

# 3D打印

## 打印未来

中国机械工程学会 编著



 中国科学技术出版社  
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

# 3D打印

## 打印未来

中国机械工程学会 编著



中国科学技术出版社  
· 北 京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

3D 打印 打印未来 / 中国机械工程学会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2013.6

ISBN 978-7-5046-6377-1

I. ① 3… II. ① 中… III. ① 立体印刷 - 印刷术 IV. ① TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 129225 号

---

策划编辑	吕建华 许 英
责任编辑	赵 晖 郭秋霞
责任校对	赵丽英
责任印制	王 沛
装帧设计	中文天地

---

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62173865
传 真	010-62179148
网 址	<a href="http://www.cspbooks.com.cn">http://www.cspbooks.com.cn</a>

---

开 本	787mm × 960mm 1/16
字 数	160千字
印 张	10.5
版 次	2013年6月第1版
印 次	2013年6月第1次印刷
印 刷	北京凯鑫彩色印刷有限公司

---

书 号	ISBN 978-7-5046-6377-1 / TS · 64
定 价	36.00元

---

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

# 编写组

## 组 长

张彦敏（中国机械工程学会）

## 成 员（按姓氏笔画排列）

王从军（华中科技大学）

王华明（北京航空航天大学）

史玉升（华中科技大学）

田小永（西安交通大学）

田利芳（中国机械工程学会）

刘惠荣（中国机械工程学会）

巩水利（中航工业北京航空制造  
工程研究所）

汤慧萍（西北有色金属研究院）

张 婷（清华大学）

张人佶（清华大学）

张述泉（北京航空航天大学）

李涤尘（西安交通大学）

杨广宇（西北有色金属研究院）

杨永强（华南理工大学）

陈超志（中国机械工程学会）

林 峰（清华大学）

林 鑫（西北工业大学）

梅 熠（中国机械工程学会）

黄卫东（西北工业大学）

锁红波（中航工业北京航空制造  
工程研究所）

魏青松（华中科技大学）

## 审 稿（按姓氏笔画排列）

丁培璠（中国机械工程学会）

王至尧（中国空间技术研究院）

李敏贤（机械科学研究总院）

雷源忠（国家自然科学基金委员会）

# 序 言

3D 打印 打印未来  
3D Printing Future

增材制造（3D 打印）技术改变了传统的去除材料加工的模式，通过逐层堆积材料直接制造产品，从而带来了制造工艺和生产模式的变革。增材制造技术作为信息技术与制造技术高度融合的产物，发展至今虽然只有二十几年，但是已经在航空航天、生物医学、国防军工、工程教育、新产品开发等领域得到应用。

增材制造作为一项新技术，尤其是不同于传统生产模式的新技术，理所当然地引起了业界高度重视，特别是将其与第三次工业革命联系起来，更成为近一个时期社会广泛关注的热点。

如何看待增材制造？我很欣赏哥本哈根未来研究学院（CIFS）名誉主任约翰·彼得·帕鲁坦的一句话：我们的社会通常会高估新技术的可能性，同时却又低估它们的长期发展潜力。

增材制造作为一项前瞻性、战略性技术，其工程应用性很强，领域跨度很大，对未来制造业，尤其是高端制造的发展十分重要。我们应该充分予以重视，既要解放思想，科学前

瞻，又要实事求是，脚踏实地。要在加强增材制造技术、工艺、装备及相关材料的研究开发基础上，一步一个脚印地推动其广泛应用与产业化。

本书由我国从事增材制造的专家、学者集体编著，旨在科学前瞻、冷静客观并尽量通俗易懂地向社会公众介绍增材制造技术，希望能够为推动我国增材制造技术发展与应用尽绵薄之力。

我们要走的路很长，必须从现在开始行动！



2013年6月



# 引言

3D 打印 打印未来  
3D Printing Future

# 3D打印与新工业革命

3D 打印也称为增材制造，它不需要刀具和模具，利用三维 CAD 模型在一台设备上可快速而精确地制造出复杂结构零件，从而实现“自由制造”，解决传统工艺难加工或无法加工的局限，并大大缩短了加工周期。而且越是复杂结构的产品，其制造的速度提升越显著。近 20 年来，增材制造技术取得了快速发展。增材制造的原理结合不同的材料和实现工艺，形成了多类型的增材制造技术及设备，目前已有的设备种类达到了 20 多种。增材制造技术在消费电子产品、汽车、航天航空、医疗、军工、地理信息及艺术设计等领域被大量应用。

随着工艺、材料和装备的日益成熟，增材制造技术的应用范围不断扩大，从制造设备向生活产品发展。“新兴 3D 打印技术”可以直接制造为人所用的功能零件和生活物品，可以制造电子产品绝缘外壳、金属结构件、高强度塑料零件、劳动工具、橡胶制件、汽车及航空用高温陶瓷部件及各类金属模具等，还可以制作食品、服装、首饰等日用产品。其中，高性能金属零件的直接制造是标志增材制造技术发展的重要标志之一。2002 年，德国成功研制了激光选区熔化增材制造装备（SLM），可成形接近全致密的精细金属零件和模具，其性能可达到同质锻件水平，同时电子束熔化（EBM）、激光近净成形等技术装备涌现出来。这些技术面向航天航空、武器装备、汽车 / 模具及生物医疗等高端制造领域，直接成形复杂和高性能金属零部件，解决一些传统制造工艺难以加工甚至是无法加工的制造难题。

美国《时代》周刊将增材制造列为“美国十大增长最快的工业”。工业革命的历史进程表明：技术进步是工业革命的源泉和驱动力，工业革命会引发整个社会的巨大变革。如同蒸汽机、福特汽车流水线引发的工业革命，3D 打印是“一项将要改变世界的技术”，已引起全球关注。英国《经济学人》杂志认为它将“与其他数字化生产模式一起，推动并实现第三次

工业革命”，认为该技术将改变未来生产与生活模式，实现社会化制造。每个人都可以用 3D 打印设备开办工厂，它将改变制造商品的方式，并改变世界的经济格局，进而改变人类的生活方式。美国奥巴马总统在 2012 年提出发展美国振兴制造业计划，启动首个项目就是“增材制造”。该项目由国防部牵头，制造企业、大专院校以及非营利组织参加，其任务是研发新的增材制造技术与产品，使美国成为全球最优秀的增材制造中心，成为“基础研究与产品研发”之间的纽带。美国政府已经将增材制造技术作为国家制造业发展的首要战略任务予以支持。

3D 打印象征着个性化制造模式的出现，人类将以新的方式合作进行生产制造；制造过程与管理模式将发生深刻变革，现有制造业分布格局必将被打破。当前，我国制造业已经将大批量、低成本制造的潜力发挥到极致，但未来制造业的竞争焦点将会由创新所主导，苹果公司的发展就体现出了这一发展趋势。3D 打印技术就是满足创新开发的有力工具，3D 打印技术的应用普及程度在一定程度上表征了一个国家的创新能力。随着人们对 3D 打印技术的认识程度不断深入，新的工业革命也伴随着创新悄然来临！



3D 打印

打印未来

# 目录

## CONTENTS

引 言	3D打印与新工业革命	
第一章	什么是3D打印	1
第二章	3D打印的由来	5
第三章	现在的3D打印	10
第四章	3D打印100例	31
第五章	3D打印的未来	150
后 记		157

# 01 第一章 什么是3D打印

3D 打印 打印未来  
3D Printing Future

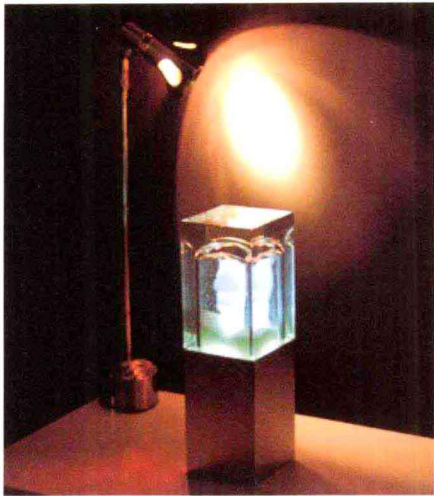
## 1.1 3D 打印的原理

3D 打印是增材制造技术的俗称。增材制造（Additive Manufacturing, AM）技术是依据三维 CAD 设计数据，采用离散材料（液体、粉末、丝、片、板、块等）逐层累加原理制造实体零件的技术。相对于传统的材料去除（如切削等）技术，增材制造是一种自下而上材料累加的制造工艺。自 20 世纪 80 年代开始增材制造技术逐步发展，期间也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）、3D 喷印（3D Printing）等。名称各异叫法分别从不同侧面表达了该制造工艺的技术特点。

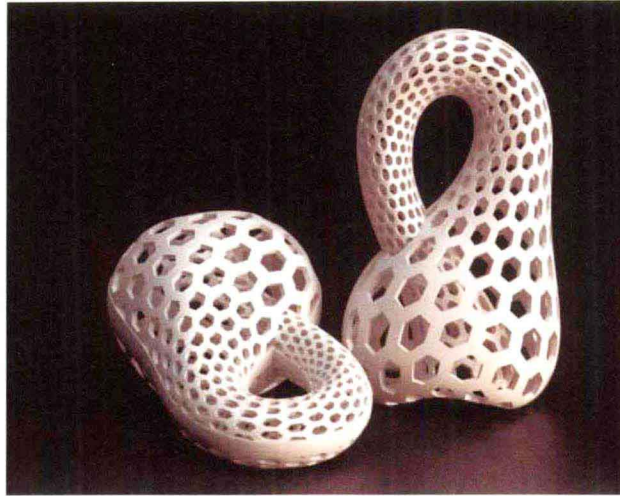
制造技术大致可分为三种方式。其一是材料去除方式，也称为减材制造，一般是指利用刀具或电化学方法，去除毛坯中不需要的材料，剩下的部分即是所需加工的零件或产品。其二是材料成形方式，也称为等材制造技术，铸造、锻压、冲压等均属于此种方法，主要是指利用模具控形，将液体或固体材料变为所需结构的零件



电影《满城尽带黄金甲》的人物形象模型  
(陕西恒通智能机器有限公司)



兽首灯（北京工业设计促进中心）



增材制造的复杂镂空艺术品

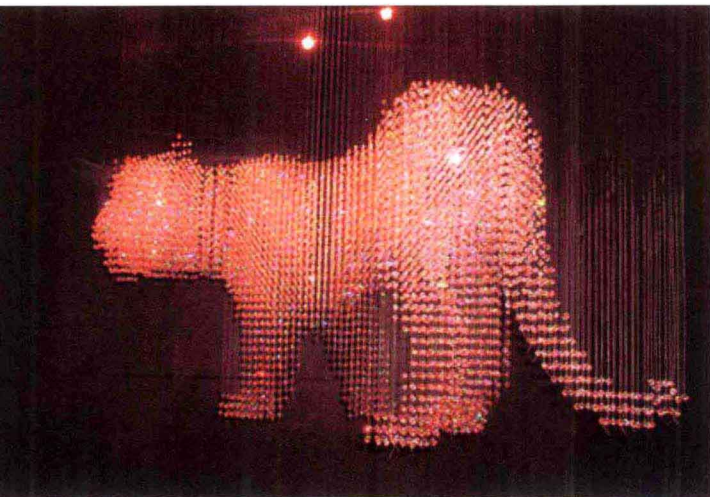
或产品。这两种方法是传统的制造方法，例如铸造技术从 3000 多年前的青铜器时代就开始使用。其三是近 20 年发展起来的 3D 打印技术，也称为增材制造，它是用材料逐层累积制造物体的方法。

美国材料与试验协会（ASTM）F42 国际委员会对增材制造和 3D 打印给予了明确的定义。增材制造是依据三维 CAD 数据将材料连接制作物体的过程，相对于减材制造，它通常是逐层累加过程。3D 打印也常用来表示增材制造技术。在特指设备时，3D 打印是指采用打印头、喷嘴或其他打印技术沉积材料来制造物体的技术，其设备的特点是价格相对低或功能较低。

从更广义的原理来看，以设计数据为基础，将材料（包括液体、粉材、线材或块材等）自动地累加起来成为现实体结构的制造方法，都可视为增材制造技术。

增材制造是数字化技术、新材料技术、光学技术等多学科发展的产物。其工作原理可以分为两个过程：其一是数据处理过程，利用三维计算机辅助设计（CAD）数据，将三维 CAD 图形分切成薄层，完成将三维数据分解为二维数据的过程；其二是制作过程，依据分层的二维数据，采用所选定的制造方法制作有与数据分层厚度相同的薄片，每层薄片按序叠加起来，就构成了三维实体，实现了从二维薄层到三维实体的制造过程。从原理上来看，数据从三维到二维是一个“微分”过程，依据二维数据制作二维薄片叠加成三维物体的过程是一个“积分”的过程。这一过程是将三维复杂





猛兽灯（北京工业设计促进中心）

结构降为二维结构，二维结构制作都可以实现，然后再由二维结构累加为三维结构。这一制造思想相对于传统的制造模式是一种变革，然而这一思想很早就有，只是在近 30 年数字化技术的不断发展下成

熟，进而物化为一个自动化装备。

采用这种原理，人们可以在制造过程中发挥想象力，创造各种各样的成形方法，这一过程也成为人们展示创造力的舞台。例如，采用光化学反应的原理，研制出来光固化成形方法，利用叠纸切割的物理方法，研制出叠层制造方法，利用喷胶粘接的方法研制出三维喷射成形方法，利用金属熔焊的原理研制出金属熔覆成形方法等。这些现象表明，制造技术已经从传统的制造技术向多学科融合发展，物理、化学、生物、材料等新科学技术的发展给制造技术的提升带来了新的生命力。由此给制造技术带来了巨大的变革，更为重要的是这一工业装备逐步走向生活，使得创造更加容易，变过去繁重和枯燥的劳动为人们创造和创新生活的乐趣。

## 1.2 3D 打印的优势

### （1）适合复杂结构的快速制造

与传统机加工和模具成形等制造工艺相比，增材制造技术将三维实体加工变为若干二维平面加工，大大降低了制造的复杂度。就原理而言，只要在计算机上设计出结构模型，都可以应用该技术在无需刀具、模具及复杂工艺条件下快速地将设计变为现实。制造过程几乎与零件的结构复杂性无关，可实现“自由制造”，这是传统加工无法比拟的。利用增材制造技术可制造出传统方法难加工（如自由曲面叶片、复杂内流道等）、甚

至是无法加工（如内部镂空结构等）的复杂结构，在航空航天、汽车/模具及生物医疗等领域具有广阔的应用前景。

### （2）适合个性化定制

与传统大规模、批量生产需要做大量的工艺技术准备以及大量的工装、复杂而昂贵的设备和刀具等制造资源相比，增材制造在快速生产和灵活性方面极具优势，适合于珠宝、人体器官、文化创意等个性化定制生产、小批量生产以及产品定型之前的验证性制造，可大大降低个性化、定制生产和创新设计的加工成本。

### （3）适合于高附加值产品制造

增材制造技术的诞生只有 20 多年，相比传统制造技术是非常年轻和不成熟的。现有大多数增材制造工艺的加工速率较低（如单位时间内制造的体积或重量）、零件加工尺寸受限（最大约为 2 米）、材料种类有限，主要应用于成形单件、小批量和常规尺寸制造，在大规模生产、大尺寸和微纳尺度制造等方面不具备优势。因此，增材制造技术主要应用于航空航天、生物医疗以及珠宝等高附加值产品，且主要用于大规模生产前的研发与设计验证以及个性化制造。

## 1.3 增材制造技术目前面临的局限

增材制造技术是一项以三维 CAD 模型为加工数据的数字化制造技术。从国内外的研究和应用情况看，增材制造较传统机加工、铸、锻、焊以及模具工艺的技术成熟度低，离大范围应用尚有一定差距。应用的主要局限性在于材料适用范围比较少、制件的精度比较低、后处理比较繁琐等问题。应该说，增材制造是难以替代传统制造工艺，它是传统技术的一个发展和补充。增材制造技术的应用还有许多问题，这些问题会随着研究和工程应用的深入而不断解决。例如，目前我国已经可以用激光 3D 打印技术制造长为 2 米的钛合金金属零件。该技术在飞机研制方面起到了关键作用。



## 第二章

3D 打印 打印未来  
3D Printing Future

# 3D打印的由来

## 2.1 3D 打印的起源

增材制造技术的核心思想最早起源于美国。早在 1892 年，美国一项专利中提出利用分层制造法构成立体地形图。随着计算机技术、激光技术和新材料技术的发展，1987、1988、1989、1992、1993 年，美国分别发明了光固化（SL）、分层实体制造（LOM）、激光选区烧结（SLS）、熔融沉积制造（FDM）以及三维打印（3DP）五种经典增材制造工艺。从 3D 打印的发展过程来看，中小企业和高等学校的多学科交叉资源在创新中起到了很大的作用。

## 2.2 国外飞速发展

1987 年，美国的 3D Systems 公司生产出了第一台基于光固化工艺的增材制造装备 SLA250，开创了增材制造技术发展的新纪元。该技术是利用激光照射紫外光敏液体聚合物，使其薄层发生固化。这是世界上最先可实际应用于商业生产的 3D 打印设备。自从 3D Systems 公司将



高层建筑高精模型





现代艺术品

Cubital 公司和 Helisys 公司都已经不再经营。由此可见市场竞争中，技术和公司的竞争是非常激烈的。

美国 DTM 公司（现在是 3D Systems 公司的一部分）的选择性激光烧结（SLS）技术在 1992 年投入使用。SLS 技术利用激光的热量来熔融粉末材料。1993 年，麻省理工学院（MIT）发明了直接型壳生产铸造（DSPC）技术投入生产。1996 年，美国 Z Corp 公司基于麻省理工学院的三维喷墨打印技术，研制出了用于概念模型建造的 3D 打印机 Z402 号，Z402 使用淀粉基和石膏基粉末材料和水基液体黏合剂来生产模型。2000 年 Z Corp 公司推出了其世界上第一个商用多色三维打印机——Z402C 机。2000 年是一个大量新技术亮相的年份，以色列的 Objet Geometries

立体光固化在美国商业化以后，日本的 CMET 和 SONY/D-MEC 公司分别在 1988 年和 1989 年将立体光固化技术以另外的形式商业化。1990 年，德国光电公司（EOS）卖出了他们的第一套立体光固化系统。1991 年，又有三项快速成形制造技术投入商业生产，它们分别是 Stratasys 公司的熔化沉积制造（FDM）技术、Cubital 公司的立体固化技术（SGC）和 Helisys 公司的叠层实体制造（LOM）。现在，

公司推出了一款名为 Quadra 的三维喷墨打印机，该款打印机利用 1536 个喷嘴和紫外线光源来喷涂硬化光敏聚合物。美国精密光学制造公司研制出了一种激光直接金属沉积（DMD）技术，该技术可以使用金属粉生产和修复金属零件。

2008 年大批量的新产品纷纷出笼，不但有新材料而且有新设备的出现。3D 打印机的价格随着新产品的问世也在不断地下滑。在牙医市场开始大量应用这一技术，直接金属烧结 / 熔融在生物医学和太空市场上一直被视为可行的和具有工艺生产能力的技术，大量的组织机构正在研究这一技术。Shapeways 公司于 2009 年推出了服务商店，它允许艺术家、设计师或其他任何人建立自己的“店面”并上传 3D 模型来向公众出售。这些产品是用增材制造系统制造直接由 Shapeways 公司向消费者出售。产品包括雕刻、珠宝、塑像和其他很大范围的消费者指向型产品。起始价格为几美元。2009 年 1 月，来自全世界的 70 人汇聚于宾夕法尼亚州费城附近的 ASTM（美国试验材料协会）国际总部，目的是建立有增材制造技术的 F42 委员会。该委员会是为了负责建立测试、处理、材料、设计（包括文件格式）和术语的规范。

2012 年的增材制造设备市场延续了近年的发展好形势，销售数目和收入的增加让销售商从中获益，进一步推动了美国股票价格的增长。2012 年，增材制造技术通过主要出版物、电视节目，甚至电影的方式涌入公众的视野。2012 年 4 月，在 Materialise 公司（比利时）的世界大会上，举办了一场时装秀，展出了快速成型制造的帽子和饰品，使得增材制造技术更加贴近百姓生活。据调查，价格低于 2000 美元的设备多用于科学研究或个人，对行业产值影响不大。行业发展主要依赖于专业化设备性能的提高。目前，专业化设备主要销往美国市场。在增材制造企业中正在进行公司间的合并，兼并的对象主要是设备供应商、服务供应商以及其他的相关公司。其中最引人注目的是 Z Corp 公司被 3D System 公司以 1.52 亿美元收购；3D Systems 公司还购买了 CAD 软件公司 Alibre 公司，以实现计算机辅助设计（CAD）和 3D 打印的捆绑；3D system 公司收购

了 Huntsman 公司的光敏聚合物及数字快速成型机相关的资产，这些兼并活动使得美国 3D 公司在增材制造产业中遥遥领先。

2011 年 7 月，美国试验材料学会（ASTM）的增材制造技术国际委员会 F42 发布了一种专门的快速成型制造文件（AMF）格式，新格式包含了材质、功能梯度材料、颜色、曲边三角形及其他过去增材制造数据（STL）文件格式不支持的信息。2011 年 10 月，美国试验材料学会国际（ASTM）与国际标准化组织（ISO）宣布，ASTM 国际委员会 F42 与 ISO 技术委员会 261 将在增材制造领域进行合作，制定共同认可的标准。

从增材制造的发展进程来看，新技术的发展体现出技术与市场的结合，新科技融合是启动创新的源泉，中小企业是创新活力的体现，企业兼并是产业快速发展的捷径，新技术的广泛应用是产业壮大的保证。目前，美国在装备研制、生产销售方面占全球的主导地位，其发展水平及趋势基本上引领了世界增材制造技术的发展。其次是德国和日本，他们在设备研发和工程应用方面居于前列。

## 2.3 我国奋起直追

我国增材制造技术自 20 世纪 90 年代初开始发展，西安交通大学、清华大学、华中科技大学、北京隆源公司等单位开始进行增材制造设备、工艺、材料、应用方面的研发，在典型成形设备、软件和材料的研究和产业化方面获得了重大进展，接近国外先进水平。20 世纪 90 年代中后期，北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学、华南理工大学、上海交通大学、大连理工大学、中北大学、中国工程物理研究院、西北有色金属研究院等一批高校和研究机构也相继开展了相关研究和应用工作。北京航空航天大学、西北工业大学、华南理工大学等单位重点研究金属直接成形技术。增材制造的高性能金属零件已应用于我国新型飞机的研制，并取得了显著成效。国内高校和企业通过科研开发和设备产业化改变了该类