

内 容 提 要

本书共分6个模块,主要内容包括3D打印技术概述、3D打印机概述、3D打印成型技术、三维数据的获取及处理、3D打印机控制软件及打印操作、3D打印基本建模方法。

本书可供高等院校相关专业学生学习使用,也可用作创新实践教材,还可作为科研工作者、3D打印爱好者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

3D打印技术 / 刘青川,陈芳主编. --上海: 同济大学出版社,2020.9(2023.6重印)

ISBN 978-7-5608-8326-7

I. ①3… II. ①刘… ②陈… III. ①立体印刷-印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第176469号

3D 打印技术

刘青川 陈 芳 主编

责任编辑 叶 倩 责任校对 徐春莲 封面设计 刘文东

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 三河市龙大印装有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 11

字 数 228 000

版 次 2020年9月第1版

印 次 2023年6月第3次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8326-7

定 价 58.00元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究



CONTENTS

目录

模块一 3D 打印技术概述 1

学习单元一	3D 打印的历史	1
学习单元二	3D 打印技术的发展	3
学习单元三	3D 打印常用材料	5
学习单元四	3D 打印技术的应用	8
学习单元五	3D 打印的未来	15

模块二 3D 打印机概述 18

学习单元一	3D 打印机的基本工作原理及工作流程	18
学习单元二	3D 打印机的分类	20
学习单元三	3D 打印机的体系结构和组装方法	25

模块三 3D 打印成型技术 29

学习单元一	光固化快速成型技术	29
学习单元二	选择性激光烧结技术	33
学习单元三	熔融沉积成型技术	38
学习单元四	黏结剂喷射成型技术	45
学习单元五	薄材叠层制造成型技术	53

模块四 三维数据的获取及处理 57

学习单元一	三维数据的获取	57
学习单元二	三维数据的处理	65

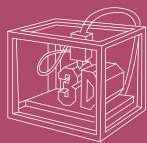
模块五 // **3D 打印机控制软件及打印操作** **72**

学习单元一	3D 打印机控制软件	72
学习单元二	3D 打印机的设置与操作	93
学习单元三	3D 打印后处理	100

模块六 // **3D 打印基本建模方法** **103**

学习单元一	3D 建模概述	103
学习单元二	3D 打印模型	110
学习单元三	逆向建模方法——三维扫描建模	112
学习单元四	Geomagic Design X 逆向建模方法	117
学习单元五	SolidWorks 建模方法	132
学习单元六	打印 3D 模型	150
学习单元七	3D 打印工作的后期处理	163

参考文献 **170**



模块一

3D 打印技术概述



学习单元一

>> 3D 打印的历史

3D 打印机出现在 20 世纪 90 年代中期，是一种利用光固化和纸层叠等技术的快速成型装置。它与普通打印机的工作原理基本相同，打印机内装有液体或粉末等“打印材料”，与计算机连接后，通过计算机控制把“打印材料”一层层叠加起来，最终把计算机上的蓝图变成实物。这种打印技术称为 3D 打印技术。

一、国外 3D 打印的历史

1984 年，Charles Hull 发明了将数字资源打印成三维立体模型的技术。1986 年，Hull 发明了立体光刻工艺，利用紫外线照射将树脂凝固成型，以此来制造物体，并获得了专利。随后他成立一家名为 3D Systems 的公司，专注发展 3D 打印技术。1988 年，3D Systems 开始生产第一台 3D 打印机 SLA-250，体型非常庞大。

1988 年，Scott Crump 发明了另外一种 3D 打印技术——熔融沉积成型（fused deposition modeling, FDM），利用蜡、ABS 树脂、聚碳酸酯（polycarbonate, PC）、尼龙



等热塑性材料来制作物体，随后成立了一家名为 Stratasys 的公司。

1989 年，C.R.Dechard 博士发明了选择性激光烧结（selected laser sintering, SLS）技术，利用高强度激光将尼龙、蜡、ABS 树脂、金属和陶瓷等材料的粉末烧结，直至成型。

1993 年，麻省理工学院教授 Emanuel Sachs 创造了三维打印（3DP）技术，将金属、陶瓷的粉末通过黏结剂粘在一起成型。1995 年，麻省理工学院的毕业生 Jim Bredt 和 Tim Anderson 修改了喷墨打印机方案，变为把约束溶剂挤压到粉末床，而不是把墨水挤压在纸张上，随后创立了现代的三维打印企业 Z Corporation。

1996 年，3D Systems、Stratasys、Z Corporation 分别推出了型号为 Actua 2100、Genisys、Z402 的三款 3D 打印机产品，第一次使用了“3D 打印机”的称谓。

2005 年，Z Corporation 推出世界上第一台高精度彩色 3D 打印机 SpeCTRum 2510。同年，英国巴斯大学的 Adrian Bowyer 发起了开发 3D 打印机项目 RepRap，目标是通过 3D 打印机本身，制造出另一台 3D 打印机。2008 年，第一个基于 RepRap 的 3D 打印机发布，代号为 Darwin，它能够打印自身 50% 的元件，体积仅一个箱子大小。

2010 年 11 月，第一台用巨型 3D 打印机打印出整个车身的轿车出现，它的所有外部组件都由 3D 打印制作完成，包括用 Dimension 3D 打印机和由 Stratasys 公司数字生产服务项目 RedEye on Demand 提供的 Focus 3D 成型系统制作完成的玻璃面板。

2011 年 8 月，世界上第一架 3D 打印飞机由英国南安普顿大学的工程师创建完成。同年 9 月，维也纳科技大学开发了更小、更轻、更便宜的 3D 打印机，这个超小型 3D 打印机重 1.5 kg，报价约 1 200 欧元。

2012 年 3 月，维也纳大学的研究人员宣布利用二维光子平版印刷技术突破了 3D 打印的最小极限，展示了一辆长度不到 0.3 mm 的赛车模型。

2012 年 8 月，美国政府宣布首个 3D 打印研究所将建在俄亥俄州。

2013 年 2 月，美国康奈尔大学研究人员发表报告称，他们利用牛耳细胞通过 3D 打印机打印出人造耳朵，可以用于先天畸形儿童的器官移植。

2013 年 3 月，美国波士顿创业公司 WobbleWorks 发起了一个项目，为号称全球第一款 3D 打印笔的“3Doodler”（3D 涂鸦手）募资。

二、中国 3D 打印的历史

1990 年，华中科技大学王运赣教授在美国参观访问时接触了刚问世不久的快速成型机。最初，王运赣教授想从最早出现的基于光敏树脂原料的光固化立体成型技术做起。然而，液态光敏树脂材料的价格太高，华中科技大学转攻以纸为原料的薄材叠层制造成型技术（laminated object manufacturing, LOM）。1991 年，华中科技大学在时任校长、已故著名机械制造专家黄树槐的主持下，成立快速制造中心，研发基于纸材料的快速成型设备。

1994 年，华中科技大学快速制造中心研制出国内第一台基于薄材纸的 LOM 样机，1995 年参加北京机床博览会时引起轰动。LOM 技术制作冲模，约比传统方法节约一半的成本，生产周期也大大缩短。

1992年，西安交通大学卢秉恒教授（国内3D打印业的先驱人物之一）赴美做高级访问学者，发现了快速成型技术在汽车制造业中的应用，回国后随即转而研究这一领域，1994年成立先进制造技术研究所。1995年9月18日，卢秉恒的样机在国家科学技术委员会（现科学技术部）论证会上获得了很高的评价，并争取到了“九五”国家重点科技攻关项目250万元的资助。1997年，卢秉恒团队卖出了国内第一台光固化快速成型机。

我国3D打印发展至今，呈现出不断深化、不断扩大应用的态势。2015—2017年，中国3D打印产业规模实现了翻倍增长，年均增速超过25%。

2017年，中国3D打印领域相关企业超过500家，产业规模已达100亿元，增速略微放缓至25%左右，但仍高于全球4个百分点。2018年上半年，中国3D打印产业维持25%以上增速，2018年整体规模达18.3亿美元。

我国的3D打印起步并不晚，像颜永年、王华明、王运赣、史玉升、卢秉恒等都是早期就加入研究的先驱。总体而言，我国在核心技术方面有先进的一面，但在产业化方面的发展还稍显滞后。

经过多年的发展，3D打印技术以美国、以色列、德国领跑全球，中国紧随其后。

2020年5月，完成首次飞行的长征五号B运载火箭上搭载了一台3D打印机，这是我国首次“太空3D打印”实验，也是国际上第一次在太空中开展连续纤维增强复合材料的3D打印实验。



学习单元二

>> 3D打印技术的发展

一、3D打印：第三次工业革命

2012年3月19日，美国总统奥巴马在卡内基梅隆大学宣布创立美国“制造创新国家网络”计划，由联邦政府主导、联邦政府和工业部门共同斥资10亿美元，逐步建立15个制造创新中心，组成创新网络。

2012年4月21日，英国《经济学人》刊文《第三次工业革命》，认为3D打印技术将与其他数字化生产模式一起，推动第三次工业革命的实现。

2012年8月16日，美国国家增材制造创新中心作为其首个“样板示范”创新中心成立。作为新技术研究、开发、示范、转移和推广的基础平台，它号称要成为增材制造技术全球卓越中心，并提升美国制造业的全球竞争力。

3D打印机的出现是对生产方式的一个革新，使设计师与产品之间建立了直接联系。

它一方面保证了设计者的想法和创意能够原汁原味地体现出来，另一方面可以大大降低制作成本（图 1-1）。而随着科技的不断进步，3D 打印机用于大规模制造变为可能。



图 1-1 3D 打印产品

二、3D 打印的发展现状

1. 3D 打印规模化发展

近年来，我国 3D 打印市场呈现出稳中向好的态势。目前中国 3D 打印相关企业中，约有 46.9% 是 2016 年以后进入 3D 打印市场的。当前中国市场的主流设备品牌包括联泰、铂力特、3D Systems、Stratasys、迅实科技等。

从区域分布来看，我国 3D 打印产业集聚态势明显，已基本形成以环渤海、长三角、珠三角为核心，以中西部部分地区为纽带的产业空间发展格局。其中，北京、浙江、陕西、湖北、广东等地产业发展较快。目前，北京市从事 3D 打印技术研发、生产与服务的企业达 70 家以上，2017 年实现销售收入约 6 亿元。

我国 3D 打印技术与国外相比虽然仍有较大差距，但随着产业的兴起，以高校科研机构为主的 3D 技术研究不断取得进步。2017 年，中国 3D 打印相关专利申请量达到 7 402 件，其中华南理工大学、西安交通大学排名前两名。

技术的进步让我国 3D 打印方案不断落地。2019 年 1 月 11 日，中国第一座使用 3D 打印技术制作的高分子材料观景桥正式亮相。未来，“3D 打印+”生态圈将会越来越完善。

2. 3D 打印个人消费

3D 打印个人消费将成为亮点。3D 打印技术会像计算机和网络一样进入普通家庭，

价格越来越便宜，性能越来越好，将融入甚至改变人们的生活。

经过多年的探索和发展，3D打印技术有了长足的进步，已经能够在0.01 mm的单层厚度上实现600 dpi的精细分辨率。国际上较先进的产品可以实现24位色彩的彩色打印。

我国有几百家3D打印企业，如北京隆源、深圳普力得科技、武汉滨湖机电、长沙华曙高科、南京紫金立德与宝岩自动化、西安铂力特等。我国的3D打印产业，整体面临核心环节对外依赖、耗材技术滞后等重大制约。在硬件方面，自动化控制系统与国外相比还有较大差距，运行稳定性有待提高。另外，我国3D打印在软件方面与国外也有很大差距。3D打印的核心在软件。软件之于3D打印机，好比大脑之于人体。缺了软件，设计师灵感再多，也变不成模型，打不出实物。作为3D打印支撑技术的软件系统，现为美国、以色列等国的几家大公司所控制，国内近乎空白。在市场方面，3D打印的需求九成在欧美，全球行业集中度极高，欧美两家龙头企业3D Systems和Stratasys已占七成份额。过度依赖外需、内需启动缓慢，使国内3D打印产业的生存现状不容乐观。从核心技术、应用材料到市场渠道，我国3D打印产业链与国外的差距还很大。

从理论上讲，能够设计或想象出来的东西，全部能打印出来。相信在未来，3D打印确实能改变几乎整个制造业。但现在，3D打印技术及其产业还很不成熟，仍然处于“拓荒阶段”，替代不了传统制造业。3D打印技术制造物体周期短，适应单件个性化需求，在大型薄壁件、蜂窝状复杂结构部件、钛合金等难加工、易热成型零件制造方面具有较大优势。但这也只是对传统工艺的补充，是“锦上添花”的技术。现在3D打印技术存在着制造成本高、制造效率低、制造精度尚不能令人满意、工艺与装备研发不充分、尚未进入大规模工业应用等问题。因此，3D打印不是万能的。现今的3D打印技术还不能打印零部件过多的物体，打印材料昂贵且有限，打印尺寸也受限制，打印出的东西在机械强度、电气属性等方面暂时都无法与传统制造业相抗衡。现今，3D打印技术只有和传统制造业的改造与提升相结合，才有更大的生存空间。



学习单元三

3D打印常用材料

3D打印材料是3D打印技术发展的重要物质基础，在某种程度上，材料的发展决定着3D打印技术能否有更广泛的应用。目前，3D打印材料主要包括工程塑料、光敏树脂、橡胶类材料、金属材料 and 陶瓷材料等。除此之外，彩色石膏材料、人造骨粉、细胞生物原料及砂糖等食品材料也在3D打印领域得到了应用。3D打印所用的这些材料都是专门针对3D打印设备和工艺而研发的，与普通塑料、石膏、树脂等有所区别，其形态一般有

粉末状、丝状、层片状、液状等。通常，根据打印设备的类型及操作条件的不同，所使用的粉末状 3D 打印材料的粒径为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ ，而为了使粉末保持良好的流动性，一般要求粉末具有高球形度。

一、工程塑料

工程塑料指被用作工业零件或外壳材料的工业用塑料，是强度、耐冲击性、耐热性、硬度及抗老化性均优的塑料。工程塑料是当前应用最广泛的一类 3D 打印材料，常见的有丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚物 (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) 类材料、聚碳酸酯类材料、尼龙类材料等。ABS 材料是熔融沉积成型快速成型工艺常用的热塑性工程塑料，具有强度高、韧性好、耐冲击等优点，正常变形温度超过 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ，可进行机械加工 (钻孔、攻螺纹)、喷漆及电镀。

ABS 材料的颜色种类很多，如象牙白、白、黑、深灰、红、蓝、玫瑰红等，在汽车、家电、电子消费品领域有广泛的应用。

PC 材料是真正热塑性材料，具备工程塑料的所有特性 (高强度、耐高温、抗冲击、抗弯曲)，可以作为最终零部件使用。使用 PC 材料制作的样件，可以直接装配使用，应用于交通工具及家电行业。PC 材料的颜色比较单一，只有白色，但其强度比 ABS 材料高出 60% 左右，具备超强的工程材料属性，广泛应用于电子消费品、家电、汽车制造、航空航天、医疗器械等领域。

尼龙玻纤是一种白色的粉末，与普通塑料相比，其拉伸强度、弯曲强度有所增强，热变形温度及材料的模量有所提高，材料的收缩率减小，但表面变粗糙，耐冲击强度降低。材料热变形温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ，主要应用于汽车、家电、电子消费品领域。

PC-ABS 复合材料是一种应用广泛的热塑性工程塑料。PC-ABS 具备了 ABS 材料的韧性和 PC 材料的高强度及耐热性，多应用于汽车、家电及通信行业。使用 PC-ABS 能打印出包括概念模型、功能原型、制造工具及最终零部件等热塑性部件。

PC-ISO 是一种通过医学卫生认证的白色热塑性材料，具有很高的强度，广泛应用于药品及医疗器械行业，用于手术模拟、颅骨修复、牙科等专业领域。同时，因为这种材料具备 PC 的所有性能，也可以用于食品及药品包装行业，做出的样件可以作为概念模型、功能原型、制造工具及最终零部件使用。

PSU 是一种琥珀色的材料，热变形温度为 $189 \text{ }^\circ\text{C}$ ，是所有热塑性材料中强度最高、耐热性最好、抗腐蚀性最优的材料，通常作为最终零部件使用，广泛用于航空航天、交通工具及医疗行业。PSU 类材料能带来直接数字化制造体验，性能非常稳定，通过与 Rortus 设备的配合使用，可以达到令人惊叹的效果。

二、光敏树脂

光敏树脂即 UV (ultraviolet ray) 树脂，由聚合物单体与预聚体组成，其中加有光 (紫外光) 引发剂 (或称为光敏剂)。在一定波长的紫外光 ($250 \sim 300 \text{ nm}$) 照射下

能立刻引起聚合反应，完成固化。光敏树脂一般为液态，可用于制作高强度、耐高温材料。常见的光敏树脂有 Somos NEXT 材料、Somos 11122 材料、Somos 19120 材料和环氧树脂。

Somos NEXT 材料为白色材质，类 PC 新材料，韧性非常好，基本可达到选择性激光烧结制作的尼龙材料的性能，而精度和表面质量更佳。Somos NEXT 材料制作的部件拥有优异的刚性和韧性，同时保持了光固化立体造型材料做工精致、尺寸精确和外观漂亮的优点，主要应用于汽车、家电、电子消费品等领域。

Somos 11122 材料看上去更像是真实透明的塑料，具有优良的防水性和尺寸稳定性，能提供包括 ABS 和 PBT 在内的多种类似工程塑料的特性，这些特性使它很适合用在汽车、医疗及电子类产品领域。

Somos 19120 材料为粉红色材质，是一种铸造专用材料，成型后可直接代替精密铸造的蜡膜原型，避免开发模具的风险，大大缩短制作周期，具有低留灰和高精度等特点。

环氧树脂是一种便于铸造的激光快速成型树脂，它含灰量极低（800℃时的残留含灰量低于 0.01%），可用于熔融石英和氧化铝高温型壳体系，而且不含重金属锑，可用于制造极其精密的快速铸造型模。

三、金属材料

近年来，3D 打印技术逐渐应用于实际产品的制造，其中金属材料的 3D 打印技术发展尤其迅速。在国防领域，欧美发达国家非常重视 3D 打印技术的发展，投入巨资加以研究，而 3D 打印金属零部件一直是研究和应用的重点。3D 打印所使用的金属粉末一般要求纯净度高、球形度好、粒径分布窄、氧含量低。应用于 3D 打印的金属粉末材料主要有钛合金、钴铬合金、不锈钢和镍合金材料等，此外还有用于打印首饰用的金、银等贵金属粉末材料。

钛是一种重要的结构金属，钛合金因具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛用于制作飞机发动机压气机部件，以及火箭、导弹和飞机的各种结构件。钴铬合金是一种以钴和铬为主要成分的高温合金，它的抗腐蚀性能和机械性能都非常优异，用其制作的零部件强度高、耐高温。采用 3D 打印技术制造的钛合金和钴铬合金零部件，强度非常高，能制作的最小尺寸可达 1 mm，而且其零部件机械性能优于锻造工艺。

不锈钢以其耐空气、蒸气、水等弱腐蚀介质和酸、碱、盐等化学侵蚀性介质腐蚀而得到广泛应用。不锈钢粉末是金属 3D 打印经常使用的一类性价比较高的金属粉末材料。3D 打印的不锈钢模型具有较高的强度，而且适合打印尺寸较大的物品。

四、陶瓷材料

陶瓷材料具有强度高、硬度高、耐高温、密度低、化学稳定性好、耐腐蚀等优异特性，在航空航天、汽车、生物等行业有着广泛的应用。但由于陶瓷材料硬而脆的特点，其加工成型尤其困难，特别是复杂陶瓷件需通过模具来成型。模具加工成本高，开发周

期长，难以满足产品不断更新的需求。

3D 打印用的陶瓷粉末是陶瓷粉末和某一种黏结剂粉末组成的混合物。由于黏结剂粉末的熔点较低，激光烧结时只是将黏结剂粉末熔化而使陶瓷粉末黏结在一起。在激光烧结之后，需要将陶瓷制品放入温控炉中，在较高的温度下进行后处理。陶瓷粉末和黏结剂粉末的配比会影响陶瓷零部件的性能。黏结剂分量越多，烧结越容易，但在后处理过程中零件收缩比较大，会影响零件的尺寸精度。黏结剂分量少，则不易烧结成型。颗粒的表面形状及原始尺寸对陶瓷材料的烧结性能非常重要，陶瓷颗粒越小，表面越接近球形，陶瓷层的烧结质量越好。

陶瓷粉末在激光直接快速烧结时液相表面张力大，在快速凝固过程中会产生较大的热应力，从而形成较多微裂纹。目前，陶瓷直接快速成型工艺尚未成熟，国内外正处于研究阶段，没有实现商品化。



学习单元四

>> 3D 打印技术的应用

关于 3D 打印的报道有很多，然而，普通读者似乎很难感受到这个新科技的成果。如今，3D 打印技术在民生领域应用也非常广泛，如展会上一些小型工艺品的制作、电影道具的制作等。总的来讲，3D 打印的应用对象可以是任何行业，只要这些行业需要模型和原型。3D 打印技术已在航空航天、生物医学、机械制造、文化教育、军事、建筑、影视、家电制造、考古、雕刻、首饰设计等领域都得到应用。随着 3D 打印技术自身的发展，其应用领域将不断拓展。

一、航空航天

航空航天是 3D 打印技术应用最广泛的领域之一，国内外均已有的成功的应用案例。

国外方面，美国 RLM 工业公司利用 3D 打印技术制造“爱国者”防空系统齿轮组件，其制造成本由原来采用传统制造工艺的 2 万~4 万美元降至 1 250 美元。通用电气公司采用 3D 打印技术制造发动机钛合金零件，使每台发动机成本节省了 2.5 万美元。波音公司利用 3D 打印技术制造了 300 多种不同的飞机零部件。英国皇家空军一架装配有 3D 打印金属部件的旋风战斗机试飞成功，其装配的 3D 打印部件包括驾驶室的无线电防护罩、起落架防护装置及进气口支架。雷尼绍公司采用 AM250 激光熔融成型工艺，用 3 小时就能制造一款航空用的双层网状结构冷却部件。

2011 年 8 月 1 日，英国南安普敦大学的工程师设计并试飞了世界上第一架“打印”出来的名为 SULSA 的无人机（图 1-2），这标志着无人机制造进入 3D 打印时代。



图 1-2 SULSA 无人机

SULSA 之所以能成为一个标志，在于整架飞机都采用了 3D 打印技术。SULSA 机身长 3 m，翼展 2 m，整机质量 5 kg，在无人机家族中只能算迷你型，一般人都能轻松举起它。SULSA 拥有高达 160 km/h 的最高飞行速度。3D 打印技术造就了 SULSA，它使得 SULSA 这种高度定制化的无人机从提出设想到首飞，在短短几天内即可实现。如果使用复合材料、采用常规制造技术，这一过程往往需要几个月时间。利用 3D 打印技术可首先在计算机上完成 SULSA 的设计“蓝图”，再用激光烧结机按“蓝图”逐层打印机身。飞机的其他配件可分开打印，再安装到飞机上。飞机上的所有设备之间使用卡扣固定技术连接在一起，因此，整架飞机可在几分钟内完成组装。

继 2015 年夏天在英国多塞特海岸进行试飞后，2016 年，SULSA 无人机正式投入实际应用，被用来帮助南极的破冰船侦察路线。

在航天领域，3D 打印技术的应用案例也越来越多。空客防务与航天事业部利用 EOS 公司的 EOSINTM 28050 制备了卫星上的支架，采用 3D 打印技术可以实现低成本单件制备，大大缩短了生产周期，使得设计人员可以优化修改设计。一颗卫星所需的 3 个支架的制备周期只需要不到 1 个月的时间，质量减轻了将近 1 kg。美国航空航天局采用 3D 打印技术制造了电子器件的冷却板、封装板、防护板等类似零件。如戈达德太空飞行中心发射的首件 3D 打印的电池安装板（图 1-3）就是采用 3D 打印技术制备的热塑性塑料聚醚酮，该器件已经用于一项测试热控器件性能的探空火箭任务。2015 年 2 月 26 日，在澳大利亚墨尔本市举行的阿瓦隆国际航空展上，莫纳什大学一个研究团队的研究人员发布了世界首款 3D 打印喷气式飞机引擎，如图 1-4 所示。



图 1-3 3D 打印技术制造的电池安装板

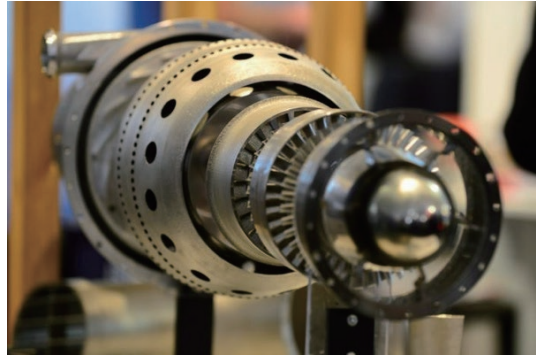


图 1-4 世界首款 3D 打印喷气式飞机引擎

国内方面，北京航空航天大学王华明教授团队的“飞机钛合金大型复杂构件激光成型技术”，在 2013 年获得国家技术发明奖一等奖。该技术在我国已投入工业化应用，使我国成为继美国之后第二个掌握飞机钛合金结构件激光快速成型技术的国家。采用该技术，我国自主研发了尺寸大且形状复杂的大型客机 C919 机头钛合金主风挡整体窗框。该团队研发的制造装备最大加工零件尺寸达到 4 m × 3 m × 2 m，是全球最大的激光快速成型装备，其制造的钛合金构件的综合力学性能已经达到或超过相应锻件的相关指标。

华中科技大学的曾晓雁教授带领的团队在 2012 年研发出的选择性激光烧结成型设备，工作台面达到 1.2 m × 1.2 m，远远超过德国、美国等国公司的同类产品，使我国在 3D 打印制造领域达到世界领先水平。该团队自主研制的 NRD-SLM-II 设备的成型尺寸可达 320 mm × 250 mm × 250 mm，成型材料包括铝基、铁基、镍基、钛基合金等。

西北工业大学的凝固技术国家重点实验室一直从事 3D 打印技术的研究，在材料成型和修复方面取得了很多成果：应用 3D 打印技术制造了航空发动机鼓筒轴；在航空发动机轴承后机匣的成型和修复方面应用激光成型与修复技术，零件已进行试验样机的装机试验。西北工业大学进行了飞机上的钛合金选型试验件生产，其样件力学性能均达到了支线飞机零件制造标准的要求，尺寸最大的零件已经达到 2.85 m。

航天器中经常希望在同一个零件的不同部位具有不同的性能，现有的方案一般是分别用不同材料制备不同的部分，再将它们焊接成理想的材料。这样，焊接的技术难度大，产品质量隐患也很大。而通过 3D 打印技术可以很方便地实现一个零件的不同区域具有不同的材料性能。美国喷气推进实验室基于选择性激光烧结技术，让打印头具备了实时更换打印粉末的能力，每一层打印使用不同的成分，制备了具有成分梯度的结构。还可以通过在基体材料上打印不同的材料制备具有成分梯度的结构。

二、生物医学

3D 打印在生物医学领域的应用更是令人称奇，正在探索的应用除了义齿和义肢外，在生物材料引领下，还将在组织工程方面大有用武之地。每个人的身体构造、病理状况都存在特殊性和差异化，当 3D 打印技术与医学影像建模、仿真技术结合之后，就能够在

人工假体、植入体、人工组织器官的制造方面产生巨大的推动效应。如肝移植、肾移植等案例，之所以过去成功率不高，关键是病人会产生排异现象。现在科学家正在利用病人体内的细胞，通过3D打印技术培育病人需要的肝脏、肾脏，这样就不会产生排异现象。

国外方面，2010年，澳大利亚Invetech公司和美国Organovo公司合作，尝试以活体细胞为“墨水”打印人体的组织和器官。

2013年，Organovo公司在一定程度上攻克了血管壁细胞的难题，成功打印出一个深500 μm的小型肝脏组织，具备普通肝脏所拥有的功能，并且能够正常存活40天。

同年，美国康奈尔大学的研究人员使用牛耳细胞打印出人造耳朵，3个月后观察发现，3D打印的耳膜（图1-5）和传统人造耳几乎与人耳完全一致。

美国加利福尼亚州一家公司已使用3D打印机成功制造了3D肝细胞，该公司在2013年4月于波士顿举行的实验生物学大会上展示了这项成果。

德国研究人员利用3D打印技术制作出柔韧的人造血管。这种血管可与人体组织融合，不但不会发生排异，而且可以生长出类似肌肉的组织。

这些成功案例表明，解决当前和今后人造器官短缺的困难将不再遥远。

国内方面，清华大学器官制造中心2004年自主研发出国内第一台细胞3D打印机，确定了几乎适合所有细胞组装的通用基质材料，并通过了教育部组织的成果鉴定，如图1-6所示。

2013年8月11日，在杭州电子科技大学“生物3D打印机”鉴定会上，中国

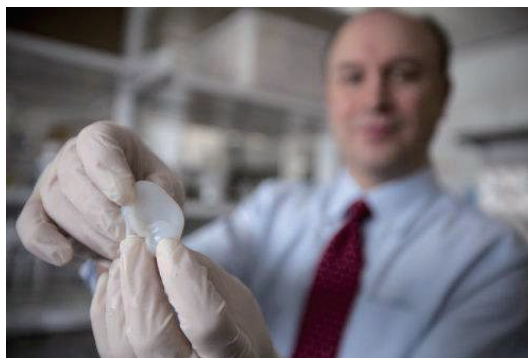


图 1-5 3D 打印的耳膜

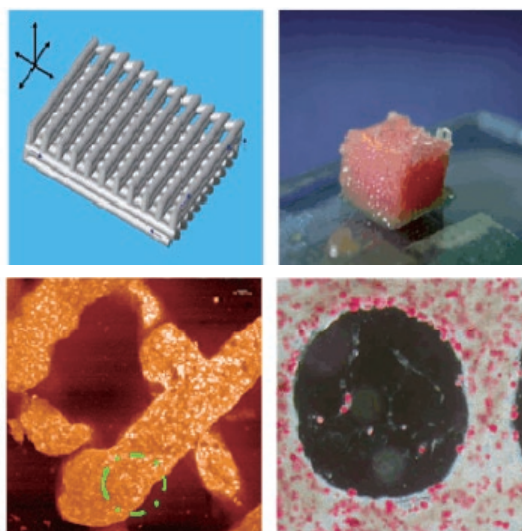
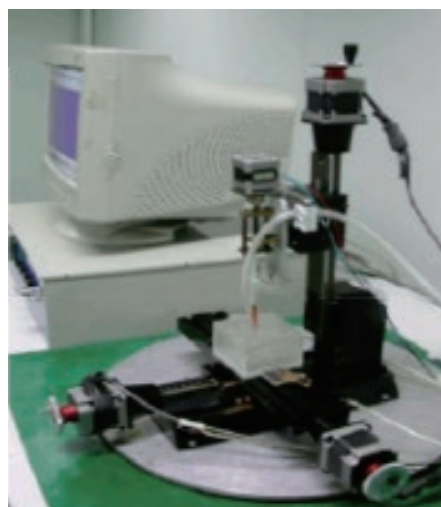


图 1-6 3D 打印设备及其相关细胞的受控组装



3D 打印技术产业联盟副理事长、杭州电子科技大学教授徐铭恩展示了一款能直接打印出活体器官的生物 3D 打印机。这也是国内首款生物 3D 打印机。在生物制造研究中心实验室里，徐铭恩现场打印出肝单元细胞，整个过程只用了半小时。

2014 年 3 月，解放军第四军医大学第一附属医院（西京医院）对 3 名骨肿瘤患者实施 3D 打印钛合金假体植入手术治疗，对他们不同部位的骨骼缺损进行修复，均取得良好疗效。其中，3D 打印的钛合金肩胛骨假体和锁骨假体临床应用为全球首例，骨盆假体临床应用为亚洲首例。同年 8 月，北京大学第三医院骨科完成世界首例应用 3D 打印技术人工定制的枢椎椎体，为一位 12 岁的小患者实施寰枢椎恶性肿瘤治疗，为肿瘤切除后颈椎结构重建技术开辟出一条崭新途径。

目前，临床上血管移植主要采取自体移植和同种异体移植，供体来源受到很大的限制。利用 3D 打印技术可以方便快速地制造出可供移植的血管和血管网修复材料。如美国哥伦比亚大学的 Norotte 教授等开发出一种基于三维自动计算机辅助沉积的生物凝胶球体 3D 打印技术，应用于无支架的小直径血管成型，体现出快速成型技术的快速、可重复和可量化等优势。美国克莱姆森大学的 Mironov 等人利用改装的喷墨打印机在一层基质材料上打印一层血管内皮细胞，形成了类似面包圈的准三维立体结构。国内方面，武汉大学中南医院血管外科也借助 3D MAX 软件三维建模，利用液态光敏树脂选择性固化技术原理制作出以光敏树脂为材料的组织工程带瓣静脉支架模型。

三、机械制造

3D 打印技术即“增材制造”，它完全不同于传统的零部件加工方法，在机械零部件制造领域引发了重大改变。过去开发一个产品，尤其是具有复杂形状的零部件，需要较多的生产设备（如专用机床、工装夹具）和专业的生产人员等，如此才能完成一个零部件的加工生产，并且产品还不一定能满足市场的需求。需要经过市场的长时间检验，对所设计的产品进行多次修改，才能满足市场需求。这样的生产过程周期较长，然而 3D 打印技术使加工人员节省了时间，也摆脱了对加工设备的束缚，一台 3D 打印机即可完成所有的制造工序，进而完成零件的生产。与传统零部件加工方式进行比较，以前结构冗杂的零部件通过 3D 打印机可以很容易地加工出来，这样需要加工的零部件的稳定性与集成度得到提高，产品的加工与设计过程得到大大简化。

大多数日常用品和机械零件主要依赖于模具制造技术，但模具制造也有其自身的局限性，生产成本高。更重要的是，模具开发的技术难度大，外观越复杂的产品，研发费用越高，做模周期越长，加工成本也越高。3D 打印技术对于模具行业来说，既是对模具这种传统行业的挑战，也给其带来了新的改革方向和发展机遇。首先，3D 打印技术可加工任意曲面的复杂产品和缩短产品研发周期，故对于生产成本高的新产品，可先通过 3D 打印制作少量产品，投放市场后观察动态，如果销量好，再通过模具制造大批量生产，这样可以避免大量制造效益不高给企业造成巨大损失的情况。其次，3D 打印技术可精确地制造出零件中的任意结构细节。在模具设计环节，先借助 3D 打印制造出零件的实体模

型,既可有效地指导模具的工艺设计,也可对零件进行装配检验,避免其结构和工艺上的设计错误。最后,随形冷却水道是高端精密模具常用的一种冷却系统,这类模具无法用常规机械加工技术制造,但3D打印技术能够制造这类复杂模具,可使模具局部降温及快冷,缩短成型周期。

汽车工业是机械工业的一个重要分支,我国早在“九五”规划中就已把汽车工业作为支柱产业。近年来国内汽车行业呈现出强劲的发展势头,已成为新的经济增长点。从2010年开始,德国将3D打印技术应用到汽车发动机等重要零部件制造中。目前,国内包括奇瑞汽车、长安福特、东风汽车、广西玉柴机器、神龙汽车等汽车企业及其零部件配套生产企业,在研发和制作缸体、缸盖、变速器齿轮等产品过程中已经开始使用3D打印技术。

传统的汽车设计建立在工业化大批量生产的基础上,这意味着消费者的差异性、个性化追求很难得到满足。在汽车界,私人定制、手工打造、限量版等词汇是属于奢侈昂贵领域的贵族消费者的,昂贵的汽车生产成本使普通大众无法享受到与众不同的产品体验。3D打印技术的出现改变了这一传统的既定思维模式,消费者可根据自身条件、动作习惯甚至不同的产品使用情景对汽车外观造型、内饰格局等方面自行设计与改变,为自己量身定做一款真正独一无二的汽车,使汽车的生产模式在不提升制造成本的基础上,从万人一式逐步转向百人一式、一人一式,甚至一人十式的全新制造模式,真正体现出“以人为本”的设计理念。

汽车行业的设计流程主要包括前期调研、设计定位、概念形成、草图方案讨论、计算机数字建模、实物立体油泥模型、工程及结构调整、样车试制、修改验证及后期的批量化生产等过程。目前3D打印技术在汽车设计整个流程中的应用,主要集中在概念模型开发、功能验证原型制造、工具制造及小批量定制型成品四个生产阶段。概念模型开发阶段引入3D打印技术,使设计师在设计初期便可将不同造型方案构建出模型,更直观地对设计合理性进行验证,为后续流程奠定基础。功能验证原型制造采用3D打印,有利于对功能的可行性进行分析和研究,避免后续工程性失误造成的返工。通过3D打印制造生产工具,不仅可以减少购置和安装设备的成本和时间,还可以制造出更加符合人体工程学理论且质量轻盈的工具。3D打印小批量定制型制成品是指设计师将多个意向设计方案确定后,打印出若干个三维立体模型,客户可直观地了解整车情况并进行准确的评价,选择出自己最满意的方案,从而提高定制化特型车辆生产领域的水平和服务优势。

由于汽车零部件产品的单价远低于军工产品,成本较高和打印材料种类较少制约了3D打印技术在汽车零部件制造上的应用。就目前阶段3D打印技术的情况,3D打印出成品汽车的所有零件,或者直接打印出一台汽车,还是不现实的。即使可以打印出来,这辆车也是消费者买不起、用不长久的。3D打印技术取代传统铸造、锻造技术进行汽车零部件的规模化生产还不现实。3D打印技术对汽车行业来说,更大的意义在于设计和开发层面。只有将其个性化、复杂化、高难度的特点,与传统制造业的规模化、批量化、精细化相结合,与制造技术、信息技术、材料技术相结合,才能推动3D打印技术在汽车零部件产业的创新发展。

四、文化教育

一些国家和组织已经开始重视 3D 打印在教育领域中的应用，并开始进行这方面的研究。

英国教育部开展了一项为期一年的试验项目，以 21 个学校为试点，将 3D 打印技术应用到数学、物理、计算机科学、工程和设计等课程中，探索 3D 打印的教学应用，推动教学创新。该项目与英国物理学会、全国数学教学创优中心（NCETM）和 3D 打印机厂商 Makerbot 合作，在“人类学习可以通过制造和分享过程产生”的理念下，为使用 3D 技术的学校提供良好的理论指导和技术支持。

美国国防高级研究计划局（DARPA）制作实验和拓展（MENTOR）项目计划在美国高中推广 3D 打印机。MENTOR 项目旨在培养高中生的工程技术，培养学生一系列的技能，并激发他们对工程、设计、制造和科学相关课程的兴趣，促进高中学龄的学生协作完成一系列的设计和制作方案，以帮助他们解决在未来设计和工程方面的挑战。3D 打印机在动手和动脑的学习中发挥着重要作用，将有助于 MENTOR 计划培养目标的实现。

意大利理论物理国际研究中心（ICTP）利用网上的免费工具将数学中的等值曲面转化成三维模型，并打印出可用于课堂教学的实物或者很酷的装饰品。3D 打印可以为枯燥的数学知识增添趣味性和实用性，将数字化和时尚相结合。通过技术手段，可以使数学与艺术并驾齐驱，通过数学模型构造和实现艺术设计。

上海市将 3D 打印引入基础教育领域。静安区青少年活动中心创意梦工厂配置了 3D 打印机及配套的 3D 扫描仪，定期开设相关课程，免费供有兴趣的学生学习三维设计和计算机辅助制造，打印自己设计的产品。

3D 打印厂商也关注和重视在教育领域的应用和推广。Stratasys 公司为教育行业推出了一款面向高等教育机构的 3D 打印机教育包——Object30 睿智（scholar）。该教育包具有超高的分辨率和精确度，可以制造出具有光滑表面、移动部件、细节完善的模型，适用于小空间、办公室和桌面操作，能够兼容所有类别的 3D CAD 软件。3D 打印教育包将使学生有机会开发 3D 打印项目，为高校带来快速成型模具制造体验，帮助跨学科（尤其是理工科）的师生们快速实现创新与设计理念。

五、其他

如今，3D 打印已经渗透到生产生活的各个领域，各行各业都可以考虑采用 3D 打印技术解决以前未曾解决或很难解决的问题。

下面再介绍几例 3D 打印在其他领域的应用。

1. 建筑

图 1-7 所示为 3D 打印房屋，其“建造者”是一台高 6.6 m、宽 10 m、长 150 m 的打印机。这台打印机用一种特殊的“油墨”、一台计算机、一个按键，便可以轻松打印出一栋真实的可供居住的房子，让 3D 打印建筑从此不再只是一个概念。2014 年 3 月 29 日，上海盈创装饰设计工程有限公司在同济大学逸夫楼举办了一场别开生面的建筑 3D 打印技