

3D

打印

3D 打印 丛书

技术导论

杨继全 郑梅 杨建飞 朱莉娅 著
杨继全 主审



3D 打印丛书

3D 打印

技 术 导 论

杨继全 郑 梅 杨建飞 朱莉娅 | 著
杨继全 | 主审

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印技术导论 / 杨继全, 郑梅等著. — 南京: 南京师范大学出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-5651-2379-5

I. ①3… II. ①杨… ②郑… III. ①立体印刷—印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 246273 号

-
- | | |
|------|---|
| 书 名 | 3D 打印技术导论 |
| 著 者 | 杨继全 郑 梅 等 |
| 主 审 | 杨继全 |
| 责任编辑 | 于丽丽 |
| 出版发行 | 南京师范大学出版社 |
| 地 址 | 江苏省南京市宁海路 122 号(邮编:210097) |
| 电 话 | (025)83598919(总编办) 83598412(营销部) 83598297(邮购部) |
| 网 址 | http://www.njnup.com |
| 电子信箱 | nspzbb@163.com |
| 照 排 | 南京理工大学资产经营有限公司 |
| 印 刷 | 扬中市印刷有限公司 |
| 开 本 | 787 毫米×960 毫米 1/16 |
| 印 张 | 9 |
| 字 数 | 152 千 |
| 版 次 | 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5651-2379-5 |
| 定 价 | 26.00 元 |
- 出 版 人 彭志斌
-

南京师大版图书若有印装问题请与销售商调换

— 版权所有 侵犯必究

前 言

3D 打印技术是正在迅速发展的一项集光、机、电、计算机、数控及新材料等学科于一体的先进制造技术,是被称为引领第三次工业革命的制造技术。美国《时代》周刊已将 3D 打印列为“美国十大增长最快的工业”。

3D 打印作为第三次工业革命最具标志性的一个生产工具,时下已成为全球最热门的技术之一。3D 打印技术是集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一身的技术,是一门综合性和交叉性的前沿制造技术,是先进制造技术的重要组成部分,也是制造技术在制造理念上的一次革命性的飞跃。3D 打印技术目前在美国、欧洲、日本等地已被广泛应用于汽车制造、航空航天、建筑、教育科研、卫生医疗以及娱乐等领域,受到制造业界及各类用户的普遍重视,本书主要介绍 3D 打印技术的基本知识、工作原理、应用软件、应用场合和发展趋势。

全书内容共分 5 章。第 1 章为绪论,简要介绍 3D 打印技术的基本知识,包括 3D 打印定义、成型原理、特点、主流 3D 打印成型工艺及国内外发展现状与趋势等;第 2 章介绍 3D 打印基础理论,包括现代成型理论、3D 打印的离散-叠加过程研究、变形机理、精度研究等;第 3 章介绍 3D 打印软件技术,主要包括正向软件设计、逆向软件设计、正逆向混合软件设计、模型支撑添加技术、模型分层切片技术、3D 打印控制软件等;第 4 章介绍 3D 打印材料技术,包括各种类型的打印成型材料及成型件的后处理;第 5 章介绍 3D 打印技术应用。

本书在编写过程中,参考了大量的相关资料,除书中未注明的参考文献外,其余的参考资料主要有:公开出版的各类报纸、刊物和书籍,因特网上的检索。本书中所采用的图片、模型等素材,均为所属公司、网站或个人所有,本书引用仅为说明之用,绝无侵权之意,特此声明。在此向参考资料的各位作者表示谢意!



本书由南京师范大学杨继全负责总体规划并编写第1、3章,郑梅负责编写第2、4章,朱莉娅负责编写第5章,杨建飞负责编写第6章。

在编写本书的过程中,南京师范大学和江苏省三维打印装备与制造重点实验室的郭爱琴、程继红、王琼、李超、邱鑫、陈玲、褚红燕、刘益剑等老师给予了许多无私帮助与支持,尹亚楠、王璟璇、姜杰、吴静雯、李永超、王森、于佳佳、陈慧芹等研究生做了大量的资料查阅和汇总等工作,最后衷心感谢南京师范大学出版社在本书出版过程中给予的大力支持。

本书得到国家自然科学基金(61273243、51175268、11102090)、江苏省重大科技支撑与自主创新基金(BE2012201)、江苏省科技支撑计划(工业)重点项目(BE2013012、BE2014009)、江苏省科技成果转化专项资金重大项目(BA20130518)等基金项目的支持。

由于作者水平有限,书中的疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正,多提宝贵意见,使之不断完善,作者在此预致谢意。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 概述	1
1.1.1 3D 打印的基本概念	2
1.1.2 3D 打印成型原理	3
1.1.3 3D 打印技术的特点	7
1.2 主流 3D 打印成型工艺	8
1.2.1 3D 打印工艺分类	8
1.2.2 光固化成型(SLA)	9
1.2.3 叠层实体制造(LOM)	11
1.2.4 选择性激光烧结(SLS)	12
1.2.5 熔融沉积制造(FDM)	13
1.2.6 三维印刷成型(3DP)	14
1.2.7 各成型工艺比较	15
1.3 国内外 3D 打印技术发展现状和趋势	16
1.3.1 国外 3D 打印技术发展现状	17
1.3.2 国内 3D 打印技术发展现状	18
1.3.3 3D 打印技术的发展趋势	19
1.4 3D 打印技术的学科体系和知识结构	20
1.5 发展 3D 打印学科的必要性	21
第2章 3D 打印基础理论	23
2.1 概述	23



2.2	现代成型理论	24
2.3	3D 打印的离散—叠加过程研究	26
2.3.1	离散—叠加过程的三个层次	26
2.3.2	STL 数据文件格式	27
2.4	3D 打印零件的变形机理	31
2.4.1	3D 打印零件的特点	31
2.4.2	3D 打印零件变形的宏观表现	32
2.4.3	光固化成型工艺的零件变形	32
2.5	3D 打印零件的精度研究	34
2.5.1	3D 打印技术的精度概述	35
2.5.2	影响 3D 打印零件精度的因素	35
2.5.3	数据处理误差	36
2.5.4	成型加工误差	39
2.5.5	后处理误差	42
第 3 章	3D 打印软件技术	44
3.1	概述	44
3.2	设计方法分类	45
3.2.1	正向设计	45
3.2.2	逆向设计	46
3.2.3	正逆向混合设计	46
3.3	正向设计软件	47
3.3.1	3DS MAX	47
3.3.2	Rhino	48
3.3.3	SketchUp	50
3.3.4	Pro/Engineer	51
3.3.5	SolidWorks	52
3.3.6	其他设计软件	53
3.3.7	格式转换软件	56
3.4	逆向设计技术	57
3.4.1	逆向设计概述	57
3.4.2	三维数据反求技术	58
3.4.3	数据反求技术分类	59



3.4.4 三维扫描技术	61
3.4.5 典型逆向设计软件	62
3.5 模型支撑添加技术	64
3.5.1 添加支撑的必要性	64
3.5.2 添加支撑的原则	65
3.5.3 添加支撑的类型	66
3.6 模型分层切片技术	68
3.6.1 分层切片的概念	68
3.6.2 分层切片的方法	69
3.6.3 分层切片对模型精度的影响	70
3.7 3D 打印控制软件	72
第4章 3D 打印材料技术	77
4.1 概述	77
4.2 SLA 工艺成型材料	78
4.2.1 光固化概念	78
4.2.2 光敏树脂特性	79
4.2.3 光敏树脂研究现状	80
4.2.4 几种常见光敏树脂	83
4.2.5 SLA 支撑材料	86
4.3 LOM 工艺成型材料	87
4.3.1 LOM 材料组成	87
4.3.2 纸质片材	88
4.3.3 陶瓷片材	89
4.4 SLS 工艺成型材料	90
4.4.1 金属粉末材料	90
4.4.2 高分子粉末材料	91
4.4.3 陶瓷粉末材料	92
4.4.4 覆膜砂粉末材料	93
4.4.5 其他材料	94
4.5 FDM 工艺成型材料	95
4.5.1 FDM 材料要求	95
4.5.2 FDM 材料研究现状	96



4.5.3	ABS 材料	97
4.5.4	PLA 材料	98
4.5.5	FDM 支撑材料	99
4.6	3DP 工艺成型材料	99
4.6.1	陶瓷粉料	99
4.6.2	石膏粉末	100
4.7	成型件的后处理	101
4.7.1	剥离	101
4.7.2	修补、打磨和抛光	101
4.7.3	表面涂覆	102
第 5 章 3D 打印技术应用		104
5.1	概述	104
5.2	3D 打印技术在工业制造的应用	106
5.3	3D 打印技术在医学领域的应用	107
5.3.1	医用模型	107
5.3.2	假体和人体植入物	109
5.3.3	个性化医疗	113
5.4	3D 打印技术在航空航天中的应用	116
5.5	3D 打印技术在建筑设计的应用	118
5.6	3D 打印技术在其他领域中的应用	121
5.7	各成型工艺应用案例	125
5.7.1	SLA 应用	125
5.7.2	LOM 应用	126
5.7.3	SLS 应用	128
5.7.4	FDM 应用	129
5.7.5	3DP 应用	131
附 录		133
缩略词表		133
参考文献		135

第1章 绪 论

人猿相揖别,是因为古人能够手工制造工具并且使用工具;今人区别于古人,是因为能够用机器自动化大规模制造工具。人类进化至今,一个崭新的文明标志就是能够用机器制造机器。从某种意义上说,当前被赋予无限想象力的 3D 打印机正是这种能够制造机器的机器。

——胡迪·利普森,梅尔芭·库曼《3D 打印:从想象到现实》

1.1 概述

3D 打印(Three Dimensional Printing, 3DP)是一个通俗、形象的名词概念,在学术界一般又称之为三维打印、增材制造(Additive Manufacturing, AM)、快速成型(Rapid Prototyping Manufacturing, RPM)等。3D 打印的过程就像我们人类盖房子一样,把成型材料一层一层地堆积起来逐渐形成有一定形状的三维物体,这就是离散一叠加成型原理,它是把计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)模型文件导入到打印机软件中,控制打印材料逐层地堆积出三维实物的一种先进制造技术。图 1-1 所示为一些通过 3D 打印技术制造的模型。

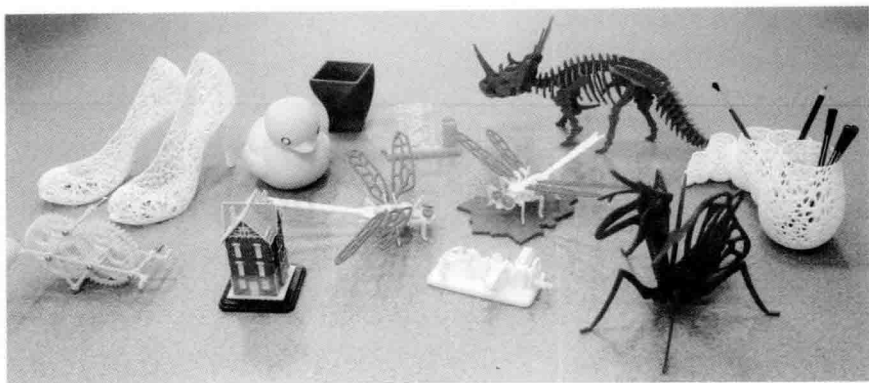


图 1-1 通过 3D 打印技术制造的模型

1.1.1 3D 打印的基本概念

首先了解与“3D 打印”概念相似的其他几个概念:快速成型、快速模具、快速制造、增材制造。

快速成型(RPM)是在制作模型或原型的快速原型(Rapid Prototyping, RP)技术的基础上进行制造功能的扩展而形成的制造技术,它诞生于 20 世纪 80 年代后期,集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一身,可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件,从而为零件原型制作、新设计思想的校验等方面提供了一种高效的实现手段。目前国内外,尤其是传媒界习惯把快速成型叫做“3D 打印”或者“三维打印”,显得比较生动形象,用它来代指所有快速成型技术。但是实际上,快速成型比较常用的有五种成型工艺,当然还有一些目前尚未有固定名称的成型工艺,其中“3D 打印”只是快速成型的一种成型工艺,只能代表部分快速成型工艺中的一部分。

快速模具(Rapid Tooling, RT),是指一般依照 RP 制作的原型,或者现有的原型件,通过真空注塑或消失模铸造等方法制作出原型的阴模,然后再生产具有一定形状、尺寸和表面精度制品的成型方法。比起传统的锻造及 CNC 加工等方法,RT 技术的成本更低、周期更短,更适合运用于中小批量的生产。

快速制造(Rapid Manufacturing, RM),是指利用 RP 技术制作出的原型或模型,通过 RT、CNC 数控技术等加工方法获得具有一定功能的零件或产品的成型技术。快速制造与一般的快速成型技术相比,其特点在于可以间接生产功能



性较强的零件或最终产品,而不是像其他快速成型技术仅能制作可观赏而不能直接使用的产品,因此,快速制造更能够适应从单件产品生产到批量的个性化产品制作。在新产品开发方面,RM 技术由于集成了 RP、RT 和 CNC 等技术,因此更具有柔性,更具竞争力。

增材制造(AM)是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术,相对于传统的材料去除与切削加工技术而言,它是一种“自下而上”的成型方法。其含义比 RP 或 RPM 更为宽泛,如用于修复破损金属零部件的激光熔覆技术,由于其成型过程是通过高能量激光把金属粉末熔化使其与已有零件的破损部位相融合而达到修复目的,因此该激光熔覆技术不属于 RP 范畴,但却属于 AM 范畴。2009 年美国材料与试验协会 ASTM 成立了 F42 委员会,将 AM 定义为:“Process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies.”即一种与传统的材料去除加工方法截然相反的,基于三维 CAD 模型数据,通常采用逐层制造方式制造三维物理实体模型的方法。

本书采用“3D 打印”一词来泛指 RP、RPM、AM 等所涉及的所有技术,不再区分 RP、RPM 和 AM 之间的不同和关联。

1.1.2 3D 打印成型原理

3D 打印成型的基本原理是把一个通过设计或者扫描等方式得到的 3D 数字化模型按照某一方向或坐标轴切成多个 2D 剖面,然后一层一层打印出来并按原来的位置依次堆积起来,形成一个实体模型。其形象示意图如图 1-2 所示,图中左侧的人体模型可以视作由右侧的多个剖面层片按序叠加而成。

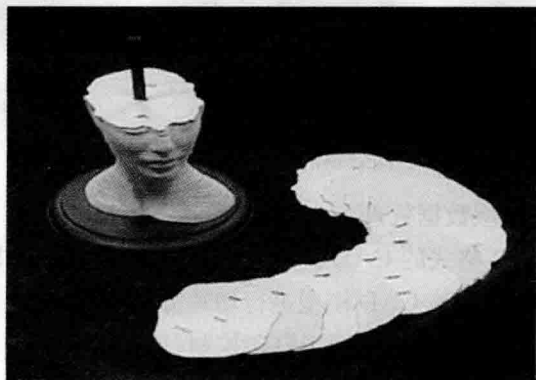


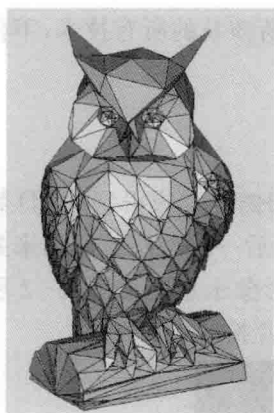
图 1-2 3D 打印成型原理形象示意图



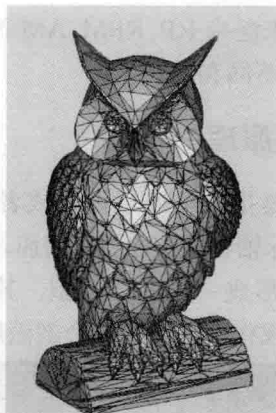
3D 打印成型过程为:先通过建模软件制作出三维的 CAD 模型,再将该 CAD 模型“分解”成多个逐层的截面,从而指导打印机逐层打印。具体可以分为四个步骤。

第一步:获得三维 CAD 模型。

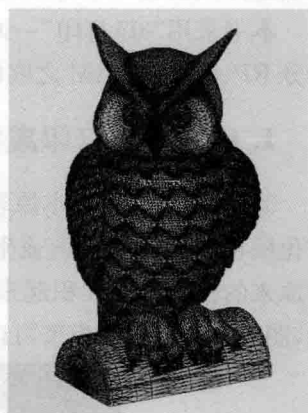
通过三维建模设计或者扫描实际生活中的物体得到可以用于打印的三维模型。常用的 3D 建模软件有 Cinema 4D、ZBrush、Poser、Maya、Softimage XSI、Solidworks、Catia、AutoCAD、VariCAD、Pro/E、UG、3DS 等。设计软件和打印机之间协同工作的标准文件格式是 STL(Stereo Lithography)文件格式,是由美国 3D Systems 公司于 1988 年制定的接口标准。STL 文件使用三角面片来近似模拟物体的表面,三角面片越小、数量越多则其生成的表面分辨率越高。图 1-3 所示为同一个 CAD 模型采用不同数量的三角面片来表示的效果。显然,图 1-3(a)表示的 STL 模型精度远低于图 1-3(c)表示的 STL 模型,但是其文件的大小却大大降低。



(a) 三角面片数量 2 086 个
(文件大小 101 KB)



(b) 三角面片数量 6 488 个
(文件大小 316 KB)



(c) 三角面片数量 78 824 个
(文件大小 3.75 MB)

图 1-3 不同数量的三角面片表示的 CAD 模型

第二步:CAD 模型数据处理。

把要打印的 STL 格式的 CAD 模型导入到打印控制软件中(见图 1-4),导入后,打印机控制软件对该 CAD 模型进行切片分层,获得一系列离散的切片,并对每层二维切片进行数据处理以用于打印控制(见图 1-5)。

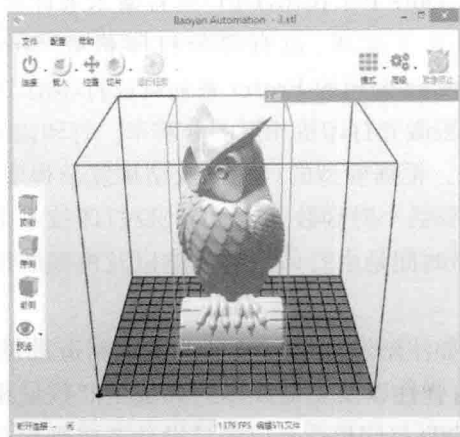


图 1-4 CAD 模型导入到打印控制软件中

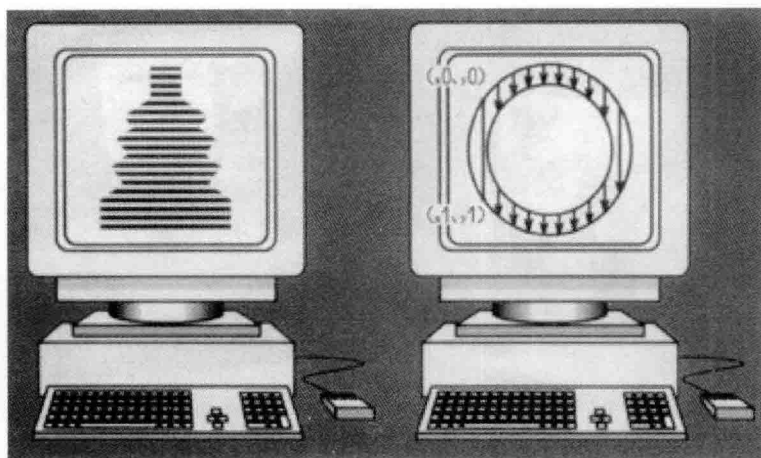


图 1-5 CAD 模型切片分层

第三步:实现打印过程。

把每个切片的数据信息传给 3D 打印机的控制系统,通过读取每个切片的加工信息,用成型材料将这些切片逐层地打印出来,即控制成型材料有规律地、精确地、迅速地层层堆积起来而形成三维的原型,再将各层截面以各种方式黏合起来,从而制造出一个实体,这种技术的特点在于其几乎可以造出任何形状的物品。

打印机打出的截面的厚度方向(Z 方向)以及平面方向($X-Y$ 方向)的分辨



率是以每英寸的像素(Dots Per Inch,DPI)或者微米来计算的。一般而言,打印层厚为 100 微米,即 0.1 毫米,也有部分打印机如 Stratasys 公司的 Objet Connex 系列、3D Systems 公司的 ProJet 系列可以打印出 16 微米的层厚。而平面方向则可以打印出跟激光打印机相近的分辨率。打印出来的“墨水滴”的直径通常为 50~100 微米。根据模型的尺寸以及结构复杂程度而定,用传统方法制造出一个模型通常需要数小时到数天。而用 3D 打印技术则可以将时间缩短为数小时,当然实际成型时间是由打印机的性能以及模型的尺寸和结构复杂程度而定的。

传统的制造技术如注塑法能够以较低的成本制造批量化产品,而 3D 打印技术则能以更快、更有弹性以及更低成本的办法生产数量相对较少的产品或模型。一个桌面尺寸的 3D 打印机就可以满足设计者或概念开发小组制作模型的需要。图 1-6 所示为一台已经打印出塑料成型件的 3D 打印机。

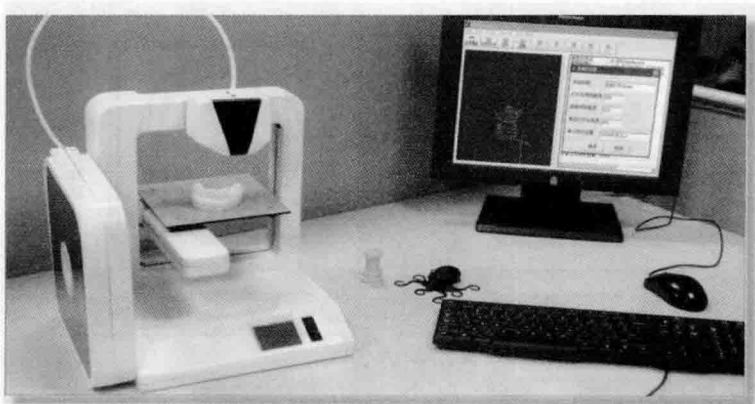


图 1-6 打印出塑料成型件的 3D 打印机

第四步:成型件后处理。

3D 打印机的分辨率对大多数应用来说已经足够(在弯曲的表面可能会比较粗糙,微观上如同图像上的锯齿,见图 1-7),要获得更高分辨率的物品可以通过如下方法:先用当前的 3D 打印机打出稍大一点的物体,再通过表面打磨即可得到表面光滑的“高分辨率”物品。有些技术在打印的过程中还会用到支撑物,比如在打印一些有倒挂状的物体时就需要用到一些易于去除的东西(如可溶性支撑材料)作为支撑物。

从 3D 打印系统上取下的制件往往需要剥离支撑结构,去除废料,有的还

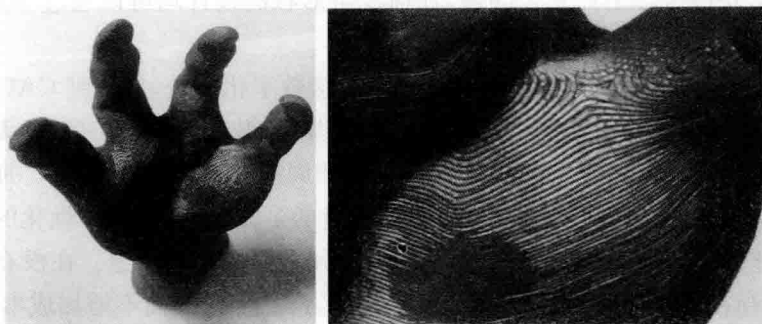


图 1-7 打印的模型及其局部放大图

需要进行后固化、修补、打磨、抛光和表面强化处理等,这些工序统称为后处理。修补、打磨、抛光是为了提高表面的精度,使表面光洁;表面涂覆是为了改变表面的颜色,提高强度、刚度和其他性能。经过后处理便可得到最终需要的模型零件。

总体而言,从成型的角度,零件可视为一个空间实体,它是点、线、面的集合。3D 打印的成型过程是体—面—线的离散与点—线—面的叠加的过程,即三维 CAD 模型—二维平面(实体)—三维原型的过程。具体流程如图 1-8 所示。

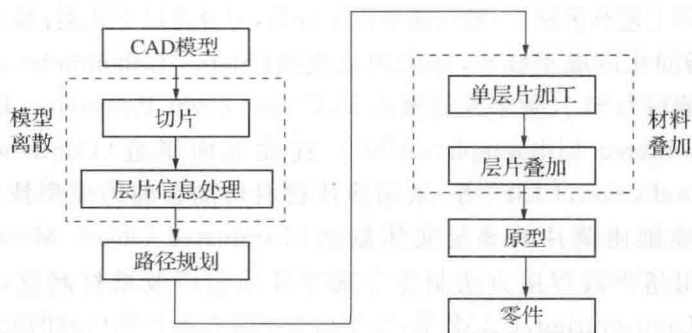


图 1-8 3D 打印的离散—叠加过程

1.1.3 3D 打印技术的特点

3D 打印带来了世界性的制造业革命,以前是部件设计完全依赖于生产工艺能否实现,而 3D 打印机的出现颠覆了这一生产思路,这使得企业在生产部件的



时候不需要再考虑生产工艺问题,任何复杂形状的设计均可以通过 3D 打印机来实现。

3D 打印具有 4 大优势:① 3D 打印是直接数字化制造,从三维 CAD 模型直接制造出产品,减少或省略了毛坯准备、零件加工、装配等中间工序,且无需昂贵的刀具或模具,从而极大地缩短了产品的生产周期,提高了生产效率。加工过程中无振动、噪声和切削废料。② 3D 打印制造的是完全定制的、个性化的独特产品,设计空间无限,可做到全球仅此一件,百分之百按订单制造。在没有售出之前,是储存在计算机里的数据,无需实体仓库,产品多样化而不增加成本。③ 数据打印产品在没有售出之前是用数字发运的,模型文件在互联网上传输所需费用极微。此外,3D 打印不仅是按需制造,而且是就地制造,即在使用地点制造,这种方式节约了物流成本。④ 数据打印能够最大限度地发挥材料的特性,而不在意制品构造是否复杂,仅把材料放在有用的地方,材料无限组合,大大减少了材料的浪费,提高了材料利用率。

1.2 主流 3D 打印成型工艺

1.2.1 3D 打印工艺分类

3D 打印工艺有多种,一般按成型方法分类,可分为以下几类:基于紫外光源和光敏树脂固化的成型技术,如光固化成型(Stereo Lithography Apparatus, SLA,有时缩写为 SL)、数字光处理成型(Digital Light Processing, DLP)、微光造型(MicroStereo Lithography, MSL)、连续液面制造(Continuous Liquid Interface Production, CLIP)等;采用薄片材料切割叠加的成型技术,如采用 PVC 薄膜或纸质薄片的叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM);采用超声波焊接方法制作金属零件的超声波增材制造(Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM)等;采用高功率激光器加热材料的成型技术,如选择性激光烧结(Selected Laser Sintering, SLS);采用材料挤出成型的技术,如塑料丝材加热挤出成型的熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)、混凝土挤出成型的建筑打印(Construction Printing, CP)等;基于数字微喷方法的成型技术,如三维印刷成型(Three Dimensional Printing, 3DP)等。