

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

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

2021年第3期 总第214期

21世纪以来美国制造业演变特点及其启示 p1

数字孪生技术赋能制造供应链 p17

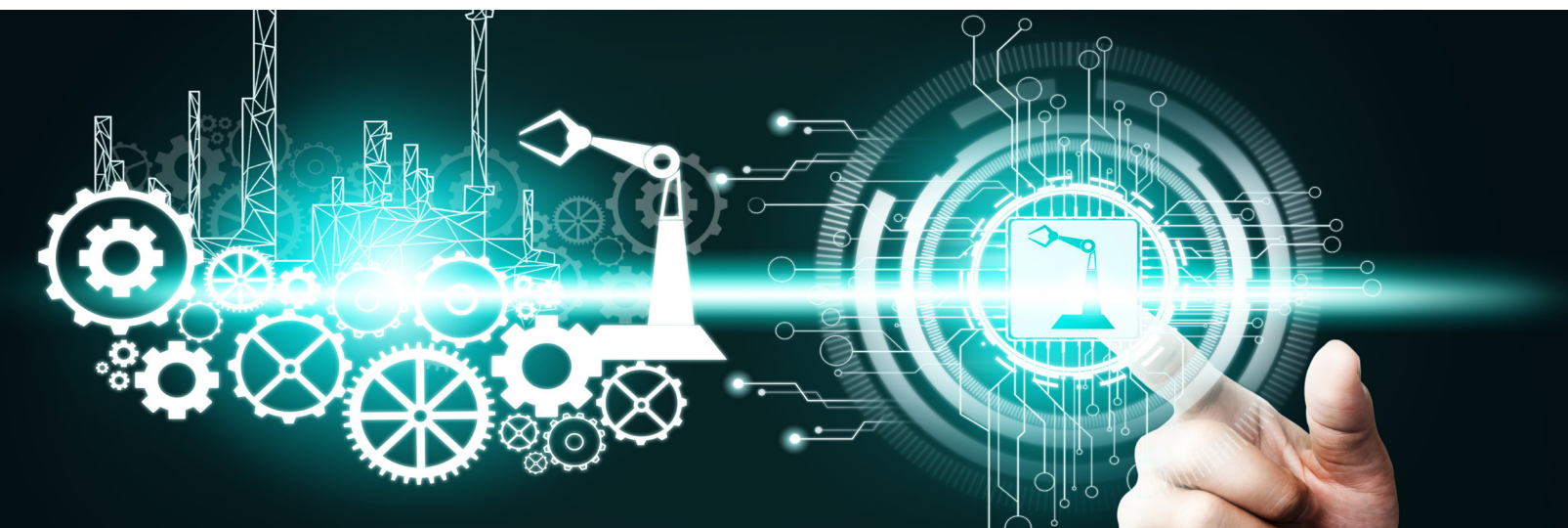
加速智能制造——生态系统方法的价值 p29

没有退路的变革——商用发动机的研发平台探索之路 p39



目录

CONTENTS



机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2021 年第 3 期 (总第 214 期)
2021 年 6 月 28 日出版

主办: 中国机械工程学会工作总部
地址: 北京市海淀区首体南路9号
主语国际4号楼11层
邮编: 100048
电话: 010-68799036 (编辑部)
传真: 010-68799050
E-mail: zhongyg@cmes.org
网址: <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



专家视点 EXPERT OPINION

- | | |
|----------------------|----|
| 21 世纪以来美国制造业演变特点及其启示 | 1 |
| 数字孪生技术赋能制造供应链 | 17 |



热点关注 CURRENT POINT

- | | |
|-------------------------|----|
| 加速智能制造——生态系统方法的价值 | 29 |
| 没有退路的变革——商用发动机的研发平台探索之路 | 39 |

21 世纪以来美国制造业演变特点及其启示*



中国科学院成都文献情报中心 韩文艳 熊永兰 张志强

摘要：工业革命以来制造业是国民经济的支柱产业。在经济全球化和科技全球化的竞争发展中，产业链全球化分工，其中制造业尤其是高端制造业对于一国构建现代产业体系、增强国际竞争力具有重要意义，作为制造业龙头的高端制造业成为科技强国争夺的关键核心技术产业。文章以美国为研究对象，分析了 2000—2018 年间制造业及其细分行业的发展现状和产业演变特点。研究发现，美国制造业演变过程中经历了“空心化”再到回流的转变，高端先进制造业不断优化升级，传统基础产业长期保持其优势，国家顶层设计、科技创新、良好创新生态对制造业发展具有重要驱动作用，其中化工产品、计算机及电子产品和交通装备制造属于优势行业。美国制造业发展对我国可借鉴经验和启示是，从先进制造业集群建设、创新生态系统构建、制造业结构优化升级、科技创新投入、制造业与服务业融合发展以及知名品牌打造等方面推动制造业高质量发展，助力制造强国战略的实施。

关键词：美国；制造业；演变；科技创新

随着科技革命与产业革命的深入推进，制造业作为立国之本、强国之基，在国际竞争中的核心地位不断凸显。21 世纪以来，尤其是 2008 年全球金融危机以后，发达国家特别是科技强国纷纷重新审视“去工业化”政策，包括制造业外包政策和“重服务轻制造”的思维，重振制造业成

了各国经济政策和产业结构迭代升级的主旋律。科技发达国家纷纷出台振兴制造业的战略规划与实施机制。如，美国从 2009 年底开始相继发布“再工业化”战略相关政策，包括《重振美国制造业框架》《先进制造业伙伴计划》《先进制造业国家战略计划》等。2013 年 4 月，德国机械及制

造商协会等机构设立“工业 4.0 平台”并推出《保障德国制造业的未来——关于实施工业 4.0 战略的建议》报告，工业 4.0 正式进入德国国家战略。2013 年 9 月，法国公布了为期 10 年的“新工业法国”计划，旨在推动法国回到工业化道路上去，让法国的工业基因更加强大，建立更具竞

注：来文原载于《世界科技研究与发展》2021 年第 4 期，本刊获作者授权转载。

竞争力的法国工业。2012年1月，英国启动工业2050计划战略研究，2013年10月发布报告《制造业的未来：英国面临的机遇与挑战》，旨在提振制造业。2017年1月，英国公布了英国现代工业战略“绿皮书”，旨在通过提高生产力和振兴工业生产，以振兴“脱欧”后的英国经济。2002年起，日本每年发布《日本制造业白皮书》分析其制造业竞争力的优劣势。近年来，美国经济温和扩张，制造业发展疲软，但其高新技术产业、高端制造业仍然占据着全球制高点，制造业不断转向附加值最高的尖端制造。为此，深入分析美国制造业演变特点，借鉴其发展的良好经验，日益受到政府和学者的高度关注。

学术界对近年来美国制造业的关注与研究也较多：一是美国制造业回归的影响因素及对中国的影响研究。如，胡峰等认为美国国内政策、政治压力、海外成本上升、本土比较优势渐显及生产方式变革等驱动了制造业回流；庄芮认为美国重振制造业的动因是解决经济“虚拟化”和就业问题、促进出口、构筑“美国制造”全球话语权并确保美国在全球的战略主导地位；潘辉等分析认为美国制造业回归战略将对

中国制造业流向、出口以及产业升级等产生深远影响；李玉梅提出在美国制造业回流影响下中国应构建中国企业主导的全球价值链以巩固中国世界制造业中心地位；Li Y 等认为美国制造业受R&D和非R&D投入的驱动，而中国制造业以传统要素和R&D投入为驱动，需借鉴美国通过合作网络保持持续创新以增强竞争力的经验。二是美国制造业重振的相关战略规划政策分析研究。如，胡鞍钢等评述国际金融危机以来美国制造业回流政策；张恒梅基于美国制造业创新网络计划提出中国先进制造业提升技术创新能力的路径；朱焕焕等分析美国制造业创新网络建设在计划宗旨、领域布局、技术路线制定和创新生态打造等方面呈现出的新变化和新特点；赵正国分析美国国家制造业创新网络计划评估机制建设问题并开展评估案例研究；汤霓等评述美国振兴先进制造业的职业教育发展策略；Horowitz M J 发现能源购买政策有效降低了美国制造业中电力及能源消耗的支出。三是美国制造业发展的效率与质量测度。如，赖石成评价国际金融危机前后美国制造业分行业生产率时发现技术进步主导了产业生产率；

孔瑞等发现美国制造业可能已进入“低成本竞争”的时代；张继彤等研究发现再工业化的实施并未能提升美国制造业产出效率，也未缩小传统制造业同先进制造业的产出效率差距；Hitomi K 利用相对生产率和劳动生产率等评估方法对美国工业和制造业的效率和生产率进行分析和评估；Egilmez G 等发现美国制造业碳足迹的存量一直在大幅增加，而产出的急剧增长掩盖了碳排放强度降低所带来的潜在利益。四是美国制造业发展现状及在全球的水平。如2018年7月，美国布鲁金斯学会发布《全球制造业记分卡：美国与18国比较研究》指出，美国制造业复兴势头强劲，经过多年的产出及其劳动力比例下降，美国制造业在过去几年再次呈现新的增长；2018年10月，美国国家竞争力委员会发布的《加速：能源充裕时代下美国制造业加速振兴行动计划》，提出美国亟需建设一个由更安全、更可持续、更廉价的能源组合，与正在复兴的先进制造业双轮驱动的创新驱动型经济体建设，以保持其在全球经济中的领先竞争能力；《2019世界智能制造中心城市潜力榜》显示，美国所有样本城市整体实力均在平均水平之

上, 而中国 22 个样本城市中仅 6 个城市高于平均水平; 2019 年 7 月, 美国战略与国际问题研究中心 (CSIS) 发布的《培育美国制造业的下一轮革命》, 全面分析了美国先进制造业的不同劳动力发展计划, 旨在更好地了解教育和培训未来工人所需的条件。

综上所述, 关于近年来美国制造业发展情况已有较多研究, 主要集中在制造业回归的动因、影响、政策及全球竞争力方面, 对于 21 世纪以来美国制造业演变特点尤其是对细分行业发展特点的分析相对较少。为此, 本文基于美国经济分析局关于制造业的数据, 对 2000—2018 年美国制造业及其细分行业的发展情况进行分析, 梳理总结了美国制造业的演变特点, 基于此总结了对中国制造业高质量发展的启示。中国作为全球价值链的重要组成部分, 制造业附加值正处于一微笑曲线底部 (制造环节), 向左端进入高附加的研发和专利设计, 向右端进入品牌和销售管理服务等附加值更高的环节, 研究结果可以为中国制造业升级提供经验借鉴, 服务中国由制造大国向制造强国转变的有关决策。

一、美国制造业演变分析

1. 美国制造业总体分析

21 世纪以来, 美国制造业发展稳中求进, 增加值总体呈缓慢波动上升趋势, 在国民经济中的比重则处于收缩状态 (图 1)。从产业增加值看, 制造业增加值由 2000 年的 15502 亿美元上升至 2018 年的 23212 亿美元, 同比增长率达 49.7%; 受全球金融危机影响, 2008—2009 年制造业增加值略微下降, 2009 年增加值为 17021 亿美元, 是 2006—2018 年的极小值; 2000—2018 年美国制造增加值年均增长率为 2.3%, 其中 2009 年增长率低至 -5.5%,

2018 年增长率高达 6.2%。美国制造业波动上升的发展趋势与其产业结构迭代升级、实施的系列制造业回流政策密切相关。如奥巴马政府在金融危机之后推行“再工业化”政策, 大力强调制造业的重要性, 并在 2009 年 12 月公布《重振美国制造业框架》; 美国通过增加税收优惠等措施吸引美国企业海外制造回流, 同时加强对优势高端制造业的保护。2018 年美国国会通过的《出口管制改革法案》, 要求美国商务部工业安全局公布技术出口管制体系框架, 对人工智能和机器学习技术等 14 类代表性新兴技术进行出口限制。

就产业增加值占 GDP 比而言, 美国制造业在 GDP 中的地位

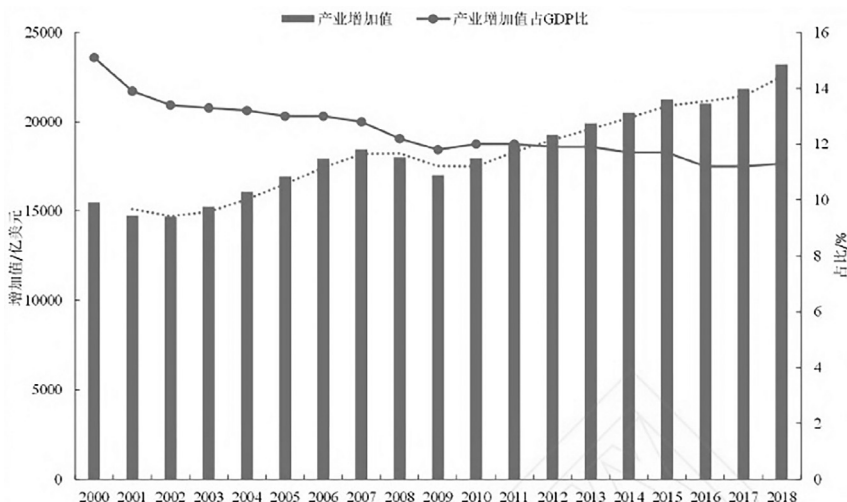


图 1 2000—2018 年美国制造业增加值及其占 GDP 比重

呈现下降到稳定的状态。2000—2009年下降趋势显著，占比由2000年的15.1%降至2009年的11.8%，产值比重的下降在一定程度上反映了美国制造业萎缩、产业空心化严重；2009—2018年，占比维持在11%~12%之间，并且由2016年的11.2%缓慢上升至11.3%，2008年金融危机以来，美国一直提倡的制造业回归战略在该过程中发挥了一定作用。在过去的全球化进程中，美国基于比较优势，借助全球化产业链将低端制造业、加工厂转移到中国等生产要素成本较低的发展中国家，大力发展高新技术产业和金融服务业，包括电子信息、生物医药等高端制造业，并对其进行

贸易保护，促使美国在全球制造业体系中，尤其是高端制造业始终占据重要地位。可见，美国制造业的萎缩乃至空心化，主要在于美国基于成本优势和贸易策略将中低端制造领域转移至国外，导致中低端制造业生产能力偏弱，进而带来相应的就业问题，而美国在高端制造业领域则始终掌握关键核心技术。如美国在国防、航空航天、生物制药、精密化工、高性能材料、半导体和信息技术等领域均处于世界领先地位。根据PwC统计，2018年全球研发投入前十名的公司中，有七家来自美国，其中五家涉及高端制造。

在美国制造业结构中，耐用

品与非耐用品的份额较为稳定，耐用品具有明显的比较优势（图2），其中耐用品主要包括木制品、非金属矿产品、初级金属制品、金属制品、机械制造、计算机及电子产品、电气设备、电器及其零件、机动车辆、车身、拖车及零件、其他运输设备等，非耐用品主要包括食品饮料和烟草制品、纺织品、服装、皮革及相关产品、纸制品、印刷、石油及煤制品、化工产品、塑料和橡胶制品。

耐用品制造业在美国产业中具有重要地位，占全国GDP比重呈先缓慢下降后趋于稳定的状态，2000—2009年下降较明显，2009年以后占比基本处于6.1%~6.5%之间，趋于稳定；在制造业中比

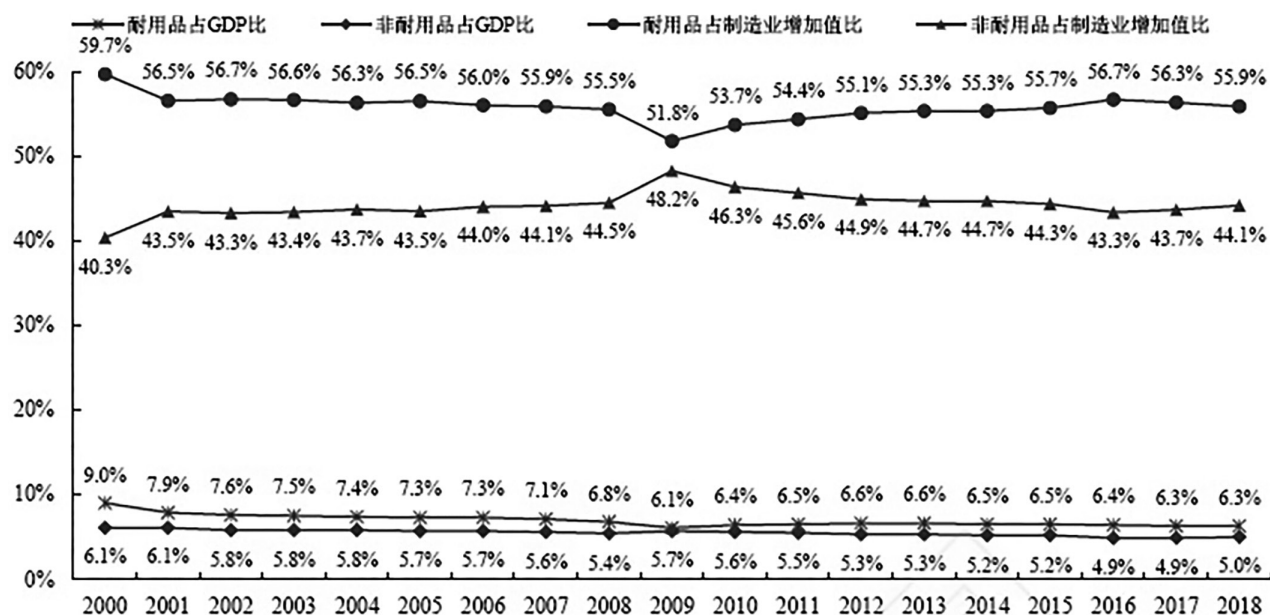


图2 2000—2018年美国制造业中耐用品与非耐用品发展情况

重总体处于 51%~60% 之间, 变化幅度不大, 表现为先缓慢下降后缓慢上升状态, 由 2000 年的 59.7% 下降至 2009 年的 51.8%, 再上升至 2018 年的 55.9%。计算机和电子产品是耐用品制造业中增加值最高的行业, 2018 年为 2973 亿美元。金属制品、机械、机动车辆、车身、拖车及零件、其他运输设备等也是耐用品制造业中较重要的行业, 2018 年产值均达到 1500 亿美元。非耐用品制造业方面, 增加值占 GDP 比重较为稳定, 由 2000 年的 6.1% 演变至 2018 年的 5.0%; 占制造业比重呈先升后降状态, 但变幅较小, 由 2000 年的 40.3% 上升至 2009

年的 48.2% 再下降至 2018 年的 44.1%。值得注意的是, 2009 年美国耐用品与非耐用制造业受金融危机影响, 波动较大, 耐用品在制造业比重达到极小值, 非耐用品占制造业比重达到极大值。化工产品是非耐用品制造业中增加值最高的行业, 2018 年高达 3781 亿美元。食品饮料和烟草制品、石油及煤炭产品也是非耐用品制造业中较重要的行业, 2018 年产值分别为 2689、1722 亿美元。

总体上随着产业革命的推进, 耐用品制造业的地位日益凸显。半导体产业作为典型的耐用品制造业和高新技术产业, 美国在全球占据霸权优势, IC

Insights 发布 2018 年第一季度全球半导体供应商销售额 TOP15 排名中, 美国占据八席(英特尔、美光科技、高通、博通、德州仪器、英伟达、西部数据/闪迪和苹果)。据美国半导体工业协会白皮书显示, 2018 年, 美国半导体工业占全球 45% 的市场份额, 几乎是韩国、日本、欧盟和中国的总和, 并在微处理器和其他系列产品领域亦处于领先地位。

21 世纪以来, 美国制造业劳动生产率水平不断提高, 劳动生产率总体呈逐年增长的趋势, 非耐用品制造业劳动生产率要高于耐用品制造业(图 3)。制造业、耐用品、非耐用品劳动生产

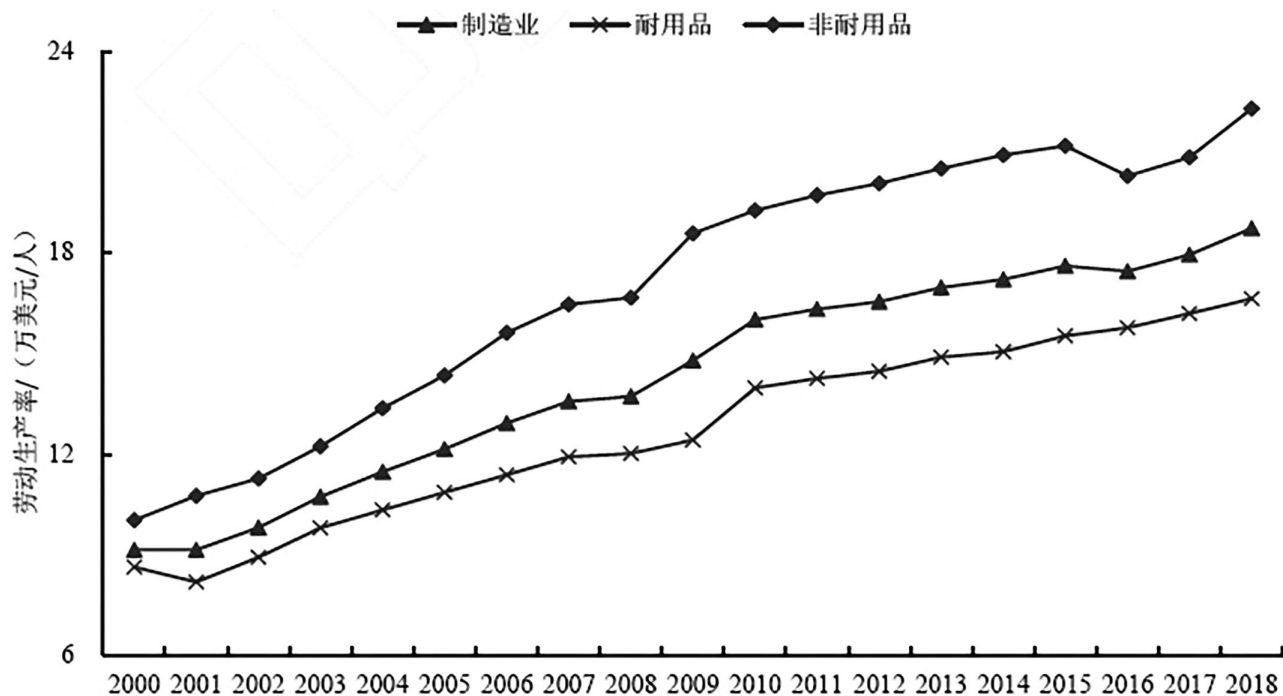


图 3 2000—2018 年美国制造业劳动生产率变化趋势

率分别由2000年的9.15、8.63、10.03 万美元/人,提高至2018年的18.73、16.63、22.30 万美元/人,年平均增长率为3.8%、4.1%、4.6%。劳动生产率的不断提高与科技进步、生产工艺改进、劳动素质的提高、产业结构优化升级以及大量高素质移民带来的科技优势等密切相关。非耐用品制造业劳动生产率略高主要原因在于其作为传统制造业,发展已处于成熟阶段,吸纳的劳动力较少(2018年美国非耐用品制造业吸纳的劳动力占制造业总劳动力的37%,耐用品制造业高达63%),而产品生命周期较短,更新换代频率较高,市场需求驱

动技术设备更新和产量增大,从而提高了劳动生产效率。

2. 美国制造业细分行业分析

就制造业细分行业而言(图4),美国的石油、天然气、电力、铜、铝、硫酸、乙烯、汽车、飞机等工业产品的产量,以及微电子工业、计算机技术、激光技术、宇航技术、生物工程技术、核能利用和新材料等的研制与开发,均居全球领先地位。从产业增加值来看,美国制造业细分行业间发展差异较大,大体上分为四个梯队。

化工产品制造业,计算机及电子产品制造业,食品、饮料和烟草制品业等三大行业属于第一梯队,总体表现为波动上升趋势,分别由2000年的1879、2254、1632 亿美元上升至2018年的3781、2973、2689 亿美元,年均增长率分别为4.03%、1.82%、2.97%。化工产品、食品饮料属于美国传统优势产业,具有陶氏杜邦、强生、可口可乐等全球知名企业;电子信息作为新兴产业,美国一直处于产业链顶端,其中硅谷电子信息产业集群闻名全球,集聚甲骨文、苹果、谷歌、英特尔、微软等龙头企业,凭借不断创新引领电子信息产业

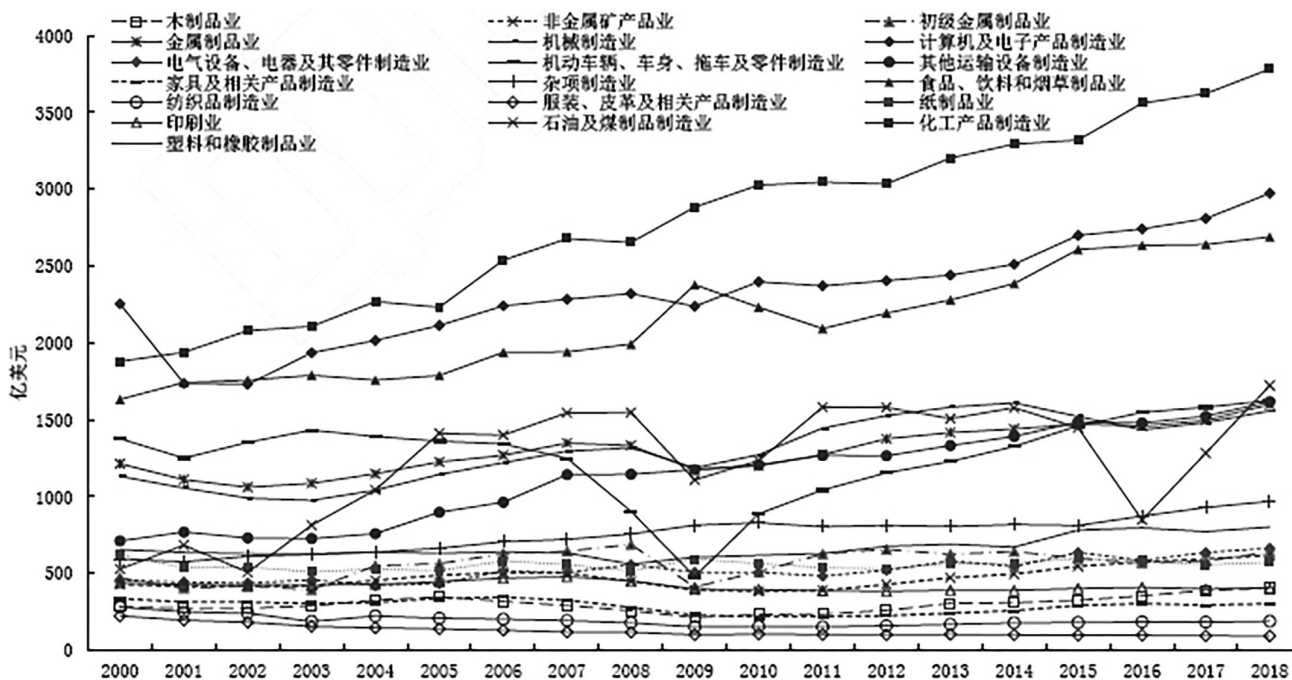


图4 2000—2018 年美国制造业细分行业增加值

变革。

机械制造业, 金属制品, 机动车辆、车身、拖车及零件制造业, 石油及煤制品制造业, 其他运输设备制造业等五大行业属于第二梯队, 呈缓慢波动上升趋势, 分别由 2000 年的 1131、1213、1375、527、711 亿美元增长至 2018 年的 1557、1598、1624、1722、1617 亿美元, 年均增长率分别为 1.99%、1.68%、3.67%、10.25%、4.83%, 其中机动车辆、车身、拖车及零件制造业波动较大, 2009 年的产值在 2000—2018

年间为极小值。汽车制造业与航空航天制造业均是美国的优势产业, 航空制造有波音公司、洛克希德马丁公司、美国联合航空技术公司等知名企业, 汽车制造有通用、福特、克莱斯勒、特斯拉等知名企业。值得注意的是, 第一二梯队产值增加与美国减少贸易逆差、增加就业机 会的贸易政策有一定关系。

杂项制造业, 塑料和橡胶制品业, 初级金属制品业, 纸制品业, 电气设备、电器及其零件制造业, 非金属矿产品业, 印刷业,

木制品业, 家具及相关产品制造业, 纺织品制造业, 服装、皮革及相关产品制造业等 11 个细分行业属于第三梯队, 总体变化幅度不大, 年均增长率在 3% 以内。该类均属于传统或基础制造业, 发展已趋于成熟稳定, 且受成本要素的驱动, 美国将劳动密集型、资源消耗型、环境污染型制造业转移至国外, 而将价值和技术密集型产业或核心技术长期保留在国内。

就细分行业增加值占 GDP 比例看 (图 5), 第一梯队三大产

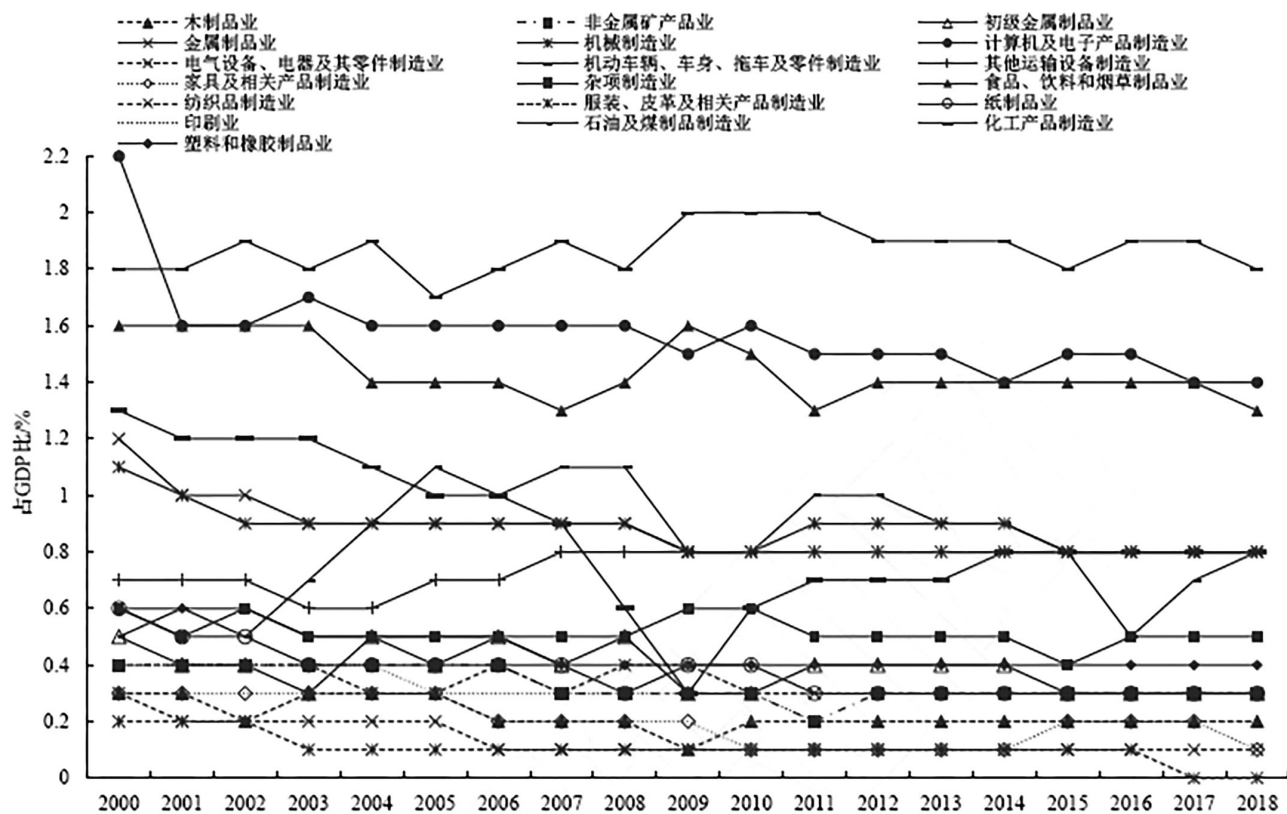


图 5 2000—2018 年美国制造业细分行业增加值占 GDP 比重

业增加值占 GDP 比重的年均值在 1% 以上，第二梯队细分行业增加值占 GDP 比重的年均值在 0.7% ~ 0.9% 之间，第三梯队细分行业增加值占 GDP 比重的年均值在 0.5% 以下。2000—2018 年，细分行业基本表现为波动下降的变化趋势并趋于稳定，这与美国不断推进产业结构服务化转变密切相关，包括产业政策、金融和信息产业的兴起、跨国公司资本全球化布局以降低成本的需求等。

就细分行业增加值占制造业增加值比重看（图 6），第一梯队三大产业增加值占 GDP 比重的年均值在 10% 以上，三者占制造业的比重高达 40% 左右；第二梯队细分行业增加值占 GDP 比重的年均值在 5% ~ 10% 之间，总共占制造业比重约为 30%；第三梯队细分行业增加值占 GDP 比重的年均值在 5% 以下，其中典型劳动密集型产业服装、皮革及相关产品在制造业年均比重仅为 0.7%。从变化趋势看，2000—2018 年第一梯队与第二梯队细分行业占制造业比重处于波动变化状态，其中 2009 年为重要节点，2009 年化工产品与食品饮料制造业的占比分别增加至极大值，而汽车制造业占比则跌至极小值。

受金融危机影响，2009 年美国汽车销售长期下滑的趋势触底，汽车制造业正在脱离低谷，而石化行业回流加上页岩气革命（能源要素禀赋）推动，促使美国成为全球化工产品生产成本第二低的国家，食品饮料等与生活密切相关的传统优势产业产值得到提升。第三梯队的细分行业占制造业比重变化幅度较小，基本趋于稳定，其中家具及相关产品制造业、纺织制品制造业、服装和皮革及相关产品制造业、印刷业的比重总体表现为逐年缓慢下降。

从劳动生产率来看，细分行业劳动生产率基本呈不断提高状态（图 7），内部差异较大，石油及煤制品制造业劳动生产率最高，服装、皮革及相关产品制造业劳动生产率最低。其中排在前三的依次为石油及煤制品制造业、化工产品制造业、计算机及电子产品制造业，年均劳动生产率分别为 110.26、33.95、19.87 万美元 / 人，其他运输设备制造业为 16.72 万美元 / 人，紧随其后。初级金属制品业，机动车辆、车身、拖车及零件制造业，纸制品业，食品、饮料和烟草制品业，电气设备、电器及其零件制造业，杂项制造业，机械制造业，非金属矿产品业的年均劳动

生产率介于 10 ~ 15 万美元 / 人之间；塑料和橡胶制品业，金属制品业，印刷业，木制品业，纺织制品制造业，家具及相关产品制造业，服装和皮革及相关产品制造业的年均劳动生产率则不足 10 万美元 / 人。就演变趋势看，石油及煤制品制造业、化工产品制造业、计算机及电子产品制造业、其他运输设备制造业呈波动上升趋势，分别由 2000 年的 43.92、19.43、12.67、9.61 万美元 / 人上升至 2018 年的 153.75、46.11、28.61、23.40 万美元 / 人，石油及煤制品制造业起伏较大，其余细分行业的劳动生产率变化幅度较小。石油化工、电子信息为美国制造业劳动生产率较高行业，主要在于美国在该领域的机械化程度较高、高素质人力资源积累与供给较为充足，并且能源资源丰富、拥有庞大的国内外市场。此外，智能制造和创新有力支撑了美国半导体、化工产业的优势地位。如随着工业互联网的布局，美国将电子信息产业发展重心转移到了智能与数字制造、智能机器、人工智能等方向，在半导体领域尤其注重创新投入与人才，其中硅谷作为世界科技创新中心，集聚了大量全球高科技人才，并强化以企业为主体的研

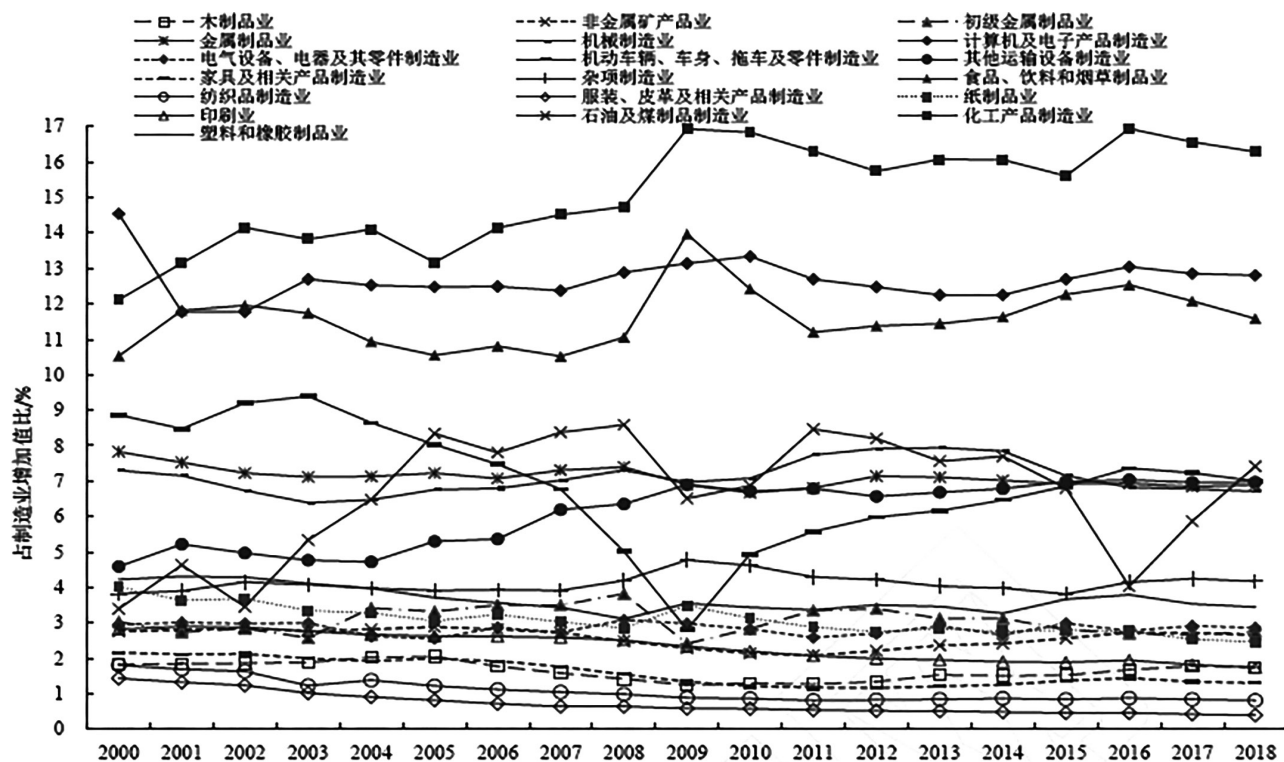


图 6 2000—2018 年美国制造业细分行业增加值占制造业增加值比重

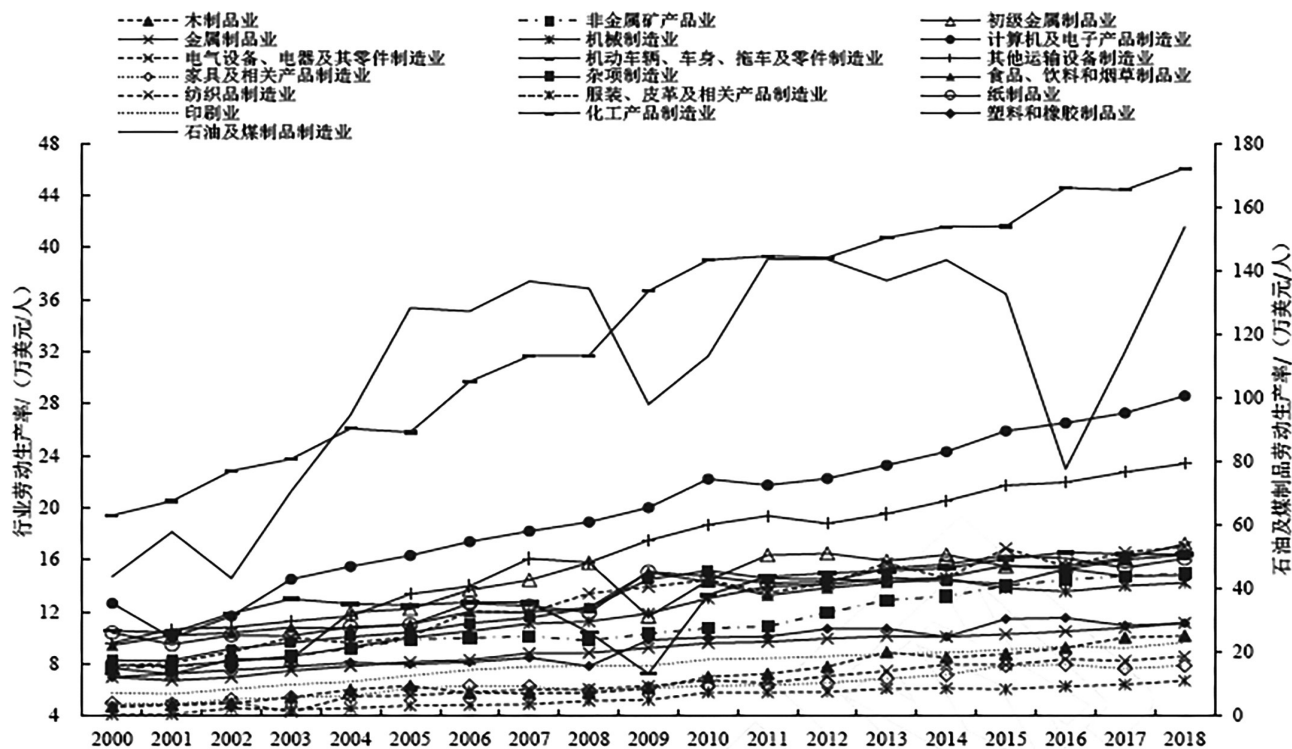


图 7 2000—2018 年美国制造业细分行业劳动生产率

发投入、营造良好的创新生态，促使美国半导体产业长期维持领先优势。同时美国技术创新与工资增长形成了良性循环，在其制造业发展过程中，工人的高工资刺激了用机械替代昂贵的劳动力，而机械发明或创新又带来了更高的生产率，从而使工资更高，这反过来又刺激了在更高程度上采用新的发明或开展新的创新活动。

从劳动报酬来看，美国制造业人均报酬呈增长趋势（图8），由2000年的4.40万美元/年增

长至2018年的7.13万美元/年，领先于美国人均年薪水平（2018年仅6.47万美元/年）。细分行业人均报酬总体呈逐年上升趋势，行业异质性较大。其中排在前三的依次为石油及煤制品制造业、计算机及电子产品制造业、化工产品制造业，年均人均报酬分别为9.41、9.28、8.16万美元/年，2004年以来计算机及电子产品制造业与石油及煤制品制造业的差距不断缩小并实现了超越。其他运输设备制造业，机械制造业，纸制品业，初级金属制

品业，机动车辆、车身、拖车及零件制造业，电气设备、电器及其零件制造业，杂项制造业的年均人均报酬介于5-8万美元/年，其余行业则不足5万美元/年。总的来看，美国制造业各细分行业的劳动生产率与人均报酬呈现一定相关性，劳动生产率中等与低报酬行业表现较为明显。值得注意的是，其中计算机及电子产品制造业2000—2003年为美国制造业报酬最高行业，之后被石油及煤制品制造业替代，但2016年后再次成为报酬最高行业，发

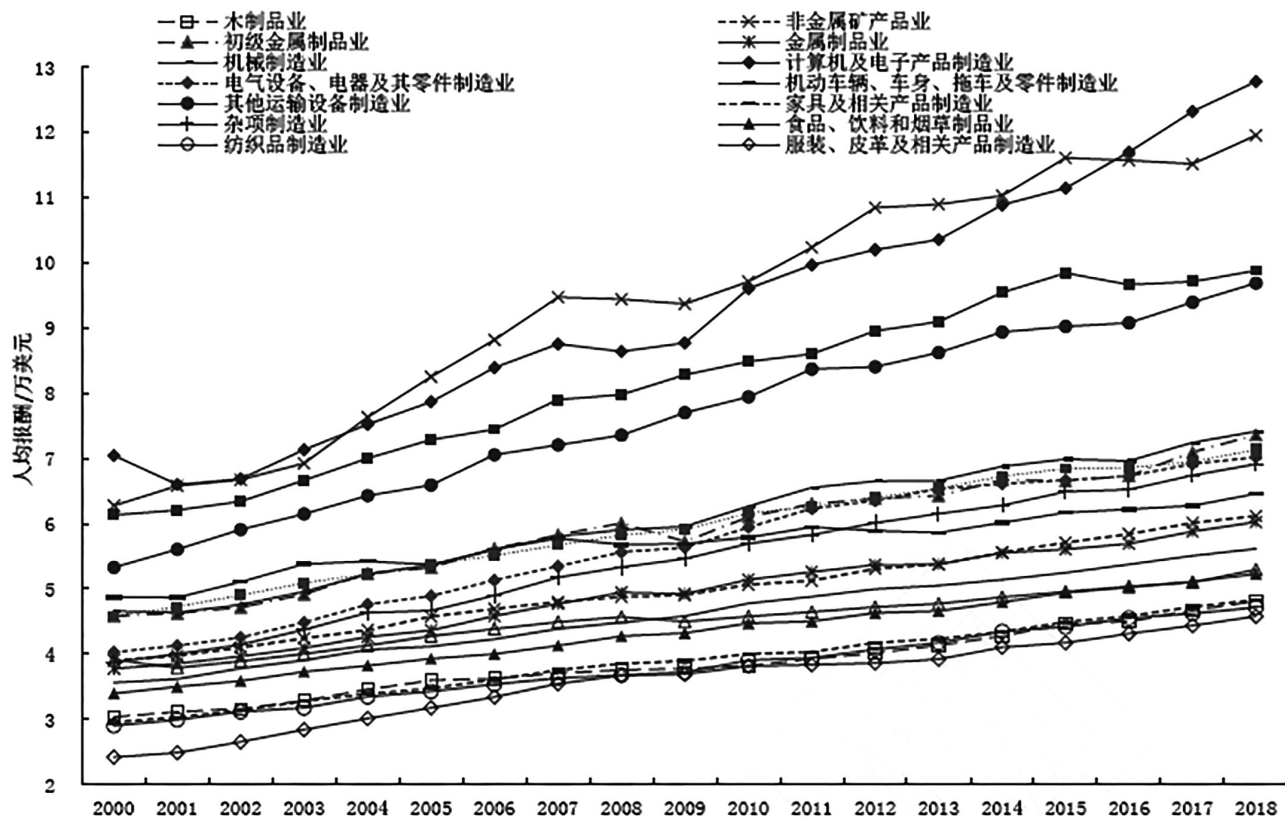


图8 2000—2018年美国制造业细分行业人均报酬变化趋势

展前景广阔，这与电子信息等高端制造业的发展密切相关。

二、美国制造业演变特点

1. 政府顶层迭代式战略设计大力促进制造业回流

美国在产业结构演变过程中，在成本效益和科技创新驱动下，将低端制造业转移至国外，导致制造业呈现“空心化”状态。2008 年全球金融危机后美国出台多个战略规划政策，促进制造业回流，重塑高端制造业竞争优势，并且带动其它产业发展，从而构建现代高端产业体系，实现产业结构的再平衡（图 9）。奥

巴马政府推行“再工业化战略”，2009 年，出台《重振美国制造业框架》。2011 年 6 月，总统科技咨询委员会在《确保美国先进制造的领先地位》报告中强调了美国制造业空心化造成的风险。

2012 年 6 月，先进制造伙伴关系（AMP）监督委员会在《赢得美国先进制造竞争优势》报告中强调美国私有行业在将前期研究转变为经济、高效的本土制造能力及新产品上，面临技术和财政上的局限。2012 年，美国政府建立了首个制造创新机构（美国国家增材制造创新中心）并推广经验。2012 年 3 月，奥巴马政府宣布由联邦政府投资 10 亿美元成立国家制造业创新网络（NNMI），促进美国制造业科技创新和成果转

化。2013 年 1 月发布《国家制造创新网络的初步设计》，明确了国家制造创新网络的主要任务及基本运作框架，计划在制造工艺、先进材料及其加工工艺、高效能技术及其平台以及具体应用等优先领域建设 15 个制造业创新研究所（IMI），最终目标是希望在未来十年建设 45 个制造业创新研究所，到 2017 年已建设 12 个，建成制造业创新中心 7 家。2014 年 10 月，总统科技咨询委在《加速美国先进制造》的报告中建议政府在先进制造促进工作上要整体参与并协调一致。2014 年 12 月，国会将《振兴美国制造与创新法案》定为法律，该法案给予商务部建立、协调 NNMI 制造创新机构的权利，及与受先

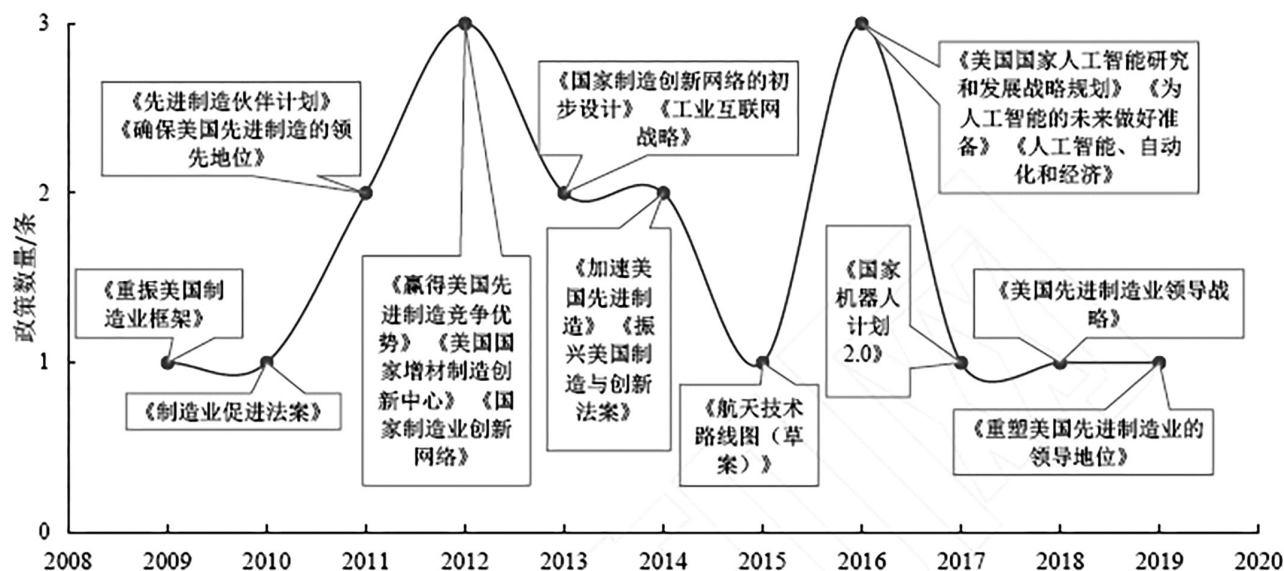


图 9 2008 年以来美国制造业主要相关政策

进制造影响的联邦部门（国防部和能源部）协同的权利，以指导NNMI计划的工作。2016年发布的《美国国家人工智能研究和未来战略规划》《为人工智能的未来做好准备》和《人工智能、自动化和经济》等提出优先发展人工智能的基础和长期研究项目，确保美国在人工智能领域的领先地位。2018年《美国先进制造业领导战略》提出支持智能和数字制造系统、先进工业机器人、人工智能、高性能材料、组织和器官的生物制造、食品安全加工、检测和可追溯性等15个重点方向的发展。2019年6月，美国非盈利机构MForesight发布了《重塑美国先进制造业的领导地位》报告指出了美国制造业当前存在的根本性弱点，及其对美国长期繁荣和安全风险的可能影响。此外，2020年6月，美国两党参议院提出了《美国晶圆代工业法案》，以促进芯片制造业回流，增强半导体制造竞争力；2021年1月，拜登签署《购买美国货法案》行政令，支持美国制造业发展。

2. 高端先进制造业稳步发展并不断优化升级

在全球化驱动的产业分工的

大背景中，传统制造业受生产要素驱动和经济环境效应影响，通过技术变革、梯度转移，在国民经济和制造业的比重缓慢下降并趋于稳定。随着美国劳动力成本不断上升，人力资源掣肘制造业发展，2000-2018年，制造业及其细分行业的劳动力成本呈逐年上升状态，制造业劳动力成本的年均增长率为2.73%，石油及煤制品制造业、服装和皮革及相关产品制造业、计算机及电子产品制造业、其他运输设备制造业、杂项制造业、电气设备、电器及其零件制造业劳动力成本的年均增长率皆超过了3%。但服务型产业发展、制造业产业链的全球分工趋势中，美国的高端制造业并没有向国外转移，而是稳步发展。基于美国独步全球的高技术优势对高端产业的有力支撑，美国着力推进电子信息产业、生物医药业、汽车制造业、航空航天制造业、先进材料等高端先进制造业的发展，并利用先进的科学技术，驱动高端先进制造业的迭代升级，长期保持高端制造优势，如波音公司的民用飞机市场占有率位居全球第一；高通的手机芯片技术支撑众多手机品牌的发展；高端工业医疗设备全球领先，尤其是通用的核磁共振设备。根

据2020年世界五百强数据分析，ICT制造业、医疗器械制药业、军工航空航天+机械（工程机械+农业机械）、汽车是五个美国最为核心的优势制造业，高端制造业发展是支撑美国霸权及国际竞争力的核心。

3. 传统基础性优势产业长期保持其竞争优势

在过去的几十年间，全球石油化工行业经历了从技术更新到产地转移的巨大变化，而美国在全球石化行业长期占有重要地位。美国是全球重要的石油大国，其石油和天然气储量较大，同时开采生产技术水平较高，而页岩油、页岩气的储量与产量极大提高了美国能源供应能力，进而刺激了石化行业的发展和进步。特别是，始于20世纪90年代末的美国“页岩油气”革命，使美国再次成为油气出口国。2019年《财富》美国500强排行榜中石油天然气巨头埃克森美孚位居第二，上市公司中化工行业有12家企业，原油生产企业9家，炼油行业有8家。页岩气资源的禀赋，促使美国能源化工产业生产要素成本较低，促进能源化工产

业的回流与发展,同时中美双方的拟征税商品清单中,多种能源化工商品赫然在列,包括矿产品、化学工业及其相关工业的产品和塑料,其中高分子材料为征税重点,通过经济手段支撑其优势产业发展。此外,美国传统制造业还注重转型升级发展,如 COVID-19 疫情影响下严重缺口的 3M 口罩,3M 公司(明尼苏达矿务及制造业公司)依托科技、通过上市向多元化转型,目前在近 200 个国家销售约 55000 种产品,涉及的领域包括材料、电器、建筑、能源、医疗和个人消费等。

4. 生产性服务业与制造业融合发展

美国制造业与生产性服务业的融合发展,在一定程度上促进了制造业的转型升级,维护美国制造业全球领先地位和国际竞争中的话语权。纽约都市圈中纽约州的 13 个产业集群主要涉及先进制造业和生产性服务业,包括计算机硬件与电子、工业机器与系统、交通设备、生物医药、材料加工、光学与成像、软件、食品加工、金融服务、通讯与传媒、金融与保险服务业等。如电子信

息产业中美国基于国内外市场和生产要素的比较优势,在保持其通讯设备、电脑及电子产品、核心电子元器件制造竞争优势的同时,更加注重信息通信相关设计和服务,包括信息服务与数据处理服务业、计算机系统设计及相关服务,延长产业链,加强其全生命周期服务能力以及全球市场竞争力。

5. 技术创新支撑高端制造业发展

在科技强国中,美国创造新产业的能力冠绝各国。制造业尤其是信息技术、生物医药、装备制造等高端先进制造业作为技术密集型产业,对科技创新具有较大的依赖性,其创新发展离不开科技进步的支撑,拥有核心技术将掌控产业链关键环节、占据价值链高端、引领产业发展。半导体作为集设计、研发、生产于一体的高新技术产业,属于资本密集型行业,2018 年美国半导体人均研发投入超过 18 万美元,研发支出占销售的比重为 17.4%,远超欧洲的 13.9%,而日本、中国、韩国则分别为 8.8%、8.4% 和 7.3%。中国集成电路知识产权联盟秘书处

专利态势报告 2018》显示,全球前十的集成电路专利申请企业中,美国企业 2 家,保障了其电子信息产业的引领优势。知识产权产业媒体 IPRdaily 与 incoPat 创新指数研究中心联合发布的《2019 上半年全球生物医药产业发明专利排行榜(TOP100)》中,专利排名前五的企业,3 个在美国,巩固了美国生物医药产业的全球领先地位。

6. 良好创新生态驱动制造业发展

美国具有世界上最自由的创新文化和创新生态,特别适宜于以“突破”和“颠覆”为特征的新科技的创新发展。高校、研究机构、企业、人才、金融等创新资源要素与良好创新氛围融合,构筑良好的创新生态,促使美国制造业集群与创新集群融合发展。一是,集聚世界一流研究机构。波士顿生物医药产业发展有哈佛大学、麻省理工学院、波士顿大学等诸多高校支持,硅谷有斯坦福大学、伯克利和加州理工等。二是,集聚各类投资资金,推动科技成果转化。如硅谷电子信息、生物医药产业集群的发展始终伴随着风险投资的发展。2018 年硅

谷初创企业获得的风险投资额占整个加州的 79%，占全美的 45%，为全美获得风险投资金额最多区域，发生在硅谷地区。风险投资总额为 190 亿美元，其中 38% 流向互联网公司，15% 流向医疗保健公司。三是，领军企业吸引资源要素。硅谷电子信息有甲骨文、苹果、谷歌、英特尔、微软等，美国航空制造有波音公司、洛克希德马丁公司、美国联合航空技术公司等，生物医药产业领军企业有 Genetech、Chiron、Biogen、IDEC 医药、Celera 和人类基因组科学公司等。

三、对我国的启示

1. 加强顶层迭代式设计，推动先进制造业集群递进式发展

深入实施《中国制造 2025》战略，在《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《智能制造发展规划（2016—2020 年）》《高端智能再制造行动计划（2018—2020 年）》《增强制造业核心竞争力三年行动计划（2018—2020 年）》《关于推进先进制造业和现代服务业深度融合发展的实施意见》等政策基础上，政府应进

一步发挥其顶层设计作用，通过强化规划政策引领、夯实制度保障体系，从政策层面推进制造业集群发展、有效引导高端制造业发展。在国家、省市层面设计税收优惠、产业补贴等减税降费一系列政策推动先进或高端制造业发展，全面深化“放管服”等改革以优化营商环境，制定并实施集群战略以培育先进制造业集群，充分发挥新一代信息技术在制造业升级和新兴产业发展中的作用。推进科技成果的转化与应用，重奖高附加值型科技成果产出，制定政产学研协同的科技成果转化行动方案，利用互联网搭建满足市场需求的科技创新成果共享、转化平台。

加快构建以国内大循环为主、国内国际循环相互促进的制造业新发展格局，推动制造业集群高质量发展。国内大循环中，一方面，利用广大的内需市场，将国内的现实、潜在消费需求作为制造业产业集群创新重要依据，根据区域发展资源禀赋，发挥地理临近效应，打造电子信息、生物医药、汽车制造、航空航天、先进材料、能源化工等多个世界级先进制造业产业集群，强化制造业自主创新，提升中国参与全球资源配置和竞争力的同时，可

通过完整产业链条提高域产业供应链的抗风险能力；另一方面，国家层面出台相应政策，鼓励和促进制造业及其制品消费，保护国内市场及优势产业与技术。国际循环中，一方面，在中美科技脱钩、疫情全球大流行下，中国强调科技自主的同时，还需从发达国家引技、引智，推动制造业向全球价值链的高端攀升；另一方面，推进高水平、高质量对外开放，全面深入实施“一带一路”等倡议，利用沿线经济发展的梯度差异，推动新型全球制造业产业价值链的重构与形成。此外，给予企业税收、财政补贴等方面的支持，扶持大企业打造全球知名企业，鼓励中小企业走出国门，参与国际制造业市场竞争。

2. 依托龙头企业和研究机构，着力构建开放协同的制造业创新生态系统

集聚制造业尤其是本土龙头企业与研究机构，带动制造业产业链、创新链联动发展。一是，构建开放的制造业创新生态系统，以制造业龙头企业和大型企业、高校和科研机构为核心，构建开放创新的生态体系，在全球范围内吸引、集聚包括人才、技

术、资本、知识等优质资源，强化创新要素市场建设，促进创新资源自主聚合。同时优化创新发展环境，推动重点企业与科研院所、高等院校、集群促进机构、金融机构等组成创新联盟，促进各利益主体优势互补、利益共享、风险共担，打造世界级创新集群与先进制造业集群。二是强化企业创新主体地位，给予企业与国立科研机构同等的创新地位，鼓励企业加大研发投入、提升研发机构能级，支持企业组建创新联合体，产学研合作建设共性技术研发平台、个性高端技术研发平台等，并发挥其在重大产业先导、科技专项中的作用，解决产业发展中的卡脖子技术问题。最后，基于现在复杂的国际形势，加强国际先进制造业人才，尤其是海外华人的引进。

3. 促进我国制造业的全产业链体系化与协同化发展，建设完整协同制造业产业体系

大力发展价值密集型、技术密集型高端制造业，同时不可忽视传统基础制造业智能化发展。中国和美国在高端制造，特别是民用飞机、高性能材料、芯片、

生物医药、数控机床等尖端制造和信息技术领域的差距是全面的，而美国的能源化工等基础制造业在全球仍处于前端。为此，中国需要加大力度发展生物医药、电子信息、人工智能、交通装备等先进制造业。同时需要长期重视能源化工等基础制造业、国民经济上游产业的发展和优化升级，利用先进技术和设备推进传统制造业革新，尤其是互联网技术推进传统制造业数字化转型，发展智能制造。通过制造业向产品虚拟化、协作网络化、制造无人化方向转型，促进更多的产业向国际产业体系和价值链的上游迁移，从制造大国向制造强国迈进，变过去的“代工厂”为“高价值产业输出国”。

4. 加大科技创新投入，实施技术创新战略，夯实先进制造业发展的科技支撑

先进制造业的发展与传统制造业的优化升级皆离不开科技创新的支撑，需要加大先进制造业领域的研发资金和研发人员投入，制定和实施“国家技术创新战略”，提升科技创新能力，助力创新型国家建设，增强制造业国际竞争力。一是增强中国创新

竞争力，政府持续加大对研发、专利、标准制定、教育等的财政经费支持，制定并部署新时期国家人力资本战略，培育和吸引全球科技人才，推进重点实验室、大科学装置等创新平台或科技基础设施的开放共享，产学研多边合作，协同突破技术瓶颈。二是保护具有优势的本土关键技术领域，对 5G 等优势领域加强保护并为其发展争取良好的国际合作环境，为中小企业提供更多的网络防御和反倾销支持，促进涉及国家安全、经济安全与核心必需品的关键供应链多样化，增强供应链韧性，确保其安全。三是全面提高对外开放水平，积极与更多国家、经济体签署自由贸易协定并建立多边技术联盟，加快中日韩自贸区建设进程、落实 RCEP 协定，同时加快推动中欧 BIT、FTA、CAI、“一带一路”与欧亚互通战略对接，以区域一体化的实际行动，拓展经济发展新空间，构建科技合作网络。此外，不断优化科技创新环境，加快建立和优化政产学研协同创新机制，加强知识产权的保护，促进科技创新，推动制造业强国建设。

5. 深入推进制造业数字化和服务化融合发展

先进制造业集群建设离不开服务业支撑，通过开展服务型制造、发展生产性服务业，可以推动集群向价值链高端攀升，形成服务与制造相互支撑、相互促进的良性发展格局。同时制造业和服务业相融合的过程，也是产业链向中高端转变、附加价值提升的过程。德勤公司和中国机械工业联合会发布《2014 中国装备制造业服务创新调查》报告指出，全球范围内装备制造业服务化趋势明显，航空和国防、汽车制造、电子信息产业、生物和医药设备领域来自于提供服务所获得的收入占全部收入的比重分别为 47%、37%、19% 和 21%，其中服务业务所占份额最高的 10% 企业，这一比重均超过 50%。通过加快发展基于互联网、5G、区块链等新技术的信息服务，重点发展工业设计、知识产权保护等创新服务，促进制造业服务业的深度融合，推动生产性服务业向价值链

高端延伸，驱动制造强国战略实施。

6. 强化全社会知识产权和品牌意识，着力培育中国制造业产品的全球高端品牌

制造业强国的建设离不开全球品牌的塑造，在全社会大力强化知识产权和品牌意识非常必要。Interbrand 发布的 2018 年度“全球最具价值 100 大品牌”中，中国仅华为 1 家入选。而美国上榜品牌 49 家（制造业品牌 24 家），德国上榜品牌 10 家（制造业品牌 7 家）；WPP 集团发布的 2018 年度“BrandZ 全球最具价值品牌 100 强”中，中国有 15 个品牌上榜（制造业品牌 2 家——茅台和华为），而美国上榜品牌 55 家（制造业品牌 15 家），德国上榜品牌 8 家（制造业品牌 4 家）。可见，中国制造业品牌较少，在一定程度上反

映了制造业的综合实力、国际竞争力与发达国家间存在较大差距。为此，中国应以打造全球知名品牌产业为契机，加速融入全球制造业产业链高端和价值链核心，成为全球制造业迭代升级的重要参与者。激励企业全面提升产品品质，增强市场辨析度和产业领先性，发展耐用品制造业，全面延伸产品生命周期。增强企业知识产权布局意识，鼓励企业积极进入马德里体系进行商标全球布局，引导知识产权优势企业打造高端品牌，向全球价值链高端攀升。国家层面应以有力的行动措施（搭平台、重宣传、给奖励等），扶持企业树立全球化品牌意识，培育和创造全球化知名品牌，积极参与全球化竞争，以全球视野谋划发展。深化国际合作，提升企业自主研发和科技创新能力，通过塑造核心竞争力，融入到全球高端产业链的变革中。MT

数字孪生技术赋能制造供应链



上海天睿物流咨询有限公司 邱伏生 赵新阳

大约从2014年开始,西门子、达索、PTC、ESI、ANSYS等知名工业软件公司,都在市场宣传中使用“Digital Twin”术语,并陆续在技术构建、概念内涵上做了很多深入研究和拓展。即便是如今的2021年,“数字孪生”已经是商业世界的高频词汇,但“数字孪生”尚无业界公认的标准定义,概念还在发展与演变中。也因此“数字孪生”技术在不同领域的应用,都可以发展出该领域内相应标准和模型。

2021年4月26日,2021数字孪生技术峰会在北京国家会议中心隆重召开,刘先林院士在致辞中指出,数字孪生已写进“十四五”规划纲要,在国家层面被认可为建设数字中国的核心技术。数字孪生也被国际权威分析机构评为十大战略科技发展趋势。工信部已经连续4年发布《数字孪生白皮书》,数字孪生技术

开始在工业领域或智慧城市领域开发应用,为决策者提供智能化的辅助决策。

虽然概念仍在发展和演变中,但事实上,现有的工业仿真软件与产品的设计、生产制造中的数据沉积,都是构建数字孪生的基础。数字孪生在工业制造的各个供应链环节的现实场景中,已经具有了实现的基础和创造价值的巨大潜力。

一、数字孪生技术与制造供应链

1. 数字孪生技术

数字孪生思想最早由密歇根大学的Michael Grieves教授命名为“信息镜像模型”(Information Mirroring Model),而后演变为“数字孪生”的术语。数字孪生也被称为数字

双胞胎和数字化映射。数字孪生是在MBD基础上深入发展起来的,企业在实施基于模型的系统工程(MBSE)的过程中产生了大量的物理的、数学的模型,这些模型为数字孪生的发展奠定了基础。数字孪生包含三个组成部分:真实世界的物理产品、虚拟世界的虚拟产品、连接物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口。2012年NASA给出了数字孪生的概念描述:数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多尺度的仿真过程,它作为虚拟空间中对实体产品的镜像,反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。

数字孪生是现实世界特定对象(物理事物)的功能性系统模型。数字孪生体包括现实世界对象的数据结构、元数据和关键变量(比如人物、产品的身份、时

间序列、当前数据、上下文数据和事件等)。更复杂的复合数字孪生可以从更简单的原子数字孪生组装而成。在运营过程中,具有很强的监控能力:即可以使用数字孪生查询真实对象的状态,或接收粗略或精细的通知。

2. 制造供应链发展趋势

众所周知,供应链是围绕核心企业,通过对信息流、物流、资金流的控制,从采购原材料开始,制成中间产品以及最终产品,最后由销售网络把产品送到消费者手中的将供应商、制造商、分销商、零售商、直到最终用户连成一个整体的功能网络链结构模式。供应链发展至今,进入典型的VUCA时代(Volatility易变性、Uncertainty不确定性、Complexity复杂性、Ambiguity模糊性)。已经从单链演变为复杂的网络生态系统,供应链管理的目标就是在不确定性的环境下拨开认知迷雾,在复杂系统中找到最优解,实现有效交付,从而实现企业的价值创造、价值传递和价值获得。所以,今后的竞争,不再是企业与企业之间的竞争,而是(产业、区域、国家)供应链与供应链之间的竞争,尤其是生态“聚核能力”和抗风险能力将成为关键焦点。

在传统的供应链规划、管理和运营中,人们更愿意考虑比较

现实的问题,关注的指标主要是交付、效率和成本,并通过库存来作为平衡的资源调度点位置,“核心企业”被考验的是组织能力、流程与运作优化的能力、运营监控的能力、信息化搭建的能力和通过经验平衡的能力,并在此基础上深化。如图1所示。

平衡是期望获得期待中的利益,但是平衡的结果是“熵寂(或者熵死亡)”——使得流程僵化、组织不同环节自我保护、供应链感知麻木不仁,缺乏全链动态应变、最终丧失竞争力!于是,人们发现:供应链需要应对已知和未知的需求变化,从而不断的响应和“折腾”!

众多的制造企业供应链发展模式一再证明,按照上述的“折腾模式”是没有未来的,过去的成功经验也不再有借鉴意义,因为制造供应链已经发生了以下变化:

第一,制造供应链的逻辑导向发生了变化。传统的供应链强

调“核心企业”,所以供应链信息平台主要是强调“我的企业”的采购、生产、交付的过程信息管理,这种管理并不是以客户为中心的,所以很多情况下容易陷入以产定销,其数据方式是批量的脉冲模式的,数据流动也不是均衡性的;如今的制造业发展,尤其是全渠道产销的企业(从制造到连锁经营,涵盖电商、门店、KA、经销商等),都在强调以客户为中心,日益与互联网、云计算平台链接,其信息化必须从昔日的“存数据/查数据”转向到“制造大数据/消费大数据”的数据驱动的轨道上来。这个转变在服装行业(红领西服、李宁、ZARA)、家电行业(美的、海尔电器)、家居行业(顾家家居)、家纺行业(罗莱家纺)等表现尤为突出。由于技术、生产设施等进入门槛日益降低,全价值链的竞争日益明显和激烈,竞争的核心能力表现越来越转变为供应链的快速响应能力和产品(如爆款)

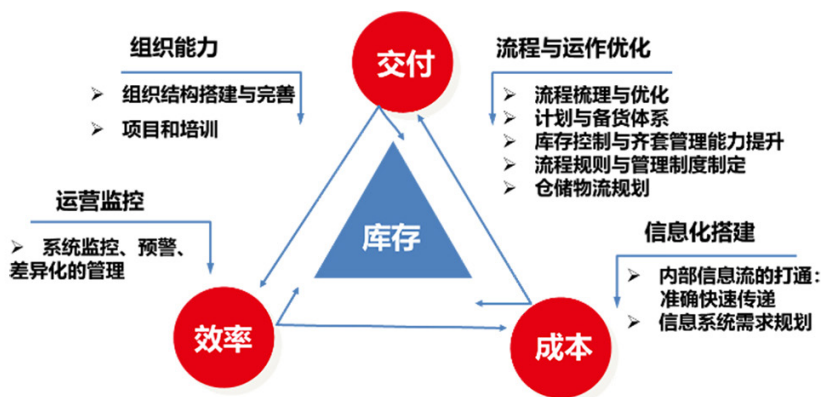


图1 传统供应链的关键关注指标

航空公司、出口、进口、多个国际司法管辖区，影响因素更加多元化；另一方面制造供应链变得越来越复杂，涉及到多个不同的参与者，比如制造商、多级供应商、各种服务商、物流交付、多级买家、终端客户、银行支付机构、技术供应商、供应链管理人员、支持者、咨询顾问等，加上不同的人站在不同的位置理解，影响因素叠加容易产生“牛鞭效应”。此外，还有其他因素，诸如政治、经济（比如中美贸易战）、气候、突发灾难（比如新冠疫情）等带来更多的不定因素。

所以，无论你处于产品供应链的哪个环节，我们不但要关注自身的客户以及客户的客户；也要关注我们的供应商以及供应商的供应商。从消费与流通的角度上来说，我们不但要关注客户需求，也要关注我们的伙伴；不但要关注行业组织，更要关注我们所处的国家、社会环境、政府。从生态链的角度，不但要关注供应商的供应能力，还要关注整个产业链的能力，以及关注生态资源，关注国家的产业政策。所以，整个供应链就变成了一个非常非常复杂的系统。这个系统仅仅采用传统的人工模式、经验模式或者简单信息化模式来规划和运作，是难以想象的——因为其难以保证“设计的、运作的和反馈的一致”，容易出现“承诺的、执行的和兑现的无法匹配”、“信

息中表现的、物理上看到的不在同一频道”等尴尬局面。

数字孪生技术可以很好的解决上述问题。

3. 制造供应链的数字化转型需要数字孪生技术赋能

制造供应链非常强调有效交付，同时提升流动资产的盈利效率，但是一方面由于过程环节中的各种变数，影响供应链的稳定性，另一方面供应链运营过程的信息数字化传递能力的高低，也将影响供应链的感知能力和可视化决策的能力，从而也决定了有效交付的程度。所以，精心设计的供应链数字资产孪生可以有效赋能企业决策，它们与边缘的现实世界对应物相连接，用于了解产品交付过程或供应链系统的状态、预警与反馈、响应更改、改进操作和增加价值。

赋能的基本原理：物理孪生将物联网传感器的数据通过集成平台传送给数字孪生，而数字孪生将分析模拟所产生的洞察、预测、决策经由集成平台送给执行机构或系统，从而优化物理孪生的运营或运转，这样就形成了一个良性的闭环机制。

通过数字孪生技术将制造供应链的各种数字化工具与企业的各类系统，配合、集成和整合成一个系统，以协调产品研发、制造、流通、销售及售后服务的

全过程，缩短产品的研发周期、促进产品的柔性制造和有效交付，全面提升企业供应链的市场竞争力。

二、制造供应链数字孪生的主线与模型

制造供应链始终围绕产品的研发、采购、生产、流通、销售的物理过程实现，并承载了这些横向和纵向过程中的各类数字信息，其数字孪生模型也主要是包含：物理过程、数字化过程和两者之间的连接方式。

制造供应链数字孪生的物理过程主要表现为物料（和产品）的流转过程，比如供应商生产、运输、到货、收货检验、存储、分拣、配送到工位生产或总装，之后下线打包、成品存储、装车、发运到门店或客户手上的物流过程。其中可能涉及到人员管理、环境管理、质量管理以及各类厂房建筑、能源管理、制造技术和物流技术的应用。如图4所示。

制造供应链数字化平台不但要支撑战略发展要求，更要有效落地到具体的应用场景，因为这些地方才是大数据的具体来源，当然也是数据错误的来源。比如在某家电制造企业，已经做了无人化的智能产线，但是物料上线之前，通常是采用供应商特色的包装到货，无法直接通过AGV或者连续输送线送到工位，那么就

只好找一个区域进行分装。由于该物料是空调面板，需要避免刮伤，并且物料尺寸还比较大，所以供应商为了降低运输过程中的成本，同时保证供应链过程中的面板质量，采用了比较大的料架（可以多装运），物料外面包装了海绵纸、泡沫纸、瓦楞纸，然后用金属料架，到了总装厂却需要分装，而分装过程需要场地、人员、与产线工位对接的“合理的工位器具”（为了和机器人对接，通常是不锈钢材料，价格昂贵）、还有物料包装数量和规格的切换，于是此时软件系统基本上是“无动于衷”，无法实现供应链过程中的数字孪生。

制造供应链数字孪生的虚拟过程主要表现为产品概念设计、

客户画像、客户需求、预测、订单管理、计划与库存要求、主生产计划和作业计划、物料齐套计划、供应商到货计划与预约到货、库存信息、质量检测信息、供应商信息和制造信息、物流过程（交付履约）信息管理等。如图 5 所示为典型的制造供应链数字化要素。

制造企业供应链与商业物流、物流企业最大的不同，就是制造企业有制造、有生产计划、有物料齐套计划和要求，这些需要全过程处于“同一频道”，虽然制造企业也强调效率，但是更强调保证效率的全价值链过程的有效协同和管理。所以，制造供应链数字孪生的虚拟构建过程中需要重新梳理基于满足（智能）

制造的价值型供应链逻辑，由于未来是以交付为中心的制造，所以需要建立推拉结合系统（很多企业推动的“积放链系统”）。拉动层面，从订单到交付，拉动制造计划和实际装配，拉动物料齐套，拉动供应商到货；另一方面的推动层面，从预测、市场投放引导开始，数据分析后由主生产计划分解为物料需求计划和采购计划，根据库存策略和采购策略，形成采购订单，从而推动供应商的采购生产和交付。两者需要实施协同、全过程通畅，此时的物流信息化，绝不仅仅是采用什么软件而已，而是能够从两个维度切入供应链和交付能力的管理，并且在这个基础上以特征参数和 KPI 为切入点，梳理供应链

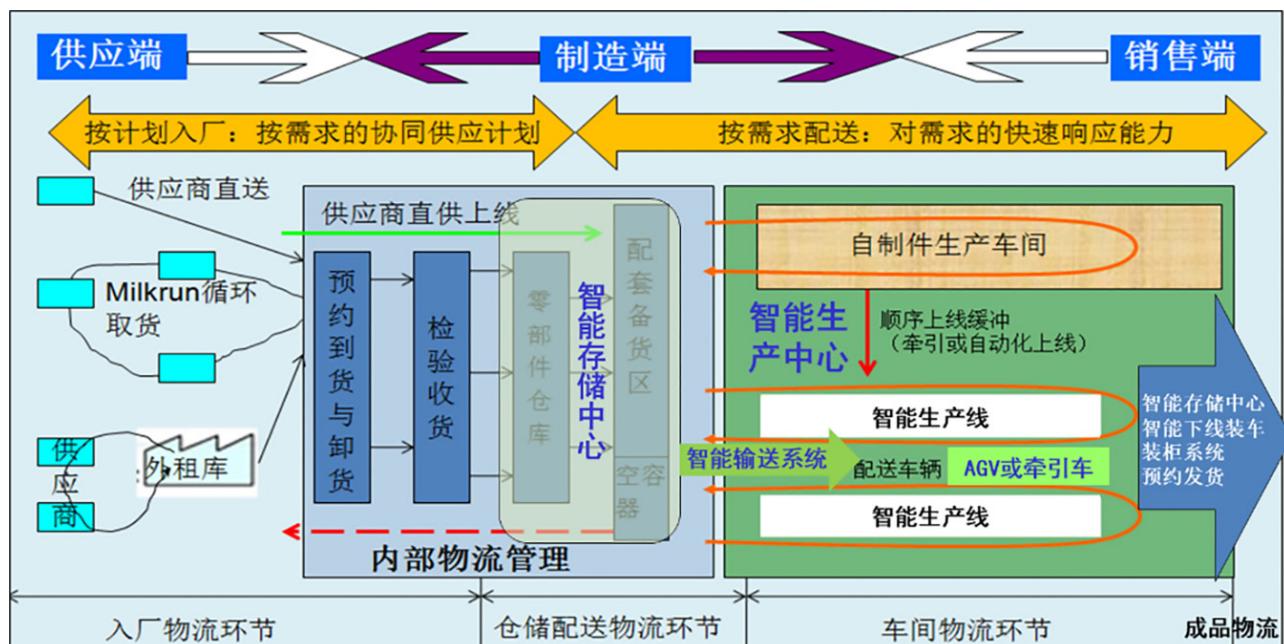


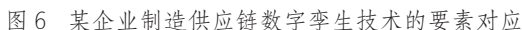
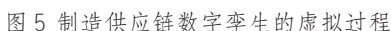
图 4 制造供应链数字孪生的物理过程

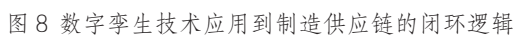
当对应关系建立起来后，制造供应链数字孪生平台需要重点关注送货计划与到货管理、存储计划与存储现场、配套计划与实物配套、作业计划与现场作业管理、总装计划与总装作业管理、装车计划与装车装柜等六个对应

的关键环节参数和标准执行，以解决数据一体化、偏差管理一体化的系统性要求，保证系统能够实现差异控制、先期预警和应急管理。过程中还需要考虑包装器具设计与身份管理、存储空间数字化规划和智能仓储设施、工位智能化配送模式和响应参数设置、成品下线到智能化快速化装车模式等方面的设计。如图7所示。

在智能制造系统中，通常需要实现虚拟到现实的制造过程，在构建智能工厂信息平台时，需要思考虚拟信息、虚拟制造、执行过程、参数选择与实际物理作业的人机料法环的对应。运营平台的主要功能不再仅限于“存储信息”，而是需要进行“是否有利于订单交付”的过程监控，同时需要根据信息与物理之间的偏差实时反馈，实现数据感知、分析和对制造设施、物流设施的智能调节和优化。数字孪生技术应用到制造供应链之后能够解决产品虚拟设计、虚拟装配、实体制造，打通研发、制造、物流、客户之间的壁垒，形成虚拟与物理之间的闭环论证，有效缩短产品交付周期和供应链过程质量的问题，其逻辑关系如图8所示。

制造供应链数字孪生充分利用制造供应链物理模型、多个环节的传感器更新运营历史数据,集成多环节(如研发、采购、制造、交付等纵向管理)、多主体(如供应商、客户及其上下游等横向管理)、多学科、多物理量(如包装、运输、分拣、制造等动态数据)、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体流动的全价值链周期过程。制造供应链数字孪生模型是一种超越现实的概念,可以被视为一个或多个重要的彼此依赖的研发、制造、物流、营销系统的数字映射系统。它将





供应链过程中物理世界的参数重新反馈到数字世界，从而可以完成仿真验证和动态调整。在制造供应链构建过程中，在实体体系（通常表现为制造工厂）尚未建造起来之前就完成相应的供应链概念设计和数字化模型（也就是通常所说的场景设计），从而在虚拟的赛博空间中对目标供应链进行仿真和模拟，并将真实参数传给实际的工厂供应链构建过程中；而在供应链构建完成之后，在日常的运维中，两者继续进行信息交互，因此制造供应链数字孪生模型更加强调模型在产品全价值链过程中虚拟环节和物理环节表现之间的反馈交互。

在数字供应链孪生和物理供应链孪生之间，一个孪生互动平台系统负责连接、交互、数据交换、控制和用数字洞察驱动优化

等。它主要包括：用户、API、人机接口；物联网平台及接口；供应链数字平台（ERP、SCM、MOM、WMS、TMS等）；供应链监控、数据交换、可视化、安全等。这个孪生互动平台系统是供应链从实到虚的映射器，虚实之间的连接器，和孪生智能的转换器，也是数字洞察的驱动器。

典型的（智能）制造供应链数字孪生技术需求归类如图9所示。可以将制造供应链运营分为A、B、C、D四个区域。

A区（见红色虚线区域）需要回答的是“一个需要具备何种交付能力的（智能）制造供应链”问题。它是制造供应链数字孪生技术平台构建的重要表达模块，是将经过规划的供应链——物流战略要求、战略绩效转化为交付过程的可视化监控，包含不限于

（可视化的）订单交付全流程、订单准时交付率、生产/物流作业变动率、预测准确率、产能利用率、生产准备物料齐套率、生产工位配送准时率、车间现场物流和制造作业效率和成品发运到货准时率等。这些指标通过算法逻辑，转化为整个供应链运营信息平台的综合参数和设计要求，同时也成为工厂日常的经营指标，可以形成实时的曲线或阶段性的统计报表，通过显示屏、终端、APP或者平台实现信息实时播报或人工查询，必要时可以建设成为“驾驶舱”模式。

B区（见灰色虚线区域）需要回答的是“（智能）制造供应链需要面临如何的需求”问题。它包含需求管理和产销平衡，是智能工厂生产需求的重要输入，其准确性和一致性，是保证（智



图9 典型的制造供应链数字孪生技术需求归类

能)工厂产能诉求的前提,也是衡量制造供应链运营有效性的监测和考核。需求管理包括数据收集、预测分析、预测评审和预测发布;产销平衡包括供需匹配、产销协同或 S&OP(销售与运营计划)、产能可视、预测冲减和调整等。这些功能将各种预测方法转化为算法,通过供应链运营信息平台实时提示、在线推动资源的调度。在通常情况下,管理者看到的只是平台终端表现的相关数据,而不是逻辑;而在平台规划的时候,需求数据的采集、整理和算法,以及时间序列、产品 SKU、市场导向、交付模式需求等就成为了制造供应链数字孪生技术平台的核心能力。

C 区(见绿色虚线区域)需要回答的是“制造供应链如何保证制造和交付”问题。它是实现服务型生产的虚拟和现实过程,也是人们通常理解的“狭义的生产”。实际上,按照“制造工厂物流中心化”的规划与运营思想,可以将 C 区业务领域理解为一个“自动化物流中心”,将智能生产设施“流线化嵌入”到物流运营过程中,最后按照订单适时交付。主要逻辑是:制造供应链数字孪生技术信息平台承载了计划、采购、物流、生产业务,通过交付计划拉动作业计划、拉动物料齐套计划和供应商到货计

划,从而指挥和调动智能物流设施和生产设施,完成生产和成品物流的过程,最后保证了交付计划。C 区主要包含生产计划、智能物流和制造。生产计划包含车间主生产计划和详细排产,需要说明的是:在智能工厂中,生产计划必须包含物流计划的各个环节,比如供应商到货计划(窗口时间)和实际到货时间、卸货计划和实际卸货能力和时间、卸货车位使用计划和实际占用时间、检验计划和实际检验放行时间(检验放行准时率)、入库计划和入库时间、分拣计划和分拣时间、配送计划和配送时间等。智能物流包含先期准备的入厂物流(智能物流 1)、为工位存储和智能化配送的生产物流(智能物流 2)和下线装车发运的成品物流(智能物流 3)。在智能工厂中,“三段物流”不再是物理上的 1—2—3 排序,而是基于“物联网”的模式,集成为一个综合运营系统。比如:将零部件货位与成品货位共享;将零部件立体库通过连续输送设施与工位直接连接,将满载的容器和空容器回流。全程将采购物流、生产物流和成品物流形成信息和物理上的映射。在此基础上,满足各种工艺要求的智能制造设施和检测设施按照供应链的运营节拍(参数的一致性),嵌入到供应链流程中,成

为供应链信息与物理运营平台的一个或多个“流通性生产”的环节孪生。

D 区(见蓝色虚线区域)需要回答的是“如何支撑制造供应链数字孪生技术运营平台保证交付”问题。它主要包含基本参数的设置和导入。特别需要强调的是:基础参数在制造供应链数字孪生技术平台规划初期就需要同步设计和界定,之后输入运营信息平台上,后期采集到的数据,只属于运营数据,必须服务和服从于设计标准数据。

针对不同的订单交付模式,制造供应链过程可能有所区别,比如按订单生产模式(MTO,比如汽车、家居、个性化家电等生产),更加强调个性化订单的交付过程的细化和监控,智能化管理的孪生颗粒度更细化,制造供应链孪生的流程、内容更加具体。比如物流网络布局变为网络化工厂布局,更加注重客户满意度、订单交付准时率、物流资源调度的有效性和实时性。对于按库存生产模式(MTS,比如饮料、食品、手机等标准化产品),需要强调库存流动、分布式生产模式、门店管理的算法,其信息平台覆盖面需要更加宽广,更加需要关注库存周转率和效率损失的问题。

在制造供应链数字孪生技术运营平台时,应基于“大供应链

小生产”、“智能工厂物流中心化”、“以交付为中心”的大原则。
“以交付为中心”的智能工厂供应链信息平台基于成品到客户交付拉动入手，之后梳理智能化制造、智能物流配送、生产备料、车间排程、生产计划和需求管理，形成一条表现为“高效交付”的供应链。如图 10 所示。

三、制造供应链数字孪生平台的构建原则

制造供应链数字孪生平台涉及到基础业务逻辑、物理物流、软硬件节点、参数与运营 KPI、使能技术和人力资源管理等多个维度，无论是从哪个维度和环节入手打造制造供应链数字孪生平台，都要落实到产品质量、交付期、成本、效率等实际问题上。比如，制造供应链所有的计划、排程、物料、配送、进出库、包

装、生产、运维、能耗管理等都必须考虑设备因素。在智能制造大环境下，让生产设备、物流设备、检测设备、物流载体和物料本身实现互联互通、系统集成、数据集成，都尤为重要。又比如，企业对供应链“快、柔、稳、精”的目标要求越来越明确，无论是生产指挥和物流—供应链管理，还是智能工厂中的智能排产，都要求供应链能够更精准高效的配套生产需求，以此来实现生产与物流各环节人、机、料、环、测的全面互联互通，建立生产与物流、交付、上下游企业之间的大生态管理，源源不断的挖掘数据价值，进而更好地实现降本增效和转型升级。制造供应链需要通过数字孪生技术平台来协同拉通企业内部和企业间价值网络，实现纵向集成网络化制造和横向集成，以及端到端的全流程集成。

在构建过程中，需要遵循以

下原则。

1. 顶层设计的原则

制造供应链的战略定位驱动数字化的顶层设计。比如领先的企业通常都会设立供应链协同中心和控制塔，并由此集成信息、物流、基建、生产设施、物流设施、产品、客户等的相关信息，并以物理物流和交付为主线，进行顶层设计。以终为始，才能够重新定义供应链数字化平台的概念设计、关键功能、绩效、系统化的功能模块和实现路径，避免盲目采购和开发一些未必适用的软件模块，取缔不合理甚至成为桎梏的软件。

2. 尊重业务的原则

构建制造供应链数字孪生平台需要基于有效研发、制造和交

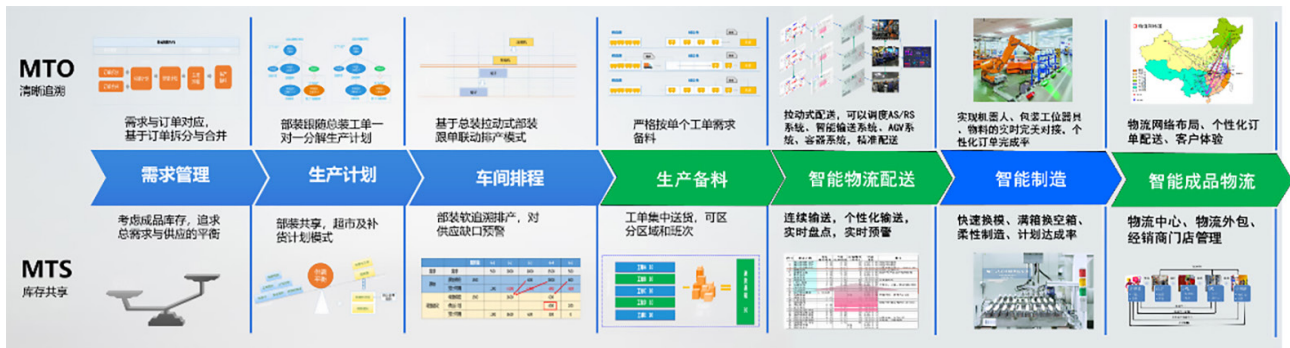


图 10 表现为“高效交付”的供应链

付的业务基础上，强调三个“是否有利于”即：是否有利于业务发展；是否有利于关键绩效的提升，帮助企业提高盈利能力和周转率，从而获得核心竞争力；是否有利于实现客户价值。在这三个要素的指引下，结合各种使能技术，应该更容易达到为企业赋能的目的。

3. 作业场景优先的原则

制造业供应链平台不但要支撑战略发展要求，更要有效落地到具体的应用场景，因为这些地方才是大数据的具体来源，当然也是数据错误的来源。重要的物流作业场景比如收货场景、分装场景、检验场景、存储场景、分拣场景、配送与输送场景、工位物料使用场景、成品盛装、成品存储、成品发运场景等。作业场景数字化、映射化、智能化水平决定了供应链运维的有效性和生产交付的有效性，从而也决定了整个智能制造系统的有效性。比如在一个新的产品制造方案中所引入的机器人干涉了一条物流传送带，布局工程师需要对传送带进行调整，并发出变更的申请，当发生变更时，同步执行影响分析来了解生产线设备和物料流动中哪些会受到影响，以及对生产调度和实际交付会产生怎么样的

影响，这样在设置新的生产和供应链系统时，就能在需要的时间里获得正确的设备配置和流量测算。

4. 推拉结合的原则

以客户需求和有效交付作为拉动，协同制造—物流—供应链一体化、孪生化逻辑设计。企业需要重新梳理基于满足（智能）制造的价值型供应链逻辑，由于未来是以交付为中心的制造，所以需要建立推拉结合的“积放链系统”。实施协同、全过程通畅，从两个维度切入供应链和交付能力的管理，并且在这个基础上以特征参数和 KPI 为切入点，梳理供应链数字化逻辑。

5. 系统性原则

制造供应链数字孪生平台，不再是多个功能软件的叠加，而是一体化、互联化、映射化。企业需要将其在产品全生命周期中和各种供应链过程中所需要的数据、信息和知识进行整理，结合信息系统，建立便于系统集成和应用的产品数字孪生模型和供应链数字孪生的过程模型，进行多学科、跨部门、跨企业的产品协同设计、制造和管理，通过供应链数字孪生模型支持关键技术创

新、大批量定制和绿色供应链。基于数字孪生技术赋能，整个供应链表现出高度的智慧、快速的反应能力、优良的人机界面和知识共享能力。比如，使用大数据技术直接从生产设备中收集实时的质量数据，将这些信息覆盖在数字孪生模型上，对设计、标准、计划和实际制造结果进行比对，检查两者是否存在差异，找出产生差异的原因和解决办法，确保生产能完全按照规划的来执行。

6. 创新的原则

强调互联互通，期待适度创新、导入新技术。所谓的互联互通，不仅仅是人、机、料、法、环、测的互联互通，更多的还有与智能物流设施的对接、与智能制造设施的对接、与智能检测的对接、与供应商的对接，并且需要强调实时数据，此时数据量是海量的、多维度的，不仅需要移动信息、无限信息，更多的可能需要导入深度学习、智能算法、5G 技术和 AI（人工智能）技术、智能物联网技术、云计算技术甚至区块链技术。在新技术的加持下，供应链信息平台应该有更多的发展动力和空间。

7. 迭代升级的原则

数字孪生技术赋能制造供应链的范式只有趋势没有定势，需要有升级计划。鉴于供应链过程的复杂性、动态性和多维度的特点，供应链数字化平台发展需要以终为始，一次规划、分步实施，制定达成路径，不断迭代升级。

8. 拉通价值链的原则

制造供应链需要打通整个价值链，数字孪生技术也将“全程都在”。供应链数字孪生模型可以对不同的生产特点进行模拟仿真和评估，结合大数据分析和统计学技术，快速找出有空档时间的工序。调整策略后，再模拟仿真整个供应链系统的绩效，进一步优化实现所有资源利用率的最大化，确保所有环节上的所有人都能够尽其所能实现盈利能力的最大化。比如，在运输的过程中

可以通过数字孪生技术将信息全面的记录下来，还可以实现运输的总成本最低，这个数据可以返回给供应链环节上的每一个使用者，这样数据的共享就产生了价值的创造；可视化排产与订单实时仿真可以有效的缩短供应链的反应时间，提高供应链的反应能力，增加智能供应链的抗风险能力和柔性能力，是整个供应链链条降本增效的必要手段。

随着客户的个性化要求日益明显，产品也呈现不断的分化之势，复杂性不断增加，这也导致了制造供应链过程也逐渐复杂，对于供应链数设计的所有过程均有必要进行完善的规划。在数字孪生模型中对需要制造的产品、制造的方式、供应链相关资源以及流经的地点等各个方面进行系统的规划，将各方面从顶层设计的维度关联起来，以避免某些要

素的结构性缺失。

当企业逐渐实现了价值链数字孪生拉通、采购数字孪生、物流数字孪生、生产数字孪生和交付数字孪生之后，整个供应链计划—执行将完全与信息平台融合，实现CPS（信息物理系统）。制造供应链数字孪生过程代表了价值链过程信息的各个物料（或产品）包装单元，都将“会说话”，与平台上的所有元素进行对话和交流，实现人、机、料、法、环、数、测的互联互通，对接工业互联网，从而实现数字化、网络化和智能化。未来的差异可视化可能也不再是反馈给管理人员并通过开会解决问题，而是反馈给整个供应链运营信息平台系统，从而实现这个系统的实时反馈（Feed Back），形成自组织、自管理等智能化的表现，最终保障智能制造和智能供应链的迭代升级。MT

参考文献：

- [1] 陈明 梁乃明. 智能制造之路 [M]. 北京：机械工业出版社，2018.
- [2] 罗戈研究. 2020 数字供应链孪生研究报告.
- [3] Lora M. Cecere 魏计美（译）. 供应链量化管理. 北京：中国工信出版社，2016.
- [4] 邱伏生. 智能供应链 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.
- [5] 顾建党，俞文勤，李祖滨. 数商：工业数字化转型之道 [M]. 北京：机械工业出版社，2020.

加速智能制造

——生态系统方法的价值



Paul Wellener, Ben Dollar, Stephen Laaper, Heather Ashton 和 David Beckoff

【编者按】本文为德勤会计师事务所能源、资源和工业部门的专题报告（原标题为 Accelerating smart manufacturing—The value of an ecosystem approach），通过调研和访谈制造业企业及其管理者以及相关案例，就智能制造生态系统的建设提出了相应观点和方法。本刊全文翻译刊登，为国内相关专业人员提供参考。

为应对新冠疫情，需要更高的灵活性和速度，领导人应考虑着力发展智能制造生态系统，以加快数字化转型，并在下一个常态下推动成果。

一、引言

2020年3月11日，世界卫生组织（WHO）宣布新型冠状病毒肺炎（COVID-19）为全球大流行病。由于北美和欧洲地区保护一线工作人员的个人防护用品和治疗患者的呼吸机严重短缺，全球供应链的瓶颈和供应短缺给疫情最严重地区不堪重负的卫生保健系统带来压力。许多国家的领导人对供应感到绝望，转向制造

业寻求援助。解决办法就是地区制造业网络全力扩产疫情一线急需的医疗设备。

以下案例说明了在实现更快的周转和促进合作伙伴之间更好的协作方面，制造业生态系统和数字工具可能具有的价值。以下案例还表明，当不同的组织拥有一个共同的目标并且能够利用数字技术时，协同创新和协作可以多么迅速地发生。

制造业生态系统如何加速生产

在美国，政府启动国防生产法案（Defense Production Act）并指定两家美国汽车制造商建立全国呼吸机库存。两家汽

车制造商都迅速起建立临时生态系统来完成订单，同时与医疗设备制造商结成伙伴关系。2020年年底，两家生态系统将共计承包生产超过20万台呼吸机。汽车制造商还与汽车行业协会和其他制造商分享了设计规范和制造计划，以提高自己的生产能力。

在英国，英国呼吸机行动联盟（VentilatorChallengeUK consortium）汇集了航空航天、汽车和医疗部门的制造商，仅在14周内就生产了10,000余台呼吸机。

2020年3月，增材制造（AM）领域也被调动起来，通过由 America Makes 公司牵头的公

私合作伙伴关系解决医疗设备短缺问题。America Makes 是一家领先的增材制造研究和技术公私合作伙伴关系机构，也是一家美国国防部增材制造创新研究所。这一举措包括为设计师、制造商和医疗行业群体提供在线门户，以便将医疗行业供应商的需求与经临床审查的 3D 打印设计和生产个人防护用品的现有制造商相匹配。截至 2020 年 5 月，该生态系统中的制造商在全国打印和分发了超过 28 万套个人防护用品。

但究竟什么是智能制造术语中的“生态系统”？从本质上说，当不同的实体以有意义的方式走到一起，解决共同的挑战、实现共同的目标时，就形成了一个生态系统。有效的生态系统能够为参与者累加“网络”效应，比起个体努力的相加，生态系统可以创造出更大的价值、增进业绩、创造指数级的成果。所有这一切的基础是协作和“共同进化”的概念。对于智能制造而言，随着先进技术的不断传播，工业 4.0 需要这种进化的观念。

《2019 年德勤和 MAPI 智能工厂研究》表示，接入到生态系统中是行业开拓者（Trailblazers）的一个标志，这些制造商通过采用工业 4.0 技术来解决具体的业务问题、应对机遇，正在取得巨大进展。研究结果激发了我们的兴趣，去进一

步研究制造商如何在组织之外与供应商和服务提供商建立联系，以进一步推进其智能制造发展。

下文“研究方法”中的案例说明了生态系统是如何为一个独特目的服务的，《2020 年德勤和 MAPI 智能制造生态系统研究》揭示了一些关于长期生态系统参与的见解，企业可以利用这些见解加速数字化举措并推动成果。制造业已经走上了数字化转型之旅——可数字化资产的复杂性使这一转型愈加复杂化，某些可数字化资产已经有 50 多年的历史了。但正如《2019 年德勤和 MAPI 智能工厂研究》所示，大多数受访制造商都在朝着这一方向进步。

当前新冠疫情造成的混乱和经济困难，增加了加紧开展智能制造举措以提高未来竞争力的紧迫性。在生产力与创新能力制造商联盟（MAPI）最近的一次 CEO 调查中，85% 的领导者同意或强烈同意到 2021 年 6 月智能工厂投资将会增加。虽然经济学家预测未来三个周期的总体商业投资可能很低，但该调查的受访者表示，他们正将工厂投资中的更多份额投向智能制造项目——36%，高于 2019 年的 30%。这表明，智能工厂投资领域的预算可能不会像总体预算那样迅速缩减。

对这些领导者来说，现在不是缩减开支、积累资源的时候。

相反，现在是对智能制造举措进行深思熟虑的、有针对性的投资的时候，以保证他们的企业机构能在下一个常态中茁壮成长。本文对智能制造生态系统做出定义，强调了制造商利用这些生态系统带来的好处，并为制造业领导者提供了指南，帮助他们确定采用生态系统的步骤。

研究方法

德勤和 MAPI 于 2020 年 7 月联合发起了一项研究，旨在确定智能制造生态系统可以潜在地加速智能工厂项目开展的方式。这项研究对全球三个地区（北美、欧洲和亚洲）的 850 多名制造业公司高管进行了在线调查，还对来自制造公司和生态系统参与机构的 30 多位领导者进行了高管访谈。

二、“完美风暴”加速生态系统应用

自 2020 年初，由于新冠疫情的到来，制造商遭到严重打击，如供需失衡和区域性停工。这种负面影响也波及了数字化转型举措。截至 2020 年 8 月，38% 的受访制造商在评估了新冠疫情的经济影响后，暂停了智能制造方面的投资。他们中的大多数预计将在未来 12 个月内恢复智能制造投资。然而，在技术和数字化转型的世界里，12 个月的时间是很

长的，等待太久的公司可能会在智能制造应用方面进一步落后于同行。尤其是 62% 的受访制造商都致力于推进各项举措，有些甚至还在加快推进（见图 1）。事实上，这些公司平均将 36% 的工厂投资分配给智能制造投资，这一数字比 2019 年的调查结果增加了 20%。

为什么当前的环境已经具备加速的条件？在许多方面，当今流动环境的不确定性需要智能制造能力，从而提高制造的敏捷性和速度。正如一位高管在谈到新冠疫情带来的变化时所说：“产能的变动微乎其微……我们不知道什么能卖，谁能来工作，所以我们只得加快行动（来推进智能制造举措）。”

我们采访过的许多公司都在加紧扩大工业 4.0 技术在其工厂

的使用，以应对新冠肺炎造成的影响。高管们分享了安装计算机视觉系统为客户提供虚拟工厂游览的案例；为线路工人增配可穿戴设备，当他们迈入到同事的六英尺私人空间时发出信号；甚至迅速增设协作机器人（Cobots）来增加劳动力，因为疫情期间工人们不能肩并肩地在生产线上工作。

一般来说，有一种假设是采用先进技术需要几个月的时间。然而，如果公司与供应商围绕着利用技术解决业务问题这一点，通过事先与外部的联系来建立关系，情况就不是这样了。一家市值 200 亿美元的全球制造企业的一位高管在接受采访时指出：

“（因为新冠肺炎疫情，）我们部署了超出计划数量的协作机器人。只需要三个月的时间，就可

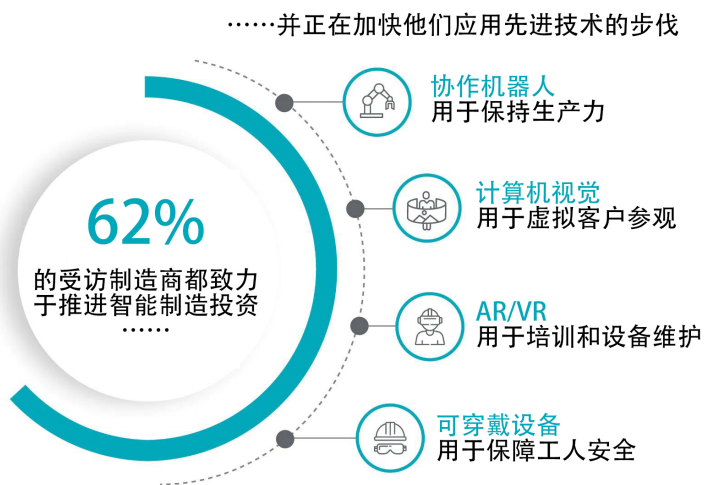
以很容易地在工厂中应用一个协作机器人……它们非常智能，并且能与员工联系起来。”这种方法可行是因为公司已经为协作机器人等功能的特定的供应商网络进行了标准化。换句话说，制造商已经利用解决方案提供商的生态系统来加速其智能制造举措。

我已经建立了智能制造的供应商关系。这是否和生态系统一样？

在讨论智能制造的生态系统时，一个常见的误解是认为生态系统同与合作伙伴或供应商的现有关系是一样的。虽然许多制造商可能与外部各方建立了若干联系，以协助实施智能制造举措，但生态系统方法需要各方与各方之间、所有方共同进行深思熟虑的协调。这种围绕制造商共同业务目标的协调是生态系统与提供智能制造解决方案的多家供应商的区别。

制造商很难独自保持快速数字化转型的步伐，生态系统则能实现更大的能力和灵活性来大规模地适应新世界。这些多对多关系的成功果实可以被所有参与者共享，也就实现了双赢。而且，就像在生物界的生态系统中一样，商业生态系统中的所有参与者都有着共同的命运。这就需要保持生态系统的平衡和健康。

我们明确了支持智能制造举措的四个主要生态系统：生产生态系统、供应链生态系统、客户



资料来源：《2020年德勤和MAPI智能制造生态系统研究》

图1 智能制造投资有助于应对新冠疫情挑战

生态系统和人才生态系统。虽然子生态系统有许多，但基本可以归属于这四个类别中的一个（见图2）。2020年德勤MAPI研究的重点是生产生态系统，但所有这四个生态系统都具有重要的相互联系。

在生产生态系统领域，我们确定了制造商更有可能应用的一组智能制造应用案例——“Great 8”，并且2019年和2020年的研究都标出了应用的程度（图3）。

三、为什么是现在？智能制造生态系统参与的好处

当你处于一个生态系统中时，就会获得创新能力来帮助你转型，并可以利用群体的集体智慧。

为了保持竞争力，如今的制造商必须以更快的速度生产更有价值、更好的产品。利用先进的技术和精通技术的人才来优化生产流程，风险很大。由于其复杂性，大多数制造商并没有把这些领域全部弄清楚，但他们未来的成功取决于此。生态系统可以帮助促进更快速的数字化转型，为公司提供近期增长和战略性长期利益（见图4）。这些生态系统甚至可以对财务业绩产生直接的影响（见下文“与财务业绩增长相关的生态系统重点”）。



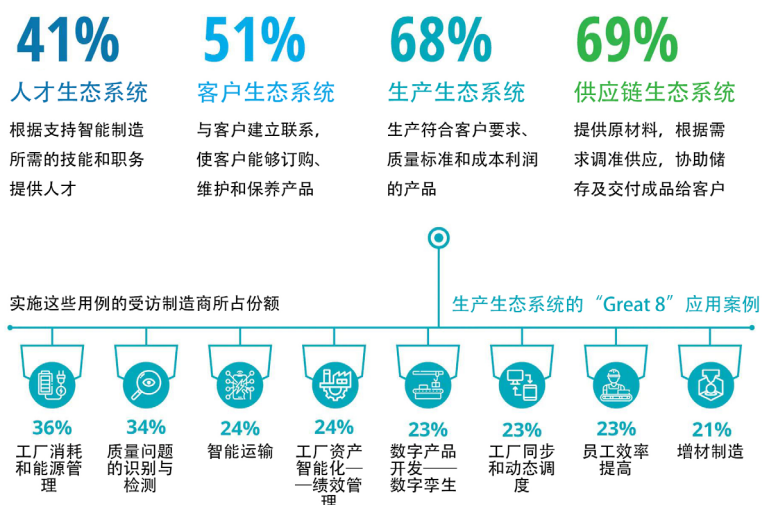
生态系统能力*：

- 已建立联系的客户
- 动态实现
- 智能供应
- 同步计划
- 人才准入
- 智能生产
- 数字化发展/创新

*生态系统能力在不断发展，可能不限于上面提到的能力。资料来源：德勤分析。

图2 智能制造生态系统中的关联参与者和功能

与这些生态系统建立联系的受访制造商所占份额



资料来源：《2020年德勤和MAPI智能制造生态系统研究》

图3 智能制造中的四个初级生态系统及其支持的“Great 8”应用案例

与财务业绩增长相关的生态系统重点

对《财富》500 强制造商的一项分析发现，与战略联盟少于 15 家的公司相比，拥有 15 家以上战略联盟的公司，在 2019 年实现了两倍的同比收入增长。这些高增长的制造商在其年度报告中使用“生态系统”一词的频率是同行的三倍以上。

1. 利益 VS 衡量标准

生态系统利益的发散性往往使人们难以衡量其对业务的影响。在标准的供应商—客户关系中，解决方案提供商通常是根据一组切实的标准来衡量的，其中许多标准是公司用来评估生态系

统性能的核心标准，例如按时完成项目或通过提高效率实现的成本节约。而对于生态系统而言，评估合作伙伴的标准可能是具体的，但生态系统的利益通常被认为是“更宏观的”，囊括了这些网络改变业务方式的各方面潜力。受访高管们分享了他们使用的衡量标准。

例如，大多数制造商衡量其生态系统合作伙伴提供的价值的最主要方法是使用与生产力或效率相关的衡量标准。然而，受访制造商报告称，拥有智能制造生产合作伙伴和联盟的生态系统带来的最大两个利益之处是“加快新产品/服务交付速度”和“增加产品/服务的收入”。排在最后一项的利益是“通过提高效率

降低运营成本”。因此，虽然降低成本可能是与智能制造生态系统合作的一个积极结果，但受访制造商似乎注意到，借助这些生产生态系统，他们的产品上市时间更快，而且拥有了新的渠道/市场。图 5 给出了他们所体验到的一些额外益处，并根据制造商生态系统方法的成熟程度进行了进一步细分。

应用案例 1

创建市场，加速搭建智能制造生态系统

大众工业云（Volkswagen Industrial Cloud）是一个开放平台，自 2019 年以来，与亚马逊网络服务（AWS）一起开发，用于整合来自大众集团所有 122 个生产基地内的所有机器、工厂和系统的数据。该平台利用机器学习、IoT 和数据分析工具，实时处理大众生产基地的信息，以改进流程。大众工业云现在正以其更长期的目标向前迈进，即与全球 30,000 家工厂和 1,500 多家供应商及合作伙伴进行联结。为此，西门子加入了大众工业云，以使该平台能够与其他技术和制造公司集成，并可能为大众工厂及其供应商和合作伙伴提供一个智能工厂软件应用程序的“市场”。

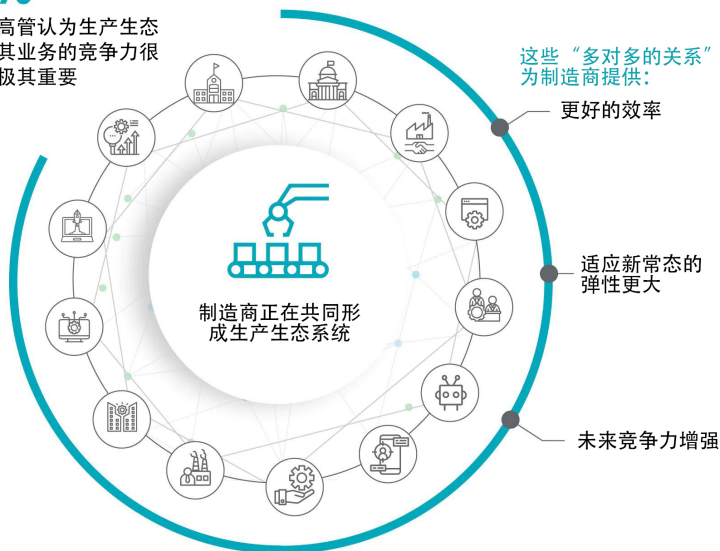
应用案例 2

创建中心资源，利用更大的外部生态系统

为加快围绕工业 4.0 的创

85%

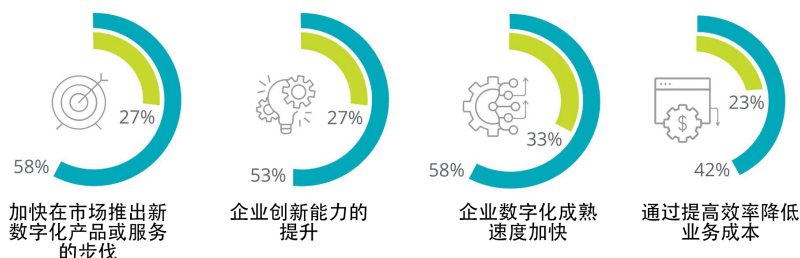
的受访高管认为生产生态系统对其业务的竞争力很重要或极其重要



资料来源：《2020 年德勤和 MAPI 智能制造生态系统研究》

图 4 生产生态系统与竞争力的联系所在

- “拥有实现智能制造所需的生态系统方法”的受访制造商
- “正在考虑，但当前没有利用这些外部联系”的受访制造商



资料来源：《2020年德勤和MAPI智能制造生态系统研究》

图5 以生态系统方法为主导，收获更高效益

新，Fortive Corporation 于2019年成立了人工智能和数据科学中心 The Fort。The Fort 位于宾夕法尼亚州匹兹堡市 Fortive 旗下20家运营公司之一的 Industrial Scientific，与卡内基梅隆大学合作，帮助加强该公司在工业4.0技能方面的人才培养。The Fort 的数据科学家根据运营公司的要求从事项目工作，经常接触更大规模的研究实验室和初创企业生态系统，以确定能够满足业务需求的解决方案。

四、生态系统方法深化影响

制造商通过智能制造举措向更广泛的数字化转型迈进，因其努力的速度和规模不同，他们的生态系统产生了重大差异。特别是当制造商与他们的网络合作伙伴一起解决特定的业务挑战或应对机遇时，可以取得更好的进展。

该研究确定了在智能制造举措方面取得进展的两种不同方法。第一种方法优先考虑企业内部努力，只在需要时才与合作伙伴联系。第二种方法优先考虑从外部寻找使能能力，并在外部合作伙伴之间建立联系。

研究发现，在受访企业中，那些更加外向型并能做到充分利用能力的公司发展得更快。在受访企业中，采用外部合作伙伴方法的公司在其实施的用例中平均有31%是“可操作的”，而那些从内部开发开始的公司只有15%的用例是“可操作的”。这一调查结果支持了《2019年德勤和MAPI智能工厂研究》的发现，该研究明确了那些利用外部支持启动智能工厂的行业开拓者的步伐。

其他制造商在考虑与合作伙伴建立联系，扩大其网络以实施智能制造举措时，仔细研究这些企业的联结方式会有所帮助。对于使用外部生态系统来实现智能

制造的公司，图6重点给出了生产生态系统中的关键合作伙伴，与单一合作伙伴建立关系的传统方法是如何通过这些联系得到优化的。

应用案例

从A点到达B点用时更短

为应对供应链挑战，数字化解决方案领域亟待快速创新，为解决这一需求，乔治亚太平洋公司 (Georgia Pacific) 于2018年底与多个创始会员组建了一个供应链生态系统——供应链创新A点中心 (Point A Center for Supply Chain Innovation)。如今，该联盟已有40余个成员，涵盖制造商、技术供应商和服务提供商。他们着眼于反映其成员真实业务需求的“问题”，并通过其成员的延伸网络获取新的技术和解决方案。这一过程包括问题演讲、应用案例研讨会、共同协议、项目等等。

五、强大的联系由何建立

一家处于智能制造领域成熟端的制造商在过去几年中采用了生态系统方法。该公司汇集了超过24家合作伙伴，以更快地发展其对人工智能、机器人技术、机器学习和视觉系统等先进技术的使用。最近，行业转型的领导者注意到，参与者（供应商）已经开始共同投资生态系统，试图

解决一些智能制造相关的问题。这便是这些合作伙伴为实现共同目标而共同取得的有机成果，生态系统也因此得以实现进一步的扩张。

但是生态系统可以带来的不仅是积累大量的合作伙伴或增加智能制造应用案例的数量。正如上面的例子所说，最佳的情况就是，生态系统的各成员围绕着共

同的问题共同创新，寻找能使多方参与者受益的解决方案。在生态系统中，建立紧密的联系可以带来更多更好的成果。采用外部方法实现智能制造的制造业受访者表示，他们通过合作伙伴带来的额外联系或能力，找到价值的可能性是其他受访者的两倍多。这些额外的联系可以带来意外的机遇，可能加速推动计划举措的落实。

除了关注企业建立联系的数量，该研究还重点指出，制造商选择的合作伙伴类型对成果起到决定性作用。那些选择“内部优先”发展路线的受访企业，与供应商最常见的联系包括企业 IT、作业技术和自动化 / 机器人供应商。与此形成对比的是，那些认为参与生态系统会获得更大收益的受访企业称，他们选择了更多类型的合作伙伴，并与之合作。虽然他们确实与企业软件供应商和运营技术供应商合作，但他们提到，与工业 4.0 技术（云、IoT 物联网、分析等）供应商合作的可能性要高出四倍（见图 7）。且如图 5 所示，这些受访企业报告称，他们的努力带来了更高的收益。

六、成熟生态系统方法的特征

大多数制造商仍在致力于全面实现智能制造的生态系统，

--- 通过直接方式接触合作伙伴的潜在途径

--- 通过生态系统方式进入合作伙伴联盟的潜在途径

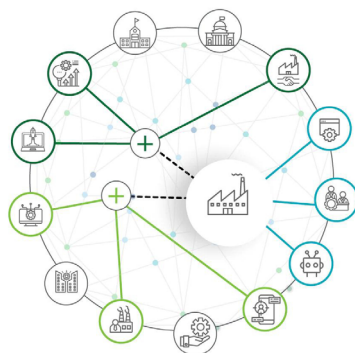
当前状态：建立了 3 个现有联系的制造商



通过直接方式达到期望状态



通过生态系统方式达到期望状态



由一个生态系统输送者 / 赞助者驱动的不同联盟



解锁云端和认知计算应用案例以及对新用户界面解决方案的访问。该生态系统中还包括技术领域企业。



该初创企业与国家级研发实验室合作开发了许多全新的尚待成熟的应用程序，解锁员工效率提升和数字孪生应用案例。



资料来源：《2020 年德勤和 MAPI 智能制造生态系统研究》

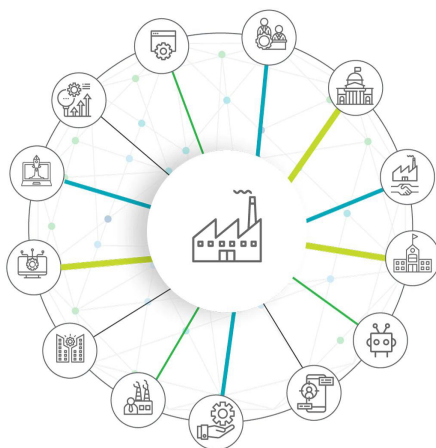
图 6 凭借生态系统，制造商能够更快地了解到新的参与者及应用案例

—相同数量的联系

—2个联系

—3个联系

—4个或以上联系



据调查结果显示，对制造商生态系统贡献最大的5种合作伙伴

#1 IT软件供应商

#2 工业4.0技术提供商

#3 运营技术供应商

#4 物理自动化/机器人供应商

#5 专业服务公司



资料来源：《2020年德勤和MAPI智能制造生态系统研究》

图7 参与生态系统的制造商报告称其联系密度更高，所获益处增多

受访者认为他们目前在其生态系统发展之旅中所处的位置不尽相同。德勤确定了完全成熟的典型生态系统方法的五个特征：

	联系一切
	整体决策
	更快获得价值
	永远保持敏捷性
	统包解决方案

就一个全面发展的典型智能制造生态系统的所有五个特征而言（见图8），受访者自己陈述的成熟度似乎低于他们的行动所表现出来的成熟度。

当被问及他们的生态系统当前的成熟度时，23%到39%的受访高管将自己的成熟度评级为5分中的4分或5分。但这似乎与“有73%的受访者使用某种形式的外部联系来加速他们的智能制造计划”的调查结果不一致。这一差距表明，尽管企业建立了许

多外部联系来支持其在智能制造生态系统方面的努力，但创建具备价值交付能力的生态系统可能比拥有强大的合作伙伴网络更为重要。

原因可能在于研究中发现的几项关键挑战。在创建智能制造生态系统的指南中，一个关键的建议是，制造商可以考虑将战略开发的哲学应用到他们的方法中；另一个建议是，在前期将他们的方法与强大的合作关系发展相结合，重点在于寻找与他们企业具有同等价值和激情的合作伙伴。

七、挑战和风险使生态系统的发展复杂化

为智能制造举措创建生态系统并非易事。有许多因素或将阻碍制造机构与更广泛的网络建立联系，使其难以推进关键智能制造举措。一些挑战反映了建立外部联系所固有的风险，另一些挑战则突出反映了外部联系管理方面的困难。

1. 生态系统的协调可能非常复杂

从生态系统关系中获取价值的一个直接障碍是需要协调努力，也就是需要与多方共同努力，在庞大的工厂中开展复杂举措。高管们反复提到他们在这方面所面临的挑战。有时，当多方共

整体决策

将各方功能联系起来的整合信息能帮助人们在整个生态系统中做出更好的决策，包括产品开发、创新和服务

联系一切

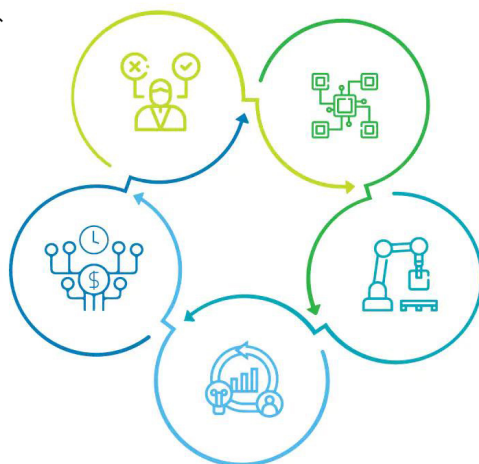
生态系统参与者之间的实时、安全和多模式的通信能够改善协作，使整个生态系统受益

更快获得价值

互补的能力有助于制造机构压缩战略采购周期，提高产品价值，缩短上市时间

统包解决方案

具备不同技术和能力的多个合作伙伴能够帮助制造机构在开发端到端服务产品方面获得竞争优势



永远保持敏捷性

生态系统方法使制造商能够迅速适应不断变化的市场需求和形势，并利用新的机会

资料来源：《2020年德勤和MAPI智能制造生态系统研究》

图8 全面发展的智能制造生态系统的五个典型特征

同解决一个问题、为利用额外资源开始扩大项目时，会有“范围潜变”的危险。这种情况可能会很难处理，特别是制造商在确保互操作性方面没有丰富的技术经验的时候。

推荐方法：

可以考虑在你的生态系统合作伙伴中，选择一个“召集人”，来帮助协调多个供应商的工作。使召集人与您的执行团队或推动

智能制造战略的智能工厂行业领袖保持一致的工作步调，达成一致的工作范围及时间安排。

2. 数据保护和网络安全最为重要

受访制造商中有 58% 对法律、财务、隐私、知识产权盗窃或智能制造生态系统带来的网络安全问题表示感到担忧。在过去两年中，将内部开发视为智能制

造举措最大贡献者的公司，将网络安全基础设施的缺乏列为加入 / 形成生态系统的主要挑战的可能性是其他公司的 1.4 倍。这可能会令他们较难获取到充分利用生态系统网络的好处，从而减慢各项举措的进展。

推荐方法：

由于许多制造商在数字领域面临的风险日渐增加，为应对任何将工厂资产（包括机器和人员）

向企业外联结的活动，企业必须制定并实施网络安全计划。

3. 知识产权盗窃是首要问题

受访企业当前最担忧的是知识产权或智能制造举措的信息泄露，决定了与外部建立联系、促进智能制造举措发展的前景如何。知识产权方面可能尤其具有挑战性，因为知识产权在智能制造环境中有着多种多样的表现形式。它可以与制造过程相关，或与材料相关（例如增材制造方面的知识产权），甚至可以与某种算法相关，比如为使公司以增加盈利方式来管理资产而开发的算法。

推荐方法：

受访的高管强调了对潜在合作伙伴进行尽职调查以及咨询法律顾问的重要性，这样可以确保所有的协议都将保护合作伙伴所共享的知识产权。

4. 各工厂技术能力不尽相同

高管访谈中出现的另一个主题是，制造商们的发展足迹各不

相同。全球 850 多名受访者代表了遍布全球 11 个国家的约 1 万家工厂。一些地区比其他地区更能充分地接受数字化技术，接受程度的不同或将严重阻碍智能制造全面战略的推行。一位受访高管遗憾地表示，要达到更高水平的数据成熟度，以便对工厂生产资产进行预测性和说明性的洞察，是一项挑战。有些地方只是从 1 级成熟度开始，即从不同的系统收集数据。这位高管所在企业采取的方法是，采用不同成熟度级别的行业标准定义，然后在预计时间内努力使所有工厂达到最低 2 级（数据可视化），同时在生态系统合作伙伴的协助下完成工作。

推荐方法：

为智能制造举措制定企业级战略（其中包括关键能力的标准化方法），并确定哪些生态系统合作伙伴是跨区域的、“经过审查的”并且可以做到随时以相匹配的速度为所有工厂提供帮助。

八、前进的道路

尽管面临经济逆风，但现在不是减缓智能制造应用势头的時候。相反，目前的形势似乎已经

成熟，数字技术可以解决制造商在疫情期间维持运营所面临的许多挑战。在当前的市场环境下继续进行智能制造投资的受访企业将其全球所有工厂相关计划预算的平均 36% 用于智能制造。显而易见，正是这些投资支持了这些企业通过数字化流程和技术进行运营模式转型。

2020 年德勤 MAPI 研究强调了对智能制造采用生态系统方法的巨大潜在益处。生态系统可以提供速度，同时使伙伴网络能够围绕共同挑战进行共同创新；生态系统还帮助了研究中提到的许多制造商加速采用智能制造。与同行企业相比，这些企业在一个或多个工厂运行的智能制造用例的百分比更高，而且从生态系统中获得的收益是同行企业的两倍。

生态系统方法是可行的，但不易采用。需要经过深思熟虑的努力，包括管理层就智能制造做出的企业承诺、组织战略、能实现或提供某种利益的意向合作伙伴，以及合作伙伴关系不断培养及他们的共同目标。探索实现智能制造生态系统方法价值的途径，请访问我们的指南。MT

没有退路的变革

——商用发动机的研发平台探索之路



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

引言：从 A380 说起

就在 3 月份，空客公司 A380 完成了最后架次的首飞。而位于法国图卢兹的总装厂，不久之后就会关闭。A380 巨无霸飞机，是飞机产品营销史上的一个灾难。从需求而言，航空市场很快就证明了不需要这样的大飞机。然而从研发体系而言，A380 对于空客公司，是一个里程碑。空客公司的历史，简单来说，就是以 A380 为界。此前，它是一个松散的欧洲多国航空联盟体；此后，它是一个真正强大的飞机制造巨头。在 A380 的研制中，空客公司建立了一个完整而统一的研发平台，彻底地整合了此前分散的制

造资源，将各国的技术标准和质量体系，变成空客真正的基因。在这个研发平台进行后续机型开发，就变得轻松多了。实际上 A350 的快速开发，正是得益于这样的平台，而且成为抵御波音 787 的利器。

一、落后者的追赶

长期以来，中国航空发动机的发展以军用领域为重点，而商用航空发动机研制相对落后。发动机的制造复杂性，代表了制造界的巅峰。在 2020 年疯传美国政府打算禁止提供 Leap 发动机给商飞 919 的时候，作为 Leap 的开发方 GE 公司的抗辩意见中

认为，即使把发动机的结构都打开，中国也不太可能复制。制造难度，由此可见。

而担负着商用飞机发动机开发的中航商用航空发动机有限责任公司（以下简称“商发”），还面临着另外的困难。

一个是公司成立时间短，员工很年轻，许多都是刚毕业的大学生，虽然不少是名校的博士、硕士，学历层次高，但缺乏发动机的工程研发经验。如何能够将有经验的工程师的知识，快速复制和传递？如何能够让充满热情的新人，迅速成为虎狼之师？它考验一个企业的知识传递的速度。

另外一个更头疼的是，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，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，必须要靠大量数据的经年累月的积累。国外发动机的数据记录，一直做得比较好。无论在哪个航线上，都在分分秒秒地为发动机做数据上的贡献。只要波音、空客飞机一启动，这些发动机就开始对飞行情况进行监控，监控器装在发动机上，可以静悄悄地采集各种飞行数据，哗哗地收集数据，天天下载数据。每次飞行的几千个数据通道在采集采样，逐步积累上亿个小时。而如畅销发动机型号赛峰CFM56，已经飞行了累计近3亿小时。

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，找出不确定性，否则模型是没有用的。对于商发公司而言，这些数据不可获取，因为正在研制的发动机，是中国第

一台自主研发商用大涵道比的涡扇发动机。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。

落后者的追赶，只有一条路，那就是集成研发——建立完整的研发体系，并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。

发动机的研发，在国外都是直线赛道。而中国，仍然处于障碍赛跑道上，到处都是障碍。如果只关注速度，而不掌握跨越障碍的各种技巧，很难扳回落后的局面。而集成研发，正是凝聚研发体系的魂魄。空客A380所依赖的平台，就做到了这一点。

集成研发，不是一道可选题，而是必答题。

二、型号和体系平台，需要双驱动

集成研发平台，就是建立一套面向管控设计过程的集成研发环境。它要求整个过程中的任务流程、工具、标准规范、数据，

以及相关关联的工程设计数据库等，都在一个平台上完成流转，而且还要与既有的信息化系统相融合。

这意味着在研制发动机型号的时候，需要同步为自己发展出一套合适的平台工具，这套平台将会在后续型号的研发中，起到事半功倍的作用。二者是有矛盾的，型号研制要求速度快，而平台则要求底盘稳。但是，发动机型号的发展，如果不带着体系一起向前冲，就相当于放弃了加速器，冲到后面进行后续型号的研制时，就无法保持高速的冲力。

由于规范了操作和行为指南，集成研发平台将许多隐含的知识显性地存储下来，使得个人知识变成企业的集体智慧。一个工程师，会有自己解决问题的方法，这是一种神秘武器。但一个工程师头脑中的知识，并不是企业的知识。考虑到人员的流动，许多知识会在不知不觉中丢失，使企业失去了持续增长的最大养分。

更重要的是，由于工程设计人员的变动，或者时过境迁，很难还原当时的场景，会导致很多

方案无法重新计算，或者重算了却得不到同样的结果。这正是信息化时代，留下的弊端之一。信息化做到了文档归档，但基本都以文件形式存在，很容易造成静态资料的沉积。而数字化，则是把文档打开，以知识体系的模块化为基础，将数据自由流动。数字化不是简单的归档，而是包含了连接对象、过程、对应数据。例如，一台发动机的设计方案非常多，整机有多少方案，整机下系统有多少方案，此系统又有多少子系统方案，都需要一套清晰的体系结构进行关联，把数据之间的关系，也都交代得清清楚楚。只有这样，在将来的知识重用时，验证过的数据才可以成为重新使用的条件。一个轮子，不需要完整地全部定义，工程师只需要添加格外创意的部分。

民机企业作为一个法人，在后续碰到事故调查的时候，必须要拿出数据证据，否则就有责任赔偿，这就意味着数据的追溯性非常重要。飞机制造要求一切数据必须具备可追溯性，非常注重过程。数据的不可追溯性，是一个灾难。人们想当然地认为，

数据就是“石油”，却没有意识到数据是世上最善于伪装的“石油”，它以各种形态，试图逃脱人们对于它的捕捉。从数据变成知识，需要高级猎手的捕捉。研发平台，就是这样的猎手。它将专业软件和设计方法，实现了有效的集成封装。一方面通过设计活动规范化，固化设计。另一方面，由于工具做到了统一化的模板封装，大大减少了学习曲线，节省了时间，再通过设计过程知识化，沉淀流程、方法体系，融合个人知识，建立数据平台。集成研发是众人拾柴火焰高，从而产生了集体知识加速度。

最重要的是，由此形成了数据结构化的优势，实现数据的成套性、多方案、可追溯性。

数字化转型，就是对数据价值重新认识，而数据背后的知识体系，则是数字化转型的精髓所在。平台，就像支撑直升机再出发的乘机坪，永远坚实可靠。

这是一个双线驱动。商发选择了型号的发展和研发平台的实施，同步进行，建用结合，为用而建，以用促建，这是一种自驱动的生长机制。

三、从零开始启动飞轮

2014年商发在决定做统一集成的研发平台之前，首先以系统工程架构牵引，全面导入产品系统工程开发理念，从企业的纪实性流程、规范，到行业及标杆的实践经验，进行了全面分析和梳理。集成研发平台是对全业务流程和工具、方法、数据的集成，需要兼容现有的信息化系统，要有足够的兼容性。

在这个过程中，需要有效地分解体系。发动机的研发，是一个庞大的系统，内含丰富的设计流程和数据体系。仅仅靠一次项目实施，是无法解决的。因此，商发一开始就成立了类似“研发体系指挥部”的机构，负责将系统问题从顶层拆分，分层次按序列推进。A类重大需求需要先做，B类优化需求往后推，如此类推。而配套体系，就需要一个数据问题管理版本。

在这个过程中，必须要做数据字典，类似一张大表，界定业务之间的概念定义，用来约束

涡轮、压气机、短舱等各个主要部件之间的数据交换等。在美国国防部开发美军体系架构框架(DoDAF)的时候,可以看到构建数据字典,是最早启动的工作。

在这一方面,从外部引入外脑显得非常重要。作为一个多年来一直为航空航天提供集成环境应用的公司,索为系统(北京索为系统技术股份有限公司)提供了多方案管理、数据接口、插件分析、共性设计的解决方案。索为系统的看法是,按照发动机的专业组别,将知识体系进行逐级分类,然后对应着各自的工具软件,尽量将流程、工具、数据三位一体地封装成知识模板。而知识模板的业务逻辑,则由各个专业处室的业务部门来提供。

这些知识模板,让使用研发平台的设计师们,只需要关注自己的设计想法和关键环节。就像是一个舵手,他只需要操纵方向盘,而方向盘之下的轴传动、链传动或者结构学等都被另外做了封装处理。人的知识,将以模块化的方式被捕捉。

集成研发的思路,开始变得清晰起来。商发决定正式启动研

发平台的“研发”。领导决心已定,也进行了全体传达。但具体专业处室怎么做,却并不确定,工程师并不清楚,集成研发要干什么,也不知道日常零散使用的工具,会如何集成到一起。

发动机的设计,除了总体之外,主要包括压气机、燃烧室、涡轮、外部与短舱、空气系统、机械系统、控制系统等几个主要部件和系统。考虑到型号研发的任务同样紧迫,不可能一上来就大规模推进平台研发。商发采用了“先锋先跑,以点带面”的方式,涡轮部门率先行动。由于涡轮还可以继续细分为气动、结构、强度、传热等专业,而气动作为第一尖刀突破口。

涡轮部门的气动团队调来了业务骨干,与数字化部门一起,在研发集成环境上协力攻关。在项目方案评审通过后,经过三个月攻坚战,涡轮部分的研发环境就有了初版,可以用来进行功能展示。虽然并不具备实战性,但涡轮研发环境的雏形演示,让专业团队看到了未来的平台特征,初具震撼性效应。“飞轮效应”的示范性,开始在各个科室发酵。

商发公司决定趁热打铁,开始大规模性地开发平台。然而,老问题,又摆到了桌面上。那就是很多信息化项目,尤其是知识管理项目,最后往往是建设热闹,使用者寥寥,信息化部门和业务部门两张皮的现象,最为常见。

合作并不是轻松的,即使有着同样的业务诉求。当年美国GE跟法国赛峰集团冲破美国军方的层层阻力,最终形成合资公司,却在联合开发CFM56发动机的时候,发现组织的不兼容问题。一开始美国和法国工程师见面时,相互不以为然,各自不同的企业文化在二者之间划下了一道鸿沟。最后双方领导拍板,直接把双方的工程师,关在一间屋子里,任由争吵,前提是要解决问题。十天时间过去了,美法工程师在技术碰撞的火花中,相互点燃了惺惺相惜的友情,早就忘记了各自的公司身份。联合团队的攻关任务,最后力出一孔。

商发公司决定拿出魄力,来推动团队融合。从2015年6月开始,大规模地抽调各个专业团队的技术力量,和供应商团队绑定在一起,集中办公,技术专家、

流程专家，IT 专家，形成“铁三角”。设计工程师的工作被临时格式化了，与原有的业务部门进行物理隔离，成为专职化的知识模板开发者。在问题导向的工程师共处时，共识就像水库大坝的水位一样，越来越高。各个科室的工程师，成为“知识讲解员”，业务过程和数据链接，被解释得清清楚楚，并被封装在知识模板里。这是一场大规模的知识迁移，知识在平台上找到了新的疆土。

上百人在一起的知识洪流，反复被梳理、定向和封装，经过百天大会战，整个平台系统的第一版，已经初具规模。尽管这个版本，依然无法直接上线应用。但已经勾勒出一个数字王国的宫殿，就像毛坯房一样，让人吃了一个定心丸。随后，精装修启动，集中开发知识模板的任务开始了。

这是一场忙碌的知识宫殿的建造。它最令人印象深刻的是小步迭代。时间节点被切分成不同的段落，由于顶层分解得当，人们可以在很短的时间内，看到阶段性成果。它激发了更多的斗志。

四、没有退路 才能进步

尽管集成研发体系对知识体系、质量保证和数据追溯都很重要，但真正用起来，阻力向来很大。设计人员一般并不情愿使用。每个人都会习惯于自己的行为方式，谁也不愿意用一种平台型的约束：因为平台往往是考虑公约数，而很难照顾到个性。很多企业的研发平台，一开始热闹，号召大家使用，但最后就像无人照顾的田地，逐渐长草荒芜而弃。

中国航空发动机集团对此有着清醒的认识。中国发动机的发展，不能再走原生态、自由生长的模式。这种模式在一两个型号或简单任务上，会有很快的速度。但对于复杂任务、多个型号的发展，后劲会严重不足，无法满足商发的持续性发展需求。平台倒逼规范性，只有这样才能产生加速度。平台再难，也必须迎难而上。

数字化转型，既是对现有开发速度的宣战，更是对组织思维的挑战。这就必须要一把手意志推动，领导不下定决心，企业资源不可能高效调度。

作为航发集团的运营系统，AEOS 已经成为集团的信念。AEOS 在航发集团，被称为“一场没有退路的管理革命”。而商发则深入贯彻这一理念，以系统工程加速度对抗组织惯性，坚持将平台作为产品研发的核心地基。

商发启动了组织变革，成立了流程与 IT 部，统一公司流程与 IT 的策划，实施，成立了研发体系与仿真技术部，融合信息化与工程设计，统筹工程设计的信息化需求并协同 IT 部门落地实施构建集成研发平台，并持续维护平台上知识模板的更新与业务的发展协同。

在平台完成之后，开始逐渐引入到各个处室去使用。商发公司意识到了平台的使用是需要推广策略的。简单的硬性分派，并不会产生好的效果。商发保留了“文化先锋队”的机制，让已经激起的平台文化的涟漪，继续传播开来。最开始参与了平台建造的业务人员，在平台开发完毕重新回到原有岗位的时候，有了一个新身份：平台对接人。平时，会将处室使用的各种意见，反馈到平台的常设维护团队；与此同

时，也是业务人员使用研发平台的解释人，平台的活字典。开发者，同时也是推广的种子选手，解释和沟通都是近在身边。

平台使用的便捷性，需要有一个优化过程。刚开始的时候，方便性差，自动化能力不足，也有许多人员对这种设计平台比较排斥。平台的使用，从来都是逼着进两步，放松退三步，退坡效应明显。

而为了防止平台在爬坡期产生的退坡效应，商发制定了相应的规则，那就是型号设计，必须将集成研发平台作为一个统一使用环境。以前任务是否完成，就看线下提交报告的完整性。而现在，任务交付的论证，就看平台的数据齐全性，而不是只看报告。

这一举措，影响深远。它用一种倒逼的方式，让知识工作者的思维，以平台为支撑，而研发体系则变得越来越规范和健壮起来。

商发发动机的集成研发，已经围绕发动机各部件系统建设了200多个流程模板、800多个活

动模板、500多个工具模板。通过集成平台的应用，基本实现了设计过程可控，实现了设计活动规范化、工具统一化、数据结构化、过程知识化和效率高效化。

由于通过对专业软件和设计方法的集成封装，在部分专业设计上减少了设计操作步骤和数据处理时间，降低了人为出错的可能性，大大提高了设计效率。如涡轮增压数据处理，过去依靠人工交互，

完成模型数据前后处理、数据导入导出，然后编制报告，约耗时3天，目前基于该平台仅需1个小时就可以完成，效率提高了近24倍；而涡轮叶片强度分析，过去需要2天左右，目前仅需15分钟即可完成。目前已经有超过5000项设计任务，在平台上完成。平台的知识加速器作用，正在彰显速度。就像飞行员的模拟训练器，新人的技能成长曲线明显加速，而研发时间也在不断压缩。

集成研发的背后，是一套组织方式与知识传递的变革，中间也有很多坑，跌进去再爬出来。

从商发的经验来看，研发体系和集成研发平台的构建，体系架构的设计和推进方法论很重要，但实践更为关键，杜绝完美主义，不断实践，快速迭代。这意味着只有技术、体系、组织都在同步迭代进化，才能真正建立完整的研发平台。

然而，数字化转型，还只是一个开始。集成研发的背后，其实意味着一套研发体系的完善。这是一个持续发展的旅途，不会有完成时。下一步，在设计与需求之间，以及设计与制造之间，进一步打通数字化通道，这是一个更大的诱惑。实现发动机的全链条、全生命周期的全数据管理，才是真正拥有了数据石油矿。数字化转型没有退路，唯有平台支撑，方可一路向前，唯有持续变革，持续创新，才能离成功越来越近。**MT**

五、永远在路上

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 26th 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

www.埃森焊接展.com