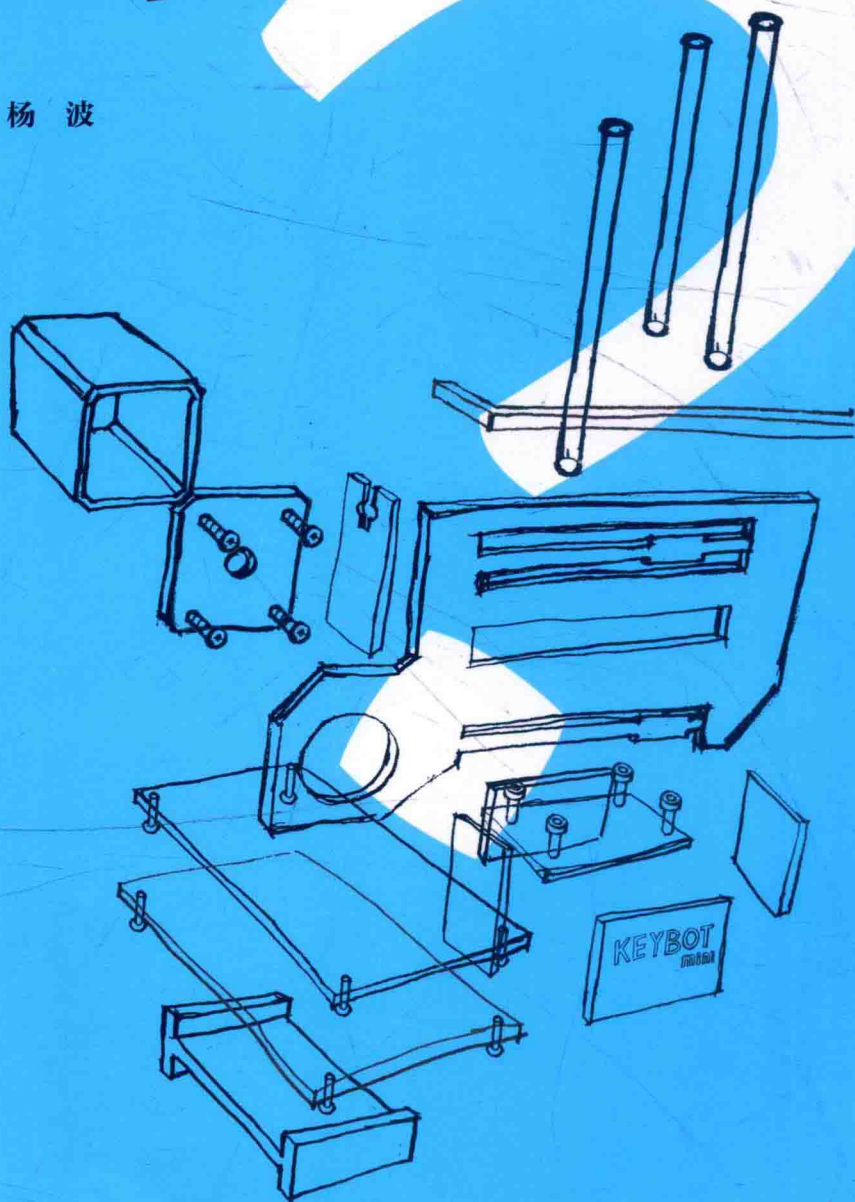


创客教育系列

3D打印机 如何动手做

编著 ◇ 杨波



华东师范大学出版社

3D 打印机： 如何动手做

杨 波 编著

华东师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

3D打印机:如何动手做/杨波编著. —上海:华东师范大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-5675-4130-6

I. ①3… II. ①杨… III. ①立体印刷—印刷术—基本知识 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 227825 号

3D 打印机:如何动手做

编 著 杨 波
项目编辑 李恒平
审读编辑 李 帆
责任校对 高士吟
装帧设计 孔薇薇

出版发行 华东师范大学出版社
社 址 上海市中山北路 3663 号 邮编 200062
网 址 www.ecnupress.com.cn
电 话 021-60821666 行政传真 021-62572105
客服电话 021-62865537 门市(邮购)电话 021-62869887
地 址 上海市中山北路 3663 号华东师范大学校内先锋路口
网 店 <http://hdsdcbs.tmall.com>

印 刷 者 昆山市亭林彩印厂有限公司
开 本 787×1092 16 开
印 张 9.75
字 数 198 千字
版 次 2015 年 11 月第 1 版
印 次 2015 年 11 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5675-4130-6/TP·100
定 价 38.00 元

出版人 王 焰

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社客服中心调换或电话 021-62865537 联系)

3D打印房子,3D打印跑车,3D打印医用支架……如今,越来越多的新闻上出现了与3D打印有关的词汇,3D打印也成为博人眼球的焦点。著名的《经济学人》杂志最近描述了3D打印技术的前景——这是一种新型的生产方式,将推动第三次工业革命。没错,像前两次工业革命一样,3D打印技术将改变以往的生产制造方式。

据行业研究机构 Wohlers 报告显示,到2016年底全球3D打印增材制造市场规模预计超过70亿美元,2018年将达到125亿美元,比2014年翻4倍。如此美好的前景使得越来越多的国家投入到3D打印技术的研发中来。目前3D打印技术最强的国家是以色列、美国和德国,奥巴马政府拨款6000万美金专门成立增材制造研发机构,英国政府也宣布投入700万英镑用于英国本土3D打印研发。伴随着3D打印科技浪潮的涌动,我国也积极投身于3D打印技术的研发。2015年初,工信部正式发布《国家增材制造产业发展推进计划(2015—2016年)》,从国家战略高度提出了3D打印的发展方向和目标。该计划将针对3D打印产业链中各关键环节如材料、工艺、设备和标准中的核心技术瓶颈进行布局,实现技术上的快速发展,达到国际先进水平。

在各国投入资金用于3D打印技术研发的同时,3D技术也被各国引入到教育中去。英国教育部开展了一项为期一年的试验项目(2012—2013年),以21所学校为试点,将3D打印技术应用到数学、物理、计算机科学、工程和设计等课程中,探索3D打印的教学应用,推动教学创新。美国国防高级研究计划局(DARPA)的制作实验和拓展(MENTOR)项目计划在美国高中推广3D打印机。该项目旨在培养高中生在工程技术方面的技能,并激发他们对工程、设计、制造和科学相关课程的兴趣。

为了揭开3D打印的神秘面纱,我们编著了本书,旨在以最直白的语言,最简明的解释,让普通读者都可以了解到3D打印技术的基础知识,让看似高不可及的高科技进入课堂教学。

全书共六章,内容涵盖了3D打印原理、3D打印机的组装、三维建模软件的使用等,使人们可以全面地了解什么是3D打印技术,如何使用3D打印机以及如何利用3D打印机实现自己的创意。

第一章讲述了3D打印最基本的原理和不同3D打印机使用的不同的3D打印技术,同时在这一章,还插入了3D打印技术的发展历史,让大家了解3D打印的由来与发展状态。为了让读者能够清晰地了解到3D打印在我们现实生活中的作用,在这一章中列举了大量的案例,分别介绍了3D打印在航空航天与国防、汽车行业、医疗与生命科学、产品设计与艺术、建筑、电子制造等领域的应用。本章的最后,我们还增加的3D打印龙头企业的介绍,让读者对于3D打印行业有更加准确的认识。

第二章介绍了 3D 打印机的组成,本章主要以采用 FDM 技术的桌面 3D 打印机的组成为例讲述了 3D 打印机的不同结构类型、主要组成部件,以及简单的电路。分别介绍了不同结构的 3D 打印机的优缺点,不同组成部件之间的关系,控制芯片以及电机驱动电路,同时介绍了开源 3D 打印机的主流控制软件和切片软件。最后在阅读材料中增加了对 PID 控制算法的介绍。为下一章 3D 打印机的组装做了知识储备。

第三章主要是讲述了 KEYBOT mini 3D 打印机的组装,本章通过非常多的图片将整个组装过程详细地展现出来,力图让每一个读者都可看得明白,组装得完整和准确。

第四章介绍了与 3D 打印机有关的软件。该章介绍了三种软件:驱动软件,控制软件,切片软件。每一种软件从安装到配置到使用都有非常详细的步骤,最后还介绍了如何对刚刚组装好的 3D 打印机进行调试。

第五章介绍了如何利用 3D 打印机进行打印。有了前面四章的准备,此时的 3D 打印机已经能够正常工作了。本章也包含了 3D 打印机打印平台的调平,STL 文件的导入与调整,STL 文件的切片。

第六章介绍了一款简单的免费三维软件的使用,虽然拥有了一台 3D 打印机,但是我们不能一味地打印别人绘制好的模型,这样不仅降低了读者对打印机的兴趣,而且也不能实现自己的创意,因此我们决定增设第六章介绍一款容易上手的三维建模软件 123D design,通过这一章的学习,相信读者能够利用这款三维软件实现自己大多数的创意。

本书由杨波、欧启琛共同组织编写,也是上海启培智能科技有限公司 3D 打印团队长期跟踪 3D 打印技术和从事创客教育实践的成果,并整合了华东师范大学、上海交通大学、复旦大学附属中学在 3D 打印方面的教学资源,以期推动创客教育在我国的发展。

由于 3D 打印技术发展迅速,作者团队已竭尽所能体现最新技术与趋势,但考虑不周全处仍可能存在,请通过 keybot2050@163.com 发邮件告知我们,我们将非常感谢。

最后,因为团队水平有限,错误和不妥之处在所难免。我们诚恳地希望使用本书的教师和读者给予批评和指正。

杨波

第一章 了解 3D 打印	1
1.1 什么是 3D 打印机	3
1.2 3D 打印机原理	4
1.3 3D 打印大事记	5
1.4 3D 打印机及其技术类型	8
1.5 3D 打印设备分类	14
1.6 FDM 技术下的 3D 打印材料	17
1.7 3D 打印的应用范围	18
第二章 3D 打印机的组成	41
2.1 3D 打印机的结构类型	43
2.2 3D 打印机的驱动与控制系统	46
2.3 工艺系统	53
2.4 上位机软件	58
第三章 KEYBOT mini 的组装	63
3.1 组装前的准备	65
3.2 组装步骤	66
第四章 软件的配置	91
4.1 软件安装	93
4.2 驱动程序安装	96
4.3 连接你的 KEYBOT mini	97
4.4 软件设置	98
4.5 功能预测测试	106
第五章 利用 KEYBOT mini 打印	111
第六章 利用 123D design 进行三维建模	117
6.1 界面初识别	119
6.2 各功能介绍	119
6.3 水杯建模	128
6.4 花瓶建模	133
6.5 空气动力小车制作	136
参考文献	147
附录	148

第一章

了解 3D 打印



近年来,一个新的词汇逐渐进入人们的视野,那就是“3D打印机”,其实这个词也挺好理解的,就是打印三维立体物件的机器。3D打印听起来像是科幻片里的东西,但其实它已经存在很久了,3D打印机能打印出许多东西,如人体骨骼、枪支、汽车、房子等。3D打印并非什么新技术,早在20世纪80年代就存在3D打印这项技术了,但是当时的机器非常巨大而且昂贵,经过二十多年的发展,技术逐渐成熟,机器也渐渐小型化,进入21世纪以来3D打印机的销售逐渐扩大,价格也开始下降。

3D打印之父 Chuck Hull 在1983年萌生了3D打印的想法,在1984年时发现了一种材料叫 goopy(一种光敏聚合物),这种材料在高强度的紫外线照射下会变成固态。如果用紫外线一层层地重复照射它,就会得到一个实实在在的物体,Chuck Hull 将它称作立体平版印刷,3D打印技术正式诞生。

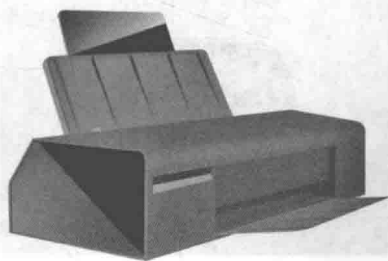
1.1 什么是3D打印机

3D打印技术,是一种以数字模型文件为基础,运用粉末状金属或丝状塑料等可粘材料通过逐层打印的方式来构造物体的技术,由于在3D打印机原理中把复杂的三维制造转化为一系列二维制造的叠加,因而可以在不用模具和工具的条件下生成几乎任意复杂的零部件,极大地提高了生产效率和制造柔性。3D打印机原理看着很简单,虽然现在有一些产品能直接打印出来,但要打印出精密产品还有很长的路要走。

3D打印技术的优点,催生了3D打印机的发明。3D打印机就是一种快速成型技术的机器,是将数字模型通过一系列的机械运动,利用增材制造工艺,最终生产出一个与数字模型外形相同的实体。

《经济学人》杂志将之称为“第三次工业革命”的重要生产工具,其标志是制造业走向数字化。

那么,3D打印机具体是什么样的机器呢?在介绍3D打印机之前让我们先来看看传统的打印机——打印在纸张上的打印机。



传统打印机

图 1-1

图 1-1 中就是我们平常所见到的打印机，它们分别是激光打印机(左)和喷墨打印机(右)，虽然名称不一样，但是它们都可以实现一个功能——在纸上打印出我们想要的文字和图案。然而打印出来的图案文字再复杂，它也就只是一个平面，即二维的，只有长度和宽度，但没有高度。

3D 打印机则是比传统打印机多了一个维度，它可以在高度方向上打印，所以 3D 打印机用最简单的话说，就是可以打出立体实物的打印机。

那么，3D 打印机使用什么样的“墨水”呢？答案是塑料、金属、陶瓷、橡胶、食品，甚至是活体组织。从理论上讲，它能打印一切固态的物体，比如玩具、服装、房子、食物、飞机和骨骼。

3D 打印机的意义不仅仅在于打印、复制产品，更在于简化产品制造流程，并能通过远程进行产品制造。正如 3D Systems 公司 CEO Avi Reichental 所言：“这是一场个性化生产的革命。”

1.2 3D 打印机原理

我们已经知道了 3D 打印机就是一个可以打印真实物体的机器，那么它的原理又是怎样的呢？

我们小时候就知道“点动成线，线动成面，面动成体”这个概念，3D 打印机正是利用了这一概念来实现实体打印的。

想象一下，一个立方体可以怎样得到呢？

首先，用一张正方形的纸铺在第一层，接着铺第二层、第三层……当叠起来纸的厚度和正方形的边长一样的时候，这时我们不就得到了一个立方体了吗？同样的道理，我们也可以得到一个圆柱体。

那么你们又要问了，立方体和圆柱体都是很规则的形状，当然很容易就可以叠起来了，而 3D 打印的物品是千奇百怪的，这个又是怎么实现的呢？

3D 打印都需要以一个数字的 3D 模型为蓝图，我们以打印一个南瓜灯为例子。

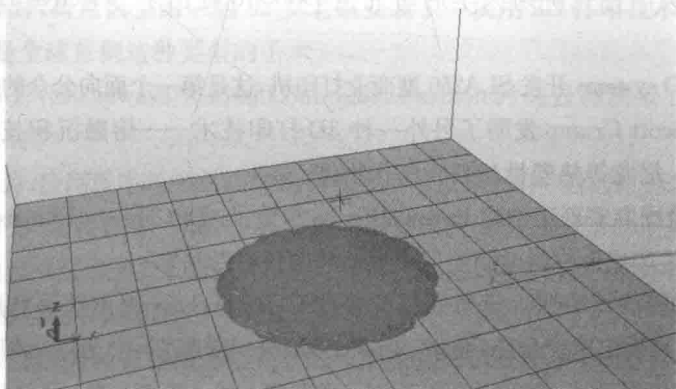
首先我们需要有一个南瓜灯的数字模型，可以通过下载，3D 扫描，3D 设计得到。



3D 模型

图 1-2

接着,为了能够像立方体一样叠加得到,我们需要对这个数字模型进行“切片”,就像立方体中的每一个正方形,只不过这里得到的图形是每一层都不一样的。



切片

图 1-3

最后就可以根据切片的结果进行一层层的打印,最终打印出我们需要的南瓜灯。

通过上面的例子,我们大致了解了 3D 打印的工作原理,用一句话说就是“分层打印,逐层叠加”。

总结一下 3D 打印的过程,就是:

首先通过计算机辅助设计(CAD)或计算机动画建模软件建模,再将建成的三维模型“切片”成逐层的截面数据,并把这些信息传送到 3D 打印机

上,3D 打印机会把这些切片堆叠起来,直到一个固态物体成型。

至于怎么堆叠这些“切片”,方式有很多种,小型 3D 打印机最为常用的就是用液态材料沉积成型,这个有点类似喷墨打印机,只不过喷头喷出的不是墨水而是热塑性塑料或共晶系统金属等可迅速固化的材料,也有采用激光烧结方式的 3D 打印机,只不过加工原料就变成了各种固态粉末。

目前 3D 打印技术的精度其实已经不错了,一般来说每层厚度可以达到 0.1 mm,当然也有部分打印机如 Objet Connex 系列、3D Systems ProJet 系列可以打印出 16 μm 薄的一层,不过在弯曲的表面可能会比较粗糙,要获得光滑的物体可以打出一个稍微大一点的物体,然后进行后期处理就可以了。



打印的实物

图 1-4

1.3 3D 打印大事记

1983 年,Chuck Hull 在一家公司工作时产生 3D 打印的想法。这家公司用紫外线使桌面涂料快速固化,他想,何不直接用这些材料来制造立体的东西?于是他将这种用瞬间固化的液体“打印”物体的技术取名 stereolithography(光固化),直到创立自己的公

司 3D Systems 后,他才称这种技术为“3D 打印”。

1986年,Chuck Hull 命名他发明的技术叫立体光固化成型技术(SLA),并以此获得了专利。

1986年,美国德克萨斯大学的研究生 Deckard 提出了 Selective Laser Sintering (SLS)的思想。

1988年,3D systems 开发 SLA250 型商业打印机,这是第一个面向公众的打印机版本。

1988年,Scott Crump 发明了另外一种 3D 打印技术——熔融沉积技术(FDM),利用蜡、ABS、PC、尼龙等热塑性材料来制作物体。

1989年,美国麻省理工学院 Emanuel Sachs 申请了 3DP(Three-Dimensional Printing)专利。该专利是非成形材料微滴喷射成形范畴的核心专利之一。

1989年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C. R. Dechard 提出选择性激光烧结技术(SLS)的想法。稍后组建了 DTM 公司。后来,DTM 公司赠送了一台 3D 打印机给我国清华大学作教学研究,我国开始培养“种子队伍”;之后,美籍华人许小曙博士进入 DTM 公司工作。

1989年,Scott Crump 成立了 Stratasys 公司。

1989年,Hans J. Langer 博士创立 EOS 公司(EOS GmbH Electro Optical Systems),总部位于德国慕尼黑。

1991年,Helisys 售出第一台叠层法快速成型(LOM)系统。美国 Helisys 公司 1985 年成立,由美国国家科学基金会(NSF)赞助研发,于 1986 年研制成功 LOM 工艺。

1992年,Stratasys 公司售出首台基于 FDM 技术的“三维建模”机器。

1992年,DTM 公司售出首台选择性激光烧结(SLS)系统——基于 SLS 的商业成形机(Sinterstation)。

1993年,Solidscape 公司成立,它生产能打印表面光滑的小型零件的喷墨打印机,但打印速度相对较慢。Solidscape 公司将按需投放(Drop-on-Demand,“DoD”)热塑料喷墨打印技术用于复杂的失蜡熔模。

1993年,麻省理工学院教授 Emanuel Sachs 创造了三维印刷技术(3DP),将金属、陶瓷的粉末通过粘接剂粘在一起成形。

1995年,麻省理工学院的毕业生 Jim Bredt 和 Tim Anderson 把约束溶剂挤压到粉末床实现 3D 打印。

1996年,3D Systems、Stratasys、Z. Corporation 等公司分别推出了自己的产品,第一次使用了“3D 打印机”的称谓。

2000年,以色列 Dbjct 公司推出 Polyjet 技术。

2005年,Z. Corporation 公司推出了世界上第一台高精度彩色 3D 打印机——Spectrum Z510,同一年,英国巴恩大学的 Adrian Bowyer 发起了开源 3D 打印机项目 RepRap,目标是通过 3D 打印机本身,能够制造出另一台 3D 打印机,从而进行可重复的“自我复制”。

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。

2009年 10 月,美籍华人许小曙和周红卫、龚志先、蔡广能等组建湖南华曙高科技有限责任公司,从事 3D 打印、立体电路产业。

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。

2011年5月,Stratasys公司收购 Solidscape 公司,获得了该公司 DoD 技术及其一系列产品。

2011年6月,荷兰医生给一名83岁老嫗安装了一块用3D打印技术打印出来的金属下颌骨,这是全球首例这种类型的手术。

2011年6月,Shapeways公司和 Continuum Fashion 时尚公司发布了第一款3D打印的比基尼泳装。

2011年7月,应用程序开发商 Delcam 公司展示了世界上第一台巧克力3D打印机。

2011年8月,世界上第一架3D打印飞机由英国南安普敦大学的工程师创建完成,无人驾驶的激光烧结飞机(SULSA UAV),所有的部件,包括机翼、整体操纵面、出入舱口,均由尼龙激光烧结打印机 EOS EOSINT P730 打印而成。

2011年11月,美国华盛顿州立大学的一个研究团队发明了3D骨骼打印机。

2011年11月,3D Systems 公司成功收购了多色喷墨3D打印技术的领导者 Z. Corporation 三维快速成型机公司。

2012年3月,美国总统奥巴马提出投资10亿美元在全美建立15家制造业创新研究所,以带动制造业增长。同年8月,美国政府宣布首个研究所将建在俄亥俄州,主要研发3D打印技术,首期投资3000万美元。

2012年3月,维也纳大学的研究人员宣布利用双光子光刻技术(二光子平版印刷技术),突破了3D打印的最小极限,展示了一辆 $330 \times 130 \times 100 \mu\text{m}^3$ 的赛车模型。

2012年4月,Stratasys 公司宣布与 Objet 公司合并。

2012年4月,《经济学人》发表专题文章,称3D打印将是第三次工业革命的重要生产工具。

2012年7月,比利时鲁汶工程类国际学院一个研究组测试了一辆完全由3D打印的小型赛车,车速达到了140 km/h。

2012年7月,在地球上进行低重力抛物线飞行过程中,美国宇航局(NASA)测试了3D打印机。

2012年7月,全球首支利用3D打印技术制造的手枪“解放者”由美国25岁的大学生 Cody Wilson 研发。3D手枪设计图后来被美国国防部主管武器贸易部门要求关闭公共下载通道,撤下3D打印枪的三维文件。

2012年9月,麻省理工学院媒体研究室的学生研究出一款新型桌面式3D打印机——Form 1,这款3D打印机可以制作层厚仅 $25 \mu\text{m}$ 的模型,这比 MakerBot 公司当年新推出的 MakerBot Replicator2 3D打印机还要薄75%。Form 1使用的3D打印方法叫做光固化(SLA),它使用紫外光来照射光敏树脂,使其固化,这是3D打印技术中最为精准的打印方法之一,同时也是成本较为昂贵的。麻省理工学院媒体研究室的学生成立了一家名为 Formlabs 的公司。Form 1 在众筹平台 Kickstarter 上创下了单一项目集资金额之最,获得了来自2068名支持者的294.5885万美元资助。之后,还获得了来自 Lotus 创始人 Mitch Kapor、MIT 媒体实验室主管 Joi Ito 的资助,以及谷歌董事长 Eric Schmidt 创办的 Innovation Endeavors 的投资。

2012年11月,中国宣布是世界上唯一掌握大型结构关键件激光成型的国家。

2012年11月,MakerBot 系列推出最新个人3D打印机 Replicator,双打印头,可以同时打印两种颜色,也支持可溶性支撑材料打印。

2012 年 12 月,Stratasys 公司宣布最大的喷墨 3D 打印机 Objet 1000 能打印 $1\,000 \times 800 \times 500$ mm 大小的物件。

2013 年 2 月,美国康奈尔大学研究人员发表报告称,他们利用牛耳细胞在 3D 打印机中打印出人造耳朵,可以用于先天畸形儿童的器官移植。

2013 年 2 月,德国公司 Nanoscribe GmbH 在美国旧金山展会上,发布了一款迄今为止最高速的纳米级别微型 3D 打印机 Photonic Professional GT。

2013 年 6 月,Stratasys 公司并购了桌面型 3D 打印领导者 MakerBot 公司,此次并购使 Stratasys 公司业务从工业 3D 打印机扩展到消费级 3D 打印机。

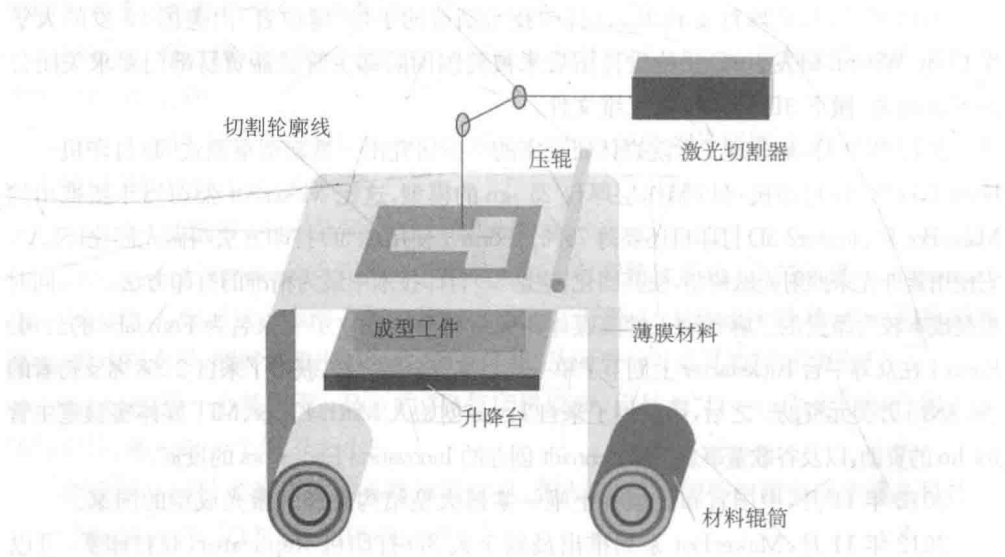
2013 年 6 月,世界最大激光 3D 打印机已经进入调试阶段,由大连理工大学参与研发,最大加工尺寸达 1.8 m。其采用“轮廓线扫描”的独特技术路线,可制作大型的工业样件和结构复杂的铸造模具。

1.4 3D 打印机及其技术类型

目前市场上的快速成型技术分为 LOM(分层实体成型工艺)、SLA(立体光固化成型工艺)、SLS(选择性激光烧结工艺)、FDM(熔融沉积成型工艺)、3DP(三维印刷工艺)和 PolyJet(聚合物喷射技术)。

1. 分层实体成型工艺

分层实体成型工艺(Laminated Object Manufacturing, LOM),这是历史最为悠久的 3D 打印成型技术,也是最为成熟的 3D 打印技术之一。LOM 技术自 1991 年问世以来得到迅速的发展。由于分层实体成型多使用纸材、PVC 薄膜等材料,价格低廉且成型精度高,因此受到了较为广泛的关注,在产品概念设计可视化、造型设计评估、装配检验、熔模铸造等方面应用广泛。下面我们一起来了解一下 LOM 技术的原理,如图所示为 LOM 技术的基本原理:



LOM 分层实体
成型工艺

图 1-5

分层实体成型系统主要由计算机、数控系统、原材料存储与运送部件、热粘压部件、激光切割系统、可升降工作台等部分组成。

其中计算机负责接收和存储成型工件的三维模型数据,这些数据主要是沿模型高度方向提取的一系列截面轮廓。原材料存储与运送部件将把存储在其中的原材料(底面涂有粘合剂的薄膜材料)逐步送至工作台上。

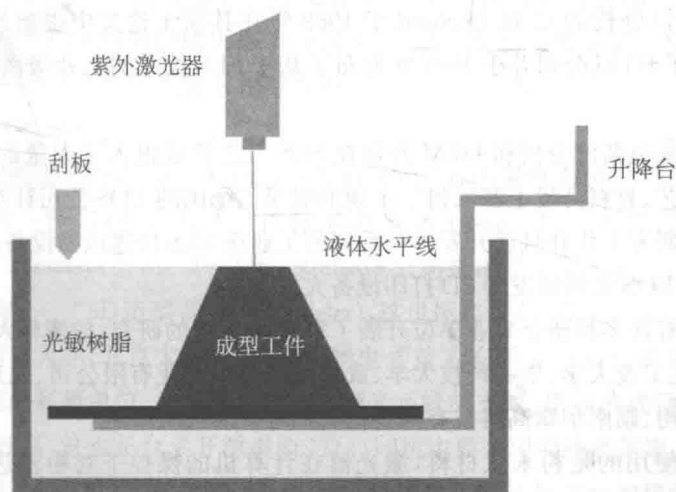
激光切割器将沿着工件截面轮廓线对薄膜进行切割,可升降的工作台能支撑成型的工件,并在每层成型之后降低一个材料厚度以便送进将要进行粘合和切割的新一层材料,最后热粘压部件将会一层一层地把成型区域的薄膜粘合在一起,就这样重复上述的步骤直到工件完全成型。

LOM工艺采用的原料价格便宜,因此制作成本极为低廉,其适用于大尺寸工件的成型,成型过程无需设置支撑结构,多余的材料也容易剔除,精度也比较理想。尽管如此,由于LOM技术成型材料的利用率不高,材料浪费严重颇被诟病,随着新技术的发展LOM工艺将有可能被逐步淘汰。

2. 立体光固化成型工艺

立体光固化成型工艺(Stereolithography Apparatus, SLA),又称立体光刻成型。该工艺最早由Chuck Hull于1986年命名并获得美国国家专利,是最早发展起来的3D打印技术之一。Chuck Hull在获得该专利后两年便成立了3D Systems公司,并于1988年发布了世界上第一台商用3D打印机SLA 250。SLA工艺也成为了目前世界上研究最为深入、技术最为成熟、应用最为广泛的一种3D打印技术。

SLA工艺以光敏树脂作为材料,在计算机的控制下,紫外光对液态的光敏树脂进行扫描从而让其逐层凝固成型,SLA工艺能以简洁且全自动的方式制造出精度极高的几何立体模型。下面我们一起来了解一下SLA技术的原理,如图所示为SLA技术的基本原理:



SLA 立体光
固化成型工艺

图 1-6

液槽中会先盛满液态的光敏树脂，氩—镉激光器或氩离子激光器发射出的紫外激光束在计算机的操纵下，按工件的分层截面数据在液态的光敏树脂表面进行逐行逐点扫描，这使扫描区域的树脂薄层产生聚合反应而固化，从而形成工件的一个薄层。

当一层树脂固化完毕后，工作台将下移一个层厚的距离以使在原先固化好的树脂表面上再覆盖一层新的液态树脂，刮板将粘度较大的树脂液面刮平然后再进行下一层的激光扫描固化。因为液态树脂具有高黏性而导致流动性较差，在每层固化之后液面很难在短时间内迅速抚平，这样将会影响到实体的成型精度。采用刮板刮平后所需要的液态树脂将会均匀地涂在上一叠层上，这样经过激光固化后将可以得到较好的精度，也能使成型工件的表面更加光滑平整。

新固化的一层将牢固地粘合在前一层上，如此重复直至整个工件堆叠完毕，这样最后就能得到一个完整的立体模型。

当工件完全成型后，首先需要把工件取出并把多余的树脂清理干净，接着还需要把支撑结构清除掉，最后还需要把工件放到紫外灯下进行二次固化。

SLA 工艺成型效率高，系统运行相对稳定，成型工件表面光滑精度也有保证，适合制作结构异常复杂的模型，能够直接制作面向熔模精密铸造的中间模。尽管 SLA 的成型精度高，但成型尺寸也有较大的限制而不适合制作体积庞大的工件，成型过程中伴随的物理变化和化学变化可能会导致工件变形，因此成型工件需要有支撑结构。

目前，SLA 工艺所支持的材料还相当有限且价格昂贵，液态的光敏树脂具有一定的毒性和气味，材料需要避光保存以防止提前发生聚合反应。SLA 成型的成品硬度很低且相对脆弱，此外，使用 SLA 成型的模型还需要进行二次固化，后期处理相对复杂。

3. 选择性激光烧结工艺

选择性激光烧结工艺 (Selective Laser Sintering, SLS)，该工艺最早是由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C. R. Dechard 于 1989 年在其硕士论文中提出的，随后 C. R. Dechard 创立了 DTM 公司并于 1992 年发布了基于 SLS 技术的工业级商用 3D 打印机 Sinter station。

二十多年来奥斯汀分校和 DTM 公司在 SLS 工艺领域投入了大量的研究工作，在设备研制和工艺、材料开发上都取得了丰硕的成果。德国的 EOS 公司针对 SLS 工艺也进行了大量的研究工作并且已开发出一系列的工业级 SLS 快速成型设备，在 2012 年的欧洲模具展上 EOS 公司研发的 3D 打印设备大放异彩。

在中国也有许多科研企事业单位开展了对 SLS 工艺的研究，如清华大学、北京航空航天大学、西北工业大学、华中科技大学、武汉滨湖机电产业有限公司、北京隆源自动成型系统有限公司、湖南华曙高科技有限责任公司等。

SLS 工艺使用的是粉末状材料，激光器在计算机的操控下对粉末进行扫描照射而实现材料的烧结粘合，就这样材料层层堆积实现成型，如图所示为 SLS 的成型原理：

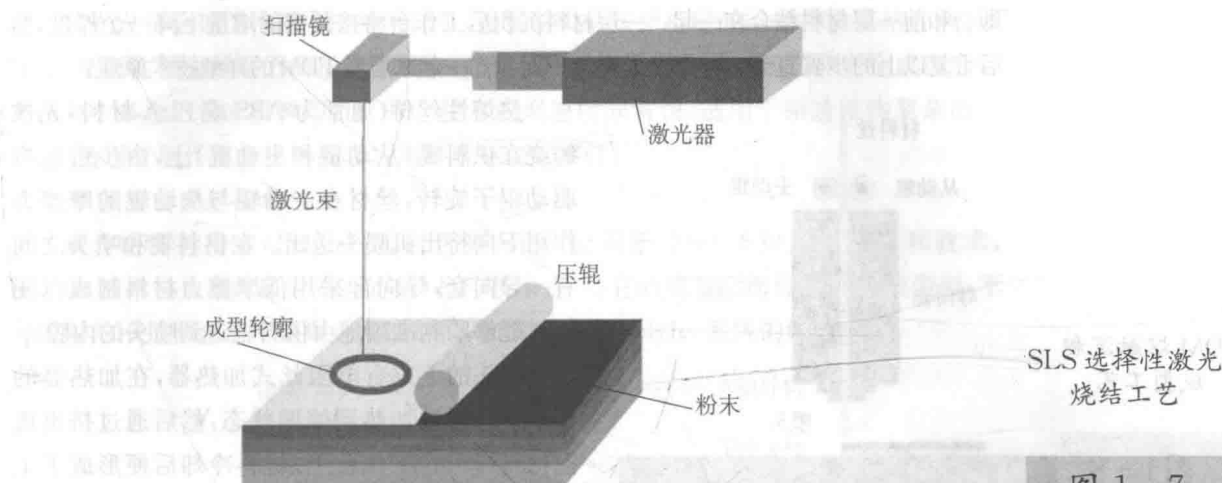


图 1-7

选择性激光烧结加工的过程先采用压辊将一层粉末平铺到已成型工件的上表面，数控系统操控激光束按照该层截面轮廓在粉末层上进行扫描照射而使粉末的温度升至熔化点，从而进行烧结并与下面已成型的部分实现粘合。

当一层截面烧结完后工作台将下降一个层厚，这时压辊又会均匀地在上层铺上一层粉末并开始新一层截面的烧结，如此反复操作直至工件完全成型。

在成型的过程中，未经烧结的粉末对模型的空腔和悬臂起着支撑的作用，因此 SLS 成型的工件不需要像 SLA 成型的工件那样需要支撑结构。SLS 工艺使用的材料与 SLA 相比相对丰富些，主要有石蜡、聚碳酸酯、尼龙、纤维尼龙、合成尼龙、陶瓷，甚至还可以是金属。

当工件完全成型并完全冷却后，工作台将上升至原来的高度，此时需要把工件取出，使用刷子或压缩空气把模型表层的粉末去掉。

SLS 工艺支持多种材料，成型工件无需支撑结构，而且材料利用率较高。尽管这样，SLS 的设备价格和材料价格仍然十分昂贵，烧结前材料需要预热，烧结过程中材料会挥发出异味，设备工作环境要求相对苛刻。

4. 熔融沉积成型工艺

熔融沉积成型工艺 (Fused Deposition Modeling, FDM) 是继 LOM 工艺和 SLA 工艺之后发展起来的一种 3D 打印技术。该技术由 Scott Crump 于 1988 年发明，随后 Scott Crump 创立了 Stratasys 公司。1992 年，Stratasys 公司推出了世界上第一台基于 FDM 技术的 3D 打印机——“3D 造型者”(3D Modeler)，这也标志着 FDM 技术步入商用阶段。

国内的清华大学、北京大学、中科院广州电子技术有限公司都是较早引进 FDM 技术并进行研究的科研单位。FDM 工艺无需激光系统的支持，所用的成型材料也相对低廉，总体性价比高，这也是众多开源桌面 3D 打印机主要采用的技术方案。

熔融沉积有时又被称为熔丝沉积，它将丝状的热塑性材料进行加热熔化，通过带有微细喷嘴的挤出机把材料挤出来。喷头可以沿 X 轴的方向进行移动，工作台则沿 Y 轴和 Z 轴方向移动(当然不同的设备其机械结构的设计也许不一样)，熔融的丝材被挤出后随