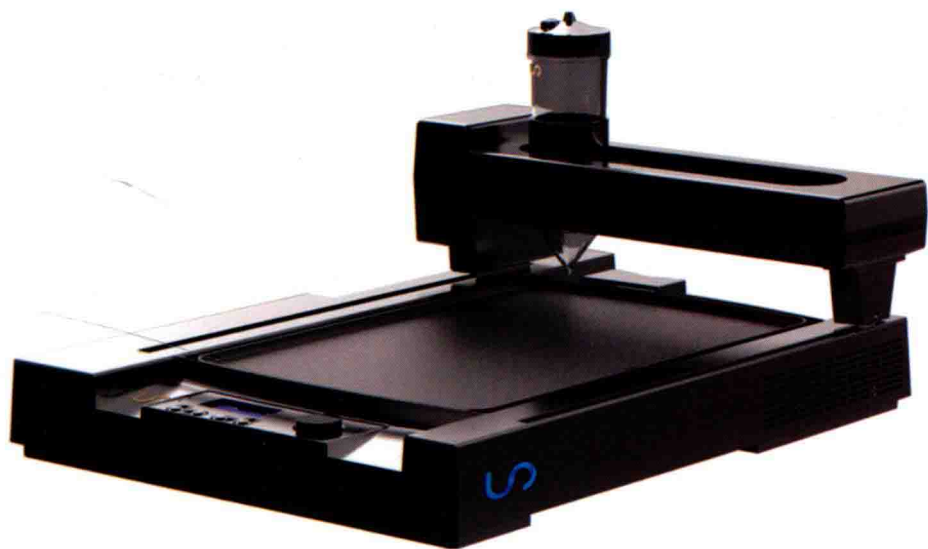


作者立足**3D行业研发经验**，解构前沿**技术细节**

剖析行业应用案例、探讨未来发展方向
引导读者进行具体实战、走进智能制造新时代



3D PRINTING
Technology, Principles and
Applications

3D打印

原理、技术与应用

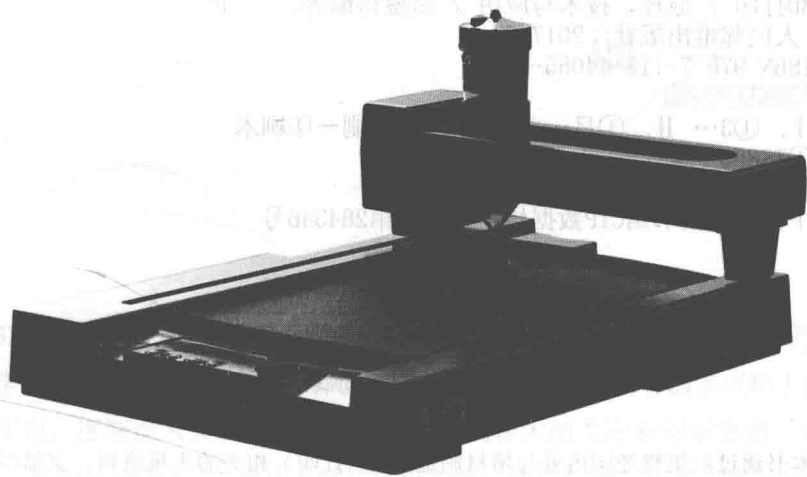
吕鉴涛 | 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



3D PRINTING

Technology, Principles and
Applications

3D打印

原理、技术与应用

吕鉴涛 | 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

3D打印：原理、技术与应用 / 吕鉴涛编著. — 北京：人民邮电出版社，2017.5
ISBN 978-7-115-44055-6

I. ①3… II. ①吕… III. ①立体印刷—印刷术
IV. ①TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第284346号

内 容 提 要

本书通过汇集整理国内外与增材制造(3D打印)相关的大量资料、文献以及前沿技术报导,对3D打印技术的起源与发展、3D打印机系统结构与控制系统、3D打印技术及材料分类与应用、3D打印数据处理与通用建模软件概览以及3D打印编程技术与通用算法等方面进行了系统性的阐述。书后半部分章节从实战的角度,试图通过解构现有的部分软硬件系统,对初步接触3D打印技术的读者进行具有可操作性和实用化的学习引导。本书还讨论了3D打印技术与中国制造2025的重要关系,以及对3D打印技术未来发展的一个前瞻性的展望。

本书适合对3D打印技术感兴趣的读者阅读与参考。

◆ 编 著 吕鉴涛

责任编辑 邹文波

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京鑫正大印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 16.5

2017年5月第1版

字数: 227千字

2017年5月北京第1次印刷

定价: 49.80元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第8052号

前言

INTRODUCTION

3D 打印技术自面世以来,距今已有 30 多年的历史。直至近年,随着信息科学与材料技术等相关产业的高速发展,3D 打印突破原有诸多应用上的技术障碍,逐渐走入大众的视野,并引发人们极大的关注和探索热情。3D 打印,即快速成型技术,是基于材料堆积法的一种高新制造技术,被认为是近 20 年来制造领域的一个重大成果。它集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一身,可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造模型,从而为原型制造、新设计思想的校验提供一种低成本的实现手段。

3D 打印作为第四次工业革命的代表技术,受到了世界各国政府的高度重视。2013 年,美国总统奥巴马在国情咨文演讲中强调了 3D 打印技术的重要性,希望推动美国 3D 打印产业的发展。在军工领域,美国军方不间断地举行各种 3D 打印技术的培训活动,而且也正在研究新型的 3D 打印应用方案以优化现役军队的作战装备,同时还在海军战舰上配备了性能强大的 3D 打印设备以备不时之需。德国在 3D 打印领域也处于全球领先地位,这得益于德国 3D 打印联盟对这一技术的大力推广。2007—2013 年,欧盟第七框架计划(7th Framework Programme)为 60 个 3D 打印联合研究项目提供了支持,总计投资 1.6 亿欧元。在欧盟《地平线 2020 项目计划(2014—2020 年)》框架下,一些新的 3D 打印研究项目将继续被支持,并且一些用于商业应用的 3D 打印项目也将纳入计划。此外,欧盟还将成立一个欧洲 3D 打印技术平台,为 3D 打印行业的企业分享信息、提供技术和经济方面的解决方案或者进行指导等,并且欧盟还将支持一些 3D 打印成果转化中心的建设。

2015 年,《中国制造 2025》以及《国家增材制造产业发展推进计划

(2015—2016年)》相继出台。计划指出,到2016年,初步建立较为完善的增材制造产业体系,整体技术水平保持与国际同步,在航空航天等直接制造领域达到国际先进水平,在国际市场上占有较大的份额。我国于1999年才开始金属零件的激光快速成型技术研究,晚美国十几年,但是发展速度很快。在3D打印领域,中国厚积薄发,尤其是近年来的发展势头极为迅猛,大有后来居上之势。在飞机钛合金大型整体结构件的激光快速成型方面,我国已取得重要突破。目前,中国已具备了使用激光成型超过 12m^2 的复杂钛合金构件的技术和能力,成为目前世界上唯一掌握激光成型钛合金大型主承力构件制造和应用的国家。中国航空业在3D打印技术上已经走在了世界前列,多个型号飞机使用了3D打印部件,部分技术已经达到世界领先水平。据新华社报道,中船重工第705研究所历经近一年的研制,在3D打印技术领域取得重大突破,借助直接金属激光烧结快速成型技术实现了3D打印,成为继美国、德国等3D打印技术巨头之后,世界上第四家掌握该技术的企业。

正因为3D打印技术如此重要,与之相关的大量技术资料也应运而生。作为一名3D打印行业的从业者,面对网络及其他各种渠道铺天盖地而来、良莠不齐的海量信息片段进行真伪辨识时我们也颇感力不从心,于是想通过自己的努力,基于项目运作的实际经验和相关知识的积累,编写一本通俗易懂、内容准确、可读性强的资料性读本奉献给大家,力求在创新性、前瞻性、可操作性和应用性等方面形成特色,做到内容尽量涵盖3D打印技术的主要方面。

本书适用范围较广,既可作为具有一定基础的技术爱好者对这一领域的认知导引,也可作为3D打印技术培训机构的培训教材,或者作为高等院校相关专业的课程和教学参考用书。

随着3D打印技术应用日新月异的飞速发展,该领域的理论与技术水平也将同步快速提升。尽管我们精益求精,及时吸纳最新的技术理念和应用成果,但限于编者的理论水平和知识结构,书中难免出现各种错误和不妥之处,恳请读者不吝赐教予以批评斧正。

本书由吕鉴涛编著，郭洋和程小伟也参与了部分章节的编写及资料的收集整理工作。电子科技大学教授高源慈博士在本书编写过程中提供了宝贵的意见。在此，向所有为本书的出版做出贡献的朋友表示衷心感谢。同时也要感谢我的家人，没有他们的支持，本书不可能这么快面世。

编者

2017年1月于成都

目 录

CONTENTS

第 1 章	引论	1
第 2 章	3D 打印技术的起源与发展	6
2.1	3D 打印技术的基本原理与起源	6
2.2	3D 打印技术国内外发展现状	10
2.2.1	国外 3D 打印技术的发展现状	10
2.2.2	国内 3D 打印技术的发展现状	11
2.3	3D 打印技术与中国制造 2025	13
2.3.1	中国制造 2025	13
2.3.2	3D 打印与中国制造 2025	14
第 3 章	3D 打印机系统结构与控制系统	19
3.1	通用 3D 打印机硬件系统概述	19
3.1.1	3D 打印机机械结构系统	20
3.1.1.1	电机	20
3.1.1.2	电源	24
3.1.1.3	导轨	25
3.1.1.4	丝杠	25
3.1.1.5	加热板 / 热床	27
3.1.1.6	挤出机	28
3.1.1.7	机身结构	30
3.1.2	3D 打印机硬件控制系统	36

3.2 通用 3D 打印机软件控制系统	38
---------------------------	----

第 4 章 3D 打印技术及材料分类与应用.....43

4.1 3D 打印技术分类	43
4.1.1 熔融沉积成型技术	43
4.1.2 选择性激光烧结技术	44
4.1.3 激光选区熔化成型技术	45
4.1.4 光固化立体成型技术	47
4.1.5 分层实体制造技术	48
4.1.6 三维打印成型技术	49
4.1.7 其他 3D 打印技术	51
4.2 3D 打印材料分类	55
4.2.1 3D 打印材料物理状态分类	55
4.2.2 3D 打印材料化学性能分类	55
4.2.3 3D 打印材料成型方法分类	55
4.3 各类打印材料及其应用	56
4.3.1 3D 打印工程塑料	56
4.3.2 3D 打印光敏树脂	58
4.3.3 3D 打印橡胶类材料	58
4.3.4 3D 打印金属材料	59
4.3.5 3D 打印陶瓷材料	59
4.3.6 其他 3D 打印材料	60
4.4 我国 3D 打印材料技术发展的现状与机遇	62

第 5 章 3D 打印数据处理与通用建模软件概览.....63

5.1 3D 打印数据处理	63
5.1.1 STL 格式简介	63
5.1.2 3D 打印数据处理流程	64

5.2	3D 建模通用软件简介	65
5.2.1	3ds Max 简介与 STL 建模实例	65
5.2.2	UG 简介与 STL 建模实例	70
5.2.3	Pro/Engineer 简介与 STL 建模实例	79
5.2.4	SolidWorks 简介与 STL 建模实例	89

第 6 章 3D 打印编程技术与通用算法 100

6.1	3D 打印编程技术简介	100
6.1.1	3D 打印机固件开发环境	100
6.1.2	3D 打印与 Gcode	105
6.2	3D 打印技术相关算法	111
6.2.1	3D 打印分层切片处理	111
6.2.1.1	STL 切片算法	111
6.2.1.2	STL 文件结构与操作处理编程	114
6.2.1.3	基于 CuraEngine 的 3D 模型切片	123
6.2.2	扫描路径生成与填充算法	130
6.2.3	支撑生成算法	137
6.2.4	成型方向与算法优化概述	146

第 7 章 3D 打印云芯片与云切片技术 150

7.1	云控制芯片简介与应用	151
7.2	CUDA 编程技术简介	154
7.2.1	CUDA 概述	154
7.2.2	GPU 架构概述	157
7.2.3	CUDA 与并行计算	157
7.2.3.1	建立 CUDA 编程环境	158
7.2.3.2	CUDA 编程架构优缺点	162
7.3	CUDA 编程实例	165
7.3.1	编写第一个 CUDA 程序	165

7.3.2	CUDA 并行编程	167
7.4	基于 CUDA 架构的 3D 模型切片	170
7.4.1	CUDA 多核编程 API 简介	170
7.4.2	CUDA 架构模型切片处理流程	172

第 8 章 3D 打印云平台与个性化定制 175

8.1	构建 3D 打印生态云平台	175
8.1.1	3D 打印云生态系统	175
8.1.1.1	云计算技术简介	175
8.1.1.2	基于云计算架构的 3D 打印生态系统	178
8.1.2	3D 打印生态系统用户群	181
8.2	云平台个性化定制服务系统	182
8.2.1	云创意设计中心	184
8.2.2	云打印中心	185
8.2.3	周边服务交易中心	187
8.3	分布式云打印与个性化定制	188
8.3.1	3D 打印与个性化定制	188
8.3.1.1	个性化市场趋势分析	188
8.3.1.2	个性化定制商品的市场容量	189
8.3.1.3	3D 打印生态系统的个性化服务流程	191
8.3.2	3D 打印智能制造云平台管理系统简介	192

第 9 章 工业 4.0 与 3D 打印 197

9.1	工业 4.0 概述	197
9.1.1	“工业 4.0”概念的由来	197
9.1.2	“工业 4.0”的核心技术与行业影响	199
9.2	3D 打印技术在工业 4.0 中的重要作用	209

第 10 章	3D 打印技术应用展望	213
10.1	3D 打印技术应用	213
10.1.1	3D 打印时代的生活	213
10.1.2	3D 打印时代的教育	219
10.1.3	3D 打印时代的制造	223
10.1.4	3D 打印时代的知识产权	225
10.2	3D 打印时代的机遇与挑战	226
10.3	4D 打印技术简介	228
附录 A	中英文术语对照表	230
附录 B	3D 打印机安装测试与常见故障维修	234
B.1	3D 打印机安装调试	234
B.2	3D 打印机常见故障与处理方法	243
参考文献		250

第1章

引论

人类发展历史上的每一次革命性技术进步都会给整个社会生活和行业生态带来巨大的变革和机遇。作为一项新型技术，增材制造（Additive Manufacturing, AM）开始在各个领域展现出前所未有的巨大潜能，并吸引了众多国家和产业巨头对此投以极大的关注和资本投入。增材制造，俗称三维打印（Three-Dimensional Printing, 3D Printing）或者快速原型制造（Rapid Prototyping, RP），它基于离散—堆积（Discrete-Collecting）原理，由零件三维数据驱动直接制造零件，是传统制造工艺的全新升级。

人类制造技术的发展已有几千年历史，制造工艺经历了“手工制造”“等材制造”“减材制造”和“增材制造”4个阶段。其中，“手工制造”是最原始的方法，它通过简易的工具对材料进行加工。该方法制作出来的产品一般精度不高、功能简单，而且对原材料的浪费也很大。“等材制造”则是指采用锻造、铸造、焊接、粉末冶金等热加工材料制造方法，在加工的过程中原材料基本不会损失。“减材制造”则是指采用车、铣、磨等技术，在加工过程中原材料会损失一部分。直到近30年来，采用材料逐渐累加制造实体零件的技术，也就是所谓的“增材制造”技术才逐步发展起来并成为一种引起社会广泛关注的新型技术，采用该技术进行制造，不会对原材料造成浪费。西方媒体把这种实体自由成型制造技术誉为将带来“第四次工业革命”的新技术。《连线》杂志（Wired）主编克里斯·安德森（Chris Anderson）曾说过，“3D打印是一件比互联网更重大的事情。”我们同样也有理由相信，3D打印技术与当年工业革命所带来的庞大工厂整合一样，人们可以将工厂整合到计算机屏幕上一个简单的图标——制造。

3D打印，作为一种快速成型技术，它是一种以数字模型文件为基础，将金属粉末、流体材质、塑料等各种类型的可粘合材料，通过计算机软件程

序控制，使用逐层堆叠材料的方式来构建物体的立体成型技术。3D 打印机（3D Printers）（见图 1-1）作为 3D 打印技术具体呈现的可操作实体装备，一般根据用途和所采用的打印材料，具有各种不同的外观和形态。目前，我们能想象的很多东西，如房子、汽车、衣服、飞机零部件、人们日常吃的煎饼和巧克力甚至是人体部分器官等都可以通过 3D 打印机“打印”出来。

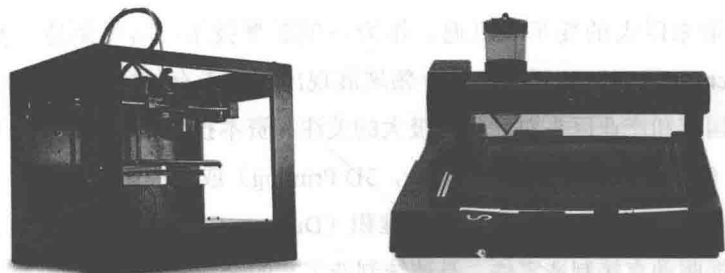


图 1-1 3D 打印机实物图

无论如何，3D 打印实现了一种可能：只要你拥有一台打印机，一个创意或想法，无论你是身处边远乡村，抑或是繁华都市，都可以通过自己的方式去改造这个世界——至少可以先改变自己的世界。

图 1-1 中，左例为一款以 ABS 材质为原料的通用 3D 打印机实物图；右例为一款煎饼打印机实物图（煎饼打印机所用原料为精面粉、牛奶、鸡蛋、白糖等按照一定比例混合调配而成的流体状可食用材料）。

3D 打印技术起源于 20 世纪 90 年代中期，经过 20 多年的发展，现在技术日趋成熟和稳定。随着 3D 打印技术应用的不断拓展，它将不再局限于制造技术领域，而是逐渐成为一种社会创新的工具。特别是在当前“大众创业，万众创新”的大环境下，这种工具使人人都可以成为创造者，从而支撑创新型社会的快速发展。随着 3D 打印开辟新的前沿领域，普通民众可以方便快捷地通过拥有 3D 打印机，从而拥有以前难以轻易获取的设计和生产制造工具的能力，制造业和商业模式将发生巨大的变革，现有的知识产权法也将面临巨大的挑战。一些传统的行业将受到 3D 打印技术冲击逐渐萎缩直至消失。然而，更多的新兴行业可能因此脱颖而出并衍生出各种新的商业生态。例如，

基于云计算技术和 3D 打印技术的分布式制造系统的出现,从根本上颠覆了传统的工厂来料加工制造模式,客户仅需要一个好的想法就可以通过 3D 打印云平台对接在线的创意设计师,将客户的想法变成可打印的三维数字切片文件,然后通过分布在不同地域的联机 3D 云打印机,将最终产品通过定制化的流程制造出来。在这种模式下,生产周期将极大缩短,同时生产流程的客户现场参与感将大幅度提升。

随着技术的迅猛发展,对于 3D 打印技术潜在优势的预测,在现阶段还无法做到十分准确的描述。然而,通过对不同行业、不同专业背景、不同技术水平和不同认知水平群体的调查和分析,可以将 3D 打印在减少生产成本、时间和空间复杂度方面所体现出来的技术优势做如下归纳。

1. 制造复杂物品不增加成本

就传统制造而言,物体形状越复杂,制造成本越高。对于 3D 打印机而言,制造形状复杂的物品不增加成本,制造一个华丽的、形状复杂的物品并不比打印一个简单的方块消耗更多的时间、技能或成本。制造复杂物品而不增加成本将打破传统的定价模式,并改变人们计算制造成本的方式。

2. 产品多样化不增加成本

传统的制造设备功能较少,做出的形状种类有限。一台 3D 打印机却可以打印许多形状,它可以像工匠一样每次都做出不同形状的物品。3D 打印省去了培训机械师或购置新设备的成本,一台 3D 打印机只需要不同的数字设计蓝图和一批新的原材料。

3. 无需组装

传统的大规模生产建立在组装线基础上,在现代工厂,机器生产出相同的零部件,然后由机器人或工人(甚至跨洲)组装,产品组成部件越多,组装耗费的时间和成本就越多。3D 打印能使部件一体化成型。3D 打印机通过分层制造可以同时打印一扇门及上面的配套铰链,不需要组装。省略组装

就缩短了供应链，节省在劳动力和运输方面的花费。供应链越短，污染也就越少。

4. 零时间交付

3D 打印机可以按需打印。即时生产减少了企业的实物库存，企业可以根据客户订单使用 3D 打印机制造出特别的或定制的产品来满足客户需求，所以 3D 打印机将使新的商业模式成为可能。如果人们所需的物品按需就近生产，零时间交付式生产能最大限度地减少长途运输的成本。

5. 设计空间无限

传统制造技术和工匠制造的产品形状有限，制造形状的能力受制于所使用的工具。例如，传统的木制车床只能制造圆形物品，轧机只能加工用铣刀组装的部件，制模机仅能制造模铸形状。3D 打印机则可以突破这些局限，开辟巨大的设计空间，甚至可以制作目前可能只存在于自然界的形状。

6. 零技能制造

虽然计算机自动控制下的机器制造降低了对人员技能的要求，但是传统的制造机器仍然需要熟练的专业人员进行机器调整和校准以及其他相关操作，这些操作很多时候非常依赖技术人员的经验和技能累积。若采用 3D 打印技术进行制造，机器在生产制造过程中会从设计文件里自动获得各种操作指示，大幅降低了对技术人员的依赖程度。生产一件传统制造方式下相当复杂的物品，3D 打印机所需要的操作技能相比之下将会更少。从某种意义上说，非技能制造开辟了一种新的商业模式，并能在远程环境或极端情况下为人们提供新的生产方式。

7. 不占空间、便携制造

就单位生产空间而言，与传统制造机器相比，3D 打印机的制造能力更强。例如，一台注塑机只能制造比自身小很多的物品，然而，3D 打印机通常可以制造如其打印台一样大的物品。通过 3D 打印设备的自由移动，甚至

可以制造出比自身还要大的物品。较高的单位空间生产能力使得 3D 打印机适合家用或办公使用，因为它们所需的物理空间小。

8. 减少废弃副产品

与传统的金属制造技术相比，3D 打印机制造金属时产生较少的副产品。传统金属加工的浪费量惊人，90% 的金属原材料被丢弃在工厂车间里。3D 打印制造金属时浪费量减少。随着打印材料的进步，“净成型”制造可能成为更环保的加工方式。

9. 材料无限组合

对当今的制造机器而言，将不同原材料结合成单一产品是件难事，因为传统的制造机器在切割或模具成型过程中不能轻易地将多种原材料融合在一起。随着多材料 3D 打印技术的发展，人们有能力将不同原材料融合在一起。以前无法混合的原料混合后将形成新的材料，这些材料色调种类繁多，具有独特的属性或功能。

10. 精确的实体复制

数字音乐文件可以被无休止地复制，音频质量并不会下降。未来，3D 打印将数字精度扩展到实体世界。扫描技术和 3D 打印技术将共同提高实体世界和数字世界之间形态转换的分辨率，人们可以扫描、编辑和复制实体对象，创建精确的副本或优化原件。

正是这些已经部分得到实证的优势，让很多传统企业在审慎的思考后，将前瞻性的目光凝视、定格于这个依然在蓬勃发展的新技术上，并以此为未来发展规划的战略制高点。在后续章节，我们将逐步揭开 3D 打印技术的神秘面纱，一起走进 3D 打印技术的神奇世界，共同探讨该技术如何改变我们的生活、工作，乃至衣食住行的各个方面。

第2章

3D 打印技术的起源与发展

对许多第一次听到 3D 打印的人而言，他们的第一反应往往是脑海中出现与桌面老式喷墨打印机类似的东西。而实际上，桌面打印机与 3D 打印机之间的最大区别在于最终作品呈现的维度。桌面打印机属于二维打印，是在平面的各类纸张上喷绘彩色或者黑白墨水，而 3D 打印机“打印”出来的则是我们常见的三维立体实物。

2.1 3D 打印技术的基本原理与起源

对任何新技术、新理论或学说，人们总是喜欢追根溯源。例如，一直以来大家耳熟能详的那只神奇的苹果砸中了伊萨克·牛顿，从而引起了伟大的万有引力的发现。虽然据说那是法国文豪伏尔泰根据牛顿的外甥女巴尔顿夫人的说法编的，当然牛顿的手稿中也没提到那只举世闻名改变世界的苹果，然而人们仍然选择相信有这么回事。这个故事对于那些喜欢刨根问底寻找各种起源的人们或许是个很好的解释，不过是否会因此让更多的人思考问题的时候选择坐在树下，或者通过遥望星空寻找灵感就不得而知了。但是可以肯定的是，对于 3D 打印这一新技术，人们没能提供类似的传奇故事来注解它的不平凡。

3D 打印技术的原理其实并不复杂，它是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可黏合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术。由于在 3D 打印技术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度的零部件，极大地提高了生产效率和制造柔性。对于需要模具生产的产品，手板（prototype）验证是可行性论证的第一步。3D 打印技术对于手板的制作而言，