

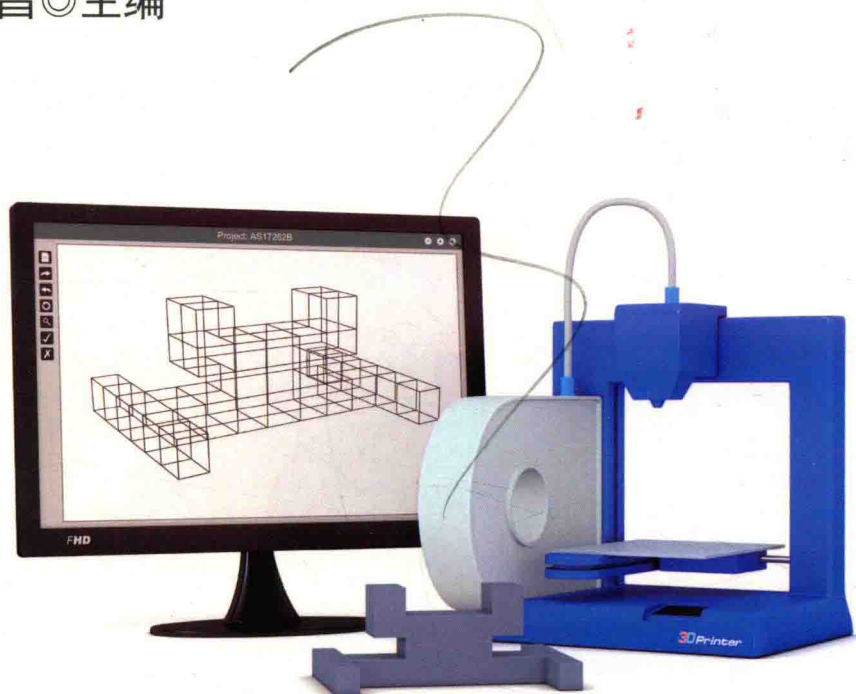


全国应用型高校3D打印领域
人才培养“十三五”规划教材

顾问 卢秉恒
丛书主编 史玉升 朱 红

3D 打印技术基础

朱 红 陈森昌◎主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

全国应用型高校 3D 打印领域人才培养“十三五”规划教材

3D 打印技术基础

主 编 朱 红 陈森昌
副主编 侯高雁 刘 凯
参 编 易 杰

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书根据近年来国内外 3D 打印技术的发展现状,汇集了大量国内外相关文献中的精华,以目前最新的职业教育改革精神为指导,并结合编著者近年来对 3D 打印技术的研究和实践成果,以 3D 打印技术的成形原理为主线,以五种主流 3D 打印技术(包括 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP)为依托,系统地阐述了 3D 打印技术的成形原理、成形过程、成形件后处理以及最新的应用进展。其中,第 1 章简要介绍 3D 打印技术的起源和发展,第 2 章介绍 3D 打印基础理论,第 3 章主要介绍目前主流 3D 打印技术的成形原理和成形材料,第 4 章详细介绍主流 3D 打印技术的成形设备及其主要技术参数,第 5 章主要介绍 3D 打印技术成形过程中的成形件后处理环节,第 6 章简要介绍 3D 打印技术的应用。

本书可作为应用型高校制造工程类、材料工程类和产品设计类专业的学习教材和教学参考书,也可作为相关专业的参考教材。同时可供从事 3D 打印技术领域研究、开发、设计、制造的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印技术基础/朱红,陈森昌主编. —武汉:华中科技大学出版社,2017.8
全国应用型高校 3D 打印领域人才培养“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5680-2925-4

I. ①3… II. ①朱… ②陈… 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 126913 号

3D 打印技术基础

3D Dayin Jishu Jichu

朱 红 陈森昌 主编

策划编辑:张少奇

责任编辑:邓 薇

封面设计:杨玉凡

责任校对:刘 竣

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:7.75

字 数:155 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:30.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

全国应用型高校 3D 打印领域人才培养“十三五”规划教材

编审委员会

顾问:卢秉恒 西安交通大学

总主编:史玉升 华中科技大学

朱红 武汉职业技术学院

主任:史玉升 华中科技大学

副主任:周钢 华中科技大学

陈森昌 广东技术师范学院

李义军 湖北嘉一三维高科股份有限公司

委员:(按姓氏笔画排序)

王晖 佛山职业技术学院

文世峰 华中科技大学

刘凯 武汉职业技术学院

李中伟 华中科技大学

李文慧 文华学院

杨家军 文华学院

杨振国 佛山职业技术学院

余日季 湖北大学

张帆 武汉理工大学

张新建 文华学院

陈曦 广东技术师范学院

易杰 湖南工业职业技术学院

胡斌 湖北嘉一三维高科股份有限公司

钟飞 湖北工业大学

侯高雁 武汉职业技术学院

盛步云 武汉理工大学

谢丹 武汉职业技术学院

鄢国平 武汉工程大学

戴红莲 武汉理工大学

魏青松 华中科技大学

秘书:俞道凯 张少奇

序

3D 打印技术也称增材制造技术、快速成形技术、快速原型制造技术等,是近 30 年来全球先进制造领域兴起的一项集光/机/电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术。它不需要传统的工具和夹具,利用三维设计数据在一台设备上由程序控制自动地制造出任意复杂形状的零件,可实现任意复杂结构的整体制造。如同蒸汽机、福特汽车流水线引发的工业革命一样,3D 打印技术符合现代和未来制造业对产品个性化、定制化、特殊化需求日益增加的发展趋势,被视为“一项将要改变世界的技术”,已引起全球关注。

3D 打印技术将使制造活动更加简单,使得每个家庭、每个人都有可能成为创造者。这一发展方向将给社会的生产和生活方式带来新的变革,同时将对制造业的产品设计、制造工艺、制造装备及生产线、材料制备、相关工业标准、制造企业形态乃至整个传统制造体系产生全面、深刻的影响:(1)拓展产品创意与创新空间,优化产品性能;(2)极大地降低产品研发创新成本、缩短创新研发周期;(3)能制造出传统工艺无法加工的零部件,极大地增加工艺实现能力;(4)与传统制造工艺结合,能极大地优化和提升工艺性能;(5)是实现绿色制造的重要途径;(6)将全面改变产品的研发、制造和服务模式,促进制造与服务融合发展,支撑个性化定制等高级创新制造模式的实现。

随着 3D 打印技术在各行各业的广泛应用,社会对相关专业技能人才的需求也越来越旺盛,很多应用型本科院校和高职高专院校都迫切希望开设 3D 打印专业(方向)。但是目前没有一套完整的适合该层次人才培养的教材。为此,我们组织了相关专家和高校的一线教师,编写了这套 3D 打印技术教材,希望能够系统地讲解 3D 打印及相关应用技术,培养出适合社会需求的 3D 打印人才。

在这套教材的编写和出版过程中,得到了很多单位和专家学者的支持和帮助,西安交通大学卢秉恒院士担任本套教材的顾问,很多在一线从事 3D 打印技术教学工作的教师参与了具体的编写工作,也得到了许多 3D 打印企业和湖北省 3D 打印产业技术创新战略联盟等行业组织的大力支持,在此不一一列举,一并表示感谢!

我们希望该套教材能够比较科学、系统、客观地向读者介绍 3D 打印技术这一新兴制造技术,使读者对该技术的发展有一个比较全面的认识,也为推动我国 3D

打印技术与产业的发展贡献一份力量。本套书可作为高等院校机械工程专业、材料工程专业、职业教育制造工程类的教材与参考书,也可作为产品开发与相关行业技术人员的参考书。

我们想使本套书能够尽量满足不同层次人员的需要,涉及的内容非常广泛,但由于我们的水平和能力有限,编写过程中有疏漏和不妥在所难免,殷切地希望同行专家和读者批评指正。

史玉升

2017年7月于华中科技大学

前 言

随着现代制造业的迅速发展,传统的标准化、规模化的生产模式已经不能满足人们对产品的使用需求,3D 打印技术的出现满足了人们多样化、定制化的生产需求。3D 打印技术作为快速成形领域的一种新兴技术,目前正迅猛发展。2012 年 4 月,英国著名杂志《经济学人》发表专题报告指出,全球工业正在经历第三次工业革命,与以往不同,本次革命将对制造业的发展产生巨大影响,其中一项具有代表性的技术就是 3D 打印技术。同年,美国政府将美国国家增材制造创新中心确定为首个制造业创新中心,《时代》周刊将 3D 打印产业列为“美国十大增长最快的工业”。随后,3D 打印技术被美国、英国、日本、中国等写进了国家发展战略中。

3D 打印技术又称为增材制造技术,是一种自底向上叠加材料的制造技术,利用该技术可以打印任意复杂形状的产品且不需要预制任何模具,可实现小批量、个性化私人定制。3D 打印的实质是以数字三维 CAD 模型文件为基础,利用计算机将成形零件的 3D 模型切成一系列一定厚度的“薄片”,运用高能束源或其他方式,将熔融体、液体、粉末、丝或片等特殊材料进行逐层堆积黏合,叠加成形,从而最终“打印”出真实而立体的固态物体。3D 打印成形的通用化过程为:由设计者首先在计算机上利用三维软件建立 3D 模型,再用切片软件将 3D 模型逐层分解成多个截面,打印机逐层打印 2D 轮廓,堆叠形成三维实体。本书将以 3D 打印技术的成形原理为主线,以五种主流 3D 打印技术(包括 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP)为依托,详细介绍 3D 打印技术的成形过程,包括三维建模、模型数据处理、3D 打印过程以及成形件后处理。

本书内容共分 6 章。第 1 章简要介绍 3D 打印技术的起源和发展、成形原理、成形特点以及意义。第 2 章介绍 3D 打印基础理论,包括 3D 打印技术成形过程中的前两个环节:三维建模和模型数据处理。第 3 章和第 4 章介绍 3D 打印的成形过程。第 3 章以五种主流 3D 打印技术为主线,分别介绍 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP 以及其他 3D 打印技术的成形原理和成形的材料。第 4 章仍以五种主流 3D 打印技术为主线,分别介绍 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP 以及其他 3D 打印技术的国内外主流成形设备及其参数。第 5 章介绍 3D 打印技术成形过程的第四个环节——成形件后处理,首先总述成形件后处理的常见工艺,然后分别介绍 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP 以及其他 3D 打印技术的成形件后处理工艺。第 6 章简要介绍 3D 打印技术的应用,并分别列举了 SLA、FDM、SLS、SLM、3DP 以及其他 3D 打印技术的应用实例。

本书由武汉职业技术学院朱红、广州技术师范学院陈森昌任主编,武汉职业技术学院侯高雁、刘凯任副主编。具体编写分工:朱红负责编写第1章、第2章,陈森昌负责编写第5章,侯高雁负责编写3.1~3.4节、4.1~4.4节、附录,刘凯负责编写第6章,湖南工业职业技术学院易杰负责编写3.5~3.6节、4.5~4.6节。全书由朱红统稿。

在本书编写过程中,查阅了大量的相关资料,在此向参考资料的各位作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中缺点、错误在所难免,恳请使用本书的师生和有关人士批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 3D 打印技术的起源与发展	(1)
1.2 3D 打印的工艺流程	(3)
1.3 3D 打印技术的特点	(7)
1.4 3D 打印技术的意义	(7)
第 2 章 3D 打印基础理论	(9)
2.1 数字建模	(9)
2.1.1 正向建模	(9)
2.1.2 逆向建模	(12)
2.1.3 正逆向混合建模	(16)
2.2 模型处理	(17)
2.2.1 数据格式文件	(18)
2.2.2 模型修复	(19)
2.2.3 模型数据处理	(21)
第 3 章 3D 打印成形工艺	(27)
3.1 光固化成形	(27)
3.1.1 SLA 成形原理	(27)
3.1.2 SLA 成形特点	(29)
3.1.3 SLA 成形材料	(29)
3.2 熔融沉积制造	(31)
3.2.1 FDM 成形原理	(32)
3.2.2 FDM 成形特点	(33)
3.2.3 FDM 成形材料	(33)
3.3 选择性激光烧结	(35)
3.3.1 SLS 成形原理	(35)
3.3.2 SLS 成形特点	(37)
3.3.3 SLS 成形材料	(37)
3.4 选区激光熔化	(40)
3.4.1 SLM 成形原理	(40)
3.4.2 SLM 成形特点	(41)
3.4.3 SLM 成形材料	(42)

3.5	三维印刷成形	(43)
3.5.1	3DP 成形原理	(44)
3.5.2	3DP 成形特点	(45)
3.5.3	3DP 成形材料	(45)
3.6	其他成形技术	(47)
3.6.1	叠层实体制造	(47)
3.6.2	形状沉积制造	(49)
3.6.3	数字光处理	(50)
第4章	3D 打印成形设备	(51)
4.1	光固化成形(SLA)成形设备	(51)
4.1.1	国外 SLA 成形机及其参数	(51)
4.1.2	国内 SLA 成形机及其参数	(53)
4.2	熔融沉积(FDM)成形设备	(55)
4.2.1	国外 FDM 成形机及其参数	(56)
4.2.2	国内 FDM 成形机及其参数	(58)
4.3	选择性激光烧结(SLS)成形设备	(60)
4.3.1	国外 SLS 成形机及其参数	(61)
4.3.2	国内 SLS 成形机及其参数	(63)
4.4	选区激光熔化(SLM)成形设备	(66)
4.4.1	国外 SLM 成形机及其参数	(66)
4.4.2	国内 SLM 成形机及其参数	(69)
4.5	三维印刷(3DP)成形设备	(71)
4.5.1	国外 3DP 成形机及其参数	(71)
4.5.2	国内 3DP 成形机及其参数	(75)
4.6	其他 3D 成形设备	(75)
4.6.1	LOM 成形机及其参数	(75)
4.6.2	SDM 制造设备	(76)
4.6.3	DLP 成形机及其参数	(76)
第5章	3D 打印成形件后处理	(78)
5.1	光固化(SLA)成形件后处理	(79)
5.2	熔融沉积制造(FDM)成形件后处理	(80)
5.3	选择性激光烧结(SLS)成形件后处理	(80)
5.4	选区激光熔化(SLM)成形件后处理	(82)
5.5	三维印刷(3DP)成形件后处理	(83)
5.6	叠层实体制造(LOM)成形件后处理	(84)

第 6 章 3D 打印技术的应用	(85)
6.1 3D 打印技术在工业制造领域中的应用	(85)
6.1.1 模具领域	(85)
6.1.2 汽车领域	(86)
6.1.3 船舶领域	(88)
6.1.4 航空航天领域	(88)
6.2 3D 打印技术在文化艺术领域中的应用	(89)
6.2.1 文物考古领域	(89)
6.2.2 艺术设计领域	(90)
6.2.3 首饰领域	(91)
6.2.4 影视动画领域	(91)
6.3 3D 打印技术在生物医学领域中的应用	(92)
6.3.1 医学模型	(92)
6.3.2 假体和植入体	(92)
6.3.3 组织工程支架	(93)
6.3.4 医用支具	(94)
6.4 3D 打印技术在建筑领域中的应用	(94)
6.5 3D 打印技术在食品领域中的应用	(96)
6.6 3D 打印技术在教育领域中的应用	(96)
6.7 各主流 3D 打印成形技术的应用	(97)
6.7.1 SLA 应用	(97)
6.7.2 FDM 应用	(98)
6.7.3 SLS 应用	(99)
6.7.4 SLM 应用	(100)
6.7.5 3DP 应用	(101)
6.7.6 LOM 应用	(102)
附录 A 常用材料中英文名称对照	(103)
附录 B 本书部分中英文术语对照	(105)
参考文献	(107)

第 1 章 绪 论

在未来(或是在星际纪年的未来),机器可以制造机器。3D 打印机就是第一波新一代的智能机器,它们能设计、制造、修理、回收其他机器,甚至能够调整和改进行其他机器,包括它们自己^[1]。

1.1 3D 打印技术的起源与发展

3D 打印技术(three dimensional printing technology, 3DPT),学术界又称为“增材制造”(additive manufacturing, AM)技术,也称为添加制造或增量制造。2009 年,美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)成立了 3D 打印技术委员会(F42 委员会),明确给出了 3D 打印的定义:“Process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies.”据此,我们可以认为,3D 打印是一种与传统的机械加工方法截然相反,基于三维 CAD 模型数据,通过增加材料逐层制造的方式,直接制造与相应数学模型完全一致的三维物理实体模型的制造方法,如图 1.1 所示。

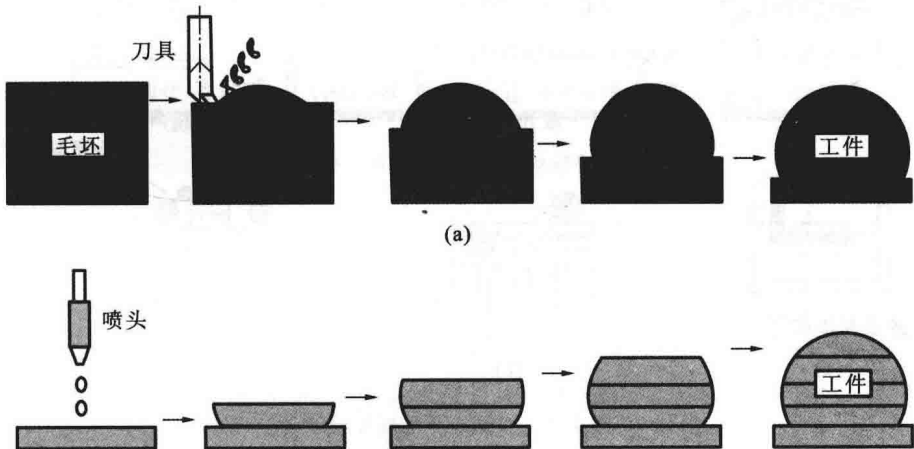


图 1.1 机械制造方法
(a)减材制造 (b)增材制造

3D 打印的实质是以数字三维 CAD 模型文件为基础,利用计算机将成形零件的 3D 模型切成一系列一定厚度的“薄片”,运用高能束源或其他方式,将熔融体、液体、粉末、丝或片等特殊材料进行逐层堆积黏合,叠加成形,从而最终“打印”出真实而立体的固态物体。3D 打印技术内容涵盖了产品生命周期前端的“快速原型”(rapid prototyping, RP)和全生产周期的“快速制造”(rapid manufacturing, RM)相关的所有打印工艺、技术、设备类别和应用。

3D 打印技术的核心制造思想最早起源于美国^[2]。早在 1892 年, J. E. Blather 在其专利中,就提出了分层制造的思想。1902 年, Carlo Baese 提出了用光敏聚合物来制造塑料的原理。1940 年, Perera 提出了在硬纸板上切割轮廓线,然后将这些纸板黏结成三维地形图的方法。20 世纪 50 年代之后,出现了上百个有关 3D 打印技术的专利。20 世纪 80 年代之后,3D 打印技术有了根本性的发展。1986 年,美国科学家 Charles Hull 成功地将数字资料转化为三维立体模型,推出光固化方法(stereo lithography apparatus, SLA),同年创立了世界上第一家制造 3D 打印设备的 3D Systems 公司。1988 年,美国人 Scott Crump 提出了熔融沉积制造(fused deposition modeling, FDM)的思想,并成立了 Stratasys 公司。1989 年, C. R. Dechard 发明了选择性激光烧结法(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形,并成立了 DTM 公司。1993 年,麻省理工大学教授 Emanuel Sachs 发明了一种立体喷墨打印法(three dimension printing, 3DP),该技术是世界上最早的全彩色 3D 打印技术。1995 年,德国 Fraunhofer(弗朗霍夫)研究所在选择性激光烧结原理的基础上提出了金属粉末激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术,采用该技术可以直接成形金属零件。图 1.2 为五种 3D 成形技术的成形原理。

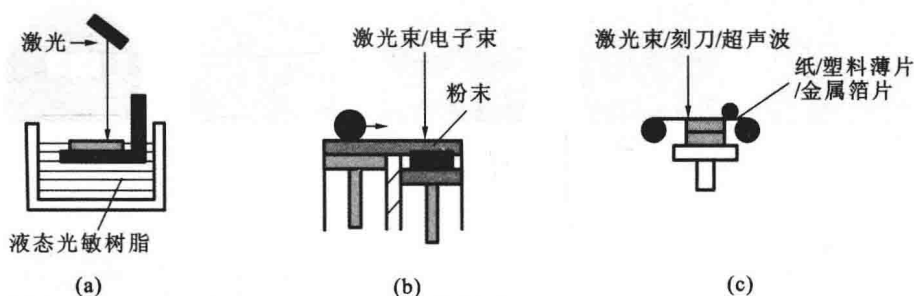
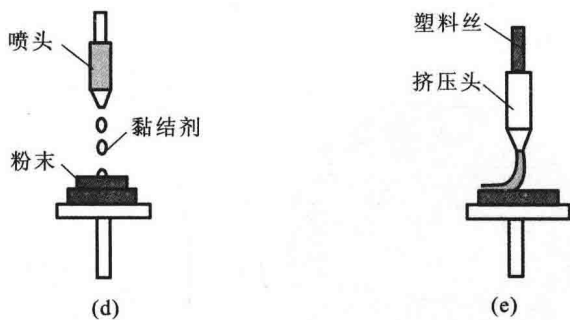


图 1.2 常见成形机成形原理

(a)SLA (b)SLS/SLM (c)LOM (d)3DP (e)FDM



续图 1.2

1.2 3D 打印的工艺流程

3D 打印成形的通用化过程为：由设计者首先在计算机上利用三维软件建立 3D 模型，再用切片软件将 3D 模型逐层分解成多个截面，打印机逐层打印 2D 轮廓，堆叠形成三维实体。如图 1.3 所示。

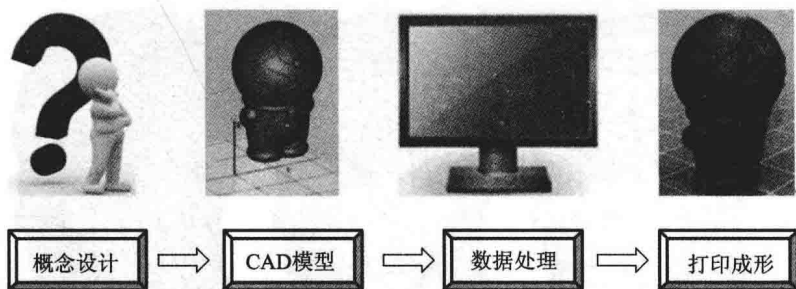


图 1.3 3D 打印成形的通用化过程

3D 打印的工艺流程一般如下^[3]。

1. 建立三维 CAD 模型

三维模型可以通过两种方式获得：其一，利用 3D 建模软件，如 AutoCAD、Solidworks、Pro/E、UG、CATIA、3Dmax、Maya、Rhino、ZBrush 和 Mimics 等；其二，通过逆向建模，扫描目标产品，生成待打印的模型。

实现设计软件和打印机之间协作的标准文件格式是 STL 文件格式，所以生成的三维模型需保存为 STL 格式的文件。STL 文件格式最早由美国 3D Systems 公司推出，是一种用三角形面片表达实体表面数据的文件格式。它是若干空间小

三角形面片的集合,每个三角形面片都是由逆时针方向排序的 3 个顶点和指向模型外部的法向量构成的,如图 1.4 所示。

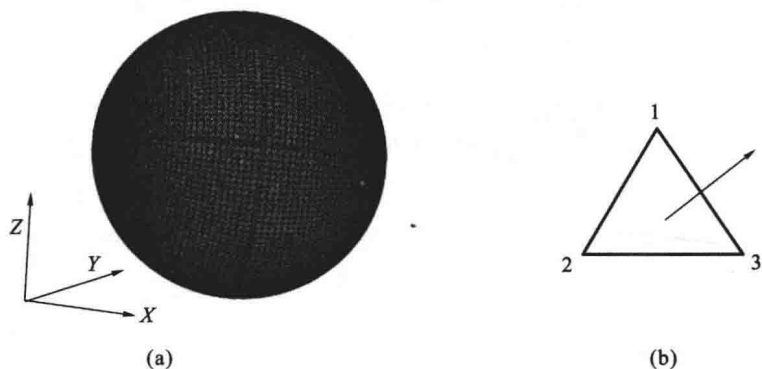


图 1.4 球体的 STL 模型及单个三角形面片

(a)用三角形面片表示的球体的 STL 文件 (b)单个三角形面片

这种文件格式类似于有限元的网格划分,即将物体表面划分成很多小三角形,用很多个三角形面片去逼近 CAD 实体模型。三角形面片越小、数量越多,则其生成的表面分辨率越高。图 1.5 所示为采用数量不同的三角形面片得到的分辨率不同的模型。

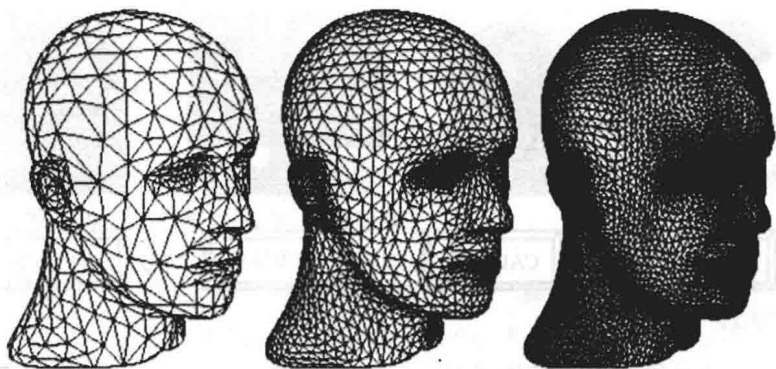


图 1.5 采用数量不同的三角形面片得到的模型

2. 模型数据处理

3D 打印机只能逐层打印目标物体,故生成 STL 格式的模型后还需要对其进行数据处理,主要包括:分层切片处理、生成层面信息和生成加工路径,如图 1.6 所示。

图 1.7(a)所示为三维模型,图 1.7(b)所示为经过切片处理后生成的某一层的层面轮廓。

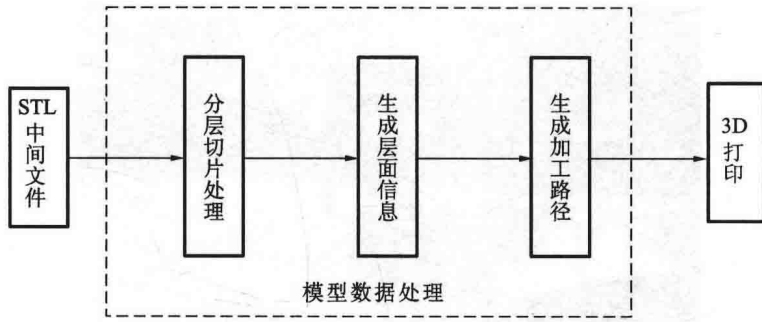


图 1.6 STL 格式文件的数据处理

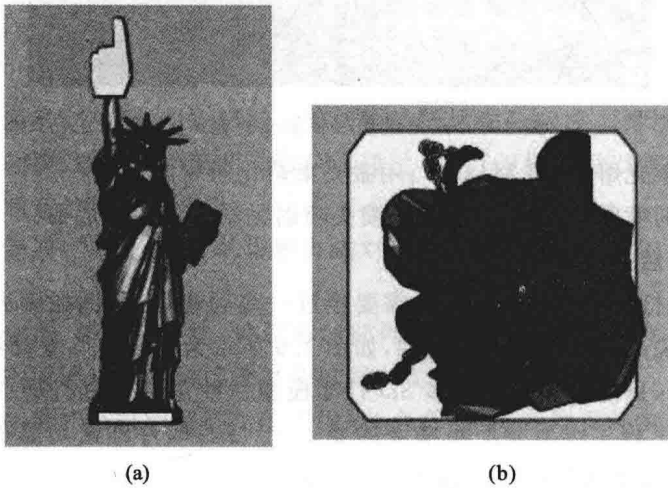


图 1.7 三维模型及其经过切片处理后的层面轮廓

(a) 三维模型 (b) 某一层的层面轮廓

3. 实现打印过程

把带有层面信息和打印路径信息的数据传到打印机控制系统中,读取每个切片的加工信息,用成形材料将这些片层轮廓打印出来,逐层地叠加便形成了真实的三维实体。被添加材料与已打印材料之间一般是通过施加热源达到原子尺度的结合,也有通过胶水胶接或利用光化学反应等实现连接的。层内的颗粒之间以及层与层之间的连接都是基于这样的原理。图 1.8 所示为采用熔融沉积制造的打印过程。

根据改变所用材料及生成片层的方式,3D 打印技术不断拓展出新的技术路线和实现方法。较成熟的技术主要有以下几种^[4]。

- (1) 光固化(SLA)成形:用激光束使液态光敏树脂固化成形。
- (2) 熔融沉积制造(FDM)成形:用喷头挤压熔融塑料成形。
- (3) 选择性激光烧结(SLS)成形:用激光束烧结粉材成形。

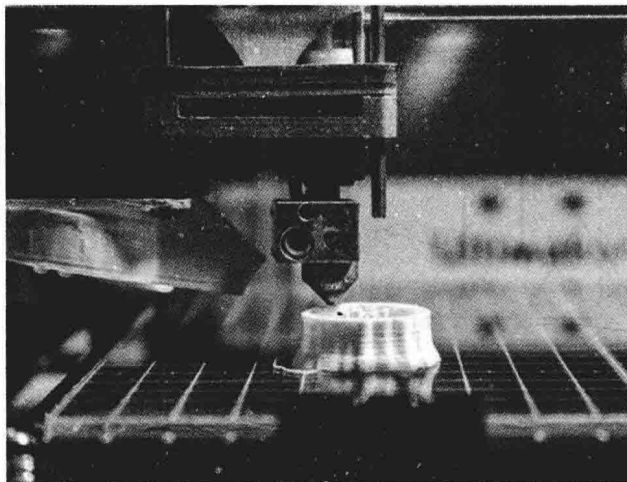


图 1.8 采用熔融沉积制造的打印过程

(4)选区激光熔化(SLM)成形:用激光束熔化粉材成形。

(5)黏结剂喷射式(3DP)成形:用喷头喷射黏结剂使粉材成形。

4. 成形件后处理

许多三维打印机打印出的产品需要经过一些后期处理,例如刷去所有的残留材料,或是冲洗产品以除去支撑结构,如图 1.9 所示为需要去除支撑结构的 3D 打印模型。此外,目前所实现的许多 3D 打印模型往往需要通过打磨或表面的切削加工,来达到工程实际对表面粗糙度的要求,金属打印件则通常需要放入热处理炉进行热处理以消除其残余应力并防止开裂和变形。3D 打印零部件的表面质量受到打印机类型、打印技术和材料粒度等多种因素的影响。后处理技术需要与打印材料、打印技术和零件几何形状相匹配,有时多种不同技术可以用于同一种零件的后处理。

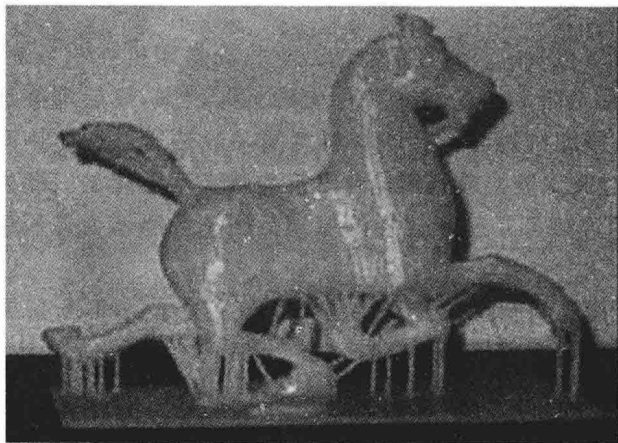


图 1.9 待去除支撑结构的 3D 打印模型