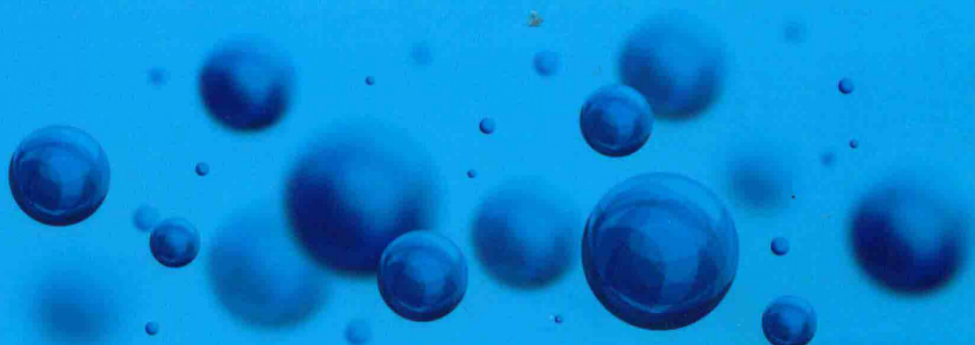


3D 打印基础 教程与设计

贾迎新 杨粤瀚 侯毅 主编



北京工业大学出版社

3D 打印基础教程与设计

主 编：贾迎新 杨粤瀚 侯 毅
副主编：刘青云 田 芳 缪亚东
参 编：芦 欣

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

3D 打印基础教程与设计 / 贾迎新, 杨粤瀚, 侯毅主编. — 北京: 北京工业大学出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5639-5748-4

I. ① 3… II. ① 贾… ② 杨… ③ 侯… III. ① 立体印刷—印刷术 IV. ① TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 285420 号

3D 打印基础教程与设计

主 编: 贾迎新 杨粤瀚 侯毅

责任编辑: 张慧蓉

封面设计: 精准互动

出版发行: 北京工业大学出版社

(北京市朝阳区平乐园 100 号 邮编: 100124)

010-67391722 (传真) bgdcb@sina.com

出 版 人: 郝勇

经销单位: 全国各地新华书店

承印单位: 北京朗翔印刷有限公司

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张: 16

字 数: 240 千字

版 次: 2017 年 11 月第 1 版

印 次: 2018 年 5 月第 2 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-5639-5748-4

定 价: 45.00 元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题, 请寄本社发行部调换 010-67391106)

作者简介

第一主编：贾迎新（1986年4月生，女，河北人。毕业于河北工业大学（211工程），现任北京商鲲三维创想科技有限公司教研主任，3D打印教材研发带头人。编著有《3D打印基础教程》、《中小学3D打印教程》、《3D打印笔系列教程》等，主要探索领域：3D打印特色课程、主题课件及教案、3D打印人才培养方案、3D打印教学体系标准等。

第二主编：杨粤瀚（1994年7月生，男，河北人。毕业于华北理工大学，曾特别参训于中国3D打印创新中心，并获得了中国3D打印技术专业技能证书。现任北京商鲲三维创想科技有限公司高级技术讲师。年轻有为，幽默风趣，有自己独特的课堂风格，参与编写：3Done、Geomagic Studio、ZBrush、Magics等软件教程。

第三主编：侯毅（1985年5月生，男，北京人。毕业于北京联合大学，曾在德企担任高级技术工程师一职，是最早一批接触3D打印技术的工程师，是3D打印之家的创始人，深入3D打印行业近5年时间，对3D打印技术及其应用有自身独到的理解和认识。现任北京商鲲三维创想科技有限公司经理。

第一副主编：刘青云，大学本科，机械制造及其自动化专业，从事加工技术教育教学三十余年，有较深的加工技术理论与操作基础，主要兴趣方向为3D打印教育教学，3D打印技术在职业教育中的应用，3D打印新技术的研发等。

第二副主编：田芳，硕士研究生，机械制造及其自动化专业，现从事中职3D打印教学，有较深的制造技术理论基础，主要兴趣方向是3D打印教学，3D打印新技术的开发，3D打印技术的推广应用等。

第三副主编：缪亚东，硕士研究生，生药学专业，从事高校教育十余年，有较深的生物医药基础，主要兴趣方向是3D生物打印，3D打印在生物医药方面的应用，3D打印生物材料等。

参编：芦欣，女，内蒙古工业大学计算机应用技术专业，硕士研究生，现就职于南通理工学院，计算机专业教师，2015年获3D打印专业证书，研究方向：计算机软件应用技术和3D打印模型处理。

序

我们认知的世界是连续的系统,但是我们测量结果是离散的,求精确很难,求近似却相对容易。在我国的古代(公元464年),祖冲之用圆内接正多边形的周长来逼近圆周长,将圆周率推算至小数点后7位(3.1415926与3.1415927之间)。现在,我们可以利用计算机“离散地”处理、计算、安排、存储、调拨、配置,用“离散”近似值相当精确地逼近“连续”真值。从“离散”的观点看世界,仿佛是由无数分离、近似的“点”构成,即朦胧,又逼真,是一种独特的美感。

上世纪90年代初,我给清华大学的博士生上课时,就提出“离散-堆积”的观点,这就是快速原型,也就是增材制造(3D打印)的原理。“离散”是物理模型的数字化建模的过程,“堆积”是将数字化模型(已切片)逐点逐层叠加起来,从而实现从二维薄层到三维实体的过程。1994年,我和清华大学团队研发出我国第一台商品化的3D打印设备(分层实体制造技术);1998年,我们团队又研发出我国第一台FDM(熔融沉积成形)的3D打印设备;从一个细胞看世界,我想到了生物制造的创意,2003年,我们又研制我国第一台低温沉积生物制造的3D打印设备;到今天,江苏永年研制的激光金属3D打印设备已批量产业化;“离散-堆积”的理论对3D打印技术的发展仍具有指导意义。

3D打印无疑是当前最流行的新兴产业技术之一,它被美国自然科学基金会称为20世纪最重要的制造技术创新。它的出现,带来了很多革命性的变革,成为各国竞争的战略高地。近几年,中国3D打印行业也获得了迅猛发展,但与世界上发达国家相比,仍有差距,尤其是在产业化应用领域。追根溯源,应用为主,教育先行,3D打印技术要从高等院校科研教育走向职业技术教育和中小学校科普教育是势在必行的。

我欣喜地看到,本书作者从3D打印技术的三生三世入手(由来、现状和将来),深入浅出地介绍3D打印技术的独特工艺,将3D建模、逆向工程和设计心理学

融会贯通，再结合 3D 打印的行业应用循循善诱、娓娓道来，颇有新意。该书尚未包含 3D 打印全部技术和最新成果，但瑕不掩瑜，对于初学者，仍是受教匪浅，有所裨益，不啻为职业教育培训的实用的、优秀的书籍。

大时代需要大变革，大变革孕育大机遇。3D 打印技术正在重塑全球制造业竞争格局，让我们汇聚磅礴力量，为实现“制造强国”的中国梦而努力奋斗。

颜永年

清华大学机械系机械工作研究所所长

中国机械工程学会特种加工分会 终身高级顾问

中国机械工程学会 终身高级顾问

SCI 源刊“Journal of Eng-Manufacturing”（英国）编委

清华老科技工作者协会 理事

中国 3D 打印第一人

江苏永年激光成形技术有限公司 董事长

前 言

本人自 1987 年赴 3D 打印技术中选区激光粉末烧结工艺 (SLS) 的发源地——美国德克萨斯大学奥斯汀分校 (University of Texas at Austin) 读博开始, 便与 3D 打印结缘。1991 年获得材料科学与工程博士学位, 专攻 3D 打印研究。1993 年主持研发了中国首台工业级 3D 打印样机, 并命名为快速成型机, 申报了国家名词认定, 次年通过了北京市科委组织的专家鉴定, 获得发明专利; 1994 年共同合资创立了北京隆源自动成型系统有限公司, 是国内最早专业从事工业级 3D 打印的高新技术企业。

3D 打印从 20 世纪 80 年代发展到今天, 其技术工艺、材料、软件等均经历了逐步的演变与发展。技术工艺方面, 主要涵盖了立体光刻 (SL)、热熔解积压成型 (FDM)、选区激光烧结 (SLS)、三维打印 (3DP)、选区激光融化成型 (SLM)、激光熔覆成型 (LMD) 等; 材料方面, 主要涵盖了树脂、石膏、蜡粉、聚苯乙烯、覆膜砂、尼龙、陶瓷、水泥等非金属材料, 不锈钢、高温合金、钛合金、模具钢、铝合金等金属材料, 人造骨粉、细胞生物原料, 糖、巧克力等食品材料; 应用软件方面, 目前主要为各类三维模型设计软件和切片软件。

随着技术自身的发展, 3D 打印的应用领域也在不断拓展。目前已在工业设计、模具制造、机械制造、航空航天、文化艺术、军事、建筑、影视、家电、轻工、医学、考古、教育等领域都得到了广泛应用。3D 打印技术正在快速改变着人类的传统生产、生活乃至思维方式。

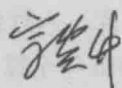
事实上, 3D 打印因其可实现复杂形状制造、数字化零件库存、按需制造、即刻制造、分布式制造、大批定制及提升资源利用效率等优势正在吸引全世界的目光, 人行企业快速增加, 技术开发投入也在不断加大。据 Wohlers 报告统计, 2016 年全球 3D 打印产值达 60.63 亿美元, 并预计 2020 年将增至 212 亿美元, 发展迅猛。

作为一名已浸润 3D 打印行业三十年的“老兵”, 我认为应理性地看待 3D 打印的发展。它并不是神器, 仍有很多需要改进之处; 更不是泡沫, 应该引起多方关注。作为智能制造的核心技术之一, 3D 打印相较传统制造来说是一个有效

的补充工具。如果改变规则、要求和目标，将3D打印与传统制造结合、增量发展，优势互补，找准市场需求，真正将其应用并产业化，3D打印将带来设计、制造的新纪元。3D打印要实现突破性发展，不仅要靠技术的进步，更需要一批有3D打印思维的人才。3D打印思维是在第三次工业革命和中国制造2025的环境中，在3D打印技术和应用不断发展的背景下，对产品设计、研发、制造、销售、物流、维修，乃至企业价值链进行重新审视的思考方式。其包括关于突破传统设计限制的自由设计思维，关于其核心竞争力的大批定制思维，关于产品交付速度及供给侧革新的即刻制造思维，关于产品及市场定位的集成部件思维，关于创新兼容的技术补充思维，关于需求拉动市场和技术发展的需求激活思维，关于商业模式和组织形态的平台服务思维，关于产业边界及创新的协同创新思维。

此外，随着3D打印产业规模的扩展，其对3D打印技术与应用专业人才的需求也日益旺盛。加之3D打印技术涉及了机械、材料、光电等众多学科，其技术特点也决定了对综合性人才的特殊性需求。同时，随着3D打印从象牙塔里的高科技发展成为融入学校、家庭和社会教育常态的技术，我们希望也能够通过3D打印创新教育，开启教育新理论和新实践，培育更多3D打印的创新力量。虽然近年来我国开始提倡创新教育，但仍处于摸索阶段，多数都忽视了最能体现青少年“创新”素养的动手实践能力的培养，造成了“手脑失衡”的现状。教育学家陶行知曾提出：“手脑双全是创造教育的目的，中国教育革命的对策是使手脑联盟。”

本书的编写，即为满足3D打印人才培养的需求，顺应创新教育大势，由3D打印的起源与发展开篇，引导读者步入3D打印的殿堂，再通过对3D打印技术与工艺、三维模型设计软件、逆向工程及设计心理学的深入浅出的讲解，理论配以丰富案例，并结合实践中常见的问题及解决方案，在生动轻松的学习氛围中带领读者畅游3D打印海洋。本书既可作为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或相关专业工程技术人员阅读。相信通过对本书的学习，也会有助于更多具有3D打印思维人才的涌现。



北京三帝打印科技有限公司董事长兼 CEO

深圳七号科技有限公司董事长

中国粉末冶金技术创新战略联盟 3D 打印专业技术委员会主任

深圳市科协委员

目 录

第一章 3D 打印的起源与发展	1
1.1 3D 打印的三生三世	1
1.2 何为 3D 打印	6
1.3 3D 打印与传统制造方式的区别与联系	7
1.4 3D 打印技术应用领域	8
1.5 3D 打印的发展现状	22
第二章 3D 打印成型工艺及技术	33
2.1 熔融沉积成型 (FDM)	33
2.2 三维印刷成型 (3DP)	61
2.3 选区激光熔化成型 (SLM)	69
2.4 立体光刻成型 (SLA)	84
2.5 选择性激光烧结 (SLS)	97
2.6 连续液体界面提取技术 (CLIP)	109
2.7 多射流熔融成型技术 (MJF)	113
第三章 三维模型设计软件	119
3.1 3DOnePlus	119
3.2 SolidWorks	133
3.3 UG	150

3.4 3DSMax	171
3.5 Magics	189
第四章 逆向工程	199
4.1 逆向工程概述	199
4.2 三维扫描仪	202
4.3 逆向工程软件 GeomagicStudio	210
第五章 设计心理学	221
5.1 设计心理学基础概论	221
5.2 设计心理学案例分析	230
参考文献	241

第一章 3D 打印的起源与发展

1.1 3D 打印的三生三世

1.1.1 3D 打印的前生

3D 打印技术最早称为快速成型技术或快速原型制造技术，诞生于 20 世纪 80 年代后期。从 20 世纪 80 年代到今天，3D 打印技术走过了一条漫长的发展之路。

1984 年，Charles W. Hull 发明了将数字资源打印成三维立体模型的技术，1986 年，Chuck Hull 发明了立体光刻工艺，利用紫外线照射将树脂凝固成形，制造物体，并获得了专利。随后他离开了原来工作的 UVP (UltraViolet Products) 开始成立 3D Systems 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。



图 1-1 3D 打印之父 Chuck Hull

1988 年，Scott Crump 发明了另外一种 3D 打印技术——热熔解积压成形 (FDM)，利用蜡、ABS、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 博士发明了选区激光烧结技术 (SLS)，利用高强度激光将尼龙、蜡、ABS、金属和陶瓷等材料粉末来烧结，直至成型。

1993 年，麻省理工大学教授 Emanuel Sachs 创造三维打印技术 (3DP)，将金属、陶瓷的粉末通过粘接剂粘结成型。1995 年，麻省理工大学 Jim Brecht 和

TimAnderson 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的方案，随后创立了现代的三维打印企业 ZCorporation。

1996 年，3DSystems、Stratasys、ZCorporation 分别推出了型号为 Actua2100、Genisys、2402 的三款 3D 打印机，第一次使用了“3D 打印机”的名称。

1.1.2 3D 打印的今生

2005 年，ZCrooration 推出了世界上第一台高精度彩色 3D 打印机——SpeCTRum2510，同一年，英国巴恩大学的 AdrianBowyer 发起了开源 3D 打印项目 RepRap，目标是通过 3D 打印机本身，能够制造出另一台 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% 元件，体积仅一个箱子大小。

2010 年 11 月，第一台用巨型 3D 打印机打印出整个身躯的轿车出现，它的所有外部组件都由 3D 打印制作完成，包括用 Dimension3D 打印机和由 Stratasys 公司数字生产服务项目 RedEyeonDemand 提供的 Fortus3D 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营敦大学的工程师剑建完成。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 3D 打印机重 1.5kg，报价约 1200 欧元。

2012 年 3 月，维也纳大学研究人员宣布利用二光子平板印刷技术突破了 3D 打印的最小极限，展示了一辆长度不到 0.3mm 的赛车模型。7 月，比利时 InternationalUniversCollegeLeuven 的一个研究组测试了一辆几乎完全由 3D 打印的小型赛车，其车速达到了 140 千米/小时。12 月，美国分布式防御组织成功测试了 3D 打印的枪支弹夹。

2012 年 12 月，Stratasys 公司发布了迄今为止最大的 3D 打印机 Objet1000，可以制造尺寸为 1000mm × 800mm × 500mm 的成品。

2013 年 2 月，玩具公司 WobbleWorks 推出了一款 3Doodler 涂鸦笔，能够画出实物。

2013 年 4 月，Organovo 宣称他们制造了具备功能和活力的 3D 打印肝细胞。

2014 年 7 月，NDUSTRY 宣布与著名自行车厂商 TiCycles 合作利用 3D 打印

技术制造出全球首辆完整钛金属自行车 Solid。

2014年9月，NASA的首台零重力3D打印机搭乘Falcon9火箭前往国际空间站，两个月后，完成了首个太空3D打印项目。NASA在国际空间站安装3D打印机为了测试宇航员在微重力下自主制造零部件和工具的可行性，将从地球向太空运送零部件和工具的次数降至最低，加快空间站的自给自足。

2015年2月，清华大学化学系刘冬生课题组与英国瓦特大学WillShu（舒文森）等合作成功研制出可应用于活细胞3D打印的DNA水凝胶材料，该材料能够同时满足多项活细胞3D打印的需求，为将来3D打印器官的活体移植创造了条件。

2015年7月，筑波大学和日本印刷公司组成的科研团队宣布，已研发出用3D打印机低价制作可以看清血管等内部结构的肝脏立体模型的方法。该方法的应用可以为每位患者制作模型，有助于术前确认手术顺序以及向患者说明治疗方法。美国食品与药物管理局（FDA）批准了全球首个3D打印药物——SPRITAM。

2015年9月，哈佛研究团队发明了一种革命性的主动混合多材料3D打印头，可以将不同材质和属性的材料整合到一个3D打印对象中。

2015年10月，四川蓝光英诺生物科技股份有限公司宣布，3D打印生物血管项目获得重大突破，具有完全自主知识产权的全球首创3D生物血管打印机问世，器官再造成为可能。波音公司披露了其最新开发出的一种独特的3D打印迷你网格材料，它的密度为0.9mg/ml，仅为塑料的1/1000。

2016年1月18日，位于弗吉尼亚州的OrbitalATK公司宣布，他们已成功地在NASA兰利研究中心测试了3D打印超音速发动机燃烧室。不仅测试分析结构确认达到甚至超出性能要求，3D打印的超音速发动机燃烧室也被证明是能够承受最长持续时间的风洞试验记录的一款燃烧室。

1.1.3 3D 打印的来生

2012年4月，英国著名杂志《经济学人》的专题报告中指出，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。报告认为，该技术将与其他数

字化生产模式一起推动实现“第三次工业革命”，可以改变未来的生产与生活方式，实现社会化制造，使每个人都可以成为一个工厂，并且将改变制造商品的方式，改变世界的经济格局，进而改变人类的生活方式。该技术一出现就取得了快速的发展，在各个领域都取得了广泛的应用。

2013年麦肯锡发布“2025”，而3D打印被纳入决定未来经济的12大颠覆技术之一。3D打印有能力改变我们在每个行业中实际生产每种产品的方式。3D打印中的“墨水”实际上是无限的，3D打印应用领域是多方面的。著名的创新团体SkunkWorks的前负责人曾说过，只要你保持简单，任何事情都是可能的。

目前，3D打印技术已经步入了飞速发展的时代，3D打印被赋予了“第三次工业革命”的大背景，以3D打印技术为代表的快速成型技术被看作是引发新一轮工业革命的关键要素。在3D打印技术领域，虽然国内与国外存在差距，但是，国内在某些方面已经领先全球，并且从“国家领导人”到“普通民众”对3D打印技术都给予了高度的关注和极大的热情，这为提升“中国制造”整体实力提供了一个绝佳的机会，为3D打印的普及应用与深化发展提供了一个良好的平台。

（一）3D打印技术未来趋势之一——设备向大型化发展

纵观航空航天、汽车制造以及核电制造等工业领域，对钛合金、高强钢、高温合金以及铝合金等大尺寸复杂精密构件的制造提出了更高的要求。目前现有的金属3D打印设备成形空间难以满足大尺寸复杂精密工业产品的制造需求，在某种程度上制约了3D打印技术的应用范围。因此，开发大幅面金属3D打印设备将成为一个发展方向。

（二）3D打印技术未来趋势之二——材料向多元化发展

3D打印材料单一性在某种程度上制约了3D打印技术的发展。以金属3D打印为例，能够实现打印的材料仅为不锈钢、高温合金、钛合金、模具钢以及铝合金等几种最为常规的材料。3D打印仍然需要不断地开发新材料，使得3D打印材料向多元化发展，并能够建立相应的材料供应体系，这必将极大地拓宽3D打印技术应用领域。

（三）3D打印技术未来发展趋势之三——从地面到太空

NASA 是美国政府机构中较早研究使用 3D 打印技术的单位，已利用 3D 打印技术生产了用于执行载人火星任务的太空探索飞行器（SEV）的零部件，并且探讨在该飞行器上搭载小型 3D 打印设备，实现“太空制造”。“太空制造”是 NASA 在 3D 打印技术方向的重点投资领域。为实现“太空制造”，美国已在太空环境的 3D 打印设备、工艺及材料等领域开展了多个研究项目，并取得多项重要成果。



图 1-2 3D 打印飞行器

（四）3D 打印技术未来发展趋势之四——助力深空探测

3D 打印技术的快速发展和远程控制技术为空间探测提供了新的思路。月面设施构件 3D 打印技术是利用月球原位资源，采用 3D 打印技术就地生产月面设施构件，是未来建立大型永久性月球基地的有效途径。该方法能够最大限度地利用原位资源制造 3D 打印所需的粉末材料，继而采用 3D 打印设备直接打印出月面设施构件，大大降低地球发射成本，并可利用月球基地的原位资源探索更远的空间目标。

（五）3D 打印技术未来发展趋势之五——走入千家万户

随着 3D 打印技术的不断发展和成本的降低，3D 打印技术走入千家万户不无可能。也许，未来的某一天，你便可以在家里给自己打印一双鞋子；也许，未来某一天，在你的车子里就放着一台 3D 打印机，汽车的某个零件坏了，便可以及时打印一个重新装上，让你的车子继续飞奔起来，而不是站在路边苦苦地等着别人来把你的车子给拖走……

3D 打印正因为它的独特魅力逐渐融入我们的生活；3D 打印正因为它的独特优势逐渐改变这个世界；3D 打印正因为它的无所不能可以让你的“异想天开”

变得“实实在在”；3D 打印正因为它的快速高效可以让你的“驾车旅游”不再孤单；3D 打印正因为它的巨大魔力让建立“月球家园”不再是一个梦想。

1.2 何为 3D 打印

3D 打印，即快速成型技术的一种，也称增材制造。它是一种以数字三维 CAD 模型设计文件为基础，运用高能束源或其他方式，将液体、熔融体，粉末、丝、片、板、块等特殊材料进行逐层堆积黏结，最终叠加成型，直接构造出物体的技术。

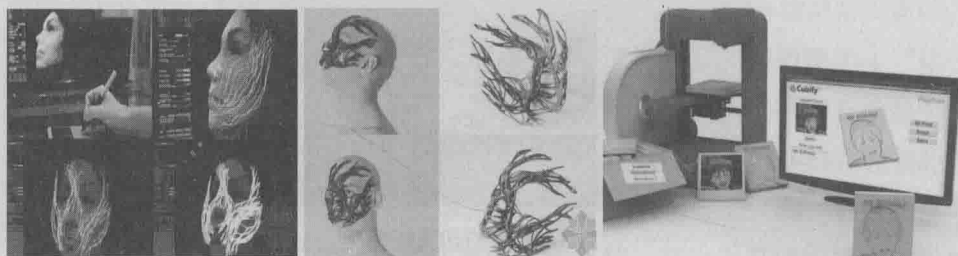


图 1-3 3D 打印释义图

3D 打印技术是数字化技术、新材料技术、软件编程技术、光学技术等多学科发展的产物。其工作可以分为两个过程：

一是数据处理，利用三维扫描仪和计算机辅助设计（CAD）数据，将数据切片分层处理，完成将三维数据分解为二维数据的过程；

二是制造过程，依据分层的二维数据，采用所选定的制造方法制作与数据分层厚度相同的薄片，每层薄片按顺序叠加起来，就构成了三维实体，从而实现从二维薄层到三维实体的过程。



图 1-4 3D 打印流程图