

▶ 普通高等教育“十三五”规划教材

3D打印技术 基础教程

于彦东 ○ 编著

*Basic Tutorial on 3D
Printing Technology*



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

3D 打印技术基础教程

于彦东 编著



机械工业出版社

作为“第三次工业革命重要生产工具”的3D打印技术在制造工艺方面的独特创新,使其不仅在航空航天、逆向设计等领域得到了发展,而且在医疗、艺术创新及教育领域也得到了推广。本书主要围绕3D打印理论知识、3D打印主流软件和动手实践案例等内容进行介绍,首先介绍了3D打印技术理论、3D打印机及3D打印专属名词与建模要求等基础知识;其次针对主流3D打印与逆向工程技术软件进行讲解,内容涵盖了三维造型软件(Creo、3D Studio Max)、3D打印软件(Simplify3D、Makerware、Cura)、STL数据编辑与修复软件(Netfabb、Meshmixer、Magics)及逆向工程软件(Geomagic Studio);最后采用案例方式进行应用知识讲解,主要包括艺术模型、浮雕3D照片及人体脊椎重建。此外,附录部分介绍了3D打印机的组装,重在培养读者的动手操作与团队协作能力。

本书可作为创新实践教程使用,也可作为大中专院校师生、科研工作者及3D打印爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

3D打印技术基础教程/于彦东编著. —北京:机械工业出版社,2017.10
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-58137-6

I. ①3… II. ①于… III. ①立体印刷—印刷术—高等学校—教材
IV. ①TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第241211号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:路乙达 责任编辑:路乙达 范成欣 商红云

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静

责任印制:李昂

北京玥实印刷有限公司印刷

2018年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·337千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58137-6

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

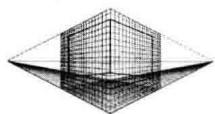
前 言

3D 打印 (3D Printing, 三维打印) 技术是快速成型技术 (Rapid Prototyping, RP) 的一种, 学术上又称增材制造。它的基本原理是以数字化模型为基础, 运用粉末状金属或塑料等可粘合材料, 通过增加材料逐层打印的方式构造物体。3D 打印技术不仅在汽车、航空航天、工业设计等工业生产领域得到了发展, 而且在珠宝、教育和医疗等领域同样得到了推广。正是 3D 打印技术在制造工艺方面的独特创新, 吸引了国内外新闻媒体和社会公众的热切关注, 被评定为“第三次工业革命最具标志性的生产工具”之一。

目前, 国内关于 3D 打印方面的著作并不多, 仅有的著作大多从 3D 打印理论知识解读、应用领域介绍和 3D 打印对未来生活的影响等方面进行探讨, 读者只能在理论层面感受 3D 打印的“高大上”, 却不能够真正地“接地气”而应用于实践。本书是一本以创新实践为写作思想、3D 打印软件应用技术为主线、动手操作与理论结合为切入点的论著。编者通过实例对软件的使用方法和操作过程进行了详尽阐述, 同时对 3D 打印过程中的问题予以了解析, 目的是让读者做到理论与实践结合、思考与创新并举, 重在学以致用。本书具有如下特点:

- 本书内容涵盖面广, 知识新颖丰富。本书涉及最新 3D 打印技术软件, 包括主流 3D 打印软件 (Simplify3D、Makerware、Cura)、3D 建模软件 (Creo、3D Studio Max)、STL 数据编辑与修复软件 (Meshmixer、Magics、Netfabb)、逆向工程软件 (Geomagic Studio) 和医学影像处理软件 (Mimics) 等。本书以 3D 打印为出发点, 结合机械设计、艺术创新、逆向工程及医学应用等典型软件进行实例讲解。
- 软件贴近实用, 实例驱动。书中软件技术结合实例编写, 着重强调内容的实用性, 不脱离实际; 讲解内容由编者实际操作完成, 读者在掌握书中内容的同时, 能够做到举一反三, 灵活运用。
- 内容通俗易懂, 言必有物。本书包含理论知识、软件应用技术与技巧分享 3 部分内容, 在详细文字讲解的基础上配有形象的图片进行辅助说明, 使得文章通俗易懂。
- 章节明确, 结构清晰。章节布局遵循了读者的学习规律, 从理论知识学习到软件技术操作, 再到动手实践。

本书首先介绍了 3D 打印的基础知识, 让读者在理论层面熟悉 3D 打印; 其次讲解了热门软件应用实例与打印操作, 使读者对 3D 打印产生浓厚兴趣; 最后附录中组装 3D 打印机的内容意在驱动读者动手实践。本书共分为 9 章, 第 1 章主要介绍了 3D 打印理论知识、应用领域及市场发展前景; 第 2 章介绍了 3D 打印机与打印材料, 包括桌面级 3D 打印机和工业级 3D 打印机以及打印材料; 第 3 章围绕专属名词含义和三维建模注意事项进行了介绍; 第 4 章对 3D 打印主流软件进行讲解, 以“3D 建模软件—STL 模型处理软件—3D 打印切片



3D 打印技术基础教程

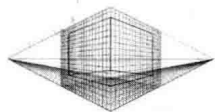
软件”流程进行结构分配；第5章从逆向工程技术出发，主要介绍了逆向工程软件 Geomagic Studio 及笔筒逆向实例操作；第6章主要以艺术模型为切入点，内容由双色模型与镂空模型的设计与打印组成；第7章详细讲解了透光浮雕 3D 照片与灯罩的制作过程，应用软件包括 Cura、Photoshop CC 和 3D Studio Max；第8章主要涉及医学影像处理软件 Mimics，并配有“人体脊椎 DICOM 图像”模型重建实例；第9章对 3D 打印问题与打印技巧进行详解，目的是保护设备、提高打印成功率、降低成本。附录为 JoysMaker-R2 3D 打印机组装实战，分别对框架、X-Y-Z 电动机、X-Y 轴、挤出机、Z 轴平台、送料机及电子器件的组装步骤进行了讲解。

本书可作为创新实践教程使用，也可作为大中专院校师生、科研工作者及 3D 打印爱好者的参考书。由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，望读者批评指正。

编 著 者

目 录

前 言	
第1章 3D 打印技术概述	1
1.1 3D 打印技术的发展	2
1.2 什么是3D 打印	4
1.3 3D 打印的应用领域	10
1.4 3D 打印创新设计	17
1.5 3D 打印的市场前景	21
1.6 习题	23
第2章 3D 打印机与打印材料	24
2.1 桌面级3D 打印机	24
2.2 工业级3D 打印机	29
2.3 桌面级3D 打印机的主要部件	30
2.4 打印材料	35
2.5 习题	41
第3章 3D 打印专属名词与建模要求	42
3.1 3D 打印专属名词	42
3.2 3D 打印对模型的要求	45
3.3 模型设计技巧	48
3.4 习题	48
第4章 主流3D 打印软件	49
4.1 3D 模型设计软件	49
4.2 STL 数据编辑与修复软件	69
4.3 3D 打印切片软件	75
4.4 习题	96
第5章 逆向工程技术及软件	97
5.1 逆向工程技术	97
5.2 逆向工程软件 Geomagic Studio	103
5.3 Geomagic Studio 逆向建模操作实例	115
5.4 习题	126
第6章 3D 打印技术创作艺术模型	127
6.1 双色模型	127



6.2 镂空模型	136
6.3 习题	147
第7章 制作透光浮雕3D照片	148
7.1 使用 Cura 软件制作浮雕照片	148
7.2 基于 Photoshop CC 创建浮雕照片	152
7.3 3D Studio Max 制作浮雕照片	156
7.4 3D Studio Max 制作浮雕灯罩	162
7.5 浮雕照片效果的影响因素	164
7.6 习题	165
第8章 人体脊椎重建模型	166
8.1 医学影像处理软件 Mimics	166
8.2 人体脊椎重建实例	173
8.3 习题	183
第9章 3D 打印问题解析与打印技巧	184
9.1 3D 打印问题解析	184
9.2 3D 打印技巧	190
9.3 习题	193
附录 3D 打印机套件组装	194
参考文献	211

3D 打印技术概述

近年来,3D 打印已经成为热议的话题,各大媒体对其报道屡见不鲜。2013 年 4 月英国《经济学人》刊文认为,传统制造技术是“减材制造技术”,而 3D 打印则是“增材制造技术”,被誉为“第三次工业革命最具标志性的生产工具”之一。2014 年 12 月,德国总理默克尔在“汉诺威工业博览会”上说过,工业 4.0 意味着未来的智能工厂将能够自行运转,零件与机器可以进行交流。智能工厂是“工业 4.0”的目标,而现实中最接近这个目标的就属“3D 打印”了。2015 年 8 月 21 日,李克强总理指出,“3D 打印是制造业有代表性的颠覆性技术,实现了制造从等材、减材到增材的重大转变,改变了传统制造的理念和模式,具有重大价值。促进中国制造上水平,既要在改造传统制造上“补课”,同时还要瞄准世界产业技术发展前沿,加快 3D 打印、高档数控机床、工业机器人等新技术新装备的运用和制造,以个性化定制对接海量用户,以智能制造满足更广阔市场需求,以绿色生产赢得可持续发展未来,使中国装备价格优势叠加性能、质量优势,为国际产能合作拓展更大空间,在优胜劣汰中实现中国制造水平跃升。”

据悉,第一台 3D 打印机诞生于 1986 年,虽然 3D 打印技术已经发展了 30 多年,但最近几年,这个神奇的“家伙”才不断在各个领域绽放出自己的光彩,出现在大众的视野里。图 1-1 所示为 3D 打印技术的应用,包括 3D 打印的汽车、3D 打印的人体器官、3D 打印的食

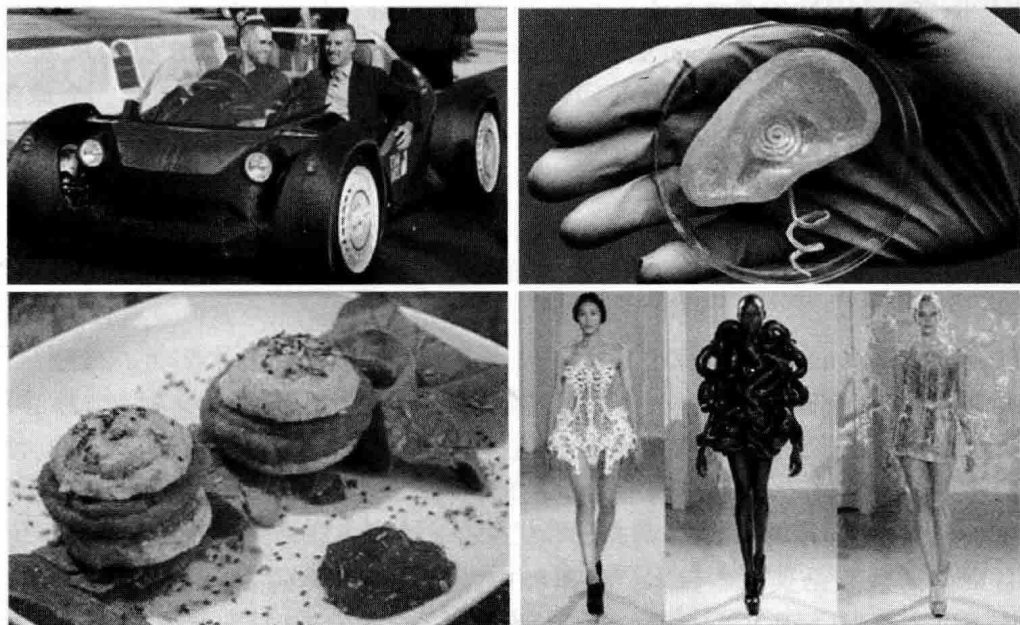
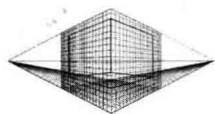


图 1-1 3D 打印技术的应用 (图片来源:3D 打印网、中国百科网、中国新闻网)



物及 3D 打印的时尚服装等。

1.1 3D 打印技术的发展

面对当今世界激烈的竞争环境，市场对于产品的设计开发、质量精度、结构复杂性、制造成本及时间都有越来越高的要求，因此以计算机技术为核心的新型设计观念和制造观念日趋发展成熟。2012 年，英国《经济学人》杂志曾发表《第三次工业革命》一文，并提出全球工业正在经历第三次工业革命，作为一项可能使全球制造业面目一新的新兴技术和第三次工业革命的重要标志之一。3D 打印技术的迅速发展已经引起全球范围内各行各业的广泛关注。

3D 打印技术的起源可以追溯到 20 世纪 80 年代出现的快速成型技术（Rapid Prototyping）。该技术采用逐层累加式的加工原理，通过建模软件构造产品的三维模型，经 3D 打印设备进行产品的直接加工制造，从而可以评估产品的可成型性与成型质量，并对三维模型进行修改与再设计，提高了产品的开发效率和成型质量，降低了新产品的研发成本和新产品的研发失败率。

近些年，3D 打印技术得到了迅速的发展，尽管在打印材料、打印精度、打印速度、支撑的去除等方面仍有待完善，但是面对这种可能深刻变革传统的生产制造模式的新兴技术，以及世界各国对此技术的投入研发，3D 打印技术的未来发展及应用市场拥有相当巨大的潜力，有望在建筑、食品、工业、医学、艺术、军事、教育、珠宝、考古等领域得到广泛应用。

1.1.1 国内外 3D 打印技术的发展

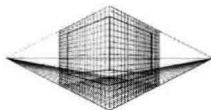
3D 打印技术，正如这种新兴的成型技术本身的特点一样“年轻且具有活力”。历史上的第一台商用 3D 打印机诞生于 1986 年，直到 1991 年美国麻省理工学院申报了关于三维打印的相关专利后，3D 打印这项技术才被真正确定下来。

1992 年，美国 DTM 公司研发成功激光选区烧结设备，3D 打印技术进入金属产品的成型阶段。2005 年，由 Z Corporation 公司研发的世界首个高清晰彩色 3D 打印机成功问世。2010 年，世界上第一辆完全依靠 3D 打印机成型的汽车 Urbee 诞生。2011 年，全球首款 3D 巧克力打印机由英国研究人员成功研制。2012 年，苏格兰科学家实现了利用人体细胞进行人造肝脏组织的打印。

经过 30 多年的发展历程，3D 打印技术已经在欧美发达国家形成了较为成熟的商用模式，核心权威的 3D 打印设备与技术依旧被欧美等发达国家垄断，可使用的成型材料种类非常丰富。

3D Systems 和 Stratasys 这两家公司拥有较先进的打印设备和技术实力。其中，3D Systems 公司是全球 3D 打印领域的龙头企业，其公司生产的成型设备已经可以对 120 多种不同的材料进行打印。目前，世界上最先进的 3D 打印技术已经可以实现单层厚度为 0.01mm 的超精细分辨率（600dpi），并支持 24 位色彩的彩色打印。

根据美国 Wohlers Associates 公司近几年发布的全球 3D 打印行业年度报告显示，拥有 3D 打印设备最多的国家是美国、日本、德国和中国。其中中国的 3D 打印设备占有率不足 10%，中国生产的 3D 设备仅占全球份额的 3.6%。在众多的 3D 打印领域中，金属 3D 打印与桌面级 3D 打印机的发展是最稳定、最快的，3D 打印技术在航空航天和医学领域的应用增



速最快。

美国在全球的3D打印领域处于领先地位,也是这项技术得到迅速发展的重要推动者,同时美国政府在国家层面上建立了战略规划,重视对3D打印技术的大力研发。美国前总统奥巴马曾公开演讲强调3D打印技术的重要性,投入大量资金建立国家级别的3D打印研究中心,发展改革传统制造业,增加就业人数,拓展3D打印技术在各领域的应用。

面对竞争激烈的国际环境,对我国而言,发展3D打印技术可以突破传统的生产制造方法,提高产品的设计能力,从而可以生产复杂的个性化产品,可以促进技术发展、行业发展、经济发展,带动就业。作为第三次工业革命的重要标志,3D技术的迅速发展也吸引了我国政府和我国高校企业的重视。

我国政府通过一系列的政策战略,投入大量的资金,提供良好的机遇与环境促进了3D打印技术在国内的发展。2013年,3D打印技术被列入国家863计划中的核心关键技术。2015年发布的《国家增材制造产业发展推进计划》中更是将3D打印提升到国家战略层面。国内高校和企业也对3D打印技术表现出了极大的热情,建立了许多3D打印实验室,很多技术与成果也陆续实现了产业化。

3D打印技术是一场革命性的技术,吸引着世界各国的眼光,因此对于我国来说,发展这项技术也是刻不容缓。国内的3D打印技术始于20世纪90年代,经过10多年的探索和发展,国内的许多高校和企业也在3D打印技术领域也已取得不俗的成绩。清华大学、华中科技大学、西安交通大学、北京航空航天大学、中国科技大学等国内高校以及北京殷华、深圳维示泰克、江苏敦超等企业致力于我国3D打印技术的发展与研发,我国已经成为世界上第三个可以生产3D打印设备的国家,部分技术已经处于世界水平。其中,北京航空航天大学研发出的飞机钛合金整体激光成型件,荣获2012年国家科技发明一等奖,更是国际上3D打印领域的重大突破。但相比技术领先的发达国家而言,仍有许多的技术难题需要攻克。国产3D打印机的性能在打印精度、打印速度、打印尺寸、打印材料、配套处理软件研发等方面普遍处理较为低端,无法满足产品的成型要求,致使3D打印产品不能真正得到应用。

1.1.2 3D 打印技术的成型优势

相对于传统制造业,3D打印技术具有许多独特的优势。

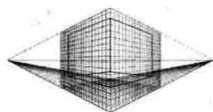
1) 制造范围广。理论上,只要是计算机可以设计出来的模型,采用3D打印技术就可以制造,即任何结构、任何材料均可以制造。

2) 制作周期短。去除了传统制造工艺中工装夹具的设计制造、毛坯的准备、零件加工装配等工序,尤其是对复杂造型的加工,其技术优势更加突出。此外,3D打印可以实现零部件一体化成型,节省了组装时间,效率更高。

3) 精确的实体复制。3D打印基于同一模型上进行制造,同时也可结合扫描技术,精确复制实体。

4) 可以实现个性化制作。利用传统方式制造个性化产品,付出的成本远远高于成品所具备的价值,这就致使传统制造无法在个性化生产的道路上走得太远。然而3D打印技术在这方面并没有太大困难,能以较低的成本进行个性化产品的单独生产或批量生产。

5) 成本低。首先,在加工方式上,3D打印技术采用增材加工方式,相对于传统机床的减材加工,可以避免对原材料的浪费,降低了制造成本;其次,与传统制造相比,使用3D



打印技术制造形状复杂的物品不会增加成本。此外,该技术可以实现就地生产制造,无须仓储,运送成本低。

6) 制作材料的多样性。3D 打印所用的材料多种多样,一台打印设备能够适用于多种材料来打印成型,不同的打印系统所用的材料也不尽相同,材料的多样性能够满足不同情况下的不同需求,应用更加广泛。常用的塑料、橡胶、金属等一些新兴材料均可以用来进行打印制造。

3D 打印也存在不足之处:打印技术不够成熟,打印耗材有着很大的局限性,打印设备和耗材成本较高,打印工作环境要求苛刻,复杂制品打印相对耗时、效率较低,大件化、批量化生产还不能够普及等。

1.2 什么是 3D 打印

1.2.1 3D 打印的基本原理

3D 打印技术 (3D Printing) 又称增材制造技术 (Additive Manufacturing)。根据美国材料与试验协会 (ASTM) 2009 年成立的 3D 打印技术委员会 (F42 委员会) 公布的定义,3D 打印是一种与传统的材料加工方法截然相反,基于三维 CAD 模型数据,通过增加材料逐层制造的方式。

成龙的电影《十二生肖》中有这样一个片段:成龙戴着一副带有扫描功能的手套在圆明园兽首表面移动,兽首的三维数据输入计算机,通过一台 3D 打印机打印出了一个一模一样的兽首,如图 1-2 所示。虽然电影中的 3D 打印机就目前技术来讲还是虚构的,但 3D 打印的过程正如电影中所描述的那样。

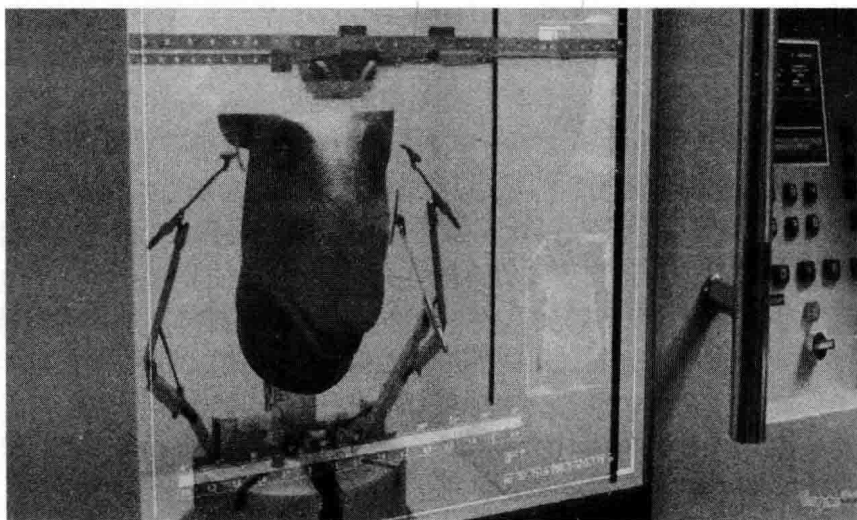
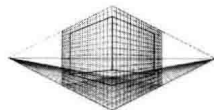


图 1-2 电影《十二生肖》中打印兽首 (图片来源:成龙的电影《十二生肖》)

3D 打印技术原理如图 1-3 所示,即在计算机上设计出三维模型,进行网格化处理后再进行分层切片处理,得到三维模型的截面轮廓,按照轮廓信息生成 3D 打印机的加工路径,3D 打印机在控制系统的作用下,有选择地固化或切割每一层材料,打印出每一层轮廓,逐



层叠加形成三维零件，最后对零件进行后处理工艺，形成最终的成品。



图 1-3 3D 打印技术原理

3D 打印过程包括以下 3 步 (见图 1-4)。

1. 前处理

前处理包括三维模型的构建 (可通过计算机建模、CT 扫描、光学扫描等方式)、三维模型的网格化处理 (网格化处理中往往会有不规则曲面的出现, 需要对模型进行近似处理)、三维模型的分层切片。

2. 分层制造

通过 3D 打印机, 将处理好的三维模型分层制造出来。三维模型的质量好坏与 3D 打印机的制造精度有很大的关系。

3. 后处理

打印完成的模型连有许多支撑, 模型表面粗糙, 带有许多毛刺或是多余熔料, 甚至会出现模型部分结构的打印发生偏差, 这时要对模型进行适当的修整, 清除打印支撑、修剪突出

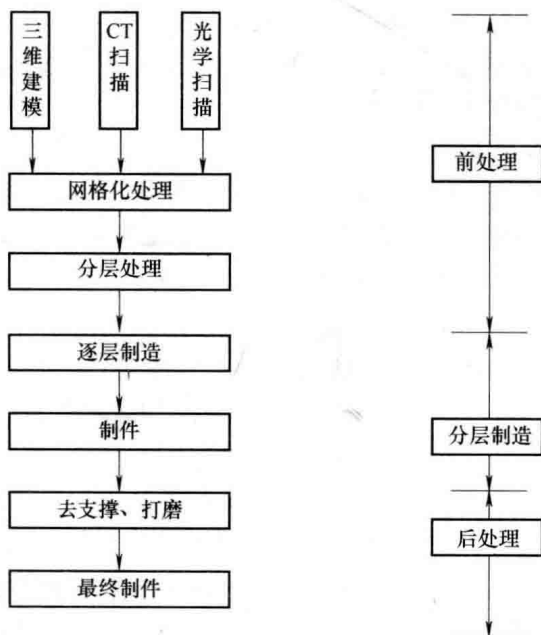
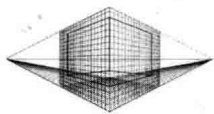


图 1-4 3D 打印过程



的毛刺、打磨粗糙表面以及固化处理增强强度等，最终获得所需制件。

1.2.2 3D 打印成型工艺分类

3D 打印技术是一种与传统的“减材制造”技术相反的称为“增材制造”的技术。按照其成型工艺可分为以下 6 种：

1. 熔融沉积快速成型技术 (Fused Deposition Modeling, FDM)

熔融沉积快速成型技术又称为熔丝沉积成型技术，市场上常见的桌面级 3D 打印机大多是基于熔融沉积技术制造的，其工作原理如图 1-5 所示。3D 打印机的加热头把打印耗材（通常为 ABS 或 PLA）加热到略高于熔化温度，在控制系统的作用下，喷嘴沿着分层切片处理确定的二维轨迹运动，把挤出的热熔丝涂覆在打印平台上，并立即凝固成型。当一层截面成型后，打印平台向下移动，继续成型第二层截面，如此逐层打印零件的截面，最终打印出所设计的模型。

熔融沉积快速成型技术的主要原材料为塑料。塑料在人们的印象中并不是一种强度很高的材料，但人们身处在一个充满可能性的世界中，塑料的强度也可以变得很高。例如，美国的 Impossible Objects 将碳纤维、芳纶 (Kevlar) 和玻璃纤维等用于 3D 打印零部件，比传统热塑性材料 3D 打印出来的部件强度高 2~10 倍。德国的 Igus 公司生产的高性能塑料（也被称作“运动塑料”）可以制造具有自润滑、耐腐蚀的轴承，生产出耐摩擦、耐腐蚀的传动螺母和齿轮。

桌面级 3D 打印机大多数使用的打印耗材为 ABS 或 PLA，打印耗材成本较高。然而，德国著名的注塑机生产厂商 Arburg Freeformer 生产的基于 FDM 技术的 3D 打印机有一个独特之处便是对打印耗材“不挑剔”，材料无须特殊的加工，也无须使用那些昂贵的材料，可以像注塑机那样使用塑料颗粒。同时，普通的 3D 打印爱好者也可以通过桌面级塑料挤出机，利用塑料粉末和其他材料创造出新颖而廉价的打印耗材。Iguldur 公司利用 Arburg Freeformer 的 3D 打印机已经成功地打印了轴承、齿轮、传动和驱动丝杠螺母滑块。

此外，美国的 Mini Metal Maker 公司设计的 3D 打印机采用 FDM 技术，以金属黏土作为打印材料，当 3D 对象被打印出来后，再进入陶瓷窑中进行高温干燥处理，高温烧去了黏土中的化合物成分，只留下金属部分，使其融合在一起而成为一个实体。

2. 选择性激光烧结技术 (Selective Laser Sintering, SLS)

选择性激光烧结技术设备由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C. R. Dechard 博士于 1989 年首次研制成功。目前，选择性激光烧结技术利用粉末为打印材料，研究主要集中在金属物件上。金属粉末烧结装置示意图如图 1-6 所示。选择性激光烧结技术的工作原理为：将粉末

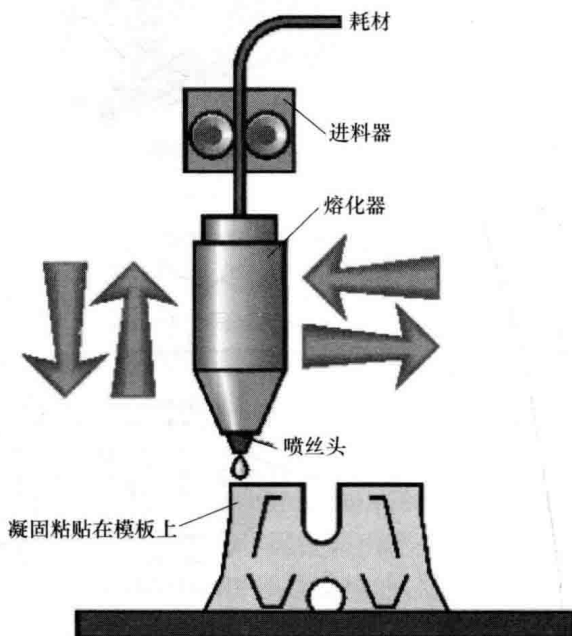
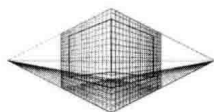


图 1-5 FDM 工作原理 (图片来源: 材料人网)



铺在工作台上，用刮板将粉末刮平，利用高强度激光器扫描截面轮廓，粉末在高强度的激光作用下烧结，每层截面烧结完成后工作台下降，继续铺粉、刮平，激光器扫描下一个界面的轮廓，烧结该层截面并且与上一个截面紧密地烧结在一起，这样层层地烧结，最后形成所需零件。

选择性激光烧结技术常采用的原材料有金属、陶瓷、塑料、尼龙、蜡及它们的复合材料。不同原材料粉末有不同的应用领域，如采用金属粉末可以制作金属制件，采用陶瓷粉末可以制作铸造型壳、型芯和陶瓷件，采用热塑性塑料粉末可以制作消失模，而采用蜡粉末可以制作精密铸造蜡模。

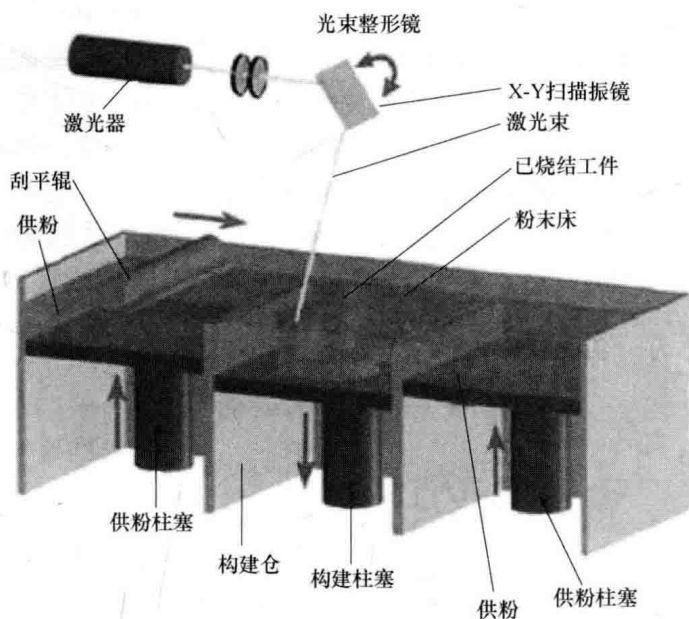


图 1-6 金属粉末烧结装置示意图 (图片来源: 嘀嗒印)

3. 三维打印成型技术 (Three-Dimensional Printing, 3DP)

三维印刷 (3DP) 工艺是美国麻省理工学院 Emanuel Sachs 等人研制的。E. M. Sachs 于 1989 年申请了 3DP (Three-Dimensional Printing) 专利，该专利是非成型材料微滴喷射成型范畴的核心专利之一。

3DP 工艺与 SLS 工艺类似，采用粉末材料成型，如陶瓷粉末、金属粉末。所不同的是材料粉末不是通过烧结连接起来的，而是通过喷头用粘接剂 (如硅胶) 将零件的截面“印刷”在材料粉末上面。用粘接剂粘结的零件强度较低，还需进行后处理。3DP 技术原理图如图 1-7 所示。具体工艺过程如下：涂抹一层粘结后，成型缸下降一个距离 (等于层厚 0.013 ~ 0.1mm)，供粉缸上升一定高度，推出若干粉末，并被铺粉辊推到成型缸，铺平并压实。喷头在计算机控制下，按照建造截面的成型数据有选择性地喷射粘结剂建造层面，集粉装置收集的多余铺粉会被重新利用。如此周而复始地送粉、铺粉和喷射粘结剂，最终完成一个三维粉体的粘结。未被喷射粘结剂的地方仍为干粉，在成型过程中起支撑作用，且成型结束

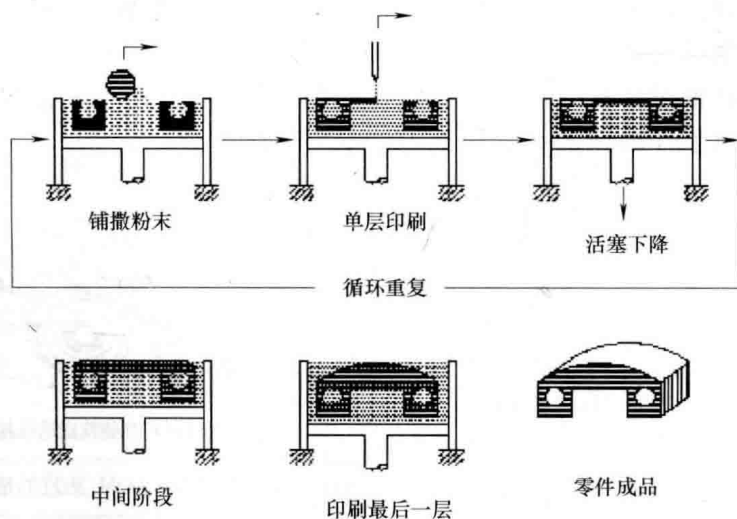
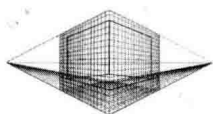


图 1-7 3DP 技术原理图 (图片来源: 智造网)



后，比较容易去除。

4. 光固化成型技术 (Stereo Lithography Appearance, SLA)

光固化成型技术又称立体光刻造型技术。它主要采用液态光敏树脂为原料，紫外激光束在计算机的控制下，按照零件的截面轮廓对液态树脂进行逐点扫描，使扫描区域的光敏树脂层发生光聚合反应，从而形成一层固化截面。一层截面固化后，工作台向下移动一个截面厚度，刮板将树脂界面刮平，紫外激光束再对第二层截面逐点扫描，树脂逐层固化，最后制造出设计的零件。光固化成型技术原理图如图 1-8 所示。

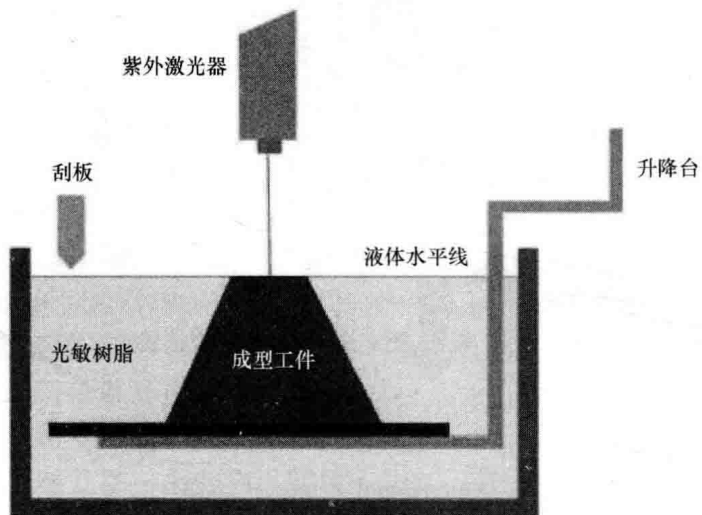


图 1-8 光固化成型技术原理图 (图片来源: 中国数字科技馆)

5. 分层实体制造法 (Laminated Object Manufacturing, LOM)

分层实体制造法又称薄形材料选择性切割。分层实体制造采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等。其原理是：在计算机的控制下，激光切割系统按照计算机提供的加工路径，将单面涂有热熔胶的薄膜材料切割出工件截面的一层轮廓。切割完一层轮廓后，工作台下降，送料机转动，使新的片层移动到加工区域，通过热粘压机构的加热，让新的片层与已切割层紧密地粘结在一起，激光器再切割下一层截面轮廓，这样一层层地切割粘合，直至加工出完整工件，最后将余料剥离，得到所需的零件。LOM 工艺的成型原理图如图 1-9 所示。

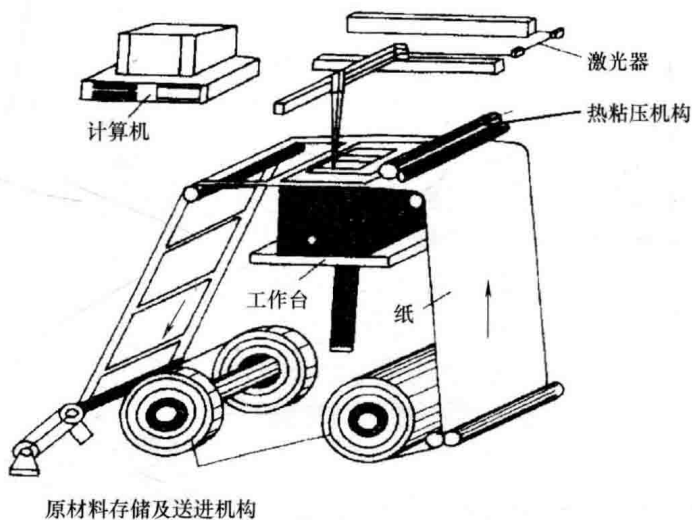
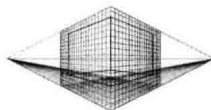


图 1-9 LOM 工艺的成型原理图 (图片来源: 数字化企业网)



6. 激光熔覆沉积技术 (Laser Metal Deposition, LMD)

激光熔覆沉积技术也称激光工程化净成型技术。激光熔覆沉积技术是直接把材料送入激光中,材料在激光束的照射下熔化,按照计算机所生成的加工路径,材料逐层叠加,最终形成所需要的工件。激光熔覆沉积技术成型原理图如图 1-10 所示。熔覆材料通常是以粉末的形式送入,分为同轴送粉和侧向送粉两类。目前,激光熔覆沉积所用粉末主要包括钛合金、铝合金、不锈钢等粉末材料。激光熔敷沉积技术具有很大的技术经济效益,广泛应用于机械制造与维修、汽车制造、纺织机械、航海与航天和石油化工等领域。

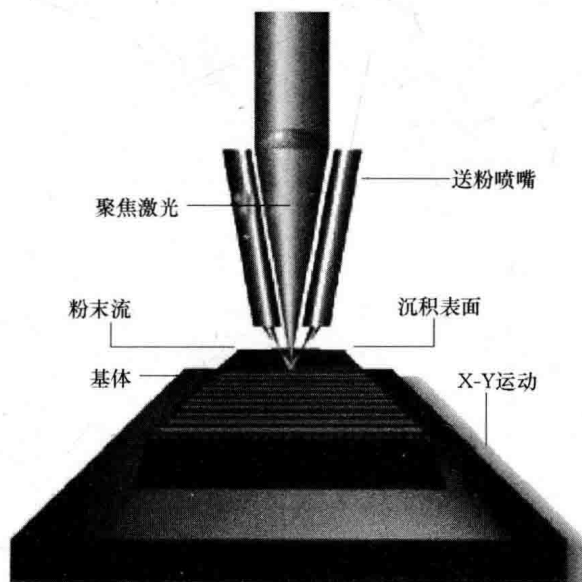


图 1-10 激光熔覆沉积技术成型原理图 (图片来源:材料人网)

打印材料、成型技术与打印的产品之间紧密相连,三者之间相互适应。基于成型技术原理的差异,打印材料的选择要与打印技术相适应;为了保证打印产品的质量与综合性能,又要选取不同的打印技术进行成型。3D 打印技术与基本材料的应用见表 1-1。3D 打印技术与典型产品如图 1-11 所示。

表 1-1 3D 打印技术与基本材料的应用

类 型	成 型 技 术	基 本 材 料
挤压	熔融沉积快速成型 (FDM)	热塑性塑料、可食用材料、共晶系金属
粒状	选择性激光烧结 (SLS)	金属材料、钛合金、不锈钢钴铬合金、铝、陶瓷、塑料、尼龙、蜡及它们的复合材料
粉末层喷头 3D 打印	三维粉末粘结技术 (3DP)	陶瓷粉末、塑料粉末、金属粉末
层压	分层实体制造 (LOM)	热塑性塑料、金属粉末、陶瓷粉末
光聚合	光固化成型 (SLA)	光硬化树脂、液态光敏树脂、环氧感光树脂

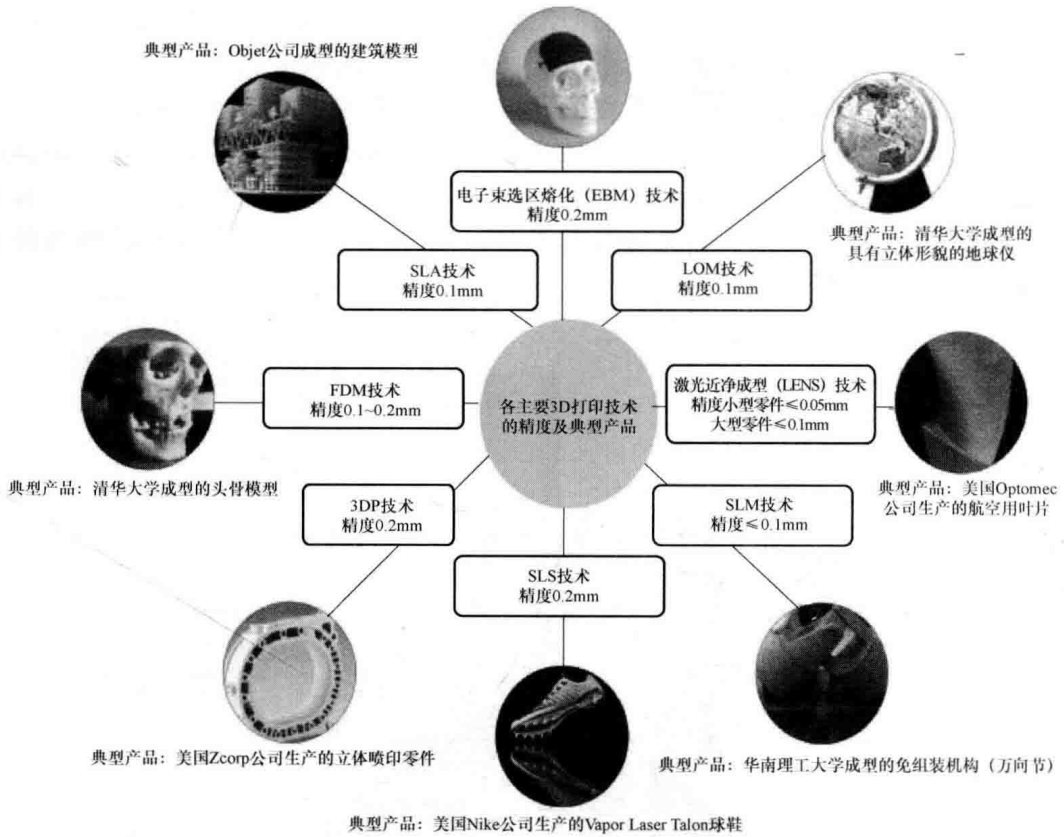
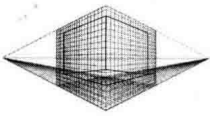


图 1-11 3D 打印技术与典型产品

1.3 3D 打印的应用领域

3D 打印技术经过近些年不断地发展与更新，技术上已经基本上形成了一套比较完善的体系，可以应用到的行业也在逐渐扩大。迄今为止，它不仅应用于机械工业、航天探索、医疗卫生等领域，还可以应用于艺术文化、创意时尚领域。

1.3.1 航空航天

在航空航天领域内，对零部件有着较为严格的要求，其结构十分复杂并且精密度高，而金属 3D 打印技术恰好满足这些要求。

目前，我国已经具备了使用激光成型超过 12m²的复杂钛合金构件的技术和能力，并且投入多个国产航空科研项目的原型和产品制造中。据报道，我国已经用激光成型直接制造 30 多种钛合金大型复杂关键金属零件（见图 1-12），并在大型运输机、舰载机、C919 大型客机、歼击机等 7 种型号飞机中装机应用，解决了型号研制“瓶颈”。

除此之外，激光 3D 打印技术还可以对产生磨损的部位进行修复。当发动机机匣有局部磨损、裂纹、烧蚀等损伤时，各种支撑环、安装环、承力环等的磨损、裂纹损伤，以及封严块、封严篦齿等的磨损、烧蚀损伤均可用激光 3D 打印方法修复。多位螺栓孔表面、内孔和