

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<https://www.cmes.org>

2021 年第 1 期 总第 212 期

物理生命体——漫话数字时代的智能装备 p01

仓储物流技术发展趋势分析 p07

机械工程学科发展报告（机械制造）概述 p17

芯片竞赛：怎样不被别人踢掉梯子 p23

生物医学设备：4D 打印的新兴前景 p30

目 录

CONTENTS



机械工程导报 MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2021 年第 1 期 (总第 212 期)
2021 年 2 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



院士专稿 FEATURE FROM ACADEMICIAN

物理生命体——漫话数字时代的智能装备 1



专家视点 EXPERT OPINION

仓储物流技术发展趋势分析 7



热点关注 CURRENT POINT

机械工程学科发展报告(机械制造)概述 17

芯片竞赛: 怎样不被别人踢掉梯子 23

生物学设备: 4D 打印的新兴前景 30



学会资讯 CMES INFORMATION

中国机械工程学会 2021 年部分活动时间表 37

物理生命体

——漫话数字时代的智能装备*



华中科技大学 李培根

工业 4.0 的核心理念乃 CPS (cyber-physics system, 信息物理系统), 它为我们展现了一个数字与物理世界深度融合的新工业时代。

这个时代正在到来, 甚至已经来临。迥异的事物之间可以在很大程度上融合在一起。生命和机器(装置)可以共融, 人机协同乃至人机共融是未来工程中重要的发展趋势; 某些物理装置可以更好地融合在人体中(如可穿戴设备、因为健康原因植入人体内部的物理器件); 即便是未能真正物理地融入人体的某些装置实际上已经成为人的存在的一部分, 比如, 有人就认为手机实际上已经成为“我之为我”的一部

分; 人们正在期待脑机接口可以大大增强人的功能。各异的事物或性质之间的界限变得越来越模糊。长久以来, 机器是人类的工具, 在人和机器构成的系统中, 人是主, 机器是从。今天我们已经能够看到某些带有虚拟现实(VR)、增强现实(AR)或混合现实(MR)的智能系统指挥人进行操作。在这样的人机系统中, 很难说人是“主”, 机器(或智能系统)是“从”, “主”和“从”的界限变得模糊了, 充其量是主从身份的融合。由于 AR、MR 技术的应用, 很多场景中“虚”和“实”的界限也变得模糊了, 在辅以 AR、MR 系统的装配或维修环境中即是如此。

无论数字智能技术多么重要, 无论人们如何重视“数字经济”, 可是人们的生活世界和工业世界永远离不开那些给人类带来各种便利的人造物——物理实体(物理产品、装备等)。这也就是为什么当数字经济以排山倒海之势滚滚而来时, 有识之士却告诫我们实体经济依然是最根本的。当然, 实体经济相关的产业一定要面向数字—智能时代, 热情接受数字经济的拥抱。工业界, 尤其是与实体经济关联最紧的制造业, 首先需要思索的是: 数字—智能时代的物理实体(尤其是物理装备)究竟应该怎样存在?

数字—智能时代的物理产品较之传统物理实体的产品应该具

注: 本文来源于“智造苑”公众号, 获得授权转载。

有特别的“生命力”，不妨把在其全生命周期中伴随有数字模型的、具有一定的自感知和“意识”能力的物理产品称为“物理生命体”。此“生命体”当然与自然的生命无关，只不过相对于传统的物理实体而言。

一、生命力呈现

数字—智能时代的物理产品——物理生命体，其生命力的表现首先在于其感知环境的能力。一个扫地机器人就能够感知房间的障碍物。应该说，对环境的感知能力还只是物理生命体的必要条件，而非充分条件。现在很多扫地机器人虽冠以“智能”，还不是真正意义上的“物理生命体”。物理生命体的生命力呈现也在于对自身状态的自感知能力，一个智能机床能够感知自身的某些状态，如振动、热变形等。智能装备应该通过自身的某些状态数据（如振动、位移、温度等）而感知自身的工作状态是否正常，是否需要运行维护。

数字—智能时代的智能装备（物理生命体）应该具有自适应能力，它能够动态地适应环境的变化。有的智能机床能够自动补偿因部件运动产生的热量和室内环境温度变化而产生的定位误差。如Mazak的“智能热屏障”技术，对主轴热位移进行精确的预报，实现高精度主轴的膨胀和

收缩补偿。一些风力发电设备的俯仰系统能够迅速调整叶片角度，容许不同的转速。风速较低的时候可以得到更高的能量，根据现有风况不断调整至最佳角度，必要时也可快速停止转动。

生命力也表现在与“伙伴”互联协同的能力。农田中工作的不同类型的农业机械（如拖拉机、联合收割机……）之间能够有信息交流；工地上不同类型的工程机械（如装载机、挖掘机……）之间存在信息互联，以使装备工作在整体或系统优化的环境。

自学习能力也是物理生命体的典型能力。一个智能注塑机在其加工实践中能够不断总结经验，通过对不同类型零件的工艺参数及其相应效果的加工大数据进行分析，使其自身变得越来越聪明。

二、因何而“生命”？

到底物理生命体因何而生命？传感器、自动执行器虽然是必不可少的，但真正使一个物理实体具有“生命力”的，乃“数字孪生体”所致。某种意义上数字孪生体即物理生命体的魂之所在。

数字孪生体又具有哪些主要功能——因之使物理实体而“生命”？

数字孪生模型当然包括物理生命体的三维结构模型，但它显

然不是物理生命体的要点。下面是赋予物理实体“生命”的几个要素。

1. 多领域物理建模

孪生模型应该反映物理产品内在的运行规律。对自身全生命周期内的状态和“生命”运动规律的的认识，也就是物理生命体“自我意识”的表现。复杂机电系统往往是多领域物理（机—电—液—热—磁—控等）综合集成系统，传统的产品开发方式是各领域设计者分别设计其相对独立的部分，然后综合。设计过程中虽有总体考虑，且相互讨论协商，但终究难以掌握系统各部分耦合的复杂情况。因此，需要基于多领域知识、面向多学科协同优化的新一代数字化设计方法与技术以及面向复杂机电系统产品的多领域建模与仿真软件和工具。产品的数字孪生模型中可能含有反映产品不同物理特性的模型，如计算流体动力学模型、结构动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳损伤模型以及材料状态演化模型（如材料的刚度、强度、疲劳强度演化）等。如何将这基于不同物理属性的模型关联在一起，是建立数字孪生，继而充分发挥数字孪生模拟、诊断、预测和控制作用的关键。如构建激光加工装备的数字孪生模型，就应该深入到光与物质相

互作用的机理。如果孪生模型具有包含功率/光谱/力/热分布等耦合物理量的全过程仿真能力,这样的激光加工装备自然具备很强的“自我意识”,也就能保证更好的加工性能。

2. 仿真

数字化模型的仿真技术是创建和运行数字孪生体、保证数字孪生体与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。仿真是将包含了确定性规律和完整机理的模型转化成软件的方式来模拟物理世界的一种技术。只要模型正确,并拥有了完整的输入信息和环境数据,就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。

3. 优化

数字孪生模型的优化能力是物理产品的智能之重要表现。如一条流程工业中的生产线,在其生产过程中实现自感知、自决策、自执行,包括生产过程中参数的最优控制等。其优化手段不仅包括经典和现代的优化控制技术,甚至还可以融入大数据和人工智能技术。

设计过程中往往更需要优化技术,应用于产品开发设计过程中的数字孪生模型自然应该具有优化能力。拓扑优化设计(topology optimization

design)的基本思想是利用有限元技术、数值计算和优化算法,在给定的设计空间内,寻求满足各种约束条件(如应力、位移、频率和重量等),使目标函数(刚度、重量等)达到最优的孔洞连通形式或材料布局,即最优结构拓扑;多学科优化设计(multidisciplinary design optimization, MDO)是一种旨在解决大规模复杂工程系统设计过程中多个学科耦合和权衡问题的一种新的设计方法。它充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制,考虑各个学科之间的相互作用,从整个系统的角度优化设计复杂的工程系统。

4. 基于数据和案例的学习能力

物理生命体的智能应该具有学习能力。有的学习方式建立在基于案例的推理(case-based reasoning)能力,如前面提到的智能注塑机的自学习能力。数字—智能时代最好的学习方式还体现在从数据中发现潜藏的规律。一个复杂的机电系统中很多相互关联的因素往往连领域专家们也难以意识到,基于大数据的深度学习方法能够发现那些潜藏的关联。总之,具有学习能力的孪生模型能够使物理装备变得越来越聪明,也是物理生命体最重要的“自我意识”。

5. 基于模型的系统工程(MBSE)

孪生模型的构建当然需要从系统出发,其构建过程应该是基于模型的系统工程。模型特指描述待研究对象的一种形象化的表达方法:把对象特性抽取出来,使用标准化的表达方式进行描述,从而能够进行进一步研究。传统的系统工程是“基于文本的系统工程”(text-based systems engineering, TSE),而MBSE是建模方法的形式化应用,以使建模方法支持设计开发乃至全生命周期阶段,或曰在产品的孕育及服役的全生命周期。在具体实现上,国际系统工程协会(INCOSE, International Council on Systems Engineering)联合对象管理组织(OMG)在统一建模语言(unified modeling language, UML)的基础上,开发出了适宜于描述工程系统的系统建模语言(system modeling language, SysML),软件提供商也开发了相应的支持SysML的工具,并且把SysML的建模工具和已有的专业分析软件如FEA、CAD等进行了集成,提出了MBSE的整体解决方案。MBSE下系统模型成为各专业学科模型的集线器。各专业学科模型已经被大量应用于工程设计的各个方面,但模型缺乏统一的编码,也无法

共享。建模工作仍处于“烟囱式”的信息传递模式，形成了一个的“模型孤岛”，没有与系统工程工作流良好结合。在MBSE下，系统模型成了各学科模型的“集线器”，各方人员围绕系统模型开展需求分析、系统设计、仿真等工作，便于工程团队的协同工作。这就使整个设计团队可以更好地利用各专业学科在模型、软件工具上的先进成果。^[1]可以想见，在MBSE方法和工具下开发的物理装备更具“生命力”。

三、“生命”的过程

一个装备在其运行过程中的动态无疑决定了它的性能与质量。通常工程师们只能凭对动态的有限认知在设计开发阶段有所考虑，但更多地其实是用静态的知性实体思维去考察装备的存在。哲学家们早已认识到普通人思维的弊端。黑格尔把世界理解为一种未完成的流动性存在，没有任何不变的本质，一切都处于永恒的变化过程中；海德格尔认为，传统哲学思维方式就是将一切“存在”都对象化为固定的、僵死的东西，所以他看待存在的本真面目，则从静态视角转向动态。^[2]装备的设计与使用非常需要这种思维。过去，装备的设计者和使用者即使有这种意识，但苦于手段的限制也难有作为。在数字—智能时代，数字孪生使人

们有可能从动态的视角透视装备的全生命周期。

物理生命体的数字孪生，其“孪生”意义主要在于“生命”的孪生，也即“生命”过程的孪生，而几何及运动学意义上的数字孪生是次要的。正如从医学角度看，人体的数字孪生主要不是一个人的外貌和身体动作的孪生，而是反映人的健康体征的各种指标（如血压、血糖、血脂、呼吸、心跳……）变化过程的孪生。对于一个物理装备而言，数字孪生模型对装备“生命”过程的呈现一般发生在装备的孕育（产品设计开发）或服役阶段。

好的装备设计应该是基于对其工艺过程深刻认识的基础上。因此，为了设计高性能的装备，往往需要对装备运行的物理过程进行仿真。如激光加工设备的设计，就可以考虑建立激光与材料相互作用过程的数字孪生模型，通过仿真对激光材料加工过程有更深刻的认识，如此“孕育”出的装备一定有更好的性能。装备的此种数字孪生本质上是装备运行物理过程的数字孪生。

装备服役过程中通过实时采集运行过程中的数据（孪生数据，包括环境数据）而建立的数字孪生模型是装备这一“物理生命体”自我意识、自适应环境变化的关键。对运行过程中孪生数据的处理和分析使装备系统能感知自身工作状态和健康状态，进而进行

相应的控制或运行维护。

“生命”的过程总是在特定的环境中存在的。如风电装备的运行过程与风场环境紧密相关，因此风电设备的孪生数据理应包括风场的数据；车间装备的节能和加工精度显然与温度环境有关，因此车间装备的孪生数据理应包括车间温度环境乃至天气的相关数据。

“生命”的过程往往与伙伴联系在一起，如一个拖拉机的运行可能同时与其他的拖拉机以及收割机、旋耕机等联系在一起，那么拖拉机的孪生数据就应该包括反映与伙伴设备工作联系的某些数据。

“生命”的过程与装备服务的对象联系在一起，如一个手术机器人，其孪生数据理应包括病人在手术过程中的相关数据。

“生命”的过程与装备的操作者或使用者的行为联系在一起。如在一台挖掘机的运行中，其孪生数据包括挖掘机操作者的操作数据，通过孪生模型进行仿真，可告知操作者如何改进操作有可能提高工作效率或节能；手术机器人的孪生数据收集应该包括医生的操作数据，同样通过孪生模型的仿真使医生优化其操作机器的过程。有些情况下（如运行操作、维护维修）记录使用者的操作数据，对其操作进行轨迹跟踪，藉此建立的数字孪生模型还有特别的用途。通过对同类型

的物理装备但不同操作者的孪生数据进行大数据分析,能够发现,怎样的操作才是最优的,从而进一步规范操作。好的数字孪生模型不仅能够沉淀人的经验,而且有可能衍生、演化出最优的路径。

“生命”的过程数据不仅包括装备运行过程的数据,还包括在“孕育”过程(设计、制造以及装配过程)中的数据,它为物理装备“生命”的过程留下了痕迹。“孕育”过程中的历史数据使人们有可能追溯产品的质量问题的。

通过对装备全生命周期过程历史数据的分析,有可能发现某些人们原来并未意识到的关联,从而可指导装备的改进设计甚至创新。

既然数字孪生的意义在于“生命”过程的孪生,“数字孪生体”就被时间规定,这是以前的数字样机或虚拟样机等数字模型完全不具备的特性。物理生命体所有的活动和“存在”都具有时间性,犹如海德格尔言“此在”的时间性。海德格尔还认为存在的本性是“去存在”(to be)。^[2]数字孪生作为一种数字存在,它是物理生命体的魂,它自然会关注装备下一刻的状态,未来的状态演化。这也是物理生命体的“思”之所在。

总之,数字孪生的意义本来就不是基于处理静态问题。装备的运行过程都是动态的,只有在

对动态过程更深刻认识的基础上并施与相应控制或维护,其“生命”的意义才更美好。这才是物理装备真正需要的。

四. “生命”的语言

“语言才是人的主人”。^[3]不是人有语言,人构成或操作语言,而是言谈、语言本身此刻现身为人的。“语言就是存在之家,就是为存在所居有并且由存在来贯通和安排的存在之家”。语言不为人所拥有,语言为存在所拥有,语言聚集着存在,显现着存在。^[4]把语言视为人的主人,大概因为语言伴随着“思”,而“思”则体现着存在。再看看物理生命体的存在——孪生数字是否可以视为一种语言?它是否真正是物理生命体的主人?的确,真正的数字孪生模型是物理装备自我意识的体现。海德格尔的哲学中有“此在”的概念,意指人。“这种存在者,就是我们自己向来所是的存在者,就是除了其他可能的存在方式以外还能够对存在发问的存在者。”^[5]传统的物理装备没有能力对自身的存在“发问”,它对自身过去、现在及未来的存在都缺乏理解。而数字——智能时代的含有数字孪生体的物理装备(物理生命体)则大不一样。在某种意义上,数字孪生体不仅能够对自身的存在“发问”,而且能够比它的创造者——人更

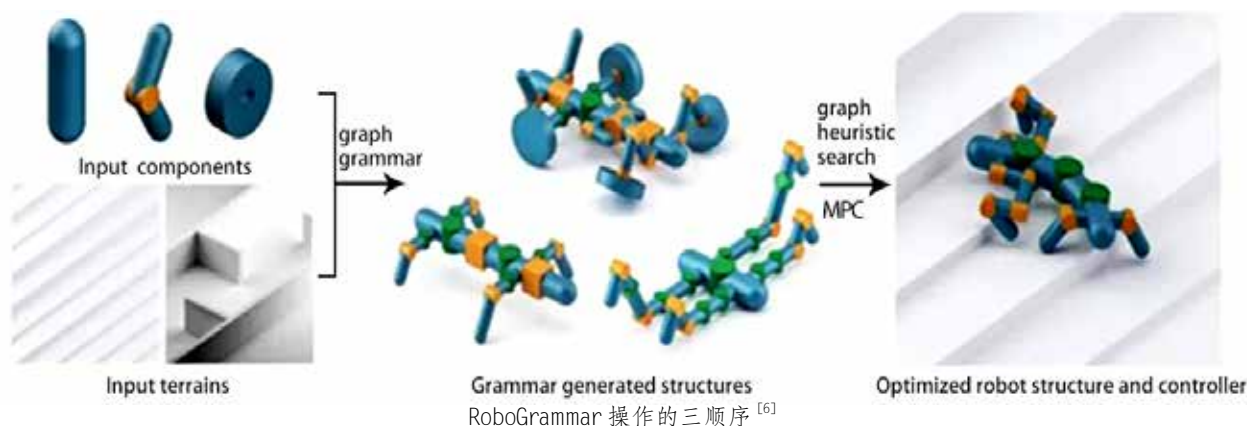
能对物理生命体(物理装备)的存在“发问”!也就是说,物理装备的数字孪生体比装备的设计者和使用者更深刻地认识装备。我们有理由认为,数字孪生模型便是“发问”的语言。

今天的数字孪生模型大多停留在对物理生命体自身状态的认识和简单的控制,人们完全可以期待未来的融入某种智能工具之数字孪生模型可能具有创造能力。

美国 MIT 的科学家 Allan Zhao 等为机器人的设计提出了机器人语法 RoboGrammar,被称为 25 年来的最高成就!

RoboGrammar 的操作分为三个顺序:定义问题;制定可能的机器人解决方案;选择最佳模型,如下页图所示。通过这些步骤,RoboGrammar 可以设计数十万个潜在的机器人结构。可以看到,它不是常规的辅助设计,而是辅助甚至提供创意。只要人提出需求,它便会提供最完美合适的机器人形状。^[6]

RoboGrammar 中包含的“图形语法(GraphGrammar)”是对机器人组件排列的一系列约束。例如,相邻的支腿应该用一个关节连接,而不是用另一个支腿相连。这样的规则确保至少设计是在初级水平上,每个计算机生成的设计作品都是可以工作的。图形语法规则基于节肢动物的启发,例如昆虫、蜘蛛和龙虾等。



Zhao 声称,“启发式功能会随着时间的推移而提高,并且将搜索收敛到最佳机器人。”

由 Zhao 等人的工作可以联想,未来含有智能工具的数字孪生模型不仅能够为产品的开发提供创意,也将使物理产品或装备在其运行中真正能够自主地做出创造性的工作,即可能做出超越人类期望值的工作。

显然,RoboGrammar 或 GraphGrammar 就是一种语言,一种真正体现智能的、一种真正“聚集着存在”(聚集着潜在的最优机器人形状的存在)的语言。

构建数字孪生体,就应该使数字孪生真正成为一种语言,一种决定物理装备真正“存在”的语言,一种使物理装备具有自我意识的语言,一种真正使物理装

备成为物理“生命体”的语言。既把它视为“语言”,就需要进一步的规范定义,从而方便数字孪生体的构建。

装备制造业的研发者,一方面需要在滚滚而来的数字经济大潮中睁大眼睛看着装备的物理世界,另一方面则需要在装备的物理世界中冥想那个孪生的世界。**MT**

参考文献:

- [1] 陈红涛,等. 基于模型的系统工程的基本原理 [J]. 中国航天, 2016 (3).
- [2] 闫顺利, 敦鹏. 存在过程论与过程哲学的对话—海德格尔和怀特海的过程观比较 [J]. 昆明理工大学学报: 社会科学版, 2009(2).
- [3] 海德格尔. 演讲与论文集 [M]. 孙周兴, 译. 上海: 三联书店, 2005: 153.
- [4] 海德格尔. 路标 [M]. 孙周兴, 译. 北京: 商务印书馆, 2000: 370, 392.
- [5] 海德格尔. 存在与时间 [M]. 陈嘉映, 王庆节, 译. 上海: 三联书店: 2006: 9.
- [6] ZHAO A, et al. RoboGrammar: Graph Grammar for Terrain-Optimized Robot Design[J]. ACM Trans. Graph., 2020, 39(6).

仓储物流技术发展趋势分析 *



同济大学 房殿军

摘要：仓储物流技术是企业建立先进合理的仓储物流系统的关键，而市场需求和科技进步共同推动了全球仓储物流技术的快速发展。本文作者基于 30 多年的行业观察与实践经验，概括总结了仓储物流技术六大发展趋势——从自动化到高柔性自动化、高密度化、拣选作业的无纸化与自动化、数字化与网络化、透明化和可预测性、智能化，并对其特点进行了深入分析。

随着工业 4.0 发展，产品定制与个性化服务已逐渐成为市场发展的重要趋势，这对现代物流系统提出了更高要求。仓储物流系统（Warehousing Logistics Systems）作为物流与供应链的核心环节，其作业效率、服务质量和运营成本一直是企业重点关注的指标。高效合理的仓储物流系统可以帮助企业加快物资流动

的速度，降低成本，保障生产顺利进行，并可以实现对资源的有效控制和管理。现代“仓储”已经不是传统意义上的“仓库”、“仓库管理”，而是在经济全球化与供应链一体化背景下的仓储，是以满足供应链上下游需求为目的，在特定的有形或无形场所，运用现代技术对物品进出、库存、分拣、包装、配送及其信

息进行有效计划、执行和控制的物流活动。显然，仓储物流技术（Warehousing Logistics Technologies）是企业建立先进合理仓储物流系统的关键。

仓储物流技术正在经历从机械化到自动化，乃至智能化的发展阶段，本文就其发展趋势的六大特点进行系统分析与总结，同时也为物流装备企业及用户的相

注：本文原载于《物流技术与应用》2020 年第 6 期，本刊获得授权转载。

关物流活动提供借鉴。

一、从自动化到高柔性自动化

随着工业社会不断进步,仓储物流技术也逐渐由人工堆放平面库,到自动化刚性立体库,再到高柔性自动立体库发展。在1917年首台叉车发明之前,仓储物流运作一直处于手工作业状态。叉车技术让仓储系统进入了机械化立体库时代,库房的空间利用率得到了极大提升,同时保留了高柔性的特点。1962年,世界首座基于堆垛机技术的自动化立体库出现,此后该技术进入了长达半个多世纪的高速发展阶段。无人、高效和空间利用率高等优点,使自动化立体库逐步成为制造业和商业推崇的最佳仓储解决方案。然而传统自动化立体

库具有刚性高的短板,很难满足灵活多变的物流服务的需求,第三方物流服务公司一般不采用这项自动化仓储技术。尽管早在1980年德国就开始研发高柔性的自动化“卫星车”(子母车)技术,但受控制技术和算法的限制,效率和柔性的博弈持续多年,使其一直没有达到与传统自动化立体库抗衡的水平。

2003年世界首台穿梭车技术(Multishuttle)的面世,让仓储物流技术真正进入高柔性自动化时代。穿梭车打破了一个巷道内只能有一台堆垛机作业的限制,实现了多台穿梭车分层作业的柔性解决方案。随着穿梭车技术的发展,四向穿梭车(4-direction shuttle)技术成为主流。“四向”指的是穿梭车可以自主完成“前后左右”的运行。四向穿梭车配备两套轮系,分别完成 X 方向和

Y 方向的运动,既可以实现在巷道内的出入库作业,又可以实现在同一层的不同巷道切换。在垂直方向(Z 方向),四向穿梭车可通过与换层提升机的灵活匹配,实现立体三维空间内任意货位的存储和拣选。四向穿梭车系统具有较好的高柔性自动化的特点,首先可以根据出入库动态需要灵活变更作业巷道和货架层面,同时可以按照作业量柔性增减穿梭车的数量来调节系统能力;其次,当其中某辆穿梭车出现故障时,可由其他车辆替代完成作业,克服了堆垛机因故障导致整个巷道无法作业的致命短板。四向穿梭车系统集成存储与拣选于一体,既适合低流量、高密度的存储型业务,也可用于高流量、高密度的动态拣选型作业,系统作业能力可以通过增减穿梭车和提升机以及其他辅助设备的数量来线性调



堆高 AGV



四向穿梭车



“魔浮”穿梭车



攀爬搬运机器人

图1 高柔性自动化仓储物流技术案例

节。

2010 年德国弗劳恩霍夫物流研究院提出了“魔浮”穿梭车 (Multishuttle Move) 的概念, 完成了世界上首辆既能在地面上又能在货架上自主行驶的多功能智能搬运机器人的研发。“魔浮”穿梭车彻底打通了仓储物流系统与生产系统之间的“隔墙”, 实现了仓储与生产的无缝对接。传统穿梭车 (包括四向穿梭车) 的作业局限在仓库的货架上, 不能在地面上行驶, 要完成生产线的物料配送, 必须经过中转环节。而“魔浮”穿梭车可以自主走出货架, 像 AGV 小车一样直接把原材料送到产线, 或者将成品直接从产线运送到成品库的货架上。这是仓储物流技术走向高柔性自动化的重要一步。

“魔浮”穿梭车虽然实现了货架和地面上的行驶, 但它

只能自主完成 X 方向和 Y 方向的水平运动, 在垂直方向运动仍需借用提升机来实现。为了进一步提升自动化仓储物流技术的柔性, 弗劳恩霍夫物流研究院利用 3D 打印技术快速实现了攀爬搬运机器人 RackRacer 的样机研发。该机器人可以实现 XYZ 方向的自主运动, 在货架上可以上下自主“攀爬”, 不再依靠提升机的帮助。这项技术将自动化仓储物流技术的柔性推向了制高点。面对低成本个性化定制给物流系统带来的巨大挑战, 高柔性自动化仓储物流技术给出了满意的解决方案。

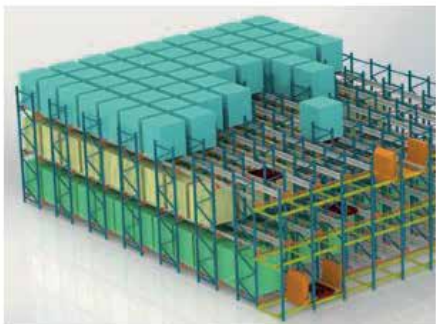
二、高密度化

随着城市化进程不断深入, 土地的稀缺性问题日益严重, 作

为工业、商业和社会不可或缺的仓储物流用地也日趋紧缺, 高密度仓储物流技术成为发展趋势。一方面传统的货架越建越高, 有的甚至超过 40 米, 以充分利用仓库有限的占地面积。这样的仓储系统一般利用超高堆垛机来完成出入库作业。另一方面是减少巷道的数量, 实现货物在水平和垂直方向的高密度存放。这种三维密集型货架系统需要采用特殊的出入库方式, 其最大的问题是无法实现对每件货物的直接出库作业。

目前常见的三维密集型货架系统和出入库方式有如下几种:

1. 贯通式货架和驶入式货架: 叉车可以驶入贯通式货架或驶入式货架存取货物, 这样就减少了叉车所需要的通道, 能够在有限的仓库空间内放下更多的货架, 大大提升了仓库的空间利用



托盘密集存储



“魔方”式密集存储



AutoStore

图 2 高密度仓储物流技术案例

率和存储能力。贯通式货架两边都有通道，可以实现先进先出（FIFO）的存储策略；而驶入式货架只配备单边通道，所以只能实现后进先出（LIFO）的存储策略。

2. 后推式货架：这种货架与载货小车配套使用，托盘货物通过载货小车依次逐个后推进入货架，当第一个货位上的货品取走后，后一个货位上的货品会被自动回到第一个货位。在这类货架系统中，叉车不必驶入存储巷道，作业效率较高，只能实现 LIFO 的存储策略。

3. 重力式货架：利用重力实现货物的存取。重力式货架是通过在存储巷道内布置无动力滚筒，安装出一个向下倾斜的小角度，货物靠自重自动从入库端滑移到位置较低的出货端。第一个货位上的货物取走后，后一个货位上的货物自动到位，实现 FIFO 的存储策略。

托盘穿梭板存储系统是一种半自动化仓储技术，与贯通式货架和驶入式货架不同，叉车不必进入货架巷道作业，而是与托盘穿梭板协同，在通道上作业。这样就大大降低了叉车撞击货架的事故率，巷道的长度也可以相应增加，进一步提高仓储密度。

垂直和水平旋转自动货柜也是高密度仓储物流技术的分支，其中垂直自动货柜应用比较广泛。垂直自动货柜分为垂直旋转或者垂直升降两种主要方式，适合小型零部件的高密度存储以及符合人体工程学的入库和拣选作业。定制的垂直自动货柜可以充分利用仓库从地面到屋顶之间的高度，从而在最小的占地面积上提供最大的仓储能力。与固定货架传统的仓储技术相比较，自动货柜可以节约高达 75% 的占地面积。

AutoStore 是一种新型高密度仓储技术。通常情况下，标准尺寸的料箱（600mm×400mm×310mm/220mm）存放在立式货格内，从仓库地面垂直向上堆叠；一组机器人在立式存储货格顶部的铝制轨道上水平行走，存取料箱；每台机器人有 8 个轮子，其中 4 个沿 X 轴方向行走，另 4 个沿 Y 轴方向行走；每台机器人配有 4 条钢索提升装置，能将每一垛中最上方的料箱垂直提升至货格顶部；立式存储货格每垛可存储最多 16 个料箱（高度达 4.9 米），每个料箱中可存储单一品项或多个品项的货物；料箱能够根据系统内的存储需求，简易地向 X 轴

和 Y 轴方向扩展；数千只料箱彼此相邻，每 16 个一垛存放在密集货格中，省去了巷道，存储密度高。AutoStore 可以实现自动化存取和“货到人”拆零拣选解决方案，场地使用比较灵活。因为垂直码垛方式只能实现 LIFO 存储策略，必须依靠合适的存取策略和优化算法来减少机器人的倒货作业，提高出入库效率。

三、拣选作业的无纸化和自动化

拣选是仓储物流中劳动密集的作业环节，在一些电商物流中心里，拣选作业甚至占仓库运营成本的 50%。为了提高拣选效率、降低仓储物流总成本，近年来拣选方式和技术不断创新，拣选作业更加动态化，部分领域还实现了拣选的自动化。

传统的“人到货”（PTG）拣选仍然是常见的拣选方式，尤其是在产品种类众多的电商物流中心里，“人到货”拣选是客户订单履行的重要组成部分。为了提高拣选效率、降低差错率，无纸化拣选已经成为大趋势，常见方式如下：

1. PDA 手持扫描器

2. 灯光拣选系统 Pick-to-Light(电子标签拣选系统)

3. 语音拣选系统 Pick-by-Voice (声控拣选系统)

4. 增强视觉拣选系统 Pick-by-Vision(增强现实拣选系统)

灯光拣选系统是一种主要依靠电子数字显示牌和各种指示灯来显示拣选信息的拣选方式,应用最为广泛。其常规模式为:在订单驱动下,系统在需拣选商品的货位上的电子标签亮起,指示操作员到准确的货位拣取准确的数量。操作员通过确认将拣选信息实时传送回系统,使拣选作业方便、高效和无误。灯光拣选系统除了用在固定货架上,还可以配备在拣选小车上。灯光拣选车一般还会配备车载平板电脑和扫描枪,能够引导操作人员同时拣选多个订单,正确选择货架上的货物,并放在拣选车上指定的容器里。灯光拣选车还可加装扬声器系统,用语音引导人员拣货。

PDA 手持扫描器应用广泛,是实现出入库和拣选作业无纸化和信息实时化的重要技术。然而在大件物品拣选时,操作员需要双手拣取货物,手持扫描器会影响作业。语音拣选系统便可以很好地解决双手作业的问题,通过

语音识别和合成技术,使仓库作业人员可以直接与仓库管理系统(WMS)进行对话沟通。作业员无需观看 PDA 手持扫描器的屏幕,直接按照语音指令到指定区域库位拣选货物,并通过语音进行动作确认。仓库管理系统直接识别作业人员语音,进行相应的数据处理。语音拣选系统可将多个订单放在一起批处理,提高拣选效率。在商品周转慢的仓库区域(C类商品拣选区),也可将多个订单批处理到一个语音拣选小车,以提高综合作业效率,降低仓库运营成本。

增强视觉拣选系统配备有智能数据眼镜和相关控制软件,该系统与仓库管理系统实时无缝交互。根据拣选策略制定的拣选列表和优化后的行走路径将被实时发送到作业人员佩戴的智能数据眼镜上,引导作业人员拣选。订

单完成后,增强视觉拣选系统会进行确认,同时索取下一个新的拣选列表。

随着仓储物流技术的发展,“货到人”(GTP)拣选系统的应用越来越广泛。“货到人”拣选系统最早与传统自动立体库(ASRS / Miniload)对接,主要用于供应产线的原材料的拣选作业。堆垛机将需要拣选的托盘/周转箱从立体库中自动取出,交到连续输送机或其他搬运设备上,货物被送到拣选站,由操作工人完成拣选后再次存入自动立体库。这种“货动,人不动”的拣选方式,大幅度减少了拣选人员的行走距离,可以实现高于“人到货”模式数倍的拣选效率,并且按照人体工程学设计的拣选站可以大幅度降低劳动强度和拣选差错率。

随着四向穿梭车自动立体库

	手持扫描器拣选	电子标签拣选	语音拣选	增强视觉拣选
图例				
优点	+ 系统柔性强 + 设备投资低	+ 显示直观可靠 + 拣选效率较高 + 适合高频次拣选	+ 系统柔性强 + 便于双手取件作业 + 适合大件物品拣选	+ 系统柔性强 + 适合高频次拣选 + 便于双手取件作业
缺点	- 双手取货受限 - 拣选效率较低	- 投资较高 - 布置难度与灵活性差	- 受地方口音影响 - 不适合高频次拣选	- 视觉疲劳问题 - 成熟度和供应商选择

图3 无纸化拣选技术的分类及特点

的推广，“货到人”拣选系统的效率和灵活性得到大幅度提升，初步往智能化方向发展。高端的四向穿梭车运行速度超过 4m/s，可以为拣选站快速补给和运回系统所需的周转箱。基于四向穿梭车的“货到人”拣选系统不仅适用于制造企业，在电商和商超物流中心的应用也日益普及。

基于 kiva 机器人的“货（架）到人”的拣选系统成为近年来电商物流热点技术之一。kiva 机器人通过扫描地面的条码定位，通过无线通信系统接受指令，将货物所在的货架从仓库搬运至拣选站，拣选人员每小时可挑拣、扫描 300 件商品，效率是传统“人到货”拣选作业的 3 倍以上，准确率可以达到 99.99%。基于 kiva 机器人的“货（架）到人”的拣选系统给拣选和包装流程带来了进一步优化的空间。在一些电商物流中心里，kiva 机器人把货架直接搬到复核包装工作台，由复核打包作业人员完成拣选、二次分拣以及打包复核三项工作。这样的流程优化，不仅减少了物流中心的人员投入，同时也减少了物流中心的内部物流作业量，提高了电商物流中心作业的综合效率，降低了总的运营成本。

在大型物流中心里，多台 kiva 机器人与多个拣选台的匹配是影响提高拣选效率的关键因素。目前常用的规划方法有动态规划法、博弈算法、合同网法等，未来基于人工智能的规划方法也会有很好的应用前景。

自动化拣选技术也已经在烟草和医药物流领域有了广泛应用。由于包装比较规范，卷烟和部分医药产品适合在 A 型货架拣选系统、通道式拣选系统等进行自动拣选。中国烟草行业物流技术近年来发展迅速，其中卷烟拣选设备已经达到全球领先地位。根据补烟填仓方式和烟仓部件结构形式的不同，自动化条烟拣选设备主要分为立式条烟分拣机、卧式条烟分拣机、通道式条烟分拣机和组合式条烟分拣机。立式条烟分拣机的烟仓直立设置，从烟仓侧面人工补烟填仓；卧式条烟分拣机的烟仓倾斜设置，从烟仓端面补烟填仓，一次可实现多条补货；通道式条烟分拣机的烟仓水平设置，从烟仓端面补烟填仓，一次可实现整件的自动补货；组合式条烟分拣机是由上述三种条烟分拣机按一定方式组合构成的条烟分拣线，以实现对不同品规的条烟的自动化拣

选。

而“货到机器人”拣选系统则可以说是相对“货（架）到人”的另一项先进技术。随着工业机器人视觉技术和抓取技术的发展，仓储物流作业中最为复杂的拆零拣选环节逐步成为工业机器人技术应用的下一个重要阵地。

“货到机器人”拣选系统通常由输送线或 AGV 连接自动立体库和拣选机器人系统，在自动输送环节，“货到机器人”和“货到人”系统的实现方式相同，即完成货物从立体库到拣选站的自动化搬运。在拣选环节，“货到机器人”拣选系统采用机器人自动拣选，即通过机器人来识别、抓取货物并放在指定的容器内。与“货到人”拣选系统下的人工拣选方式相比，“货到机器人”拣选系统下的机器人不仅能够长时间重复拣选动作，节省人力，还可以大幅度提高拣选效率，保证准确率。因此，在人力成本越来越高的趋势下，“货到机器人”拣选无疑将成为仓储物流系统的下一个热点。目前“货到机器人”拣选技术还存在一些技术瓶颈，应用案例比较少。多数物流中心里货物的品规数量庞大，商品包装各式各样，大小和重量差异很大，对

机器人的夹具技术要求很高。在现有技术水平上，“货到机器人”拣选系统还无法满足对这些不规则商品的拣选需求。不过随着行业研发力量的不断投入，不规则物品的全自动拣选技术瓶颈在不久的将来一定能突破。

移动拣选机器人是自动化拣选的最高层次，是世界仓储物流技术领域的重要技术发展方向。移动拣选机器人配备自主导航系统，采用 3D 视觉和机器深度学习技术，完成移动拣选机器人的精准定位以及货物的智能识别与抓取，并自主将拣选好的货物运送到指定地点。移动拣选机器人能够替代繁重的人工劳动，实现物流中心“机器人到货”的拣选作业方式，目前其应用范围还非常有限，主要用于规范包装货物的拣选。

四、数字化和网络化

进入工业 4.0 时代，企业要实现数字化转型，应该从物流数字化入手。物流贯穿企业业务全流程，而作为物流核心环节的仓储物流系统，其数字化是企业数字化建设的重中之重。智能传感器技术、赛博物理系统 (CPS)、

窄带物联网 (NB-IoT) 和 5G 技术正不断应用到仓储物流数字化建设中。以下就该方向的四项主要技术逐一介绍。

1. 智能物流按钮 (iButton)

智能物流按钮是一种仓储物流系统数字化和网络化的创新技术，可以用在货架、拣选小车及其他物流设备上。例如，按下拣选线上补货的智能物流按钮，可以拉通整个物流和供应链流程：自动立体库启动出库作业，AGV 小车将货物自动配送到拣选线，同时仓库管理系统可以把需求变动信息自动发送到供应商的物流系统，从而拉动供应链上游企业的物流和生产。

2. 智能物流标签 (iLabel)

与传统的 RFID 标签相比，智能物流标签具有更强的功能，它具有一定的自主决策能力，实

现报警和控制物流流程功能。智能物流标签可以广泛用在周转箱、托盘、集装箱等物流容器上。

3. 智能周转箱技术 (inBin)

通过在周转箱上加装感知与智能控制单元，实现了物流单元的智能化。inBin 智能箱既能自主管理箱内的货物，又能向上级系统及时报告智能箱的状态，实现自动要货和补货的功能。基于智能箱的输送系统可采用分散控制技术，使智能箱不再是被动单元，可以反向给输送系统下达命令。在智能箱的指挥下，输送系统可以自动地将箱子送达目的地。

4. 物联网技术 (IoT)

物联网技术能够满足智能物流网络化的需求，同时也是实现物流全流程数字化的关键。相对于基于 WiFi 和蓝牙技术的物联

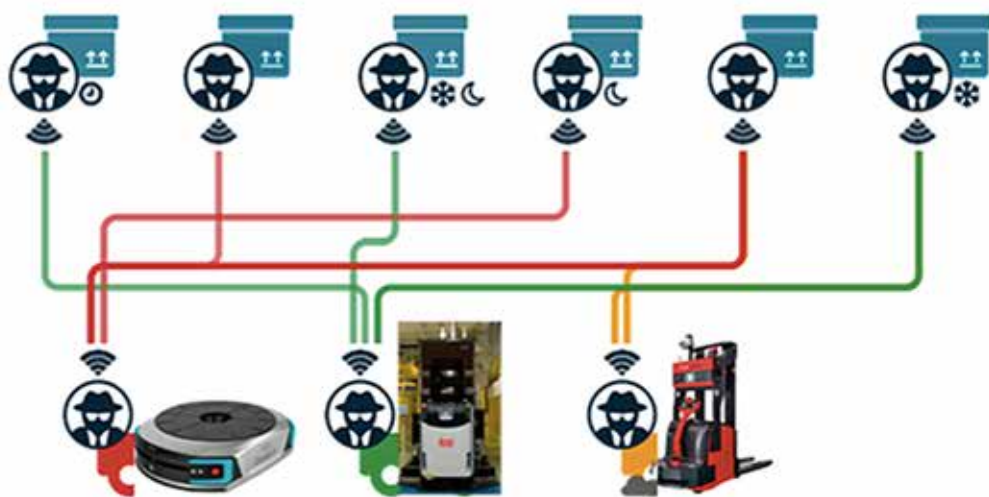
	A型架拣选系统	通道式拣选系统	货到机器人拣选	移动机器人拣选
图例				
优点	+ 分拣效率较高 + 可实现自动化补货	+ 自动化程度高 + 可实现自动化补货 + 分拣效率高(A类产品)	+ 技术比较成熟 + 部署成本较低 + 自动化与智能化	+ 柔性高 + 可扩展性强 + 自动化与智能化
缺点	- 投资较高 - 人工补货 - 产品包装规格限制	- 投资高 - 维护成本高 - 产品包装规格限制	- 系统柔性较低 - 可扩展性较弱 - 产品种类限制	- 拣选效率较低 - 产品种类限制 - 技术成熟度较低

图 4 自动化拣选技术的分类及特点

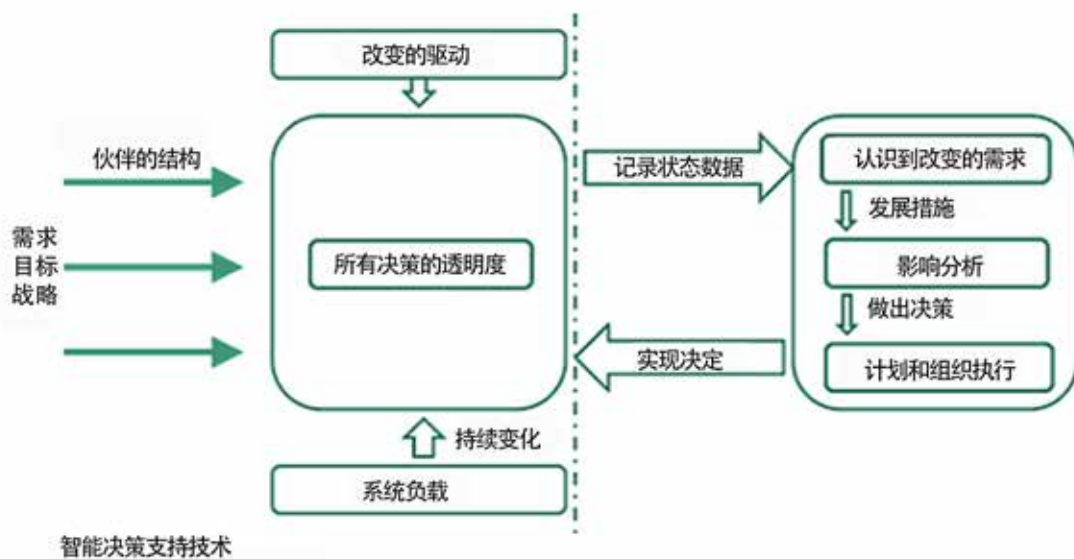
网数据准确率较低、耗电量较大，窄带物联网技术是一种专为物联网设计的窄带射频技术，支持低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接，也被叫作广域网（LPWA），以

室内覆盖、低成本、低功耗为特点。窄带物联网支持海量连接，为仓储物流系统的数字化和网络化创新应用带来勃勃生机。窄带物联网技术支持智能物流单元和

智能物流装备之间低层面的相互交流和决策，真正实现了仓库内部密集网状连接，提高仓储物流信息交换效率和准确率。中国在5G技术上处于全球领先地位，5G



多代理系统人工智能技术（MAS）



智能决策支持技术

图5 仓储物流智能化技术

无线空口技术（RIT）方案基于 3GPP 新空口（NR）和窄带物联网技术。其中，NR 重点满足增强型移动宽带（eMBB）、低时延高可靠（URLLC）两个场景的技术需求，NB-IoT 满足大规模机器连接（mMTC）场景的技术需求。中国大力发展的新基建项目将进一步推进窄带物联网建设，为中国企业在物流数字化和网络化建设方面打下良好的基础。

五、透明化和可预测性

通过数字化和网络化建设，可以实现仓储物流的可视化管

理，下一步是全流程的透明化和对未来业务的精准预测。所谓透明化，在于理解为什么系统中正在发生某些事情，进而建立系统的行为逻辑和规范，为系统的优化奠定基础。要实现透明化，必须首先捕获和分析系统实时数据，也就是建立系统的数字影像（Digital Shadow）。通过透明化可以实现流程的优化，提高物流的速度、效率和质量，降低物流成本。

基于仓储物流流程数据的完整性和实时性，可以进行“流程

挖掘”，从数字化中挖掘优化的潜能。所谓“流程挖掘”是对实际流程进行展现、监控和优化。即从企业信息系统（如仓库管理系统）中的实时信息和事件日志里提取知识，寻找规律。通过这种方式，可以挖掘深藏在流程和系统中的“内部信息”：谁、什么、何时、何处、为什么、如何……这些“内部信息”有助于审核、分析和改进现有的业务流程。市场上有多种“流程挖掘”软件工具，如 Celonis, Hammacher Datentechnik 以及 Katana 公司的专业软件。

数字孪生技术（Digital Twin）是一项创新性系统技术，是充分利用物理模型、传感器信息、运行历史等数据，集成多学科和多物理量的 3D 仿真过程。仓储物流系统的数字孪生就是相应的物流设备和系统在虚拟空间中的数字化表达，以便在这个数字化物流系统上研究实际物理系统可能发生的情况，并借助增强现实和虚拟现实技术生动直观地展现出来。所有数据模型都能够实现双向互联，真实物理系统的状态和参数将通过与智能仓储物流系统集成的赛博物理系统向数字

化模型反馈，使生命周期各个环节的数字化模型保持一致，从而实现对物理系统的状态和性能的实时评估与监控。利用数字孪生模型可以快速和低成本地对物理系统进行仿真优化，通过改变系统控制策略和规则，寻求更优的方案；同时利用数字孪生技术逆向反馈的功能，把优化后的控制方案（甚至包括 PLC 和机器人控制程序）直接植入到物理系统中。基于数字孪生模型进行的各类仿真、分析、数据挖掘以及人工智能技术的应用，可以确保它与现实物理系统的适用性。

电子商务时代，客户的订单随机性高，导致电商物流中心的业务需求波动大，这给仓储物流系统的资源配置带来巨大挑战。基于数字化和新型预测方法的物流需求预测分析，对仓储物流系统的建设和运营意义重大。目前预测方法研究大都集中在启发式预测方法和基于数据科学和大数

据技术的预测分析方法。

六、智能化

仓储物流技术发展的下一个目标是智能化。即，在数字

化和透明化的基础上，模仿生物和人的智能给仓储物流系统赋予感知、分析、学习和决策的能力；甚至利用“深度学习”技术，让系统具有思维、推理判断和自行解决复杂物流问题的能力。

德国弗劳恩霍夫物流研究院近年来一直在研究生物“群智能”在物流领域的应用。群智能源于对鸟群、鱼群等动物群体行为的研究，为物流中心内部大量的“细胞式”搬运机器人协同作业寻找解决方案。采用中心控制方式实时管控数千个机器人，需要很大的计算能力和无时延通信技术，机器人群中的突发事件甚至会使中心控制计算机瘫痪。“群智能”的控制是分布式的，不存在中心控制，每台机器人通过配备的各种智能传感随时感知自己的位置、状态和周边环境，自主决策，自主控制，而机器人群体则具有自组织性，使群体效率达到最大化。机器人群体中每个个体的能力或遵循的行为规则非常简单，因而群智能的实现比较方便。由于群智能可以通过非直接通信的方式进行信息的传输与合作，因而随

着个体数目的增加，通信流量的增幅较小，因此群的规模具有较好的扩展性。

多代理系统（MAS）人工智能技术在搬运机器人调度和控制方面的应用成为近年来研究和应用的热点。MAS 是一种分散式优化算法，用于对搬运机器人的线路规划、优化和监控。MAS 为每个对象（如运输订单、货物、搬运机器人、提升机、装卸点）建立一个数字孪生体，称为“虚拟代理”。这些“虚拟代理”为每个运输流程“协商”一个接近最佳的解决方案，即确定哪项运输任务、通过哪辆搬运机器人、在哪个路线上进行。这种系统还对不可预见的事件（如车辆故障）做出反应，并以近乎实时的方式生成替代解决方案。基于人工智能（AI）的学习能力，历史数据将被用来分析和改进算法，这样就形成了一个具有学习能力的搬运机器人调度控制系统。

人工智能图像识别技术、专家系统和智能决策支持系统等在仓储物流领域也有着广阔的应用前景。无人机与图像识别技术结合，可以完成仓库安全监控和货物盘点；专家系统

在仓储物流技术选型和规划领域已经有多个成功案例；而基于历史数据和实时信息的智能决策支持技术可以为仓储物流系统的动态优化提供支持。随着人工智能技术的快速发展，仓储物流技术智能化的水平正在逐步提高。

七、结束语

合理的、先进的仓储物流技术可以更高效地在时间上协调原材料及产品的供需，促进企业提高客户服务水平，增强企业竞争力。同时，仓储物流技术的不断发展，则顺应了时代的潮流，体现了社会对科技的强烈召唤。在智能传感技术、窄带物联网、5G、大数据、人工智能、云计算等技术逐步成熟的背景下，全球仓储物流技术已迈入创新发展的黄金阶段。高密度、高效率和高柔性自动化的物流技术不断涌现，物流与供应链系统正朝着数字化、网络化、透明化及智能化的方向发展。面对工业 4.0 提出的低成本个性化定制的愿景，仓储物流技术正在向物流 4.0 逐步迈进，并日趋成熟。MT

机械工程学科（机械制造）发展报告 概述

编者按：2020 年，中国机械工程学会及其生产工程分会承担了中国科协学科发展工程项目，在中国工程院院士、中国机械工程学会副理事长郭东明院士为首席科学家的专家撰写组和 11 个专题小组近百位专家的共同努力下，通过充分收集资料、深入调查研究和严谨数据分析，以及多次研讨会讨论和广泛征求本学科领域内专家学者的意见的基础上，形成了《2018-2019 机械工程学科发展报告（机械制造）》（以下简称《报告》）。本文为《报告》综合部分的概要版本。

一、前言

把原材料变成产品全过程的生产活动称为制造，研究产品制造过程和制造系统相关的科学，称为制造科学。机械制造科学的基本任务，就是为制造业提供所需求的机械制造过程及装备的新理论、新方法和新技术。现代机械制造学科和制造技术，是具有很强领域带动效应的工程科学，不仅研究多领域多学科交叉的基础性、科学性和创新性等共性问题，同时，可以通过解决企业生

产应用中的关键科学技术问题，成为推动制造装备、制造工艺和相关产业发展最有力、最直接的牵引力和原动力。因此，机械制造学科和制造技术，是振兴和强大制造业的重要基础，在国家经济与社会发展中起着非常重要的作用。

本报告主要概述了近几年我国在机械制造科学研究以及在不同工业领域应用中取得的创新性和标志性研究进展，通过对国内外研究进展进行对比，对今后机械制造理论和应用技术的研究趋

势进行了展望。

二、机械制造学科标志性研究进展

在精密与超精密加工领域，清华大学路新春等建立了大尺寸表面纳米级平坦化的加工原理与方法，发明了系列大尺寸超薄硅片纳米级无损伤抛光关键技术，研制开发出 12 英寸“干进干出”化学机械抛光（CMP）装备与成套工艺，实现了 IC 制造大尺寸晶圆表面的纳米级平坦化及纳米

级缺陷控制。整体技术达到国际先进水平，已在中芯国际等企业实现批量应用，打破了国外高端微电子超精密抛光装备长期垄断的局面。

在高效高质加工领域，大连理工大学贾振元等建立了碳纤维复合材料（复材）新切削理论体系，发明的钻、铣削等九个系列新型复材切削刀具、加工技术及工艺，相比于国外及传统刀具，加工损伤由毫米量级降至 0.1mm 以内，刀具寿命提升 2-7 倍，加工效率提升 3-4 倍，加工精度提升 50%。成果已应用于航天一院、三院、中航工业和中国商飞等企业复材构件的加工制造中。

在非传统加工领域，华中科技大学邵新宇等提出了大型薄壁曲面激光焊接控形控性技术，发明了大型三维薄壁曲面焊缝形貌在线“测量—跟踪—补偿”技术与装置，实现了汽车车身小变形、低应力、高质量激光焊接。成果已在上汽通用、江铃福特、江淮等企业得到应用。

在微纳制造领域，西安交通大学卢秉恒等提出了电场斥力辅助的脱模新方法，建立了大面积嵌入式功能结构的电场辅助扫描填充技术，实现了金属、低维纳米墨水等功能材料对特定微纳米孔隙的电场辅助填充；提出了异型微纳结构电致流变成形方法和宏观表面的 6 英寸晶圆级自动化纳米压印微区控制压印新方法，

实现了表面翘曲起伏的晶圆级基材与柔性模板的均匀接触，推动纳米压印技术由二维向三维方向发展。

在绿色制造领域，中南大学郭学益等创新开发了废旧线路板低温连续热解新技术，实现了废旧电路板中有机组元深度碳化与金、银、铜、钯等贵金属的有效富集，以及物料中有机溴、氯的无害转变与尾气超低标准排放，有效消除了废旧电路板中持久性有机污染物；已在江西等 9 个省（自治区）推广应用，推动我国再制造产业进入世界先进水平行列。

在仿生制造领域，源于昆虫蜕变翅膀折叠的灵感，仿生成为从小实体到大展开面的神奇变换机构。天津大学陈焱等创造性地将空间结构代替球面机构，建立了基于过约束空间机构网格的厚板折纸运动学模型，解决了厚板折纸的仿生制造难题。研究成果已用于大型空间可展结构、新型超材料与轻型复合材料、可变形机器人等工程。

在表面功能结构制造领域，华南理工大学汤勇等发明了复杂表面热功能结构形貌特征设计与可控制造关键技术，实现了管外、管内表面热功能结构高效成形及复杂形貌可控生成等，从根本上解决了管壳式换热器、空调及照明高能耗以及高铁核心 IGBT、卫星数据传输及相控阵天线高热流

密度电子芯片热控问题，在我国相关行业的龙头企业实现大量应用。

在增材制造领域，华中科技大学史玉升提出基于激光选区烧结（SLS）增材制造的复杂零件整体铸造新思路 and 发明整体铸造成套技术，突破了航空发动机机匣、航天发动机涡轮泵等高性能复杂零件的整体铸造难题。成果应用于中国航发、西安航天发动机有限公司等国内外数百家单位，取得了显著的经济和社会效益。

在基础零部件制造领域，中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司联合北京工业大学石照耀，提出了基于记忆合金流量调节的温控技术、高精度齿轮拓扑修形技术和高效齿轮配对技术等核心关键技术，开发的高铁列车用齿轮传动系统温升降低 10 度（摄氏）以上，噪声降低 11%，振动得到显著控制，功率重量比提升 10%。

在传感、检测与仪器领域，重庆理工大学彭东林提出一种将被测齿轮与传感器融汇一体的新方法——寄生式时栅技术，采用非接触、密封的离散测头线圈直接把被测齿轮、蜗轮、蜗杆、齿条、丝杠等当作均匀分度的“齿栅”，作为新检测方法的行波产生器件，再用时钟脉冲作为位移精密测量的基准，从而实现实时、在线、动态精密位移测量。

在智能制造及数字工厂领域,华中科技大学丁汉等针对“大型复杂曲面多机器人高效加工的主动顺应与协同控制”科学难题,在涉及磨抛法兰和力位自律跟踪、高能效移动机器人机构设计、超大高光反射表面三维测量、多机协同运动规划和测量加工一体化协同控制等关键技术上取得突破,并在中国中车等企业得到推广应用。

三、国内外对比与发展趋势

近年来,在国家自然科学基金、国家 973/863 科技计划、国家重大重点专项等项目的支持下,机械制造学科领域取得了一系列突出进展和创新成果,为我国制造业提供了大批新理论、新技术和新方法,在国内外产生了重要影响。我国机械制造科学从过去的跟踪、发展到现在的并跑,有的领域已处于领跑状态。超精密加工、高质高效加工、特种加工、绿色制造、仿生制造、增材制造、功能表面结构制造等领域已在国际学术界占有一席之地,研究水平总体上已步入国际先进行列。同时,我国机械科学领域近年来涌现出一批国际知名的科学家,在国际学术界占有重要的一席之地。包括国际仿生工程学会创始人,吉林大学任露泉院士;国际摩擦学会副理事长, IFToMM

摩擦学技术委员会主席、清华大学雒建斌院士;获 IWPMA 超声电机终身成就奖的南京航空航天大学赵淳生院士;获国际生产工程科学院 CIRP Fellow 称号的南京航空航天大学朱荻院士和天津大学房丰洲教授;国际光电子与激光工程学会主席、美国激光学会秘书长、清华大学钟敏霖教授; SME Fellow、俄罗斯工程院院士、武汉理工大学周祖德教授; IFToMM 执委会副主席、天津大学黄田教授等。

同时,机械制造学科领域还存在的不少问题和差距,主要体现在中国学者提出的机械制造领域的新概念、新理论、新方法和新技术不多;有重要国际影响的机械制造理论、方法和技术较少;在机械制造领域国际学术界有较大影响的中国学者少。我国机械制造的理论、方法和技术对中国制造业的自主创新 and 自强发展的贡献不够显著。

体现机械制造技术先进性的高端装备与发达国家相比仍然存在很大差距。我国高档数控机床、精密超精密加工机床、精密科学仪器、大型民用飞机、大型民用航空发动机、超大规模集成电路芯片及其制造装备、高档轿车及其关键生产设备与核心技术仍未掌握在自己手中。制造加工理论、工艺及成套装备虽然已有重大突破,仍然缺少原创性、系统性的深入研究,有些领域甚至

还处于起步阶段。例如,我国在航空发动机关键构件的制造精度方面已经接近或达到了与国外产品相同的水平,然而制造的关键构件服役寿命却不及国外同类产品的 50%,在关键构件制造技术方面未能掌握面向高性能制造的表面宏微观几何与物理状态对构件服役影响规律,相关基础数据严重缺乏、高性能加工表面状态设计基础研究不足。高端装备研发依然是仿制国外同类型设备为主,缺乏主动设计手段,没有形成“工艺牵引装备,装备支撑工艺”的良性循环。增材制造基础研究覆盖了相当完整的学科方向,但同世界领先水平还有一定差距,近几年的一些显著影响增材制造全局的重大技术进步都来自于美欧国家,美国和德国还占据高端增材制造装备商业化销售市场的绝对优势;高端增材制造装备的核心元器件和商用软件还依赖进口;以系统级创新设计引领的规模化工业应用还主要在美欧国家。机器人减速器、高速列车主轴承、液气密封等机械基础件的性能及质量与国外比较差距仍然较大,高端基础零部件发展受制于原材料、精密制造装备、检测试验技术及基础理论与技术前沿研究的落后,与发达国家存在较大差距。检测测量技术还存在自主创新少、测量精度不高、测量准确性不高、测量效率低等特点,高端仪器设备依赖进口的

局面尚未改变,现有国内测量仪器的性能及可靠性指标与国外产品相比差距明显,测量理论、方法和技术不太适应国家重大工程的需求。制造业智能制造、大数据的获取、分析和应用、数据化车间及智慧工厂等尚处于初级阶段。

四、展望

机械制造学科发展的总趋势是需求驱动、学科融合和前沿牵引。我国正处在从制造大国向制造强国迈进的征途中,各行业装备制造以及高性能产品的制造等,都迫切需要机械制造科学提供创新而实用的理论、方法和技术。机械制造学科一方面要与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科学继续深入的交叉融合,发展和完善仿生及生物制造学、微纳制造学、制造管理学和制造信息学。另一方面要与机械学融合,即与机构学、传动学、摩擦学、结构强度学、设计学、仿生及生物等机械学更深入的融合发展。下一代量子计算机、生物计算机、深地深海深空探测、精准医疗、核聚变、新能源与新材料等科学前沿和未来的需求,都对机械制造科学提出了新的机遇和挑战。

当前,制造已经处于网络/信息/智能制造、极端制造、微纳制造与生物制造的新时代,网

络环境下具有信息感知、计算分析和决策反馈控制等智能的高端重要装备和系统的智能制造,不断快速更新的智能数字网络多功能集成产品制造,以及制造尺度特大或特小尺度或极端环境极高性能的器件和功能系统的极端制造,高知识含量的信息机电产品、仿生机械产品和微纳尺度器件及其产品的制造,将成为制造业发展的重要方向。基于资源节约和环境友好的绿色可持续性制造产品的绿色度,将上升为制造竞争力的首要因素。

各领域重点研究内容简述如下。

精密及超精密加工领域:加强开展超精密加工装备及其高精度关键部件的高品质制造、超精密加工装备模块化生产、典型材料及复杂零件超精密加工工艺、超精密加工装备制造标准等研究。

高质高效加工领域:应用多学科理论和技术手段,不断完善高质高效加工基础理论,发现新规律、提出新方法、建立更准确有效的模型,支撑以高质量、高精度、高效率、智能化、绿色化、复合化、高集成化等为特征的高质高效加工装备、工具和工艺技术的创新发展。

非传统加工领域:研发多物理场、多工艺复合的激光、超声、电磁、射流、电子束等非传统加工的高精可控机制、技术与装备,

实现新型难加工材料的微加工与复杂结构成形,研究3D打印的新方法等新技术与装备。

微纳制造领域:研究功能化大面积纳米结构规整平面直接压印制造、真三维复杂仿生微纳结构定域可控制造、复杂曲面、三维多喷头、多材料电喷打印制造,以及轻薄化、共形性、表贴式的多功能柔性电子皮肤。

绿色制造领域:研发绿色制造的方法工具平台、发展再制造产品损伤检测技术,开发新型绿色材料、节能生产装备、绿色加工工艺,研发智能再制造拆解及高效清洗工艺,在典型行业和关键零部件,推广绿色制造和再制造技术。

仿生制造领域:重点研究仿生生物制造新技术体系、高端3D、4D机械仿生生物制造,加强成熟度高的仿生生物制造系统的关键技术演示验证及应用,研发重大仿生生物机电产品。

表面功能结构制造领域:揭示表面功能结构有别于宏观结构的特殊功能的实质以及与宏观结构作用机制的区别,提出新的表面功能结构制造理论和方法。

增材制造领域:通过增材制造装备、材料、结构和工艺的重大创新或集成优化,实现更高的尺寸精度、更低的表面粗糙度、更高和更稳定可靠的性能、更大的尺寸和更复杂精微的结构、更高的制造效率和更低的成本、适

用更广泛的材料等，并尽可能追求同时兼顾上述全部或部分优势。探索微纳增材、三维微电子线路、智能结构 4D 打印等前沿技术。

基础零部件制造领域：围绕重大装备和高端装备发展的配套需求，以产品突破为主攻方向，密切产需合作，加强基础技术研究，推动机械基础件向长寿命、

高可靠性、轻量化、减免维修方向发展。

传感、检测与仪器领域：科学仪器已远远超出“光机电一体化”的范畴，未来智能传感器会逐步走向集成化、能量获取自动化、高端需求多样化的趋势。需要大量引进日新月异的高新技术，如纳米、MEMS、芯片、网络、

自动化、仿生学等新技术。

智能制造及数字工厂：重点突破生产过程智能化、制造装备智能化、新业态新模式智能化、管理智能化、服务智能化中的基础理论与共性关键技术，建立智慧云制造平台，加强数字化、网络化、智能化的深度融合。

执笔人：雷源忠、王成勇

典型项目 1：大尺寸硅片超精密磨削技术和装备

单晶硅片是集成电路（IC）芯片制造最主要的衬底材料，大尺寸硅片超精密磨削是 IC 芯片制造的关键技术之一。我国大尺寸硅片超精密磨削技术和设备完全依赖进口，成为制约“中国芯”制造的技术瓶颈之一。该项目历时 15 年，系统研究了大尺寸硅片超精密磨削基础理论、工艺、

技术和装备，主要成果包括：（1）发明了单颗粒金刚石纳米切深高速划擦试验方法与装置，发明了系列化金刚石砂轮及硅片高效低损伤磨削工艺。（2）发明了单晶硅软磨料砂轮机械化学磨削新原理新技术，开发出磨削硅片的系列化软磨料砂轮及超低损伤磨削工艺。（3）发明了大尺寸硅片加工变形测量方法与设备，发明了消除硅片重力附加变形的计

算分离法和液浸消除法。（4）研制出国内首台 300mm 硅片双主轴三工位全自动超精密磨床和国际首台 300mm 硅片双主轴两工位多功能超精密磨床。

研究成果应用于我国首条国产 300mm 硅材料成套加工设备示范线，还可推广应用于蓝宝石等硬脆基片的超精密加工。获 2018 年教育部技术发明奖一等奖和中国机械工业科学技术奖一等奖。



图 1：研制的 300mm 硅片全自动超精密磨床



图 2：研制的 300mm 硅片多功能超精密磨床



图 3：研制的大尺寸硅片加工变形测量设备



图 4: 研制的系列化金刚石砂轮和软磨料砂轮

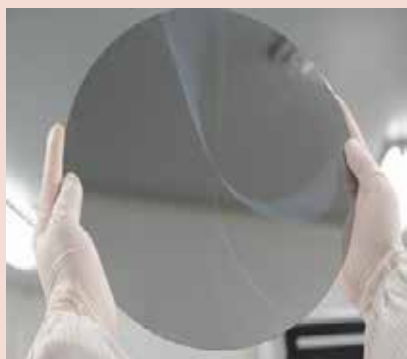


图 5: 采用所开发的超精密磨削工艺和装备磨削的 300mm 硅片

典型项目 2: 大型复材航空构件加工技术

轻质高强碳纤维增强树脂基复合材料是航空航天装备减重增效的优选材料。但此类材料加工中极易产生损伤,且随机不可控,使得构件的设计性能难以保证,实际性能难以准确计算,无法实现高性能加工,严重制约其在大型航空构件上的应用,限制了装备性能的提升。

大连理工大学贾振元院士团队从复材切削本质入手,首次建立虑及法向、切向约束和复材温变特性的切削理论模型,揭示了切削机理实验方法及装置,揭示出复材去除机理和损伤形成机制,实现了切削理论源头创新。提出“微元去除”和“反向剪切”复材加工损伤抑制原理,发明了多个系列高质高效加工工具和适

温切削损伤抑制工艺,研发出 13 套数字化加工装备。通过将上述成果应用于航天一院、三院、中航工业和商飞等企业,突破了高端装备中关键复材构件高质高效加工技术瓶颈,支撑了我国新一代重点型号研制和批产。该成果获国家技术发明奖一等奖,将我国碳纤维复材构件加工技术水平推进到国际前沿。MT



图 6 具有“微元去除”和“反向剪切”功能的复合材料系列加工工具

芯片竞赛：怎样不被别人踢掉梯子*



钛禾产业观察 张诚信

前言：大国产业

“这是一种十分寻常的巧妙手法，当一个人已经攀上高峰以后，就会把之前所使用的那个梯子一脚踢开，以免别人跟上来。”19世纪20年代，德国经济学家李斯特在《政治经济学的国民经济体系》中用“踢开梯子”来形容先进国家对后起国家的技术和经济压制。

梯子既是后起之秀进步的捷径，也可能成为隐形的陷阱。一旦发达国家在技术和经济等领域树立成功模式，后来者再想按这种模式发展，往往会在关键节点被前者踢掉梯子，从而坠落。

这个思路可以形象生动地诠释如今的芯片之战。美国作为芯片技术的发源地，主导着游戏规则制定，其他玩家只能唯其马

首是瞻。因此无论听上去多么霸道和荒谬，美国在芯片领域的各种“制裁”和“禁令”总是屡屡得手。

后起者始终要牢牢把住梯子，并且保证“补梯子的速度要快过拆梯子的”。当然还有另外一个办法，就是自己搭梯子，抢先攀顶。

1. 美国凭什么踢别人的“梯子”？

半导体产业链的上游是材料和设备，中游是设计、制造和封装测试，下游则是物联网、5G、人工智能等各种应用场景。

美国对于中国半导体产业的打压，除了直接断供高端芯片之外，还在材料、设备、设计和制造端轮番发力。

半导体材料可以分为基本材料、制造材料、封装材料，具体包含硅晶圆、光刻胶、电子特气等，目前国产化只占据15%左右，且难以覆盖核心领域，主要被美日企业垄断。

半导体设备中，晶圆制造设备投入占比70%以上，分为光刻机、刻蚀机和薄膜沉积设备。光刻机决定着晶圆加工的工艺水平。我们常说的28nm、14nm、7nm都是指光刻机能够分辨的最小图形尺寸，尺寸越小代表晶圆上能切割的芯片数量越多，集成度和良品率也越高。

光刻机的数十万个零部件产品，整合了世界各国的顶尖工艺，是集成电路产业皇冠上的明珠，荷兰阿斯麦（ASML）占据了高端光刻机80%以上的市场。

从2019年开始，ASML对中

注：本文来源于“钛禾产业观察”公众号，本刊获得授权转载。

芯国际极紫外光刻 (EUV) 7nm 设备搁置交付。尽管 2020 年 10 月, ASML 首席财务官 Roger Dassen 表示“荷兰无需获得美国许可, 就能向中国出货深紫外光刻 (DUV) 系统”。但从制程范围来看, DUV 只能做到 25nm, 只有 EUV 才是进入 10nm 以内的稳定通行证。

在 IC 设计的上游环节, EDA 软件和 IP 授权工具芯片设计的基石。而 EDA 软件基本被 Synopsys、Cadence、Mentor Graphics 三家公司垄断, 前两者都是美国公司。这三家公司都在 2019 年 5 月实体清单之后就停止了和华为的合作, 不再继续提供升级服务, 仅靠国产软件很难实现芯片设计的全流程替代。

2020 年 12 月 4 日, 英伟达正式宣布以 400 亿美元收购 ARM 公司, 上层芯片架构供应商也被美国控制, 华为的芯片设计更加困难。

IC 制造领域最受瞩目, 台积电在 2020 年 9 月 15 日以后就不得为华为设计的芯片进行代工生产。目前中芯国际能够量产的最精细制程是 14nm, 而华为目前最先进的麒麟 9000 芯片, 采用了 5nm 的制程工艺, 二者之间的技术差距 2-3 代。

虽然几个领域的老大未必都是美国人, 但美国在半导体产业里掌握着几乎所有核心的环节, 在各个细分领域也很少有短板。这决定了美国人有打压别国的底

气。

2019 年, 全球排名前 5 的半导体设备厂商有三家美国企业, 分别是应用材料、泛林科技和科天半导体, 这三家都是综合设备供应商, 经营产品涵盖沉积、刻蚀、检测等几乎所有半导体制造环节的设备。

阿斯麦 (ASML) 尽管地处荷兰, 但它最大的两个股东都是美国公司, 且零部件有 55% 依赖美国进口, 受到美国出口管制的限制。

在芯片设计领域, 美国独占榜首。据 Trendforce 2019 年数据, 全球前十大 Fabless 公司 (芯片设计公司) 美国占了 6 家, 前三大 Fabless 公司博通、高通、英伟达全是美国公司。

在芯片制造领域, 美国有 Intel 和格罗方德, 掌握着世界最先进的芯片制造工艺。材料领域虽然整体由日本占据领先, 但美国的陶氏化学位居世界化工产业第二名, 提供光刻胶等多类半导体产业相关的化学品, 也在产业链中占据着重要地位。

可以说, 美国人花 70 余年时间, 为自己在半导体领域搭建了一把最为坚固的“梯子”, 这把梯子帮助美国人爬上整个芯片制造业的顶端。站在山顶的美国人, 可以看谁不顺眼, 或者看着谁快爬上来了, 就一脚踢开谁家的梯子。

2. 美国人的“梯子”是怎么搭起来的?

从晶体管、集成电路、超大规模集成电路, 到个人计算机、移动智能终端、人工智能芯片等, 在半导体产业步步攀高的阶梯上, 几乎所有重要的创新变革都发生在美国。

1925 年, 时任 AT&T 总裁华特·基佛德 (Walter Gifford) 在美国新泽西州成立了“贝尔电话实验室公司”, 后更名为贝尔实验室。这个实验室产生了太空望远镜、太阳能电池等许多新发明, 而这些重大技术创新大多源自于基础研究的突破。汇集了世界各国顶尖科技人才的贝尔实验室, 在数学、物理学、计算机编程论、材料学、现代通信理论等领域都取得了划时代的成就。

1945 年, 著名物理学家威



图 1 肖克利 (下)、巴丁 (上左) 和布拉顿 (上右)

廉·肖克利回到战后的贝尔实验室，带领固体物理研究小组，研发制造能替代电子管的器件。1947年圣诞节前夕，受到肖克利的场效应理论启发，他的两位同事沃尔特·布拉顿和约翰·巴丁用几条金箔片、一片半导体材料 and 一个小纸架制成一个模型，可以传导、放大和开关电流。他们把这一发明称为“点接触型的锗晶体管”，标志着划时代发明——半导体的诞生。

肖克利缺席了最后的实验过程，因此1948年申请半导体专利时没有他的大名，这令他大为恼火，并立志要做一种与众不同的晶体管。1950年，肖克利研发出世界第一只PN结型晶体管，直到70年后的今天，我们所用的大多是这种晶体管。

晶体管诞生之初，其应用生态就呈现出多样性。在贝尔实验室的研究基础上，德州仪器于1954年发布了第一个可以量产的结型硅管，具备耐高温、散热强的特性，一举成为美国国防军事领域最主要的硅管供应商。同年德州仪器还推出了第一款便携式的晶体管收音机Regency TR-1，一下子成为爆款，卖出了10万多台。无论是上流社会的明星贵族，还是工薪阶层的一般家庭，少有人能够抵挡得住这款潮流产品的诱惑。

苹果公司联合创始人史蒂夫·沃兹尼亚克(Steve

Wozniak) 曾经评价Regency TR-1：“如果没有这项技术，也就没有便携式媒体播放器，今天就不会有iPhone了。”



图2 奥斯卡影后雪莉·麦克雷恩的私人订制版Regency TR-1

1954年到1956年，美国市场上共出售了1700万个锗晶体管和1100万个硅晶体管，价值5500万美元，到了1957年，晶体管的年产量达到了2900万个。

1946年，全球第一台计算机ENIAC由美国宾夕法尼亚大学研制成功，个头足足有一间屋子大。12年后IBM公司制作了第一台使用晶体管的计算机，直接瘦身到衣柜大小，但提升了几百倍的运算速度。

美国在半导体产业初创时期连续夺得世界第一，也与社会资本的大举进入密切相关。美国硅谷是现代投资业的起源地，洛克定律的发明人阿瑟·洛克创办的投资公司Davis & Rock是全球最早的风险投资机构，其促成的第一笔资金就给了初创不久的仙童半导体。Intel公司的初创也受惠于洛克和硅谷的风险投资。

此外，美国联邦政府对半导体的兴致也颇为浓厚，从一开始

就高度介入半导体产业。正如经济学家Laura Tyson在1992年所观察到的：“半导体行业从未摆脱政府干预这只看得见的手。”

20世纪50-60年代，美国军方通过签订合同，为半导体企业提供大量采购订单。据统计，70%以上的半导体研发经费来自政府采购。

基础研究坚实、应用生态繁荣、联邦政府庇护、风险资本加持，使得美国半导体产业在初创时构成了良性、可持续的创新循环。他们只需不断追赶摩尔定律，就可以保持住霸权地位。

3. 将日本人踹下深渊

1976年，日本政府发展超大规模集成电路计划(VLSI)，撮合日立、NEC、富士通、三菱、东芝五大公司设立VLSI技术研究所，以美国为超越目标，举国攻坚半导体产业。

这一计划在早期实施时遇到了重重阻力。日本半导体行业希望得到1500亿日元的政府资助，但实际只拿到737亿日元，其中只有291亿日元来自政府投入。远远不及预期的投入造成了巨大的心理落差，各成员企业士气低迷，各行其道，难以达成合作。当时参与VLSI计划的富士通公司员工福安一美回忆：“那时，大家都有一种被公司遗弃的感觉，而且也没想到最后研制出向

IBM 挑战的产品。”

关键时刻，日本半导体产业的开山祖师垂井康夫出面做“带头大哥”，终于力挽狂澜。垂井康夫认为，企业首先需要同心协力才能改变日本芯片基础技术落后的局面，集中力量突破基础技术后再进行自身产品的研发，才能使日本企业在国际具有竞争力。

在垂井康夫的带领和鼓舞下，日本半导体产业开始聚合力量，合作效率越来越高。在 VLSI 计划实施四年后，日本已经手握千余件行业专利，各公司的技术能力普遍提高。

1980 至 1986 年，日本企业的半导体市场份额由 26% 上升至 45%，而美国企业的半导体市场份额则从 61% 下滑至 43%。与此形成鲜明对比的是，1985 年 Intel 被迫裁员 7200 余人，宣布退出 DRAM 存储业务。同年，日本 NEC

成功占据全球半导体厂商销售收入榜首，甚至计划购买美国仙童半导体 80% 的股份。Intel 创始人罗伯特·诺伊斯哀叹：“美国进入了衰落的进程，如果这种情况继续持续下去，硅谷将会成为一片废墟。”

美国人显然不会眼睁睁看着自己一手开创的产业就此衰落，随即以雷霆之势对日本半导体进行了毁灭性打击。1985 年，美国半导体行业协会向政府诉苦，认为半导体行业的削弱会危害国家安全，引发了美国政府的高度重视。

1986 年春，美国认定日本存储芯片倾销。同年 9 月，在美国各种重压之下，日本被迫签署《美日半导体协议》。协议要求日本停止对美国和其他国家市场的芯片倾销，同时向美国开放市场，到 1991 年外国公司的份额要达到 20%。

美国人认为，日本封闭的半导体市场是导致美国半导体竞争力下跌的最重要因素，日本半导体企业在本土垄断并赚取大量利润，以支持其技术创新活动。

1987 年，美国以外国半导体企业进入日本市场机会不均等和日本在第三国市场倾销为由，单方面宣布对从日本进口的电子产品征收 100% 的惩罚关税。

1991 年，日美再次达成了第二次半导体协定，延续前一次协议。至此日本半导体企业的全球市场份额一路狂跌，从 1986 年的 45% 跌到 2017 年的 7%，再无此前的竞争力。

在摩尔定律的鞭策下，半导体行业必须追求技术创新的速度。但从日本的遭遇来看，仅仅构建创新循环还不足以维持可持续发展的造芯体系，还需要由国家统筹，为产业建构应对外部风险和保护的护城河。

在将日本人一脚踹下深渊之后，心有余悸的美国人开始加固自己的“梯子”。

4. 美国人的自我反省

20 世纪 80 年代美国被超越，半导体产业向日本转移，这个过程中孕育出一种半导体发展的新型模式。

当时美国半导体企业多聚集于硅谷，其发展模式大致是风险资本为创业公司注入资金，创业

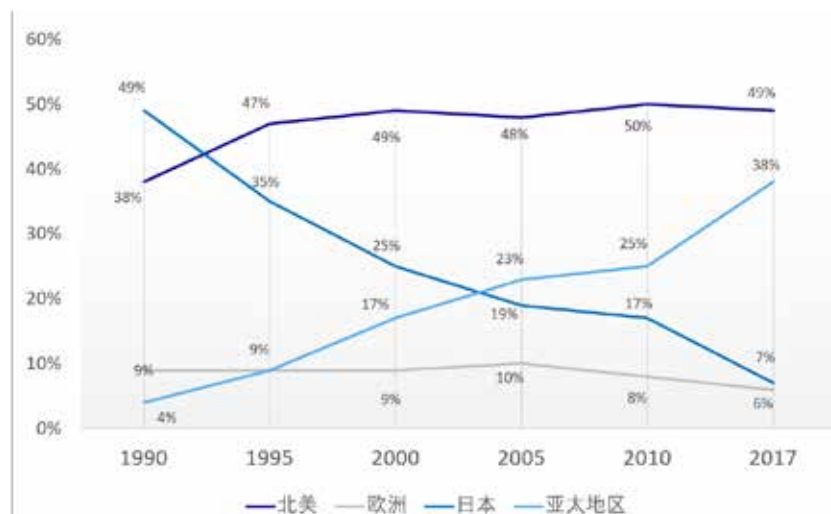


图 3 半导体产业市场份额变化

公司获得资金支持后，进行持续的技术创新获得市场，提升公司估值后上市，风险资本卖出股票获利，然后退出。

这种模式有助于解决半导体企业初创时的资金问题，效率很高，但不利于各个公司之间整合资源，大家都把对方看做同一赛道上的竞争对手。

日本人首先找到了一种截然不同的模式，国家统筹组建技术共同体，各半导体企业对外竞争，对内合作。超大规模集成电路计划整合了日本半导体产学研资源，打破企业间的壁垒，聚集了当时国内半导体最顶尖的科学家和工程师，这群人集智集力、在一起规划未来的发展路线，往往能产生颠覆式的创举。

如果说美国半导体企业像是一群各有所长的超级英雄，日本半导体产业则像是一群武士为抗击外敌聚在一起，研习新的武学招式，并且共享经验。

1982年，美国数十家半导体企业也意识到了这一问题，结成技术共享联盟研发 DRAM，然而为时已晚，在美国企业刚刚研制出 256KB DRAM 时，日本产品已经批量上市了。

依托这种技术共同体的模式，半导体行业能够集中优势资源面向未来布局，攻克的不仅是当下的主流技术，还有未来的新技术。

当时的日立把一整幢楼用于存储芯片研发，第一层人员研发 16KB，第二层人员研发 64KB，

第三层人员研发 256KB。时任 Intel 生产主管的安迪·格鲁夫沮丧地说：“从日本参观回来的人把形势描绘得非常严峻。”

日本人这种面向未来的研发布局就像是传说中的三刀流，让习惯了单手舞刀的硅谷企业毫无招架之力。

经历挫折后，美国终于认识到突破未来技术的重要性。1984年，《国家研究法案（NCRA）》颁布，开始启动半导体制造技术科研联合体（Sematech）计划，国家驱动 IBM、TI 和 HP 等十几家企业联合成立了半导体制造技术科研战略联盟（Semiconductor Manufacturing Technology Research Consortium，SMTRC）。



图 4 Sematech 计划成员

SMTRC 位于德克萨斯州的奥斯汀 (Austin)，经费一半由成员企业提供，另一半由美国国防部高级研究项目局 (DARPA) 提供，研究成果由各成员企业和美国政府共享。期间共计有 700 名研发人员参加，每年投入 2 亿美元，主攻 IC 制造与设备工艺。

除了规模化的投入，精巧的组织设计也推动了共同体的成立。共同体的聚合都需要一个“带头大哥”，在日本是垂井康夫，美国人则推出了有着“硅谷之父”盛名的罗伯特·诺伊斯。现在看来，这在当时无疑是一个明智的决定。

作为一名杰出的科学家，诺伊斯在技术上有能力将各成员不

成熟的研发意向，整合成切实可行的研发方案。先后创办仙童半导体和 Intel 的经历，已经让诺伊斯成长为具有投资和管理意识的企业家，谙熟企业的经营规律。而他“硅谷之父”的地位，足以赢得组织成员们的尊重和信任。

共同体的管理，由企业的技术专家和管理人员共同负责，防止科研与市场脱节，并定期召开会议，研判产业与技术发展的当下和趋势，这种高质量的信息资源对于小企业成员是宝贵的财富，实现了最新的信息和技术在行业的扩散共享。

在 SMTRC 的引领下，美国半导体产业到 1993 年已经很大程度上恢复了竞争力。1996 年，美

国实现全球第一块 12 寸晶圆的突破，继续引领集成电路行业。

5. 中国芯片产业的“梯子”

没有一个国家拥有 100% 完整的芯片全产业链条。解决现实的卡脖子问题，不能完全靠关起门来搞自主创新。这样即便造出来，代价也必然巨大，而且还可能误入歧途。

在各项优惠政策的刺激下，近年来如雨后春笋般涌现的芯片制造项目不仅出现了重复建设的问题，甚至还出现了不少烂尾工程，多个 12 英寸项目和 8 英寸项目爆雷。全民造芯的滚滚热浪

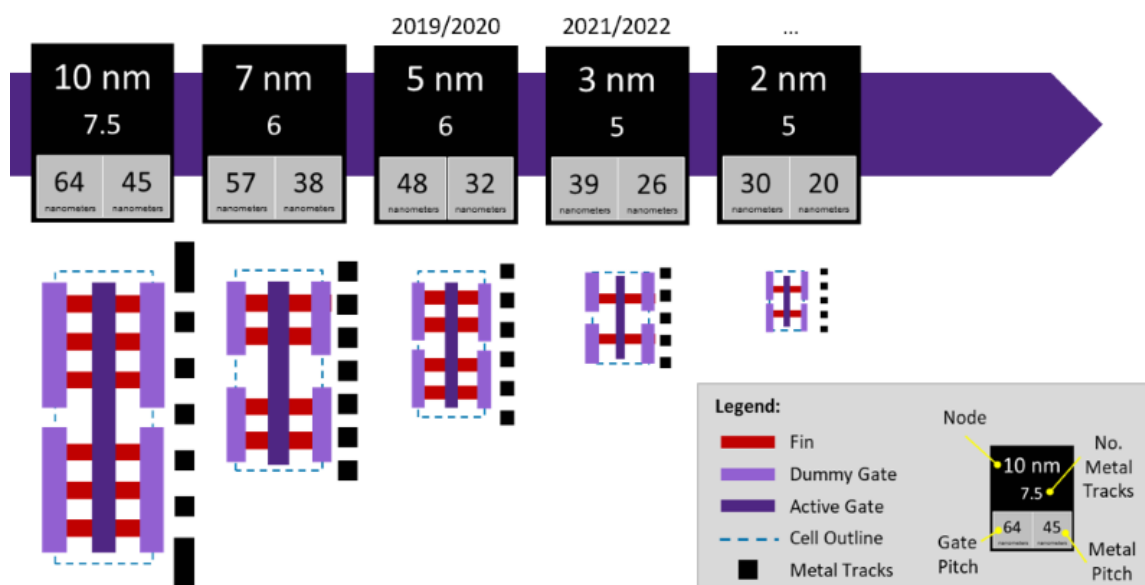


图 5 芯片制程的演变
EE Times: Path to 2nm May Not Be Worth It | EE Times
(“发展 2nm 或许不值得”)

里，需要更多理性规划，避免不计成本的盲目追赶。

美国在半导体产业初创时期，成功构建的可持续性创新循环或许值得我们借鉴。“可持续”指一种可以长久维持的过程或状态，这一概念最初被用于环境保护领域，后被广泛运用于经济学与社会学。对于半导体企业来说，可持续性发展就是进入“技术创新—产品升级—降低成本—市场应用—企业盈利”的良性循环。

企业先要活下来，才能实现技术的持续突破。2019年，中国集成电路设计企业数量为1780家，IC设计销售收入超过3084.9亿元，在全球收入中占比10%，但是其中盈利企业仅780家。

中国工程院院士吴汉明认为，商业成功是检验技术创新的唯一标准，成套工艺是芯片技术水平的集中标志。研究是手段，

产业是目的。

新基建的浪潮掀起，人工智能、5G、工业物联网、新型汽车电子等产业也给集成电路的发展带来了新机遇。以人工智能为例，其芯片往往基于某一种特定应用场景进行开发，中国丰富多样的应用场景，反哺终端企业创造各种独一无二的解决方案。

摆在中国芯片产业当前的关键问题是：如何在可持续“造芯”的基础上，逐步赢得在全球产业分工制衡的能力，并抢先布局未来？

一方面，需要继续加强基础研究和培养本土半导体产业人才是根本，这是一个长期持续的工程。另一方面，需要加强在设计、设备方面的全球合作，而在关键的材料和制造工艺环节，重点支持若干团队进行集中攻关。

当前摩尔定律已经走到了历

史的节点，芯片制程推进到2nm之后，其它技术路线必然成为产业的突破口，能否在第三代半导体产业中占据主导地位，关键是看手中是否掌握领先行业的前瞻性、颠覆性技术。以面向未来的碳基芯片为例，北大教授张志勇、MIT教授Max M. Shulaker等中外多支团队也都在集中攻关。谁能跑到前面？现在很难说得清楚。

但是提前布局颠覆性技术，也许会帮我们架起一把从背面登山的新云梯。

作为全球最大消费电子产品生产国、出口国和消费国，庞大的市场仍然是我们最大的优势。中国的芯片产业，除了要构建好下游的应用生态，还要在一些领域做到无可替代。

无可替代的含义，就是要在每个关键山头都有能力搭建自己的梯子，还不能被别人踢掉。MT

参考文献：

- [1] 陈芳，董瑞丰.《“芯”想事成：中国芯片产业的博弈与突围》，2018
- [2] 冯锦航，郭启航.《芯路，一书读懂集成电路产业的现在与未来》，2020
- [3] 朱贻伟.《中国集成电路产业发展论文集》，2006
- [4] 张立恒，刘莲芹.《芯跳不止——身边的集成电路江湖》，2015
- [5] 先进半导体材料及辅助材料编写组.《中国先进半导体材料及辅助材料发展战略研究》，2020
- [6] Mariana Mazzucato.《创新型政府：构建公共与私人部门共生共赢关系》，2019
- [7] 周立.《中美贸易争端：技术封锁与保护主义》，2018
- [8] 谢志峰，陈大明.《芯事：一本书读懂芯片产业》，2018

生物医学设备：4D 打印的新兴前景



美国机械工程师学会

编者按：本文为美国机械工程师《机械工程》杂志的专题文章，探讨了4D打印技术在生物医学领域的应用前景。

引言

3D打印已经从一种新奇的事物迅速发展成为一项成熟的主流技术。现在，从建立新产品原型、生产备用机械零件到建造新房屋等一系列工作中，都已开始应用3D打印。

在3D打印不断发展的同时，我们现在也看到了4D打印时代的来临，其中第四个维度就是时间。在4D打印中，物体在打印后会以可控的方式发生变化——这种能力是对3D打印潜力的进一步拓展。

在医疗行业，4D打印可以改善从医疗设备到组织植入物的一切事物。在很大程度上，这项技术仍处于早期阶段，而且尚在研究当中。但4D打印发展极为迅速，

在某些情况下，这项技术已经在改变并拯救生命。而在不久的将来，4D打印有望做得更多。

一、4D 打印的兴起

目前，4D打印仍然属于新兴技术，这个词对不同的人来说可能有不同的含义。但从大多数定义来看，4D打印是3D打印的延伸，3D打印是增材制造工艺，通常是通过逐层叠加材料，将计算机设计文件构建成物体。当该物体受到光、热或化学反应等外部刺激后，能够以可预测的方式改变其形状或属性时，就是4D打印在发挥作用。

2013年，麻省理工学院(MIT)自组装实验室负责人斯凯拉·蒂比茨(Skylar Tibbits)在TED上做了一场关于该主题的演讲，

首次提出4D打印这个概念。他向听众展示了一串材料，将其放入水中时，会变成字母MIT，而另一串材料则会自行组装成一个立方体。例子虽然很简单，但意义却很明显。蒂比茨后来说，有了4D打印，“你不仅能打印静态的物体，还能打印出会变形的物体。”

从那时起，4D打印概念引起了人们的极大兴趣，观察者们纷纷猜测是否能开发出可以巧妙改变形状以应对冰雪路面的汽车轮胎、可以根据水流变化进行调整的水管，以及可以自行组装的组合家具。正如德国弗莱堡大学(University of Freiburg)工艺技术实验室/尼普顿实验室(NeptunLab)负责人巴斯蒂安·E·拉普(Bastien E. Rapp)2019年对记者说的那样：

“现在，我们不仅可以打印物理结构，还可以打印功能。就像在材料中嵌入一段代码一样，一旦触发，它就会执行您编写的代码。”

对于医疗界来说，4D 打印具有特殊的吸引力。首先，使用该技术对医疗行业来说并非极大的飞跃，因为无论是指导外科医生操作的器官模型，还是定制的假肢，又或是使用活体细胞和其他生物材料作为“墨水”来打印组织的生物打印，3D 打印技术已经在该行业得到充分利用。

很多人将 4D 打印看作是这类活动提升至新水平的机会。身体是一个不断变化的平台，会因运动、成长、年龄、损伤和环境而改变。能够适应这些变化的物体——也许是经过调整便可以适应血管的支架，或者是能够随患者一同生长的设备，对于正在寻找方法治疗患者的医生和研究人员来说，似乎是一个不错的选择。

甚至让医疗设备到位的过程也可能被简化。“我们认为 4D 打印最大的应用领域之一是微创手术设备的开发，”佐治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology) 和埃默里大学 (Emory University) 联合项目华莱士·H·库尔特 (Wallace H. Coulter) 生物医学工程系教授斯科特·霍利斯特 (Scott Hollister) 说道，“所以，与

其让外科医生做开放性手术将设备植入心脏，不如让心脏病专家用导管将设备送到指定位置。”

这种方法已在一些设备上得以使用，但 4D 打印能让使用它的设备和治疗领域更加广泛。“如果能把某种东西折叠成一个较小的形状，然后，当它到达体内的目的地时，通过加热或其他刺激，让它展开成预定的设计形状，那么就可以避免做大型手术了，”霍利斯特说道，“这样做使得住院时间更短，恢复更快，感染风险也更小。”

二、让儿童重获新生

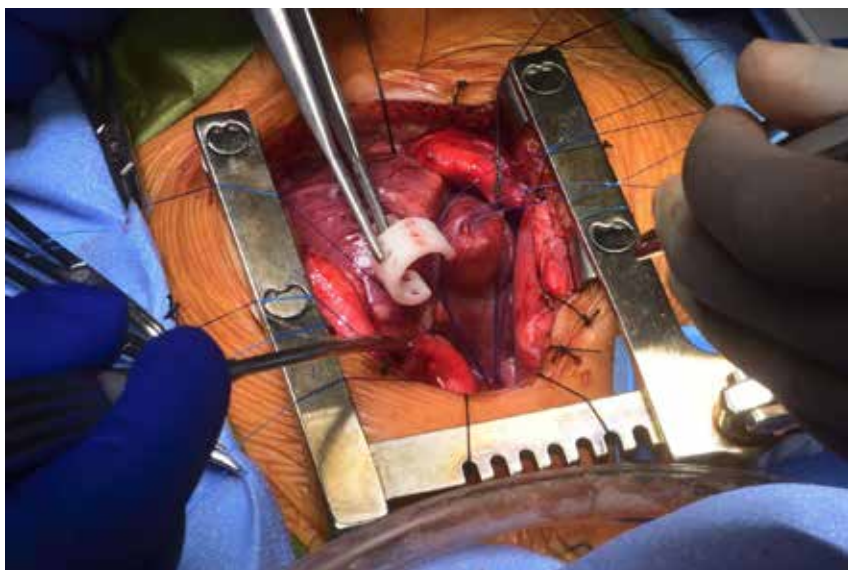
当研究人员还在从多个方面努力了解 4D 打印在医疗领域的潜在应用时，霍利斯特和他的同事已将该项技术用于实际应用。他的团队与亚特兰大儿童医疗保健中心 (Childrens Healthcare of Atlanta) 和密歇根大学 (University of Michigan) 的医生合作，一直使用 4D 打印来治疗儿童气管的先天性问题。例如，有一种叫做气管软化症的疾病，即婴儿气管中的软骨未能正常发育；因此气道软弱“塌陷”，无法保持气道通畅，使儿童呼吸困难。通常情况下，这种情况会在三岁左右得到改善——但对于一些孩子来说，需要尽早医治，医生可能需要进行气管切开术，并给这些孩子戴上呼吸机以维持

生命。或者，他们可能会通过手术植入一个夹板，以保持气道畅通。然而，这些设备通常是由戈尔特斯防水透气面料 (Goretex) 等材料制成，霍利斯特解释说。因此，虽然这些材料可以支撑气管，但随着时间的推移，其固定的尺寸和形状会限制气管的自然生长。这就导致这些儿童必须进行额外的手术，放入更大的夹板，最终在气管功能恢复正常后移除最后放入的夹板。

为了解决这个问题，霍利斯特和他的同事们开发了一种 4D 打印夹板，该夹板具有某些独一无二的特性。通过对患者进行 CT 扫描，他们创建了气管的 3D 计算机模型，而这个模型反过来又被用来开发虚拟夹板的 CAD 模型。“我们针对患者的解剖结构单独设计夹板，”霍利斯特说道，“然后我们使用激光烧结技术 3D 打印夹板，从而构建材料层。”

打印出来的夹板本质上是一个空心的 C 形管，医生将其缝合到气管外侧，夹板可将组织固定在适当位置，以保持气道通畅。随着时间的推移，夹板会对气管组织生长所产生的压力做出反应。“我们这样设计，它就可以让气道生长，并随之生长，”霍利斯特说，“随着气道的生长，气道会与夹板接触，它继续生长就会推动夹板打开。”

夹板的成分也会随着时间的推移而改变。“我们都是采用能



逐渐降解进而从体内排出的材料来打印这些夹板，所以日后无需再进行其它手术，”霍利斯特说道。之所以选择聚己内酯（PCL）这种材料，是因为它需要几年的时间才会慢慢溶解，可以让气管有时间生长并自我修复，最终让儿童能够正常呼吸。

2012年，首个4D打印夹板被成功用于救治一名儿童，挽救了他的生命。自那时起，4D打印夹板被用于治疗其他一些患有气管软化症或支气管软化症的儿童，支气管软化是一种与通往肺部的支气管有关的类似病症。还被用来帮助一名出生时就没有气管的儿童，因为他需要进行大面积重建手术。

这些夹板的制作快速且成本相对低廉。霍利斯特的团队在亚特兰大实验室每天可打印多达200个夹板。这一点很重要，因为他们通常需要多个夹板——有

些用于该批夹板的机械和杀菌测试，有些则用作手术中的“备件”。“我们为外科医生提供的夹板数量，多于他们在手术室里实际需要的数量，就是以备不时之需，”他说，“尽管我们是基于患者的CT扫描进行的设计，但以前手术留下的疤痕组织可能会有我们看不见的问题，或者图像本身的分辨率有问题。”为了安全起见，团队手头可能有多达10种不同尺寸的夹板供外科医生选择。

这一能力也凸显了4D打印的另一个重要优势。霍利斯特认为，能够以更经济高效的方式来生产定制化设备，从而治疗成长中儿童的问题，这可能是“医学的范式转变”。这是因为它使得为罕见与独特的问题制造设备一事在经济上具有可行性——这些条件可能还不足以代表一个足够大的市场，让那些使用传统方法的大型公司认可开发这类设备的

合理性。

三、让修复更高效

与此同时，其他研究人员则在更基础的层面上开展工作，并专注于利用4D打印技术修复人体组织。2019年秋天，美国国家自然科学基金会（National Science Foundation）授予乔治华盛顿大学（George Washington University, GWU）和马里兰大学（University of Maryland, UMD）的研究人员一笔经费，用于研究如何利用4D打印技术控制干细胞向心肌细胞的分化。乔治华盛顿大学机械与航空工程系副教授张丽洁（Lijie Zhang）和马里兰大学费舍尔生物工程系教授约翰·费希尔（John Fisher）等研究人员正在研究以下领域：智能结构或支架，它们可作为控制细胞行为的平台；生物墨水，这是3D生物打印中使用的由活体细胞制成的物质；以及干细胞，他们正在将干细胞培育成心脏组织。通过这项工作，张教授说：“我们在实验室里使用4D打印制造了一个智能心脏组织贴片。”

张教授关于4D打印的研究涉及多种器官和组织类型，她解释了4D打印如何帮助解决心血管问题。为了修复受损的心脏，研究人员有时会将干细胞注射到器官中。张教授说：“但是心脏

的泵送往往会将这些细胞挤出心脏，导致这些细胞死亡。”她和团队正在研究的方法是创建一个3D打印支架，将干细胞固定在适当的位置，直到它们变成功能性心脏细胞——理想情况是，创建一个活的心脏组织贴片。她和团队使用长波近红外光，这种光对活体组织的伤害比其他形式的光更小，能让材料变得有弹性，材料到达指定位置后，就可以拉长和收缩。

贴片可以使用激光3D打印的立体平版印刷技术来构建，激光在新型智能支架材料的液体形态中“绘制”图案，一部分完成后再继续下一部分，从而创建一个具有所需形状的固体结构。打印出来的结构可根据光线或温度的刺激自动改变形状。

张教授说，她正在开发的技术可用于修复涉及神经和脑组织的其他类型的问题。该技术也有可能加强目前3D生物打印心脏等器官的方法。她说，虽然这种打印的心脏已被制造出来，“它们只是具有心脏的形状，但不具备完整的功能”。她认为目前正在研究的4D打印材料和技术可以使这些制造出来的器官实现泵送和血液流动等功能，使它们对药物的测试更有价值。她还表示，有朝一日，这项研究可能会利用患者自身的细胞，4D打印出具备正常功能的心脏后植入人体。

“4D生物打印的概念是如此

之新，以至于它在组织工程中开辟了一个很少有人想象过的充满可能性的领域，”马里兰大学的费希尔教授在宣布美国国家科学基金会（NSF）经费资助时讲道，

“虽然科学家和工程师们还有很多工作要做，但4D生物打印组织有朝一日可能会改变我们治疗小儿心脏病的方式，甚至为研究捐赠器官的替代品铺平道路。”

四、探索新型材料

如今，4D打印要得到更广泛的应用，其发展并不在于打印过程本身，更多的是在于打印的材料。“材料开发确实是将这项技术推向前沿所需的最大进步领域之一，”霍利斯特说，“这一领域具有广阔的开发潜力。”

考虑到这一点，霍利斯特的团队开发了一种叫做聚（甘油—十二烷二酸）或PGD的形状记忆材料。“你可以把它打印成一种形状，然后把它折叠或变形成为另

一种状态，这样就可以很容易地把它输送到体内，”霍利斯特说，“当它升温至体温时，就会恢复最初的形状。”

这种材料有可能在各种情况下发挥作用，例如修复心脏壁的缺陷。现在通常是用镍钛贴片来进行修复，该贴片也可以通过导管输送。然而，他说，“那是金属材料，所以它比心肌硬得多，而且装置一旦腐蚀，就会导致并发症和出血。而且它是永久性的，所以一旦放进去，它就会一直留在心脏里，除非把它取出来。”霍利斯特表示，通过使用PGD，“我们的目标是制造一种与心肌硬度一致的装置。当它升温至体温时，它的作用更像橡胶”。就像气管夹板中使用的聚己内酯材料一样，“它可以被吸收，所以一旦它到位，组织就会在上面生长，材料会消溶，这样心脏中就只剩下天然组织了。”

开发新型可打印材料是维墨公司（Dimension Inx）的核



心业务，这家芝加哥的初创公司是从西北大学（Northwestern University）的实验室工作中发展起来的。该公司制造用于修复和使组织及器官再生的材料。通常情况下，该领域的公司会制造一些固定的结构，将活体细胞“种植”在其中或其上，然后将其放入人体，以修复某个孔或其他问题。“我们的不同之处在于，我们的产品在植入后可转化为活体组织，而无需事先添加细胞，”该公司联合创始人兼首席技术官亚当·亚库斯（Adam Jakus）博士说道。

例如，维墨公司制造的材料之一“超弹性骨”（Hyperelastic Bone）是一种具有弹性的生物活性陶瓷。这种合成材料主要成分是磷酸钙，与人类骨骼中发现的陶瓷类型相同。然而，该材料生产出来具有弹性和柔性，医生可将其压入合适的位置，切割成合适的尺寸，将其缝合到位，等等。

亚库斯指出，该材料有多种潜在用途。“在一个复杂的儿科病例中，颅骨底部可能会有创伤或先天缺陷，在过去，这些创伤或先天缺陷会用一个不会随患者生长的永久性结构来支撑新细胞，以此进行治疗。现在超弹性骨可用于此类修复。”这种治疗无需添加细胞或使用化学物质来刺激组织修复。相反，人体的细胞会与材料融合，并生长成其形



状。“植入后，随着时间的推移，这种材料会转化为骨骼，因此它会随患者一起生长，”亚库斯说，“几年后，如果你对该材料被植入的位置进行X光或CT扫描，你是看不到它的。因为它长成了患者的新骨骼。”

用该材料制作植入物相当简单，通过简单的喷嘴挤出法在室温下就可以用维墨公司称之为“3D绘画”的工艺进行3D打印。3D绘画工艺不仅可以制造出形状和尺寸合适的植入物，它也是超弹性骨发挥有效性的关键。“这种打印技术让我们引入了大量的三维孔隙，这几乎是使用传统制造方法无法实现的，”亚库斯说，“这种多孔性对于材料能够转化并与人体完全融合，以及真正成为4D打印材料非常重要。”

乔治华盛顿大学的张教授也认为，新型智能生物材料的开发是4D打印的前沿领域。针对她实验室正在研究的心血管贴片，研究人员开发了一种名为“智能大豆油环氧丙烯酸酯”或SOEA

的材料，这种材料适合基于激光的3D打印工艺的要求，并且可根据光线变化来改变其特性。SOEA材料还被用于制造小型、扁平的星形物体，当受到不同的刺激时，这些物体会折叠起来，然后展开，宛如花朵绽放。这一概念可用于拓展神经再生的途径，或将药物输送到靶器官。

展望未来，张教授表示，开发更多类型的适合3D打印工艺的材料将有利于4D打印的发展。此外，她补充道，十分重要的一点是我们要开发出更多的方法，来管理打印物体的变化过程。“例如，我们可以利用热量、光线或磁性来改变材料的形状，但我们需要更精确地控制其智能结构，所以我们正在寻找更好的机制来实现这一目标。”

五、保持实用性

4D打印面临的所有挑战并非都是技术性的。关于人体使用的材料和设备的规定自然特别严

格，这也体现出监管者难以跟上快速发展的技术。例如，当4D打印的气管夹板首次用于挽救一名儿童的生命时，该团队必须获得美国食品药品监督管理局（FDA）的紧急批准才能使用该设备，霍利斯特提到，“因为没有它，患者就无法存活”。

“现在非肌肉骨骼组织靶向材料的很多障碍都是监管方面的，”亚库斯说，“对于任何类型的4D打印技术，美国食品药品监督管理局都还没有非常明确的监管途径。问题是，以往那些指导方针和标准是为那些植入后不应发生改变的东西制定的，比如钛植入物。”对于传统医疗设备而言，“改变没有益处，”他说，而对于4D植入物来说则有益处。

“因此，需要制定新标准。幸运的是，相关标准组织已经意识到了这一点，他们正在努力。”

当研究人员寻找新材料和新方法时，他们不仅要关注监管机构，还要关注底线。对于亚库斯来说，新材料需要“方便手术，成本效益也要高”，他说，“这一点我们从一开始就牢记于心，因为就现在的医疗系统而言，一旦某样东西变得稍微不具有成本效益，它就不再实用了。”

张教授补充说，我们还有很多工作要做，挑战依然存在。但4D打印在医疗领域的前景广阔，潜在效益十分引人注目，她说：“4D打印在医疗领域的应用前景

非常广阔。”

补充案例 1:

利用 4D 血流核磁共振图像 (MRI)，设计人员 3D 打印出功能性心脏模型。

3D 打印还具有一种潜力，那就是有效地将随时间推移所发生的变化可视化。例如在科罗拉多州，技术人员和医生正在将血流的 4D 核磁共振图像与 3D 打印机相结合，制作出呈现多种颜色的功能性心脏模型。

从一次心跳结束到下一次心跳开始的一个心搏周期内，4D 血流扫描对血液流经心脏各部分的速度进行彩色编码，医生由此可以更加便捷、准确地看到问题所在。这有助于他们精确定位问题，并制定合适的手术计划。

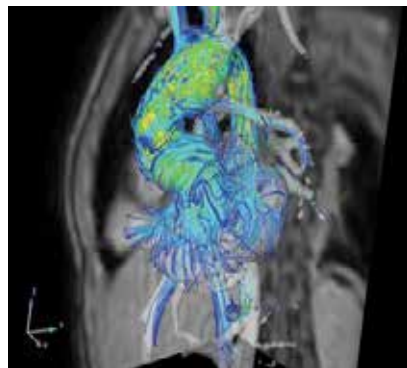
科罗拉多儿童医院放射科医生洛娜·布朗 (Lorna Browne) 说道：“这并不是静态的过程，你可以看到血流的流进流出。”4D 血流扫描为胸腔内的每一条主要血管扫描图像。医生借此获得患者的完整信息，而标准的核磁共振扫描不能提供这些。“解释起来也比较方便。”

该打印模型基于 Stratasys 公司的数字解剖学解决方案，Stratasys 公司表示，方案中包含的一套新材料更接近实际的组织密度，而不是一个刚性模型。Stratasys 公司医疗部门负责人斯科特·德里卡基斯 (Scott Drikakis) 说：“这主要是尝试复

制天然组织。”他补充道，该平台允许进行更大范围、更加有效的融合，以更加接近某个器官不同的物理特性。对于制定手术计划而言，该打印模型不是简单的视觉模型，而是功能模型。

德里卡基斯说，公司在开发该平台时直接与医疗设备制造商及医生合作。他还称，这有助于设计出在邵氏 A 硬度计上柔软和柔韧度为 00 的组织，这是市场上材料的最低硬度值。

德里卡基斯表示，为打印该功能模型，系统使用的是基于体素的软件和斯特塔西公司的 J750 打印机，这是 Stratasys 公司专为市场设计的第一款打印机。系统采用 3D 打印软件包 (GrabCAD) 中的新型软件，该软件包从更接近临床应用的角度定义了术语。他说：“它不会显示邵氏值，而是显示骨密度。”他还表示：“你不必计算邵氏值是多少，只需要用临床用语来描述骨密度——骨质较硬、骨质不够坚硬等。”



利用 4D 血流核磁共振图像分层，3D 打印出显示血流细微差别的心脏模型。

图片：由 Stratasys 公司提供

科罗拉多儿童医院的临床手术设计研究员尼古拉斯·雅各布森 (Nicholas Jacobson) 说道, 提取核磁共振图像文件进行打印极具挑战性。“将这些数据从电脑中逐层提取出来, 然后发送到打印机, 这是一个相当复杂的过程。”

为了准备用于打印的核磁共振图像文件, 雅各布森将流线导出为彩色的 .PLY 文件, 因为 .PLY 文件可将彩色标量数据存储在网格顶点中, 且导出速度非常快。然后将这些文件导入建模软件, 该软件将 .PLY 文件作为体素形状通道读取, 并使用颜色数据对其进行着色。“这很重要, 因为这样我们就可以控制 4D 流线的宽度, 更精确地控制颜色梯度,” 他说道。

然后, 雅各布森运用抖动算法将颜色“像素化”, 把它们分成 15×15 微米的方块, 其大小相当于从打印机中出来的一滴墨的大小。他说: “我们真的精确到了每一滴。”

因为打印机只有七种颜色, 所以有必要通过几种颜色像素的抖动或混合, 诱使人眼看到完全不同的颜色。算法可以量化材料相邻放置的比例和排列方式。

雅各布森说: “如果操作正确, 那么制造出来的效果就是看上去有超过 25 万种颜色混合在一起。”

“最后, 我们推出了一种分层算法, 即以 0.027 毫米为单

位将模型分层, 并导出 .PNG 文件。打印机像喷墨打印机一样读取 .PNG 文件。这个过程非常重要, 因为我们从中获取了诸多细节。但这仍然是新兴技术。我们做的还很少,” 雅各布森说道。

补充案例 2: 增材制造设计中的共生关系

由 COMSOL 公司提供

拓扑优化, 顾名思义, 是一种优化方法, 可以识别给定设计问题的最优拓扑。该方法无需初始设计; 相反, 只需设计人员输入一个设计空间, 一个用于分析的物理规格, 以及一个约束和目标列表。基于这些信息, 优化算法可以系统地识别出有效设计并量化其性能。

该方法具有极高的设计自由度和极高的性能, 因而被广泛应用于突破工程领域的界限。除了性能以外, 新设计所需的有限输入也使得该方法极具吸引力, 因为它可以生成具有相似规格的定



拓扑优化利用目标函数的梯度以迭代方式更新设计。图片: 由 COMSOL 公司提供

制化设计, 正如在生物医学领域中所看到的那样, 每种植入物都很相似, 但患者却不同。

拓扑优化领域与增材制造领域之间存在共生关系。一方面, 这是由于拓扑优化产生的设计往往过于复杂, 无法用传统方法制造。另一方面, 大多数设计人员都尽量利用增材制造提供的设计自由度, 因此他们乐于使用那些专为性能而自动设计的工具。因而该方法在性能、目标函数定义明确且一致的结构力学领域被广泛应用。

拓扑优化利用目标函数的梯度以迭代方式更新设计。正常情况下, 设计变量数以千计, 所以必须以有效的方式计算梯度, 唯一的方法就是利用伴随敏感度分析法来实现。

学术界的研究人员已经证明了拓扑优化在结构力学领域以外的非标准问题上的应用, 所以并不存在阻碍该方法得到广泛应用的固有限制。

然而, 对伴随敏感度分析法的推导是一项繁琐而困难的任务, 但是 COMSOL Multiphysics® 软件 (一款功能强大的多物理场仿真软件) 能够自动执行该项工作, 这使得非专业人员也能够将拓扑优化用于非标准目标函数, 而无需考虑物理学类型。现在, 拓扑优化在计算流体力学, 以及声学、电磁学等各种波传播领域都有所应用。MT

中国机械工程学会 2021 年部分活动时间表

为积极服务机械工程领域的广大科技工作者，积极助推机械工程科学技术繁荣和发展、促进机械工程科技的普及和推广、促进机械工程科技人才的成长和提高，中国机械工程学会将于 2021 年继续举办各类学术交流、培训、大赛等系列活动。

活动名称	时间	地点	联系人
3 月			
第 8 期热处理金相检验及相关标准技术培训班	2021 年 3 月 26-28 日	上海	韩冲（热处理分会） hanchong@chts.org.cn 15611919886
黑龙江省机械工程学会 2021 年度学术年会暨七届一次理事（扩大）会议	2021 年 3 月	哈尔滨	郭洪鑫（黑龙江省机械工程学会） heilongjiang165@sina.com 0451-82625471
江西省大学生焊接创新大赛暨全国大学生焊接创新大赛选拔赛	2021 年 3 月	南昌	黄永德（南昌航空大学） huangydhm@nchu.edu.cn 13767007228
中国科协智能制造学会联合体交流会暨高端论坛	2021 年 3 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
材料分会九届二次委员会会议暨新材料与产业论坛	2021 年 3-4 月	重庆	胡军（上海材料研究所） hujunww@hotmail.com 13918513675
4 月			
第六届全国增材制造青年科学家论坛	2021 年 4 月 23-25 日	西安	林鑫（西北工业大学） xlin@nwpu.edu.cn 13991921926
全国管材成形技术论坛	2021 年 4 月 24-25 日	上海	李淑慧（上海交通大学） lishuhui@sjtu.edu.cn 13621937852
智能流控第二次学术研讨会	2021 年 4 月 9-10 日	杭州	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
京津冀焊接论坛 2021 峰会	2021 年 4 月	沧州	薛海涛（河北工业大学） xuehaitao@126.com 15522510633
焊接分会青年工作者第四届学术研讨会	2021 年 4 月	天津	赵雷（天津大学） zhaolei85@tju.edu.cn 13920873508
《机械传动》期刊理事会年会	2021 年 4 月	待定	耿彦锋（郑州机械研究所有限公司） jxcd1977@foxmail.com 13633855150

活动名称	时间	地点	联系人
第十届流体传动与控制国际会议 (ICFP2021)	2021 年 4 月	杭州	张青松 (流体传动与控制分会) zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
首届全国钢结构防腐增效降本及诚信体系建设会议	2021 年 4 月	北京	段金弟 (表面工程分会) djd430030@sina.com 027-83614523
2021 全国焊接科技高层论坛	2021 年 4 月或 10 月	济南	陈姬 (山东大学材料连接研究所) chenji@sdu.edu.cn 15866726380
第十五届全国工程陶瓷学术年会	2021 年 4 月中旬	宁波	谢志鹏 (清华大学) xzp@mail.tsinghua.edu.cn 13911123685
5 月			
2021 年中国机械工程学会会员日	2021 年 5 月 21-30 日	全国	花牡丹、栾大凯 (工作总部) huamd@cmes.org, 13520128833
第 14 期材料热处理高级研修班	2021 年 5 月 12-16 日	常州	韩冲 (热处理分会) hanchong@chts.org.cn 15611919886
全国大锻件学术会议	2021 年 5 月 28-30 日	山东章丘	何文武、焦永星 (太原科技大学) hwwssl@126.com 13503542846, 15536822559
高水平论文撰写培训交流会	2021 年 5 月	成都	陈小安 xachen@cqu.edu.cn 13608306107
东部地区摩擦学学术论坛	2021 年 5 月	深圳	汤皎宁 (深圳大学) tjn@szu.edu.cn 18665820168
智能供应链的创新与实践	2021 年 5 月	北京或广州	宋海萍 (上海天睿物流咨询有限公司) Halen@logiwis.com 13817677158
管带输送机关键技术研讨会	2021 年 5 月	太原	周利东 (太原科技大学) 58616994@qq.com 13223518785
第十九届中国国际工业炉及热工技术展览会	2021 年 5 月	上海	罗培培 (中航工程集成设备有限公司) 13501208242
IFMTTI 中国工业炉及冶金产业与热工技术大会	2021 年 5 月	上海	罗培培 (中航工程集成设备有限公司) 13501208242
第二届中频感应电炉设备与熔炼创新技术峰会	2021 年 5 月	上海	罗培培 (中航工程集成设备有限公司) 13501208242
第三届中国工业炉及热工技术产业发展高峰论坛	2021 年 5 月	上海	罗培培 (中航工程集成设备有限公司) 13501208242

活动名称	时间	地点	联系人
第八届中国技术史与技术遗产论坛	2021 年 5 月	深圳	孙烈 (中国科学院自然科学史研究所) sunlie@ihns.ac.cn 15011267263
第一届国际增材制造青年科学家论坛	2021 年 5 月	西安	连芩 (增材制造技术分会) lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
第十三届全国青年表面工程论坛	2021 年 5 月	待定	段金弟 (表面工程分会) djd430030@sina.com 027-83614523
防锈、腐蚀与防护技术培训与工程师资格认证	2021 年 5 月	武汉	段金弟 (表面工程分会) djd430030@sina.com 027-83614523
2021 中国超硬材料产业发展大会暨中国超硬材料产业链博览会	2021 年 5 月	商丘 郑州 南阳	李剑 (河南省机械工程学会) 541817@qq.com 13838188257
密封技术研讨会	2021 年 5-10 月	北京 广州 安徽 宁国	张青松 (流体传动与控制分会) zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
6 月			
第 25 届北京埃森焊接与切割展览会	2021 年 6 月 16-19 日	上海新 国际博 览中心	陈晓钢 (工作总部) 010-63983928/63972304
2021 年成组与智能集成技术学术研讨会	2021 年 6 月 25-27 日	福州	郭俊康 (西安交通大学) cmes-gt@vip.163.com 18165259045
2021 年全国智能运维与健康管理学术年会	2021 年 6 月 28-30 日	无锡	杨申仲、肖颖 (设备与维修工程分会) Sbwx08@163.com 010-64019685
2021 年塑性加工行业智能制造发展论坛	2021 年 6 月 29-30 日	上海	周林 (塑性工程分会) zz_lin@163.com 13811919643
中国热处理发展论坛	2021 年 6 月 29-7 月 1 日	上海	高直 (热处理分会) gaozhi@chts.org.cn 18701500804
化学热处理技术论坛	2021 年 6 月 29 日 -7 月 1 日	上海	韩冲 (热处理分会) hanchong@chts.org.cn 15611919886
高性能零件光整加工技术产学研用高层论坛	2021 年 6 月	沈阳	金洙吉 kimsg@dlut.edu.cn 0411-84706519
生产工程分会切削学术年会	2021 年 6 月	兰州	汪莉 (成都工具研究所) toolmagazine@chinatool.net 010-83242219,13982025939

活动名称	时间	地点	联系人
表面强化热处理及表面硬化层检测培训班	2021 年 6 月	苏州	张明皓（热处理分会） zhangminghao@chts.org.cn 15116917601
MIDAS 有限元分析软件在机械专业的应用案例研讨	2021 年 6 月	武汉	余震（武汉科技大学） 475287122@qq.com 15327337823
高功率脉冲磁控溅射专题会	2021 年 6 月	深圳	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
绿色制造、节能减排青年科学家论坛	2021 年 6 月	武汉	陈万诚（湖北省机械工程学会） 3263734980@qq.com 18995554148
2021 年国际热处理新技术（广东）论坛	2021 年 6 月	东莞	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
机械史与机械工业遗产学术研讨会	2021 年 6 月	昆明	孙烈（中国科学院自然科学史研究所） sunlie@ihns.ac.cn 15011267263
物流仓储装备技术研讨会	2021 年 6 月底	上海	纪凯（物流工程分会） clei_info@163.com 13701391277
尖端材料表 / 界面结构及功能研讨会	2021 年 6 月 -7 月	太原	王孝广（太原理工大学） wangxiaoguang@tyut.edu.cn 18735385327
2021 第四届广西国际装备制造业博览会	2021 年 6 月底 7 月初	南宁	李振雄（广西机械工程学会） 1781318609@qq.com 0771-5876281
7 月			
第九届国际工程失效分析会议（ICEFAIX）	2021 年 7 月 11-14 日	上海	龚巍（材料类，复旦大学） gongyi@fudan.edu.cn 021-65642391 有移亮（机械类，北京航空航天大学） yyl@buaa.edu.cn 010-82317108
流体传动与控制分会军工工作交流会	2021 年 7 月 17 日	宁波	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
2021 旋转机械传动与控制研讨会	2021 年 7 月	北京	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
第七届亚太光学制造会议（APCOM）	2021 年 7 月	成都	崔海龙（中国工程物理研究院机械制造工艺研究所） office@ijem.org.cn 13890168134,028-65726627

活动名称	时间	地点	联系人
表面工程企业环保问题解决方案研讨会（汽车行业有色金属及其成型模具表面防护技术交流会）	2021 年 7 月	上海	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
电镀技术培训与工程师资格认证	2021 年 7 月	武汉	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
大湾区焊接技术论坛	2021 年 7 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
工业设计论坛	2021 年 7 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
2021 中国制造自动化技术学术研讨会	2021 年 7 月中下旬或 8 月	江西	魁建平（北京机械工业自动化研究所有限公司） kuijp@riamb.ac.cn 010-82285785、13661204969
2021 全国高效绿色零件近净轧制成形新技术论坛	2021 年 7-8 月	待定	王宝雨，钱东升（北京科技大学） bywang@ustb.edu.cn 13511007379
连续输送机械设计暑期培训	2021 年 7-8 月	太原	周利东（太原科技大学） 58616994@qq.com 13223518785
材料分会结构钢学术交流会	2021 年 7 月 -8 月	承德	冯毅、马鸣图（中国汽车工程研究院股份有限公司） fengyi@caeri.com.cn,mingtuma@126.com 18202379265,13808354501
现代气动技术学术论坛	2021 年 7 月 -10 月	线上	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
8 月			
第十七届全国塑性工程学术年会暨第九届全球华人塑性技术研讨会	2021 年 8 月 20-22 日	天津	周林（塑性工程分会） zz_lin@163.com 13811919643
2021 年全国堆焊再制造技术学术会议	2021 年 8 月	青岛	赵军军（山东京泰机械装备再制造有限公司） Zhaojunjun0182@sina.com 13651188220
高性能精确成形制造青年学者论坛	2021 年 8 月	秦皇岛	高鹏飞（燕山大学） gaopengfei@nwpu.edu.cn
冲压论坛学术会议	2021 年 8 月	威海	张鹏（哈尔滨工业大学（威海）） zhangpeng@hitwh.edu.cn 13656315317
第 7 届中国大学生材料热处理创新创业大赛	2021 年 8 月	待定	韩冲（热处理分会） hanchong@chts.org.cn 15611919886

活动名称	时间	地点	联系人
第 14 届中国热处理活动周	2021 年 8 月	待定	张明皓（热处理分会） zhangminghao@chts.org.cn 15116917601
第十五届全国摩擦学大会	2021 年 8 月	兰州	王道爱（中国科学院兰州化学物理研究所） wangda@licp.cas.cn 18561381332
2021 年全国青年摩擦学学术会议	2021 年 8 月	兰州	王道爱（中国科学院兰州化学物理研究所） wangda@licp.cas.cn 18561381332
2021 油液监测技术研讨会	2021 年 8 月	成都	盛晨兴（武汉理工大学） scx@whut.edu.cn 18672988909
起重机结构专业学术年会及 MIDAS 有限元分析软件应用研讨会	2021 年 8 月	河南 长垣市	余震（武汉科技大学） 475287122@qq.com 15327337823
第八届全国材料物理模拟及数值模拟学术会议	2021 年 8 月	兰州	曾建民（广西大学） zjmg2004@163.com 13737144044
第八届材料与结构强度青年工作论坛暨中国机械工程学会材料分会青年工作年会	2021 年 8 月	无锡	赵军华（江南大学） junhua.zhao@163.com 18206177312
2021 年全国失效分析培训班	2021 年 8 月	北京	有移亮（北京航空航天大学） yyl@buaa.edu.cn 010-82317108
热处理及失效分析培训班	2021 年 8 月	待定	吕东显（中国热处理行业协会） Chta@chta.org.cn 13693356546
第六届全国水液压技术研讨会	2021 年 8 月	太原	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
工业大数据系列学术研讨会	2021 年 8 月	上海	秦威（上海交通大学机械与动力工程学院） qinwei630@sjtu.edu.cn 13472790428
智能涂层专题会议	2021 年 8 月	哈尔滨	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
广东省制造业信息化发展论坛	2021 年 8 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
第六届中国大学生起重机创意大赛	2021 年 8 月下旬	武汉	纪凯（物流工程分会） clei_info@163.com 010-64002961
2021 年（第三十四届）全国机械行业可靠性技术学术交流会	2021 年 8 月中下旬	浙江	宋耘（可靠性工程分会） Machine_reliab@sohu.com 010-88301552

活动名称	时间	地点	联系人
2021 中国大学生机械工程创新创业大赛—“明石杯”第二届微纳传感技术与智能应用大赛	2021 年 8 月中下旬	烟台	赵立波、林启敬（西安交通大学） mnems@mail.xjtu.edu.cn 029-82663008
微纳制造技术分会学术论坛暨第二届三次委员会	2021 年 8 月中下旬	烟台	赵立波、林启敬（西安交通大学） mnems@mail.xjtu.edu.cn 029-82663008
硬钎料设计原理研讨会	2021 年 8-9 月	宁波	叶雷（中国航发北京航空材料研究院） yeleibiam@163.com 13810661546
第十届锻压装备与制造技术论坛暨第十二届锻压设备学术交流研讨会	2021 年 8-10 月（待定）	威海或 贵阳	徐刚（济南铸锻所检验检测科技有限公司） dysbwyh@163.com 0531-87979298
9 月			
高端装备制造技术创新学术论坛	2021 年 9 月 7 日	武汉	陈万诚（湖北省机械工程学会） 3263734980@qq.com 18995554148
2021 第七届智能制造国际（武汉）论坛	2021 年 9 月 9-10 日	武汉	陈万诚（湖北省机械工程学会） 3263734980@qq.com 18995554148
焊接力学及结构设计及制造学术研讨会	2021 年 9 月	杭州	赵雷（天津大学） zhaolei85@tju.edu.cn 13920873508
第 15 期材料热处理高级研修班	2021 年 9 月	北京	韩冲（热处理分会） hanchong@chts.org.cn 15611919886
第九届全国失效分析学术会议	2021 年 9 月	待定	梅坛（上海材料研究所） tmei@ptcai.org 13774287925
第十届全国压力容器学术会议	2021 年 9 月	杭州	朱金花（合肥通用机械研究院有限公司） cmes-cpvi@126.com
第九届全国失效分析学术会议	2021 年 9 月	待定	刘宇希（理化检验分会） yxliu@sct.org.cn 021-65556775-310 骆红云（失效分析分会） shixiaofenxi@cmes.org 010-82339905
智能气动与运载火箭地面供气技术研讨会	2021 年 9 月	北京	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
2021 流控分会青年工作年会	2021 年 9 月	江苏	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333

活动名称	时间	地点	联系人
首届国际游乐机械学术论坛	2021 年 9 月	郑州	刘然 (中国特种设备检测研究院) liuranhbu@163.com 18132267790
增材制造技术分会 2021 年年会	2021 年 9 月	西安	连芬 (增材制造技术分会) lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
2021 中国 (西安) 国际 3D 打印博览会暨高峰论坛	2021 年 9 月	西安	连芬 (增材制造技术分会) lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
“工业大数据”浙江地方行	2021 年 9 月 -10 月	乐清 新昌 萧山 滨江等	彭涛 (浙江大学机械工程学院) tao_peng@zju.edu.cn 18768174506
物流工程分会 (起重机械专业) 学术论坛	2021 年 9 月或 10 月	安徽 淮南	文豪 (太原科技大学) noveldavid@163.com 13603551042
第八届钛合金结构成形及焊接技术交流会暨第十三届超塑性学术研讨会	2021 年 9-10 月	待定	杜立华 (中国航空制造技术研究院) quietness2007@126.com 010-85701416
第五届智能制造论坛	2021 年 9-10 月	待定	贺春红 (江苏省机械工程学会) 1205435878@qq.com 13851614546
2021 中国 (漯河) 食品机械产业技术发展大会	2021 年 9-12 月	漯河	李剑 (河南省机械工程学会) 541817@qq.com 13838188257
10 月			
亚洲国际物流技术与运输系统展览会	2021 年 10 月 26-29 日	上海	魏瑜莹 (工作总部) 010-6879048 weiyx@cmes.org
2021 第二十六届工业工程与工程管理国际学术会议 (IE&EM 2021)	2021 年 10 月 15-17 日	西安	窦润亮 (天津大学) drl@tju.edu.cn 18622118008
第 25 次全国焊接学术会议	2021 年 10 月	北京	黄彩艳 (焊接分会) cws8322012@126.com 0451-86322012
2021 年塑性理论论坛学术会议	2021 年 10 月	上海	陈军 (上海交通大学)、邓磊 (华中科技大学) jun_chen@sjtu.edu.cn, denglei@hust.edu.cn 13916703288, 18986129193
第 12 届亚洲微纳米成形技术研讨会	2021 年 10 月	上海	徐杰 (哈尔滨工业大学) xjhit@hit.edu.cn 18686838886
高速率成形论坛学术会议	2021 年 10 月	长沙	崔俊佳 (湖南大学) cuijunjia@hnu.edu.cn 18670737345

活动名称	时间	地点	联系人
加热学术研讨会	2021 年 10 月	待定	曹田力 (中国汽车工业工程公司) gylzz@163.com 022-23005853
高性能传动与智能装备专业学术年会	2021 年 10 月	重庆	陈小安 xachen@cqu.edu.cn 13608306107
第十六届中日超精密加工国际会议 (16th-CJUMP)	2021 年 10 月	济南	陈善勇 shanyongchen@tom.com 13787126664
生产工程分会 (精密装配领域) 第五次会议暨学术研讨会	2021 年 10 月	大连	金鑫 goldking@bit.edu.cn 13671287342
国际制造工程会议 (IMCC2021) 测试技术分会场	2021 年 10 月	西安	袁祖荣 qzr@tju.edu.cn 18602276030
IMCC2021- 极端制造第二届青年科学家论坛	2021 年 10 月	西安	崔海龙 (中国工程物理研究院机械制 造工艺研究所) office@ijem.org.cn 13890168134,028-65726627
国际制造工程会议 (IMCC2021)	2021 年 10 月中下旬	西安	安博 (生产工程分会) 13811738808@126.com 13811738808
2021 年全国先进生产系统理论与应用研讨会	2021 年 10 月	西安	唐敦兵 d.tang@nuaa.edu.cn 13776639985
真空高压气淬低压渗碳研讨会	2021 年 10 月	苏州	张明皓 (热处理分会) zhangminghao@chts.org.cn 15116917601
第 3 期激光热处理及增材制造培训班	2021 年 10 月	杭州	张明皓 (热处理分会) zhangminghao@chts.org.cn 15116917601
无损检测分会磁粉渗透专业大会	2021 年 10 月	上海	李秀芬 xiufen_li@163.com 13519158735
无损检测分会状态监测专业大会	2021 年 10 月	上海	胡斌 Hubin@csei.org.cn 13910102891
中部地区摩擦学学术论坛	2021 年 10 月	湖北	白秀琴 (武汉理工大学) xqbai@whut.edu.cn 13871203123
2021 年摩擦耐磨减摩材料与技术学术会议	2021 年 10 月	长沙	姚萍屏 (中南大学) ppyao@csu.edu.cn 13974870567
第 18 届中国 CAE 工程分析技术年会暨第 3 届数字仿真论坛	2021 年 10 月	浙江 德清	魁建平 (北京机械工业自动化研究所 有限公司) kuijp@riamb.ac.cn 010-82285785、13661204969

活动名称	时间	地点	联系人
连续输送技术专业研讨会	2021 年 10 月	待定	周利东 (太原科技大学) 58616994@qq.com 13223518785
2021 国际结构完整性学术研讨会	2021 年 10 月	杭州	高增梁, 温建锋 (浙江工业大学、 华东理工大学) zlgao@zjut.edu.cn, jfwen@ecust.edu.cn 0571-88320763, 021-64251623
全国第 21 届残余应力学术会议	2021 年 10 月	绵阳	姜传海 (上海交通大学) chjiang@sjtu.edu.cn 13391307839
国际摩擦学研讨会	2021 年 10 月	莱州	赵延刚 (烟台大丰轴瓦有限责任公司) chinazhouwa@126.com 15166822515
滑动轴承失效分析与预防专业组秋季会员大会	2021 年 10 月	井冈山	赵延刚 (烟台大丰轴瓦有限责任公司) chinazhouwa@126.com 15166822515
第一届全国陶瓷增材制造创新论坛	2021 年 10 月	深圳	连芬 (增材制造技术分会) lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
第二届增材制造与创新设计论坛	2021 年 10 月	广州	连芬 (增材制造技术分会) lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
第 8 届表面工程国际会议	2021 年 10 月	青岛	段金第 (表面工程分会) djd430030@sina.com 027-83614523
智能制造与转型发展学术论坛	2021 年 10 月	太原	刘春林 (山西省机械工程学会) jxglkf@126.com 13303435091
工业机器人创新发展高峰论坛	2021 年 10 月	武汉	陈万诚 (湖北省机械工程学会) 3263734980@qq.com 18995554148
第十三届中部地区摩擦学论坛	2021 年 10 月	湖北 恩施	白秀琴 (武汉理工大学) xqbai@whut.edu.cn 13871203123
广东省机械工程学会环境装备分会学术年会	2021 年 10 月	广州	刘奕华 (广东省机械工程学会) gdmes@163.com 020-38732721
2021 年海南机械科技学术论坛	2021 年 10 月	海口市	梁爽爽 (海南省机械工程学会) hnjxxh@163.com 18689736251
物流工程分会年会	2021 年 10 月底	上海	纪凯 (物流工程分会) clei_info@163.com 13701391277

活动名称	时间	地点	联系人
第 21 届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会	2021 年 10 月中旬	绵阳	姜传海 (上海交通大学) chjiang@sjtu.edu.cn 13391307839
第 19 届全国特种加工学术会议	2021 年 10 月底 11 月初	杭州	徐均良 (特种加工分会) cmesdjg@163.com 0512-68321541
第二届兰亭国际院士大会、第五届先进材料国际会议	2021 年 10 月下旬或 11 月上旬	镇江	李松军、袁新华、朱脉勇 (江苏大学) Lsjchem@ujs.edu.cn 15052990380
11 月			
首届中国机械工程大会	2021 年 11 月	待定	栾大凯 (工作总部) luandk@cmes.org, 13401022489
2021 年智能运维与故障诊断专家论坛	2021 年 11 月 19-21 日	广州	肖颖 (设备与维修工程分会) Sbwx08@163.com 010-64019685
2021 中国铸造活动周	2021 年 11 月	待定	王云霞 (铸造分会) wangyunxia@foundrynations.com 024-25852311-307
2021 国际智能化焊接制造研讨会	2021 年 11 月	上海	陈华斌 (上海交通大学) hbchen@sjtu.edu.cn 13918704029
第 11 期热处理质量控制体系及生产环保要求与安全培训班	2021 年 11 月	待定	韩冲 (热处理分会) hanchong@chts.org.cn 15611919886
第九届中国企业润滑管理高峰论坛	2021 年 11 月	广州	贺石中 (广州机械科学研究院有限公司) hsz@gmeri.com 13503008119
智能供应链的创新与实践	2021 年 11 月	上海	宋海萍 (上海天睿物流咨询有限公司) Halen@logiwis.com 13817677158
管道物料输送专业会议	2021 年 11 月	浙江诸暨	李学奎、焦翠萍 (软控股份有限公司) lixk@mesnac.com、jiaocp@mesnac.com 18678953399、18553207523
第十四届全国高温材料及强度学术会议	2021 年 11 月	珠海	马显锋、赖焕生 (中山大学) maxf6@mail.sysu.edu.cn, laihsh@mail.sysu.edu.cn 13688895796, 18250166287 温建锋 (华东理工大学) jfwen@ecust.edu.cn 021-64251623
2021 年液压委员会会议及学术论坛	2021 年 11 月	徐州	张青松 (流体传动与控制分会) zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333

活动名称	时间	地点	联系人
极端制造分会第二届学术年会暨第三届极端制造高端论坛	2021 年 11 月	北京	崔海龙（中国工程物理研究院机械制造工艺研究所） office@ijem.org.cn 13890168134,028-65726627
工业大数据与智能系统分会学术年会暨第四届大数据驱动的智能制造学术会议	2021 年 11 月	广州	庄源琳（华中科技大学机械科学与工程学院） 164525566@qq.com 18771081785
冷喷涂技术及应用专题会	2021 年 11 月	苏州	段金第（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
2021 年压力容器论坛	2021 年 11 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
2021 年包装与食品工程、农产品加工学术年会	2020 年 11 月中旬	待定	赵丹（包装与食品工程分会） bnx@caams.org.cn 15210963406
中国宁波新材料与产业化国际论坛	2020 年 11 月	宁波	魏瑜莹（工作总部） 010-6879048 weiyx@cmes.org
12 月			
第六届 4D 打印技术论坛	2021 年 12 月	武汉	连芬（增材制造技术分会） lqiamt@mail.xjtu.edu.cn 029-83395187
第三届广东省暨粤港澳大湾区工业工程创新大赛	2021 年 12 月	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721
时间待定			
特种加工教材教学研讨会	2021 年 8 月下旬	哈尔滨	白基成（哈尔滨工业大学） jichengbai@hit.edu.cn 18103661699
2021 年全国喷丸技术培训班	2021 年上半年	上海	姜传海（上海交通大学） chjiang@sjtu.edu.cn 13391307839
残余应力培训班	2021 年下半年	上海	姜传海（上海交通大学） chjiang@sjtu.edu.cn 13391307839
第一届全国数字化转型产学研大会	2021 年第二季度	临港新片区	王镒杰（上海市机械工程学会） yjwang@shmes.org.cn 15601829888
第九届先进制造业大会	2021 年第三季度	待定	王镒杰（上海市机械工程学会） yjwang@shmes.org.cn 15601829888

活动名称	时间	地点	联系人
第三届全国“新特杯”数字化创新设计大赛	2021 年全国科普日	临港新片区	王锰杰（上海市机械工程学会） yjwang@shmes.org.cn 15601829888
2021 工业机器人推广与应用培训	待定	云南	杨丽敏（云南省机械工程学会） ynjxxh@aliyun.com 0871-65335474
液压元件及系统创新设计大赛	待定	秦皇岛	张青松（流体传动与控制分会） zhangqingsong@riamb.ac.cn 010-82285333
电镀技术培训与工程师资格认证	待定	广州	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
防锈、腐蚀与防护技术培训与工程师资格认证	待定	广州	段金弟（表面工程分会） djd430030@sina.com 027-83614523
广东省科协智能制造学会联合体成立暨智能制造广东（国际）论坛	待定	广州	刘奕华（广东省机械工程学会） gdmes@163.com 020-38732721

BEW2021

第25届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 25th BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR



2021年6月16-19日
上海新国际博览中心

Shanghai New International Expo Center
June 16-19, 2021

微信二维码



www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com