CMES
中国机械工程学会

MT机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

http://www.cmes.org

2020 年第 6 期 总第 211 期

制造业全球产业格局演变趋势与中国的应对策略 p1

汽车轻量化材料最新加工技术概述 p14

数字化制造 p31

农业自动化：农场生产效率的提升之道 p41

2020 智能制造十大科技进展 p48

目 录
CONTENTS

机械工程导报
MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2020 年第 6 期（总第 211 期）
2020 年 12 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

专家视点 EXPERT OPINION

制造业全球产业格局演变趋势与中国的应对策略 1
汽车轻量化材料最新加工技术概述 14

热点关注 CURRENT POINT

数字化制造 31
农业自动化：农场生产效率的提升之道 41
2020 智能制造十大科技进展 48

学会资讯 CMES INFORMATION

智能制造科技进展论坛在南京召开 58
2020 中国机械工程学会年会在杭州举行 61

制造业全球产业格局演变趋势与中国的应对策略*

中国社会科学院工业经济研究所　李晓华

【摘要】当今世界正经历百年未有之大变局，制造业全球产业格局也在发生巨大变化。2005 年以来，全球制造业增加值和出口格局呈现中等收入国家、东亚和太平洋地区快速崛起的特征，但 2015 年以后的变化趋缓。由于中等收入国家国内供给能力的增强、市场的扩大以及逆全球化等因素的影响，全球价值链呈现缩短的趋势。影响制造业产业格局演变的主要因素包括资源禀赋变化、国际政治经济关系、技术变革、外部冲击等。新一轮科技革命和产业变革、保护主义和单边主义上升等影响因素仍将继续发挥作用，新冠肺炎疫情的影响逐步显现，未来全球制造业格局将会发生深刻改变并对中国的制造业产生重大影响。面对全球制造业格局演变趋势，推动中国制造业高质量发展需要把握正确的方向，积极加以应对。

【关键词】制造业；产业格局；全球价值链；供应链

当今世界正经历百年未有之大变局。新一轮科技革命和产业变革催生新技术、新产业、新业态和新模式，保护主义、单边主义和“逆全球化”抬头，世界各国比较优势持续改变等因素推动制造业全球产业格局发生显著的变化。科技革命和产业变革深入推进、经济全球化遭遇逆流以及新冠肺炎疫情的冲击，还将进一步改变制造业全球产业格局。中国制造业的发展既面临着日趋复杂多变的外部环境带来的挑战，同时产业基础、创新能力、人力资源、市场规模等方面的优势也给中国制造业向高质量发展迈进、向全球价值链高端攀升、增强在全球产业中的话语权打下扎实基础。新工业革命为中国制造业在战略性新兴产业、未来产业领域的并跑、领跑提供了历史机遇。

一、2005 年以来世界制造业格局的演变

2005 年以来，全球制造业增加值和出口格局呈现中等收入国家、东亚和太平洋国家快速崛起的特征，但 2015 年以来的变化趋缓。由于中等收入国家国内供给能力的增强、市场的扩大以及“逆全球化”等因素的影响，全球价值链呈现“缩短”的趋势。

1. 世界制造业区域分布变化

进入 21 世纪以来，全球制造业最显著的变化是新兴市场国家的崛起和发达国家的相对衰落。如表 1 所示，2005 年不同收入水平国家制造业增加值

注：本文来源于 2021 年《财经问题研究》第 1 期，本刊获得授权转载。

占世界的比重分别为：高收入国家占74.5%，中等收入国家占25.2%，其中，中等偏上收入国家占20.8%，中等偏下收入国家占4.4%，低收入国家的工业化水平极低，制造业增加值仅占全球的0.2%。此后的十余年间，高收入国家制造业增加值占世界的比重下降到2018年的53.8%，而中等收入国家提高到2019年的46.7%，其中，尤以中等偏上收入国家的变化为大，提升了近20个百分点。低收入国家、最不发达国家制造业增加值比重分别提高0.2个百分点和0.6个百分点。但2015年之后，无论是发达国家比重的下降还是中等收入国家比重的提高都大幅度放缓。

如表2所示，从制造业的地域分布来看，呈现出由北美、欧盟、东亚和太平洋地区三足鼎立到东亚和太平洋地区明显占优的变化趋势。2005年，北美、欧盟、东亚和太平洋地区制造业增加值占世界的比重分别为23.8%、24.3%和31.5%，到2017年北美地区的比重下降到17.8%，欧盟地区的比重下降到2019年的16.8%，而东亚和太平洋地区的比重提高到45.6%。在东亚和太平洋地区，高收入国家以外的国家提高明显，从占全球的12.2%提高到32.4%。世界其他地区中，南亚地区占比从2.1%提高到3.7%；中东和北非地区占比基本保持在3.1%，而拉美和加勒比地区虽然在2008—2010年有明显提高，但2019年比2005年降低0.6个百分点，撒哈拉以南非洲地区提高0.2个百分点。

表1 不同收入水平国家的制造业增加值占比（单位：%）

国家类型	2005年	2008年	2010年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
高收入国家	74.5	65.8	61.4	54.9	55.6	54.4	53.8	—
中等收入国家：	25.2	34.0	38.3	44.8	44.1	45.3	45.7	46.7
中等偏上收入国家	20.8	28.6	32.4	38.5	37.7	38.9	39.5	40.2
中等偏下收入国家	4.4	5.4	5.9	6.2	6.4	6.4	6.2	6.6
低收入国家	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
最不发达国家	0.4	0.5	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	—

资料来源：根据World Bank数据库计算

表2 不同地区的制造业增加值占比（单位：%）

地　区	2005年	2008年	2010年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
东亚和太平洋地区	31.5	33.8	39.1	43.5	44.0	44.4	45.1	45.6
东亚和太平洋地区（不包括高收入国家）	12.2	17.9	22.1	30.1	29.8	30.5	31.7	32.4
欧盟地区	24.3	24.3	19.9	17.0	17.5	17.3	17.4	16.8
拉美和加勒比地区	5.9	6.8	7.2	6.2	6.0	6.1	5.4	5.3
拉美和加勒比地区（不包括高收入国家）	5.2	6.1	6.4	5.4	5.2	5.4	4.7	4.7
中东和北非地区	3.1	3.5	3.6	3.2	3.2	3.1	3.2	—
北美地区	23.8	19.3	18.5	18.6	18.3	17.8	—	—
南亚地区	2.1	2.5	3.2	3.4	3.6	3.8	3.6	3.7
撒哈拉以南非洲地区	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4

资料来源：根据World Bank数据库计算

2. 世界制成品出口份额变化

制造业在不同收入水平和不同区域的分布状况变化反映了各国制造业竞争优势的变化，而这一点又在各区域和国家的全球出口份额上表现出来。如表3所示，从不同收入水平的分组来看，2005—2018年高收入国家制成品出口占比从77.1%下降到68.0%，中等收入国家制成品出口占比从23.3%提高到31.5%，其中，中等偏上收入国家占比从19.6%提高到26.9%，中等偏下收入国家占比从3.6%提高到4.4%。但2015—2018年各收入水平国家制成品出口比重基本保持了稳定。如表4所示，从不同地区分组来看，2018年世界制成品出口国主要集中在欧洲和中亚、东亚和太平洋地区，分别占全球制成品出口额的42.0%和39.7%，其次为北美地区占8.9%、拉美和加勒比地区分别占4.1%；中东和北非、南亚、撒哈拉以南非洲地区占比较低。2018年东亚和太平洋地区制成品出口份额相比2005年提高7.3个百分点，但与2015年相比变化不大。欧洲和中亚地区2018年制成品出口份额比2005年下降5.0个百分点，但相比2015年提高1个百分点；北美地区2018年的份额比2005年下降3.0个百分点，比2015年下降1.4个百分点；南亚地区2018年份额比2005年提高0.8个百分点，但比2015年略有下降。

如表 5 所示，从不同类别产品出口的地区分布变化来看，东亚和太平洋、欧洲和中亚地区是制成品（包括资本品、消费品和中间品）最主要的出口地区，其次为北美地区，而原材料出口的地区分布相对比较平均，最高的欧洲和中亚地区占比在 30% 以上，东亚和太平洋、拉美和加勒比、北美地区占比均在 10% 以上。2015—2018 年东亚和太平洋地区的资本品、消费品、中间品和原材料出口占世界比重均有所下降，而欧洲和中亚地区上述四类产品占世界比重均有明显提高。拉美和加勒比地区、北美地区、撒哈拉以南非洲地区原材料出口占比分别提高 1.3%、2.0% 和 2.7%。

3. 世界制造业价值链分工格局变化

近年来，世界制造业价值链呈现缩短的趋势。根据麦肯锡全球研究院的研究，几乎所有商品生产价值链中的贸易强度（即总出口与总产出的比率）都有所下降，全球跨境贸易占全球产出的比例已从 2007 年的 28.1% 降至 2017 年的 22.5%，而且在那些最复杂和交易量最大的价值链中，贸易强度的下降尤为明显。从表 6 可以看到，计算机、运输设备、汽车、机械设备、电气设备、化学、纺织和服装、家具等产业在 2000-2007 年间的贸易强度均有不同程度的提高，而 2007-2017 年间则普遍出现了下降，创新型复杂产品的下降幅度相对更为明显。

全球价值链的缩短是多重因素共同作用的结果。一是发展中国家特别是中国国内创新能力提高，国内配套能力增强，许多中间投入品实现了国内生产而无需到国际市场上进行采购。根据 WITS 数据库的数据，从 2005 年到 2018 年，中国出口商品中资本品的比重从 42.18% 提高到 45.92%，而进口商品中资本品比重从 48.47% 下降到 40.11%，中间产品比重从 24.73% 下降到 20.32%，表现出中国资本品与中间产品自给能力的增强。二是随着经济增长和收入水平的提高，发展中国家本土市场规模持续扩

表 3 不同收入水平国家的制成品出口占比（单位：%）

国家类型	2005 年	2008 年	2010 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
高收入国家	77.1	73.1	72.2	68.0	69.7	69.2	68.0
中等收入国家：	23.2	26.8	27.7	31.6	30.0	30.3	31.5
中等偏上收入国家	19.6	23.0	24.0	27.2	25.9	26.2	26.9
中等偏下收入国家	3.6	3.7	3.7	4.3	4.1	4.1	4.4
低收入国家	0.1	0.1	—	—	—	—	—

资料来源：根据 World Bank 数据库计算

表 4 不同地区的制成品出口占比（单位：%）

地　区	2005 年	2008 年	2010 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
东亚和太平洋地区	32.4	32.8	37.5	39.7	39.6	40.6	39.7
欧洲和中亚地区	47.0	46.1	42.8	41.0	42.3	41.9	42.0
拉美和加勒比地区	4.2	4.0	4.1	4.4	4.4	4.3	4.1
中东和北非地区	1.4	1.8	2.0	1.9	1.9	1.9	2.1
北美地区	11.9	10.8	10.1	10.3	10.3	9.5	8.9
南亚地区	1.3	1.4	1.8	2.1	2.2	2.2	2.1
撒哈拉以南非洲地区	—	0.9	0.8	0.0	0.6	0.6	0.6

资料来源：根据 World Bank 数据库计算

表 5 不同地区分组的不同类别产品出口占比（单位：%）

地　区	资本品		消费品		中间品		原材料	
	2015 年	2018 年	2015 年	2018 年	2015 年	2018 年	2015 年	2018 年
东亚和太平洋地区	46.8	46.0	31.6	29.8	29.9	28.7	16.4	16.3
欧洲和中亚地区	34.8	36.3	45.7	49.6	43.8	45.9	30.8	34.0
拉美和加勒比地区	4.5	4.5	4.1	3.9	5.7	5.16	13.9	15.2
中东和北非地区	1.1	1.4	4.9	3.6	4.1	4.0	18.8	9.8
北美地区	11.7	10.7	9.8	9.8	12.2	11.5	13.7	15.7
南亚地区	0.8	0.8	3.3	2.8	2.9	2.9	1.5	1.4
撒哈拉以南非洲地区	0.3	0.3	0.6	0.8	1.6	1.8	4.8	7.5

说明：世界出口总额由五大区域加总。
资料来源：根据 WITS 数据库（https://wits.worldbank.org）计算

表 6 代表性商品的贸易强度变化

	创新型商品						劳动密集型商品	
	计算机	运输设备	汽车	机械设备	电气设备	化学	纺织和服装	家具和其他制造业
2000—2007 年	13.0	11.0	8.9	7.3	6.2	7.8	8.2	7.3
2007—2017 年	-12.4	-6.2	-7.9	-8.9	-8.3	-5.5	-10.3	-0.8

资料来源：McKinsey Global Institute（2019）

表 7 中国进出口商品结构变化（单位：%）

		2005 年	2008 年	2010 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
出口	资本品	42.2	44.2	46.9	44.3	44.2	45.2	45.9
	消费品	38.4	34.8	35.4	37.8	37. 5	36.4	35.5
	中间产品	16.1	18.7	15.6	16.3	16.3	16.3	16.7
	原材料	3.1	2.1	2.0	1.7	1.8	1.8	1.67
进口	资本品	48.5	42.6	41.8	42.0	42.6	40.6	40.1
	消费品	8.8	10.4	10.0	12.2	12.7	13.0	13.2
	中间产品	24.7	20.4	20.9	23.6	22.5	21.5	20.3
	原材料	17.6	26.3	26.0	21.7	21.4	24.1	25.0

资料来源：WITS 数据库（https://wits.worldbank.org）

大，更多本国制造的商品就地销售而不是出口到国外。麦肯锡全球研究院的数据显示，由于本国消费者的购买增加，印度出口服装占最终产量的比例从 2002 年的 35% 下降到 2017 年的 17%。三是机器人、人工智能以及工业互联网、智能制造等技术的不断成熟，“机器换人”更加普遍，产业的资本密集度、知识密集度不断提高，原本容易实现全球劳动力成本套利的产业链布局在一国内部也变得有利可图[1]。美国等国家在国际金融危机之后推动的制造业回流也对全球价值链缩短产生一定影响。此外，生产靠近市场带来的供应链响应速度的提高、美国发起的一系列贸易摩擦、购买本国货的“溢价”、价值链本地化对供应链韧性的改善等因素也在全球价值链缩短中发挥了作用。

近年来，中国在全球价值链中的分工地位明显提高。中国制造业的全球价值链前向参与度与后向参与度在 2010 年之后均呈下降趋势，低技术和中高技术制造业呈现从下游向上游转变的趋势[2]。但总体上，中国对高技术产品进口的依赖程度仍然较高。用半导体及相关产业、航空航天产业、光学影像和医疗器械产业、机械设备及其零部件、机动车零部件和发动机等典型产品代表创新型密集型行业，2018 年中国创新密集型行业进口和出口比例分别为 26.0% 和 15.9%，其中进口供给率最高的美国、德国、法国创新密集型行业对中国的影响比例分别为 92.3%、45.8%、47.2%[3]。

二、影响制造业产业格局演变的因素

产业在大空间尺度的分布是无数企业生产区位布局决策的集中体现，而企业选择将生产经营部门或价值链环节布局在哪个区位是出于利润最大化的考量。企业的经营过程就是组织各种生产要素进行生产，并将产品在市场中进行销售，从而获得收入和利润。这个过程中涉及到要素价格、要素组合的效率以及与生产组织、销售过程相关的运输成本、交易成本。不同的产业所需的要素投入及其组合不同、市场不同、运输成本不同，因此追求利润最大化的企业会选择在不同的区位进行布局。也就是说，生产的空间格局取决于产业的内在特征与运行规律，同时也会受到技术变革、国际政治经济关系、外部冲击、国内政策等多种因素的影响。

1. 资源禀赋变化

每一种产业、产业链的每一个环节都有特定的生产要素投入。例如，劳动密集型产业和加工制造环节需要大量的低成本劳动力；资源加工产业需要大量的能源和自然资源；高技术产业和研发设计环节需要大量的科学家、工程师和技术工人。而各个国家和地区通常具有不同的要素条件和资源禀赋。因此，如果产业资本能够自由流动，就会选择根据产业与产业链环节的要素投入差异将其布局在最具资源禀赋优势的区位，以使得最终向用户交付产品的成本最低。资源禀赋条件并不是一成不变的，特别是高级生产要素会随着经济发展和资源的投入而发生改变。例如，随着发展水平的提高，收入水平必然随之上涨，原本具有劳动力成本优势的发展中国家的低成本优势会逐步削弱，导致相应的劳动密集型产业向其他国家和地区转移。如果该国家或地区又积累形成新的优势要素（如熟练工人、工程师），则会加强对其他产业

的吸引力，形成国内产业的更替。因此，制造业的产业格局会随着地区间资源禀赋的变化而改变。此外，经济的发展还会带来用户需求以及市场规模和结构的变化，也会影响到企业的投资布局决策。靠近大规模的市场，不但能够节约运输成本，而且能够更加了解当地需求特征，对需求变化做出快速反应。在一些情况下，靠近市场可能由于要素组合不是最优、规模经济没有充分发挥而造成生产环节的成本不占优势，但是运输成本的节约和供应链的灵活性仍然会使本地化成为整体更优的选择。

2. 国际政治经济关系

国际政治经济关系对产业空间格局的影响是通过改变生产要素和最终产品的流动性发挥作用的。各种生产要素的流动性存在显著差异，土地以及附着其上的自然资源、区位条件完全无法流动，人力资本的流动受到各国边境管理和国内就业规定的限制。相比之下，最终产品、资本、技术的流动性较高。要素和产品的流动性越高，各个产业和产业的各环节就会越按照其要素投入特征与各国（地区）资源禀赋的匹配性以及目标市场、运输成本等经济因素的综合考虑来布局生产能力；反之，当要素和产品的流动受到阻滞时，经济因素在产业区选择中的作用下降，如何使生产活动能够进行以及市场能够获得需要的产品成为最需要解决的问题。生产要素的流动性受到各国政府不同程度的管制以及国际经贸规则的约束。二战以来，投资和贸易自由化是国际政治经济关系发展的主要方向。在全球经济自由化的推动下，资本、技术和产品的流动性提高，跨国公司得以在全球范围内寻找最优生产区位，形成了 20 世纪 80 年代末以来的全球价值链分工或产品内分工的格局。但事实上，虽然全球化是历史大势，但阻碍全球化的因素一直存在，且在一些时间段有所加强，经济全球化不时出现逆流。例如，战后的“巴统协定”、“瓦森纳协定”一直对一些国家的高科技产品进口进行限制；世界各国也都在利用各种贸易和非贸易壁垒加强对本国产业的保护；因政治、军事、法律等原因对产品出口实施限制或对某国实施禁运也时有发生。各主权国家采取的对研发、产业发展进行补贴的等产业政策，也会在一定程度上使要素价格、供给、需求发生改变，从而影响企业生产的区位选择和全球产业的空间格局。

3. 技术变革

技术变革从多个方面影响全球产业格局。一是影响产业结构。一些新技术的商业化会形成新产品、新模式、新业态，对原有的产品或服务形成替代，从而形成新产业。颠覆性的变革不仅会在具有传统产业优势的地区产生，甚至原有的优势还会形成对新技术发展的阻碍，优势企业本身也存在着阻碍创新的战略刚性。例如，支票、信用卡不普及的中国成为移动支付最普及的国家。二是影响资源禀赋。技术的发展会使资源的重要性发生改变，一些以前重要资源的作用下降，一些曾经没有价值的资源成为重要的生产要素。因此，造成一些原有资源优势地区的产业衰落，新要素丰富的地区的该要素密集型产业获得快速发展。工业革命以来，能源经历了从煤炭到石油、天然气，经过核能，再到以太阳能、风能为代表的可再生能源转型的过程；知识、技术、管理乃至数据也逐步进入曾经由资本、劳动、土地等天然要素构成的生产函数。三是影响交易成本和运输成本。交易成本和运输成本是影响企业向用户交付产品最终成本的重要因素，信息技术和运输技术的发展总体上使交易成本和运输成本呈现持续下降的趋势，生产接近用户的重要性逐步降低。20 世纪 80 年代开始的大规模离岸外包以及产品内分工的重要推动力就是信息技术和运输技术发展带来的成本下降，使得生产环节在全球分布并最终在一个地方组装成最终产品在经济上更加有利可图。移动互联网、物联网、区块链等技术仍在继续推动交易成本的快速降低。四是影响产品的形态与生产、交付方式。例如，机器、流水线的出现使大规模生

产、连续化生产代替小规模、分散化生产，生产要素集中的现代工厂取代了传统的手工工场和家庭作坊；可再生能源具有分布式特征，改变了传统电力生产集中式的特征。再如，信息技术的发展推动了制造与服务、硬件与软件的深度融合，一些原有依托物质载体存在的产品（如音乐、影响）可以完全以数字化的形态传递、交付、使用；企业可以从向最终用户交付实物产品转向借助互联网远程提供服务；还有一些产品可以实现产品原型的数字化传输和在用户端通过 3D 打印等技术实现物质形态的复现。

4. 外部冲击

自然灾害、战争、瘟疫等外部冲击具有突发性、不可预测性，这些因素会剧烈地改变短期供给和需求，使全球供应链遭到破坏，进而对生产要素的组织调配、生产的区位选择等方面产生影响。例如，发生于 20 世纪 70 年代的两次石油危机中，中东主要产油国大规模削减产量、减少供应，造成发达国家石油供应短缺，价格暴涨。此后，西方发达国家一方面建立石油战略储备应对石油供应中断风险，另一方面开始推动能源节约技术、发展可替代能源产业。又如，日本是世界主要汽车零部件、电子元器件供应国，2011 年 3 月日本福岛地震和海啸造成日本国内企业的大面积停产，一些关键汽车和电子零部件严重供应不足，影响到全球许多汽车整车厂的生产，也推动一些跨国公司考虑供应链供应来源的多元化。许多传染性疾病具有传播速度快、感染性强等特征，造成对防疫、医疗等方面物资短期内的爆发式增长，生产活动也会因为疫情防控受到严重影响。在生产的全球化水平低、各国之间主要开展产业间分工的时期，由于外部冲击大多是局部发生，因此它对生产活动的影响也多是区域性的。但是在生产高度全球分工的阶段，世界各国的产业链、供应链环环相扣，相互之间高度依赖，特别是汽车、电子等产业的产品复杂度高、产业链长、国际化水平高。高度细化的全球产业分工在显著提高生产的总体效率的同时，也使产业链、供应链变得更加脆弱，一旦由于外部冲击造成某个国家的生产受到冲击，全球整个产业都可能受到影响。

三、未来全球制造业演变趋势及其对中国的影响

当前世界进入了动荡变革期，国际经济、科技、文化、安全、政治等格局都在发生深刻调整[4]。在制造业发展方面，新一轮科技革命和产业变革、保护主义和单边主义上升等影响因素仍将继续发挥作用，新冠肺炎疫情的影响逐步显现，未来全球制造业格局将会发生深刻改变并对中国的制造业产生重大影响。

1. 各国要素禀赋变化推动“雁阵模式”继续发展

（1）“雁阵模式”在发展中国家间继续发展

处于劳动密集型产业和产业链的劳动密集型环节的公司，会优先选择将主要生产能力配置在综合生产成本最低的地区，其中最关键的是劳动力成本的高低。劳动密集型加工制造过程的聚集能够充分利用一国的劳动力资源、带动该国经济的快速增长，但同时也会由于抬高工资水平，使各国间的要素供给比较优势发生改变、甚至逆转。日本经济学家赤松要在 1930 年代研究东亚国家工业化的时候提出了著名的“雁阵模式”（“flying geese”model）。雁阵模式指出，劳动密集型产业呈现从工业化国家向欠工业化国家和最不发达国家梯次转移的特点。工业化发达国家的发展水平最高，是产业国际间转移的主要推动力，随着该国工资等生产要素成本的上涨，将会逐渐丧失在劳动密集型产业的优势，从而推动劳动密集型产业向更低成本的发展中国家转移。在雁阵模式下，工业化发达国家（如日本）构成产业梯次转移格局的“头雁”，其他发展中国家成为处于燕尾的雁阵跟随者[5]。在劳动密集型产业带动下的发展中国家随着经济发展、工资水平提高，低成本劳动力优势将会逐渐削弱，推动劳动密集型

产业向更低成本的发展中国家转移，这是在现有技术水平下劳动密集型产业在全球转移、分布的一般趋势。

（2）中国劳动密集型产业加快向国外转移

改革开放以来，特别是2001年正式加入WTO以来，通过抓住国际产业分工变革和产业转移的趋势，中国充分利用数量庞大且工资低廉的劳动力承接国际产业转移，成为世界最重要的劳动密集型产业和环节的生产和出口基地。但是经济的发展必然带来工资及其他要素成本的上涨，导致中国的制造业成本优势削弱，形成产业向更低成本发展中国家进一步转移的推动力。2000年，中国城镇单位就业人员工资水平为9333元，2008年增加到28898元，2018年进一步上升为82461元，年增速几乎都在10%以上。根据国际劳工组织的数据，2017年中国从业人员平均月收入为847美元，大约相当于柬埔寨、印度尼西亚、斯里兰卡、坦桑尼亚等发展中国家的4倍以上。即使考虑到在工人素质、基础设施、产业配套、生产效率方面的优势，中国的劳动密集型产业综合成本已经渐失优势，“市场和资源两头在外的国际大循环动能明显减弱”[4]。来自WTO的数据显示，中国纺织品出口额占世界的比重已从2015年最高点的37.29%下降到2017年的36.60%；而同期南亚东南亚国家联盟（ASEAN）的份额从5.60%提高到6.01%；中国服装出口额占世界的比重从2013年最高点的39.19%下降到2017年的33.60%，而南亚东南亚国家联盟的份额从9.32%提高到12.17%。

2019年中国人均GDP突破1万美元，即将进入高收入国家行列，有4亿人进入中等收入阶层。随着中国经济继续保持中高速增长、居民收入水平持续提高，劳动力的成本优势将会继续削弱，如果“机器换人”的效率和劳动密集型产业的资本密集度不出现显著提高，中国劳动密集型产业及价值链的劳动密集型环节将持续向低成本发展中国家转移。但是另一方面也要看到，居民收入水平的提高意味着内需进一步扩大，对美好生活需求的实现将会推动对更高质量、更高性能产品和服务需求的增长，将会成为中国制造业升级的动力，国内大循环的作用不断增强，加大对国际产业资本的吸引力，推动中国国内资本、技术和知识密集型制造业的规模、发展水平持续提高。

2. 新工业革命深入推进加剧未来产业全球竞争

（1）主要国家在高科技和未来产业领域的竞争加剧

在奥巴马政府时期，美国就提出“重振制造业”战略，通过发布一系列法律、战略和政策推动制造业回流。特朗普当选美国总统后，进一步提出“美国优先”战略，从美国的经济利益出发，退出一系列国际组织，重新谈判地区贸易协定，对贸易伙伴频繁施压和制造贸易摩擦。其中，中国成为美国打压、遏制的主要对象。当前世界正经历百年未有之大变局，而其中最关键的变量就是世界上主要国家之间的力量对比[6]。从历史上看，苏联和日本都曾挑战过美国的世界经济霸主地位，而且对美国的赶超都止于经济规模略超美国2/3之时[7]。中国GDP相对于美国的比例已从四十年前的约1/15提高到2018年的65.4%，面对世界第一的位置被挑战，美国对华态度与政策发生大角度的改变[7]。

以美国为代表的发达国家对中国进一步发展的打压遏制呈现出以下三个方面的特点。一是涉及领域越来越广，从早期的光伏扩大到通信设备、智能终端，近年来又扩大到数字产业、人工智

表8 中国和东盟劳动密集型产品出口占世界比重的变化（2007–2017年）（单位：%）

	地区	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
电子数据处理和办公设备	东盟（ASEAN）	16.4	16.4	15.9	15.8	13.8	13.3	13.1	13.5	14.6	14.3	13.7
	中国	30.4	32.3	34.0	37.7	39.3	40.6	40.7	37.1	35.8	34.1	33.9
纺织	东盟（ASEAN）	4.6	4.5	5.0	5.4	5.3	5.2	5.3	5.4	5.6	5.8	6.0
	中国	23.4	26.0	28.2	30.4	32.0	33.8	35.3	35.8	37.3	36.6	36.6
服装	东盟（ASEAN）	8.1	8.3	8.4	8.9	9.0	9.3	9.3	9.6	10.5	11.0	12.2
	中国	33.1	33.0	33.7	36.6	36.7	38.4	39.2	38.7	38.3	35.5	33.6

资料来源：https://data.wto.org/

能等领域。二是遏制手段日益多元，从早期的军用和军民两用技术的出口限制、反补贴反倾销、绿色贸易壁垒等扩大到投资并购限制、高科技中间产品出口限制、市场准入限制、高等教育和科技交流的限制等全方位的遏制。三是遏制借口越来越多，从早期的违反 WTO 等多边规则的倾销和补贴、扩大到对知识产权保护的指责，进而又扩大到数据隐私、国家安全等方面。而且美国还拉拢其盟友特别是“五眼联盟”国家一起对中国从技术、市场等方面进行遏制。高科技产业和新兴产业、未来产业是美国遏制打压的主要领域，其主要原因在于，一方面随着中国产业的持续升级，与美国在全球价值链高端环节的重合度不断加大，从维护现实利益出发美国对中国的高科技产业进行打压遏制，以维护其在高科技产业的地位和利益；另一方面，战略性新兴产业和未来产业代表着产业的发展方向，拥有巨大的发展潜力，直接关系到未来的经济增长和在全球产业分工体系中的话语权。如果抓住新一轮科技革命和产业变革的机遇实现了在战略性新兴产业和未来产业的突破，那么后发国家将会进一步缩小与发达国家的差距。反之，今后发国家将花费更大的代价来进行在高科技领域的追赶。而从发达国家的角度来看，则是其产为地位受到挑战、发展机会减少。

（2）美国在高科技领域的遏制对中国“危中有机”

当前世界产业链价值链高度片段化，世界各国产业已经形成“你中有我，我中有你”的高度依赖关系，而中国已经成为全球产业链供应链中关键一环，超大的国内市场对于跨国公司也形成巨大的吸引力。因此，美国推动下的中美之间的“脱钩”不可能完全实现，特别是在市场的“脱钩”必然会受到国际社会和美国国内力量的阻碍，但遏制中国技术的进步符合发达国家利益，中美之间的科技交流与联系将会弱化。中美之间的“脱钩”趋势对中国产业的影响利弊共存。不利的影响在于，从短期看，由于一些核心零部件、工业软件被断供，一些产业链可能发生“断链”。例如，华为被列入美国商务部实体清单，不仅美国企业被限制未经批准向华为出口，而且采用美国技术超过 25% 甚至 10% 的台积电、中芯国际等美国本土以外的公司也被限制为华为旗下的海思麒麟芯片代工，华为手机很可能面临无芯片可用的局面。从好的方面说，在全球产业链价值链分工格局下，一个国家产业发展所需要原材料、零部件、生产设备、工业软件等中间投入默认可以从全球市场采购获得，由于许多发达国家生产的中间投入品技术水平更高、性能更稳定、使用寿命更长，因此虽然价格更高，但是由于对生产的影响巨大，许多下游生产企业更愿意选择进口产品，对国内从无到有取得突破的新产品不愿用、不敢用，这就使国内新产品失去在产业化过程中不断迭代升级的机会，由于生产规模小，在生产成本上也不具竞争力。随着一些高技术产品被“卡脖子”或“卡脖子”的风险加大，逼迫下游用户在国内寻找供应来源，主动与产业链上游伙伴一道解决“卡脖子”产品的国产替代，这就为中国高技术新产品提供了在应用中持续改进、完善的市场空间。同时，“脱钩”意味着以 WTO 为代表的国际贸易多边规则被破坏，至少在被“卡脖子”的产业领域，无需继续遵守 WTO 补贴与反补贴等相关规则的限制，可以实施更积极的产业政策，发挥我国集中力量办大事的体制优势，政府在研发、生产环节的技术创新和市场采购方面提供更大力度的支持，加快国内技术的成熟完善。

从长期来看，中国整体上在基础科学研究、产业技术创新、高端人才吸引力等方面仍存在较大差距。作为处于追赶阶段的后发国家，来自先发国家的技术转移和扩散是加快缩小差距的重要推动力。科技“脱钩”会严重影响中国获得国际前沿技术和优秀人才，加大科技创新的难度。此外，从极端情况看，如果因为科技“脱钩”在战略性新兴产业、未来产业领域形成两套独立的技术标准体系，会严重影响规模经济的发挥，推高研发、制造的成

本，对包括中美两国在内的世界各国的福利都会造成损失。

3. 新“数字鸿沟”造成低收入国家过早“去工业化”

（1）数字技术的成熟与广泛应用可能形成新“数字鸿沟”

在工业化以来的很长一段时期内，无论是机器换人还是机器人换人，更多地是以机器替代肮脏（Dirty）、危险（Dangerous）、困难（Difficult）和沉闷（Dull）的“4D”工作以及人类所不胜任的工作（如大量计算）。但是近年来“大数据＋机器学习”的人工智能技术不仅取代人类不胜任、不愿从事的蓝领工作外，正在对需要长期知识积累的白领工作形成替代威胁。对于从低收入水平开始起飞的发展中国家来说，它们要素禀赋的一般特点是资本短缺、劳动力相对丰富且成本低廉。自18世纪工业革命以来，包括英国在内的所有工业化成功的国家都是依靠纺织业开启它们的工业化历程[8]。即使到今天，纺织业（包括服装业）依然被看作劳动密集型产业。从劳动密集型的棉纺织业起步符合发展中国家的比较优势，廉价的劳动力资源可以让它的纺织品在世界范围具有竞争力，从而实现工业化进一步前进的资本积累。按照这一逻辑，如果包括人工智能和机器人在内的新一代信息技术出现突破性进展，带来纺织服装、电子装配等传统意义上的劳动密集型产业的全生命周期成本大幅度下降，这意味着劳动密集型产业转变为资本和知识密集型产业。那么，处于工业化起飞前夜的发展中国家的劳动力成本优势将不再有效，它们寄希望进行原始资本积累的具有比较优势的劳动密集型产业不复存在，因而有可能被锁定在“前工业化”阶段或者实现工业化的难度大幅度增加。这些低收入国家可能因数字技术的突破性进展而失去工业化的机会、过早的“去工业化”，新的“数字鸿沟”将会出现。

（2）中国制造业将会受益于数字经济发展

作为工资水平处于发达国家与低成本发展中国家之间的国家，新一代信息技术的成熟及其与制造业的深度融合对中国带来的正面影响可能更大。由于机器人、人工智能技术主要是一次性投入成本，而且能够不停歇的工作，相对于一线工人生产效率、精度更高。如果机器换人的成本不是过高，那么相对于低成本发展中国家来说，中国制造业“机器换人”在一定程度上能够抵消工资水平的过快上涨，在更长时期保持中国制造业的综合成本优势。国内许多企业的实践案例表明，在一些产业的某些工序，以“机器换人”可以带来明显的成本节约。相对于发达国家来说，中国本身就具有技术工人、工程师的规模与工资优势，而且中国的机器人产业快速发展，人工智能行业的应用技术发展水平与美国共处全球第一梯队，因此，“机器换人”虽然也能够缩小发达国家相对于低成本发展中国家在工资水平上的劣势，但很难改变与中国之间的劳动力成本差距。而且新一代信息技术与制造业的深度融合还能够加快制造业的服务化转型、提高制造业的柔性，使制造企业能够更好地适应其用户特别是消费者个性化需求的发展趋势，基于产品开发更多的增值服务。从这个意义上来说，新一代信息技术的发展及其与制造业的深度融合带给中国制造业的积极效应更多。

4. 新冠肺炎疫情推动全球供应链布局加快调整

（1）新冠肺炎疫情推动供应链多元化、本地化和区域化

2020年初以来，新冠肺炎疫情在全球爆发，至今也未完全被控制。由于病毒指数型传播的特征，造成新冠肺炎疫情传播速度快、持续时间长、感染人数多，因此对全球经济活动造成的冲击也呈指数型爆发。在疫苗研制成功前，最主要的疫情防控措施是社交隔离，做好个人防护的同时减少社交接触，一些疫情严重的地区一度还采取“封城”等措施。停工造成爆发疫情国家的制造业产能严重不足，停飞、停航、入境管制、暂停进口、关税上调等措施造成了跨境物流通道的中断，国际贸易受到严重影响。

新冠肺炎疫情对供应链产生两方面显著影响：一是新冠肺炎疫情造成对口罩、防护服、呼吸机、酒精等防护用品、消杀用品需求的爆发式增长，世界许多国家出现医疗、防疫物资供应严重短缺的局面。在疫情严重的意大利、西班牙、德国、美国等国家，由于劳动密集型产业和加工组装环节的离岸外包，产业门类和产业链不完全，许多医疗物资国内缺乏生产能力，严重依赖进口。面对疫情爆发后全球对口罩需求的暴涨，许多国家难以筹措到疫情防控所需的物资，甚至发生截留其他国家医疗物资的情况。二是由于疫情防控造成的开工不足、运输班次减少甚至停止造成全球许多重要的产业供应链中断，由于缺少上游原材料、零部件等中间投入品而使下游产业的生产受到严重影响。新冠肺炎疫情造成世界经济的严重衰退，国际货币基金组织2020年6月发布的《世界经济展望》报告预测，2020年全球经济将下降4.9%，全球贸易额（商品和服务）下降11.9%，2020年将成为2008年国际金融危机以来最严重的经济衰退。

在新冠肺炎疫情爆发前，全球产业分工遵循的是效率优先的逻辑。在考虑运输、通信等交易成本的前提下，全球产业链价值链片段化，每个环节被配置到拥有最符合其投入要素禀赋的地区，从而实现最终产品交付成本最小化，进而形成发达国家从事研发设计和品牌营销、发展中国家从事加工组装的全球价值链分工格局。在通常情况下，高度全球分工的价值链偶尔也会遇到因自然灾害、贸易冲突等原因造成的供应链局部问题，但总体上来说，全球价值链供应链能够保持顺畅运转。但是新冠肺炎疫情波及面大、持续时间长，对供应链的影响也更加严重和长期，供应链安全的重要性凸显。全球分布的产业链供应链由于要经过多个国家一系列工厂、诸多运输环节，因此在面对疫情冲击时，由于空间距离长、环节多而形成的脆弱性就暴露出来。许多国家政府和跨国公司开始反思供应链过于集中带来的风险，考虑推动供应链上的企业回归本土和供应来源的多元化。例如，日本政府在2020年4月宣布提供两千多亿日元补贴，帮助在海外的日本企业将生产线转移回日本本土和中国以外的其他国家。

供应链的效率与安全在各产业间具有不同的重要程度。新冠肺炎疫情的影响表明，本地化生产和供给直接决定了应急物资的供应速度，从而影响对突发事件的应对效率。应急物资供应的越快、越充裕，突发事件的直接和间接影响就能控制得越低，从而减少生命和财产损失。因此，在面对重大突发事件时，应急物资本地化生产的成本增加相对于效率损失显得微不足道。新冠肺炎疫情将会推动世界主要国家将关系人民生命安全、产业安全、国家安全的应急物资生产进行本地化和多元化布局。

（2）各国应对重大疫情冲击的供应链布局调整对中国影响有限

中国是世界最大的工业国和众多产业链的主要基地，因此发达国家和跨国公司所推动的供应链回归就带有从中国撤离的意思，有些国家直接提出了“中国+1”战略，在中国之外培育新的供应链来源。这就意味着，新冠肺炎疫情将与中美贸易摩擦叠加，推动原来布局于中国的供应链外迁到其他国家，中国具有优势地位的产业可能因此被削弱。

虽然供应链的多元化、本土化是发达国家和跨国公司应对新冠肺炎疫情的对策，但其可实施性要受到诸多因素的影响。第一，疫情作为外部冲击的影响有多大，根本上取决于类似突发事件的频率、持续时间及其造成的损害。但从长期看，如果突发事件等不确定性因素造成的损害与加强供应链安全的收益有限，那么供应链的多元化和本土化也将是有限的、甚短期的、局部的。一些劳动密集型产业向发达国家回归或转移到一些虽有成本优势但因生产率低、产业配套不完善而综合成本仍旧偏高的国家，会带来整体生产成本的上涨。更重要的是，中国在疫情防控中表现出应对突发事件的卓越能力，凸

显了中国产业链的韧性，相比于供应链回归到疫情未能有效控制的国家，继续在中国投资甚至进一步推动中国供应链的完整性反倒是更优的选择。2020 年秋冬季世界许多国家疫情的反弹，而中国取得抗击疫情斗争重大战略成果、生产全面恢复，因而出现大量制造业海外订单向中国转移的现象。第二，中国完善的基础设施、齐全的产业体系、完善的产业配套是短期内很难在其他地区复制的。经过改革开放四十年来的发展，中国形成了世界最齐全的产业门类、最完整的产业链条和最完善的产业配套体系。制造业供应链实际上是一个非常复杂的网络体系，在一级供应商之下有更多的二级供应商，二级供应商之下还有三级、四级供应商，有的多达几十级供应商，这些供应商之间又形成非常复杂的投入—产出关系。因此完整的供应链体系的建设是一个漫长的过程，同时许多国家也不具备构建完整产业体系的国土空间、人口规模和产业容量。例如，在苹果公司 2019 年的 200 家核心供应商中，中国大陆有 41 家，位列第二；在全球 807 家工厂中，383 家在中国大陆，位列第一，而作为目前跨国公司重点转移目的地的越南和印度分别只有 18 家和 8 家工厂[9]。对于发达国家来说，长期的离岸外包使其缺乏高级技术工人和合格的工人，人才的培养也是一个漫长的过程。

此外，新冠肺炎对世界经济的冲击也使得各国政府和跨国公司缺乏产业链转移的资金。因此，新冠肺炎疫情虽然会在一定程度上推动在华供应链向外转移，但程度将会非常有限，而且我国“经济潜力足、韧性大、活力强、回旋空间大、政策工具多的基本特点”[10] 以及超大且仍持续扩张、水平不断提升的市场空间，对国际直接投资具有巨大的吸引力。事实上，2020 年前 5 个月，外资在中国并购总额达到 90 亿美元，这是十年来外资在华并购数量和金额第一次超过中国企业出海并购[11]。也就是说，凭借整的产业体系、庞大的国内市场、经济的强大韧性，仍将继续成为全球供应链的主要组成部分。

四、“十四五”时期中国制造业的调整方向与政策建议

总体上看，由于制造业发展的要素、技术、国际政治、国内政策等方面环境的变化以及新冠肺炎疫情等突发事件的影响，劳动密集型产业的全球格局将会继续发生显著改变，制造大国和强国在战略性新兴产业和未来产业的竞争加剧，数字技术有可能弥补制造大国和强国的成本劣势并造成低收入国家的“过早去工业化”，逆全球化抬头和新冠肺炎疫情造成制造业全球化趋势有所停滞，本地化、区域化与供应链的多元化将会加强，中国制造业发展面临着巨大的挑战。但另一方面也要看到，超大国内市场、不断增强的创新能力、完善的产业体系以及快速产业化能力、蓬勃的数字经济、经济发展的韧劲等也使中国有能力应对新挑战，并在世界制造业格局大调整中找到更有利的位置。

1. 中国制造业在全球产业体系中的发展方向

面对百年未有之大变局，推动制造业的高质量发展既要有战略定力，又要适时做出应对。

（1）坚持扩大开放

虽然全球化出现逆流，但是要看到，全球化的趋势不可逆转。从世界范围来看，美国政府在频繁“退群”和四处挑起贸易摩擦的同时，也在推动美欧之间的“三零”贸易协定的签署，越南等国也在积极加入美欧日主导的自由贸易协定。如果不积极参与和推动全球化，我们就会被排挤到世界市场之外。从产业链价值链的内在特点来看，在几十年的产业内和产品内分工发展后，许多产业链已经是高度全球化的，没有国家在所有产业链和价值链的所有环节都具有优势，只有整合全球资源才能生产出最具国际竞争力的产品，关起门来搞产业只能是削弱自己的竞争力。正如习近平总书记所说，“在经济全球化深入发展的条件下，我们不可能关起门来搞建设，而是要善于统

筹国内国际两个大局，利用好国际国内两个市场、两种资源。”[12]

（2）加强自主可控

发挥比较优势、参与全球分工是产业全球化的经济逻辑，但是近几年的贸易战特别是美国的霸权主义让我们认识到，全球产业分工体系中并不仅有经济规律在发挥作用，各国的政策选择会使经济规律失效、全球化受到严重阻碍。在这种情况下，我国必须要增强对产业链关键环节的自主可控，在外国“断供”时，不至于因为找不到国际替代来源且国内无法生产而使我国产业链“断链”、产业生产陷入停顿。但同时也要看到，由于资源的有限性和创新的不确定性，一个国家无法在所有领域做到世界最佳，因此自主可控是在全球化大背景下增强产业链的安全性。增强自主可控有两种路径：一是补齐少数关键环节的短板，至少做到自主可用，当“断供”发生时，虽然国产技术和产品不是最优的，但能够保障供应链不中断，产业生产能持续。二是锻造少数关键环节的长板，在少数关键技术和产品上做到世界最优、成为世界最主要的供应商，进一步强化与其他国家“你中有我、我中有你”的相互依赖关系，形成一种动态“威慑平衡。”

（3）保持产业链完整

产业链的完整性是一个相对的概念，由于现代制造业高度复杂的特点，没有任何一个国家能够在所有产业保持产业链的完整性，即完全不依赖其他国家的零部件、原材料、生产设备、科研仪器、工业软件等实现国内生产。20 世纪 80 年代以来，发达国家由于长期离岸外包，大量劳动密集型产业以及产业链、价值链的劳动密集型环节被转移到更低成本的发展中国家，因此出现了一定程度的“产业空心化”。而中国从劳动密集型产业起步开始工业化，经过改革开放以来四十多年的“压缩型工业化”，在保持在劳动密集型产业综合成本优势的同时，不断向产业链、价值链的高端环节攀升，产业配套体系不断完善，因此中国的产业链相对比较完整。但是生产成本的持续上涨、跨国公司“中国 +1”战略、美国加征关税等因素，中国经济已经出现“脱实向虚”问题，劳动密集型产业不断向国外转移。应该吸取发达国家“产业空心化”的教训，尽可能延长劳动密集型产业的国际竞争力，至少要保持在劳动密集型产业的生产、创新、升级能力和适度的产能，在保障国内产业链安全的同时也加强对全球产业链价值链的控制力。

2. 推动中国制造业提高全球产业链价值链地位的政策建议

中国制造业的发展既要着眼于当下面临的“卡脖子”、产业链安全等紧迫问题，也要对抢占未来全球产业发展制高点未雨绸缪。

第一，继续加大研发投入。我国在制造业技术水平上的差距很大程度上源于工业化时间短、科技积累不足。因此无论是增强工业基础能力、破解“卡脖子”问题还是锻造技术和产业“长板”都需要进一步加大研发投入。除了要继续加大各级政府对科技创新的资金支持外，也要通过破除制约科技创新的体制机制障碍、研发费用加计扣除、个税抵扣、加强知识产权保护等举措，鼓励企业、社会组织和个人加大对科技创新的投入，特别是鼓励企业加大对基础研究的投入。

第二，及早布局未来产业。未来产业是由前瞻技术的成熟和产业转化所形成的产业，代表着未来的产业发展方向，也是未来经济发展的“新动能”。未来产业由于各国起跑线接近、不确定性高，因此是后发国家实现赶超的重要机遇。应加强对前瞻技术和未来产业发展方向的战略性研究，制定发展蓝图，加大国家对前瞻技术的研发投入，通过政府采购等方式培育早期市场，引导企业开展前瞻技术的工程化、产业化工作。

第三，加快商签自贸协定。充分发挥我国庞大的市场、完善的产业配套、强大的制造能力对跨国资本的吸引力，不断深化国内体制机制改革、与国际贸易规则接轨，推动由商品和要素流动型开放向规则等制度型开放转

变。积极推进同欧盟、日本、韩国以及其他主要贸易伙伴之间商签更高标准的自贸协定和区域贸易协定；进一步深化与东亚和东南亚等在地理上临近的国家的产业链合作，通过降低关税壁垒、提高通关效率、促进资本流动，在东亚东南亚地区建立起具有活力和国际竞争力的区域产业链；加强与“一带一”沿线国家开展产能合作，完善中国制造业的全球产业链布局。

第四，推动产业数字化转型。推动以数字技术为核心的新型基础建设，一方面加快前沿数字技术的成熟，同时也为我国产业升级发展打好数字化基础。发挥我国在数字技术和数字经济产业的优势，鼓励数字科技企业与制造企业之间的合作，制定智能制造技术规范、统一数据格式标准、推动数据开放、发展工业互联网等制造业数字化平台。支持制造企业的数字化改造，鼓励制造企业采用具有经济效益的新型数字化系统，增强提供远程维护、个性化定制、增值服务等服务型制造提供能力。

第五，加强产业链的韧性。支持企业对“零库存”生产模式进行调整，在综合权衡供应链安全和效率的情况下适当增加库存规模，可以考虑建立海外仓以强化国外下游企业的供应链安全，抑制供应链外迁倾向。国家对应急物资、战略物资的企业库存给予一定补贴。鼓励劳动密集型企业采取“离岸而不外包”模式，即随着国内劳动力成本上涨，我国制造企业主动到低成本发展中国家进行投资，而不是直接将劳动密集型业务剥离、外包，同时在国内保留“母工厂”和一定的产能，负责新产品的工程化以及工业的改进优化。MT

参考文献

[1]McKinsey Global Institute. Globalization in Transition: The Future of Trade and Value Chains[EB/OL].https://www.mckinsey.com/featured-insights/innovation-and-growth/globalization-in-transition-the-future-of-trade-and-value-chains, 2019-01-16.

[2] 李鹏飞，游子安．全球价值链下中国制造业的分布特征与演变趋势 [J]. 郑州大学学报（哲学社会科学版），2020,53(04):39-45+127.

[3] 张其仔，许明．中国参与全球价值链与创新链·产业链的协同升级 [J]. 改革，2020(6):58-70.

[4] 习近平．在经济社会领域专家座谈会上的讲话 [N]. 人民日报，2020-08-24(002).

[5]Kojima, Kiyoshi. The “flying geese” model of Asian economic development: origin, theoretical extensions, and regional policy implications[J].Journal of Asian Economics,2000(11):375 - 401.

[6] 张宇燕．理解百年未有之大变局 [J]. 国际经济评论，2019(5):9-19.

[7] 张宇燕．跨越“大国赶超陷阱”[J]. 世界经济与政治，2018(1):1.

[8] 文一．伟大的中国工业革命：”发展政治经济学”一般原理批判纲要 [M]. 北京：清华大学出版社，2016:104.

[9] 何波．新冠肺炎疫情对我国在全球产业链地位的影响及应对 [J]. 国际贸易，2020(6):45-52.

[10] 习近平．在基层代表座谈会上的讲话 [N]. 人民日报，2020-09-20(002).

[11] 经纬创投．中美脱钩声浪下，外资在华并购不减反增的背后逻辑 [EB/OL].https://finance.sina.cn/2020-08-19/detail-iivhvpwy1866772.d.html?vt=4&node_id=76749,2020-08-19.

[12] 习近平．不断开拓当代中国马克思主义政治经济学新境界 [J]. 求是，2020(16):4-9.

汽车轻量化材料最新加工技术概述

德国莱兴巴赫－哈缪公司亚太区　吴昊阳

我们目前常说的“轻量化材料”主要指铝合金、镁合金、塑料、复合材料等。与传统的金属加工（这里主要指高温合金加工）不同，对于这类“有色金属及非金属材料”的加工，国内外都没有特别完善的理论体系。应该说，轻量化材料加工技术尚处在经验探索阶段，而市面上几乎见不到关于非金属切削理论的书籍。而轻量化材料的切削工艺经验实际上更多是为加工企业以及工具设备供应商所掌握，因此本文将更多的从应用于轻量化材料机械加工的主流工具、设备和相关工业产品的技术介绍出发，分析并梳理当下轻量化材料的主要加工技术。

一、轻量化加工的界定

当前，无论是学术界还是工业界，都不存在明确的“轻量化加工”的定义，因此首先需要对讨论的对象做出界定。轻量化加工是指对轻量化零件进行加工，而实现零件轻量化的手段主要有两种：一是通过合理的结构设计减轻重量，二是采用新材料或改变特性的材料减轻零部件的重量。在轻量化零件设计过程中，第一步往往是优化零件结构，与传统结构相比，新结构会减轻大约 30% 的重量。第二步是采用更换材料，如铝合金、镁合金、钛合金等有色金属，以及碳纤维、玻璃钢、塑料等非金属，还有各种复合材料。更换材料会使零件重量大幅减轻，但成本也会相应提高。

因此，通过轻量化设计的零件往往具有结构复杂和材料特殊的特点，给加工带来难度。“加工（machining）”这个词在机械制造领域里通常是指成形工艺（如铸造、冲压、锻造、模压等）之后，通过去除的方法，实现零件的精准外形，也就是现在常说的“减式制造”。

加工的方式有很多，比较常见的如机械切削、电切削（电火花、电腐蚀）、水切割、激光切割等。

本文所论述的“轻量化加工”就是指在“轻量化零件”成形以后，对其不必要部分进行去除，进而实现设计所需精度的零件几何外形的工艺过程。值得提出的是，很多特殊功能要求的几何表面需要通过高速铣、喷丸、打磨、热处理、酸洗、桁磨、镀层、抛光等工艺实现，而这些工艺中有些属于加工的范畴，有些属于表面处理，本文会具有针对性的对加工相关的技术进行论述，也会涉及到表面处理技术范畴。同时，本文将论述的“轻量化加工”主

要限定在汽车行业内，针对汽车的轻量化零件加工的最新技术和发展趋势向读者进行简要介绍，同时也会参考其它行业如航空航天和铁路船舶的轻量化零件加工技术，使读者更全面地了解整个轻量化加工领域的最新动态。

二、轻量化零件的工艺要求

由于轻量化设计包括结构和材料两个方面，轻量化零件具有结构复杂，材料多样的特性，因此加工轻量化零件也面临两个主要问题：一是零件形状复杂给装夹和加工带来麻烦；二是新材料特别是非金属材料的性能与金加工完全不同，缺乏加工经验，加工难度大。

1. 轻量化加工的特殊性

零件设计的特殊性导致加工工艺的特殊性。与传统机械零件不同，轻量化零件通过结构设计和替换材料实现减重目的，因此轻量化零件的特殊结构和材料都导致了与传统加工相比具有明显的特殊性。本节先论述结构对加工工艺和设备的影响（纵向），再论述不同轻量化材料的加工特性（横向）。

（1）由结构导致的加工特殊性

结构设计是轻量化设计的第一步。通过优化结构减轻零件重量的代价是结构的复杂化，进而给加工工艺带来难度，使工装夹具的设计更加复杂，对加工设备的要求也更加苛刻。例如通过利用有限元分析软件对现有零件进行“自适性拓扑优化（Adaptive topology optimization）” 可以获得具有类似仿生结构的零件几何形状。大致过程是先设计出零件的基本几何形状，再规定出零件的固定位置、受力部位和受力状态，然后利用有限元算法对零件的受力状态进行模拟，去除掉非关键部分的材料，或将非关键受力部分的材料补充到关键部分。通过若干次迭代获得最终的优化结构，再在优化后的有限元结构模型的基础上进行零件设计，获得最终的CAD数模，如图1所示。显然，整个有限元计算过程中产生的结果的复杂性是传统机械设计方法根本无法比拟的，所以即便在人工设计的过程中对结果进行合理简化使其更适合加工（DFM），也无法避免加工复杂化的代价。

图2是对某支架和法兰类零件的优化前后的比对，可以看出优化后的零件具有十分复杂甚至仿生的拓扑结构。

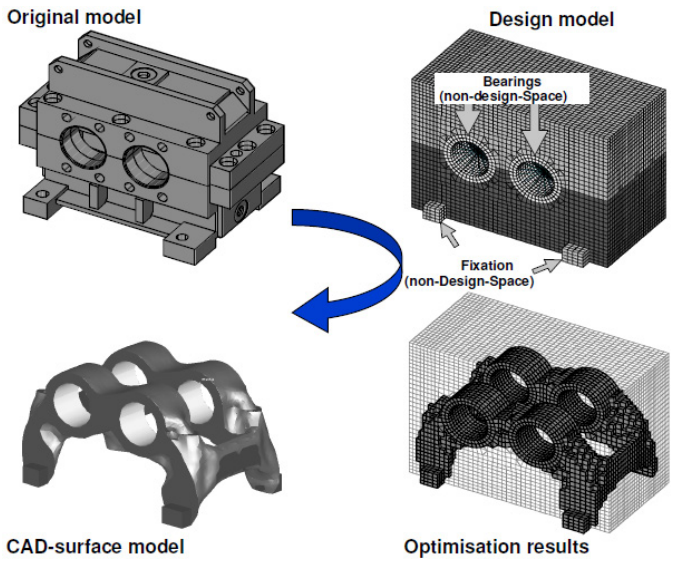


图1 利用自适性拓扑优化方法进行轻量化设计流程

图2 优化前后零件结构对比

这首先给成形工艺造成难度，需要设计制作极其复杂的模具或融模。如果通过加工的方式，那么毛坯的去除量也会很大。德国莱兴巴赫－哈缪公司（Reichenbacher Hamuel GmbH）开发的激光熔覆—五轴加工一体CNC可以实现对这种复杂轻量化结构件的成形和功能表面的高精密加工。但目前主要应用于高附加值金属零件的修复和表面镀层工艺。

其次，复杂的零件结构给加工的装夹系统提出更高的要求。通过有限元优化后的零件多为薄壁零件，具有很多肋板结构，截面变化大，很多部位固定时易变形，加工时易振动，因此零件的装夹设计比较困难。而汽车零部件多为规模化量产，对生产效率要求很高，对夹具和零件装卸的自动化要求也高，所有这些因素都决定了轻量化切削中工装夹具等辅助系统的复杂性。图3为德国某机床公司设计的针对变截面薄壁零件的自动化真空吸附及气动装夹系统，部分气缸带有力反馈传感器。

第三，复杂的结构给加工工艺带来困难。

首先，薄壁零件加工长久以来一直是个工程难题，非常容易出现切削加工变形，表现在结构对材料应力、切削力和热等因素产生的影响非常敏感。例如，由于薄壁零件本身的刚度较差，由于应力的释放，在每一次的切削加工中，就会出现零件变形。又如，因工件较薄切削热会引起工件热变形，从而使工件尺寸难以控制。再比如，在切削力的作用下，容易产生振动和变形，影响工件的尺寸精度，形状、位置精度和表面粗糙度。

其次，结构的复杂性导致很多部分难以触及，因此往往需要设计具有特殊几何形状的刀具。同时，走刀轨迹也更加复杂（当然，这需要使用五轴联动加工中心），编程时考虑的因素也就越多。

第四，对加工和辅助设备要求更高。

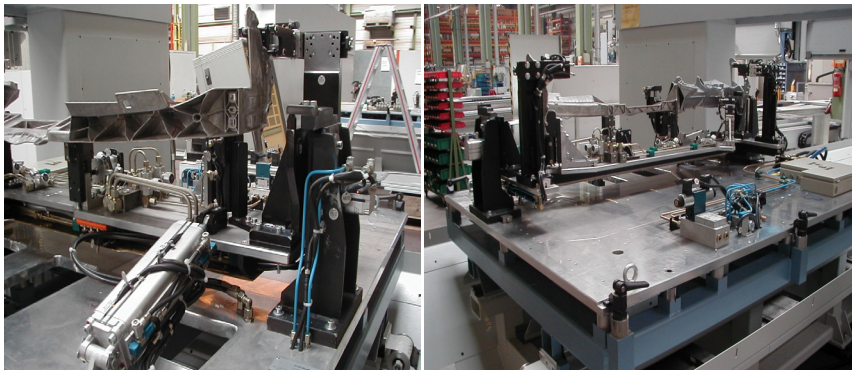


图3 轻量化零件的自动夹具

传统的三轴联动加工设备无法满足要求，所以用于轻量化材料的加工中心大都需要五轴联动甚至更高自由度的运动控制。例如通过六轴机器人对复杂曲面进行修边；有的机床厂商在铣头或工作台上增加自由度，以便刀头可以深入，避免主轴或刀具夹持机构碰触到零件。

（2）由材料导致的加工特殊性

本段中提及的“轻量化材料”是指轻量化零件所使用的新型材料，主要包括金属和复合材料。金属轻量化材料主要有铝合金、镁合金和钛合金；复合材料主要是纤维增强塑料基复材，主要包括碳纤维增强复合材料（CFRP），玻璃纤维增强复合材料（GFRP）和芳纶复合材料（Kevlar）。

①铝合金加工难点。

铝合金材料熔点低，特别在高速切削时一旦温度升高，就容易出现较大塑性，很容易出现粘刀的问题。另外伴随着加工性质的不同，其参数与热处理状态也会有所差异。由于切削力的影响，铝合金材料在切削之后零件很容易出现弹性应力变形。再有，由于铝本身的化学性质较为活泼，因此容易与氢产生化学反应，零件的力学性能也会产生影响。

②镁合金加工难点。

镁合金极易产生电化腐蚀，其自身的防蚀处理较其它金属困

难。另外，燃点低，切削过程中必须考虑温度的影响。同时，与铝合金加工类似，工件易变形。

③钛合金加工难点。

钛合金材料是目前较难加工的材料之一，因其热传导系数小、比热低、化学性能活泼等特点，给机械加工带来一定的难度。由于材料导热性差，比热低，致使加工时局部升温快，切削温度很高，易损坏刀具；化学活性强，加工时表面塑性下降，形成难加工的硬化层；此外，钛合金塑性低、硬度高，工件表面回弹量大。总之，加工钛合金时物理化学反应十分复杂。

④树脂基的纤维加强复合材料加工难点。

CFRP，GFRP，Kevlar 等典型的纤维增强复材 FRP 都属于难加工材料，在切削时容易产生大量有害粉尘，因此对设备的防尘要求较高。这类材料通常导热系数低，故切削温度高，基体容易软化或烧焦；由于各项异性、非均匀性、层间结合强度低等特性，加工时容易产生分层、撕裂、破损、表面粗糙等缺陷；另外，由于纤维的硬度较高，故对刀具要求也较高。

由于对复合材料的加工工艺研究时间并不长，所以无论是学界还是工业界都没有完整的理论体系来指导加工。很多特种加工手段也都可以运用于复合材料，但是也并没有结论。

2. 汽车轻量化材料应用

目前应用于汽车轻量化的材料可概括分为：高强钢、轻合金和非金属。

（1）高强钢

高强钢主要应用在汽车车身、底盘、悬架、转向等汽车零部件，如轿车外板、车门、顶盖、发动机罩、行李箱盖、车身底板等。高强钢属于传统的金加工范畴，理论和实践经验丰富，主要考虑的就是薄壁问题，主要工艺包括修编、钻孔、铰孔、功丝、铣台面等。对于车门这样的大型零件的切割和制孔加工，通常会采用机械加工或激光切割的方式。

（2）轻合金

轻合金包括铝合金、镁合金和钛合金。

汽车铝合金主要分为铸造铝合金和形变铝合金（工艺如锻造、挤压、内膨胀等）。当前汽车用铝合金以铸件为主，约占汽车用铝量的 80%，主要用在制造发动机零部件、壳体类零件和底盘上的其他零件。现已大批量应用的零件有轿车发动机缸体、缸盖、离合器壳、保险杠、车轮、发动机托架等零部件。变形铝合金在车身零件及结构件的应用方面也发展较快，如应用日益广泛的铝合金车厢盖、发动机罩、提升式后车门、翼子板、保险杠、车厢底板结构件、热交换器、车轮以及车身骨架等。

镁合金具有重量轻、吸震性强、高强度、可回收等特性。主要应用在车身、底盘、引擎系统、传动系统和内饰零件。镁合金的应用主要分为壳类和架类两类零件：壳类零件包括气缸盖、离合器壳、变速器壳、滤油器壳、空气滤清器壳、分动器壳、增压器壳、灯罩等；架类零件包括方向盘、仪表盘、风扇架、挡泥板架、踏板托架、转向支架、刹车支架、灯托架、座椅架、车身支架、车门框架、轮毂等。

目前，钛合金主要用于制造汽车悬架弹簧和气门弹簧、发动机气门等高强度和抗氧化部件，由于钛合金成本过高，主要应用在跑车、赛车和豪华汽车中，普通量产型轿车并未应用。

（3）非金属

高强度纤维复合材料也因为受到成本限制，尚未得到广泛应用，但是由于原材料产能逐步提升使得材料成本逐渐下降，未来前景看好。目前除了高端汽车之外，在量产型汽车中主要集中在汽车底盘、车身覆盖件和次结构部件。目前，各大厂家纷纷投入巨资研发碳纤维轻量化零件，例如宝马公司在与 Fraunhofer 合作开发碳纤维发动机缸体，已取得阶段性进展，如图 4。

汽车用塑料的主要类型包括通用工程塑料、塑料合金和增强塑料。塑料在汽车上的应用由来已久，最早是用于仪表板、车门

内板、顶棚、副仪表板、杂物箱盖、座椅及各类护板等内装件，而后逐渐向外装件、结构件和功能件扩展，如车身外板、后阻流板、保险杠、车轮罩、前后翼子板、举升门，以及油箱、散热器水室、风扇叶片、发动机进气管、气门室罩盖等。

泡沫在很多复合材料部件中充当芯材，在箱体类零件的铸造中充当消失模，因此对泡沫加工工艺的研究也不容忽视。图 5 为涡轮箱体部件的精密铸造消失模，有若干块泡沫加工后拼接而成。

3. 汽车轻量化零件特点

首先，对轻量化零件的加工是“产品级”而不是“工具级”。加工对象以结构件为主，主要工艺是修边、打孔、攻丝、铣槽、切断等。与模具加工相比，加工精度低、切削量小，因此加工时产生切削力和切削热都相对较小，所以通常不采用“湿切削”而是采用“最小油雾化”冷却。另外，加工毛坯以型材件和薄壁零件为主，进给速度可以更快，加工时间通常较短。但是要求更高的加工效率，工装夹具复杂，由于需要频繁更换工件，因此对自动化程度要求更高。

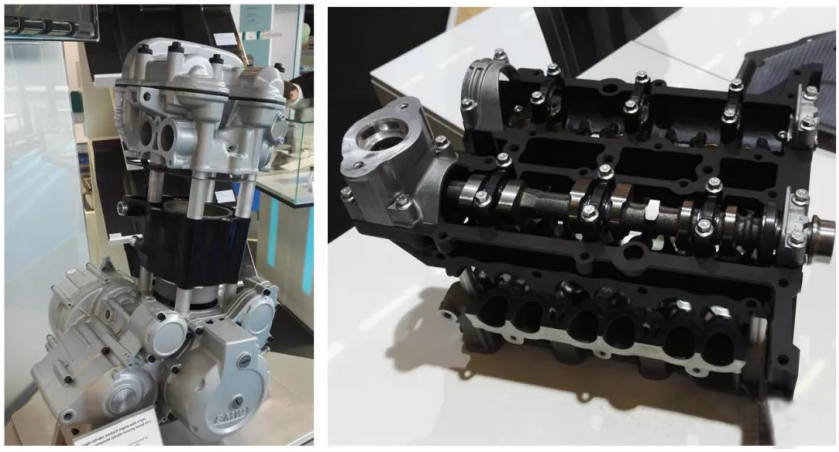


图 4 宝马及福特公司碳纤维发动机缸体测试样机

图 5 泡沫消失模

其次，轻量化切削与传统的金切削有着本质不同，因此轻量化材料在切削过程中要考虑的工艺问题也与金切削大相径庭。例如铝合金粘性大，强度相对较低，切削时容易粘刀，工艺类似塑料。而碳纤维复合材料强度大，加工时容易产生振颤，同时产生很大粉末，类似竹子和硬木切削。

第三，融化切割和水切割等方式经常不可以用于轻量化材料。例如铝合金具有高反射率和高导热性不适于激光切割。同时很多型材件要求退火和时效处理，而切割区域由于受高温作用，会使材料淬火硬化，因此在很多情况下，铝件的切割是不可以采用这种高温的融化工艺的。而有一些复合材料是具有亲水性的，特别是由木材复合而成的汽车内饰件在切割时是不允许有切削液的，更不可以用水刀。

总之，轻量化材料特别是非金属轻量化的加工工艺可以说别具一格，与金切削并不具有明显的可比性。而我国的从业人员往往借鉴金属（高温合金）加工工艺，因此走了不少弯路。

4. 汽车轻量化零件加工方法

在明确了材料和零件特点以后，对汽车轻量化零件加工时涉及到的加工工艺和技术进行小结，从当下流行和最新的工艺及技术角度出发，简要归纳如下。

（1）机械加工工艺

高强钢和轻合金都是金属，基本上都适合传统的金切削方式，只是工艺细节上有一些技巧。对于非金属轻量化零件加工来说，切削也是最常见的加工方式，在后面会详细介绍。值得提出的是，汽车非金属零件基本上都是采用高速切削，刀具多采用“狼牙棒”式多切削刃复合刀具，所以加工工艺基本属于磨削，通过磨削切边并去除毛刺。

（2）特种加工工艺

电火花切割理论上可以切割导电材料，但是轻量化材料往往是绝缘体或者导电率很差，因此无法用电火花切割。而且电火花大都用在精密零件或超硬零件上，汽车轻量化以结构件和覆盖件为主，不需要电火花。

等离子切割需要将高温高速的等离子弧为热源，利用喷嘴产生经压缩的高温等离子流来熔化被切割的导电金属，金属熔化后被吹散，实现切割。但是同样不适合绝缘材料，轻量化零件也几乎用不到这种工艺。

激光切割在轻量化零件加工应用广泛，高强钢和非金属都非常适合。但铝合金对于激光切割来说属于难加工材料，一是吸光性差，需要大功率激光器；二是局部受热使材料性能和形状发生较大变化。理论上与机械切割相比，激光设备在切割非金属材料时，不会产生毛刺和分层等缺陷，也不会产生粉尘。但是目前看，对于各向同性的均质非金属材料来说，激光切割效果很好，但使用激光切割碳纤维等很多非均质的复合材料仍然存在不小的缺陷。

水切割的适用范围也很广，五座标水刀非常适合形状复杂的薄壁轻量化零件的修边和打孔工艺。但是水刀精度不如激光和机械切割，而且很多复合材料在加工时是禁止有水的，例如木料复合材料内饰件。

超声切割是利用高频在刀具上产生振动，进而使切削力大幅减小。目前应用最多的是刀片式切割，特别适合薄壁和软性、粘性材料切割。也有在旋转刀具上施加轴向振动的方案，但是主要用于超硬材料的加工。

打磨和去毛刺是轻量化零件加工的重要工序，复杂形状的零件主要还是由人进行打磨和去毛刺，也可以利用机器人或专门的自动化打磨设备。打磨的关键技术是打磨头和运动控制。目前许多供应商开发出打磨刀具模块，在刀柄内部设计了浮动机构，可以让打磨头上下浮动。也可以采用浮动转子高速主轴进行打磨（图6）。

图6 R-H的抛光模块，专用于叶片涡轮等复杂型面的抛光

剪裁和下料是成形工艺前的重要工序，主要是将纤维布片裁减成需要的形状。这类设备主要是针对软性及粘性材料的切割，设备结构为三坐标低龙门，刀片架与Z柱间有一个转动自由度，用以调整刀刃方向。切割的原理有很多种，例如激光、水切割、圆盘刀片、超声刀片等等。由于切削力小，因此设备结构轻、空载速度快。配备下料排布软件，有些设备配备在线检测系统，可以通过照相、热辐射等方式检测织物的编织缺陷。

三、轻量化材料切削系统

一般来说，刀具及刀柄、铣头、夹具、床身以及其他辅助设备构成切削系统，它决定了加工质量和加工效率。轻量化材料的物理属性决定了切削工艺的特殊性，因此轻量化切削系统的工艺设计目标也是自成一派的。

与机床行业类似，刀具市场也有两股势力在争夺轻切削订

单。一是以山特维克、山高为首的金切削刀具供应商，另一类是以蓝帜为首的木工及塑料刀具供应商。总体上来说，轻切削刀具比传统金切削刀具更加锋利，而且经常需要根据具体加工要求选定特制刀具，特别是对于非金属复合材料切削来说。由于轻量化结构件往往采用“三明治”结构，即中间由泡沫或蜂窝充当“芯材”，外部树脂和纤维材质包裹后固化成形获得的零件。除铝合金及有色金属加工之外，还包括对非金属材料如碳纤维，玻璃钢、泡沫、蜂窝、塑料、木材等材料的加工。因此刀具设计更加复杂，经常会采用非标定制刀具。

1. 纤维加工刀具

以碳纤维加工为例，由于每一层纤维排布方向不同，因此需要若干组方向不同的刀刃（multi cutter）才可以顺利切断所有纤维，否则容易产生毛边，因此碳纤维零件往往采用磨削加工。但是磨轮颗粒微观结构的刃角角度无法控制，所以影响切削质量。因此现在较为流行的刀具多为“狼牙棒 / 玉米棒”形式，即多切削刃形式，并且切削刃的几何形状可定义（geometrically defined cutting edges），如图 7 所示。

加工过程中的切削策略也是值得考虑的。例如为避免产生毛刺，修边时刀具沿轮廓线进给的同时，沿曲面法向前后进给，使得沿不同方向排布的刀刃可以切断纤维。

当然，刀具的选择并没有一个确定的最优方案，国外的刀具厂商都在遵循自己的技术特点进行研发，并完善相应的技术平台。例如有的刀具厂商认为金刚石刀具是最佳的选择。然而哪种刀具方案最佳，目前业内也并没有公认的经验，学界也没有完善的理论。

从加工经验来看，碳纤维 / 玻璃钢复合材料非常坚固，并加剧了刀具的磨损，并且在材料的边缘处容易出现裂层，而这种裂层现象会导致材料强度的降低。

钻削加工是碳纤维复合材料最常见的二次加工方式之一，由于碳纤维复合材料具有各向异性和非均匀性、层间结合强度低、（某些树脂材料）受温度影响大等特点，在钻削制孔过程中极易产生分层、毛刺和撕裂等缺陷，属于典型的难加工材料。在碳纤维复合材料常见的制孔缺陷中，分层缺陷对复合材料结构件的承载能力和疲劳强度影响最大。因此避免分层是最重要的钻孔工艺优化目标。

以孔加工为例，刀具的破损，错误的刃角和不适当的工艺方法都会导致边缘的分层和破损，如图 9 所示。

为解决孔加工的分层问题，通常的解决方案有两种：一是在零件背面加垫带有相当尺寸孔的夹具。例如要在碳纤维板材上钻 Φ5 的孔，那么就需要在零件背后的夹具上预留约 Φ5.2 的孔，并通过真空吸附等方式使零件紧

图 7“狼牙棒”式切削刀具

图 8 金刚石刀具

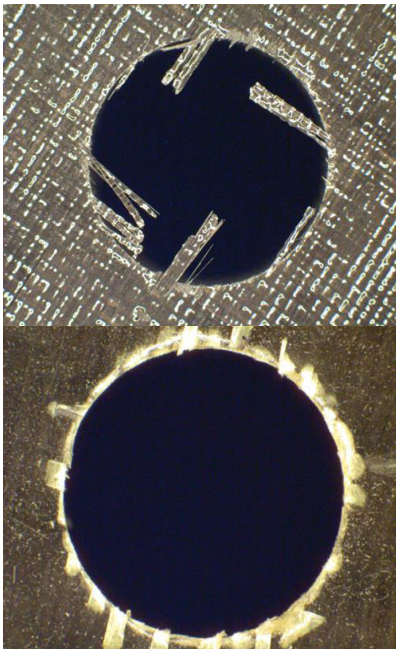


图 9 孔边缘的分层和破损

密固定在夹具上，零件正面也用压板环紧密固定。这样用 Φ5 的钻头制孔时，可以快速进给，而不必担心孔的边缘纤维之间发生较大撕裂。因为分层区域仅存在于宽度约 0.1mm 的环状带上，通常在工艺允许范围。图 10 为采用正确刀具和工艺加工的孔。

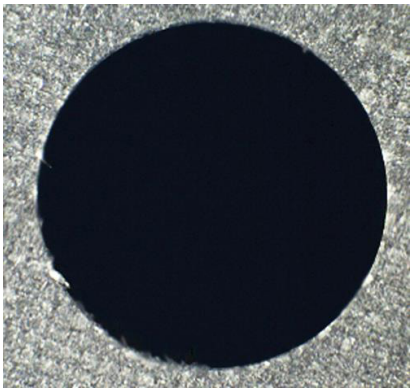


图 10 碳纤维板材上采用正确刀具和工艺加工的孔

图 11 所示的钻铣系统为奥地利碳纤维零件供应商 FACC 定制开发，用于空客 A380 零件。该制孔系统每秒可一次性快速钻孔 12 个。

另一种方法则更具普遍性，就是采用小直径刀具，钻透后采用镗孔的方式（图 12），将破损的边缘铣掉。这种方法效率较低，但对装夹方式没有特别要求，汽车碳纤维结构件制孔量很大，因此往往要求机床具有较大的加速度（7m/s^2），以保证铣头可以快速进行镗铣运动。也有一类偏心钻设备，通过机械机构实现镗孔运动，可以快速制孔。

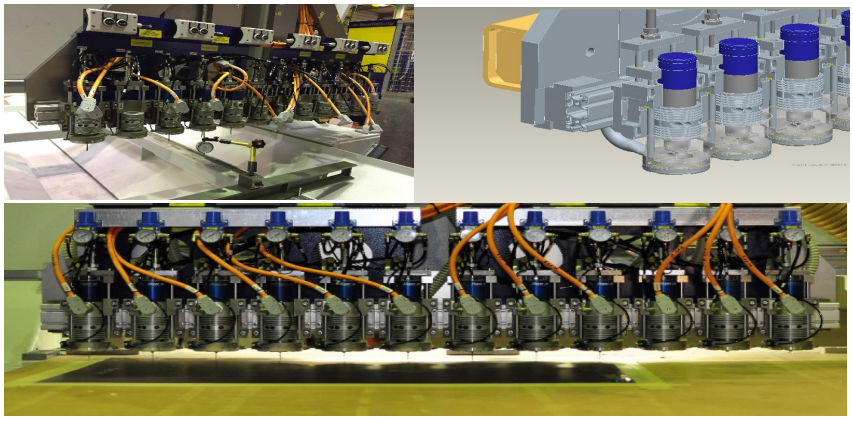


图 11 飞机蒙皮制孔系统

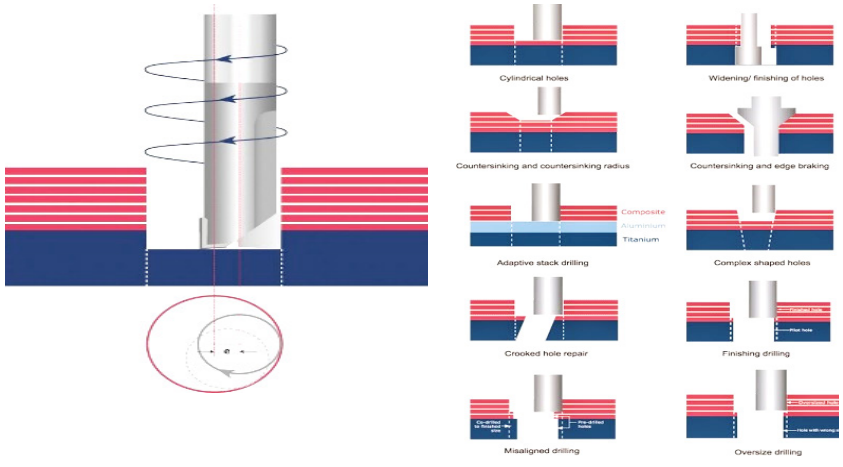


图 12 碳纤维零件镗孔

当刀具转动时，刀具轴向方向保持不变同时画出更大直径的轨迹圆。与机床运动相比，偏心钻通过偏心机构实现小刀铣大孔，更容易实现较大加速度，经济性更好。同时，也便于手持操作，非常适合大型碳纤维零件的人工制孔，在航空航天领域优势明显。

2. 蜂窝材料加工

蜂窝切削也是比较特殊的工艺。例如：Nomex（一种芳族聚酰胺纤维）是一种有很多带有涂层的各种金属的和非金属的组合材料、粘结剂和封装组合材料。这些材料对传统的机器加工来说，是一个挑战，尤其是蜂窝芯材的曲面加工。

蜂窝加工时难于固定，蜂窝底部与粘胶固定并不十分牢靠，在铣削平面加工时，去除下的材料很容易打卷并缠绕主轴， 从而破坏材料，甚至可能将整个工件拖离工作台。为此国内很多研究机构把注意力放在装夹方式上，例如通过磁粉固定蜂窝底部。实际上，欧洲企业已经通过刀具和切削策略解决了蜂窝加工的固定问题，如图 13。

如图 14 所示，Neuhaeuser 刀具公司在铣刀前段加装粉碎头。当前端齿刀具切割材料时，粉碎头在空气的作用下带走切除掉的材料，从而保证加工工件的光洁度。这种办法能让切下的材料不再参与加工，因此不会发生蜂窝被铣刀卷吸起来的情况。

3. 超声切割

此外，超声切割也是比较流行的蜂窝切割解决方案之一。早在 20 年前，超声加工一度成为研究热点。因为通过给刀具施加沿轴向的高频震动，理论上可以大幅减小切削力。但是由于当时技术限制，超声切割的实际应用一度陷于停滞，难以突破。而同期的激光技术和高速切削（HSC）工艺得到迅猛发展并广泛应用，超过了超声切割的应用价值。因此设备供应商将注意力纷纷转向激光和 HSC 技术。

目前，超声加工主要应用在超硬材质和软性材料上，例如陶瓷加工和食品切割。在汽车轻量化加工应用上，主要体现在蜂窝切割、预浸料切割和纤维布下料等软性材料的切割。

超声切割主要部件是发生装置和切割头。目前有很多提供软性材料超声切割解决方案的供应商，但是硬脆性材料超声加工尚未成熟，也没有成熟的工业产品。

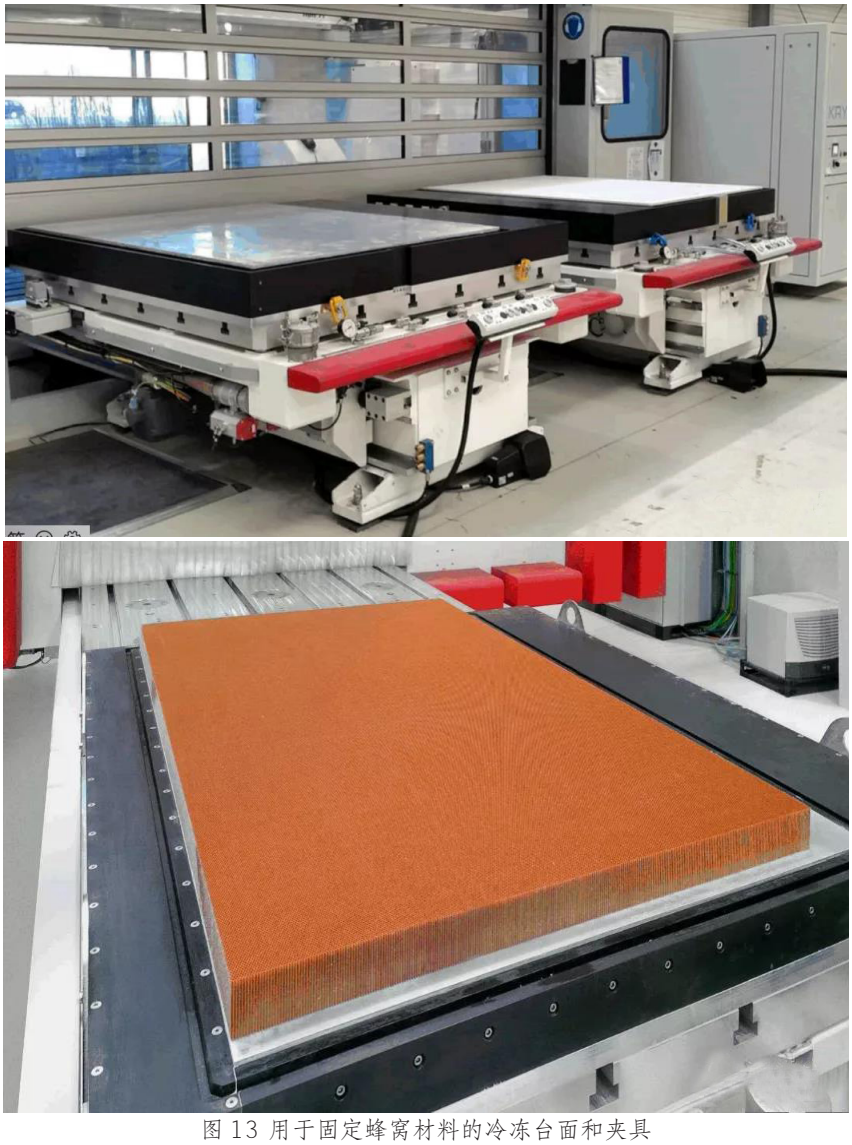


图 13 用于固定蜂窝材料的冷冻台面和夹具

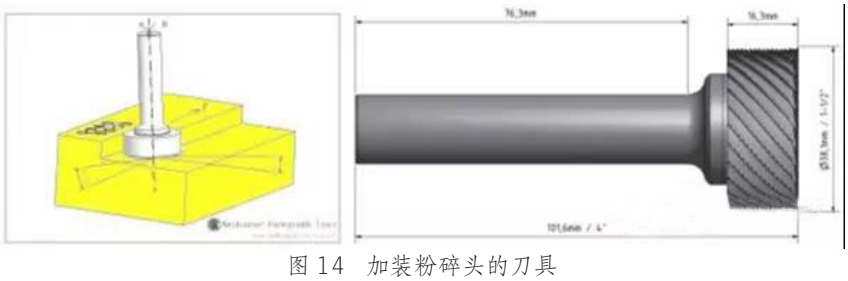


图 14　加装粉碎头的刀具

4. 高效刀具冷却

为提高冷却效果，很多刀具厂商提出中空冷却方案（图 15）。在刀具中间，刀刃根部或附近部位，配合空气流道，使压缩空气在刀具内部进行冷却，并由刀具底部将粉尘吹出。该技术方案的理念来源于深孔钻（抢钻），即利用高压水流把孔底的金属切屑排出。尽管该方案对于高端金属加工机床来说几乎可以算得上标配，但是由于很多复合材料加工时忌水，忌油，加工复合材料深孔的时候通常只允许空气冷却，因此要求主轴带有中空通入压缩空气功能，而这也是传统金属机床的研究空白。

与这个思路类似，也有供应商在刀柄外部吹送压缩空气及雾状冷却液对刀具进行冷却。例如 MHT 油雾冷却系统（图 16），包含“气雾”润滑及最小油雾化功能，通过高压空气将刀刃部产生的切屑吹走（可以有效避免‘振颤’并显著提高表面质量，大幅提高刀具寿命）。在切削厌水材料时，可以仅适用空气，关闭油基或水基冷却管路。与中空冷却系统类似，MHT 系统安装于主轴前端，每把刀具都分别配有 MHT 吹风模块，喷射模块的小孔喷嘴可将高压的冷却空气 / 冷却液对准刀尖。该系统适合空气冷却和（水 / 油基切削液）切削液冷却。

MHT 喷射模块装在刀具外部，不随刀具转动。前端设有喷射小孔，可准确向刀尖处喷射高压冷却气体或油雾，由于高速切削，刀刃处会形成气体湍流，使得喷射气体或油雾自动对准刀尖。更换刀具时，喷射模块也随着刀柄一同更换并固定，每一个喷射模块对应于特定长度和直径的刀具，确保冷却气 / 油雾对准刀尖，保证冷却效率。

无论是中空冷却还是 MHT 冷却，这类冷却方式有别于传统的干冷或最小油雾化冷却，可以使

图 15 中空刀具中空冷却刀柄

图 16 MHT 油雾冷却系统

冷却油雾指向切削部位，冷却效率最高。高效冷却方式可以有效避免材料融化，加工速度可以更快，不必担心融化的树脂粘在刀具表面，非常适合小直径刀具的精切。同时，高压空气可将粉末吹走，可避免非金属材料升温融化后粘在加工过的表面。由于喷嘴压力大，可以吹断非金属或铝合金粉末和碎屑，因此可以彻底根除切削瘤。

四、轻量化加工中心

与金属加工类似，铝合金及复合材料零件的机械加工设备大体上也可以按照车、铣、刨、磨、镗等不同结构形式来区分。但是与传统金属零件不同，汽车轻量化零件以结构件为主，加工精度要求相对不高，而且很多是薄壁零件，切削力很小，所以诸如坐标镗床这样的结构件加工利器，就很少应用在轻量化切削领域(图17）。复合材料零件的表面多半不需要也不允许磨削加工，因此磨床类设备应用很少，但是表面打磨抛光工艺相对较多。而轴类零件大都不需要精度配合，而成形工艺多半在缠绕机或3D编织机上完成，因此复合材料的车削加工的应用范围比金切削中的车削少得多。轻量化切削以高速铣为主，因此诸如拉床、刨床、立车等低速设备几乎都没有用武之地。轻量化零件特别是汽车轻量化零件的加工，主要以切边、钻孔、开槽、铣削为主。选用的机械加工设备主要是高速加工中心，结构形式以龙门式、卧式、立式等五轴加工机床为主。

图17 重型五轴镗铣床多用于加工大型结构件，但并不适合汽车轻量化零件加工

而从广义上讲，涉及到轻量化加工的机床种类有很多，如果以零件成形为节点，那么主要包括下料设备和加工中心。下料设备在成形之前使用，主要包括纤维织物的剪裁机、水切割、激光切割、开料锯以及各类对毛坯材料修整的设备。而另一类就是加工中心，主要针对成形后的工件进行机械加工，也包括对成形模具和曲面真空夹具的加工。还有一类打磨和去毛刺设备，也可以归为加工机床。

加工中心是最常用的轻量化加工设备，由于被加工轻量化零件大都形状复杂，因此加工中心大都要求具备5轴联动功能，同时配备复杂的装夹系统。接下来将主要针对轻量化材料加工中最重要加工中心设备展开论述。

1. 重切削与轻切削分类

由于材料通常较软，同时采用高速切削，因此切削力小，所以主轴扭矩并不需要特别高，同时驱动系统受力更小。再加上加工精度要求通常不高，所以轻量化材料切削CNC的门槛要低于金切削机床。

因此轻量化材料切削设备领域，大体上有两类加工中心厂商参与市场竞争：一类是金切削机床的轻型化的型号，另一类是木工机床的重型化改进型号。

金切削机床的轻型化的设备供应商例如：德国的福柯(Fooker，Reichenbacher Hamuel）、法国的里内（Forest-line）、意大利的JOBS、日本的SNK等。这类加工中心的特点是：机床刚性好、精度高、但造价高昂等。这类设备通常用于航空铝件（如壁板、蒙皮等）和轨道交通大型铝件的加工，由于切削量大、公差要求高，因此比较适合这种“轻型机床”加工（图18）。

此外，由于高压铸铝结构件开始应用于Tesla车身，因此

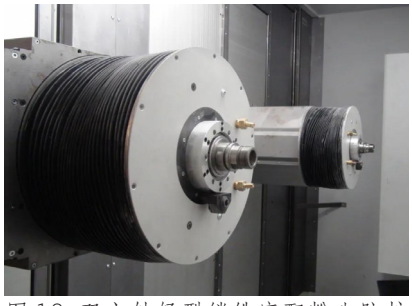


图18 双主轴轻型镗铣床配粉尘防护系统（Reichenbacher Hamuel GmbH）

图 19 双主轴双转台摇篮式金属加工机床（Unior CNC）

很多用于缸体缸盖的金属加工机床被用在了铸铝结构件的加工。典型供应商如德国的 Grob，Chiron，日系的 Makino，Mazak 等量产型机床企业（图 19）。

木工机床重型化的设备供应商如：德国的豪迈（Homag）、意大利的 CMS 等。这类设备通常采用焊接床身，因此运动部件更轻，空载速度更快，结构更简单，价格也更便宜。同时通过提高阻尼的方式避免振颤，通过软件补偿提高加工精度。另外木工机床制造商对粉尘防护有着丰富的经验。因此欧洲汽车行业的轻切削应用往往采用这类机床，实际上更准确的名称可以译作“雕铣机”（Router）（表 1）。

值得一提的是，机床（Machine tool）、雕铣机（Router）、木工机床（Wood machine）只要是数控控制系统，在欧美都叫做加工中心（CNC）。而在亚洲国家基本都翻译为机床或加工中心。在欧洲市场轻量化材料的加工主要集中在铝合金车身结构件，内饰及外饰件，以及模型加工。在设备选用上大致如下：

铝合金结构件如车桥，前后梁等通常采用轻型金属加工机床；

铝合金外饰件如行李架，天窗边框等通常采用高端雕铣机；

碳纤维 / 玻璃钢复合材料内外饰零件通常使用雕铣机和高端木工机；

非金属（塑料，木材等）内饰件加工通常采用雕铣机或木工机；

2. 床身结构

因为切削力比较小，轻切削机床大都采用焊接结构，而不是铸造结构。而影响机床刚性的主要是运动部件之间的连接机构，如滑块、轴承、齿轮等，对于机床来说，多体刚性比结构件刚体的刚性重要得多。但对于大型机床来说，焊接结构件就显得有些脆弱，为增加其刚性，焊接结构的立柱，侧墙等支撑部件也会采用向中间灌砂子或混凝土等方式，或者直接采用钢筋混凝土作为支撑结构。也有一些比较“新潮”的轻型机床会采用碳纤玻纤玄武等复合材料制作大型结构梁。由于运动结构较轻，所以滑块可直接落在导轨上，不必设计静压系统，维护简便。

（1）龙门式

龙门式加工中心比较适合大中型零件的加工，由于轻量化零件以结构件和覆盖件为主，如车架、车门、仪表板等，这类零件尺寸通常较大，因此对龙门式 CNC 的用量最大。而龙门式 CNC 也包括三种类型：龙门移动式、工作台移动式和横梁移动式。

龙门移动式是指门形结构框架在导轨梁上运动。这种结构龙门不适合太高，如果龙门过高会造成框架运动时的扭曲变形，影响精度。如果对 Z 向行程要求较高，那么就需要将导轨梁加高，龙门变矮。这种结构叫做高架桥式，如果移动的龙门 / 桥变成一根横梁的样式，那么就可以称作横梁移动式。这种结构适合 Z 向行程高的大型零件加工。另外也

表 1 机床和“雕铣机”的比较

	机床（Machine tools）轻型化	雕铣机（Router）重型化
床身结构	铸造为主，焊接成为趋势 床身重，刚性好	焊接床身 床身轻，刚性一般
速度	慢，15 ～ 30m/min；高速进给需用直线电机，但造价更高	快，60 ～ 100 m/min；齿条驱动，便于散热
加工材料	大切削量铝合金（如模具）加工，非金属复合材料加工	少切削量铝合金（如型材）加工，树脂基复合材料加工
造价	高	低
精度	高	一般，但满足加工要求
典型企业	Reichenbacher Hamuel，Fooke，FIVE	CMS，Bray

可以采用多根横梁和多套铣头实现独立加工。如果龙门固定，让工作台移动，可以避免大跨度横梁在运动时的变形。因此移动工作台式龙门加工中心的结构稳定性更好，但是需要占地空间较大，对零件及夹具的重量也有限制。目前的新型龙门会采取动梁式结构并配置可移动的工作台，装卸工件时工作台移动到外部，通过机器人或自动吊装设备更换零件或整个夹具，作业完毕后，工作台运动到设备内部，并固定位置，再进行加工。

（2）立柱式（轻型镗铣结构）

目前有一种单侧支撑的卧式加工中心逐渐开始流行。这种样式严格上属于C型结构，稳定性差。但是结构相对简单，生产成本低，比较适合切削力小的铝合金、镁合金和增强纤维塑料复合材料和塑料零件的加工。这样可以将零件竖立放置，加工时切屑或粉末落到下面不会留在工件上面。

（3）框架式

框架式是稳定性最好的机床结构（图 20），落地镗床以及很多卧式加工中心多采用这种结构。框架式加工中心通常造价较高，多用于高强度加工中心。在轻量化零件的加工中，主要用在箱体类零件，如铝合金发动机缸体及缸盖等。这类加工中心需要有较强的刚性，适合大切深的强切削。框架式结构配合摇篮式工作台是最经典的五轴联动加工中心的结构形式。

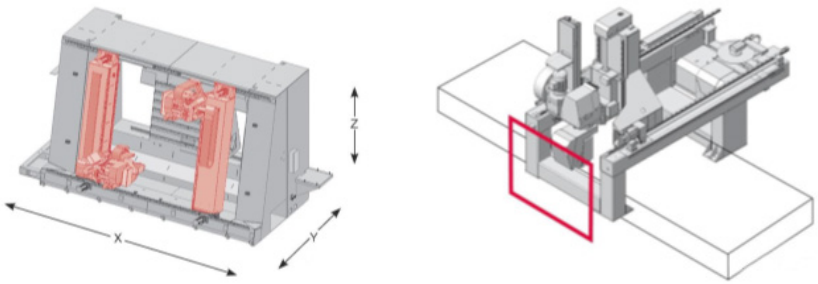


图 20 为弥补结构刚性的不足，可增加龙门支撑，形成半框架式结构

3. 主轴

绝大多数使用高速电主轴，功率 5 ～ 25kW。加工塑料、树脂、软木等材料时，主轴功率大约 5 ～ 10 kW；在加工铝型材、玻璃钢等材料时，功率选择区间为 7 ～ 15kW；切削碳纤维和大切削量铝合金零件时，功率选择 10 ～ 25 kW；更大的厚板类零件的切削以及缸体缸盖的加工会选择 40kW 以上的主轴，但这在汽车轻量化结构件加工中并不常见。

欧美绝大多数配套厂都采取高速切削 HSC，因此大都要求配备高速电主轴，转速配置 24000 rpm 以上，实际加工时转速 15000 rpm 左右。

对于很多轻型五轴加工系统来说，铣头往往是个薄弱点。因为大部分厂家都采用了谐波减速器作为 A、C 轴的驱动，这个设计与机器人的前段关节的驱动是一样的，因此很多厂家内部称之为“机器人铣头”。传动比大，成本低，与数控系统集成简便；不足之处是扭矩偏小，也无法支撑重量较大的大扭矩大功率高速电主轴。

4. 轻量化切削辅助系统

（1）粉尘防护系统

粉尘防护是复合材料加工永恒的话题，特别是当导电纤维进入电气柜或电子部件，又或者当高硬度粉尘进入机械运动部件，都会造成设备损毁。

比较新的吸尘方案是在主轴头前段安装可伸缩毛刷，防尘毛刷位置可根据刀具长度由 NC 控制。同时吸尘区域与机床内部吸尘管道连接，外接高压真空吸尘系统。由于防尘毛刷包围在刀具外部，因此产生真空区域最小，可实现最高效吸尘。同时毛刷位置可以根据曲面位置通过程序调整，使毛刷始终贴合曲面，因此该方案非常适合修边和轮廓外形铣削加工。

为配合非金属切削，毛刷内部，主轴前端通常会配置除静电装置和吹风口。

传统意义的金切削是不必考虑粉尘的，铝合金加工通常只考虑及时排屑以避免高温铝屑堆积

使床身变形，影响加工精度。随着高速加工应用的普及，高切削速度、小切深、快速进给的加工策略在欧洲已经得到普及，因此铝件在加工的时候产生的铝屑非常细小，可以和粉尘一样被工业吸尘器吸走。

也有供应商在刀柄上做文章，开发了吸尘刀柄。利用透平原理，在刀柄前端增加涡扇装置，涡扇与刀具共同高速转动，将切削时产生的粉尘吸入与刀柄相连接的吸尘装置。涡扇相当于弹簧夹头，将刀具加紧。刀柄采用标准 HSK 标准，根据不同要求可选配各种规格如 HSK A，F，E 等。

在高速切削的同时，粉尘随高速空气进入吸尘管道的同时也起到为刀具降温的作用。转速越快，冷却空气流速越高，带走热量也就越大。为避免高速粉尘颗粒对涡扇叶片的磨损，材料表面经过热处理，硬度达到 58 HRC。

由于涡扇要适应高转速，因此对动平衡要求较高。目前，已有设计已经接受 60,000 rpm 高转速测试。零件采用整块钢材制造，因此材料一致性最佳，25,000 rpm 高速切削时动平衡等级 G<2.5。经斯图加特大学机床研究所（University Stuttgart, Institute für Werkzeugmaschinen）以及弗朗霍弗自动化研究所（Fraunhofer IPA）等权威机构测试，采用该方案粉尘吸收率达 97.4%，材料去除速度为一般方案的 5.3 倍。

（2）物料交换系统

汽车行业属于典型的采取大批大量生产模式的行业，因此对自动化程度要求较高，也更讲究生产效率。

为提高加工效率越来越多的汽车结构件供应商采用立式旋转工作台。工作台两侧都可以放置工装和零件，通常通过零点卡盘（参见下文“轻量化加工夹具系统”）和定制工装实现自动化或半自动化快速上下料。加工中心在内侧加工时，外侧的操作人员或机器人可以装卸工装或工件。加工完成后，转台快速转动 180^0，位置固定后，开始新一轮机加，这样设备使用率极高。同时铝屑向下掉落，便于清理。

或者采用交换式工作台。图 21 所示的物料交换方案体现了尽量多的在工装上固定工件，并尽量少的减少零件移动次数的思路：每个工作台上配备 3 个转动轴，每个轴有 4 个装夹面，可固定 4 个工件。因此每个工作台一次性可装夹 12 个工件，由 3 个主轴同时加工 3 个零件，加工完成后，夹具转动 90°，加工下一组零件。

5. 轻量化加工夹具系统

（1）零点卡盘系统

汽车轻量化零件的固定往往需要特殊工装夹具，而且工装的种类繁多。另外零件的批量小，批次多，需要频繁更换夹具。所以零点卡盘几乎成为加工中心的标配。

零点装夹系统（ZPS，Zero PointSystem）的作用是帮助用户实现工装夹具与机床之间的快速定位和夹紧，减少机械加工中的辅助时间。它包括零点定位器

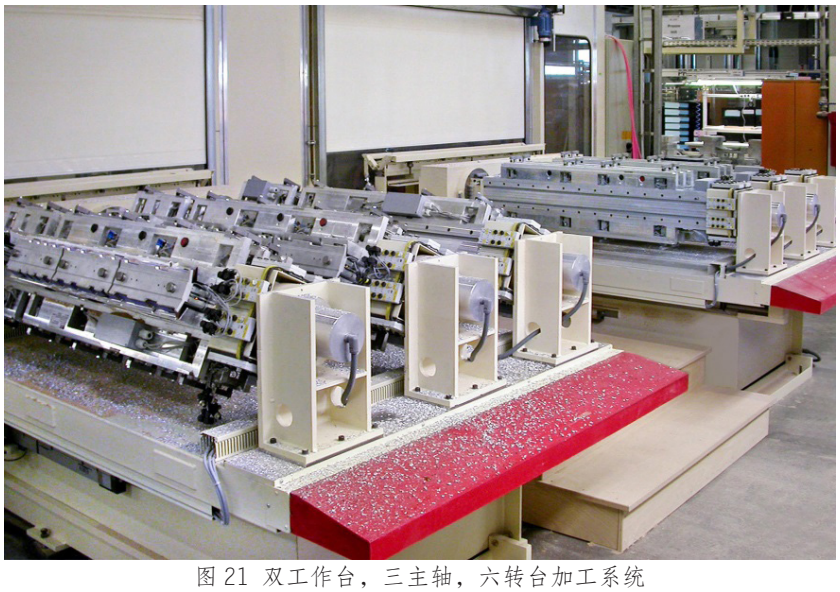


图 21 双工作台，三主轴，六转台加工系统

（凹头）和定位接头（凸头），零点定位器通过大直径高刚度的滚珠夹紧定位接头，当给零点定位器通入 60bar 的液压或者 6bar 气压时，滚珠向两侧散开，定位接头可自由进出零点定位器；当切断压力时滚珠向中心聚拢并锁紧定位接头。这两部分之间的重复定位精度是 0.002mm，同时提供 5 kN 至 30 kN 的夹紧力。

使用时将零点定位器（凹头）安装到机床工作台上，凹头在机床工作台上的位置标记为零点，根据实际加工需要可安装多个定位器凹头（至少 2 个）；定位接头凸头与夹具、工装或者工件通过定位台阶和螺栓紧固到一起（每个夹具、工装或工件至少安装 2 个定位接头凸头）。

当需要加工某个工件时可直接通过零点定位基准夹具系统安装到机床工作台上，无需调整位置和找正精度，整个过程可在 1 分钟内完成（以往更换夹具或工件用于找正位置精度和调整的时间往往超过 1 个小时或者更长时间），大幅度降低了机械加工的辅助时间，提高机床的实际生产效率。

零点定位基准夹具完全采用了优化的曲线设计，定位接头可以任意角度插入定位器。在实际生产环境中不管是人工搬运夹具还是机器起吊，都无法保证托盘完全水平，这就增加了更换托盘的难度。零点定位基准夹具系统的这一设计完美的解决了这一难题：实现了更换托盘时的倾斜安装，另外该系统具有 12mm 的误差自动找正功能，减轻了工人为了将定位接头对准定位器的工作量。

机械加工中产生的灰尘、切屑、油污等对夹具的稳定性、精度及使用寿命都有很大的影响，不解决这个问题就无法真正实现工装夹具的快速更换。零点定位基准夹具系统采用了不锈钢材料，抗腐蚀、易维护；其特有的滚珠夹持系统更有利于清除灰尘和切屑，只需要用气枪就可很快的除去进入定位器的灰尘和切屑。

随着人工成本的日渐攀升，企业都希望能降低对工人的依赖，愈来愈倾向于实现生产的自动化。零点快速定位器能快速更换机床夹具，不需要在机床上人工校正及锁紧工件，其重复定位精度小 0.002mm。零点装夹系统比较容易实现自动化，使工厂形成半柔性化生产，大大节省人力及机器的投入。特别是配合机床交换工作台和机器人以及自动化生产线的搬运定位装夹，自动化生产线、自动化托盘更换系统，实现工厂的无人化生产，图 22 是为奔驰 AMG 开发的零件夹具及工作台零点卡盘。

（2）真空吸附夹具

汽车覆盖件曲面通常比较复杂，因此比较适合专用的随形夹具并配合真空吸附以及机械固定等方式对其装夹。下面的夹具通过吸盘对玻璃钢零件进行固定，同时设计了吸尘管道，直接从夹具底部吸收加工时产生的粉尘。

（3）气动装置

通过气缸等执行机构驱动平口钳、压板等机械机构固定零件，这种方式常见于铝型材结构件。但是汽车铝结构件无论是挤压，内膨胀还是压铸成形的，多半是薄壁零件或框架结构，夹持时很容易变形。所以气动自动夹具系统往往要考虑零件受力变形等问题。

五、汽车轻量化加工的应用领域

1. 车体结构件加工

车体铝合金结构件加工有一个大型化的趋势。为了消除连接过程出现的较大误差，欧洲高端

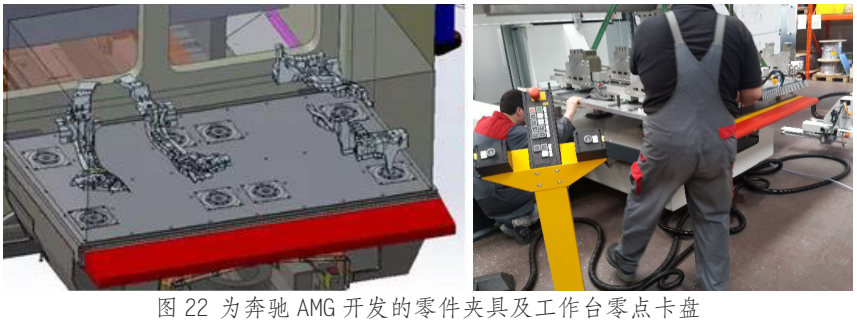


图 22 为奔驰 AMG 开发的零件夹具及工作台零点卡盘

汽车特别是跑车大多会在零部件完成装配 / 预装配之后，进行一次机加，确保整体车身框架上关键曲面的形位公差。例如奥迪的底座焊接 / 铆接之后，会放在加工中心上进行整体机加。而保时捷和法拉利的整车框架 AFS 完成连接工艺后，要把整体框架都放在 CNC 里进行加工。另外，复合材料车身零件在制作过程中都是一次成形的，而且复材零件往往偏大、且精度差。所以复材件以及复材与铝合金预装配件都会在同一台 CNC 里进行加工（图 23、图 24、图 25、图 26）。

保时捷和法拉利的 AFS 会在装配前对整体零件进行一次精度较高的加工。不同之处是，法拉利由于产量小，所以采用加工中心配旋转工作台形式，转台可以翻转 180°，实现翻面。因此一次装夹可以完成 6 个面的加工（图 27）。

保时捷是目前全球唯一量产的跑车，其最后一道 AFS 机械加工采取通过式方案。双头雾轴加工中心与焊接线集成。而两个铣头同时对一个 AFS 加工，效率极高，可以跟上焊接线的生产节拍。（图 28）

2. 覆盖件（内、外饰）加工

覆盖件对加工精度要求比较低，所以很多厂商索性选择五轴木工机床加工。或者用工业机器人配电主轴 / 激光器 / 超声头进

图 23 碳纤维零部件整体加工

图 24 房车大型三明治结构侧板件加工

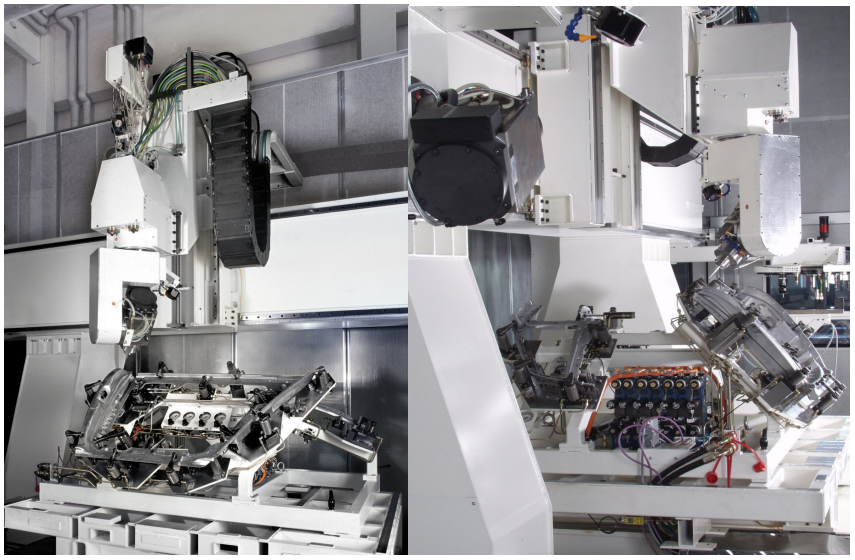


图 25 奥迪 A8 及大众辉腾铸铝件加工

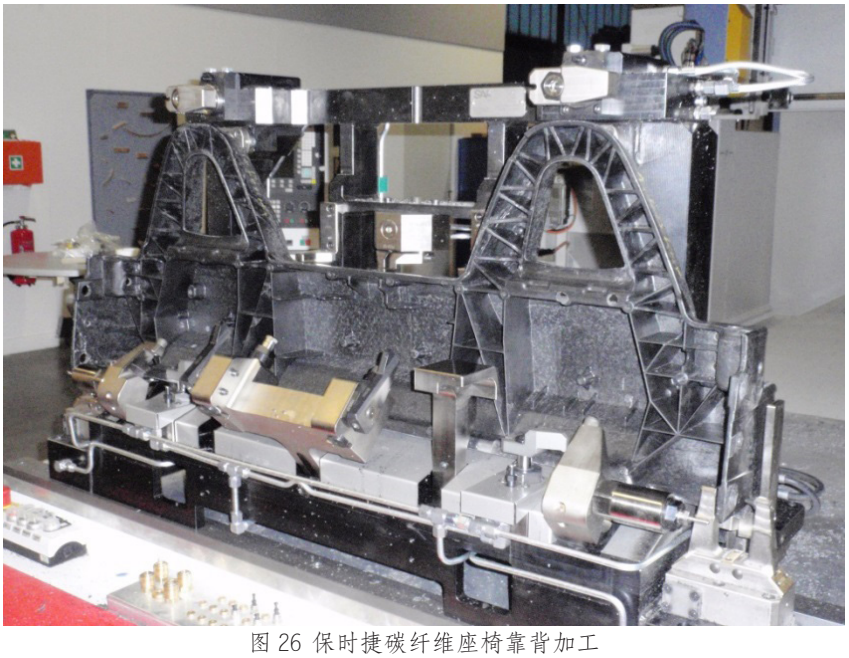


图 26 保时捷碳纤维座椅靠背加工

行修边。中低端车型的覆盖件以塑料为主，高端车型则经常会出现木材和铝镁合金的复合材料。例如宾利内饰件的材料为名贵木材、铝合金、塑料、密度板等若干层材料叠压成形。所以在加工时，首先要选择合适的刀具和加工工艺。同时根据零件的尺寸和工艺要求设计夹具。之后再根据刀具，夹具和工艺选择或定制机床。

图 27 法拉利全铝车身整体加工系统

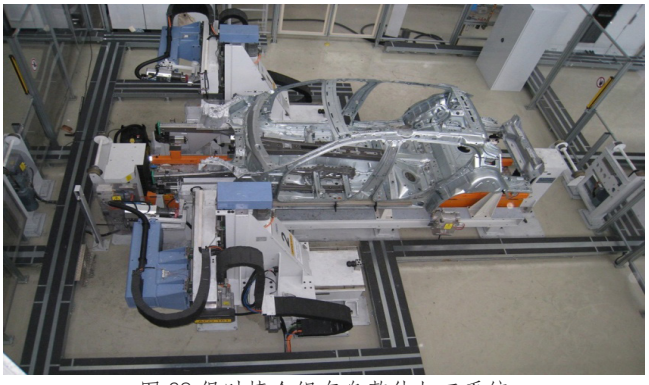


图 28 保时捷全铝车身整体加工系统

图 29 树脂基辅材与铝合金车门的激光焊接样件

六、技术展望

随着自动化技术的不断进步以及各种特殊工艺的不断成熟，加工设备的工艺集成度也会越来越高。换言之，轻量化零件的生产会涉及到越来越多的特殊工艺，而这些工艺也将集成在同一台设备里。例如激光头与铣头都可以集成在同一台加工中心里，在切削就可以兼顾两种工艺。目前有一种工艺可以将铝合金和树枝基辅材焊接在一起，其强度大于粘接，也不必像铆接那样担心复合材料被破坏。这个工艺是先用激光在金属表面融化出细密的粗糙表面，再把复合材料零件和处理好的金属相接处并施压，同时在金属侧加热，使另一面与粗糙表面相接触的复合材料树脂融化。这样树脂与金属粗糙表面相粘合，如图 29 所示，实现金属与非金属材料的焊接。整个工艺包括了激光的表面处理，电感装置加热，以及最后的加工，整个工序都可以在一台设备上完成。

另外，工艺融合也是设备开发新趋势。加工中心的出现实际上就是最初钻铣工艺或车镗工艺的融合。如今的加工中心几乎可以实现车、铣、磨、镗等所有机械加工工艺。而未来的发展将是多种加工工艺的融合。

总之，轻量化材料切削是一门新的学问。与之相生相伴的是各种新理念和新工艺的出现。我国的从业人员需要紧密跟进最新的技术动向，跟随并赶超世界先进。MT

数字化制造

美国爱荷华大学智能系统实验室　安德鲁·库西亚克（Andrew Kusiak）

摘要：基于模型的系统工程方法为数字化制造提供了一些颇有趣味的方法。本文综述了基于模型的系统工程方法在数字孪生体构建中的应用。基于近期发表的相关论文，介绍了数字制造技术的进展。数字孪生的构建是一个复杂的过程，需要人工完成，成本较高。本文给出了一些自主构建数字孪生的观点。

关键词：数字化制造；数字孪生；基于模型的工程；自主建模

1. 引言

制造业的转型涉及到数字化、更强的服务倾向性、开放性、两极分化、竞争性，以及最近测试的韧性需求（详情见Kusiak的文献[1]-[4]），所有这些都需要高效构建数字模型（数字孪生）。数字模型在各公司中的优先级各不相同，其应用也有很大差异，然而，对于建模的需求却得到了所有企业的普遍支持。除了机器学习这一特例之外，建模都是由人工完成，存在成本高、更新困难和扩展性差等问题。如果数字模型生成方法的自主化程度能够达到机器学习那样，那么其价值会比机器学习高一个数量级。机器学习在许多方面改变了建模范式：（i）在基于知识的系统中，需要通过人工方式表述定量模型，或基于专家访谈结果推导出定性知识，而机器学习算法实现了这一过程的自动化；（ii）机器学习自其早期开始，就将定量变量与定性变量整合在一个模型中，这在之前的数学规划中是无法实现的（文本挖掘和图像处理也已成为现实）；（iii）新近提出的机器学习算法（例如卷积网络和对抗式网络）不仅可以自主选择输入参数，而且能够利用不准确的数据集（例如，结果不平衡）生成模型。

2. 文献综述

以“制造”+“基于模型的系统工程”或“数字”或“数字孪生”或“信息物理系统”或“基于物理的数字孪生”为关键词，对Elsevier Science Direct、SpringerLink和IEEE Xplore这三个主要的数字图书馆中的出版物开展文献计量分析，结果如图1所示。

以“制造”+“基于模型的系统工程”两个关键词开展搜索时所得到的文献量最多（428341篇，见表1中的域A），而在搜索“制造”+“基于物理的数字孪生”时得到的文献量最少（1768篇，见表1中的域D）。表1还

给出了五个域之间重复文献的数量（从域 A+B 到 A+E）。

例如，搜索“数字”+“制造”+“基于模型的系统工程”共得到 84067 篇文献（见表 1 中的域 A+B）。

表 1 中的数据证明，基于模型的系统工程具有整合性。基于模型的框架整合了制造业发展过程中的主要相关概念，而且未来还能发挥这一作用。这种整合性在制造业的数字化转型中极为重要，因为制造业的任意功能领域（从制造工艺到会计）及其环境（从工程设计到供应链）中不同性质的模型（从物理模型到高级网络商业模型）都可以用同一种方法（图形语言）来描述。

表 1 中的数据表明，搜索中用到的五个关键词中，“数字化制造”和“基于模型的系统工程”的重复度最高（两个领域共有 84067 篇文献重复，即域 A+B）。这一简单的分析说明了科研界和工业界对于在数字化制造中应用基于模型的系统工程方法的关注程度。

数字孪生概念是数字化制造必不可少的部分，下面将讨论这个概念。

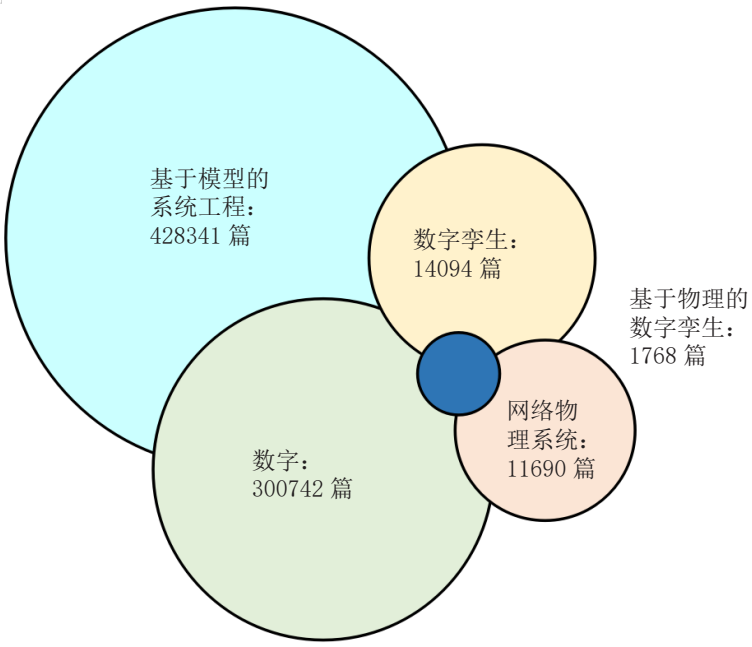


图 1 三个数字图书馆中有关五个主题词的文献数量

3. 数字孪生

自从 Grieves 提出数字孪生[5]以来，人们对其有很多不同的定义。“数字孪生”一词引起工业界和学术界的注意，而之前它有一些不同的名称，例如，模型预测控制中的模型[6]，风能中的虚拟模型[6]，或者本质上任何一种基于物理的、尤其是数据衍生的模型。

Stark 和 Damerau[8] 将数字孪生定义为“一个活跃的独特产品（真实的设备、物体、机器、服务或无形资产）或独特的产品服务系统（由产品和相关服务组

表 1 三个数字图书馆中相关文献的数量

域	关键词		数字图书馆			总篇数
			Science Direct	Springer	IEEE Xplore	
A	制造	基于模型的系统工程	386258	40603	1480	428341
B	制造	数字	157871	129982	12889	300742
C	制造	数字孪生体	7614	6328	152	14094
D	制造	基于物理的数字孪生体	1670	96	2	1768
E	制造	网络物理系统	6175	4670	845	11690
A + B	表示联合域的关键词		71989	10512	1566	84067
A + C			4314	841	14	5169
A + D			1179	56	0	1235
A + E			4708	949	321	5978

成的系统）的数字表示，其中包括在一个生命周期内甚至跨多个生命周期阶段利用模型、信息以及数据选定的特征、属性、条件以及行为。”Jones 等人[9]与 Lim 等人[10]也在其综述文章中给出了其他定义。

本文将数字孪生（见图 2）定义为有趣的科学现象（例如物理学、生物学等现象）、过程、系统或对象（例如实体对象、基于信息的对象）得到相关数据并在此基础上建立的一种模型。

文献中常常报道数字孪生，而不是基于物理的孪生。大多数基于物理的模型是几十年前引入到有限分析或热分析工具等软件中的。增材制造方面目前也提出了几个基于物理建立的模型。制造业中的建模工作常常涉及到数据，例如过程状态、设备利用率、物品数量、产品质量、性能以及表示物理现象的传感器数据，如温度、速度和流速。人们希望未来能够测量迄今为止尚未发现的物理变量。

事实上，数据的相关性、范围、质量和数量决定了制造业中建模的程度以及模型的准确性。毫无疑问，任何涉及物理现象的建模工作都倾向于使用能够表示物理现象的数据（此处称为直接数据），然而，传感器的可用性和成本通常是其限制因素。可用于建模的数据可能并不一致，也会影响到直接传感数据的应用。当某些物理数据无法采集时，此类异类数据可以用作替代数据。例如，在生物学和医学中，以遗传数据（成本较高）作为低成本的实验室数据（替代数据，例如验血数据）可以得到较高精度的结果。在制造业应用中进行这种数据替代需要开展数据科学方面的研究。

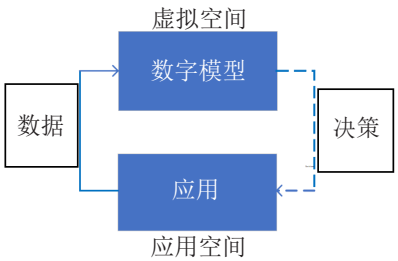


图 2 数字孪生的概念

未来的制造业在很大程度上是数字化的。如图 1 所示，所有的制造业计划，首先就是进行建模，图 2 给出了一个被广泛接受的数字孪生概念。理想情况下，数字模型是制造业应用过程（例如，某个实体系统）的复制品。数字模型可将来自应用程序的数据用于各种目的（例如，控制、优化、预测），并将所得到的结果反馈回实体系统（见图 2）。

下面介绍文中所涉及概念的相关文献。

4. 数字孪生方面的文献

Jones 等人[8]综述了过去十年发表的数字孪生文献，总结了各文献中使用的术语和定义，确定了待解决的研究问题和未来研究领域。在另一篇综述中，Lim 等人[10]根据过去 5 年发表的 120 多篇文献，对数字孪生的进展进行了归类总结。Yi 等人[11]针对智能装配过程提出了一种三层数字孪生参考模型，详细地讨论了虚拟空间层，其中涉及到装配过程规划、仿真、预测和控制管理等方面，并针对卫星装配开展了工业案例研究，演示了所提出的方法。Redelinghuys 等人[12]提出了数字孪生的一个六层体系结构，通过一个应用实例对该体系结构进行了演示，以验证文中提出的概念，找出不足。Tong 等人[13]讨论了一种智能机床数字孪生，用于机床动力学的数据分析与优化、轮廓误差的估计与补偿，并利用文中提出的方法演示了数字机床孪生，其中对 MTConnect（MTConnect.org）采集的数据进行了多传感器融合。Liu 等人[14]提出了一种建模方法，用来开发机加工过程的多尺度、多维度数字孪生，详细讨论了几何模型、行为模型和过程模型，并以空气舵加工过程的监控为例，阐述了文中提出的仿生原理。Wang 等人[15]提出了质子交换膜燃料电池的数字孪生，讨论了燃料电池的三维物理模型以及数据驱动模型，在缩短的时间段内数据驱动模型的预测精度与三维物理模型相当。Verboven 等人[16]针对

农产品加工领域的数字孪生提出了一些期望，例如降低产品变异性、提高质量和保质期、减少资源损耗和使用量、降低成本、优化生产计划、改善物流、节能和提高透明度，讨论了基于物理的模型、数据驱动模型和混合模型在孪生体中的作用。Ding 等人[17]提出了信息物理生产系统的数字孪生体，详细介绍了配置和操作机制以及实时数据驱动的操作管理。Glatt 等人[18]讨论了一个集成式系统的建模和实现，其中包括一个工业物料搬运系统和一个基于物理的仿真数字孪生，利用一个物理引擎模拟工件与物料搬运系统之间的物理相互作用，解决了物料搬运过程中的物理干扰问题，展示了预测、监测和诊断三种数字孪生功能。Kaigom 和 Roßmann[19]讨论了基于物理的仿真机器人虚拟试验台，使其适应施加在机械手上的外力，该仿真方案整合了多体动力学建模技术、机器人技术和虚拟现实技术，有助于实现机器人操作，证明了在位置不确定的情况下数字孪生的实用性。大多数的数字孪生是基于数据而不是物理方程式构建的。最理想的情况是，所有数据都能反映某些物理参数的数值，然而，这在制造业环境中似乎并不现实。毫无疑问，在不同的制造领域，从电子工业到机械加工工业，物理参数的数量会有差异。从制造环境中可以采集到许多数据点，涉及到的某些参数可能与物理学毫无关联，例如零件号、状态码、完成时间和效率。所采集的数据将用于建模。提出了基于模型的系统工程方法来表示数字模型。

5. 基于模型的系统工程

基于模型的系统工程领域吸引了许多研究者和从业者，该领域目前已经出版了多本专著，发表了多篇期刊论文，开发了几十种过程建模方法，其受关注度由此可见。Borky 和 Bradley 在近期出版的一本书[20]中强调，系统体系结构是一门严谨的、客观的、定量的并且可测量的学科，用于定义、分析和构建基于先进技术的系统。书中通过实例介绍、阐释了基于模型的系统体系结构过程（MBSAP）方法。

Douglas[21]在其书中介绍了基于模型的系统工程，描述了系统开发的各个阶段，包括需求、分析、设计以及与工程学科之间的技术交接。Dori[22]在其书中强化了基于模型的系统工程的概念，重点是对象过程方法（OPM）和系统建模语言 SysML（SysML.org）。

van Ruijven[23]提出了一种基于模型的系统工程本体论，提高了互操作性和效率，降低了故障率。所提出的本体论是根据 ISO 15926 数据集成标准推导的，针对过程层级和物理层级的系统描述了一种基于模型的故障方法。Inkermann 等人[24]提出了基于模型的系统工程的概念，可协助完成汽车业需求采集。讨论了新兴汽车系统的部分模型，包括从概念（应用案例）到解决方案（系统结构）等不同层级的应用案例、功能、功能实现、系统结构和产品结构。多家公司组成一个多学科团队，采用系统建模语言（SysML 1.4）来支持实现生产线设计中的系统工程活动，Van Noten 等人[25]对所得到的经验进行了总结。Mosavi 等人[26]认识到了基于模型的系统工程的重要性，采用系统建模语言（SysML）、web 本体语言（OWL）和业务过程建模符号（BPMN）三种建模工具对半导体制造业供应链中所涉及到的各种过程进行建模。Hecht[27]讨论了一种基于模型的系统工程方法，对重要基础设施的韧性和生存能力开展定量分析。分析结果表明，与恢复性措施相比，防火墙和传播阻断措施等防御性措施更为可取。Sindiy 等人[28]根据航空航天领域的应用经验，针对基于模型的系统工程，介绍了实现其可视化的准则，其中一条经验指出了在实时应用中输出视图的动态操作方法。Laing 等人[29]收集了工业组织的相关数据，以检验基于模型的系统工程方法的工业实践效

果，并记录了这项研究所取得的经验教训。

Feldmann 等人[30]针对基于模型的系统工程中不一致的问题，提出了一种规范、诊断和处理方法，提出了一种图形化建模语言来表述不同工程模型之间的依赖关系和一致性规则。

Mohamad 等人（2017）根据已有的需求和系统工程模型研究了社会网络模型的自动构建，采用低成本通信与协调（LoCoLoCo）方法，基于从实际系统工程模型中选定的系统工程组件，自动创建了社会网络并实现了可视化。

6. 模型自主发现方面的文献

过去的十年，人们对利用数据进行自主建模的关注度日益提升，特别是对过程模型（见 Claes 等人的文献[32]）。过程挖掘旨在利用事件数据进行过程建模（见van der Aalst的文献[33]），利用数据科学来生成过程模型。ProM（ProM 2020）是过程挖掘方面的事实标准，支持 MXML、SA-MXML、XES 和 CVS 等格式（见 van der Aalst 的文献[33]）。

过程挖掘包括过程发现、模型增强和一致性检验等内容。过程发现是指从事件日志中提取过程模型。模型增强旨在利用事件日志中的信息改进过程模型。一致性检验则是检查验证所发现的过程模型是否达到了预期的行为。大多数算法所构建的过程模型很难解释，特别是在非结构化领域。对于复杂的动态过程，采用的是声明性过程模型。它们利用约束（即需要遵循的规则）来说明，哪些过程行为是可以实现的。

De Weerdt[34]研究了自动化过程发现的问题，已在其文献中提到，旨在利用信息生成过程模型，例如客户关系管理系统。这项研究源于序列过程挖掘（Han 等人的文献[35]，Zaki 的文献[36]）。Augusto 等人[37]采用不同的质量指标系统地总结、评估了一系列自动化过程发现方法。目前，已经提出了多种挖掘非结构化过程的方法（Molka 等人的文献[38]）和挖掘结构化过程的方法（Augusto 等人的文献[37]，[39]）。Chapela-Campa 等人[40]和 Han[41]讨论了过程中常见模式的提取，例如序列、循环。Fabrizio 等人[42]提出了一个详尽的模型挖掘方法，其中使用了先验算法和序列分析算法。Dikici 等人[43]根据 1000 篇已发表的文献进行了总结，对影响过程模型可理解性的因素进行了分析。

7. 数字模型实例

用于开发制造业数字模型的数据分为以下几类：

√传感器数据（例如，在机床上采集的振动数据、油温、计算机化测量设备的测量数据）

√图像（例如，组件质量数据、机器人操作包线的图片流）

√ RFID 数据（例如，射频识别标签中包含的组件描述）

√可测量或预测的软件生成数据（组件处理时间、组件计数、工具状态）

数字模型分为如下几类：

√过程

√功能

√基于基础科学，例如基于物理

√系统

图 3 给出了采用基于模型的方法对物理衍生模型进行工程表述的一个示例，基于 SADT（结构化分析和设计技术）符号，说明了著名的泰勒方程在估算工具寿

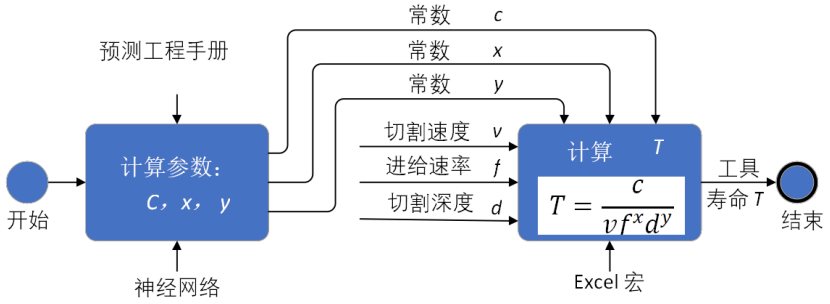


图 3 物理衍生模型

命时的执行过程。

如图 3 所示，基于模型的表示方法可以将所需数量的信息纳入基于物理的模型（即泰勒方程）中。图 3 中的模型区分了模型输入（自变量 v，f，d）和先前计算的模型参数 c，x，y，后者采用自上而下的箭头（SADT 符号中的控制符）进入计算 T 的方框。图 3 第一个方框中的预测工程手册是背景知识，因此它采用了自上而下的箭头。图 3 中的两个自下而上的箭头（神经网络、Excel 宏）表示每个活动方框的资源。

图 4 的示例说明了基于模型的框架的灵活性。

图 4 中的卷积神经网络（例如 Kusiak 的文献 [44]）使用的输入量与图 3 中基于物理的模型不同，可以预测工具剩余寿命 T_R（或工具寿命 T）。如有需要，图 4 中的模型还可以扩展，来描述神经网络以及周围环境的细节。

许多数字模型整合了很多不同领域的内容并且服务于不同的领域。由于存在这种需求，而且构建数字模型本身就较为复杂，因此数字模型存在多种表示方式，例如列表、矩阵、图形模型和树状图。

本文给出的过程模型采用 BPMN（bpmn.org）方法。

考虑一下从安装到订购产品的过程，它包括以下七个任务（从 A 到 G）。

A：操作 A

B：操作 B

C：操作 C

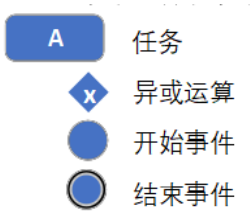
D：操作 D

E：操作 E

F：操作 F

G：操作 G

图 5 所示的这个过程其模型采用 BPMN（bpmn.org）符号，其中：



该模型包括 7 个任务（从 A 到 G），其中有开始事件和结束事件，两个循环 L1 和 L2，任务之间的数据流标记为数字 1 到 8。

图 6 是图 5 中模型的另一种图形表示，采用树状图的形式。

图 5 和图 6 所示的这类模型通常是由团队中的领域专家构建的。然而，人工建模成本高，而且所建模型可能不准确、寿命有限。为了克服这些缺点，需要利用数据进行建模。

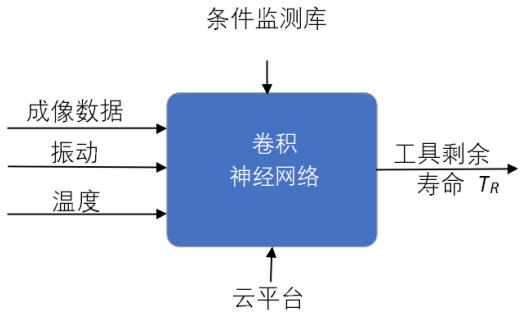


图 4 数据衍生模型

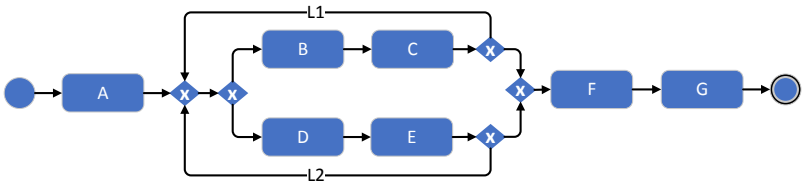


图 5 数字过程模型

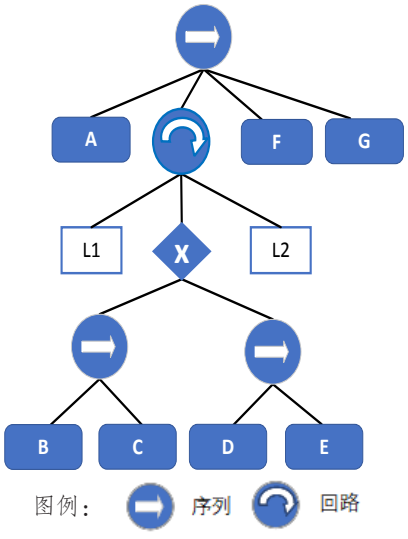


图 6 图 5 数字模型的树状表示

8. 数字模型的自主构建

过程模型的自主构建需要基于数据才能实现。事件日志在过程挖掘文献（例如，van der Aalst 的文献[33]）中常被用作原始数据源。为了在模型开发和分析的所有方面保持术语统一，建模所用的原始数据将围绕各项任务而展开。

表 2 为一段时间内所记录任务的六个列表。关于过程数据的内容，并没有统一的标准。表 2 和表 3 针对建模给出了数据内容的两种格式示例，它们都与图 5 和图 6 的模型表示法相关。

表 2 中的数据为任务的长列表（称为完整列表），其中的各项任务遍布整个过程模型，即从开始事件后的第一个任务到结束事件之前的最后一个任务。请注意，某些任务会重复多次，这是因为开展数据采集的过程中存在一些循环（见图 5）。

另一种数据格式是任务的短序列（部分列表）。这种数据内容格式更可能出现在工业应用领域，其中需要实现过程的某些部分。

此外，表 2 和表 3 所示的任务序列中还采集了附加信息，例如每个任务的输入（I）和输出（O）。这些附加信息可以存储在与任务相同的单元格中，例如，格式 3C7 中 3 是任务 C 的输入，7 是任务 C 的输出。

在对任何模型进行可视化处理之前，例如图 5 或图 6 所示的模型，都需要将表 2 和表 3 中的数据表示为矩阵以便分析。

根据表 2 或表 3 中所列的内容，构建了图 7 所示的任务—任务矩阵。图 7 中的任务可以以任意顺序排列，但行和列中的任务顺序必须一致。图 7 矩阵中元素“*”表示两个任务之间的先后关系。本文采用输入（行）—输出（列）的形式，举例说，F 行 C 列中的元素为“*”表示任务 C（列 C）在任务 F（行 F）之前执行。

表 2 用于构建图 5 和图 6 所示模型的完整任务列表

时间标识	任务								
1	A	B	C	B	C	B	C	F	G
2	A	D	E	D	E	F	G		
3	A	B	C	F	G				
4	A	B	C	B	C	F	G		
5	A	D	E	F	G				
6	A	D	E	D	E	D	E	F	G

表 3 用于构建图 5 和图 6 所示模型的部分任务列表

时间标识	任务						
1	C	B					
2	A	B					
3	E	D	E				
4	C	B	C	F	G		
5	A	D					
6	F	G					
7	A	B	C	F	G		
8	B	C	F	G			
9	A	B	C				
10	C	B	C	F	G		
11	A	B					
12	A	D	E	F	G		
13	E	D	E	D	E	F	G
14	A	D					

任务	C	D	F	G	A	E	B
C							*
D					*	*	
F	*					*	
G			*				
A							
E		*					
B	*				*		

图 7 表 2、表 3 中数据的矩阵表示

注：（i）图 7 矩阵中的每个“*”可能代表多对一任务—任务序列；（ii）矩阵的对角线元素为空；（iii）图 7 中的矩阵在工程设计界被称为依赖结构矩阵。

图 7 中的矩阵表示表 2 或表 3 中的过程数据构成了一个未经组织的过程模型。Kusiak 等人在文献 [45]-[46]、Kusiak 在文献 [1] 中均提出了矩阵和数字模型的分解和组织算法。

9. 结论

本文描绘了数字化制造的建模图景，讨论了创建数字孪生所需的数据和方法。文献综述表明，基于模型的系统工程方法可能成为表述数字孪生的前沿方法，并给出了若干数字模型实例。针对自主建模，提出了一些观点。MT

参考文献

[1] Kusiak, A. (2020), Open manufacturing: A design-for-resilience approach, International Journal of Production Research, https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1770894.

[2] Kusiak, A. (2020), Extreme Engineering: Polarization in Product Development and Manufacturing, Engineering, 2020, https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.01.012.

[3] Kusiak, A. (2019), Fundamentals of smart manufacturing: A multi-tread perspective, IFAC Annual Reviews in Control, Vol. 47, pp. 214-220.

[4] Kusiak, A. (2019), Service manufacturing: Basic concepts and technologies, SME Journal of Manufacturing Systems, Vol. 52, Part A, pp. 198-204.

[5] Grieves, M. (2014), Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, Google Scholar.

[6] IEE (1991), IEE Colloquium on Industrial Applications of Model Based Predictive Control (Digest No.174, London, UK.

[7] Kusiak, A. and W. Li (2010), Virtual models for prediction of wind turbine parameters, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 1, pp. 245-252.

[8] Stark, R. and T. Damerau (2019), Digital twin, in S. Chatti and T. Tolio (Eds), CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer, Berlin, pp. 1-8, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.

[9] Jones, D., C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks (2020), Characterising the Digital Twin: A systematic literature review, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 29, pp. 36-52.

[10] Lim, K.Y.H, P. Zheng, and C-H. Chen (2020), A state-of-the-art survey of digital twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 31, pp. 1313-1337.

[11] Yi, Y., Y. Yan, X. Liu, Z. Ni, J. Feng, and J. Liu (2020), Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study, Journal of Manufacturing Systems, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.013.

[12] Redelinghuys, A.J.H., A.H. Basson, and K. Kruger (2019), A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 31, No. 6, pp. 1383-1402.

[13] Tong, X., Q. Liu, S. Pi, and Y. Xiao (2020), Real-time machining data application and service based on IMT digital twin, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 31, pp. 1113-1132.

[14] Liu, S., J. Bao, Y. Lu, J. Li, S. Lu, and X. Sun (2020), Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components, Journal of Manufacturing Systems,

https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.014.

[15] Wang, B., G. Zhang, H. Wang, J. Xuan, and K. Jiao (2020), Multi-physics-resolved digital twin of proton exchange membrane fuel cells with a data-driven surrogate model, Energy and AI, https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100004.

[16] Verboven, P., T. Defraeye, A. K. Datta, and B. Nicolai (2020), Digital twins of food process operations: The next step for food process models? Current Opinion in Food Science, Vol. 35, pp. 79-87.

[17] Ding, K., F. T.S. Chan, X. Zhang, G. Zhou, and F. Zhang (2020), Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smart shop floors, International Journal of Production Research, https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661.

[18] Glatt, M., C. Sinnwell, L. Yi, S. Donohoe, B. Ravani, and J. C. Aurich (2020), Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation, Journal of Manufacturing Systems, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.015.

[19] Kaigom, E.G. and J. Roßmann (2016), Toward physics-based virtual reality testbeds for intelligent robot manipulators - An eRobotics approach, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Daejeon, Korea, pp. 1000-1005.

[20] Borky, J.M. and T.H. Bradley (2019), Effective Model-Based Systems Engineering, Springer, Cham, Switzerland.

[21] Douglass, B.P. (2016), Agile Systems Engineering, Morgan Kaufmann, Burlington, Mass.

[22] Dori, D. (2016), Model-based Systems Engineering with OPM and SysML, Springer, New York, NY.

[23] van Ruijven, L.C. (2012) Ontology and model-based systems engineering, Procedia Computer Science, Vol. 8, pp. 194-200.

[24] Inkermann, D., T. Huth, T. Vietor, A. Grewe, C. Knieke, and A. Rausch (2019), Model-based requirement engineering to support development of complex systems, Procedia CIRP, Vol. 84, pp. 239-244.

[25] Van Noten, J., K. Gadeyne, and M. Witters (2017), Model-based Systems Engineering of discrete production lines using SysML: An experience report, Procedia CIRP, Vol. 60, pp. 157-162.

[26] Mousavi, B.A., R. Azzouz, C. Heavy, and H. Ehm (2019), A Survey of Model-Based System Engineering Methods to Analyse Complex Supply Chains: A Case Study in Semiconductor Supply Chain, IFAC PapersOnLine, 52-13, pp. 1254-1259.

[27] Hecht, M. (2016), A model based systems engineering approach to resiliency analysis of a cyberphysical system, Proceedings of the IEEE 27th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE), Ottawa, ON, Canada, pp. 25-28.

[28] Sindiy, O., K. Litomisky, S. Davidoff, and F. Dekens (2013), Introduction to information visualization (InfoVis) techniques for model-based systems engineering, Procedia Computer Science, Vol. 16, pp. 49-58.

[29] Laing, C., P. David, E. Blanco, and X. Dorel (2020), Questioning integration of verification in model-based systems engineering: An industrial perspective, Computers in Industry, Vol. 114, https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103163.

[30] Feldmann, S., K. Kernschmidt, M. Wimmer, and B. Vogel-Heuser (2019), Managing inter-model inconsistencies in model-based systems engineering: Application in automated production systems engineering, The Journal of Systems and Software, Vol. 153, pp. 105-134.

[31] Mohamad, M., G. Liebel, and E. Knauss (2017), LoCoCoCo: Automatically constructing coordination and communication networks from model-based systems engineering data, Information and Software Technology, Vol. 92, pp. 179-193.

[32] Claes J., I. Vanderfeesten, J. Pinggera, H.A. Reijers, B. Weber, and G. Poels (2013), Visualizing the Process of Process Modeling with PPMCharts, in La Rosa, M. and P. Soffer (Eds), Business Process Management Workshops, BPM 2012, Lecture Notes in Business Information Processing, Vol. 132, Springer, Heidelberg, pp. 744-755.

[33] van der Aalst, W.M.P. (2011), Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes, Springer, Heidelberg.

[34] De Weerdt, J., M. De Backer, J. Vanthienen, and B. Baesens (2012), A multi-dimensional quality assessment of state-of-the-art process discovery algorithms using real-life event logs, Information Systems, Vol. 37, No. 7, pp. 654-676.

[35] Han, J., J. Pei, B. Mortazavi-Asl, H. Pinto, Q. Chen, U. Dayal, and M. Hsu (2001), Prefixspan: Mining sequential patterns efficiently by prefix-projected pattern growth, Proceedings of the 17th International Conference on Data Engineering, pp. 215-224.

[36] Zaki, M.J. (2001). Spade: An efficient algorithm for mining frequent sequences, Machine Learning, Vol. 42, Nos 1-2, pp. 31-60.

[37] Augusto, A., R. Conforti, M. Dumas, M. La Rosa, F.M. Maggi, A. Marrella, M. Mecella, and A. Soo (2018), Automated discovery of process models from event logs: Review and benchmark, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 686-705.

[38] Molka, T., D. Redlich, W. Gilani, X.-J. Zeng, and M. Drobek (2015), Evolutionary computation based discovery of hierarchical business process models, in W. Abramowicz (Ed.), Business Information Systems, Springer, pp. 191-204.

[39] Augusto, A., R. Conforti, M. Dumas, M. La Rosa, and G. Bruno (2018), Automated discovery of structured process models from event logs: The discover-and-structure approach, Data & Knowledge Engineering, Vol. 117, pp. 373-392.

[40] Chapela-Campa, D.M. Mucientes, and M. Lama (2019), Mining frequent patterns in process models, Information Sciences, Vol. 472, pp. 235-257.

[41] Han, J., H. Cheng, D. Xin, and X. Yan (2007), Frequent pattern mining: Current status and future directions, Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 15, No. 1, pp. 55-86.

[42] Fabrizio, M.M., C. Di Ciccio, C. Di Francescomarino, and T. Kala (2018), Parallel algorithms for the automated discovery of declarative process models, Information Systems, Vol. 74, No. 1, pp. 136-152.

[43] Dikici, A., O. Turetken, O. Demirors (2018), Factors influencing the understandability of process models: A systematic literature review, Information and Software Technology, Vol. 93, pp. 112-129.

[44] Kusiak, A. (2020), Convolutional and generative adversarial neural networks in manufacturing, International Journal of Production Research, Vol. 58, No. 5, pp. 1594-1604.

[45] Kusiak, A. and W.S. Chow (1987), An efficient cluster identification algorithm, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-17, No. 4, pp. 696-699.

[46] Kusiak, A. and J. Wang (1993), Efficient organizing of design activities, International Journal of Production Research, Vol. 31, No. 4, pp. 753-769.

农业自动化：农场生产效率的提升之道

美国机械工程师学会

引言

自动化，特别是数字驱动的自动化，已经彻底改变了从运输业到制造业的各个行业。农业领域的自动化水平也在不断提升。农业领域的方方面面正在以不同的方式实现自动化，大大小小的农场都在改变传统的做法和工艺。今天，新一代的农业设备中应用了各种新兴技术，包括机器人、传感器、无人机、自动驾驶车辆、全球定位系统和机器学习技术等。

全球农用设备制造商纽荷兰公司的北美品牌营销经理卢克·泽比（Luke Zerby）表示：“农业生产中目前汇集了许多领域的技术，甚至于可供我们使用的技术比首次登月时可用的技术还要多。问题是，我们如何利用这些技术为农民服务？”

高校、大型制造商以及各类初创企业都在努力解决这一问题，提出许多创新性的解决方案，以提高农业生产的效率、生产率，实现可持续的发展。

一、不断增长的需求与供给的困难

人们对农业自动化的关注度不断提高，原因有以下几点。

在未来的几十年里，世界人口将大幅增长，需要养活的人口越来越多。受气候变化、水资源短缺等因素影响，“联合国等组织预计，如果不采取措施，几十年内粮食缺口将增至70%。举例来说，气候变化模型显示，加州的农作物产量可能会下降15%。”加州大学戴维斯分校生物和农业工程教授大卫·斯劳特（David Slaughter）如是说，他也是该校智能农场计划的负责人。

与此同时，农业部门也在尽力找到足够的人手来生产所需的粮食。农业领域正面临着全球性的劳动力短缺问题，其原因是多方面的，如城镇化、移民政策以及乡村人口老龄化等。美国加州农场局最近进行了一项调查，有56%的农场主声称，在过去的5年里，他们无法雇佣到生产主要粮食作物所需的全部工人。10年前，华盛顿州立大学（WSU）的研究人员就在着手研究一种机器人化的芦笋收割机，当时市场突然发生了变化。

华盛顿州立大学教授、精细与自动化农业系统中心主任张勤（Qin Zhang）称：“华盛顿州的芦笋种植面积在短时间内缩减了90%，鉴于雇佣不到足够的劳力来收割芦笋，农场主们决定改种其他作物来维持生计。”

提升自动化水平将有助于解决这些难题，但在农业领域实施自动化的难度更大。纽荷兰公司泽比说：“在制造厂里，你会看到机器人在车间周围自动搬运底盘和其他零部件。车间环境的可控性极强，有很多重复性任务。但是，当你转到室外时，将会面临不同的天气条件，车轮下的土壤也在变化，作物在生长，总之，你需要解决多层次的复杂问题。”

尽管如此，农业自动化领域仍在许多方面取得了进步。虽然水果蔬菜等特种作物的种植、采收自动化程度仍很有限，但玉米和大豆等中耕作物的管理中已经应用了大量的自动化技术。实际上，利用全球定位系统来自动引导大型农用拖拉机和其他设备已有20年的使用历史。操作人员输入坐标后，机器负责沿直线犁地，避开播种和喷药施肥间隙。但是这些拖拉机运行时依然需要

人工监督。

二、自动化程度有待提升

目前，农业自动化行业发展不断深化，农用机械自动化程度日益提升。例如，凯斯纽荷兰工业公司（CNH Industrial）生产了多款无人驾驶概念拖拉机，包括基于该公司纽荷兰品牌拖拉机生产的NHDrive概念拖拉机。泽比称：“我们已经掌握了拖拉机相关的所有自动化技术，拖拉机85%的工作都是自动完成的。所以，NHDrive真是一个合乎逻辑的产物。”

NHDrive拖拉机前后各配备两个RGB彩色摄像头，车体前部装有雷达和激光雷达传感器，用于探测障碍物。其运动路径既可由操作员设定，也可由系统软件根据田地尺寸和形状、所牵拉机具的宽度、运动路径上可能出现的固定障碍物（如电线杆或建筑物）自动生成。拖拉机作业时，操作员可以使用平板电脑或计算机远程监控摄像头、访问拖拉机数据，并控制发动机转速、所牵引机具等的设置参数。

泽比介绍说：“如果NHDrive拖拉机感知到前方有障碍物，就会停车。操作员可通过摄像头观察，发现问题所在，然后向拖拉机发出指令。”

该拖拉机无需驾驶员操作，可24小时不间断运转，能够充分利用良好的天气作业，也适合采收快速成熟的作物。但同时，其驾驶室具有完备的功能，必要时可供驾驶员进去操作。泽比解释道，农场主经常要将拖拉机从一块田地经由公路驶到另一块田地，这项任务可由驾驶员来完成。这样的话，不必再使用卡车进行拖运，就可以在各块田地间合法移运拖拉机。

位于南达科他州苏福尔斯市的雷文工业公司（Raven Industries）是一家精密农用设备制造商，其做法与凯斯纽荷兰工业公司不同。Dot是雷文工业打造的全自动柴油动力平台，尺寸20英尺×12.5英尺（约为6.1m×3.81m），重13500磅（约为6125千克）。Dot通过GPS进行导航，并将增加其他传感器，以提供更丰富的周围环境信息。特别是，Dot设计有一个U形台，用来携载各种机具，最大承重35000磅（15876千克），可帮助Dot完成各种任务。目前，Dot适配多家供应商的多种机具，能够完成播种、喷药和施放颗粒状肥料等任务，未来可供选用的工具会更多。

雷文工业公司工程总监约翰·普雷海姆（John Preheim）表示：“平台安装上这些工具后，就形成了真正的独立单元。它是真正的自动化平台，但还需专人在田间监督。”该公司期望未来可以取消人工监督。雷文工业公司还在开发一种可以让一个人通过平板电脑同时操作多台机器的系统。

部分无人驾驶车是专为与其他设备协同作业设计的。雷文工业公司开发了用于无人驾驶拖拉机的新系统——AutoCart。该系统借助GPS导航牵引谷物运输车。谷物运输车与收割机同步作业，收割机沿田垄行驶时，谷物运输车自动伴随收割机移动，并使用摄像头协助跟踪收割机，检测路径上的物体。收割机的传送带将谷物装载到运输车中，装满谷物后，AutoCart会自动行驶至卸载点卸下谷物，再返回收割机旁。通过这种方法，一名驾驶员可以同时操控收割机和谷物运输车。

市场上大部分自动化农用设备推出的时间较短，尚未得到广泛应用。然而，普雷海姆表示：“这比市场最初设想的要快，我们相信，农业自动化将比汽车等其他行业更快迎来市场爆发期。”

首先，在农间无人驾驶涉及的监管及法律问题相对较少。其次，雷文工业等公司为市场提供了能将传统拖拉机转变为无人驾驶拖拉机的自动化系统，这种转变是公路车辆无法实现的。普雷海姆说道：“我们可以先对现有的农场车队进行自动化改造。农场主无需舍弃已经投入的资金。我们认为，农场自动化机器的数量可以实现平稳的逐步增加。未

来田间将出现载人设备和无人设备共同作业的场景，然后无人设备的比重逐渐增大，农民可以从更远的位置操控更多的机器。”

三、小机器带来大变局

自动化设备的应用目标包括中耕作物农场中的各种任务，从种植到除草和喷药。还有些机器人可以协助采集、利用数据，以改进农业生产操作。EarthSense是根据伊利诺伊大学厄巴纳－香槟分校（UIUC）的研究成果设立的初创子公司，主要利用机器人技术帮助繁育人员培育出适应力更强的植物品种。

传统的方法是，繁育人员将田地划分为3米见方的网格，并在每块地里种植不同的种子，然后定期派一队人到田间去评估植物生长状况。据UIUC野外机器人学教授、EarthSense联合创始人吉里斯·乔达里（Girish Chowdhary）说，招聘和培训该岗位人员具有一定难度，而且不同人员的评估结果可能不一致。

EarthSense设计打造了一款仅有11英寸（约28厘米）宽的小型四轮机器人，以每小时1英里（约1609米）的速度在玉米等农作物行间移动。机器人重约15磅（约6.8千克），由4个电动机驱动，装有两个激光雷达传感器，一个朝前用于导航，一个朝上用于采集作物信息。机体两侧及上方各有一个摄像头，也用于采集作物数据。机器人与云端相联，通过机器学习技术，融合多个传感器信息，结合自身的前进运动，创建每行作物的3D地图，并向种植者提供作物数量、高度、茎宽、叶片密度、作物健康状况等信息。

目前，该机器人已在许多大型农业公司中投入使用。

有了EarthSense开发的这款机器人，就无需再为这项工作招聘和培训大量人员，所得测量结果的一致性也更好。此外，它还可以在农作物下方作业，这是无人机和卫星成像都无法达到的地方。目前，EarthSense正致力于为机器人配备喷药设备或以机械方式控制杂草的设备，乔达里表示，与上方喷药技术相比，这种除草方式更具靶向性，化学品

用量至少可降低 50%，实际降幅取决于具体施药情况。

乔达里认为，这种机器人有助于实现“分散化”这一大趋势。“分散化”趋势或将催生新的农业生产方式。他表示：“你可以把一台大拖拉机分散为许多可以分布式部署的小单元。”。过去难以实现这一点的原因在于“每台小机器都需要一个人监督。”但对自动化机器人而言，一名操作员即可监督协调多台机器人。有鉴于此，大量公司和研究人员都在研究“群”机器人技术在农业中的应用，可由一组相互协作的无人机绘制田地地图并实施监测，或由一组小型机器人合作完成播种或田间除草。

乔达里称，分散化的作业方式会带来许多潜在效益。例如，无论农场大小，都可以采用这项技术——农场主不必购买大型收割机，而是可以根据任务情况轻松调整小型机器人的数量。乔达里解释说：“小农场主因为农场规模不够大，往往利润微薄，无法购买大型设备。有了这种机器人后，如果你的农场规模较小，就可以只配备一台设备，如果农场规模巨大，可以采购 100 台。”

分散化还可以帮助农场主采取差异化的作物管理策略。例如，在采收前，农场主有时会种植一些肥田作物，以便在主作物采收后保护土地。但是对于某些作物，比如玉米，要做到这一点是不现实的。

乔达里解释说：“大型拖拉机无法在不伤害玉米的情况下种植肥田作物，但体积较小的机器人就可以。”

分散化也让作物品种选择更灵活。通常情况下，大农场主基本只能种植特定品种的中耕作物。改种其它作物会涉及到专业化的重型设备，还要投资基础设施，成本过高。然而，有了分散化的机器人，设备的灵活性更高，就可以根据市场或天气条件选种其它作物。

乔达里还认为，利用小型机器人作业，可以在大型农场周边经济高效地管理蔬菜、水果作物，实现多样化种植，无需雇佣劳动力。

四、特种作物管理所面临的挑战

水果和蔬菜等特种作物的管理属于高度的劳动密集型工作，在农业劳力短缺的背景下尤其具有挑战性。对此，乔达里表示：“由于作物特性的原因，目前相应的自动化方案不多。但这是农业自动化领域中的一个重要研究方向，也是该领域的重大挑战之一。”

特种作物的种植规模通常比中耕作物小，因此难以判断实施自动化管理的经济合理性。然后是作物本身的原因。华盛顿州立大学的张勤说：“在机器人领域，我们常常听到人机接口这个术语。在特种作物农业生产中，机器人与作物之间也需要接口，因为每株作物都是自然生长的，彼此间千差万别，没有统一的标准。”

与中耕作物相比，许多特种作物也更为脆弱，想想浆果和玉米之间的对比。此外，中耕作物通常是一年生植物，在采收时可以毁坏，而许多特种作物是多年

生植物，如苹果树、葡萄藤。这意味着机器人作业时不能损毁植物。

虽然特种作物的自动化管理还远未达到标准，但市场上也有一些自动化解决方案，还有些方案处于研发阶段，特别是针对除草和喷药等任务的方案。

当地的、新鲜的……机器人化的

2020 年 1 月，第五季公司（Fifth Season）在匹兹堡郊外的宾夕法尼亚州布拉多克市开设了一家基于机器人技术运营的室内垂直农场，种植菠菜、沙拉配菜等新鲜蔬菜，在当地商店出售。

该垂直农场是封闭的受控环境，其中的广布系统由机器人化传送装置和垂直升降装置构成的，能够根据作物的生长状况移动作物完成整个水培生长过程。系统将作物播种在小容器中，然后将其放置于模块化的、可移动的培植盘中。这些托盘会被自动移送至生长室，置于光照及营养环境不同的架子上，架高 30 英尺（约 9.1 米）。随着植物的生长，环境需要不断满足新条件，广布系统就会自动地将“作物公寓”及时移送至相应环境的架子上。

某些工作，例如对作物的检查和部分包装过程，仍然需要由人来完成。但这时：“我们不是让人来到作物旁，而是把作物移到工人身边。”第五季公司的联合创始人兼首席技术官、首席运营官布拉克·韦伯（Brac Webb）说。

这一专利人工智能软件系统将根据各作物在不同生长阶段所需的养分来指导“作物公寓”的移动过程。韦伯表示：“整个农场共有近 8000 个培植盘，我们要对每个培植盘的移动过程进行跟踪。作物种类繁多，培植方式也各有不同，由人进行跟踪就太过复杂了。”

韦伯还表示：“利用这种生长环境受控的农业技术，我们可以在作物生命周期的每个阶段真正实现养分的最优化配给。”如此，就可以依据统一的质量标准生产健康的作物。韦伯补充道：“我们最多可以将作物生长时间缩短两周，因为在理想条件下，作物可以不间断生长。第五季公司的这一方法也有助于降低劳动力及能源成本。

该系统会生成大量关于作物及其具体生长条件的数据。有了这些数据，再加上各个“作物公寓”的历史都可被追溯，第五季公司准备利用分析学和深度学习技术来揭示相关趋势，不断优化养料配比和种植工艺。

圣地亚哥市的视觉机器人公司（Vision Robotics）开发了一种生菜疏苗机器人，近几年帮助农场主解决了劳动力短缺问题。通常，播种生菜时会多撒些种子，以确保扎根出苗的生菜不会太少。生菜长出后，还需再疏除多余的幼苗，以 10 英寸（约 25.4 厘米）的间距沿菜垄保留健壮菜苗，过去这项工作是利用锄头人工完成的。

视觉机器人公司的生菜疏苗机由拖拉机牵引，向需要疏除的幼苗喷洒肥料，从而在生长早期杀掉这些幼苗，完成疏苗工作。这样，在疏苗的同时还完成田地施肥工作，有利于余下生菜的生长。

生菜疏苗机采用了该公司核心的机器视觉技术。机器人的每条喷洒线上都装有一个摄像头，系统使用专利算法辨识“好”苗、引导喷肥器。视觉机器人公司的首席运营官托尼·科瑟尔卡（Tony Koselka）表示，疏苗机作业时最大速度可达每小时 3 英里（约 4828 米）。然而，他说：“视觉系统允许实现的运行速度可能接近每小时 10 英里（约 16 千米）。系统作业时的运动速度取决于喷肥器在准确定位喷施点时的开关速度。”

视觉机器人公司正在利用类似技术开发一种机械除草机，该机拖动多对刀片灭除地面上的杂草。在视觉系统的引导下，刀片不断开闭，除掉杂草，留下所需的作物。该公司还把深度学习技术应用于这些操作，不断提高操作精度。

科瑟尔卡说：“我们还开发了另一种除草机，可以识别比绿色作物的颜色稍黄的某种杂草。

后来有一年，杂草并没有像往年那么早转黄。我们只通过创建新的深度学习训练集，就有效地应对了这一情况。”

特种作物的喷药喷肥、除草及修剪方面的自动化技术发展迅速，但这些作物的实际采收仍是重大难题。有些作物可以采用机械方式采收，比如坚果、西红柿等作物可以粉碎加工，但像新鲜水果和浆果这类作物的采收对于研发人员而言仍是复杂的问题。

例如，某特定植株上的西红柿果实并不是同时成熟的。机器人需要识别出成熟的果实，并且不能损伤未成熟的果实。因此，我们需要为机械臂规划一条到达成熟西红柿的路径，这条路径需要绕过植株的茎、叶以及植株上其他的西红柿，且不能造成任何损伤。

科瑟尔卡说：“执行器，即采摘机械手，是目前最为拖后腿的部分。”执行器需要施加作用力使果实从植株上脱落，还需要具有灵活性，以免损伤果实或植株。目前，视觉机器人公司正在尝试各种各样的方法，比如采用吸盘式装置采摘苹果或通过鼓风方式吹落浆果。

吉里斯·乔达里和他在伊利诺伊大学厄巴纳－香槟分校的合作伙伴吉里斯·克里希南（Girish Krishnan）正在探索如何将软体机器人技术应用于农业领域，并制作了带有章鱼状装置的机器人。

乔达里表示：“软体机器人真的可以成为解决作物操作问题的关键之一。举例来说，假设有三根管子构成这个装置，每根管子都有其卷曲方式，各不相同，因此当你向管子施加压力时，它们会以某种特定的方式弯曲。通过控制作用在管子上的压力，就可以让软体机器人灵巧地移动，轻柔地包裹植株，抓取浆果。”乔达里团队得到了美国农业部和美国国家科学基金会的资助，乔达里称，该项目还处于早期研究阶段，要想投入商业应用，至少需要几年时间。

五、再聪明些

在农业的许多方面，自动化和机器人技术仍在发展，新技术不断涌现，未来将有许多新的可能性、新的机会。机器人将变得更聪明，在农场，数据的应用范围将不断拓展，而自动化设备在这一过程中会发挥关键作用，包括采集田间数据，根据数据来采取行动，自动做出决策。新兴的5G技术会让这些数据流更为快捷，传感器和物联网的应用范围将继续扩展，推动监控能力持续改善。

加州大学戴维斯分校的思劳特（Slaughter）说：“这将使我们在管理大型农场时能像侍弄一个后花园一样精细地看护每株作物。我们希望能够在商业规模上实现这样的操作，能以管理后花园同样的知识和精细度种植大面积的农场。”

与任何新技术革命一样，农业自动化仍有一系列问题需要解决，从降低成本到培训农场工人从事更具技术性的工作，所有这些都意味着机遇。乔达里说：“机器人技术通常涉及三个方面的内容：机构、传感器和计算机硬件、算法和软件。我们需要在这三个领域不断发展前进，制造出更好、更有用的农业机器人。”MT

2020 智能制造十大科技进展

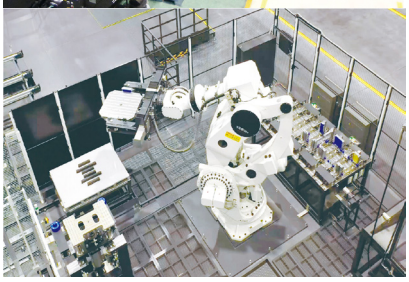
国际智能制造联盟（筹） 中国科协智能制造学会联合体

世界智能制造十大科技进展

（排名不分先后）

“Dream Site”智能工厂

Smart Factory“Dream Site”



入选理由

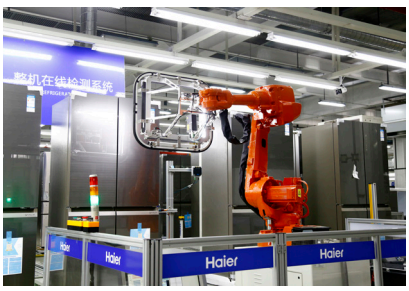
大隈株式会社“Dream Site”是“自动化和熟练技术相辅相成的未来工厂”，可连续生产高品质、高效率加工机床。完成从原材料投入到出货的全线作业，所有作业区域恒温控制，切屑自动回收，零部件加工区域的干净整洁。车间顶部的太阳能电池板可降低车间运营成本，信息物理系统提高加工准备的速度，实现连续运行。生产进度与运行监视系统实现车间的可视化。搭载防碰撞系统的智能机床，支持所有作业的生产管控，可实现多种加工方式。

关键词

智能工厂，信息物理系统，IoT，复合加工

大规模定制的未来工厂

Future Factory Plan Based on Mass Customization



入选理由

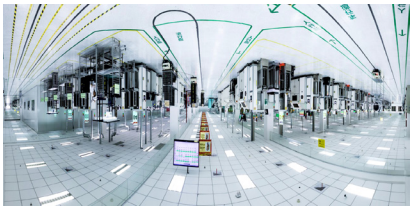
海尔实现从企业为中心向用户为中心、从大规模制造向大规模定制的转型，进行数字营销、设计、生态、制造、管理等维度实践，将生产模式和技术云化、软化，实现用户全流程的实时互联、用户和工厂的零距离。大规模定制模式在海尔内部和跨行业、跨领域进行应用和推广，推动从产品定制、开发到供应商模式、柔性生产、质量管控等方面实现变革。实践得到国际标准化组织 ISO/IEEE/IEC 的认可。

关键词

大规模定制，互联工厂，全流程实时互联

基于工业互联网平台的智能制造解决方案

Smart Manufacturing Solutions Based on Industrial Internet Platform



入选理由

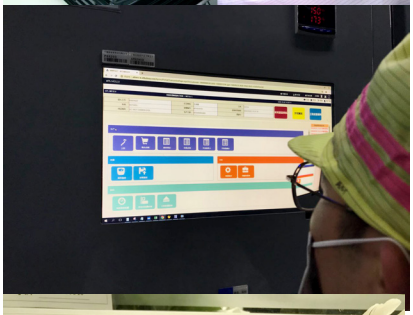
联想工业互联网平台具备开源时序数据库、低代码的开发环境，解决了多领域、多场景海量工业终端接入和数据管理问题，实现 33 家工厂工业设备的快速接入和工业数据的实时计算、分析和响应。通过 IT 和 OT 域数据整合，构建统一的数据融合和共享平台，实现面向电子行业跨全球制造资源信息共享和多工厂、多产线协同制造。基于用户行为特征的全价值链优化，支撑了百万级个性化定制需求，打造电子行业批量定制生产和上下游深度协同解决方案。

关键词

联想工业互联网平台，海量终端接入，批量定制生产，上下游协同

3C 锂离子电池制造的智能工厂

Smart Factory for Manufacture of 3C Lithium-Ion Batteries



入选理由

宁德新能源科技（ATL）的 3C 锂离子电池制造的智能工厂，通过智能制造生产线与制造运营管理平台融合，打造整体企业级的智慧制造平台。满足行业特性的前工序高保密高效率，并适应后工序高柔性的需求，可在高自动化程度下兼顾适度柔性，解决锂离子电池制造过程中的海量数据收集、存储、分析、控制的诸多难题。通过对下发数据进行系统层面的最优化参数推荐、关键参数自动校验，设备自动控制、自动产品质量检验判断、变更控制等，保障了生产的工艺质量。以拉通全业务数据价值链为基础，集成最新的精益管理、成本管理、流程控制等管理技术，实现锂电池产品性能及可靠性的提升，降低制造成本，缩短制造周期，加速新产品导入。

关键词

3C 锂离子电池，自动化，柔性，海量数据，参数推荐

根云（ROOTCLOUD）平台

ROOTCLOUD IIoT Platform

入选理由

树根互联专注构建以ABIoT（A即人工智能AI，B即区块链Blockchain，IoT即物联网能力）为核心能力的工业互联网平台。ROOTCLOUD根云平台能提供从工业设备连接，到数据管理分析，再到工业应用的端到端服务，帮助大中小型各类企业转型。目前，ROOTCLOUD根云平台已经接入各类工业设备69万台，打造了包括工程机械、环保、铸造、注塑、纺织和定制家居等在内的20个行业云平台，覆盖多个细分行业，帮助各类客户以工业互联网平台为抓手，快速搭建起智慧产品、研发、制造、服务和产业金融的创新链，带动一批上下游企业完成数字化转型。

关键词

根云平台，工业互联网平台，透明工厂

基于北斗的农机自动导航与作业精准测控关键技术

Agricultural Machinery, Automatic Navigation, and Telematic System Based on BeiDou Navigation Satellite System

入选理由

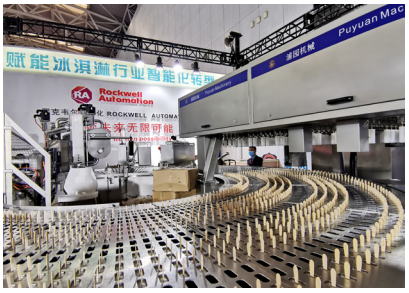
北京农业智能装备技术研究中心突破农机北斗自动导航、全程机械化作业智能监测和作业大数据云服务等关键技术，创制具有自主知识产权的电液、电机转向两类农机北斗自动导航产品，显著提升农机作业质量和效率，降低作业成本。创制了13种智能监测终端，构建了全程机械化作业智能监测技术体系。攻克广域集群农机作业多元异构数据高并发接入、大数据分析处理技术，构建基于大数据的全程机械化作业云服务平台，可提供自动导航AB线收发、作业质量分析、作业量统计、作业重漏区域检测、跨区作业检测等15项云服务，并在国内实现了业务化运行，为国家农机作业补贴政策规范高效实施提供了有效的监管技术支撑。

关键词

北斗应用，农机装备产业，农机自动导航，全程机械化作业智能监测，大数据云服务平台

智能运维解决方案 Rockii

Rockii: A Smart Operations and Maintenance System for Manufacturing



入选理由

罗克韦尔智能运维解决方案 Rockii，针对企业的业务运营和维护保障等相关领域，创新地提出了场景化的业务需求。在技术架构的选择上，从基础架构层到应用服务层，纳入了工业安全网络、边缘计算端、物联网服务的全方位可扩展性设计。除了行业通用的智能运维应用外，Rockii 的服务套餐覆盖十大行业，为不同规模的客户提供了丰富的版本选择以达到入门、标准化、能力提升等不同目标。通过在 CPG 消费品制造行业、冶金、矿山等重点行业的应用，为客户在后疫情时代的数字化转型道路提供了创新路径。

关键词

工业物联网，场景化方案，远程运维

基于 5G 的数字化转型解决方案“Connected Manufacturing”

Connected Manufacturing: 5G Digital Transformation Solution

入选理由

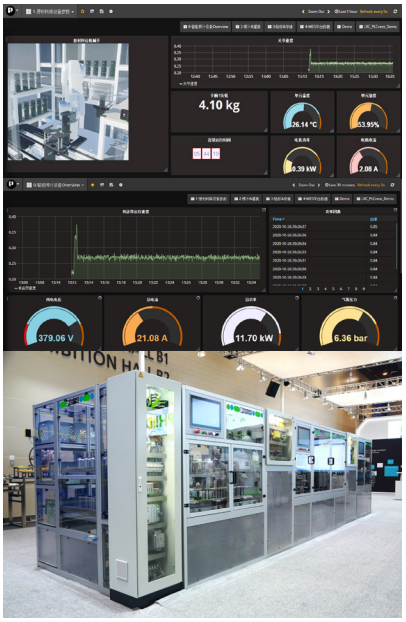
NEC 针对智能工厂建设的数字化转型提出 “Connected Manufacturing” 解决方案。“NEC DX Factory”方案利用 5G 低延时大容量的特性，实现多台 AGV 的同时控制、大规模定制物料供给的柔性化。利用 5G 超高速低延迟特性实现远程机器人操作，针对新常态提供对应、可行的工作方式。“Customer DX”方案利用 5G 技术实现企业间、企业与消费者的互联互通，从而实现全流程管理和大数据分析、需求优化并减少损耗。

关键词

数字化转型 (DX)，DX Factory，Customer DX，5G

基于 Proficloud 的云—边—端一体化协同解决方案

Cloud-Edge-Terminal Integrated Collaborative Solution Based on Proficloud



入选理由

菲尼克斯电气打造的云—边—端一体化协同平台，端侧通过对所有的电子器件升级实现更智能、高效地采集并传输信息数据。边缘侧的边缘设备搭载多语言、多算法模型对边缘组网设备进行数据分析、处理，提供更高效的动态应用服务。云端侧实现各子系统间实时数据的交流和共享，弥补传统数据采集孤立的缺陷，解决系统难以联动的问题。对非正常状况做出判断并实施预警联动，实现高效、便捷的集中式管理、降低运营成本，从数据接入、处理、应用 3 个层面提供应用与管理解决方案。

关键词

边缘计算，智能互联，数据驱动，预防性维护，集中式管理

跨行业融合技术实现未来智造

Intelligence + BIM Technology = Future of Manufacturing

入选理由

Autodesk 提出利用 BIM 技术和制造技术的融合技术能力，构建完全可配置的模型，在流程早期审阅设计并确保根据个人需求进行定制。针对生产线创建完全数字化的模型真实尝试有助于提高灵活性和效率的改变。对于高度自定义的项目，可在设计期间将产品数据插入到 BIM 环境中，系统将告知并说明可能影响匹配度或安装的建筑模型变更。更重要的是，利用高性能计算和大数据处理技术的衍生式设计，可同时为工程建设业和制造业提供自动化、智能化的辅助设计技术。

关键词

跨行业融合，BIM 技术，衍生式设计

中国智能制造十大科技进展

（排名不分先后）

数字化全成形经编装备及智能生产管理系统

Digital Fully Fashioned Warp Knitting Machines and Intelligent Production Management System

入选理由

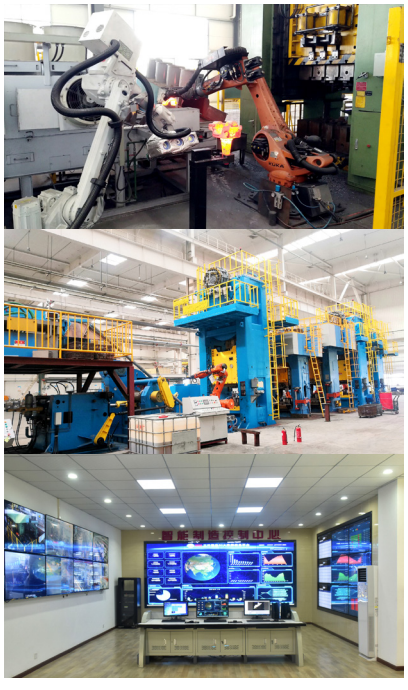
五洋纺机数字化全成形经编装备可实现纱线上机 3D 智能编织、功能纤维 / 短纤的全成形编织，创新服装一体成形“织就穿”的新生产模式。多维精协嵌入式工业大脑集成技术实现安装调试、工艺、生产、操控的远程运维和人机交互。智能生产管理系统实现订单的个性化定制和大数据全闭环智能管理。人工成本、产品不良率、能耗及运营成本大幅降低，生产效率大幅提升。为世界 30 多个国家和地区提供卫星天线、航天网格基布、家纺、毛巾、功能网具等数字化经编装备。

关键词

一体成形，全成形经编装备，针织智能生产管理

智能热模锻生产线关键技术

Development and Application of Key Technologies in Intelligent Hot Die Forging Production Lines



入选理由

华中科大、武汉新威奇、武汉惟景三维、湖北三环锻造等联合研发的集锻压、在线质量检测、热模锻 / 再制造技术与装备及生产线监控系统等的一体智能热模锻生产线。伺服直驱数控螺旋锻压技术与装备，减少传动环节；高温在线三维测量技术与装备，优化热锻模设计和锻造工艺；多材料热锻模电弧增材制造 / 再制造技术与装备，降低热锻模成本、提升热锻模使用寿命；在线监控系统帮助实现高效稳定运行。高性能精密热模锻的智能生产可整体提升热模锻生产线的年产率、精度、合格率，显著降低能源损耗。

关键词

热模锻生产线，伺服直驱数控螺旋锻压，高温在线三维测量，热锻模电弧增材制造 / 再制造

智能液压成形成套装备协同控制与运维保障关键技术

Key Technologies of Collaborative Control and Operation-and-Maintenance Support for Up-Market Intelligent Hydroforming Equipment

入选理由

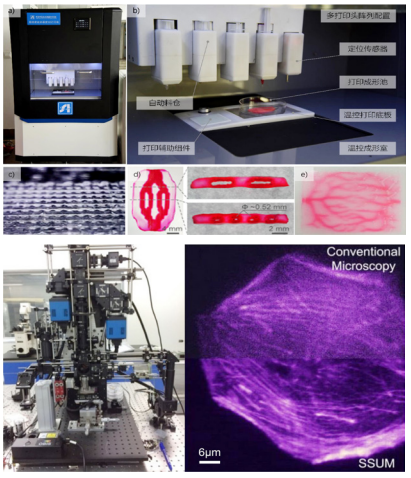
合肥合锻智能研制的新一代适应多工况需求、多品种制造、精准运维服务的系列化液压成形成套装备及服务系统，突破了液压成形成套装备精密控制技术、多并联高协同的系统优化技术。系列化精密等温锻造装备、超高强钢热冲压成形自动生产线、AT 轨根部锻造自动生产线、高速薄板冲压液压机生产线以及双动充液拉深液压装备等高端智能液压成形成套装备及运维保障系统，为高端装备关键部件成形成套装备的精准运维提供重要保障。

关键词

多工况高协同，耦合设计技术，云—边协同服务运维技术，精准运维服务

面向类生命机器人的跨尺度生物制造装备及检测关键技术

Trans-Scale Biofabrication Equipment and Detection Technologies for Bio-Syncretic Robots



入选理由

中科院沈阳自动化研究所在分子尺度层面，建立具有实时超分辨视觉反馈的纳米操控系统，实现生物大分子原位可视精确操控。在细胞尺度层面，建立高通量细胞在线检测和多细胞模块化制造组装系统，解决长期阻碍生物制造发展的细胞损伤难题。在组织尺度层面，建立梯度微环境与血管化的生命维持构建技术体系，为复杂类生命机器人及大尺度功能化组织器官稳定制造提供多工艺融合的跨尺度制造装备。成果为类生命机器人、新药开发、器官修复再造等提供了支撑。

关键词

类生命机器人，纳米操控，细胞装配，生物制造

设施农业智慧工厂化种植模式

Intelligent Factory-based Planting for Facility Agriculture

入选理由

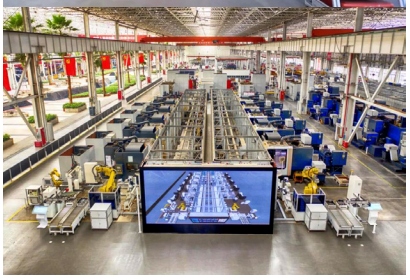
北京工业大学开发的现代设施农业智慧工厂化种植模式，从“系统设计、基础物流、关键装备”三个层次创新，实现设施农业“高投入、高产出、高收益”。建立立体种植模式下的物料单元规格及物流系统工程体系，形成单元模块、循环水肥、种植体系等标准。实现不同经济作物播种、移栽、定植、收获、物流包装等各环节的机械化作业，通过物联网等技术搭建了智能管控平台。智慧工厂化种植模式在降低农业劳动力的同时，促进叶菜、果菜、花卉、中草药等传统设施农业种植的变革。

关键词

设施农业，工厂化种植，智能装备

工程机械智能灯塔工厂

Intelligent Lighthouse Factory for Production of Construction Machinery



入选理由

三一重工 18 号智能灯塔工厂产线实现高度自动化、柔性化，控制系统全局数字化、智能化。应用 AI、大数据、IOT、数字孪生、5G、MR 等新兴技术，实现视觉管理、海量设备互联、调试智能评测等系统升级。引入多类关节机器人、重载 AGV、立库等技术，实现多品种小批量大吨位长尺寸复杂产品的无人化、少人化制造。探索“短平快”的技改管控方法，不减保供，大幅提升产能。带动百余家智能制造解决方案供应商深度协同，促进产业人才规模及结构高质量发展。

关键词

智能工厂，自动化柔性化产线，工程机械智能制造

航天电器电子元器件智能制造

Smart Manufacturing of Aerospace Electronics and Electronic Components

入选理由

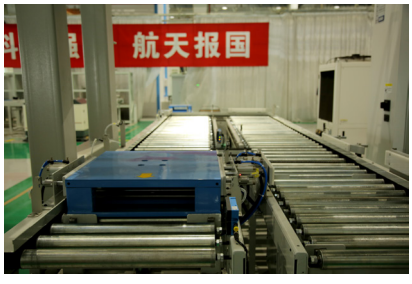
贵州航天电器推动航天电器从传统制造模式向智能制造模式转型，连接器智能生产车间突破软硬件间的壁垒，打通了产品全生命周期的数据流，实现产品从订单到交付、从研发到服务的全流程集成。虚拟仿真技术实现产线物流与智能装备虚实结合、数据实时同步。视觉检测开发技术实现微米级的尺寸检测与外观筛查。智能装备与生产运营管理系统实时数据交互，支持过万种产品自动流转、混线生产。自主研发智能产线执行和生产运营智能调度系统，实现了智能化管控由车间级向公司级延伸。

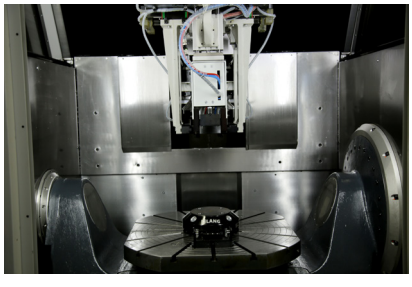
关键词

航天电器智能制造，微米级机器视觉，全流程集成

航天复杂构件多品种变批量数字化柔性生产线

Flexible, Digital Production Line for Complex Aerospace Components with Multiple Varieties and Variable Batch Sizes





入选理由

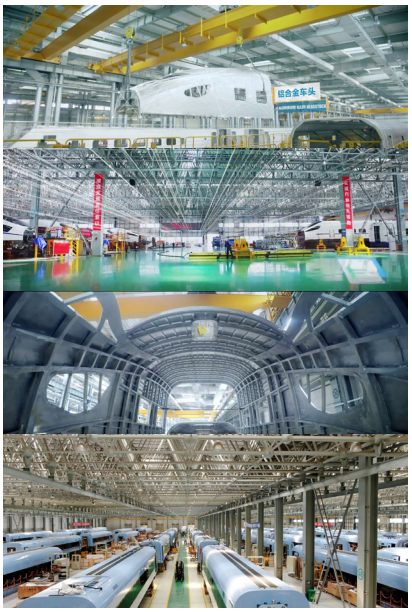
北京动力机械研究所将传统的机加工推式批量生产转变为产能平衡下的单件 / 小批量拉式生产，打造成军工产品混流、柔性、拉式数字生产线，实现生产模式的精益化与标准化。成套应用智能物流装备和集成数控生产设备，解决了工件配送协同与上下料协同等技术难题，大幅提高机床的综合使用率，实现制造过程的自动化与数字化。通过工业互联网实现人、机、料、法、环的互联互通和信息感知，将自动化生产与信息化管控深度融合，提高了资源利用效率、生产效率，保证产品质量一致性。

关键词

多品种，变批量，柔性数字生产线，自主可控

高端轨道交通装备精益化智能制造

Lean Smart Manufacturing of High-End Rail Transit Equipment



入选理由

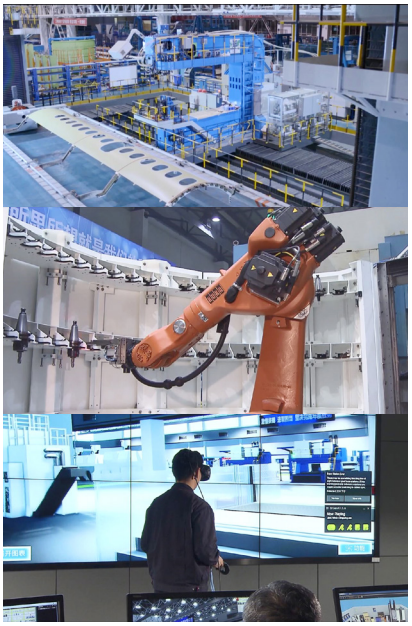
中车长春轨道客车以关键制造环节智能化为核心，以网络互联为支撑，实现制造全过程优化控制、智能调度、状态监控、质量管控的智能制造模式。持续推广至全球 5 个国家生产基地，覆盖轨道交通全车型制造及运维业务，打造可快速推广的智能制造管理范式。实现全业务链条数据贯通，大数据体系化分析。深化应用高级排程，打通供应链整体业务链条。实现生产效率、配送效率、能源利用率、一次合格率较大幅度提升，为企业实现标准化全球制造业务提供基础。

关键词

轨道交通装备，智能制造，精益运营， MPI，流程一体化，大数据体系化分析

面向复杂装备的企业级生产管控中心

Enterprise Production Control Center for Development and Production of Complex Equipment



入选理由

成飞工业集团建设的企业级生产管控中心支持企业从业务驱动管理向数据驱动管理转型。多维度多尺度生产数据分析挖掘及可视化管控平台，突破复杂装备研制生产过程的多源 / 复杂 / 异构数据挖掘及集成可视化。基于大数据分析及风险预警模型装备，研制物流智能预测 / 预警等关键技术。构建高效集成的物联感知网络实现多源异构数据融合驱动的多场景融合应用，形成关键作业过程状态感知能力、数控加工过程智能监控能力及具备自评估和权值自优化机制的智能预测 / 预警能力。

关键词

航空装备，生产管控，多维度数据分析，智能预测 / 预警

智能制造科技进展论坛在南京举行

11 月 26 日下午，智能制造科技进展论坛在南京国际博览会议中心召开。此次论坛作为世界智能制造大会的分论坛之一，由中国机械工程学会具体承办。论坛吸引全国各地从事智能制造领域的专家、学者、企业家共 120 余人参会。

会场

中国工程院主席团名誉主席、中国工程院院士周济向论坛的召开表示祝贺，并就国际智能制造联盟（筹）、中国科协智能制造学会联合体在推进我国智能制造的发展做的一些工作做了简要介绍。

南京市人大常委会主任龙翔代表南京市政府向参加论坛的嘉宾代表表示欢迎，并简要介绍了南京市在智能制造方面的发展情况。

论坛上，向入选“2020 世界智能制造十大科技进展、2020 中国智能制造十大科技进展” 的项目企业代表颁发了证书。

南京航空航天大学校长单忠德院士做了“智能制造技术与

同济大学陈明教授主持论坛

中国工程院主席团名誉主席、中国工程院院士周济致辞

南京市人大常委会主任龙翔致辞

颁发 2020 世界智能制造十大科技进展证书

颁发 2020 中国智能制造十大科技进展证书

装备赋能制造业高质量发展”报告，重点分析了美国、德国、日本和中国等九个国家制造强国指标发展情况，从规模发展、质量效益、结构优化、持续发展四个方面对比了九个国家指标情况。在论述美国、德国、日本等工业发达国家数字化、智能化制造技术与装备基础上，列举了数字化无模铸造复合成形技术与装备、筒子纱数字化柔性染色技术与装备等典型案例。指出了数字化、智能化制造的未来发展趋势与发展建议，从而推动制造业服务定制化、平台化发展，发展智能制造园区、绿色制造园区，数字化智能化网络化设计与生产制造一体化发展，不断优化制造工艺与装备，使整个制造更加优化与节能高效。创新发展智能产品和智能装备，使未来制造更加智能化、绿色化和人性化。

欧特克软件（中国）有限公司大中华区制造业战略市场总监杨博做了题为“领创未来——利用行业融合的技术实现未来智造”的报告。他认为，2020 年的新冠疫情，考验着企业的响应速度，对其工作模式、生产效率提出挑战。欧特克利用制造方法和自动化技术的融合，为客户提供更高的生产力和创新能力。在建筑业和制造业加速融合的趋势下，将产品设计、产品工程和制造专业知识与建筑设计和施工方面的专业知识相结合，为客户在产品生命周期提供竞争优势。

宁德新能源科技有限公司企业流程和信息化部门总监梅灯银做了题为“ATL 在锂电行业的数

中国工程院院士、南京航空航天大学单忠德做报告

欧特克软件（中国）有限公司大中华区制造业战略市场总监杨博做报告

宁德新能源科技有限公司企业流程和信息化部门总监梅灯银做报告

三一集团有限公司智能制造所所长饶有福做报告

合肥合锻智能制造股份有限公司严建文董事长做报告

字化转型实践”的报告。介绍了宁德新能源（简称 ATL）公司和业务模式；解读了 ATL 数字化转型蓝图和策略；分享了智慧研发转型实践和案例、智慧工艺转型实践和案例、智慧制造转型实践和案例。

三一集团有限公司智能制造所所长饶有福做了题为“创新引领、智造未来——三一智造、实践概况”的报告。报告分享了三一集团在数字化革命浪潮中的思考与 10 余年的数字化实践。三一目前业务覆盖范围将近 150 个国家，海外有四个研发基地，国内有六大工业园区，每年三一的硬性研发投入在年销售额的 5%。提出数字经济的发展，带来了工业产品的成本大幅降低。三一希望机械工程产品能逐步实现电动化、无人化和绿色化，三一和互联网企业、供应商企业共同推进机械工程领域的全局发展。同时，详解了 18 号灯塔工厂的智能制造探索，展望未来转型方向。在人才培养方面，致力于建立好的人才发展环境，让人才乐于投身机械工程领域。

高端论坛

合肥合锻智能制造股份有限公司严建文董事长做了“高端智能液压成形成套装备协同控制与运维保障关键技术”，分享了合肥合锻智能成功研制的新一代适应多工况需求、多品种制造、精准运维服务的系列化液压成形成套装备及服务系统，及其在航空航天装备、大型石化装备、轨道交通与汽车装备等高端制造领域的应用实践。提出新材料技术、制造技术和新一代信息技术间的交叉融合，将使得液压成形成套装备呈现出工况多元化、装备协同化、服务智能化的发展趋势。

论坛最后，同济大学陈明教授邀请加拿大工程院院士、华中科技大学教授沈卫明、论坛报告人严建文、杨博、梅灯银和饶有福带来了一场生动的高端对话，围绕智能制造的发展趋势、实施智能制造的成功经验和应用成效、后疫情时代智能制造的机遇和挑战展开了思想的交流与碰撞，为大家今后从事智能制造工作提供非常有意义的借鉴与参考。MT

2020 年中国机械工程学会年会在杭州举行

11 月 15 日上午，2020 年中国机械工程学会年会主旨报告会在杭州举行。年会开幕式由中国机械工程学会常务副理事长张彦敏主持，参加开幕式的领导和嘉宾有：中国机械工程学会理事长、华中科技大学原校长李培根院士，浙江省政协副主席陈小平，浙江省委委员、浙江工业大学党委书记蔡袁强，浙江省科协秘书长谢牧人，中国机械工程学会副理事长、大连理工大学校长郭东明院士，中国机械工程学会副理事长、上海交通大学校长林忠钦院士，中国机械工程学会副理事长、清华大学副校长尤政院士，中国机械工程学会副理事长、原国家质量监督检验检疫总局副局长陈钢，中国机械工程学会副理事长，国机集团党委常委、副总经理、总工程师陈学东院士，中国机械工程学会副理事长，陕西省科协主席，西安交通大学教授蒋庄德院士，中国机械工程学会副理事长、浙江大学教授谭建荣院士，中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明研究员，中国机械工程学会副监事长包起帆。

参加本次年会各项活动的还有机械工程领域的两院院士、著名专家、杰出学者和中国机械工程学会第十一届理事会理事以及各专业分会、省区市机械工程学会负责同志、学会会员、科技工作者等，共计 1000 余人。

中国机械工程学会常务副理事长张彦敏主持年会开幕式

年会会场

全体与会人员唱国歌

中国机械工程学会理事长李培根院士致辞

浙江省委委员、浙江工业大学党委书记蔡袁强致辞

浙江省科协秘书长谢牧人致辞

年会开幕式举行了庄严的奏唱国歌仪式，全体与会人员面向国旗，行注目礼。

中国机械工程学会理事长李培根院士致开幕辞，他代表中国机械工程学会向前来参加年会的全国机械行业的科技工作者表示欢迎，提到了我国在战胜疫情过程中科技力量以及广大科技工作者所起到的至关重要的作用，希望广大会员和科技工作者以学会宗旨“联络机械工程同志、研究机械工程学术、发展机械工程事业”为指引，共同担负起学术共同体的责任和使命，守正创新，同奋进，共担当，共同谱写机械工程事业新篇章。致辞最后，李培根向浙江省科协、浙江工业大学以及其他为此次会议的顺利召开付出辛勤努力的组织和个人表示衷心感谢。

浙江省委委员、浙江工业大学党委书记蔡袁强、浙江省科协秘书长谢牧人、浙江省政协副主席陈小平先后致辞，欢迎全国各地机械行业科技工作来杭州参加机械行业的盛会，也希望参加中国机械工程学会年会的院士、专家能为浙江传经送宝，为浙江制造业的发展带来新思路、新经验、新智慧、新办法。

成果发布环节，中国机械工程学会副理事长、机械工程高质量科技期刊分级目录审定委员会主任陈学东院士发布了《机械工程领域高质量科技期刊分级目录》（以下简称《目录》）。《目录》是为了深入贯彻落实中国科协、中宣部、教育部、科技部《关于深化改革培育世界一流科技期刊的意见》，推动中外科技期刊同质等效，吸引高水平论文在中国科技期刊首发，服务国家创新驱动发展战略，根据中国科协统一部署，中国机械工程学会承担了机械工程领域高质量科技期刊分级目录发布工作。《目录》包含我国机械工程领域的 49 种期刊，

浙江省政协副主席陈小平致辞

陈学东院士发布《机械工程领域高质量科技期刊分级目录》

蒋庄德院士发布“2020 年机械工程重大科学问题和工程技术难题”

“中国机械工程学会高端学术著作出版计划”签约仪式

中国机械工程数字博物馆启动仪式

分为T1级（6种）、T2级（18种）、T3级（25种）。

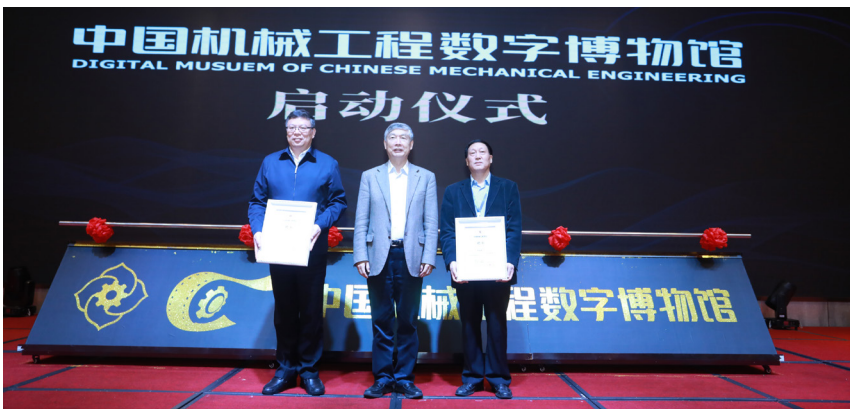
中国机械工程学会副理事长、学术工作委员会主任委员蒋庄德院士发布了“2020年机械工程重大科学问题和工程技术难题”，共5个重大科学问题和5个工程技术难题。

随后，中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明代表学会、机械工业出版社社长李奇代表出版社，签署了“中国机械工程学会高端学术著作出版计划”的合作协议，旨在助力机械工程发展，更好地服务制造强国建设，繁荣机械出版事业。

开幕式最后，举行了中国机械工程数字博物馆启动仪式，由李培根、林忠钦、尤政、郭东明、谭建荣、陈学东、蒋庄德、陈钢、陆大明、张柏春共同推杆启动“机械工程数字博物馆”，并由李培根理事长向馆长尤政、执行馆长张柏春颁发了聘书。未来，学会将组织开展机械工业遗产认定、机械科技人物事迹和科技成果采集等工作，把博物馆打造成展示我国机械科技领域成果、展示科技工作者风貌的高质量平台。

主旨报告会由林忠钦院士主持，分别由尤政院士，中国机械工程学会常务理事、浙江大学机械工程学院院长、中国工程院院士杨华勇，中国机械工程学会常务理事、中国科学院自然科学史研究所所长张柏春做学术报告。

尤政院士的报告题目是“智能微系统技术”。报告重点介绍了微系统的特点、国内外研究进展及其应用。以微机电系统（MEMS）为代表的微系统技术集约了当今科技发展的诸多尖端成果，具有高集成度、高性能、高可靠、体积小、功耗低、可批量生产等优点，是继微电子之后又一个对国民经济和国防军事具有重要影响的军民两用的颠覆性技术，除在装备信息化、智能化方面起着不可或缺的作用外，在面向物联网、汽车电子、工业控制、健康医疗、消费电子等重点行业领域也有广阔的应用前景。智能微系统技术是引领未来的战略性技术——智能技术的重要组成部分，将推动人类社会进入智能化时代，从系统角度出发，它融合微电子、微光子、MEMS、架构、算法五大要素，采用新的设计思想、设计方法、制造方法，在微纳尺度上，通过3D异质/异构集成手段，可以实现具备信号感



颁发“中国机械工程数字博物馆”馆长、执行馆长聘书

林忠钦院士主持主旨报告会

尤政院士做报告

杨华勇院士做报告

张柏春所长做报告

知、信号处理、信令执行和赋能等多功能集成的微型化系统。基础是微电子、光电子、MEMS 等先进芯片技术；核心是体系架构和算法。

杨华勇院士的报告题目是“智能制造的一些探索与实践”。他谈到，智能制造是结合现代信息技术如人工智能、区块链、云计算、大数据、边缘计算、5G、物联网等，驱动制造业转型升级，通过打通人—机—物连接和数据、模型、交互、优化控制，赋能传统工业。智能制造的主要目标是生产过程的实时感知和生产资源的高效配置，其中最核心的是数据。面对工业场景中的海量数据，开发了数据中枢系统，包含工业数据集成与管理、混合建模计算、智能算法工具等三大基础模块，实现工业大数据的高效分析。从几个案例分享和商飞大脑的建设经验中可以看到，智能制造的实践正在由点及面逐步深化，从局部技术应用创新逐渐向更深层次的智慧经营模式创新和产业新价值增长方面扩展。综合各种场景和技术，以及一些智能制造探索实践，希望打造以数据为核心的新一代工厂大脑平台，实现制造企业的全域感知、全局协同、全线智能，让智能制造更敏捷、更柔性、更智能，向自主、实时制造单元演进。

张柏春所长的报告题目是“保护工业遗产 传承技术文化”。他认为，工业遗产见证了人类的生产和生活，承载着工业文明和科技创造，具有重要的历史、科技、社会和文化等价值。随着我国经济的转型发展和产业结构的升级，许多退出经营的工厂及其设备等成为具有开发潜力的遗产资源。我们须有选择地保护价值较高的工业文物和遗迹，而且合理地进行利用或再设计，使其具有新的使用功能和价值，并且与城市或社区发展相融合，甚至催生创意产业。中国机械工程学会可以首先梳理我国机械工业既有遗存和正在使用的设备和设施等，估量它们在工业史和技术史上的历史地位和各种价值，将具有里程碑意义的产品、机器设备、建筑物、厂区等评选为机械工业遗产，根据遗产保护政策，妥善加以保护、利用和必要的再开发。这样，我们就可以理清和珍视自己的行业传统，讲好前辈创新创业的故事，弘扬科学精神和工匠精神，传承技术文化，坚定创新自信和文化自信。

年会期间还召开了大师讲堂及机械工程青年精英论坛、2020 年绿色制造发展论坛暨绿色制造青年论坛、机械史与机械工业遗产学术研讨会、极端制造分会第一届学术年会暨第二届极端制造高峰论坛、新媒体环境下科技传播暨“我是工程师”科普丛书智享会、绿色制造丛书编委会第二次会议、2020 年中国机械工程学会期刊工作研讨会、液压泵新技术与发展趋势学术论坛等其他活动、科技经济融合服务余杭专题调研等丰富多彩的专题活动。MT

关于征集《机械工程导报》编委的通知

各位会员、专业分会、省区市机械工程学会：

《机械工程导报》（双月刊，以下简称《导报》）前身是《中国机械工程学会会讯》，创刊于 1998 年，已出版 210 期。《导报》是我会为会员提供的专属服务产品，以内部资料的形式，主要面向我会个人会员、单位会员、专业分会、省区市机械工程学会，以及工信部、工程院、国家发改委、中国科协等党政管理部门发放。

为加强学会与会员以及会员间的联系沟通，更好的服务于会员，为会员提供求真探索的交流园地，服务于机械工程发展，《导报》决定面向我会各类会员以及学会各级组织征集编委会成员，通过参与栏目策划、稿件组织，汇聚最新研究成果，提高专题专栏内容质量，广泛传播会员在工作中取得的新知心得，打造一本共建、共享、共荣的会员专刊。

好风凭借力，送我上青云。真诚欢迎热爱机械工程事业、热心学会公益事业、学有专长且时间允许的广大会员和科技工作者加入到编委会的队伍中，我会也将为每一位编委提供必要的条件支持。

联系人：钟永刚 010-68799036 zhongyg@cmes.org

栾大凯 010-68799008 luandk@cmes.org

附件：《机械工程导报》编委会委员登记表

中国机械工程学会

2020 年 12 月 18 日

《机械工程导报》编委信息登记表

姓　名		会员编号	
手　机		Email	
愿意担任哪些职务（选择）	☐专题主编　☐编委　☐专栏主编　☐专栏编委		
对《机械工程导报》内容的建议	（扫描二维码填表）		

（附件表格也可在学会网站 www.cmes.org 下载）

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

CMES 中国机械工程学会 | 焊接学会 CMES | CWA 焊接设备分会 | DVS German Welding Society | MESSE ESSEN Place of Events

www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com