

# 3D打印技术

## 基础及应用

吴国庆 / 主编

非  
外  
借

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 3D 打印技术基础及应用

主 编 吴国庆

副主编 李 彬 姜 杰 莫中凯 顾 海

参 编 张 捷 陆晓霞 徐建刚 卢国升 何 科

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

3D 打印技术是基于 CAD 模型快速制作零件的新型成形方法。本书全面介绍了 3D 打印技术的工艺流程和特点, 阐述了每种技术的基本原理, 并介绍了 3D 打印技术在工业、文化创意以及医学等领域的应用。

全书共分 10 章, 主要介绍了 3D 打印技术的基本概况, 并对光固化成形工艺、选择性激光烧结工艺、选择性激光熔化工艺、熔融沉积成形工艺、三维印刷成形工艺、分层实体制造工艺、形状沉积制造工艺、电子束熔化成形工艺、激光近净成形工艺九种成形技术进行了论述, 并介绍了目前工业应用广泛的光固化成形工艺、选择性激光烧结工艺、选择性激光熔化工艺、熔融沉积成形工艺及三维印刷成形工艺这五种典型工艺的产品制造实例。

本书可作为高等学校增材制造工程及机械类、近机械类专业的本科生和研究生教材和参考书, 也可供相关工程技术人员学习使用。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

3D 打印技术基础及应用 / 吴国庆主编. -- 北京:  
北京理工大学出版社, 2021. 7

ISBN 978-7-5763-0056-7

I. ①3… II. ①吴… III. ①立体印刷-印刷术  
IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 137345 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京侨友印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 18.5

字 数 / 435 千字

版 次 / 2021 年 7 月第 1 版 2021 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 王晓莉

文案编辑 / 王晓莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

3D 打印技术是一种区别于传统制造工艺的先进制造技术，其个性化服务和数字化制造的特点契合了我国发展先进制造业的目标和要求。它与物联网、云计算、机器人等技术实现深度融合，正在掀起一场全方位的新科技革命和产业革命。

3D 打印 (3D Printing, 3DP)，又称增材制造 (Additive Manufacturing, AM)、实体自由制造 (Solid Free-form Fabrication, SFF)、快速成形 (Rapid Prototyping, RP) 等，是通过材料逐层增加的方式将数字模型制造成三维实体物件的过程。与传统的去除式加工及变形加工方式相比，逐层加工的 3D 打印技术制造过程直接而无需模具和夹具，可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件，为创新设计提供了自由的空间，并大大减少了加工工序，缩短了加工周期。

2020 年，“增材制造工程 (080217T)” 列入普通高等学校本科专业目录。本书的编写在一定程度上助力了 3D 打印技术教材体系的建设，助推 3D 打印技术应用型人才的培养。本书采用模块化的编写方式，以成形工艺为主线，融入丰富的应用案例和先进研究成果，以满足应用型高校学生的自主学习。

本书共 10 章。

第 1 章简要介绍了 3D 打印技术的基本知识，包括 3D 打印发展历程与趋势、3D 打印原理概述、3D 打印技术分类等。

第 2 章详细介绍了 3D 打印的数据建模与处理，包括三维建模的方法、STL 数据和文件输出、三维模型的切片处理等。

第 3~9 章分别详细介绍了光固化成形工艺及应用、选择性激光烧结工艺及应用、选择性激光熔化工艺及应用、熔融沉积成形工艺及应用、三维印刷成形工艺及应用、分层实体制造工艺及应用、其他成形工艺及应用。

第 10 章介绍了工业应用广泛的光固化成形工艺、选择性激光烧结工艺、选择性激光熔化工艺、熔融沉积成形工艺及三维印刷成形工艺的产品制造实例。

本书由吴国庆担任主编，其负责总体规划、审核统稿，同时还负责编写第 1 章，李彬负责编写第 2、4、6 章，姜杰负责编写第 3、7 章，莫中凯负责编写第 5、8 章，顾海负责编写第 9、10 章，张捷、陆晓霞和徐建刚、卢国升、何科等对应用案例提供了素材支持和参与了部分文字编写工作。

在本书的编写过程中，黄天成、孙健华、徐媛媛、顾燕、施瀚昱、刘金金、陈浩、陈侯焯等老师给予了许多无私帮助与支持，他们做了大量的资料查阅、汇总及实例整理等工作，在这里对其表示衷心感谢。同时要感谢行知教育协作联盟、北京理工大学出版社、先临三维科技股份有限公司、苏州中瑞智创三维科技股份有限公司等单位在本书出版过程中给予的大



力支持。在本书的编写过程中，作者还参考了大量的文献，在此向参考资料的原作者表示感谢！

本成果为机械设计制造及其自动化江苏省一流专业资助项目，同时得到了江苏省重点建设学科（苏教研〔2016〕9号）、江苏省重点研发计划（BE2018010-4）、教育部产学研合作协同育人项目（201902294001、201902294016）、江苏省高校自然科学研究重大项目（20KJA460007）、南通市科技计划项目（JCZ19122、JCZ19123、JCZ20056、JC2020149、JC2020155）等的支持。

3D打印技术涉及众多学科，限于作者水平，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

第1章 绪 论 .....	(1)
1.1 3D 打印发展历程与趋势 .....	(2)
1.1.1 国外发展历程 .....	(2)
1.1.2 国内发展历程 .....	(4)
1.1.3 未来发展趋势 .....	(6)
1.2 3D 打印原理概述 .....	(7)
1.2.1 3D 打印基本原理 .....	(7)
1.2.2 3D 打印工作流程 .....	(7)
1.2.3 3D 打印与传统制造 .....	(9)
1.3 3D 打印技术分类 .....	(10)
1.3.1 按成形工艺分类 .....	(10)
1.3.2 按加工材料分类 .....	(13)
1.4 3D 打印材料概述 .....	(14)
1.4.1 常见的3D 打印材料 .....	(15)
1.4.2 新兴的3D 打印材料 .....	(18)
1.4.3 3D 打印材料的发展趋势 .....	(20)
1.5 3D 打印技术应用领域 .....	(20)
1.5.1 工业制造领域的应用 .....	(21)
1.5.2 建筑设计领域的应用 .....	(21)
1.5.3 生物医药领域的应用 .....	(22)
1.5.4 汽车制造领域的应用 .....	(22)
1.5.5 大众消费领域的应用 .....	(23)
1.6 3D 打印技术的机遇与挑战 .....	(24)
1.6.1 3D 打印技术的发展机遇 .....	(24)
1.6.2 3D 打印技术的未来挑战 .....	(25)
思考与练习 .....	(27)



<b>第2章 3D打印的数据建模与处理</b> .....	(28)
2.1 三维建模的方法 .....	(28)
2.1.1 计算机辅助设计 .....	(29)
2.1.2 逆向工程 .....	(31)
2.2 STL数据和文件输出 .....	(34)
2.2.1 STL文件的格式 .....	(34)
2.2.2 STL文件的精度 .....	(35)
2.2.3 STL文件的基本原则 .....	(37)
2.2.4 STL文件的错误 .....	(38)
2.2.5 STL文件的编辑和修复 .....	(39)
2.2.6 STL文件的输出 .....	(40)
2.3 三维模型的切片处理 .....	(40)
2.3.1 成形方向的选择 .....	(41)
2.3.2 主要切片方式 .....	(42)
2.3.3 数据描述方式 .....	(44)
思考与练习 .....	(45)
<b>第3章 光固化成形工艺及应用</b> .....	(46)
3.1 概述 .....	(46)
3.1.1 工艺发展 .....	(46)
3.1.2 工艺特点 .....	(47)
3.2 SLA成形工艺 .....	(48)
3.2.1 基本原理 .....	(48)
3.2.2 后处理 .....	(52)
3.3 成形系统 .....	(53)
3.3.1 SLA成形系统 .....	(53)
3.3.2 DLP成形系统 .....	(55)
3.3.3 PolyJet成形系统 .....	(57)
3.4 成形材料 .....	(58)
3.4.1 光敏树脂的性能要求 .....	(58)
3.4.2 光敏树脂的组成 .....	(58)
3.4.3 光敏树脂的分类 .....	(59)
3.5 SLA成形制造设备 .....	(59)
3.6 SLA成形质量影响因素 .....	(63)
3.6.1 原理性误差 .....	(64)
3.6.2 工艺性误差 .....	(65)
3.6.3 后处理误差 .....	(68)
3.7 SLA的应用 .....	(68)



3.7.1	功能性和装配性测试 .....	(69)
3.7.2	辅助铸造 .....	(70)
3.7.3	制造原型零件 .....	(71)
3.7.4	陶瓷制备 .....	(72)
	思考与练习 .....	(73)
<b>第4章</b>	<b>选择性激光烧结工艺及应用 .....</b>	<b>(74)</b>
4.1	概 述 .....	(74)
4.1.1	工艺发展 .....	(74)
4.1.2	工艺特点 .....	(75)
4.2	SLS 成形工艺 .....	(76)
4.2.1	基本原理 .....	(76)
4.2.2	后处理 .....	(78)
4.3	SLS 成形系统 .....	(79)
4.3.1	光学扫描系统 .....	(80)
4.3.2	供粉及铺粉系统 .....	(82)
4.4	SLS 成形材料 .....	(83)
4.4.1	对材料的要求 .....	(84)
4.4.2	成形材料分类 .....	(84)
4.5	SLS 成形制造设备 .....	(88)
4.6	SLS 成形影响因素 .....	(92)
4.6.1	原理性误差 .....	(93)
4.6.2	工艺性误差 .....	(96)
4.6.3	后处理误差 .....	(102)
4.7	SLS 的应用 .....	(102)
4.7.1	模具制造 .....	(102)
4.7.2	产品试制与验证 .....	(103)
4.7.3	辅助铸造 .....	(103)
4.7.4	原型制作 .....	(103)
4.7.5	医学应用 .....	(104)
	思考与练习 .....	(104)
<b>第5章</b>	<b>选择性激光熔化工艺及应用 .....</b>	<b>(105)</b>
5.1	概 述 .....	(105)
5.1.1	工艺发展 .....	(105)
5.1.2	工艺特点 .....	(106)
5.2	SLM 成形工艺 .....	(107)
5.2.1	基本原理 .....	(107)
5.2.2	后处理 .....	(108)



5.3	SLM 成形系统	(108)
5.3.1	光学系统	(108)
5.3.2	铺粉系统	(111)
5.3.3	气体循环系统	(112)
5.4	SLM 成形材料	(113)
5.4.1	材料特性	(113)
5.4.2	常用的粉末材料	(115)
5.5	SLM 成形制造设备	(117)
5.6	SLM 成形影响因素	(119)
5.6.1	原理性误差	(119)
5.6.2	工艺性误差	(122)
5.6.3	后处理误差	(129)
5.7	SLM 的应用	(130)
5.7.1	航空航天	(130)
5.7.2	医学植入体	(131)
5.7.3	模具制造	(131)
5.7.4	汽车零部件制造	(132)
	思考与练习	(133)
<b>第6章</b>	<b>熔融沉积成形工艺及应用</b>	<b>(134)</b>
6.1	概述	(134)
6.1.1	工艺发展	(134)
6.1.2	工艺特点	(135)
6.2	FDM 成形工艺	(136)
6.2.1	基本原理	(136)
6.2.2	后处理	(137)
6.3	FDM 成形系统	(138)
6.3.1	运动机构	(138)
6.3.2	挤出机构	(139)
6.3.3	喷头	(140)
6.4	FDM 成形材料	(141)
6.4.1	成形材料	(141)
6.4.2	支撑材料	(144)
6.5	FDM 成形制造设备	(145)
6.6	FDM 成形影响因素	(147)
6.7	FDM 的应用	(151)
6.7.1	概念模型可视化	(151)
6.7.2	性能和功能测试	(152)
6.7.3	装配校验	(153)



6.7.4	制造原型零件 .....	(154)
6.7.5	快速模具的母模 .....	(155)
	思考与练习 .....	(156)
<b>第7章</b>	<b>三维印刷成形工艺及应用 .....</b>	<b>(157)</b>
7.1	概 述 .....	(157)
7.1.1	工艺发展 .....	(157)
7.1.2	工艺特点 .....	(158)
7.2	3DP 成形工艺 .....	(159)
7.2.1	基本原理 .....	(159)
7.2.2	后处理 .....	(159)
7.3	3DP 成形系统 .....	(160)
7.3.1	喷墨系统 .....	(161)
7.3.2	运动系统 .....	(164)
7.4	3DP 成形材料 .....	(164)
7.4.1	粉末材料 .....	(164)
7.4.2	黏合剂 .....	(165)
7.5	3DP 成形制造设备 .....	(166)
7.6	3DP 成形影响因素 .....	(168)
7.7	3DP 的应用 .....	(170)
7.7.1	概念模型可视化 .....	(170)
7.7.2	辅助铸造 .....	(170)
7.7.3	制造原型零件 .....	(172)
7.7.4	医疗领域应用 .....	(172)
	思考与练习 .....	(174)
<b>第8章</b>	<b>分层实体制造工艺及应用 .....</b>	<b>(175)</b>
8.1	概 述 .....	(175)
8.1.1	工艺发展 .....	(175)
8.1.2	工艺特点 .....	(176)
8.2	LOM 成形工艺 .....	(177)
8.2.1	基本原理 .....	(177)
8.2.2	后处理 .....	(178)
8.3	LOM 成形系统 .....	(180)
8.3.1	切割系统 .....	(181)
8.3.2	升降系统 .....	(184)
8.3.3	加热系统 .....	(185)
8.3.4	原料供应与回收系统 .....	(189)
8.4	LOM 成形材料 .....	(190)



8.4.1	薄片材料	(191)
8.4.2	热熔胶	(193)
8.4.3	涂布工艺	(194)
8.5	LOM 成形制造设备	(194)
8.6	LOM 成形影响因素	(196)
8.6.1	原理性误差	(196)
8.6.2	工艺性误差	(198)
8.7	LOM 的应用	(203)
	思考与练习	(206)
<b>第 9 章</b>	<b>其他成形工艺及应用</b>	<b>(207)</b>
9.1	形状沉积制造工艺及应用	(207)
9.1.1	概述	(207)
9.1.2	SDM 成形工艺	(208)
9.1.3	SDM 成形系统	(210)
9.1.4	SDM 成形材料	(211)
9.1.5	SDM 成形制造设备	(212)
9.1.6	SDM 成形影响因素	(213)
9.1.7	SDM 的应用	(214)
9.2	电子束熔化成形工艺及应用	(216)
9.2.1	概述	(216)
9.2.2	EBM 成形工艺	(217)
9.2.3	EBM 成形系统	(218)
9.2.4	EBM 成形材料	(220)
9.2.5	EBM 成形制造设备	(221)
9.2.6	EBM 成形影响因素	(222)
9.2.7	EBM 的应用	(223)
9.3	激光近净成形工艺及应用	(224)
9.3.1	概述	(224)
9.3.2	LENS 成形工艺	(225)
9.3.3	LENS 成形系统	(226)
9.3.4	LENS 成形材料	(228)
9.3.5	LENS 成形制造设备	(229)
9.3.6	LENS 成形影响因素	(230)
9.3.7	LENS 的应用	(231)
	思考与练习	(233)
<b>第 10 章</b>	<b>3D 打印综合实例</b>	<b>(234)</b>
10.1	SLA 综合实例	(234)



10.1.1	案例分析	(234)
10.1.2	成形设备	(235)
10.1.3	3D 打印	(236)
10.2	SLS 成形综合实例	(241)
10.2.1	案例分析	(241)
10.2.2	成形设备	(242)
10.2.3	3D 打印	(243)
10.3	SLM 成形综合实例	(247)
10.3.1	案例分析	(247)
10.3.2	随形冷却水路设计及模流分析	(248)
10.3.3	成形设备	(252)
10.3.4	3D 打印	(253)
10.4	FDM 成形综合实例	(259)
10.4.1	案例分析	(259)
10.4.2	三维建模	(259)
10.4.3	成形设备	(265)
10.4.4	模型切片与 FDM 打印	(265)
10.5	3DP 成形综合实例	(269)
10.5.1	案例分析	(269)
10.5.2	三维建模	(269)
10.5.3	成形设备	(273)
10.5.4	模型切片与 3DP 打印	(273)
	思考与练习	(278)
	参考文献	(279)

# 第 1 章

## 绪 论

制造业是国民经济的重要支柱，在新时期我国正经历着从制造大国向制造强国的转变。“中国制造 2025”提出了要“加快新一代信息技术与制造业深度融合”的目标，制造业的数字化、网络化和智能化成为“中国制造 2025”的决胜点和主攻方向。

制造技术从制造原理上可以分为三类：第一类技术为等材制造，在制造过程中，材料仅发生了形状的变化，其质量基本上没有发生变化；第二类技术为减材制造，在制造过程中，材料质量不断减少；第三类技术为增材制造，即 3D 打印技术，在制造过程中，材料质量不断增加。等材制造技术已经发展了几千年，减材制造技术发展了几百年，而增材制造技术仅有 40 年的发展史，这种新兴技术实现了制造技术从等材、减材向增材的重大转变，正以其化虚拟数据为实物的独特能力改变着制造业。

3D 打印 (3D Printing) 技术，是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种高新技术，是造型技术和制造技术的一次重大突破，它从成形原理上提出一个分层制造、逐层叠加成形的全新思维模式，即将计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM)、计算机数字控制 (Computer Numerical Control, CNC)、激光、精密伺服驱动和新材料等先进技术集于一体，依据计算机上构建的工件三维设计模型，对三维设计模型进行分层切片，得到各层截面的二维轮廓信息，3D 打印设备的成形头按照这些二维轮廓信息在控制系统的调度下，选择性地固化或切割各层的成形材料，形成指定的截面轮廓，并逐步有序地叠加形成三维工件。这种高自由度、个性化的制作方式解决了以往传统制造中工程设计的难题，能够轻松制造出具有空洞与复杂细节的高精度零件和产品。更高的制造自由度为工程师的创新提供了帮助，推进了整个制造业的转型与升级。

美国材料与试验协会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) F42 国际委员会将 3D 打印定义为：“Process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies.”即一种利用三维模型数据通过叠加材料获得实体的工艺，通常为逐层叠加，相对于传统的材料去除加工工艺，这是一种“自下而上”的材料累加的制造工艺。3D 打印技术自 20 世纪 80 年代末逐步发展起来，



期间也曾被称为“材料累加制造”(Material Increase Manufacturing)、“快速原型”(Rapid Prototyping)、“分层制造”(Layered Manufacturing)、“实体自由制造”(Solid Free-form Fabrication)和“增材制造”(Additive Manufacturing)等。名称各异的叫法也从不同角度反映了该制造技术的多样化特点。

从广义的原理来看,以设计数据为基础,将材料(液体、粉材、线材或块材等)自动化地累加起来成为实体结构的制造方法,都可视为增材制造技术。增材制造技术不需要传统的刀具、夹具及多道工序,根据三维设计数据在一台设备上即可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,从而实现“自由制造”,解决了复杂结构零件难以制造的难题,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期。增材制造技术的飞速发展,为世界带来了颠覆性的变革。

3D打印技术是增材制造的核心技术之一,发展3D打印技术是提高我国制造业自主创新能力和促进我国经济发展方式转变的关键之举。3D打印技术是一种基于材料堆积法的先进制造技术,综合了机电控制技术、数字建模技术、电子信息技术、材料化学技术等多个领域的先进技术,为复杂零件的成形提供了新的制造方法,为设计者拓宽了新的设计空间,是对传统制造技术体系的重要补充。3D打印技术具有灵活性,可以以较低的生产成本和较高的生产效率完成小批量、复杂、精细定制部件的生产,从而在生产上实现结构优化,达到节省零件加工材料、节约能源等目的。正因为如此,3D打印技术受到了国内外各界的关注,成为一个极具发展前景的朝阳产业。

## 1.1 3D打印发展历程与趋势

### 1.1.1 国外发展历程

3D打印技术的核心思想起源于19世纪末的美国。1892年到1988年是3D打印技术的起步期。从历史上看,首次提出层叠成形方法的是J. E. Blather,1982年,他在其美国专利(#473901)中,提出用分层制造的方法来构成三维地形图。该方法的具体内容是:将地形图的轮廓线压印在一系列的蜡片上,然后按照轮廓线切割各蜡片,并将切割后的蜡片依次有序地黏结在一起,熨平表面,从而得到对应的三维地形图。

1902年,Carlo Baese在他的美国专利(#774549)中提出了一种用光敏聚合物来制造塑料件的加工工艺,这是现代第一种3D打印技术的加工工艺——光固化成形(Stereo Lithography, SL)的最初设想。1982年,Charles W. Hull将光学技术应用于快速成形领域,并在UVP的资助下,完成了首个3D打印系统光固化成形系统的搭建。该系统于1986年获得专利,是3D打印技术发展史上的一个里程碑。同年,Charles成立了3D Systems公司,研发了著名的STL文件格式,STL格式逐渐成为CAD/CAM系统接口文件格式的工业标准。1988年,3D Systems公司推出了世界上第一台基于立体光刻技术的商用3D打印机SLA-250,SLA-250的面世标志着3D打印商业化的起步。

20世纪50年代后,世界上先后涌现出了几百种3D打印成形工艺及技术。包括但不限于以下几种:Michael Feygin于1984年发明了叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)技术,其成立的Helisys公司于1991年推出第一台LOM系统;Scott Crump于1988年发明了熔融沉积成形(Fused Deposition Modeling, FDM)技术,并于1989年成立了Stratasys公司,三年后该公司推出了首台基于FDM技术的3D工业级打印机;C. R. Dechard于1989年发明了选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术,DTM公司于1992年推出首台SLS打印机;美国麻省理工学院(MIT)的Emanuel Sachs于1993年发明了三维印刷(Three Dimensional Printing, 3DP)技术;Z Corporation于1995年开始开发了基于3DP技术的打印机。

除了新工艺的提出,3D打印新技术也得到了快速发展。如Objet公司于2000年更新了SLA技术,运用紫外线光感和液滴综合技术,大幅提高3D打印的制造精度;Z Corporation公司于2005年推出世界上首台高精度彩色3D打印机Spectrum Z510,完成了3D打印技术由单一色彩向多色彩的迈进;Objet公司(已与Stratasys公司合并)于2008年推出Objet 500 Connex3打印机,它是一台能够同时使用几种不同打印原料的3D打印机,如图1-1所示;2009年,澳大利亚Invetech公司和美国Organovo公司研制出全球首台商业化3D生物打印机,并打印出第一条血管;2009年,Bre Pettis带领团队创立了著名的桌面级3D打印机公司MakerBot,向用户出售DIY(Do It Yourself)套件,用户可自行组装3D打印机。这些技术创新使3D打印技术越来越贴近人们的生活,并对许多行业产生深远甚至颠覆性的影响。2012年4月,英国著名经济学杂志《经济学家》发表封面文章*The Third Industrial Revolution*,表示3D打印“将与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”。

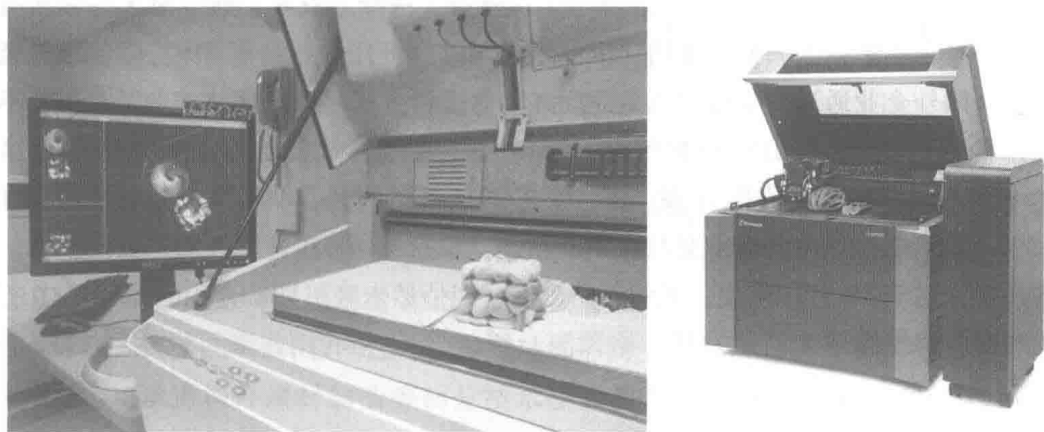


图 1-1 Objet 500 Connex3 打印机

2012年,美国《时代》周刊将3D打印产业列为“美国十大增长最快的工业”。据3D打印领域的年度权威报告*Wohlers Report 2020*的数据,2019年全球3D打印产业增长了21.2%,达118.67亿美元,其中金属3D打印尤其突出。根据报告显示,2019年销售约2 327台金属打印系统,而2018年销售量为2 297套,增幅1.35%,如图1-2所示。在2017—2019年,金属打印机的平均销售价格逐年增长,每年的售价分别为407 883美元/台、413 043美元/台、467 635美元/台。

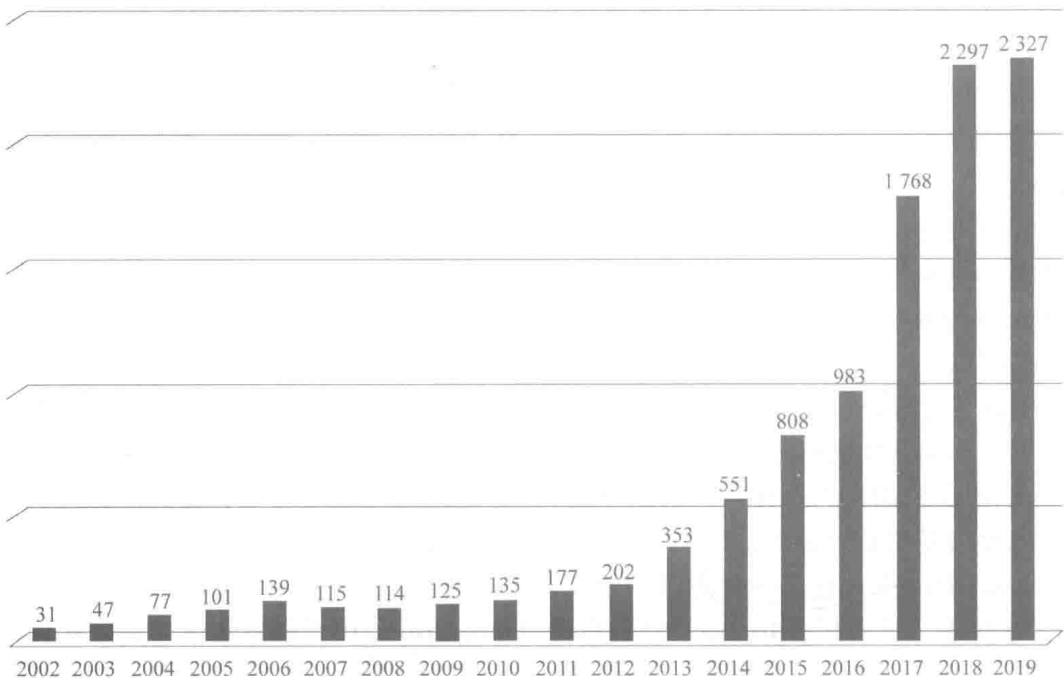


图 1-2 金属 3D 打印机销售趋势图

从国际市场来看，3D 打印成形市场本身已进入商业化阶段，出现了拥有多种成形工艺及相应的软件和设备的公司，如美国的 3D Systems、Stratasys 公司，德国的 EOS 公司，以色列的 Objet 公司，瑞典的 Arcam 公司，比利时的 Materialise 公司等。

由于 3D 打印技术蕴含着巨大商业价值，在建筑、医疗、汽车、航空航天等领域有着广泛应用，并且正不断融入人们的生活，因而众多国外企业纷纷投身到 3D 打印领域。经过多年的发展，国外企业通过自主研发或企业间并购等多种方式，不断优化产业链布局，不断将产业与技术高度集中，据公开资料统计，2019 年，非品牌设备的打印机销售占比达到了 41.45%，品牌设备的销售占比为 58.6%，而在 2018 年的时候，非品牌设备的销售占比还只有 22.3%。这表明产业内的企业总数在不断增加，也意味着 3D 打印技术正日渐成熟。在接下来的几年，对于 3D 打印来说，虽然前路漫漫，但依然未来可期。今后的几年，3D 打印设备销售和服务将继续迎来高速发展。据预测，到 2021 年年底销售额可以达到 179 亿美元，而在 2029 年将至少达到 1175 亿美元。

### 1.1.2 国内发展历程

我国 3D 打印技术的研究开始于 20 世纪 90 年代，研究工作主要在国内的高校展开。清华大学是最早从事 3D 打印技术研究的高校之一，1988 年，清华大学的颜永年教授在了解到快速成形技术后，多次与美国学者进行深入交流，并建立了清华大学激光快速成形中心。而后其与中国香港的殷发公司合作，创办了国内第一家 3D 打印公司——北京殷华快速成形模具技术有限公司，填补了国内在 3D 打印技术上的空白。颜永年教授所带领的研究团队主要

就3D打印方面的基础理论、成形工艺、成形材料等方面展开研究,该团队自主研发了基于熔融沉积工艺原理的快速成形系统和基于叠层实体工艺原理的快速成形系统,并成功制备了叠层实体工艺的工艺用纸。

西安交通大学卢秉恒教授在1992年赴美学习的过程中发现了快速成形技术在汽车制造业中的应用前景,随后于1994年成立先进制造技术研究所,组建研究团队,并于1997年研发售出了国内第一台光固化快速成形机。1998年,华中科技大学快速制造中心聘请史玉升教授专门负责选择性激光烧结技术和选择性激光熔化技术的研究,并针对性地对激光烧结设备及其合适的粉末材料进行研究,1999年,史玉升团队应用自主研究的相关理论与研究的相关设备打印出了计算机鼠标外壳。2001年,颜永年教授团队研制出了生物材料3D打印机,为制造科学又提出一个新的发展方向。此后,西北工业大学、华中科技大学等高校都将生物3D打印技术视为3D打印的重点研究方向。

3D打印正式进入我国后,得到了社会各界的关注和投入。1995年,3D打印技术被列为我国未来十年十大模具工业发展方向之一,国内的自然科学学科发展战略调研报告也将3D打印技术研究列为重点研究领域之一。2012年10月,由亚洲制造业协会联合华中科技大学、北京航空航天大学、清华大学等权威科研机构和3D行业领先企业共同发起的中国3D打印技术产业联盟正式宣告成立。2012年11月,中国宣布成为世界上唯一掌握大型结构关键件激光成形技术的国家。2013年,世界3D打印技术产业联盟宣告成立,总部基地落户南京。

2015年2月,由国家工信部、发改委和财政部联合发布了《国家增材制造(3D打印)产业发展推进计划(2015—2016年)》,计划中要求将培育和发展3D打印产业作为推进制造业转型升级的一项重要任务,这为我国3D打印行业的快速发展提供了政策支持。同年8月,在李克强总理参会的“国务院先进制造与3D打印专题讲座”中,主讲人卢秉恒院士强调了3D打印在我国制造业发展中发挥的重大作用,这加大了国家政府对3D打印新兴技术发展的重视。2017年11月,国家工信部、发改委、教育部、财政部等十二部委继续联合发布了《增材制造产业发展行动计划(2017—2020年)》,使3D打印产业发展上升到国家高度,3D打印产业已成为《中国制造2025》的发展重点。

时至今日,我国3D打印技术已与世界先进水平同步甚至超过了世界先进水平。在高性能复杂大型金属承力构件增材制造等部分技术领域我国已达到国际先进水平。2016年12月,中国科学家将3D打印血管植入恒河猴体内,实现了血管的再生,解决了临床人工血管内皮化的难题,该项成果属于全球首创,对干细胞技术临床应用具有里程碑意义。2017年7月,上海长征医院成功完成全球首例全颈椎3D打印人工椎体置换手术,患者被确诊为软骨肉瘤,第二节至第七节颈椎骨都被侵蚀,通过对比分析患者的颈椎,应用3D打印技术设计定制了一模一样的钛合金人工椎体,最终实现了假体与人骨的融合,如图1-3所示。2019年11月,中国建筑旗下中建二局广东建设基地完成了一栋7.2 m高的双层办公楼主体结构的3D打印工程,这标志着原位3D打印技术在建筑领域取得了突破性进展,这也是世界首例原位3D打印双层示范建筑,如图1-4所示。