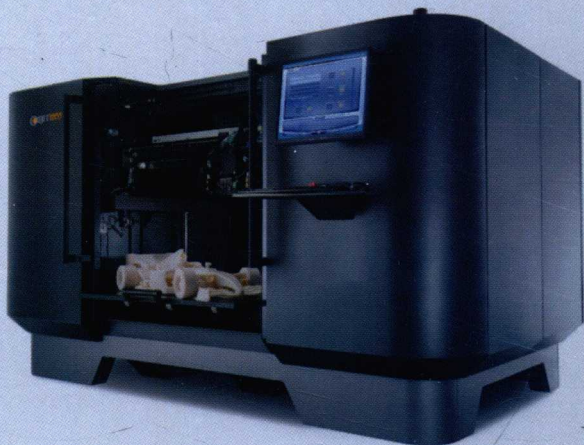
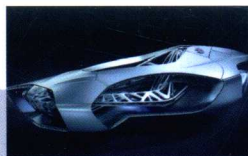


北京工业大学国家级专业技术人员继续教育基地、北京市专业技术人员继续教育基地教材

# 3D 打印技术 基础教程

陈继民 编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

北京工业大学国家级专业技术人员继续教育基地、北京市专业技术人员继续教育基地教材

该书由国家级专业技术人员继续教育基地专项经费资助出版

# 3D 打印技术基础教程

陈继民 编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是一本3D打印技术知识的初级教程,旨在让读者全面了解3D打印技术的基础知识。内容涵盖了从3D数据的获取、3D模型设计软件以及到目前市场上主流的3D打印方法,系统全面地对3D打印技术进行了深入浅出的讲解。全书分为8章,每章都相对独立,又相互联系。第1章对3D打印技术及其应用做了概述介绍。第2章对3D数据的获取手段(比如3D扫描设备以及3D扫描原理等)做了详细介绍,重点介绍了各种实现3D扫描的方法。第3章介绍了主要针对3D打印技术的三维建模软件和主流的3D软件,这些软件是进行3D打印时最常用的设计软件,以及软件处理工具。第4~第7章则重点介绍了当前主流的几种3D打印技术,比如FDM,SLA,SLS(SLM)以及3DP。据不完全统计,目前使用的3D打印方法有30多种,每一种方法都有其独特的特点。本书介绍的这几种方法占据了80%以上的市场份额,也是绝大多数用户在使用3D打印技术。对每一种技术的起源、国内外现状到今后的发展趋势做了详细描述。为了使读者开阔3D打印应用视野,在第8章中对近年来3D打印的创新应用做了介绍。

本书可作为3D打印的培训教材,也适合对3D打印技术有兴趣的在校学生,以及相关专业工程技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

3D打印技术基础教程/陈继民编. —北京:国防工业出版社,2016.1  
ISBN 978-7-118-10588-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第299009号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$  字数 123千字

2016年1月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 35.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 前 言

2012年4月29日世界著名的《经济学人》杂志发表了一篇《3D打印将推动第三次工业革命》的文章,文章认为3D打印技术将推动第三次工业革命,并对3D打印技术给予高度评价:“伟大发明所能带来的影响,在当时那个年代都是难以预测的,1450年的印刷术如此,1750年的蒸汽机如此,1950年的晶体管也是如此。而今,我们仍然无法预测,3D打印将在漫长的时光里如何改变这个世界。”一石激起千层浪,3D打印技术立刻引起了世界各国的高度关注。2012年美国总统奥巴马在当年的国情咨文中提出,要用3D打印技术重振美国的制造业。2013年7月美国国防部、能源部等5部委联合有关企业、科研院所组建了美国增材制造创新研究院(NAMI)。此后,3D打印的热浪席卷全球,3D打印的各种应用不断涌现。2015年2月中华人民共和国工业和信息化部、国家发展与改革委员会、财政部联合印发了《国家增材制造产业发展推进计划(2015—2016年)》的通知,全国各地掀起了3D打印的热潮。但是,目前3D打印技术方面人才匮乏,严重阻碍了这一技术的推广应用。3D打印技术的教育逐渐被提到议事日程,3D打印技术的培训也如雨后春笋般开展起来。然而至今还缺乏较系统介绍3D打印技术的教材。在参阅了大量的文献资料之后,作者编写了这本3D打印技术的初级教程,试图为学习3D打印技术

知识的读者打开一扇全面了解 3D 打印技术的大门。

3D 打印学术上叫增材制造(Additive Manufacturing, AM),是从 20 世纪 70 年代末、80 年代初,由快速成型(Rapid Prototype, RP)和快速制造(Rapid Manufacturing, RM)技术发展起来的。随着计算机技术的发展,计算机辅助设计技术在产品开发中扮演越来越重要的角色,产品开发的周期越来越短,人们对快速制造技术的需求越来越迫切,与传统的去除材料的制造技术相比,RP, RM 技术通过层层堆积,快速获得设计的产品原型,大大提高了产品成型的速度。据不完全统计,目前使用增材制造技术的 3D 打印方法有 30 多种,每一种方法都有其独特的特点,从打印材料看,有的使用液体打印材料,有的使用粉末材料,还有的使用固态材料。从打印方式看,有的使用喷嘴,有的使用激光,有的使用投影等,还没有一种通用的 3D 打印方法满足所有 3D 打印的需要。本书重点选择了几种主要的 3D 打印方法进行介绍,这些方法占据了 80% 以上的市场份额,也是绝大多数用户在使用 3D 打印技术。读者通过学习这些方法,可以触类旁通地深入学习其他 3D 打印技术。全书涵盖了从 3D 数据的获取、3D 模型设计软件以及到目前市场上主要的 3D 打印方法,系统全面地对 3D 打印技术进行了深入浅出的介绍。

本书由北京工业大学激光工程研究院陈继民教授撰写,部分内容也反映了其科研成果。本书编写过程中,北京工业大学激光工程研究院的在校研究生李东方、刘春春、王颖、窦阳等几位同学帮助查阅了大量文献,并对文献加以总结和梳理,特此向他们表示衷心感谢。

3D 打印技术涉及计算机控制、软件设计、精密机械以及材料科学

等多个学科,是一个前沿交叉学科。尽管研究成果丰富,应用领域不断扩大,仍有许多新问题、新现象有待解决。由于作者水平所限,书中难免出现不当和错误,欢迎广大读者批评指正。

作 者

2015. 11

# 目 录

<b>第 1 章 3D 打印概述</b> .....	1
1.1 3D 打印技术 .....	1
1.2 3D 打印材料 .....	3
1.3 3D 打印的应用 .....	9
1.3.1 在航空领域的应用 .....	9
1.3.2 在医疗领域的应用 .....	14
1.3.3 在个人消费领域的应用 .....	18
参考文献 .....	22
<b>第 2 章 3D 数据获取</b> .....	25
2.1 三维扫描数据获取 .....	26
2.1.1 非接触式三维信息获取 .....	26
2.1.2 接触式三维信息获取 .....	31
2.2 三维扫描原理 .....	32
2.2.1 立体视觉三维形态测量方法 .....	32
2.2.2 飞行时间三维形态测量方法 .....	33
2.2.3 结构光投影三维形态测量方法 .....	33

---

2.3	三维扫描仪简介 .....	34
2.4	三维扫描后处理软件 .....	37
2.4.1	PolyWorks 软件 .....	37
2.4.2	Imageware 软件 .....	38
2.4.3	Geomagic Studio 智能化逆向工程软件 .....	38
2.4.4	Geomagic Design X 参数化逆向工程软件 .....	41
2.5	三维扫描仪的其他应用 .....	45
2.5.1	虚拟现实领域 .....	45
2.5.2	逆向工程领域 .....	46
2.5.3	文物保护领域 .....	46
2.5.4	数字娱乐领域 .....	47
2.5.5	服装制造领域 .....	49
	参考文献 .....	49
<b>第3章</b>	<b>3D 打印的建模软件 .....</b>	<b>51</b>
3.1	Autodesk 123D .....	52
3.2	Tinker CAD .....	54
3.3	Blender .....	56
3.4	SketchUp .....	59
3.5	3DTin .....	60
3.6	FreeCAD .....	61
3.7	3DS MAX .....	63
3.8	Rhinoceros(Rhino) .....	63
3.9	Solidworks .....	64



---

3.10	Pro/E .....	66
3.11	Cubify Sculpt .....	67
3.12	Alias Design Studio( Alias) .....	68
3.13	UG(Unigraphics) .....	69
3.14	中望 3D .....	70
	参考文献 .....	72
<b>第 4 章</b>	<b>FDM 打印技术 .....</b>	<b>74</b>
4.1	机械结构 .....	74
4.2	工艺参数控制 .....	76
4.3	工艺特点 .....	78
4.4	产品发展及技术研究现状 .....	79
4.5	应用方向 .....	84
4.6	主要问题与发展方向 .....	86
	参考文献 .....	88
<b>第 5 章</b>	<b>光固化 3D 打印技术 .....</b>	<b>91</b>
5.1	液态树脂光固化技术 .....	91
5.2	光固化立体成型技术 .....	93
5.2.1	光固化立体成型的系统组成 .....	93
5.2.2	光固化快速成型的工艺过程 .....	95
5.3	光固化立体成型技术研究现状 .....	98
5.4	光固化立体成型的材料研究 .....	100
5.5	基于 SLA 技术的 3D 打印机 .....	103

---

5.6 基于DLP技术的3D打印机	105
5.7 光固化成型技术应用前景	107
参考文献	112
<b>第6章 SLM打印技术</b>	<b>114</b>
6.1 SLM基本原理	114
6.1.1 SLM原理与特点	114
6.1.2 SLM成型高质量金属零件关键点	116
6.1.3 影响SLM成型质量的因素	118
6.2 SLM研究现状	120
6.2.1 SLM工艺研究现状	120
6.2.2 SLM设备研究现状	122
6.2.3 SLM材料研究现状	124
6.3 SLM技术的应用	125
6.3.1 多孔功能件	125
6.3.2 牙科产品	126
6.3.3 植入体	127
6.4 SLM技术发展展望	127
6.4.1 网状拓扑结构轻量化设计制造	127
6.4.2 三维点阵结构设计制造	128
6.4.3 陶瓷颗粒增强金属基复合材料-结构一体化 制造	129
参考文献	129

---

<b>第 7 章 3DP 技术</b> .....	133
7.1 基本原理及成型流程 .....	136
7.1.1 基本原理 .....	136
7.1.2 成型流程 .....	137
7.2 关键技术 .....	138
7.2.1 运动控制 .....	138
7.2.2 胶水的喷射方式 .....	139
7.2.3 打印所需相关参数 .....	141
7.3 成型特点 .....	143
7.4 成型材料及应用 .....	144
7.5 发展趋势 .....	146
参考文献 .....	148
<b>第 8 章 3D 打印应用实例</b> .....	150
8.1 3D 打印在医学上的应用 .....	150
8.2 3D 打印在汽车制造上的应用 .....	160
8.3 3D 打印在建筑领域中的应用 .....	166
8.4 3D 打印在其他工业中的应用 .....	168
参考文献 .....	176

# 第 1 章 3D 打印概述

3D 打印技术是由 20 世纪 70 年代末、80 年代初出现的快速原型技术发展而来的一种先进制造技术,它的发展会对现存的制造业带来革命性的改变。目前已经在航空航天、医疗以及文化创意等领域得到了广泛的应用,并不断发展。

## 1.1 3D 打印技术

3D 打印技术,学术上又称“增材制造”技术,也称加成制造或增量制造。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去除加工方法截然相反的材料添加成型技术,它基于三维 CAD 模型数据,通过增加材料逐层制造的方式,采用直接制造与相应数学模型完全一致的三维模型的制造方法成型三维物体。3D 打印技术内容涵盖了产品生命周期前端的“快速成型”和全生产周期的“快速制造”相关的所有打印工艺、技术、设备类别和应用。3D 打印涉及的技术包括 CAD 建模、测量技术、接口软件技术、数控技术、精密机械技术、激光技术、材料技术等。

3D 打印技术的发展起源可追溯至 20 世纪 70 年代末到 80 年代

初期,美国 3M 公司的 Alan Hebert(1978 年)、日本的小玉秀男(1980 年)、美国 UVP 公司的 Charles Hull(1982 年)和日本的丸谷洋二(1983 年)四人各自独立提出了一种成型的新概念,即材料层层叠加成型。1986 年,美国人 Charles Hull 率先推出光固化方法(Stereo Lithography Apparatus,SLA),利用光照射到液态光敏树脂上,使树脂层层凝固成型,这是 3D 打印技术发展的一个里程碑。同年,他创立了世界上第一家生产 3D 打印设备的 3D Systems 公司。该公司于 1988 年生产出了世界上第一台基于光固化成型的 3D 打印机(SLA-250)。1988 年,美国人 Scott Crump 则发明了另外一种 3D 打印技术——熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling,FDM),该技术是将塑料丝熔化后通过打印头挤出,层层堆积成型,之后他成立了 Stratasys 公司。目前,这两家公司已在纳斯达克上市,是最早上市的 3D 打印设备制造企业。1989 年,美国德克萨斯州大学奥斯汀分校的 C. R. Deckard 发明了选区激光烧结法(Selective Laser Sintering,SLS),其原理是利用高强度激光将材料粉末烧结直至成型。由于使用这一技术生产的零件强度高,韧性好,可以直接当产品使用,因此迅速发展成为全球应用最广的 3D 打印技术,又被誉为“Texas Idea Global Industry”。1995 年德国 Fraunhofer 激光研究所,又在 SLS 技术基础之上,成功开发选区激光熔化(Selective Laser Melting,SLM)技术。1993 年,美国麻省理工大学教授 Emanuel Sachs 发明了一种全新的 3D 打印技术。这种技术类似于喷墨打印机,通过向金属、陶瓷等粉末喷射黏结剂的方式将材料粘结逐层成型,然后进行烧结制成最终产品。这种技术的优点在于制作速度快、价格低廉。随后,Z Corporation 公司获得麻省理工大学的许可,利用该技术来生产 3D 打印机,“3D 打印机”的称谓由

此而来。此后,以色列人 Hanan Gothait 于 1998 年创办了 Objet Geometries 公司,并于 2000 年在北美推出了可用于办公室环境的商品化 3D 打印机,该打印机不是喷射黏结剂,而是将一种液态的光敏树脂喷射在一个基板上,随后紫外灯将树脂固化,层层叠加获得三维模型,这种技术又被称为三维印刷(3DP)。

3D 打印具有如下特点和优势:

(1) 数字制造:借助 CAD 等软件将产品结构数字化,驱动机器设备加工制造成器件;数字化文件还可借助网络进行传递,实现异地分散化制造的生产模式。

(2) 降维制造(分层制造):即把三维结构的物体先分解成二维层状结构,逐层累加形成三维物品。因此,原理上 3D 打印技术可以制造出任何复杂的结构,而且制造过程更柔性化。

(3) 堆积制造:从下而上的堆积方式,“无中生有”生长出三维物体。这对实现非匀致材料、功能梯度的器件更有优势。

(4) 直接制造:无需模具,任何高性能难成型的部件均可通过“打印”方式一次性直接制造出来,不需要通过组装拼接等复杂过程来实现。

(5) 快速制造:3D 打印制造工艺流程短、全自动、可实现现场制造,因此,制造更快速、更高效。

## 1.2 3D 打印材料

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、金属材料和陶瓷材料等,除此之外,彩色石膏材料、人造骨粉、细胞生物原料以及砂糖等食品材料也在 3D 打印领域得到了应用。3D 打印所用的这些原材料都是专门针对 3D 打印设备和工艺而研发的,与普通的塑料、石膏、树脂等有所区别,其形态一般有粉末状、丝状、层片状、液体状等。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  $1\sim 100\mu\text{m}$  不等。一般在 3D 打印机上使用的粉末材料,为了使粉末保持良好的流动性,要求粉末要具有较高的球形度。

### 1. 工程塑料

工程塑料指被用来做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 Acrylonitrile Butadiene Styrene(ABS)类材料、Poly Carbonate(PC)类材料、尼龙类材料等。ABS 材料是熔融沉积造型(Fused Deposition Modeling,FDM)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  $90^{\circ}\text{C}$ ,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,如白色、黑色、深灰、红色、蓝色等,在汽车、家电、电子消费品领域有广泛的应用。PC 材料是真正的热塑性材料,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。玻纤增强尼龙是一种白色的粉末,与普通塑料相比,其拉伸强

度、弯曲强度有所增强,热变形温度以及材料的模量有所提高,材料的收缩率减小,但表面变粗糙,冲击强度降低。材料热变形温度为 $110^{\circ}\text{C}$ ,主要应用于汽车、家电、电子消费品领域。PC-ABS 材料是一种应用最广泛的热塑性工程塑料。PC-ABS 具备了 ABS 的韧性和 PC 材料的高强度及耐热性,大多应用于汽车、家电及通信行业。使用该材料配合进口 3D 设备制作的样件强度比传统的 FDM 系统制作的部件强度高出 60%左右,所以使用 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 (Poly Carbonate-ISO) 材料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 (Polysulfone) 类材料是一种琥珀色的材料,热变形温度为 $189^{\circ}\text{C}$ ,是所有热塑性材料里面强度最高、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。

## 2. 光敏树脂

光敏树脂即紫外线树脂,由聚合物单体与预聚体组成,其中加有光(紫外线)引发剂(或称为光敏剂)。在一定波长的紫外线( $250\sim 300\text{nm}$ )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、防水材料。目前,研究光敏材料 3D 打印技术的主要有美国 3D System 公司和以色列 Object 公司。常见的光敏树脂有 Somos Next 材料、树脂 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,基本可达到选区激光烧结法(SLS)制作的尼龙材料性能,而精度和表面质量更佳。Somos Next 材料制作的部件拥有迄今最优的刚性和韧性,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,具有很好的防水和尺寸稳定性,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、医疗以及电子类产品领域。Somos 19120 材料为粉红色材质,是一种铸造专用材料即含蜡光敏树脂的树脂蜡。该树脂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,大大缩短周期,拥有低留灰烬和高精度等特点。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<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。

### 3. 橡胶类材料

橡胶类材料具备多种级别弹性材料的特征,这些材料所具备的硬度、断裂伸长率、抗撕裂强度和拉伸强度,使其非常适合于要求防滑或柔软表面的应用领域。3D 打印的橡胶类产品主要有消费类电子产品、医疗设备以及汽车内饰、轮胎、垫片等。

### 4. 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,不惜投入巨资加以研究,而 3D 打印金属零部件一直是研究和应用的重点。无论是送粉式还是铺粉式 3D 打印机,