

3D打印技术应用丛书

# 3D 打印技术与成形工艺

3D DAYIN JISHU YU CHENGXING GONGYI

主 编 门正兴 白晶斐 银 赢

主 审 刘辉林 燕杰春



重庆大学出版社

术应用丛书

# 3D 打印技术与成形工艺

3D DAYIN JISHU YU CHENGXING GONGYI

主 编 门正兴 白晶斐 银 赢

副主编 董 洁 樊小西

汪成功 程明远

主 审 刘辉林 燕杰春



重庆大学出版社

## 内容提要

本书根据 3D 打印主流成形工艺,从 FDM、SLA、SLM、Polyjet 等多种成形工艺较为系统地阐述了 3D 打印技术与成形工艺的原理、分类、主流设备结构、材料、工作流程等内容,从 3D 打印在汽车、航空航天等经典应用场景作了案例展示,并结合增材设备操作员新职业赛事,让读者了解职业知识和能力要求,希望能够对广大 3D 打印学习者有所帮助。

### 图书在版编目(CIP)数据

3D 打印技术与成形工艺 / 门正兴, 白晶斐, 银赢主

编. — 重庆: 重庆大学出版社, 2022.7

(3D 打印技术应用丛书)

ISBN 978-7-5689-3409-1

I. ①3… II. ①门… ②白… ③银… III. ①快速成型技术 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 111460 号

## 3D 打印技术与成形工艺

主 编 门正兴 白晶斐 银 赢

主 审 刘辉林 燕杰春

策划编辑: 鲁 黎

责任编辑: 陈 力 版式设计: 鲁 黎

责任校对: 王 倩 责任印制: 张 策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人: 饶帮华

社址: 重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编: 401331

电话: (023) 88617190 88617185 (中小学)

传真: (023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: [fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)

全国新华书店经销

重庆市联谊印务有限公司印刷

\*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 12.5 字数: 299 千

2022 年 7 月第 1 版 2022 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 978-7-5689-3409-1 定价: 48.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

## ／ 编委会 ／

主 编：门正兴 白晶斐 银 赢

副 主 编：董 洁 樊小西 汪成功 程明远

编写人员：岳太文 王莲莲 刘 鑫 陈 诚 马亚鑫  
吴代建 郭金鹏 黄斌斌 段 军 范 芳  
靳 鑫 武新宇 杨险锋 何 苗 郑艳萍  
冷 涛 陈 龙 康 毅 郭 蕾

技术支持：王大勇 王 滔 唐浩舰 魏晓峰 秦 鹭  
吴文韬 简 舒 张思聪 黎江龙

特别鸣谢支持单位：

成都市远浩三维科技有限公司

深圳市创想三维科技股份有限公司

Stratasys 中国

广州中望龙腾软件股份有限公司



## ■ 前 言

前沿科技层出不穷，耳熟能详的人工智能、区块链、AR 与 VR 技术、人机接口等，哪一种技术既“亲民”，又能在火星探测器、歼 20 等尖端设备上使用呢？无疑就是 3D 打印技术。其实，3D 打印技术潜移默化地影响着人们的日常生活，如每款新车的研发都用到了 3D 打印快速制造的零件、商店中的精美首饰多数也采用 3D 打印蜡模浇铸成形，而矫形牙套和义齿大部分都采用 3D 打印制造技术生产。

3D 打印技术的原理并不复杂，就是将复杂三维实体变成二维简单图形，然后层层叠加成形最终的零件。这个过程对人们并不陌生，燕子筑巢、蜂窝结构、大树的年轮、贝壳、盖房子的过程，这些过程统称为增材制造。随着计算机技术的发展，计算机帮助人们实现了三维实体到二维图像的转化，又将二维的图像转化为设备可以识别的代码并指挥设备完成层层叠加。3D 打印成为一种与锻造、铸造、焊接、数控加工并驾齐驱的材料成形方法。它既可以打印玩具，也可以打印一幢完整的建筑，甚至可以在航天飞机中给宇航员打印任何所需的物品。随着物联网、云计算、大数据等技术的不断成熟和广泛应用，“中国制造 2025”“工业 4.0”等工业发展战略已然兴起，推动了工业机器人、3D 打印等智能制造产业的发展。我国是全球最大的工业生产国，随着国家政策的扶持和企业需求的扩大，未来 3D 打印将在我国工业生产制造中扮演重要的角色。

本书系统地介绍了 3D 打印技术，使学生对 3D 打印技术在目前的大环境下所涉及的前沿技术领域和最新科技成果有全面的认识，着重培养学生基于增材制造的创新思维，拓展学生的创新设计能力。

3D 打印技术与其他材料成形技术最大的区别就是“想到即做到”，本书编写过程中力求体现理论结合实际的特色，并注重新技术的普及与推广。本书编写模式新颖，采用团队通力协作、校企深度合作的模式完成。

全书共 7 个模块，由门正兴、白晶斐、银赢担任主编，董洁、樊小西、汪成功、程明远担任副主编。全书由刘辉林、燕杰春主审。

3D 打印技术涉及众多学科，发展日新月异，由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2022 年 1 月



## ■ 目 录

<b>模块一 熔融沉积成形 (FDM) 工艺</b> .....	<b>1</b>
单元 1 FDM 工艺原理及特点 .....	3
单元 2 成形材料 .....	15
单元 3 3D 打印笔成形应用实践 .....	22
单元 4 FDM 3D 打印成形应用实践 .....	29
<b>模块二 光固化成形 (SLA) 工艺</b> .....	<b>37</b>
单元 1 SLA 工艺原理及特点 .....	39
单元 2 成形材料 .....	49
单元 3 SLA 成形应用实践 .....	55
单元 4 DLP 数字光处理技术 .....	62
<b>模块三 激光选区熔化 (SLM) 成形工艺</b> .....	<b>67</b>
单元 1 SLM 成形工艺原理及特点 .....	69
单元 2 成形材料 .....	79
单元 3 典型零件 SLM 成形过程 .....	89
<b>模块四 聚合物材料喷射技术 (Polyjet)</b> .....	<b>101</b>
单元 1 Polyjet 工艺原理及特点 .....	103
单元 2 Polyjet 成形材料 .....	112
单元 3 Polyjet 成形设备 .....	119
单元 4 Polyjet 典型应用及案例 .....	126

<b>模块五 3D 打印准则</b> .....	133
单元 1 尺寸原则 .....	135
单元 2 支撑原则 .....	141
单元 3 轻量化原则 .....	146
单元 4 一体化免装配原则 .....	153
<b>模块六 典型应用场景及案例</b> .....	157
典型应用场景 1: 航空航天 .....	158
典型应用场景 2: 汽车 .....	160
典型应用场景 3: 医疗 .....	163
典型应用场景 4: 消费品案例 .....	165
典型应用场景 5: 生产制造案例 .....	168
<b>模块七 3D 打印比赛典型案例</b> .....	173
典型案例 1: “神笔马良” 3D 打印笔竞赛 .....	174
典型案例 2: FDM 成形工艺——3D 打印大赛 .....	177
典型案例 3: 逆向工程 + FDM 成形 增材制造比赛 .....	181
典型案例 4: 拓扑优化 + SLM 成形 增材制造比赛 .....	186
<b>参考文献</b> .....	189

## 模块一

# 熔融沉积成形（FDM）工艺

本模块主要围绕 FDM 成形工艺展开学习，包含成形工艺的原理及特点、成形材料，并从 3 个维度来学习 FDM 成形工艺的应用，即 3D 打印笔成形应用实践、桌面级 3D 打印成形应用实践、工业级 3D 打印成形应用案例。



## 模块目标

1. 了解 3D 打印的基本原理。
2. 掌握 3D 打印笔和桌面级打印机的操作方法。
3. 能够运用 FDM 成形技术打印简单零件（包含设计、前处理、打印、后处理）。

## 学习地图



## 建议学时

20 学时。

## 单元1 FDM 工艺原理及特点



### 单元结构

- 问题导入
- 认知学习
  - FDM 的概念
  - FDM 成形原理
  - FDM 设备工作原理及成形过程
- 拓展深化
- 分析与评价

### 单元目标

1. 了解 3D 打印的起源和发展。
2. 了解 FDM 工艺成形原理。
3. 熟悉 FDM 设备工作原理及成形过程。
4. 理解 FDM 成形工艺参数。
5. 了解 FDM 成形工艺特点。

### 问题导入

人们可以使用普通打印机将计算机中存储的文件或二维图片打印在纸上，那是否可由 3D 打印机来打印立体物品呢？

在生活中，人们使用手机的时间越来越多，需要一个简约、易用、舒适的手机支架（图 1.1.1）。目前市场上的手机支架价格很便宜，没有个性，有创意、适用的价格太高，不能满足每个人的个性化需求。

采用 3D 打印技术可以轻松地打印一个属于自己的、独一无二的手机支架，支架上可以有使用者名字，可以随时更新设计和颜色，还可以作为礼物送给朋友（图 1.1.2）。当然，也可以在网络或实体店等将 3D 打印产品进行售卖，将创意变成财富。



图 1.1.1 常见手机支架

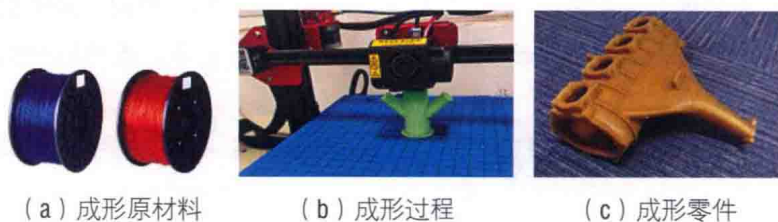


图 1.1.2 3D 打印手机支架

## 认知学习

### 一、FDM 的概念

熔融沉积成形 ( Fused Deposition Modeling ) , 又称熔丝沉积成形, 简称 FDM。FDM 方法成形过程如图 1.1.3 所示, 一般为热塑性塑料制成的丝状材料 [图 1.1.3 ( a )], 被加热到 200 °C 左右显熔融状态, 然后通过带有一个微细喷嘴的喷头挤喷出来 [图 1.1.3 ( b )]; 喷出的热熔材料涂在前一层已固化的材料上, 温度低于固化温度后开始黏结固化, 通过材料的层层堆积形成最终成品 [图 1.1.3 ( c )]。FDM 成形工艺由美国学者 Scot C 博士于 1988 年提出, 1993 年由美国 Stratasys 公司推出了第一代 FDM 工业设备。



( a ) 成形原材料

( b ) 成形过程

( c ) 成形零件

图 1.1.3 FDM 成形过程

现实生活中人们经常有制作单个及小批量零件的需求，常见的场景包括：

- ①工业产品设计初期，设计方案需要制造实物并反复修改。
- ②个人 DIY。
- ③小朋友及学生的动手创造。
- ④设备零件损坏，急需部件。

传统的单个及小批量零件生产对个人的动手能力要求很高，制造材料仅限于木头、塑性泥等简单材料，生产的零件往往比较粗糙，生产时间也较长（图 1.1.4）。

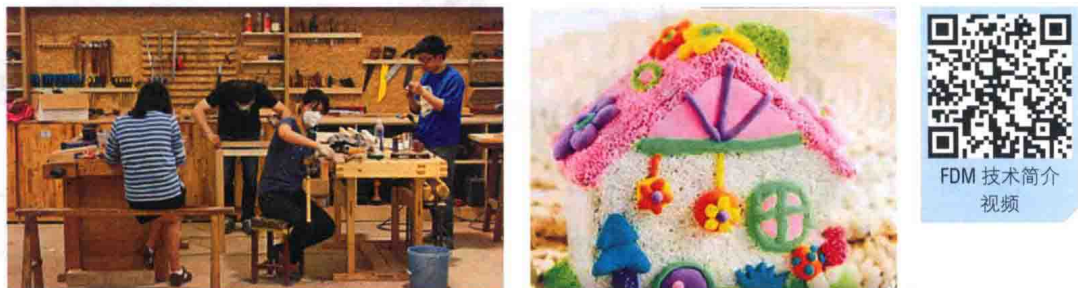


图 1.1.4 传统手工制作

FDM 技术是目前应用较为广泛的 3D 打印技术，也是迄今为止较容易获取的 3D 打印工艺。FDM 3D 打印技术根据数字模型预设的轨迹，自下而上逐层构建出具有复杂结构、优秀的机械性能的塑料零件，让人们头脑中的创意转变为真实的零件，让人们的梦想更加接近现实（图 1.1.5）。



图 1.1.5 FDM 成形塑料零件

## 二、FDM 成形原理

所有 3D 打印技术（增材制造）的基本原理都是将三维实体转化为二维平面后层层堆积形成最终的零件，采用不同原材料（金属、塑料、沙子、石膏）、不同材料的形式（丝材、粉材、板材、液态材料等）以及不同的材料结合方式（激光烧结、黏接、焊接）构成了各种各样不同的 3D 打印方法。

**FDM 成形原理：**丝状低熔点材料在加热熔化后由喷头挤出，挤出后的材料与已凝固的材料黏接后形成片状材料，片状材料层层堆叠最终形成零件（图 1.1.6）。

加热喷头在计算机的控制下，可根据截面轮廓的信息，做 X-Y 平面运动和高度 Z 方向的运动。丝状热塑性材料（如 ABS 及 MABS 塑料丝、蜡丝、聚烯烃树脂、尼龙丝、聚酰胺丝）

由供丝机构送至喷头，并在喷头中加热至熔融态，然后被选择性地涂覆在工作台上，快速冷却后形成截面轮廓。一层截面完成后，喷头上升一截面层的高度，再进行下一层的涂覆。如此循环，最终形成三维产品。未经后处理的 FDM 成形零件表面有明显的成形纹路，根据纹路的方向，可以清楚知道零件的成形方向（图 1.1.7）。

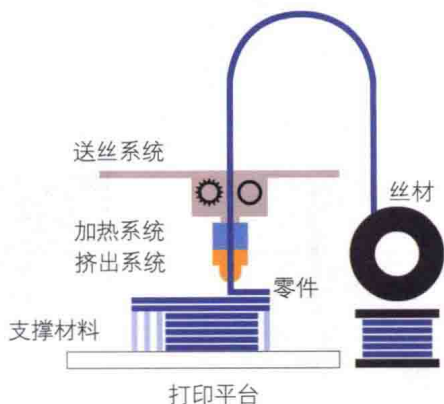


图 1.1.6 成形原理



图 1.1.7 成形纹路

## 三、FDM 设备工作原理及成形过程

### (一) FDM 设备工作原理

所有的 3D 打印成形过程都如图 1.1.8 所示，FDM 设备工作原理如图 1.1.9 所示。



图 1.1.8 3D 打印成形过程

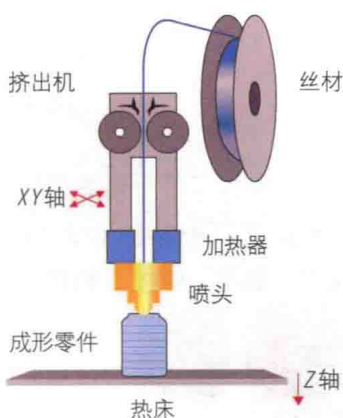


图 1.1.9 FDM 设备工作原理

将实心丝状原材料缠绕在供料辊上，由电动机驱动辊子旋转，辊子和丝材之间的摩擦力使丝材向喷头的出口送进。在供料辊和喷头之间有一导向套，导向套采用低摩擦材料制成，以便丝材能顺利、准确地由供料辊送到喷头的内腔（最高送料速度为 10 ~ 25 mm/s，推荐速度为 5 ~ 18 mm/s）。

喷头的前端有电阻式加热器，在其作用下，丝材被加热熔融，然后通过出口涂覆至工作台上，并在冷却后形成截面轮廓。受结构的限制，加热器的功率不可能太大，丝材熔融沉积的层厚随喷头的运动速度而变化，通常最大层厚为 0.15 ~ 0.25 mm。



## (二) FDM 系统组成

FDM 系统主要由送丝系统、加热系统、挤出系统、运动系统 4 个部分组成, 如图 1.1.10 所示。

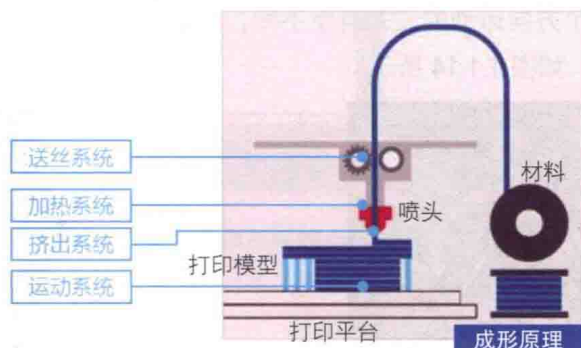


图 1.1.10 FDM 系统的组成

### 1. 送丝系统

送丝系统是将丝材平稳、可靠地输送到挤出系统, 它的主要功能是为挤出提供推力, 控制挤出速度。送丝系统一般由两台直流电动机带动相关齿轮构成, 示意图及实物图如图 1.1.11 所示。通过控制齿轮的正反转、停止及旋转速度, 可以控制喷头进料、出料, 出丝速度。

### 2. 加热系统

FDM 设备一般拥有两套加热系统, 一套设置在喷嘴前端, 用于将热塑性材料快速加热到熔融状态。由于热塑性材料的加热温度为  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 因此一般采用电阻加热方法, 如图 1.1.12 所示。FDM 设备的另一套加热装置为基板加热或整个成形环境加热, 加热温度一般为  $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 主要作用是减少零件变形, 避免翘曲、开裂等。

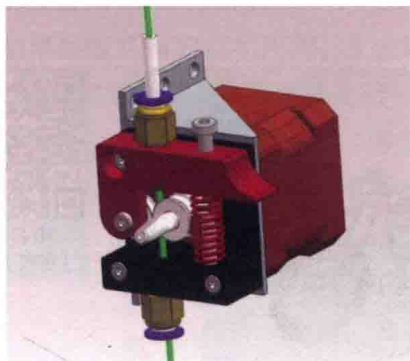


图 1.1.11 送丝系统  
(图片来源于创想三维)

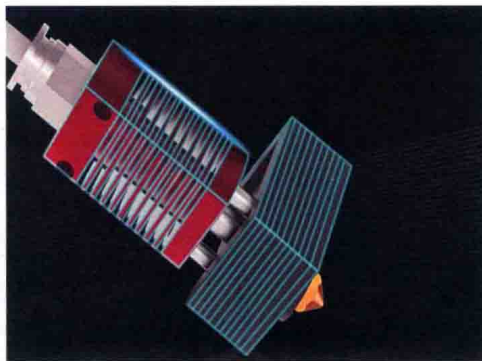


图 1.1.12 加热系统  
(图片来源于创想三维)

### 3. 挤出系统

挤出系统主要由喷嘴组成。FDM 成形的原材料一般是直径为  $1\sim 2\text{ mm}$  的塑料丝材, 在成形过程中一般单层厚度为  $0.16\text{ mm}$  左右, 需要将热塑性材料加热到  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  后从直径为

0.2 ~ 0.5 mm 的喷嘴挤出。挤出系统的示意图及实物图如图 1.1.13 所示。

## 4. 运动系统

FDM 成形三维实体的过程：首先成形 X/Y 平面薄片，然后通过喷头或基板在 Z 方向的移动进行下一个 X/Y 平面薄片成形。运动机构包括 X、Y、Z 三个轴的运动。不同的 FDM 成形设备实现 X、Y、Z 三个方向运动的方式有所不同，桌面级一般采用基板进行 X、Y 平面运动，喷嘴进行 Z 方向运动，如图 1.1.14 所示。

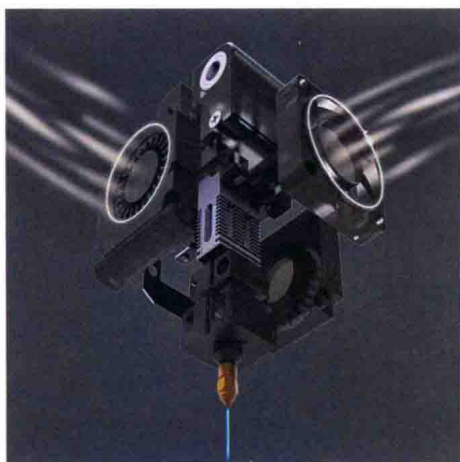


图 1.1.13 挤出系统  
(图片来源于创想三维)



图 1.1.14 运动系统

## (三) FDM 典型设备

FDM 典型设备包括 3D 打印笔、桌面级 FDM 打印机以及工业级 FDM 打印机 3 种。

### 1. 3D 打印笔

3D 打印笔是一支可以在空气中书写的笔，帮人们把想象力从纸张上解放出来，是目前较为简单和廉价的 3D 打印工具 (图 1.1.15)。



图 1.1.15 3D 打印笔

### 2. 桌面级 FDM 打印机

桌面级 FDM 打印机成形零件尺寸为 250 mm × 250 mm × 300 mm 左右，能够满足普通人 DIY 和学生学习的基本需求，是一般学校教学、个人研究的主要设备。如图 1.1.16 所示为创

想三维的 Ender-3 打印机，其参数见表 1.1.1。

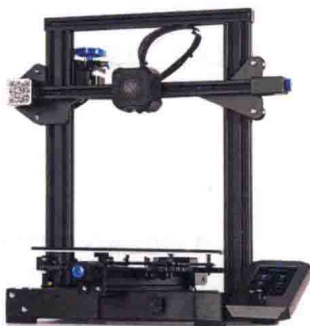


图 1.1.16 创想三维的 Ender-3 打印机

表 1.1.1 产品参数

产品尺寸： 475 mm × 470 mm × 620 mm	打印层厚： 0.1 ~ 0.4 mm
打印尺寸： 220 mm × 220 mm × 250 mm	打印耗材： PLA/TPU/PETG
成形技术： FDM	计算机操作系统： MAC/WindowsXP
产品净重： 7.8 kg	切片软件： Simplify3d/Cura
产品毛重： 9.6 kg	打印精度： ±0.1 mm
热床温度： ≤ 100°	耗材直径： 1.75 mm

### 3. 工业级 FDM 打印机

与桌面级 FDM 打印机不同，工业级 FDM 打印机可以将 3D 打印技术与生产级热塑性塑料结合，快速成形具有较高尺寸精度和可重复性的高强度、耐用、尺寸稳定的部件，用于航天、医疗、汽车、电子和其他专业。如图 1.1.17 所示为 Stratasys 公司的 Fortus 450 mc，其产品参数见表 1.1.2。



图 1.1.17 工业级 FDM 打印机