新方法。

如图 18 所示，“工程周期”由数据采集、信息分析、工程师决策和物理世界中的实施执行计划组成。当工程师执行一个“工程周期”时，就会为数据创造价值。图 18 中圆角矩形内的术语，传统 CPPS 中都有描述。图 18 中矩形内的术语（如“选择监控数据”、“选择分析方法和工具”）描述的是支持制造系统工程师构建工程周期的重要方面，是数字三胞胎的主要内容，然而传统的 CPPS 却未能将其包含。换言之

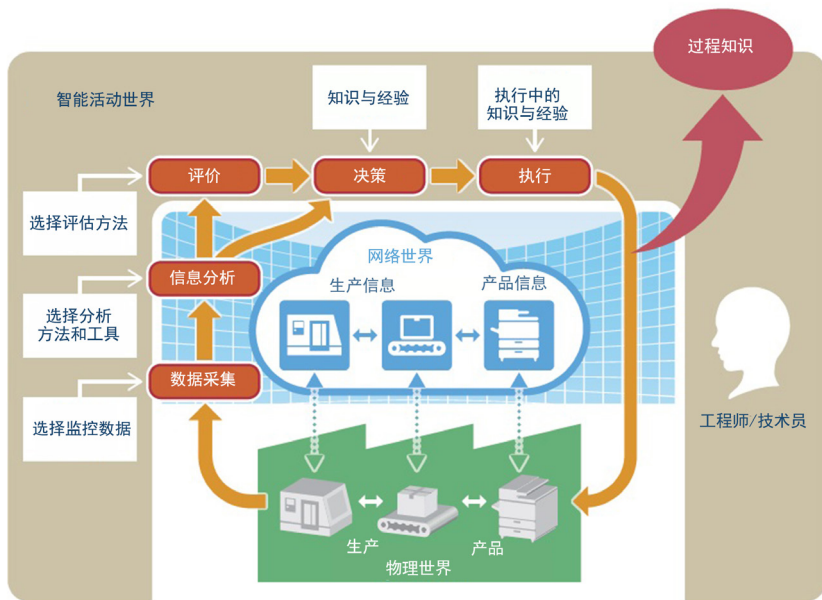


图 18 数字三胞胎的工程周期（来源：三菱电机公司）

之，本节内容针对的制造系统工程师，是主动自行构建工程周期来执行持续改善的，数字三胞胎则致力于支持这一过程。其中，以人为中心的 CPPS 对这一数字三胞胎来说是很好的参考。以人为中心的 CPSS 与数字三胞胎的主要区别在于构建工程周期的主体：在以人为中心的 CPSS 中，构建工程周期的主体是开发人员；而在数字三胞胎中，是车间的制造系统工程师。

我们将工程周期形容为“可重复使用的工艺知识”。换言之，我们要将制造系统工程师的工艺知识体系化，对其进行收集和归档，通过重复使用、部署、共享知识来支持人工活动，并运用这些知识进行教学。在工艺知识的帮助下，我们得以利用人机交互等手段改善工程周期。这也成为了专家向新手工程师传授知识的一种新方式。专家工程师为特定问题（如提高制造系统生产率）开发新的工程周期时，数字三胞胎可对该工程周期、多种 AI 工具、模拟器和其他软件的使用情况，以及工程师执行的活动进行记录，这就是一个数据采集过程。新手工程师可以通过跟踪过程记录来研究学习专家工程师解决问题的方法。

数字三胞胎是对 CPPS 的拓展，重点在于 CPPS 与持续改善的融合，从而鼓励工程师主动构建并执行各种工程周期。数字三

胞胎能帮助专家工程师将知识传授给新手工程师，还能帮助培训智能制造领域的新手。也就是说，数字三胞胎为构建智能制造系统赋予了可能。智能制造系统可使不同制造系统工程师的不同能力得到充分发挥，尊重性地创造价值，从而提升工程师的技能和工作能力。

3. 德国研究案例：英飞凌科技公司——协作机器人

最新一代协作机器人（CoBots）证明了人与机器人协作的好处多于风险。通过半导体解决方案和高级算法的恰当结合，我们可以将这些风险最小化甚至消除。协作机器人首先需要具备的是先进的安全保障能力和精确扫描周围环境的能力。

不同于传统的工业机器人，协作机器人摆脱了安全防护笼的束缚，可直接与人互动。然而，由于没有安全防护笼，大大增加了人和生产资料的安全风险。如果想把机器人从安全防护笼中解放出来，必须首先确保人类不会因自己的疏忽或故障进入机器人高速运转的临界范围而受伤。人们只能通过复杂的传感器技术提高机器人的灵敏度。基本上，人与机器人之间区域、多个机器人之间区域的安全性都必须得到加强，从而打造更为灵活的保护区。例如，较小的保护区可随着机器

人的手臂移动。区域概念可用于搭建虚拟围栏。如果有人进入危险区外围，CoBot 机器人将发出警告信号，但仍会继续全速运行。如果人继续靠近，CoBot 就会减缓运行，并相应发出警告。如果人类即将踏入危险区域，CoBot 则会停止运行。

安全和安保这两个词乍听起来很相似，但二者有一个明显的区别：安全指对人的保护，但安保则包含对数据的保护，因此安保的目的在于保护机器人免受网络攻击。在工业 4.0 和物联网的背景下，数据安全性日益攀升——只有数据安全性良好的系统，才能保证其功能的安全性。加密系统可以保护发送给机器人的指令，避免指令被他人操纵，而授权机制则可以避免机器人执行错误指令。机器人是为生产过程的一部分，安全机制可以防止其在有线或远程软件更新期间被操纵。用户和新增组件也需要进行安全认证，以阻拦未经授权的访问。

机器人必须经过校准才能正常运转。然而，如果攻击者操纵了校准，机器人的运动范围将有可能超出编程设置。

这就是安全和安保的交汇之处——没有有效的安保保护，功能安全就不存在。这是未来系统的一个关键要求，当前的解决方式是采用具有硬件安全模块（HSM）等功能的特殊安全控制

器或微控制器。由于安全功能是在硬件中实现的，用户只需掌握极少的加密技术知识。此外，这对现有软件的影响极小。

自动化设备和机器人只有在功能良好的情况下才能顺利地完成工作，因此需要定期维护。但关闭机器、进行维护会占用宝贵的生产时间。此外，鉴于生产过程中的具体负载配置要求，自动化团队可能会更换掉仍能正常工作的部件，造成大量本可避免的损失。

机器人能发出多种信号，供我们诊断其“健康状况”。例如机器人运转声音发生变化或出现轻微震动是电机、齿轮箱或轴承

需要维修保养的迹象。例如，功率消耗轻微且有规律地上升，可能是机械阻力增加的迹象。可能是由于轴承即将失效，导致电力系统比平时消耗更多的电流。半导体行业已有利用性质独特的硅制出的、价格低廉的微型传感器，用于测量各种各样的信号。拥有了低成本但高质量的传感器，我们势必要在机器人上搭载一系列传感器，来监测其健康状况。例如，温度、振动、噪音、定位和运动、加速度和测力传感器可集成于机器人的关节中。其中许多传感器已经可以在机器人内部找到，因为它们是实现机器人及其他机器的预期功能所必需的。但

除此之外，共同监测所有传感器，就可以像拥有直觉的人类一样，识别潜在的早期故障迹象。

要使这种持续的监测发挥作用，还需立即评估监测结果，找出待处理的故障。微控制器可用于收集、预处理和评估数据。这些微型数值运算器具有连接各传感器所需的所有数据接口，可集成在机器人关节中。各传感器的信息融合后，可在芯片内进行评估，也可以利用工业 4.0 数据网络传递给中央计算机。通过不断检查机器人的信号，人工智能系统能够突出显示超出预期限制的参数，提醒维护团队检查机器人是否过度磨损。人工智能系统

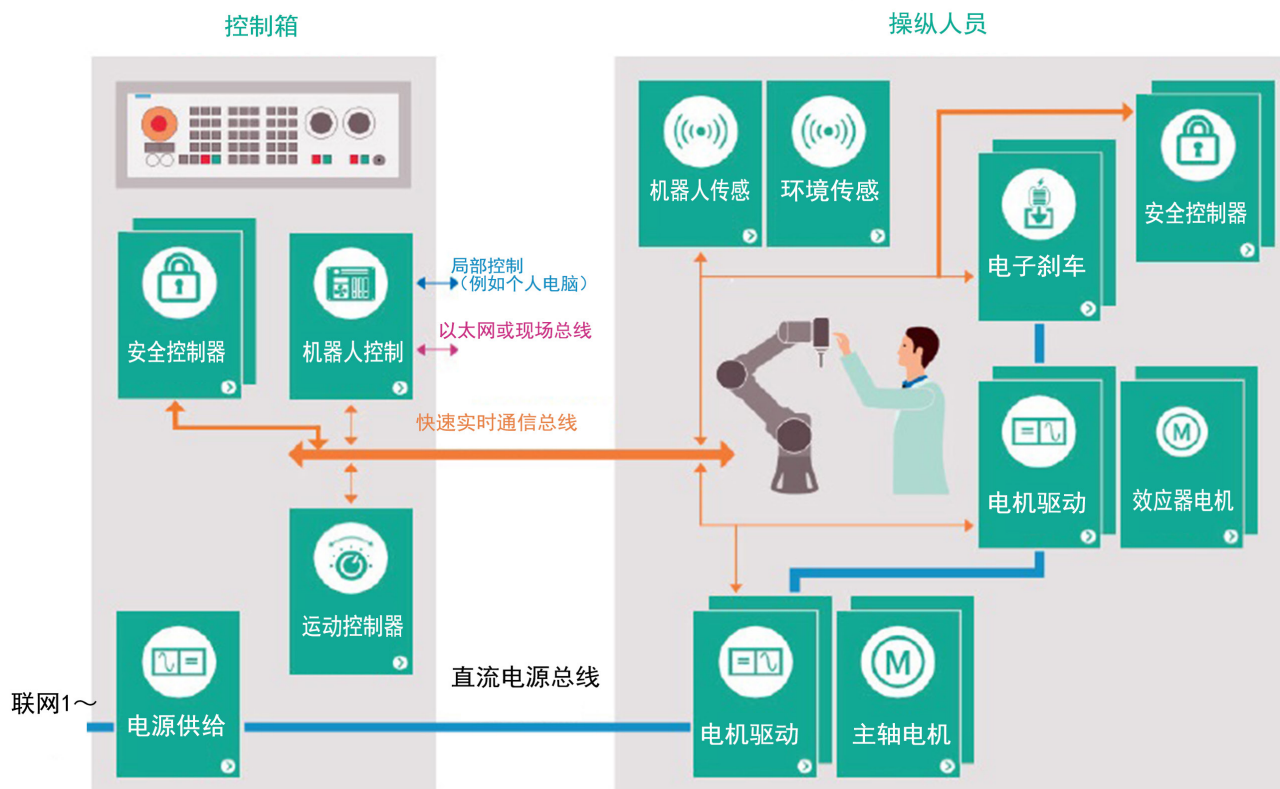


图 19 带有传感及安全组件的 CoBot 结构 (来源: 英飞凌公司)

将连续传感和数据分析相结合，可以在机器人以及其他生产系统中实现状态监测和预测维护解决方案，从而实现各类设备的高可用性。因此，机器人需要配备能够探测周围环境的传感器。雷达、3D 成像器等技术是基于飞行时间原理的，可发挥“眼睛”的作用。微机电系统（MEMS）麦克风可给机器装上“耳朵”，压力传感器则给机器提供一种“感觉”。机器人对环境的可靠“理解”进一步保证了人类同事的安全。

4. 德国案例研究：学习型工厂

学习型工厂通常用于教育、培训工人，旨在帮助工人掌握创造先进生产环境所需的新技能。生产技术迅速吸纳了信息与通信技术的概念，并采用新的生产模式，如增设制造机器人、协作机器人。未来，生产形式的变化会愈发频繁。在生产环境中进行能力建设的需求不断提升，这也将影响到人机交互的新形式。

学习型工厂提供了教育、培训的新方法，弥补了高等教育和工业培训中传统的教育、培训概念的缺失。新方法结合了教育和培训这两个概念，将由研究驱动的、最先进的解决方案与竞争性生产中的产业战略相结合。学习型工厂主要目的是增强人类在先进价值链中的作用。

随着信息通信技术对生产技术的影响越来越大，在信息通信技术驱动的生产环境中，培训工人跟上高速发展的动态、跟上新形式的人机互动变得愈加重要。

对社会 4.0 而言，终身学习和高水平的教育或技能提升发挥着关键作用。然而，终身学习也需要升级技能和创造更多能力的场所。这些场所需要建立在物理空间、信息空间，或两者结合，打造信息物理教育和培训环境。学习型工厂代表了这样的信息物理教育培训环境，专门支持终身学习。

学习型工厂的一个实际案例是 ETA 工厂，由达姆施塔特工业大学生产管理、技术与机床研究所的能源技术和生产应用（ETA）跨学科研究小组发起。作为真正的研究工具，ETA 工厂不仅提供了良好的研究机会，还提供了学习环境，在这一环境中，从工业

和教学中所获得的见解得以传递。ETA 工厂的生产车间由两条完整的价值链组成，可以生产小规模、面向市场的产品（见图 20）。

近年来，越来越多的学习型工厂或实验室得以建立。在德国，学习型工厂的概念也已经被采纳并付诸实践。例如，工业 4.0 平台提供的《工业 4.0 地图》列出了在工业 4.0 背景下已经实现的用例、测试床和支持服务。它展示了由公司（如 SAP、Festo）或科学与公共机构（如卡尔斯鲁厄理工大学生产科学研究所（wbk）、弗劳恩霍夫 IGCv）发起的学习型工厂的各种倡议、活动和实施内容。

一般来说，学习型工厂的概念不仅存在于生产现场，也可以转移到所谓的学习实验室和学习小组。因此，这个词也可以引申为以人机交互话题为主的学习场

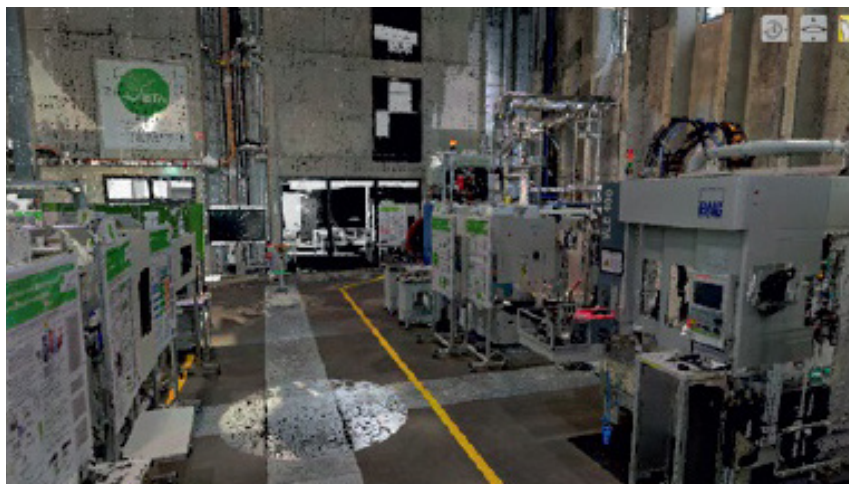


图 20 信息物理教育培训环境（来源：达姆施塔特 ETA 工厂）

所。

5. 德国和日本合作案例研究：DFKI 与日立——工人行为的识别、评估与转移

老龄化和出生率下降是欧洲、日本等成熟社会最大的社会问题。特别是对于制造业企业来说，有经验的工人是强大的行业支柱，他们的退休是一个严重问题。因此制造业急需一种能够利用专家的知识经验帮助新工人的技术。对工人（无论是人还是机器）的行为识别可以在支持工厂工人方面发挥重要作用，例如，质检、事故风险降低、工人健康维护以及机器、专家、新手间的知识传递。

将行为识别模式应用于不同工厂的主要困难在于工厂之间行为的多样性。由于要识别的重要行为因工厂而异，目标行为也因工厂而异。此外，即使部分工厂的目标行为相同，其在各工厂的表示方式也可能不同。例如，在

工厂 A 中，“检查手册”的行为可能是指工人从纸张上阅读的情况，但在工厂 B 中，它描述的可能是工人通过显示器，阅读数字化手册的情况。在这种情况下，所使用的传统方法需要为这些工厂创建单独的识别模式，因为为一个工厂创建的模式不能用于另一个工厂，即使在这两个工厂中，目标行为具有相同的名称——“检查手册”。换言之，若要使用传统方法，必须为每位客户创建定制模式。

此外，即使定制模式开发成功，也缺乏进一步修改的灵活性。例如，如果在定制模式开发完成后，工厂 A 引入了读取数字化手册的显示器，就需要收集大量新引入“检查手册”行为的数据，开发新的定制解决方案。同样，这些系统做出的任何决策都没有给出解释，比如为什么要做出某项决策，这一点至关重要，尤其是在人机协作不可或缺的环境下。

本研究的目标是开发一个易

于部署的人类行为识别模式，该模式可以作为标准解决方案应用于不同的工厂，无论工厂的定制模式有限还是没有定制模式，从而进行低成本部署。此外，向人类解释机器的决策是这种方法的重要组成部分。

其核心思想是基于简单组件的组合来识别复杂的行为，如行为中涉及的动作和对象，并以视觉和文本形式向人类解释其识别过程。

我们使用了两个可穿戴式传感器。一是智能眼镜，或者说是眼球追踪器，带有一个摄像头，可提供工人的视野。二是佩戴在身上的运动跟踪传感器，为臂带式传感器或全身式传感器。这些传感器分别用于识别被观测的对象和基本动作。虽然很多传统系统都采用固定摄像头作为传感器，但固定摄像头往往受到遮挡和视角的限制，因此可穿戴式传感器更适合复杂的工业环境。

我们假设，即使不同工厂对行为的表述可能不同，但不同之处在于动作和对象的组合方式（统称为“基础”）。换句话说，我们假设“基础”，即动作和对象的识别模块，可以在不同的工厂通用。

图 22 提供了对拟议模式的概述。假设一个新行为可以由预定义的基本动作和对象的组合来表示，该框架能够识别新行为，而无需耗时的再训练过程。在这

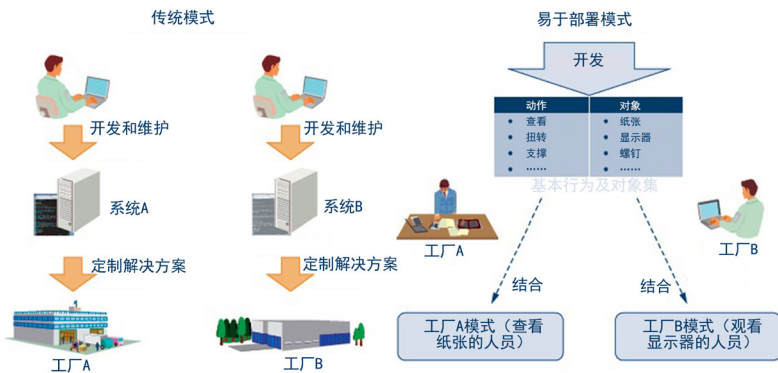


图 21 传统模式 VS. 易于部署行为识别模式（来源：DFKI）

里，“动作”被定义为身体部位的简单运动，如“抬起手臂”、“弯腰”，而“行为”则被定义为一个基本动作和一个对象的组合。这两种动作的识别决策，以及视线引导下的对象检测，都有视觉和文字解释作为支撑。在人与机器近距离工作时，这些解释对建立人对机器的信任起着至关重要的作用。

在上述“检查手册”行为的示例中，可能出现的动作是“查看”，工厂A中可能的对象是“纸张”，工厂B中可能的对象是“显示器”。通过将复杂的行为分解成更简单的动作和涉及的对象，中间识别模块“查看”便可以应用于两个工厂。通过这个框架，可以实现对不同工厂多种行为的识别，无需定制，但具备充分的解释。

该系统引入了一种基于可解释动作识别方法的深度神经网络（DNN），该方法利用可穿戴式传感器和视线引导对象识别的方法来识别行为。实验结果表明，该方法的效果与传统方法相当，准确率达到90%以上。

通过开发易于部署的可解释行为识别系统，我们将在培训、指导、控制和降低风险方面为各制造业工厂的大量工人提供支持。

6. 结论

本文重点讨论了劳动力日益成熟、机器和基础设施日益老化等因素带来的社会挑战，讨论了如何定义这些问题，并通过德国和日本的应用案例探讨了人机互动的新方法。CPS、AI和机器人等数字技术有望帮助解决这些社会挑战。这些技术可以执行原属于人类领域的例常性认知任务，因此，应用这些技术也会对社会转型产生影响。

为建立可持续发展社会，人类必须不断创造高附加值的工作，并具备随时从非高附加值工作转向高附加值工作的能力。同时，机器不仅要能进行非高附加值的工作，还要做到通过与人类的不断互动，成为创造高附加值工作的机制。根据这些要求，数字化转型可以实现以人为中心的

新型制造体系，在这一体系中，人类专注于终身技能的提升，不断创造高附加值的工作。从本质上来说，这个系统振兴了人机交互，使人和机器能共同在数字化社会中发挥作用。

最终，我们应该致力于强化数字社会的公共利益，分享从人机互动中获取的知识，建立以人类福祉为中心的可持续发展社会。本文呼吁建立调解过程，鼓励社会考虑、讨论未来的情景和行动。

基于多个国家案例研究，我们观察到德国和日本是如何用数字技术改变传统人机互动的。如上一章所述，新的人机互动模式——以互助为目的进行调整的社会调解过程，正在开发中。然而，将人机互动的经验作为社会集体智能进行存储的机制，以及利用集体智能提高人机性能的尝试，在两国都还没有探索出来。为实现这种可能，有必要建立机制和规则，以便在个人、地区、工厂、公司、国家、世界等不同层面实现经验共享。

德国和日本之间的这一合作项目颇有价值，因为我们已经认识到两国在处理当前问题方式上的异同。尽管两国的目标相似，但其各自的历史背景和社会结构正在影响它们的方法和重点领域。最后，我们鼓励各国在努力建立可持续发展社会的过程中保持开放的讨论。**MT**

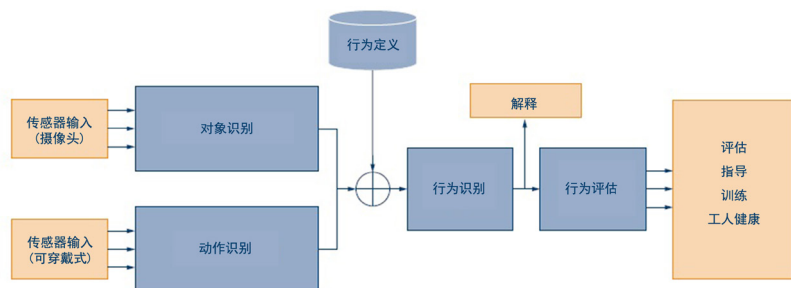


图 22 框架总览 (来源: DFKI)

全开放的工业自动化系统正喷薄而出

——论 IEC 61499 的历史责任和应用前景



上海工业自动化仪表研究院, PLCopen 中国组织 彭瑜

一、自动化先贤的预言正在实现

发端于 1969 年的 PLC 问世和 1975 年推出第一套 DC 之后, 经过几年的实践, 在 1980 年被美国一个自动化大师发现, 由于缺乏一种能完整规范控制系统配置和组态的语言, 不同自动化制造商的产品互不兼容, 产生了一个巨大的壁垒。他预言, 如果能开发出这样一种自动化的语言, 一定会给最终用户带来各种利益, 诸如应用程序的可移植性、系统的互操作性、工厂生产的灵活性, 以及自动化控制系统投入现场调试前的验证。

40 年过去了, 自动化领域的学者和工程师们为了实现当年大师的预言做了许多工作。而这些成果的顶端应该就是 IEC

61131-3 和 IEC 61499。其中大部分成果已经融合到自动化的软件产品和平台中, 也有一些开源的实现(如 Eclipse Foundation 的 4DIAC 开源项目)。

进入 21 世纪的第二个十年之后, 工业界对于全开放控制系统的呼吁和诉求也日益强烈, 以至于在 2016 年由最终用户倡议并积极组织开展下一代开放自动化系统 OPA 的标准化活动。这一标准化活动的鲜明特色除了充分吸收和继承工业标准的已有成果, 以及对一切利益攸关者都持开放态度而外, 从一开始就十分注重结合实际的验证工作, 标准的制定必须经得起测试床的测试和工业装置中试的检验和验证。OPA 的一个目标就是要大幅提升控制设计软件平台, 而不再采用今天 DCS 运用的专用的功能块和软件

工具。埃克森美孚(ExxonMobil)和洛马(Lockheed Martin)曾在 2017 年指出: IEC 61499 看起来可能解决这个目标。不过当前只有少数(区区 5 个)的工业控制软件实现或部分实现了 IEC 61499 标准。这个技术成熟吗? 有哪些实践能够最大化地实现最终用户的应用程序及组态信息的可移植性?

与此同时, 同样在 2016 年, 在意大利, 发起了面向中小型制造业 Daedalus 项目, 积极开拓和尝试将 IEC 61499 分布式智能控制系统用于离散制造。

显然这两个项目在未来开放自动化的方向上形成了互补的局面, 虽各有侧重和所长, 但其理论和实践的基础都是 IEC 61499。

二、IEC 61131-3 和 IEC 61499 的组合满足全开放自动化系统的新要求

IEC 61131-3 已经为工业界广泛接受，可能是因为它开发较早，没有反映软件工程之后发展的成果，它在概念上没有支持重新配置 (reconfiguration) 和分布式控制。另外，IEC 61131-3 的局限性在于它的软件模型是面向单个设备的，其顶层就是设备 (Device)，没有系统的概念。

随着智能制造的发展，未来的自动化系统把移植性、可配置性 (configurability)、互操作性、重新配置和分布式作为高层次的要求而专门列出。显然 IEC 61131-3 不能满足当今复杂工业系统的新要求。为了克服这些局限，IEC 从 2000 年开始开发了 IEC 61499 标准，历经多年时间发布了标准的 4 个部分，但在第二版时因已经出版了不少诠释该标准的技术书籍和论文，撤回了 IEC 61499-3，所以现在只有 Part 1 分布式和嵌入式控制和自动化的开放架构，Part 2 软件工具，Part 4 功能块符合要求的行规，基本上用成熟的技术赋能于各个领域的智能自动化。据悉 IEC61499-5 正在准备中。

关于 IEC 61499 的开放架

构，上海交大戴文斌老师对此有个精辟的概括：“IEC 61499 基于工程师熟悉的方框图，将功能块 (FB) 从 IEC 61131-3 中的子程序结构扩展到分布式计算系统中的功能单位，通常作为系统级可执行建模语言使用。其核心是事件触发的功能块网络，功能块为逻辑代码提供统一接口封装，功能块之间通过事件和数据接口相互连接。”

IEC 61499 具有以下主要的特性：

- 建立在现有的领域标准的基础上
- 现代的事件驱动、面向对象的开发语言
- 硬件抽象
- 通过连接功能块以直觉图形的方式对控制算法建模
- 直接支持分布式系统的实时通信
- 不同供应商的设备可互操作
- 自动管理资源之间低层级可变化绑定
- 基本支持再组态

IEC 61499 第一个工业实现是 ISAGRAF，但它并不是这一国际标准的全面实现。它没有实现所有的 IEC 61499 的规范，而是由于市场驱动的原因，在实现 IEC 61499 标准时采取了有选择的优先目标，将主要的注意力集

中在扩展其工具链的系统级工程能力，而不是达到较低级别的代码的移植性（通过运用 XML 作为程序的表达）。因此，这一工具链在大型复杂的应用程序进行分布式部署时具有显著的能力，但语法及其表达却是专用的，并不能在此级别与其它的 IEC 61499 的工具软件相兼容。与传统的 IEC 61131-3 运行环境兼容也影响了 ISAGRAF 决定采用时间执行模型，而不是 IEC61499 标准的事件驱动的执行模型。

不过这一标准自发布以来，特别是 2005 年至 2014 年这九年间，并没有获得工业界的广泛接受，即使是在学术界做了大量的研究和开发，发表了数量不菲的论文和专著，情况也没有大的改观。比较多的意见集中在 IEC 61499 的几个目标如移植性、可配置性和自动化系统的互操作性并没有被完全证实。看来确实存在若干误解。究其原因一方面是因为标准的制定及其实现和实施之间，肯定会存在一个滞后的开发周期；更重要的原因是技术上的成熟和市场力量的推动还没有大到足够的火候。值得钦佩的是在较为艰难的发展中 IEC 61499 标准制定的牵头人（也是 IEC 61131-3 国际工业控制编程语言标准制定的主导人员）James H. Christenson

创立了 Holobloc Inc, 无偿提供 IEC61499 的开发包; 还有 Eclipse Foundation 的 4DIAC 开源项目, 培育了对 IEC 61499 进一步的开发应用。在奥地利注册的 NXTcontrol 公司坚持了十几年, 在 4DIAC 开源的基础上为 IEC 61499 的应用开发平台和产业化做了不少有效的工作, 2009 年就与三菱电机的德国分支合作, 在三菱的 PLC 中装载了 IEC 61499 的软件。他们在欧美工业市场应用上辛勤耕耘, 给予埃克森美孚有关技术管理人员深刻印象; 他们还吸引了施耐德的眼光, 在 2017 年收购了这一很有潜力的小公司。

据 ARC 的资深分析专家分析, 施耐德之所以青睐 NXTcontrol 是因为他们在 IEC 61499 实际的工业应用领域 (而不是科学研究) 积累了许多经验。为了开发应用基于 IEC 61499 的软件产品, 他们遇到了 IEC 61499 的长处、短处和不能容忍的问题。NXTControl 的客户主要是 OEM、集成商, 楼宇自动化 / 能源管理是他们的最大多数的应用案例。而施耐德在 2016 年发布了有远见的自动化组态工具 Prometheus, 这一工程平台软件在功能性上与 NXTcontrol 的产品十分相似。将这两个软件整合, 创建一种使软件独立于硬件的工程平台, 这大

概是主要的价值所在。

今年 7 月, 美国 automation.com 的主编 Lydon 曾发表过如下的判断, 早期 IEC 61499 的开发由于技术上的约束, 难以被广泛采用。随着技术的进展, 基于 IEC 61499 的软件平台在原则上解决了不同供应商之间软件对硬件的移植性、可配置性和互操作性的问题, 从而使软件与硬件解耦。同时通过适当地调配和组合基于时间扫描的机制和基于事件的机制, 可以方便地使自动化系统采用来自 IT 领域的最佳实践, 易于与企业的管理系统接口。而且为了让传统的 PLC 和 DCS 系统继续在开放自动化系统中发挥作用, 正在开发与 IEC 61499 兼容的包装软件 (wrapper)。像 OPAF 和 NAMUR 这样的最终用户组织, 正在推进

改变现有专用的硬件与软件捆绑在一起的控制系统的范式。施耐德作为跨国的工业自动化主要供应商热衷于基于 IEC 61499 的开发平台, 谋求在开放自动化系统的方向重塑工业自动化系统的视界, 这一趋向表明 IEC 61499 的工业应用正在进入关键的发展阶段。

三、实现移植性、互换性、互操作性的实践

按照 James H. Christenson 在其撰写的《What is IEC 61499》文章中的定义, 移植性是指一个软件工具能接受和正确解释由另一个软件工具编写的软件部件和系统组态; 互换性是指嵌入式设备能与其它设备一起

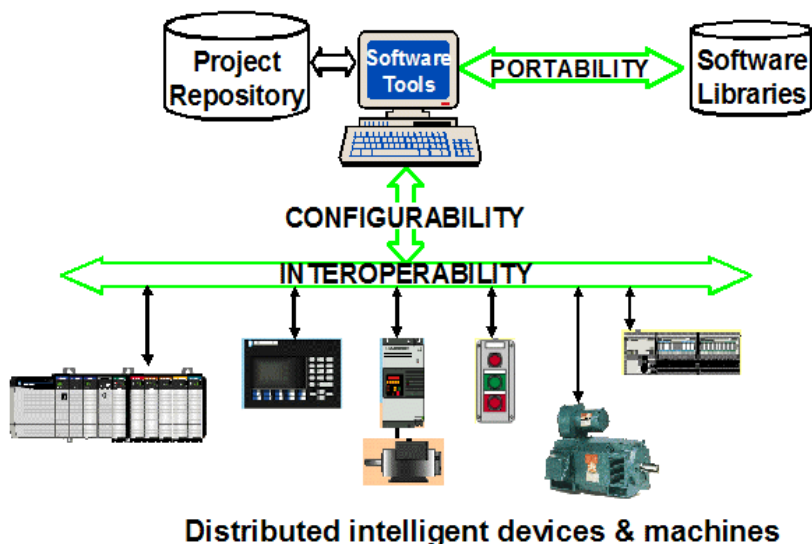


图 1 移植性、互换性和可配置性的图形解释

运行操作，执行并完成分布式应用程序所需要的功能；可配置性是指任意设备及其配备的软件部件能被软件工具与多个供应商提供的设备及其配备软件进行配置。详见图 1。

开放流程自动化 OPA 有四个关键概念：互操作性、互换性、组态的移植性、应用程序的移植性。在新开发的标准中 OPAS V2.0 和 V2.1 (关于组态的移植性) 着重于对不同的自动化部件和系统进行控制策略的移植。在 OPAS 的标准中，所谓的移植性是指从软件供应商购买的应用软件，能按照应用的许可协议在一个公司内部的各种控制系统之间移植。如果经过最终用户的识别、判断和采纳，就可以将他们的知识产权 IP 以控制策略的形式进行移植。V2.0 和 V2.1 中用到的已有标准包括：IEC 61131-3 (用于控制概念)、IEC 61499 (用于执行协调) 和 IEC 61804 (用于功能块)。未来的 OPAS V3.0 将着重于应用程序的移植性。

为了验证 OPA 的关键概念，ExxonMobil 在洛马的配合下建立了一个系统集成实验室，共有 10 家公司 (ABB, ANSYS, AspenTech, Inductive Automation, Intel, nxtControl, R Stahl, RTI, Schneider Electric 和 WindRiver) 提供了供集成的软件、

硬件等部件。目标是探索关键技术的可行性；建立由多家公司提供的硬、软部件集成的系统。采取的方法是：利用现有的标准 (OPC UA、DDS、IEC 61499 等)；启动时先用实验室的部件树莓派；然后集成各公司提供的工业用部件；各种功能分布在不同的部件中。图 2 给出 OPA 为验证关键概念的测试结果。

图 2 中右上图描述组态的移植性。原系统组态 DCN 3 使用 4DIAC 控制软件，硬件采用树莓派。如果我们想通过组态的移植性操作，将 DCN 3 改用 NXTcontrol 的控制软件。操作按以下顺序进行：先将 4DIAC 的组态信息输出到基于 XML 的移植软件，再由该基于 XML 的移植软件输入到 NXTcontrol 控制软件的组态管理程序中。接下去由

NXTcontrol 控制软件对硬件树莓派进行部署，使之成为 DCN 3 的执行部件。于是原来 DCN 3 的硬件执行 4DIAC 的 Runtime 改为执行 NXTcontrol 的 Runtime。

图 2 中左下图描述应用程序的移植性。将在实时先进计算平台中的 NXTcontrol 基于 IEC 61499 的应用程序 PID (虚拟 PLC) 重新配置到 DCN 1 (采用 Intel 的硬件) 中，并部署该 DCN 1 执行基于 IEC 61499 的 PID 应用程序。

图 2 中左上图描述 OPA 系统中的互操作性。图中运行在实时先进计算平台中的 ABB 的软控制器 (虚拟 PLC) 其 I/O 使用的是 STAHL 的远程 I/O 模块。ABB 的软控制器对由 NXTcontrol 构成的 DCN 2 机型控制。DCN 2 的数据送到装在实时先进计算平台

OPA Proof of Concept Key Results

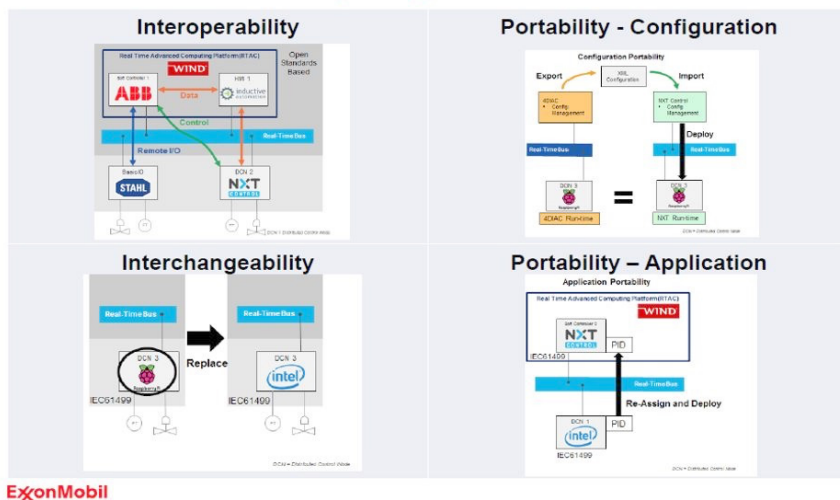


图 2 OPAF 关键技术的验证 (来源: ExxonMobil)

中的 HMI 1 软件（由 Inductive Automation 公司提供），而且同处在先进计算平台中的 ABB 软控制器也与 HMI 1 软件交换数据。

图 2 中左下图描述 OPA 系统的互换性。图中用树莓派 CPU 板构成的 DCN 3 来取代原来用 Intel 的 CPU 模块构成的 DCN 3。要注意的是这两个硬件板都联接在实时总线 OPC UA 上，而且其中都装有基于 IEC 61499 的控制程序。

以上实验验证了开放流程自动化系统 OPA 的几个关键技术，之所以能取得符合要求的结果，重要的原因在于基于 IEC 61499 的软件工具已臻于成熟。

四、异军突起的 CPS 产品化——Daedalus 项目

2016 年在美国倡导开放流程自动化 OPA 的同时，在意大利也发起了面向中小型制造业 Daedalus 项目，积极开拓和尝试将分布式智能控制系统用于离散制造。

工业 4.0 要求生产系统中各种管控环节能进行纵向集成、横向集成和端对端的集成。有什么创新性的技术具有所需要的互操作性、模块化、可扩展性，从而能支持实现 CPS，达到同时支持

横向集成和纵向集成呢？同时，如何让 CPS 从概念发展成为产品？

CPS 自动化开发要求专门构想一种面向对象的方法，而 IEC 61131-3 属于 90 年代的技术，虽然在 IEC 61131-3 的 2013 年修订版增加了面向对象的新条款，但其 5 种编程语言如何运用面向对象，还有待于开发和实践。IEC 61131-3 的软件模型不是建立在系统的基础上，而是定义 PLC 设备的软件模型，即使这个 PLC 设备是个有多个 CPU 的系统，但仍然属于多核集中于一个设备中的范畴。何况现代化的软件工具应该是全部基于事件驱动的，而当前 PLC 的编程是严格按照时间驱动的范式。必须对 CPS 的分布式智能进行编排才可能取得复杂的行为特性，而很难采用 IEC 61131-3 能直接开发分布式智能控制的应用。

那么有没有可能利用现有的一些技术标准和平台呢？面向服务的架构 SOA 是一种可能的方法，OPC UA 可用于这一场景。但 M2M 要求快速的实时通信，至少到目前为止 OPC UA 延伸到现场层的技术还处在开发之中。数据分发服务 DDS 标准为分布式设备之间的通信提供一种高性能、且信息安全的实时中间件，但它只能处理通信的事务，而不能处

理工程事务所要求的智能。可扩展的消息处理和参与协议 XMPP（eXtensible Messaging and Presence Protocol）为实时的分布式消息传输提供一种信息安全、且可以可扩展的方法，但它需要与其它的顶部平台集成。

以上这些技术方法好像都不合适，那么 IEC 61499 这个从 2005 年就出现的标准能不能承担这个重任呢？IEC 61499 作为系统级由事件驱动的建模语言，和 IEC61131-3 组合，可以开发出一种分布式集感知、认知、控制、通信、仿真、按工程要求能进行动态编排的综合工程平台，才有可能把 CPS 从概念演化为产品，并且将不同的机电一体化的 CPS 产品组合编排为更为复杂的 CPS 系统，构成智能制造的生产线或大型制造装置。

由欧洲 IEC 61499 能力中心（the European Competence Center）发起的 Daedalus 创新计划，其中基于 IEC 61499 的控制和仿真平台的基础是位于意大利米兰的国家研究委员会（National Research Council, CNR）下属的 Institute of Industrial Technology and Automation（ITIA）几位研究人员开创性的工作。他们对 IEC 61499 加以扩展，引入模型预测控制（Model Prediction Control），构建了

适于离散制造分布式控制系统的平台，尤其是将 CPS 的概念具体落实为 CPS 的机电一体化的设备产品，并发挥 IEC 61499 的面向对象、事件驱动的互操作性开发语言和由此实现设备互操作性的优势，将各种机电一体化的 CPS 设备按照生产线的要求连接为符合工业 4.0 基本属性的生产系统，支持了自动化金字塔向分布式面向服务的制造网络的转变。

实现 CPS 产品化的途径是需要定义一个 IEC 61499 的 CPS 控制器（见图 3），其控制对象是机电一体化的设备和自动化的设备。它基于 IEC 61499 的实时通信赋予 CPS 系统感知和认知功能性的实施，它面向服务的接口赋予与其它自动化层级在任意时刻全双工的无缝连接。这样形成了

一个硬件与软件一体化的 CPS 产品。

但 Daedalus 项目的目标不仅仅是定义和开发 CPS 设备，它还需要开发一种实施复杂 CPS 系统工程环境。从现代开发语言来讲，IEC 61499 是面向对象、具有互操作性的基于事件的建模语言，而 Daedalus 平台要求一种开发 CPS 集成开发环境 IDE 的参考实现；从互操作性实时的中间件来讲，IEC 61499 给出了实时和预定义的拓扑，而 Daedalus 平台要求以严格的实时实现自动发现（auto-discovery）和自动绑定（auto-binding）；从编排开发架构来讲，IEC 61499 可对分布式设备进行监控型编排，而 Daedalus 平台要求软件开发包 SDK 能实际优化的分布

式解决方案；从 CPS 的界面来讲，IEC 61499 可以实现 CPS 的界面，但并不去定义这种界面；而 Daedalus 平台要求把自动化对象加以扩展为包括具有行为模型的 CPS 界面；从实现 CPS 产品化的机制来讲，IEC 61499 仅仅通过非实时总线来实现，而 Daedalus 平台要求对传统的和/或专用系统进行硬件/软件的包装（wrapping）。

Daedalus 项目旨在提升 IEC 61499 的功能性，使它能用来成为实现 CPS 的功能模型，这样便能连贯一致地执行本身的自动化任务的同时，并能在任意时间为自动化金字塔中其它层次的部件和组件提供必要的服务，使自动化任务与为其它部件的服务协调一致。Daedalus IEC 61499 CPS

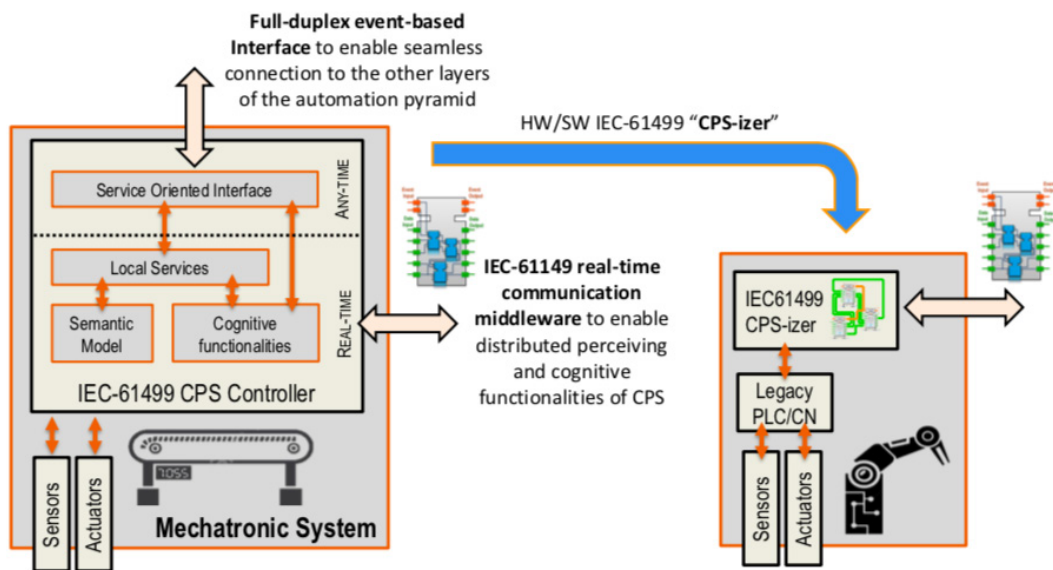


图 3 基于 IEC 61499 的控制器实现 CPS 概念的产品化

不仅包括控制算法而且还包括系统的其它数字化部分，例如 HMI、行为模型和硬件抽象。其集成的面向服务的接口能够完整地利用 CPS 的虚拟化智能概念，加强与其它数字化模块的连接，例如为将仿真模块提供服务。工作重点 是定义 CPS 内的认知功能、系统编排功能、优化控制。在先进控制策略中模型预测控制可以改进优化系统性能的能力，而同时对过程的约束施加显性的影响。由于本项目着重于制造工程的离散性质，故采用实施混合 MPC (Hybrid MPC)。为描述连续变量和离散 / 逻辑变量的相互作用采用混合的框架。Daedalus CPSs 可采用递阶多层次聚合来构成复杂的系统，并且表述完整的生产单元和生产线。在每一个 CPS 中都包含智能的性能，使它们能协调地聚合为一个复合的 CPS 系统。为了控制一个大的装置或一个复杂的网络，需要用到像 MPC 这样的优化的控制技术。Daedalus 计划有一个重要的工作内容是推出一个软件开发包 SKD，与 IEC61499 的集成开发环境 IDE 集成，以支持自动化工程师在优化编排器中进行设计（详见图 4）。说得 更明白些就是 CPS 的范式导致新一代基于知识的解决方案，具有在一个复杂的结构实时框架中集成和处理所有

工厂层的数据，从机械控制系统到车间工厂的监控和生产计划。显然 Daedalus 的解决方案超出了现有的 PLC 的限制，创建新一代的嵌入式控制设备，显露出采用全分布式控制架构，并建立不同控制层级之间（即由 ERP 通过 MES、SCADA 和 DCS 到现场）的深度连接的潜力。这一方法对于工业自动化必定会有高光的表现。因为迄今为止生产线自动化通常还是按经典的 ISA 95 金字塔的

演变在构建，不同层级按递阶多层的架构连接，而不是按协调的关系连接。Daedalus 的方法可以让具有分布式智能的生产线的不同层级进行全集成。显然 CPS 的概念能引导工业朝向工业 4.0 的范式演进，其中生产线的每一个部件都是智能的具备 CPS 的基本特性，而且都能够与所有的控制层级直接通信。

Daedalus 项目开发内容（见图 5），包括 IEC 61499 集成开

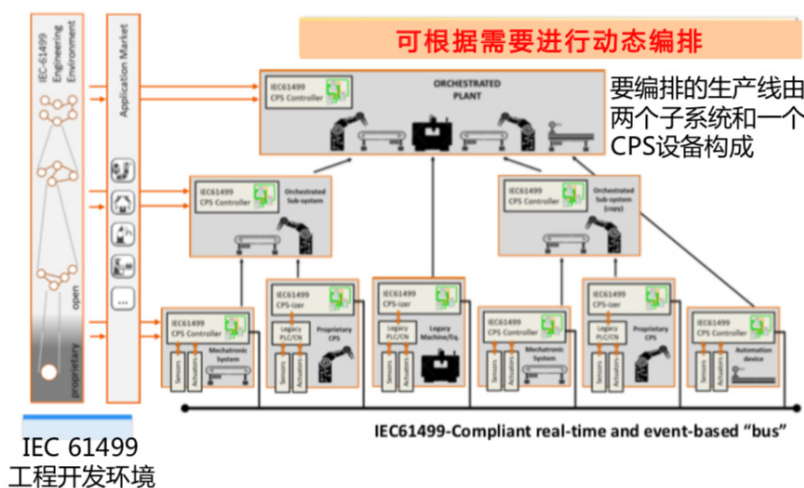


图 4 对分布式智能设备进行多层次递阶编排

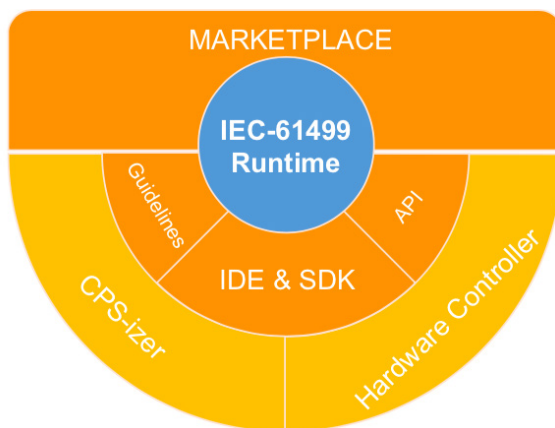


图 5 Daedalus 项目开发内容

发环境 IDE 和 SKD, IEC 61499 有线 / 无线分布式 RUNTIME, IEC61499 参考控制器, IEC 61499 参考 CPS 设备, IEC61499 仿真框架, 参考自动化 App 商店。

五、期望更多中国公司利用自动化发展的难得机会

总的说来, 一些自动化公司已经把 IEC 61499 标准列为优先考虑的开发事务。这是因为标准着重于开放的解决方案, 极大地简化了复杂性, 并降低了实现分布式控制系统联接性的成本。在传统的集中控制的领域, 配置和修改诸如 PLC 等工业设备的代码受到严格的限制。PLC 必须逐个地编程, 然后在系统的层次上确认这些 PLC 可以一起协调地相互配合。控制代码的可复用的程度很差, 这是一个很大的问题。IEC 61499 采用事件驱动的执行模型, 使分布式的控制逻辑得以实现, 执行过程中通信是自动构建无需专门处理。符合 IEC 61499 的软件工具通过配置、编程和数据管理的集成手段和工具, 将工程设计的成本大大降低。这表现为系统的所有功能 (包括控制、信息处理、通信和过程接口) 现在有可能不依赖于特定的硬件和操作系统, 也就是将应用程序与硬件

和操作系统解耦, 这将改变多少年来控制硬件与软件一直紧紧捆绑在一起的状态。这将突破用户需要更换一部分硬件、软件以至提供业务价值的功能性也随之要更换的局面。这种情形类似于当软件升级时相应的部分或者全部硬件也不得不更换。现在实施的工程不再依赖于任意特定的硬件和拓扑了。符合 IEC61499 的解决方案将软件与硬件解耦, 彼此独立。当控制系统需要升级的时候, 软件和硬件的成本很低, 而效率却很高。这种高级别的灵活性和敏捷性为智能制造的工程提供了基础。

使用一个软件工具可以解决所有的控制任务。通信的路径是自动生成的, 面向对象的工程设计可以通过预先做好的软件对象功能块来完成。编程语言与 IEC 61499 和成熟的 IEC 61131-3 标准完全一致。这意味着工程软件工具可在现有的已经安装的基础上将新的产品与老的设备加以集成。

值得指出的是, 现在在圈内人士中已经将 IEC 61499 称为可执行的系统级建模语言, 这主要是因为符合 IEC 61499 的应用程序本身就是按基于模型的系统工程 MBSE 建立的, 不必再通供模型的转换就可以直接被部署执行。这无疑比旨在建立 “自动化

的联合国” 的 OPC UA, 通过 OPC 的信息模型和各种类别的自动化场景结合的伙伴信息模型 (或称配套信息模型) 来实现 MBSE 来得简洁得多。

显然, 从现在起到未来的 5 至 10 年间工业自动化格局一定会发生大的变化。其中 IEC 61499 的潜在巨大影响我们绝不能低估。考虑到相当大部分国外的公还处在观望或刚起步的阶段, 这对于国产自动化工程软件应该是一个难得的机遇。因为运用 IEC 61499 开发控制工程的软件平台的技术我国还是处于前沿的。上海交大自动化系戴文斌团队长期耕耘于这一方向, 取得了很好的开发科研成果。上海乐异自动化科技有限公司已经能够提供基于 IEC 61131-3+IEC 61499+HMI 的运行 (runtime) 环境。只要在产业化的方向上进一步努力和积累, 找到具体落实的举措, 一个具有发展前途、而且又有自主知识产权的工程软件平台一定会出现在我国的工业自动化的领域。

期待我国有更多公司抓住机遇, 用这样的标准为指导, 用先进的 IT 软件技术来实现自动化软件的时代跨越, 那么在工业自动化软件领域取得令人鼓舞的进展和广泛实际应用是完全可能实现的。MT

从造得了到造得好，中国还需走几步？*



钛禾产业观察 李富强

明朝崇祯年间，中国江西一位名叫宋应星的县学教谕写了一本涵盖农工两业的“杂书”——《天工开物》，迅速成为当时的畅销书，并出口到全世界，给各国技术进步带来深远影响。其中《冶铸》《锤锻》《燔石》等篇章，图文并茂详解了工艺的选材、工具、步骤等，甚至已经有了定时、定量和成品率的概念，堪称现代工艺手册的雏形，县城老师宋应星，也因此被英国科学史家李约瑟誉为中国的“狄德罗”。

这本“杂书”发行之时，欧洲的启蒙运动才刚刚萌芽，美洲大陆正在打响持续百年的殖民地战争，日本江户幕府颁发了锁国令，实行了长达两个世纪的闭关锁国。但是由于书中含有“东北夷”、“北虏”等敏感词，这

本书在清朝乾隆年间成为禁书。一百年后，当欧洲开启如火如荼的工业革命之时，这本诞生在中国的科技著作，却被尘封在宁波

的天一阁里。

虽然书中大量记载的是古代手工业的生产工艺，与现代化生产定义的“工匠精神”存在一定

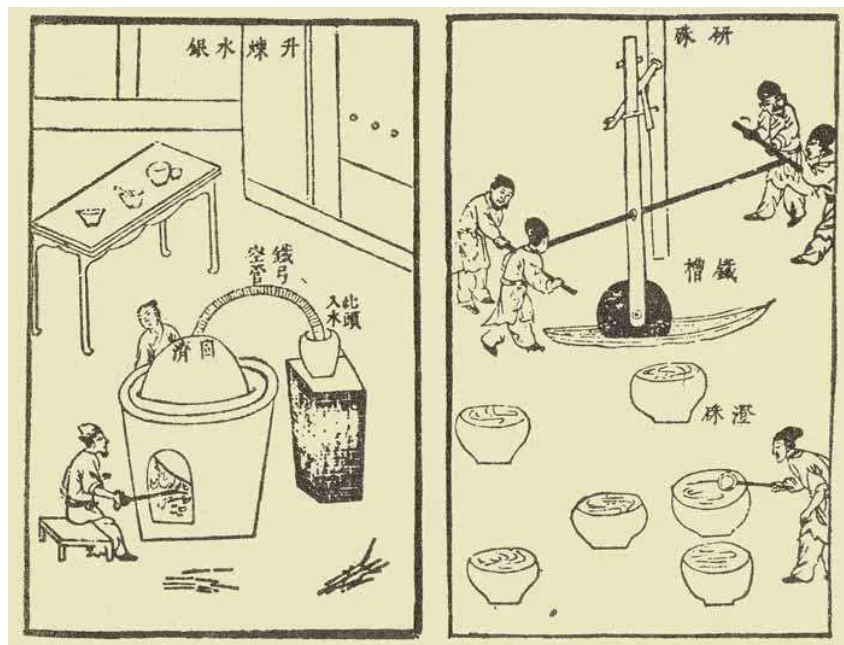


图1 《天工开物》插图，1673年初刊

注：本文来源于钛禾产业观察公众号，本刊获得授权转载。

差异，但起码说明，我们的老祖宗已经有了“精工制造”意识和传统，甚至在某些理论方面遥遥领先于世界。

后面的事情众所周知，世界科技进步的天平被工业革命的火车头碾碎，中国自此落后于世界。虽然新中国成立以后通过技术引进和自主创新，中国制造在许多领域已经逐步跨过“从无到有”这条河，正在攀登“从有到优”的高峰，但至今仍在奋起直追的道路上。

如今，我们可以造得出不同形态的材料，多种型号的机床，甚至实现了一系列重要装备从无到有的跨越，但国产工业品仍难以彻底甩脱“质次价廉”的标签——这其中的巨大差距之一，就在于工艺水平。当前，面对美国人发起的贸易战和科技封锁，中国已经可以凭借最完整的工业体系正面硬怼，但是摆在中国制造眼前的现实问题是，真正卡住脖子的并不一定是别人的锁喉大招，也可能是自己喉咙里的一根鱼刺。

一、什么是靠谱的产品？

2012年，刚刚接手华为手机事业部的余承东，面对的是一堆“山寨机”、“贴牌机”的标签，当时的华为手机在“中华酷联”四大国货品牌中销量垫底。

随后8年的智能机翻盘之路，华为团队不仅要努力提高产品的技术含量，更是要着力改善产品的可靠性，余承东不止一次在公开场合宣称：“要把华为手机的平均故障率做到三星苹果的十分之一。”好产品并不是全靠科技含量堆砌出来的。一个小小的质量事件就可能让整个产品线溃败。2016年，因为过于追求电池创新设计，而多次出现爆炸事故的Note7让三星公司元气大伤，即使日后攻关折叠屏黑科技，也因隆起、闪屏、黑屏等频频出现的故障问题导致口碑骤降，中国市场占有率从20%跌至仅有0.8%。

性能参数往往代表产品上限，而工艺水平则意味着产品底线。上限能说明你有多牛，底线则决定了你有多靠谱。

“国产不靠谱”仍然是至今常常在各行客户口中听到的刺耳声音——仔细分析这个不靠谱的原因，未必是国内厂家造不出合格的产品，而是成品率偏低，即使合格产品里面的性能质量也参差不齐。

2020年7月，中国第一个火星探测器“天问一号”发射升空，中国科技启航驶向浩瀚宇宙的更深处。这项历时4年的复杂工程，也是从最基础的航天材料和紧固件开始构建的。例如有着优越抗氧化性、耐腐蚀性的镍基高温合金(Inconel)，此前被用来制

作在发射平台上固定航天飞机的8个双头螺栓，也代表着超高的原材料生产加工水平。

Inconel合金也是航空发动机的重要原材料。航空发动机几千甚至上万小时的寿命周期，对材料的稳定性有着极为苛刻的要求。材料源头的性能稳定，决定了加工成型、试验验证的乃至维修维护的一系列问题。

以其中的Inconel718(国内牌号GH4169)钢棒为例，国内产品室温性能与国外产品水平相当，但个别元素最终成品含量、晶粒度的炉次间稳定性和高温性能却不如进口钢棒表现优异——同样是合格产品，国产钢棒离散系数要比进口钢棒高得多。

虽然偏差一定会存在，且在误差范围内的偏差都是被允许的，但是成熟的工艺会让偏差更集中可控。如果产品一致性强，偏差集中在某一个方向，可以在后续的工序中进行校正。而不确定的偏差则会遵循牛鞭效应，在零件加工、部件装配、成品装配环节中逐级放大，最终成品的性能将是离散和不确定的。

以上这段举例，翻译成一句话就是：打造一只完美的木桶，要先把每一块板都尽量打磨得没有瑕疵。

2018年，历来天马行空的乐高团队按1:1比例组装了一辆速度能够达到20km/h的布加迪Chiron跑车。除了轮胎是特殊材

料，这辆布加迪完全由超过 100 万个乐高 Technic 积木拼成，没有用到任何胶水，连装配用的电动螺丝刀都是“乐高版”。



图2 1:1 比例组装的乐高版布加迪 Chiron

拼插积木有很多，但敢用积木造一辆真跑车，还能上路行驶的只有乐高。这种底气，源于每块积木抽检中误差不超过 0.1mm 的一致性。

比较之下，目前许多国产工业品，在结构简单的场景中尚且堪用，但要支撑更加复杂庞大的高端制造体系时却显得底气不足、根基不稳。而当中国制造突破“造得了”的瓶颈，继续向“造得好”精进时，产品稳定性、可靠性将是我们向产业链高端爬升的持续保障。

卡在中国制造喉咙里的第一根鱼刺是“工艺”。要把这根鱼刺拔出来，大概可以分三步：

- 第一步：揪出细节里的魔鬼
- 第二步：技术管理并步提升
- 第三步：借助数字化的翅膀

二、检查：揪出细节里的魔鬼

德国工业巨头克虏伯公司奠基人阿尔弗雷德·克虏伯，在 19 世纪对工业生产提出了一项规定，要求每一个生产环节都要有细致规范的指引：“规则必须为每一种情况和每一道工序而制定，并且要制定每个人的责任与权利。”克虏伯公司出产的钢卷在高品质、高价格的细分市场始终占据主动。这位 14 岁就全权掌管企业的金牛座男人，正是靠着恪守纪律和严控细节，才带领克虏伯从一个濒临破产的作坊式工厂，成长为世界第一的军工联合体，并被视为德国重工业的缩影。

建筑大师密斯·凡·德罗曾经说过一句话叫“上帝藏在细节中”（God is in details），后来被人们引申成“魔鬼藏在细节中”，这句话也一度成为郭台铭最常挂在嘴边的口头禅——任你整体表现看起来如何完美，但隐藏在微末毫厘中的疏漏却是让千

里之堤溃散的蚁穴。

钛禾智库在长期的制造业调研中，见过“细节中的上帝”，见过“细节中的魔鬼”，也见过“把魔鬼变成上帝”。

2019 年，国内某铸件企业接到一项结构复杂的产品订单，技术团队日夜攻关，报废数次终于生产出一批验收合格的零件。客户加订两批，按照相同工艺生产的产品却均因化学元素不合格而报废。生意来之不易，厂里从上到下都很重视，新一批产品投产，领导各环节跟产——还是同样的工艺，这一批的化学成分又“神奇”的合格了。在对比前后几批生产数据后，复查结果浮出水面：不合格品在熔炼时长和浇铸温度均按照工艺的上限执行，致使一些金属元素在加热过程中过度烧损。出熔炼炉到浇筑的时间没有做出细致明确规定，导致液体与空气接触时间过长，又影响了氮元素含量。在找到问题的症结之

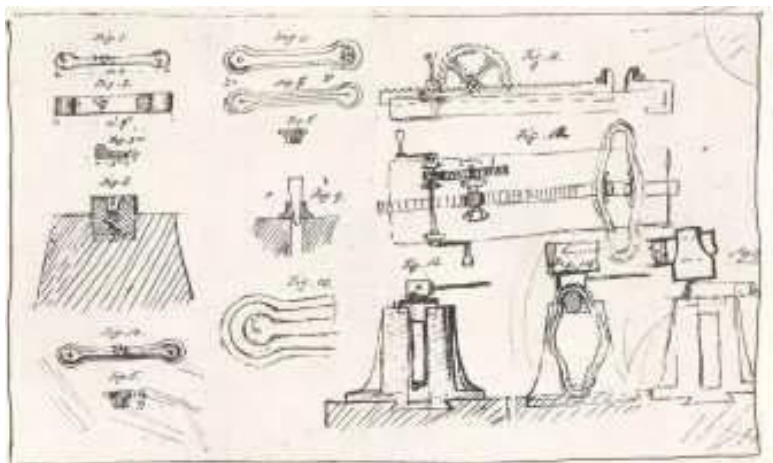


图3 阿尔弗雷德·克虏伯的手稿

后，车间管理人员对几个相关工序进一步细化，压缩操作时间和温度控制范围。这一举措带来的直接效果是，此后交付的几个批次元素含量都稳定得多，性能参数也更加集中。

产品能够造出来，说明工艺方案的大方向对路；但要获得质量稳定的产品，则需要工艺细化。工艺细化就是靠严格的过程控制把细节里的“魔鬼”揪出来，再把魔鬼变成“上帝”。

在中国追赶世界先进的道路上，有人喜欢装备加成，有人喜欢多学技能。砸钱进口最好的原料和最新的设备，或许可以在短时间内达到提升产品质量的目的。但是反观欧洲一些老牌工厂，用着20年前的老机器，却靠着一摞摞比我们厚重得多的工艺说明，照样能保证稳定可靠的产出。

长期持续对工艺细节的打磨，既是做百年基业的决心，也是中国制造目前最缺的一口真气。制造业中每一家企业、每一个车间都是工业大生态中的一环，你产的材料用于生产我的设备，我造的机床成型了他的零件——各个环节的管控都逐步走向精细化，整个中国制造的大链条才能完成螺旋式爬升。

四、治疗：技术管理同步提升

抓细节是个长期不懈的工

程，如果这根弦稍有松懈，“上帝”也会重新变回魔鬼。

2017年，日本神户制钢造假事件引发舆论哗然。这家曾被视为“工匠神话”代表的日本第三大钢企，被曝出长期在管理层知悉甚至授意的情况下，篡改尺寸和强度等出厂数据以次充好。这些流出的不合格品，被用来生产丰田汽车、新干线以及日本国产的MRJ支线客机等。这些被篡改的参数早在出厂前的检测中就被发现，工厂管理层却默许了造假行为。质量的保障不是靠最终检验，而是需要在一道道严密的工序里实现——即使具备较强的技术加工能力，但假如放松了对过程的管控，原本有效的工艺也得不到全面执行。

与神户制钢的造假事件先后曝光的，还包括东丽公司轮胎材料、高田安全气囊、三菱燃油效率等一系列数据造假丑闻，日本的工匠神话随之幻灭。在品质管控上投机取巧的还不止日本企业，著名的德国大众汽车尾气检测造假事件，波音737 MAX的两起空难，都与管理层对品控纵容有着密切关系。

这些当初依靠过硬品质爬到制造业链条顶端的国际老牌企业，拥有雄厚的科研实力和细致的工艺流程，按理说应该提供最可靠的产品，却在品质管控上马失前蹄，透支了多年积攒的口碑和名望。如今，神户制钢仍在努

力挽回名誉，而737MAX也被全面停飞，重返蓝天遥遥无期。

而正处于追赶期的一些中国企业，经常遭遇的却是另一方面的问题。

与进口设备一起引进中国的，还有精益生产、六西格玛、5S管理等先进管理方法，但是当许多企业把整个生产流程掰开揉碎，去粗取精重新组装，却发现这些洋方法提升最大的是生产效率，对生产品质的改进则远远不及预期。

深究其原因，有一个经常被忽视的基本逻辑：工艺的完善首先需要基于成熟的技术能力。当技术的内核沉淀不足时，仅靠管理上的增值，是很难弥合与改进目标之间差距的。也就是说，打铁还得自身硬。好鞍配好马才能发挥最大效力。

真正涉及核心能力的工艺细节，在任何行业内都是“秘籍”，无法像套公式一样用现成的管理工具来应用破解。同样，再成熟的管理工具，也需要在不同的企业语境下进行个性化调整。工艺流程的精细化，技术能力和管理思维是缺一不可的两条腿，既不能倚仗技术优势而放任管理疏漏，也不能依赖管理方法而忽略技术基础。

五、预后：借助数字化的翅膀

从中国制造到“中国精工”，需要把工艺观测的放大镜换成显微镜，而这枚能让内部微观结构分毫必现的高倍镜片，是需要靠海量的经验和数据积累打磨出来的。

相比沉淀数百年的欧美制造强国，中国制造目前积累的数据，尚不足以形成系统性的定量规律，仅能观察宏观表面，无法探查内部构造。

所幸中国人赶上了数字化革命的高速列车，1.0 的放大镜，有机会跨过 2.0 的光学显微镜，直接换成 3.0 的电子显微镜。

一方面，数控加工技术、自动化生产线的普及扩大了工厂产

能，数据积累的效率得到空前提升。另一方面，仿真软件的应用，也改变了曾经需要像盲人摸象一样确认方案，再根据加工结果反查工艺流程的验证过程，在加工之前就排除一些人为疏漏，验证成本得以大幅度压缩。

实际上，这些数字化技术的金字塔底座，也是靠无数的数据颗粒积聚起来的。

大数据时代的到来，给中国制造业带来缩短数据规模差，甚至逆袭的难得机会。但是随着数据激增，各种“云”、“库”、“链”层出不穷，又给生产管理带来新的困惑：究竟工艺流程的颗粒要细化到什么程度？怎样让越来越

多的冗余数据，不会反过来影响客观判断？

工艺流程的精细化，往往是一个先做加法再做减法的过程，数据积累只是起点，数据治理和数据应用才是后面的大课题。

以航材上应用较多的 7050 铝合金为例，作为面世近半个世纪的老牌合金，多年来中国人从“量”上获得的数据已经非常可观，然而国内有此生产能力的铝厂两只手都数的过来，能够保持批次稳定性的更是少之又少。原因还是在于当年通过技术攻关解决了从无到有的问题后，并未通过数据积累，对工艺流程进行持续改进。

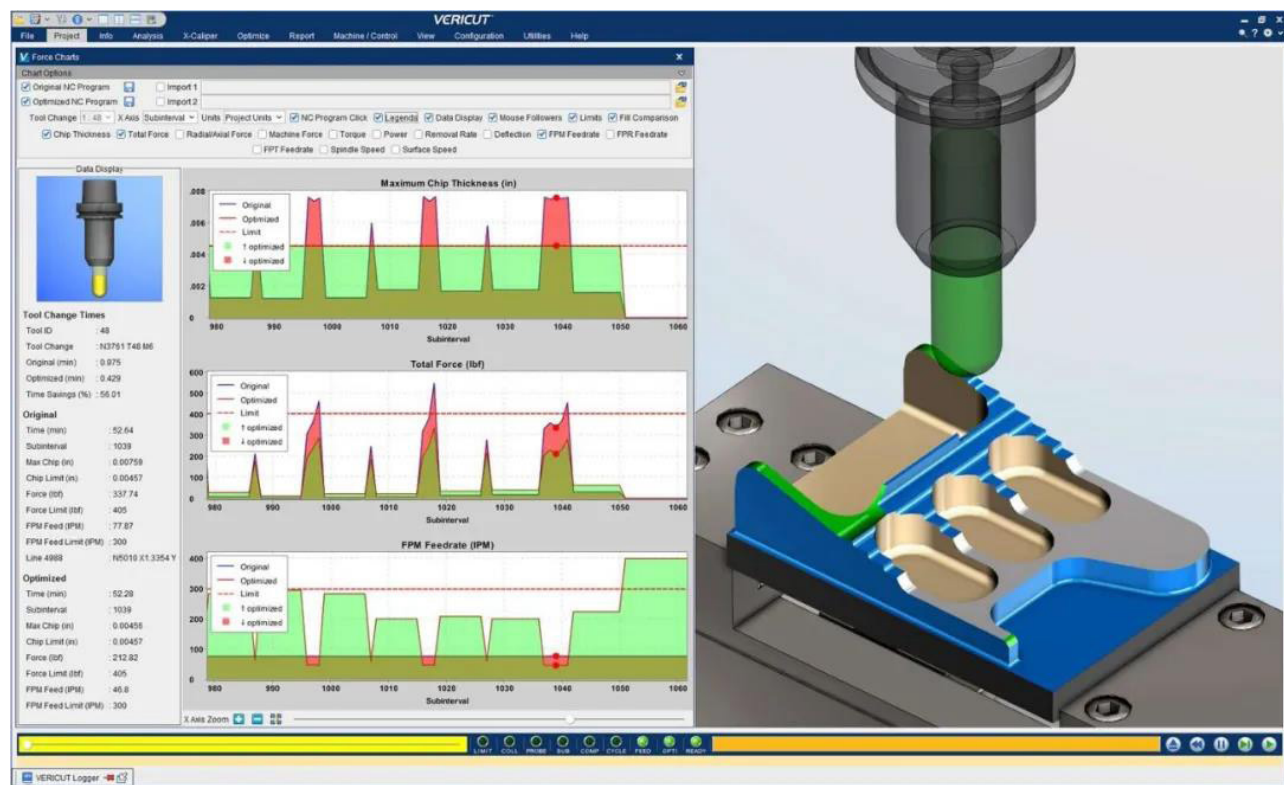


图 4 仿真软件模拟加工过程和结果分析

在工艺流程上实现数字化转型的一条基本路径是：从足量的数据中发现生产规律，找到整个工艺过程控制的关键点，再移除多余的工序，或者根据交付需求对控制范围进行调节，充分发挥工艺的柔性。这需要有相当扎实的基本功——马步扎得不稳，经验积累不够，即使插上数字化的翅膀，也很难飞得更高。

波音客机从20世纪五十年代707开始起步，但直到787才大量运用新型材料，在此之前几代产品中，底层材料、零件加工和装配等工艺继承性很强，并不断档式跨越。研发、制造、检测中的数据流转不仅是一个闭环，也是一个持续上升的螺旋，支持工艺水平在产品的升级迭代中连续稳定的提升。

这意味着足够的耐心和长远的眼光。而一个经常有的教训是：我们在追求发展速度时，往往容易重视新课题，忽视老问题。

精细化生产是一场持久战。既要有“显微镜”看工艺细节，

掌握更稳定的工艺方法。也要用“望远镜”看长远，重视持续改进基础制造工艺，才能留有向专、精、特、新产业链高处攀登的后劲。“显微镜”与“望远镜”，前者知晓方寸，后者探求边界。

六、尾声：中国答卷

当前的中国制造业正处于一个较为割裂的阶段：日新月异的技术突破与相对薄弱的工业基础共生。

这一代产业人也因此面临着双重考验：一方面是新概念、新科技层出不穷，新课题、新产品快速迭代。另一方面，已经涉足的领域向内渗透不足，大量短板甚至空白尚待填补。与此同时，我们还要面对老牌工业强国的科技封锁，一些关键材料、元器件和设备常常在博弈中被掐住七寸。

工业体系上，中国已经有了硬怼外界金枪锁喉的底气。但工艺水平等方面，还需要一根一根

拔出卡住我们喉咙的鱼刺。中国的科技工业树在向上开枝散叶的同时，还需要持续往下扎根。

2020年4月，教育部组织研制并发布了《中小学生阅读指导目录（2020年版）》，著于300多年前的《天工开物》被列入其中，成为官方推荐的中小学生课外读物。生产实践的普及提前渗透到下一代的教育中，同时也呼唤深植于民族精神中的创造力。

1976年，李约瑟在其编著的15卷《中国科学技术史》中提出了一个著名问题：尽管中国古代对人类科技发展做出了很多重要贡献，但为什么科学和工业革命没有在近代的中国发生？

美国经济学家肯尼思·博尔丁把这个问题称之为“李约瑟之问”。随后40多年里，伴随着中国改革开放与“科学春天”的到来，“李约瑟之问”引发了无数学界和产业界人士的持续探讨。或许这个问题暂时没有一个确切的答案，但是突飞猛进的中国制造业，正在奋力做好这份答卷。MT

参考文献

- [1] 张方、王林岐《国内外GH4169棒材质量稳定性分析》，锻压技术，2016年09期
- [2] 黎峰《国际分工新趋势与中国制造全球价值链攀升》，江海学刊，2019年03期
- [3] 严鹏《工匠革命：制造业的精神与文化变迁》，电子工业出版社，2020年8月
- [4] 韦康博《国家大战略：从德国工业4.0到中国制造2025》，现代出版社，2016年8月
- [5] 杨斌、李建明、李东红《中国高端装备制造业发展报告》，清华大学出版社，2017年
- [6] Joseph Needham《中国科学技术史》，科学出版社，1990年

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