

STEM 教育培训系列

# 3D 设计 与3D打印

杨伟群 编著



清华大学出版社

STEM 教育培训系列

# 3D 设计 与3D打印

杨伟群 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

近年来随着消费型桌面 3D 打印机及其耗材成本持续下降,桌面 3D 打印机开始进入学校和普通家庭。桌面 3D 打印机属于智力设计创作工具,要求用户具有一定的技术和设计素养,尤其需要具有 3D 建模、3D 扫描、手工制作方面的动脑与动手能力。本书全面介绍桌面型 3D 打印技术的原理、方法和应用案例,强调利用 3D 打印技术解决日常生活和教学中的问题,是一本基于项目案例的培训教材。本书案例均取材于日常生活,全部项目均经过实际打印验证。

本教材是和国家有关部委合作开展全国性 3D 打印技术师资培训活动的主教材,同时也可以作为各类学校的创新设计、职业培训、劳动技术或通用技术课程的实训教材以及各类企、事业教育培训机构 3D 打印技术推广应用培训教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

3D 设计与 3D 打印/杨伟群编著.--北京:清华大学出版社,2015

STEM 教育培训系列

ISBN 978-7-302-39254-5

I. ①3… II. ①杨… III. ①三维—设计 ②立体印刷—印刷术 IV. ①J506 ②TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024133 号

责任编辑:郑寅堃

封面设计:迷底书装

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.75

字 数:432 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版

印 次:2015 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:69.00 元

产品编号:057239-01



3D 打印是一种快速成型技术,它在各个行业中的应用越来越广泛。最近几年桌面型 3D 打印机开始进入家庭和学校,尤其在中、小学校有了初步的应用,但目前大都还处于前期探索阶段。教育行业是 3D 打印技术推广应用的重要市场,应该引起教育工作者和行业部门的充分重视。与传统的教学活动比,3D 打印更有利于教师将知识和实践相结合形成新的教学模式。教师掌握 3D 打印技术至少可以在下列三方面提升教学能力:

- 知识综合应用能力:3D 打印的应用有助于学校开设综合创新课程,如欧美的 STEM 教育项目利用 3D 打印技术开发多学科综合课程,著名的 F1 in Schools 教育项目就涉及空气动力学、材料学、造型设计等方面的知识,而 3D 打印为这些知识的整合提供了技术手段;
- 帮助理解抽象知识:3D 打印技术的本身并不是课程的重点,但它可以将抽象的数学模型进行物化,甚至可以将抽象的概念变成有趣的实际问题,进而帮助学生掌握抽象的知识概念;
- 提高技术与设计素养:3D 打印能够帮助学生将数字化的设计模型快速变成实物,这一过程既包含了理论知识的迁移,也是手脑并用的过程,如工程或建筑类 3D 打印原型可以帮助学生发现问题和设计缺陷,并且通过不断修正获得最优设计方案,在课堂上获得的技能和创造性设计将来可以应用到现实生产生活中。

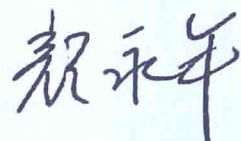
3D 打印在教学应用中最核心的内容是 3D 打印机的快速成型能力促成数字化设计的实物化。同时,在课堂中应用 3D 打印机对教师和信息素养要求较高,还要求教师具有较强的动手能力和基本的工程技术素养。这就需要首先对教师进行培训,既要在使用 3D 打印设备的技能上,更要在创新意识和学习活动设计能力上提升教师的水平。本书作者长期在高校从事数字化设计与制造的科研与教学工作,主持或参与了国际和国内多个普教、职教领域的教育研究项目,对 3D 打印技术在教育领域的推广有着独到的见解。作者提出的用培训来推动 3D 打印的普及,并计划在全国范围组织针对教育领域的师资培训是很好的想法。这将能有效提升教师 3D 打印技术应用能力,促进素质教育的实施,丰富学生的学习体验。

3D 打印和互联网、大数据、微电路、材料和生物技术相结合正在引发

传统生产和生活方式的革新,不久的将来,3D打印机也会像计算机、手机和互联网一样进入我们的学校和家庭。教育工作者不应错过这项新技术带来的教育创新机会。虽然3D打印机的普及还面临着很多困难,但随着技术不断进步和应用成本的不断下降,很多现在担心的问题都会迎刃而解。让我们在教学实践中不断探索这种新兴技术,借此推动教学模式和教学活动的创新。

中国3D打印技术产业联盟首席顾问

清华大学教授



# 前言

## FOREWORD

近年来 3D 打印技术被媒体持续热炒并引起社会广泛关注。其实 3D 打印并不是全新的技术,它源于 20 世纪 80 年代工具、模具制造领域的快速成型技术(Rapid Prototyping),随着制造技术的进步,快速成型设备能做到小型化放在办公桌面上使用,其操作并不比传统的纸张打印机复杂多少,所以从通俗易懂及易于向社会推广的角度出发,美国人率先提出了“3D 打印机”这一新商品名称并在短短几年间迅速传遍全球。

我国是制造业大国,3D 打印技术有着巨大的市场需求和应用前景,但中国的国情和美国不同,中国还没有形成桌面型 3D 打印机的商业化应用模式,作者看到许多人是凭着热情和好奇在用 3D 打印机。应用 3D 打印的消费环境还没有建立起来,其中最重要的原因是 3D 打印机是一种智力型创作工具,需要用户具有一定的技术和设计素养。从普遍性来讲,中国民众包括众多沉浸在应试教育的中小学教师设计和技术素养远远比不上欧美民众,所以,要想普及 3D 打印并让非专业民众尝到技术与设计的乐趣,开展 3D 设计和 3D 打印的普及性培训是当务之急。为此笔者利用自身的经验和能力,在北京、广州等地尝试举办了多期面向非专业公众的 3D 打印体验和培训班,发现桌面型 3D 打印机在教育行业有很好的应用前景,在有关专业厂商支持下,决定编著一本能够帮助人们理解、操作 3D 打印的实用培训教材,其读者对象主要是中小学教师、职业院校教师和已经购买或将要购买 3D 打印机的普通市民。本书的写作目的和特点可以用三个“面向”来归纳。

### (1) 面向日常生活,提倡兴趣驱动学习

国内的大部分科技竞赛和技能大赛陷入功利性怪圈,常常和升学条件和个人名利挂钩,它剥夺了许多孩子个性张扬和自由学习的权利。本书尽量做到把“好玩、有趣、实用”的元素引入生活与学习,并强调利用 3D 打印机解决身边的实际生活问题。

### (2) 面向基础和职教领域师资的新技术培训

我国基础教育师资大部分来自师范院校,教师工程技术素养和动手能力不足,本书的许多案例可以帮助从事数学、物理、信息、艺术、劳动技术或通用技术等课程教师利用 3D 打印技术改良教育技术和升级教学内容。

职业教育在中国经济发展和产业转型中扮演着重要角色,但整个社会普遍都“崇拜学历、轻视技能”,在企业 and 公司,技能型人才职业上升空



间有限,而设计素养和创新能力是提升职业地位的重要砝码。本书的许多案例可以作为职业院校学生进行产品创意设计训练的课题,并已在全国性师资培训中得到验证。

### (3) 面向国际 STEM 课程项目推广

许多学校把课程分得过多、过细,导致学习负担重、知识综合应用能力弱,而以美英为首的西方教育体系正在实施 STEM 教育计划——即把科学(Science)、技术(Technology)、工程(Engineering)、数学(Maths)高度融合形成“一锅烩”的模块化课程,从美国总统、大学校长到工业领袖都寄希望于 STEM 计划能使本国理工教育和人力资源在 21 世纪继续保持全球领先的地位。本教材介绍的 F1 in Schools 和 4×4 Racing 是国际 STEM 课程项目,也是和 3D 打印密切相关的教育项目。

本教材将用于和国家有关部委合作开展全国性 3D 打印技术师资培训项目,也适用于各类学校的创新设计、劳动技术或通用技术课程的教学以及各类企事业单位的 3D 打印技术培训课程,主要内容安排如下:

第 1~5 章为 3D 打印技术综述,3D 建模理论与技能,3D 扫描测量原理及打印数据处理技术,打印机使用操作。

第 6 章为 3D 设计与打印课题,分中级(6.1~6.4)和高级(6.5~6.10),主要为 3D 打印培训和学校的课程开发提供项目素材。

第 7 章为 STEM 课程开发项目,介绍 F1 in Schools 和 4×4 Racing 项目的教学内容与实施。

读者可以选择性地完成第 6 章的练习案例,体会一下 3D 打印的乐趣和魅力。由于本书的版面有限,有些案例内容写得不详细,将来作者会逐步把有关补充内容上传到微小网(www.vx.com)网站,书中涉及的 3D 打印数据文件和软硬件操作的 PDF 文档全部向购书读者开放并将持续更新,读者将从微小网上下载模型、视频、照片、工程图文档等详细数据,便于尽快掌握 3D 打印知识和技能。

最后,作者特别鸣谢下列单位和人士:

泰西(北京)精密技术有限公司、北京数码大方软件有限公司、北京太尔时代科技有限公司、北京天极力达技术开发有限责任公司、广州中望龙腾软件股份有限公司,它们提供了赞助和技术支持。另外,本书还得到了北京航空航天大学、世界技能大赛(Worldskills)中国机械设计 CAD 项目集训基地(广州市工贸技师学院)、北京瑞谦广源科技有限公司的支持。

上述单位的许彦龙、谢小星、芦贺平、拾祎春、金鹏、何珊珊、孙宏波、杨冠煜、黄奕、靳永卫、王励扬、王超等工程师和教师们在 3D 建模、图纸编辑、小电路制作、打印验证等方面提供了技术支持工作。没有上述单位资助和个人的支持,就不可能在 9 个月内完成写作,作者在此深表感激。

由于本人知识水平和技术能力有限,书中如有错误之处敬请读者不吝指正,电子邮箱 worldskills\_cad@163.com。

杨伟群

2014 年 11 月

## 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 3D 打印技术综述 .....        | 1  |
| 1.1 3D 打印工作原理 .....          | 1  |
| 1.1.1 增材制造基本原理 .....         | 1  |
| 1.1.2 3D 打印技术的专利来源 .....     | 3  |
| 1.1.3 3D 打印系统配置 .....        | 4  |
| 1.2 3D 打印主流技术 .....          | 7  |
| 1.2.1 熔融沉积成型技术 .....         | 7  |
| 1.2.2 光固化立体成型技术 .....        | 8  |
| 1.2.3 3D 印刷或选择性黏结打印技术 .....  | 8  |
| 1.2.4 选择性激光烧结技术 .....        | 9  |
| 1.2.5 选区激光熔化技术 .....         | 10 |
| 1.2.6 激光近净成型技术 .....         | 11 |
| 1.3 FDM 三维打印实施步骤 .....       | 12 |
| 1.3.1 FDM 打印技术的应用 .....      | 12 |
| 1.3.2 3D 几何建模 .....          | 13 |
| 1.3.3 STL 模型数据处理 .....       | 15 |
| 1.3.4 分层控制参数 .....           | 15 |
| 1.3.5 开源 3D 打印机的打印参数设置 ..... | 17 |
| 1.4 打印机和打印材料的选择 .....        | 20 |
| 1.4.1 打印性能指标 .....           | 20 |
| 1.4.2 打印材料性能 .....           | 21 |
| 1.4.3 选择 ABS 还是 PLA .....    | 22 |
| 1.5 3D 打印在教育行业的应用 .....      | 23 |
| 1.5.1 3D 打印在各学科的创新应用 .....   | 23 |
| 1.5.2 3D 打印的课堂应用 .....       | 27 |
| 第 2 章 UP 桌面型 3D 打印机操作 .....  | 29 |
| 2.1 UP 的结构组成 .....           | 29 |
| 2.1.1 机械部分 .....             | 29 |
| 2.1.2 电器部分 .....             | 29 |
| 2.1.3 打印软件安装 .....           | 31 |





|              |                             |           |
|--------------|-----------------------------|-----------|
| 2.1.4        | 在 Windows 8.1 上安装 .....     | 31        |
| 2.2          | 打印准备工作 .....                | 32        |
| 2.2.1        | 打印机初始化 .....                | 32        |
| 2.2.2        | 打印平台调至水平 .....              | 32        |
| 2.2.3        | 手工校准喷嘴高度 .....              | 32        |
| 2.2.4        | 准备打印垫板 .....                | 35        |
| 2.2.5        | 其他维护选项 .....                | 35        |
| 2.3          | UP 打印软件的操作 .....            | 36        |
| 2.3.1        | 3D 模型操作 .....               | 36        |
| 2.3.2        | 模型缩放与位置变换 .....             | 37        |
| 2.3.3        | 模型的布局 .....                 | 38        |
| 2.4          | UP 打印机操作要点 .....            | 39        |
| 2.4.1        | 打印工艺参数设置 .....              | 39        |
| 2.4.2        | 打印质量的选择 .....               | 42        |
| 2.4.3        | STL 模型数据错误及修复 .....         | 42        |
| 2.4.4        | 清理打印模型 .....                | 43        |
| 2.4.5        | 如何避免或减少打印件边缘翘曲 .....        | 44        |
| 2.5          | 打印件的常见后处理 .....             | 45        |
| 2.6          | FDM 打印零件几何精度误差成因及对策 .....   | 46        |
| 2.6.1        | CAD 模型转化成 STL 文件带来的误差 ..... | 47        |
| 2.6.2        | STL 分层过程带来的误差 .....         | 48        |
| 2.6.3        | 设备工艺条件所导致的误差 .....          | 49        |
| <b>第 3 章</b> | <b>3D 打印建模技术 .....</b>      | <b>51</b> |
| 3.1          | 3D 建模基础知识 .....             | 51        |
| 3.1.1        | 3D 建模途径 .....               | 51        |
| 3.1.2        | 3D 模型的计算机表示 .....           | 52        |
| 3.2          | 3D 建模方法 .....               | 53        |
| 3.2.1        | 线框建模 .....                  | 54        |
| 3.2.2        | 曲面建模 .....                  | 55        |
| 3.2.3        | 曲线/曲面的光顺性评价 .....           | 58        |
| 3.2.4        | 实体建模 .....                  | 59        |
| 3.2.5        | 多边形网格模型 .....               | 62        |
| 3.3          | 3D 建模技能 .....               | 66        |
| 3.3.1        | 3D 建模软件 .....               | 66        |
| 3.3.2        | OpenSCAD 应用入门 .....         | 68        |
| 3.3.3        | SketchUP(免费版)应用实例 .....     | 77        |
| 3.3.4        | TinkerCAD 应用实例 .....        | 80        |
| 3.3.5        | Siemens NX 曲面建模实例 .....     | 84        |

|              |                               |            |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 3.3.6        | CAXA 工业软件曲面建模实例 .....         | 92         |
| 3.3.7        | 中望软件(ZW3D)建模实例 .....          | 99         |
| 3.3.8        | Autodesk Inventor .....       | 116        |
| 3.4          | CAD 数据转换 .....                | 120        |
| 3.4.1        | CAD/快速成形系统间的常用数据接口类型 .....    | 120        |
| 3.4.2        | 常用 CAD 系统的 STL 文件输出 .....     | 121        |
| <b>第 4 章</b> | <b>3D 扫描技术应用</b> .....        | <b>122</b> |
| 4.1          | 3D 扫描仪测量原理 .....              | 122        |
| 4.1.1        | 逆向工程设计与 3D 扫描 .....           | 122        |
| 4.1.2        | 3D 扫描仪分类 .....                | 123        |
| 4.1.3        | 3D 扫描原理 .....                 | 124        |
| 4.1.4        | 扫描数据的曲面重构 .....               | 128        |
| 4.2          | 工程型 3D 扫描仪应用 .....            | 128        |
| 4.2.1        | 泰西 Handy Scan 扫描仪 .....       | 129        |
| 4.2.2        | 泰西 Capture 3D 扫描仪的应用 .....    | 132        |
| 4.2.3        | 用最佳拟合方式对齐点云 .....             | 136        |
| 4.2.4        | 使用贴标记方式 .....                 | 146        |
| 4.3          | 消费型 3D 扫描仪应用 .....            | 147        |
| 4.3.1        | 泰西 Sense 扫描仪 .....            | 147        |
| 4.3.2        | EAGLE EYES 3D 扫描系统 .....      | 148        |
| 4.3.3        | 基于拍照的 3D 建模 .....             | 153        |
| <b>第 5 章</b> | <b>3D 打印数据处理技术</b> .....      | <b>155</b> |
| 5.1          | STL 数据文件及处理 .....             | 155        |
| 5.1.1        | STL 文件的格式 .....               | 155        |
| 5.1.2        | STL 文件的打印精度 .....             | 157        |
| 5.1.3        | STL 文件的纠错规则 .....             | 157        |
| 5.1.4        | STL 格式的局限性 .....              | 160        |
| 5.2          | 如何使用 Netfabb 处理 3D 打印数据 ..... | 161        |
| 5.2.1        | 软件的交互界面 .....                 | 161        |
| 5.2.2        | 模型检查 .....                    | 163        |
| 5.2.3        | 模型编辑 .....                    | 165        |
| 5.2.4        | 模型修复 .....                    | 168        |
| 5.2.5        | 模型测量 .....                    | 173        |
| 5.2.6        | 在 Netfabb 中创建参数化模型 .....      | 174        |
| 5.3          | 3D 扫描数据的处理与编辑 .....           | 176        |
| 5.3.1        | Netfabb 修复人体面部数据的应用实例 .....   | 176        |
| 5.3.2        | MeshLab 应用实例 .....            | 184        |

|            |                                   |            |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 5.3.3      | MeshMixer 应用实例 .....              | 190        |
| 5.4        | Geomagic 系列工程软件 .....             | 196        |
| <b>第6章</b> | <b>3D设计与打印课题 .....</b>            | <b>198</b> |
| 6.1        | 几何拼图积木 .....                      | 198        |
| 6.1.1      | 平面几何拼图 .....                      | 199        |
| 6.1.2      | 孔明锁 .....                         | 202        |
| 6.1.3      | 孔明锁变形件设计 .....                    | 203        |
| 6.2        | 生活用品的创意设计 .....                   | 205        |
| 6.2.1      | 折叠圆珠笔 .....                       | 206        |
| 6.2.2      | 嵌有三维文字的圆珠笔 .....                  | 206        |
| 6.2.3      | 购物袋塑料提钩设计 .....                   | 208        |
| 6.3        | 卡通造型摆件打印 .....                    | 209        |
| 6.3.1      | QQ公仔模型打印 .....                    | 210        |
| 6.3.2      | Angry birds 模型打印 .....            | 211        |
| 6.3.3      | 基于折纸模型的逆向设计造型 .....               | 212        |
| 6.3.4      | 3D打印件彩绘后处理 .....                  | 214        |
| 6.3.5      | ABS打印件的丙酮熏蒸后处理 .....              | 215        |
| 6.4        | 创意家居用品的打印 .....                   | 216        |
| 6.4.1      | 创意台灯的造型设计 .....                   | 217        |
| 6.4.2      | 彩色灯罩打印与灯具组装 .....                 | 218        |
| 6.4.3      | 六角亭小夜灯打印制作 .....                  | 220        |
| 6.4.4      | 镂空结构笔筒打印件 .....                   | 220        |
| 6.5        | 多面体空间结构的设计 .....                  | 222        |
| 6.5.1      | 在 Siemens NX 中构建正十二面体 .....       | 223        |
| 6.5.2      | 半正则多面体 .....                      | 223        |
| 6.5.3      | 对偶多面体结构 .....                     | 224        |
| 6.5.4      | 多面体桁架结构 .....                     | 226        |
| 6.6        | 建筑模型打印 .....                      | 227        |
| 6.6.1      | 埃菲尔铁塔模型 .....                     | 228        |
| 6.6.2      | 两层独立别墅模型 .....                    | 230        |
| 6.7        | 拼接玩具的设计与打印 .....                  | 232        |
| 6.7.1      | 小车拼接模型 .....                      | 233        |
| 6.7.2      | Lego 积木模型 .....                   | 235        |
| 6.7.3      | Lego 车模 .....                     | 237        |
| 6.7.4      | 扩展设计: Arduino Lego 机器人设计与打印 ..... | 237        |
| 6.8        | 自行车手机夹的打印 .....                   | 237        |
| 6.8.1      | 设计图纸 .....                        | 238        |
| 6.8.2      | 打印及安装 .....                       | 240        |



|              |                                       |            |
|--------------|---------------------------------------|------------|
| 6.9          | 机器乌龟打印 .....                          | 240        |
| 6.9.1        | 乌龟行走机构的原理 .....                       | 241        |
| 6.9.2        | 机器乌龟的零件设计与打印 .....                    | 242        |
| 6.9.3        | 制作的注意点 .....                          | 242        |
| 6.10         | 太阳能 LED 台灯设计与打印 .....                 | 245        |
| 6.10.1       | 产品描述 .....                            | 245        |
| 6.10.2       | 打印件的设计模型 .....                        | 246        |
| 6.10.3       | 电路与装配 .....                           | 246        |
| 6.10.4       | 扩展设计:可折叠的太阳能台灯 .....                  | 249        |
| <b>第 7 章</b> | <b>F1 in Schools 全球设计挑战赛 .....</b>    | <b>250</b> |
| 7.1          | F1 in Schools 比赛对车体设计要求 .....         | 251        |
| 7.1.1        | 翼型的设计 .....                           | 252        |
| 7.1.2        | 其他结构的设计 .....                         | 253        |
| 7.1.3        | 设计并制作一辆 F1 车模 .....                   | 256        |
| 7.2          | F1 in Schools 一体化实验室主要设备 .....        | 257        |
| 7.3          | 4×4 Racing 团队设计挑战赛 .....              | 258        |
| 7.3.1        | 车辆基本设计要求 .....                        | 258        |
| 7.3.2        | 技术说明 .....                            | 259        |
| 7.3.3        | 设计并制作一辆符合 4×4 in Schools 规则的越野车 ..... | 260        |
| 附录           | .....                                 | 261        |
| 附录 A         | “3D 设计与 3D 打印”培训项目简介 .....            | 261        |
| 附录 B         | “3D 设计与 3D 打印”培训考核大纲 .....            | 262        |
| B.1          | 培训目标 .....                            | 262        |
| B.2          | 培训内容及课时安排 .....                       | 262        |
| B.3          | 考核评分规则 .....                          | 263        |
| B.4          | 培训机构必须具备的基本条件 .....                   | 264        |
| B.5          | 向媒体推介本培训项目 .....                      | 265        |
| 附录 C         | “3D 设计与打印”培训考核样题 .....                | 265        |
| C.1          | 模块 A 产品造型设计与打印 .....                  | 265        |
| C.2          | 模块 B 结构/功能设计与 3D 打印 .....             | 267        |
| C.3          | 模块 C 逆向工程与 3D 打印 .....                | 269        |
| C.4          | 模块 D 机电集成设计与 3D 打印 .....              | 270        |
| 附录 D         | 如何下载本书的数据文件 .....                     | 271        |

# 3D打印技术综述

## 1.1 3D 打印工作原理

3D 打印并非一夜之间冒出来的新技术,这个技术起源于 19 世纪末的美国,并在 20 世纪 80 年代主要在模具加工行业得以发展和推广,在国内叫做“快速成形(Rapid Prototyping, RP)”技术。随着信息和材料技术的进步,快速成形设备已能做到小型化供大家放在办公桌面上使用,其操作并不比传统的纸张激光打印机复杂,所以为了便于向普通民众推广此产品,小型化的快速成形设备被称为“3D 打印机”。虽然 3D 打印机目前很时髦,但此项技术实际上是“上上个世纪的思想,上个世纪的技术,这个世纪的市场”。欧美国家正在重整制造业,这个时候老的传统制造方式已没有优势可言,正好 3D 打印技术相比传统制造技术具有革命性变化,3D 打印技术成为欧美国家振兴制造业的新抓手。

企业或研究机构普遍喜欢用 Additive Manufacture(AM)来表示 3D 打印技术,国内专业术语称为“增材制造”。2009 年美国材料实验协会 ASTM(American Society of Testing Material)协会将 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.”即与传统的去除材料加工方法完全相反,通过三维模型数据来实现增材成形,通常用逐层添加材料的方式直接制造产品的制造方法。

3D 打印是增材制造(Additive Manufacture)的主要实现形式。“增材制造”的理念区别于传统的“去除型”制造。传统机械制造是在原材料基础上,借助工装模具使用切削、磨削、腐蚀、熔融等办法去除多余部分得到最终零件,然后用装配拼装、焊接等方法组成最终产品。而“增材制造”与之不同,无需毛坯和工装模具,就能直接根据计算机建模数据对材料进行层层叠加生成任何形状的物体。

### 1.1.1 增材制造基本原理

增材制造技术是由 CAD 模型直接驱动快速制造任意复杂形状



三维实体零件或模型的技术总称,其基本过程如图 1-1 所示。首先在计算机中生成符合零件设计要求的三维 CAD 数字模型,然后根据工艺要求,按照一定的规律将该模型在 Z 方向离散为一系列有序的片层,通常在 Z 向将其按一定厚度进行分层,把原来的三维 CAD 模型变成一系列的层片;再根据每个层片的轮廓信息,输入加工参数,自动生成数控代码;最后由成形机喷头在 CNC 程序控制下沿轮廓路径做 2.5 轴运动,喷头经过的路径会形成新的材料层,上下相邻层片会自己黏结起来,最后得到一个三维物理实体。这样就将一个复杂的三维加工转变成一系列二维层片的加工,大大降低了加工难度,这也是所谓的“降维制造”。

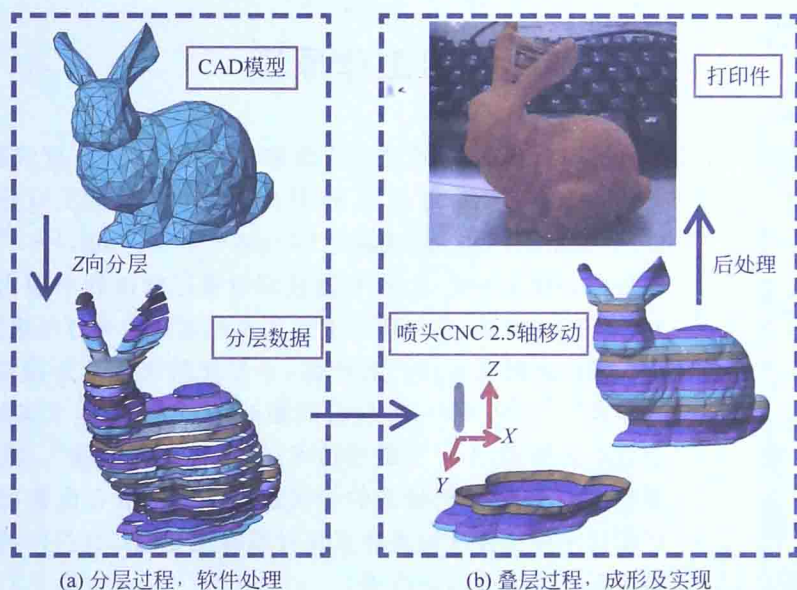


图 1-1 增材制造基本原理(用颜色表示分层)

3D 打印技术,是以计算机三维设计模型为蓝本,通过软件分层离散和计算机数字控制系统,利用激光束、热熔喷嘴等方式将金属粉末、陶瓷粉末、塑料、细胞组织等特殊材料进行逐层堆积黏结,最终叠加成形,制造出实体产品。与传统制造业通过模具、车铣等机械加工方式对原材料进行定型、切削并最终生产出成品不同,3D 打印将三维实体变为若干个二维平面,通过对材料处理并逐层叠加进行生产,大大降低了制造的复杂度。这种数字化制造模式不需要复杂的工序,不需要庞大的机床,不需要众多的人力,直接从计算机图形数据便可生成任何形状的零件,使生产制造的中间环节降到最小限度。

用日常生活中的普通打印机可以打印计算机设计的平面图形,而 3D 打印机与普通打印机工作原理很相似,只是打印材料不同。普通打印机的打印耗材是墨水(或墨粉)和纸张,而 3D 打印机消耗的是金属、陶瓷、塑料等不同的“打印材料”,是实实在在的原材料。打印机与计算机连接后,通过计算机控制可以把“打印材料”一层层地叠加起来,最终把计算机上的蓝图变成实物。通俗地说,3D 打印机是可以“打印”出真实 3D 物体的一种设备,比如打印一个机器人、玩具车、各种模型,甚至是食物或人体器官等。之所以通俗地称其为“打印机”,是参照了普通打印机的技术原理,因为分层加工的过程与通常的打印十分相似,这项打印技术也可称为 3D 立体打印技术。

桌面型 3D 打印机源于 2008 年英国 RepRap 开源项目。RepRap 是 3D 桌面打印机发



展的基石,直接催生了包括 Makerbot 在内的一大批廉价的普及型 3D 打印机,价格从几千到几万元人民币不等。3D 打印技术目前面临着几个主要问题亟待解决:首先,与传统切削加工技术相比,产品尺寸精度和表面质量相差较大,产品性能还达不到许多高端金属结构件的要求;其次是大批量生产效率还比较低,不能完全满足工业领域的需求;最后,3D 打印的设备和耗材成本仍然较高,如基于金属粉末的打印成本远高于传统制造。由此可见,3D 打印技术虽然是对传统制造技术的一次革命性突破,但目前它却不可能完全取代切削、铸锻等传统制造技术,两者之间应是一种相互支持与补充,共同完善与发展的良性合作关系。

### 1.1.2 3D 打印技术的专利来源

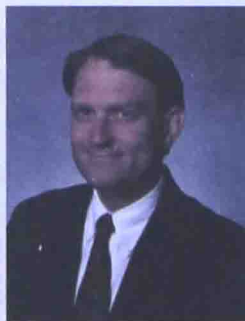
目前美国的 Stratasys 与 3D Systems 两家公司被全球公认为 3D 打印领域的行业巨头,这两家公司完全是靠自己拥有的 3D 打印原始专利而发展起来的。

3D Systems 的创始人查尔斯·胡尔(Charles W. Hull)称得上是一位发明家。生于 1939 年的他已经获得了多项专利,其中最著名的当属为 3D 打印技术的普及铺平道路的“立体光刻造型”(Stereolithography)专利。1982 年,在紫外线设备生产商 UVP 公司担任副总裁的胡尔试图将光学技术应用于快速成形领域,他发明的立体光刻造型(SLA)方法对于当时的快速成形工艺是一个巨大的突破。1984 年,以胡尔为发明人,UVP 公司申请了世界上第一件 SLA 专利,该专利的名称为 Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography,于 1986 年 3 月获得授权,专利号为 US4575330A。

随后,胡尔从 UVP 公司离开,成立了 3D Systems 公司,致力于将 SLA 技术商业化。1990 年,3D Systems 从 UVP 公司购回了 US4575330A 专利。2001 年,3D Systems 公司收购了 DTM 公司。DTM 公司是“选择性激光烧结”(SLS)技术的开发者,持有该技术的基础专利 US5155321A。现在的快速成形设备中,以对 SLA 的研究最为深入,运用也最为广泛。无独有偶,Stratasys 的创立者斯科特·克伦普(S. Scott Crump)也是一位多产的发明家。他研发了 3D 打印的另一种技术路线——熔融沉积成形(FDM)技术,并于 1989 年申请了美国专利。同年,斯科特·克伦普和妻子丽莎·克伦普(Lisa Crump)一同创立了 Stratasys 公司。3D 打印技术的两位创始人如图 1-2 所示。



Charles W.Hull



S.Scott Crump

图 1-2 3D 打印技术的两位创始人

1992 年,斯科特·克伦普申请的 FDM 专利获得授权,其名称为 Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects,专利号为 US5121329A。1993 年,Stratasys 公司

开发出了第一台基于熔融沉积成形技术的设备。经过二十多年的发展,如今的 Stratasys 已经成长为市值超过 30 亿美元的大型企业。

从两家企业的发展历史可以看出,3D 打印行业的“双雄”——Stratasys 与 3D Systems 均源自多产的发明家,其发展都遵循了发明家→技术→专利→企业→商业化的路径,其经验值得借鉴。

在专利分析领域,常常用专利被引证次数来衡量专利的重要性和价值。通常情况下,专利越重要,被引证的次数就越多。在某领域内被引证次数最多的专利,很可能就是该领域的基础专利或核心专利。截止 2010 年底,US4575330A 被引证次数高达 417 次,US5121329A 被引证次数 212 次。从被引证数量的指标来衡量,两件专利堪称 3D 打印行业的基础专利。引用 US4575330A 最多的为 3D Systems 公司,引用次数高达 77 次,约占该专利被引用总次数的 18%,表明 3D Systems 在 US4575330A 的基础上进行了持续创新,不断部署新的专利。

其他引用 US4575330A 的公司中,除了 3D 打印行业的 Zcorp 公司、Object 公司、Stratasys 等公司外,还涉及化工、医疗、半导体、影像、电子、材料、航空、汽车等领域的企业,在一定程度上显示了 3D 打印技术对其他行业的深远影响。

此外,麻省理工学院(MIT)也多次引用 US4575330A。该学校也是全球 3D 打印技术的重要研究机构,开发了 3D 印刷(3DP)技术,持有基础专利 US5204055A。1995 年,Zcorp 公司从麻省理工学院获得专利授权,开发了基于 3D 印刷技术的 3D 打印机。

引用 US5121329A 次数最多的为 Stratasys,高达 62 次,约占该专利被引用总次数的 29%。自我引证比例较高,说明 Stratasys 在 US5121329A 的基础上进行了持续的研究和开发,并不断将创新成果转化为专利。

此外,通过两件专利的被引用情况分析还可以知道,Stratasys 与 3D Systems 都分别引用了对方的基础专利。3D 打印行业里的相关公司交叉引用其他公司的专利,在一定程度上表明,3D 打印领域的某一家公司不可能完全垄断某种技术,而是通过相互借鉴和学习,共同推动技术进步。

### 1.1.3 3D 打印系统配置

不管是个人还是企业建立 3D 打印工作室甚至车间,都需要满足一定的软件和硬件技术条件,其中有些是可选的,有些是必须配备的。下面的内容针对的是已经购买了桌面型打印机的用户。

#### 1. 一台高配置的计算机(必备)

三维 CAD 设计以及三维扫描数据处理对计算机配置的要求较高,尤其是在处理几十至上百兆具有细节要求的产品模型数据时,高配置计算机可以确保设计工作快速、稳定和可靠地完成。通常的要求是:

- ◇ 15 英寸以上的高清显示器;
- ◇ 64 位 Intel 酷睿 i5 以上或者同样处理速度的 AMD CPU;
- ◇ 独立显卡,1GB 以上独立显存; 8GB 以上内存; 500GB 以上硬盘;
- ◇ 最好是 Windows 7/Windows 8/Mac 的操作系统。



## 2. 3D 设计软件(必备)

3D CAD 软件是用来进行 3D 打印模型创建和修改的。目前市面上有较多品牌的软件可供选择,售价不等。国外高端的如 Catia、Siemens NX、PTC Creo、Geomagic Design 等商业版,售价在万元以上,主要用于专业工程师;中端如达索的 Solidworks、欧特克 Autodesk Inventor、西门子 SolidEdge 等,适用于专业人士和学生;国产的 CAXA 和中望 3D 产品功能也较全面,价格较低,交互简单,功能也够用,且本地化技术服务与支持占优势,技术支持成本低。考虑到使用成本、模型复杂度、是否支持 A 级曲面设计等,桌面型 3D 打印机学校或个人用户尽量选择一些国产 3D 工业设计软件,如 CAXA 或中望 3D 软件,从事艺术创作的可以选择的软件较多,如 3D Max、Maya、Rhino、Geomagic 系列、Blender、Freeform 等。

随着 IT 云服务技术的出现,3D 打印设计软件目前正向不需要专业知识的大众普及,3D 打印的设计平台正从专业设计软件向非专业设计应用发展。具有代表性的一是免费的开源 3D 脚本设计工具 OpenSCAD 和谷歌的 SketchUp 为代表的免费 3D 设计软件;二是基于 HTML5 浏览器和 WebGL 技术的 3D 交互设计软件,如 TinkerCAD、3D Tin、Autodesk 123D 等新兴互联网 3D 设计应用。目前多个 IT 行业巨头相继推出了基于各种开放平台的 3D 设计和打印应用,大大降低了 3D 设计打印的门槛,甚至有的应用已经可以让仅具小学文化水平的用户通过互联网 3D CAD 软件自主设计类似乐高积木的模块化玩具。

## 3. 3D 打印数据处理软件(可选)

3D 打印数据模型目前均使用多边形面体格式的数据模型。3D 打印数据模型由于来源不一,会产生各种几何缺陷导致无法打印,尤其是通过 3D 扫描获取的 3D 模型数据几乎都要经过处理才能让 3D 打印机读取。

多边形面体处理和编辑软件国内开发单位和个人极少,目前流行的 3D 打印数据处理软件大都是德国、美国、意大利等国人士开发,具体见图 1-3 的系统配置地图。

## 4. 3D 扫描仪和逆向工程软件(可选)

把这两项列为可选或备选,主要是根据 3D 打印面向的不同的客户群体而定的。如果是面向产品设计应用或 3D 照相服务,3D 扫描仪是必需的。目前,3D 扫描仪国内外设备价格差别很大,从几千、几万元到几十万元不等。3D 扫描仪背后的质量差异也不是几句话可以说清楚的,用户主要根据自己希望得到的扫描模型的细节分辨率来进行购买决策。

逆向工程软件可选的较多,大多数的 3D 设计软件包括 Catia、UG NX、PTC Creo、Solidworks、中望 3D 等均不同程度地支持 3D 扫描得到的点云编辑和曲面设计,且操作简单。当然,也可以选择更为专业的 Netfabb StudioPro、Geomagic 系列软件和 Imageware 等专业逆向工程软件。

## 5. 打印后处理工具(必备)

打印后处理工具主要是一些手工或电动工具。由于 3D 打印件通常要进行附着物及支撑材料的剥离和清洁,如有的打印件表面粗糙,要进行打磨处理或涂装处理,尤其是桌面型