

# 3D打印

## 三维智能数字化创造

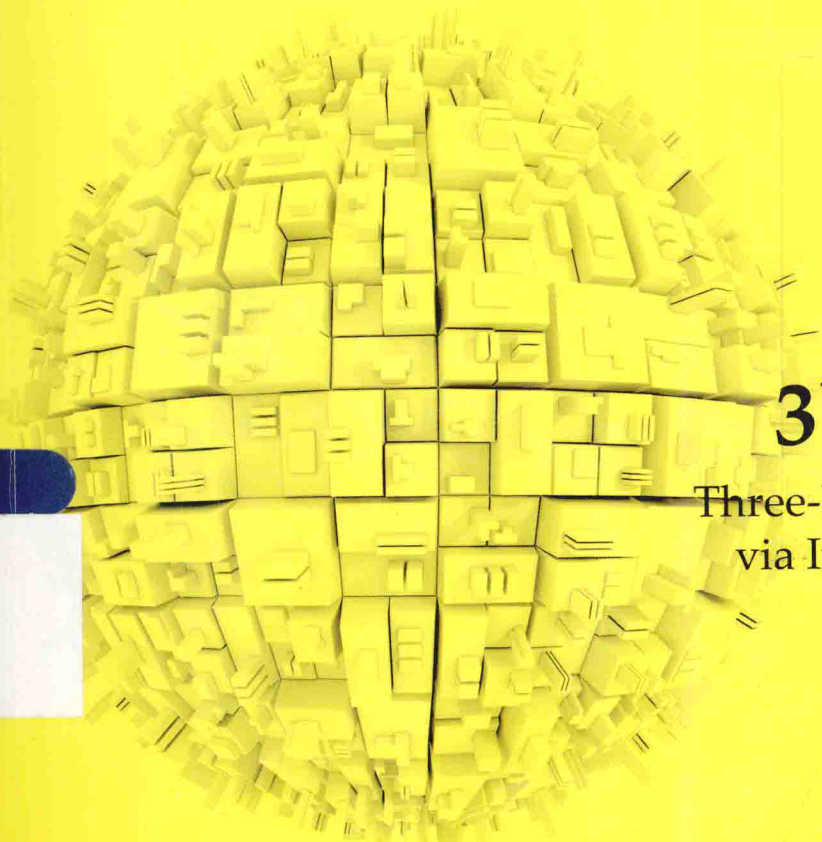
创客实践

中国智造

第三次工业革命

(第2版)

吴怀宇 / 著



# 3D Printing

Three-Dimensional Creation  
via Intelligent Digitization

# 3D打印

## 三维智能数字化创造

创客实践

中国智造

第三次工业革命

(第2版)

吴怀宇 / 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

《经济学人》等主流媒体称 3D 打印将引发“第三次工业革命”。本书从产业经济的宏观视角对 3D 打印、3D 智能数字化、创客、中国智造、全球第三次工业革命这五者的关系进行了详尽讨论。

本书从专业技术的角度对 3D 打印的原理、结构和工艺方法做了详细介绍,包括 10 多种典型成型工艺的优劣分析和比较,手把手、从无到有地组装一台 3D 打印机等。3D 智能数字化是 3D 打印的基础和关键,涉及 3D 计算机图形学、计算机视觉、模式识别、机器学习等领域。本书以通俗易懂、娓娓道来的方式对它们进行了详细讲解。

本书是一本以作者原创观点为指导,融汇众多最新思想,详细讲解 3D 打印和 3D 智能数字化技术原理方法,手把手实战型教学的综合类技术书籍,对每一个操作步骤都进行了图文并茂的详细描述,包括实际运作一家 3D 照相馆的所有技术细节。本书无论对于国内、国外的广大普通用户及技术爱好者,还是高等院校大学生及研究生、学术界、工业界、政府产业经济决策层,都具有重要的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

3D 打印:三维智能数字化创造 / 吴怀宇著. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2015.1  
ISBN 978-7-121-24641-8

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(2014)第 248386 号

责任编辑:付 睿

印 刷:中国电影出版社印刷厂

装 订:河北省三河市路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:27.5 字数:720 千字

版 次:2014 年 1 月第 1 版

2015 年 1 月第 2 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:3500 册 定价:105.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

## 推荐序一

今年（2013年）4月看过吴怀宇博士给《中国科学报》撰写的关于3D打印的技术评论专栏，感觉写得十分顺畅，现在很高兴得知他的《3D打印：三维智能数字化创造》一书也即将出版了，更是神速！

3D打印近年来在国内外受到广泛关注，网络、报刊、媒体上都有铺天盖地的密集报道。新闻报道虽然可以及时反映3D打印技术的最新进展，但呈现给普通读者的观感难免有些碎片化，不便于获得系统化的了解和认识，尤其是3D打印机几乎“无所不能”地被应用到各个领域，从航空航天、汽车、医疗，到时装、食品、武器等，给人一种眼花缭乱的感觉。《3D打印：三维智能数字化创造》出现得非常及时，是一本很值得读的书。该书不仅对3D打印的来龙去脉、原理结构、各种工艺方法做了系统的阐述，而且还对3D智能数字化的理论方法、应用技术以及最新进展也做了详尽的介绍。将这两个密切相关的新兴学科关联起来进行表述，使得读者能够从整体上把握3D数字化打印的脉络框架。此外难能可贵的是，吴怀宇博士非常耐心地以通俗易懂的文字解释书中出现的每一个术语和技术细节，辅以图文并茂的形式，使得本书将能够被广大普通读者所接受。

近些年来我也非常关注3D打印和社会制造方面的研究进展，并曾于2012年在《中国科学院院刊》上发表过一篇题为“从社会计算到社会制造：一场即将来临的产业革命”的文章。借怀宇的新著，我对3D打印和社会制造谈一点自己的体会和看法，抛砖引玉，同大家一起探讨。

具体说来，源自快速成型和快速制造，以3D打印技术为核心手段的加式制造（Additive Manufacturing），被许多人认为是一项将要改变世界的“破坏性”新技术，已引起全球性的关注。加式制造是相对于减式制造而言的，两者过去都不是严格意义下的制造专业术语。所谓减式制造，即通过模具、车铣等机械加工技术与工具将原材料转化成产品的工艺过程与设备的总称，其特征为利用缩削、减少材料来生产部件。而近十年来，随着快速成型、快速制造、3D打印等技术的成熟与普及，加式制造已成为日益风行的制造专业术语。与减式制造相反，加式制造的主要特征就是利用逐层增加材料的方式生产各种产品，无须模具，因此也被称为无形制造技术（Freeform Fabrication，简称FF或FFF）。

2012年3月，英国《经济学人》杂志以“第三次工业革命”为主题，声称3D打印技术即将引发新一轮的“工业革命”浪潮，并认为生产制造将从大型、复杂、昂贵的传统工业过程中分离出来，凡是能接上电源的任何计算机都能够成为灵巧的生产工厂；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，目前的制造格局必将被打破。

然而，正如蒸汽机促成第一次工业革命是通过引发人类理念的变革来达成的，3D打印机要催生新的产业革命，也必须通过诱发新的人类理念转化来实现。问题是：新的理念是什么？

我们认为，这一新的理念即便不直接是社会制造，也一定与社会制造直接相关。社会制造可使传统企业转变为能够主动感知并且响应用户大规模定制需求的智能企业，其核心就是主动、实时地将社会需求与社会制造能力有机地衔接起来，从而有效地实现需求和供应之间的相互转化。为此，我们必须把社会搜索、社会计算、社会制造等相关的新兴领域有机地结合起来，将互联网、物联网和物流网与3D打印机组成的社会制造网无缝地连接，通过众包等方式使社会民众充分参与产品各个环节的全生命制造过程，促成个性化、实时化、经济化的生产和消费模式，形成新的产业革命。

正如Google依靠大规模的计算机服务器阵列满足人们信息搜索的需求，从而改变人类生活与工作方式一样，我们可以设想未来的3D打印机也将组成大规模的社会制造阵列，实时方便地满足人类



对各种个性化产品的物质需求，使生活和产业中的“长尾效应”常态化，进而更加深刻地改变我们生活的社会。这就是为什么3D打印将改变我们的世界，这就是为什么社会制造将带来一场产业革命的真正原因。

中国作为今日世界制造业大国之地位正面临着严峻的挑战，西方媒体甚至直白地宣称：“天将变了”，“未来的制造业将再次回流到先进发达国家”，“美国制造，出口中国”的新时代即将来临！就连美国总统奥巴马也在2013年11月的国情咨演讲话里特别地强调3D打印技术，全美国上下要将其视为拯救美国制造业的希望之光。

参照信息行业的发展历程，我们认为，快速成型相当于20世纪60年代的专用和大型计算机，3D打印机则相当于20世纪70年代的个人PC和苹果台式计算机。令人担忧的是，我们在这一新兴领域目前所处的地位，差不多就是半个世纪前我国在世界信息行业所处的地位！

显然，我们必须尽快补上3D打印这一课，但我们切不可忘记信息行业在个人计算机出现之后浪潮般的发展进程：Microsoft的快速崛起，还有随之而来的Oracle、Yahoo、Amazon、eBay、Google、Facebook、Twitter，国内的百度、阿里巴巴、QQ和微博等。以目前的情况判断，3D打印的核心价值将完整体现于社会制造的发展与成熟的过程当中。社会制造对于制造行业而言，就是信息行业中从Microsoft至Amazon再到Google和Twitter的一体化合成，可视为虚拟网络世界与真实物理世界的首次完美结合。因此，在关于3D打印机之大量媒体渲染的背后，社会制造才应当是我们关注的要点，否则，我们可能错失良机，一误再误，代价将难以估量。

在社会制造的环境中，大批3D打印机形成制造网络，并与互联网、物联网和物流网无缝连接，形成复杂的社会制造网络系统，实时地满足人们的各种需求。消费者与企业通过网络世界能够随时随地参与到生产流程之中，社会需求与社会生产能力将实时有效地结合在一起，“想法到产品（Mind to Product）”，“需求就是搜索，搜索就是制造，制造就是消费”将成为现实。因此，社会制造必将极大地刺激社会需求，同时有效地提升整个社会的参与程度，其直接结果就是社会就业率的大幅度提高。而且，加速发展社会制造产业，不但能够解除我国长期在模具和材料工业落后受制于人的不利局面，还可以使我国蓬勃发展的社会媒体和网络文化得到进一步的升华，使其成为促进社会经济科学发展的有力工具：从被动到主动，从消极到积极。

另一方面，社会计算也将发挥关键性的作用，从专注社会舆情分析到满足社会经济需求，为社会制造的发展与成功提供有力保障。首先，社会计算为社会制造提供了主动及时地掌握社会需求的必要手段，从而能够在大数据时代环境下直接用数据考察研究各类问题。其次，社会制造涉及人的行为与需求，对许多问题由于时间、经济、法律和道德上的原因无法进行传统的实验，而社会计算则能够以计算实验的方式弥补这一缺陷。最后，社会计算的平行管理与控制为落实社会制造的运营和支持各种决策提供了一个有效的操作平台。

一言蔽之，社会制造的关键就是通过社会计算，主动、实时地将社会需求与社会制造能力有机地衔接起来，从而有效地实现需求和供应之间的相互转化过程。由于存在于社会媒体上的大数据具有动态性、多样性、虚实交互性、复杂性和不确定性等特点，如何计算获得有用的信息，并从中挖掘出一般规律是一个极具挑战性的问题。我们必须以物联网、云计算的手段，采用机器学习、数据挖掘、模式识别、人工智能等领域的理论、技术和方法，研发可计算的智能社会媒体数据信息处理机制。为此，必须把社会计算和社会制造这两个密切相关的新兴领域有机地结合起来，这将对于提高我国制造业的竞争力、加速产业升级和转型、扩大社会内需、繁荣国家经济，具有至关重要的战略意义。

2007年，在参加编写《中国至2050年先进制造科技发展路线图》的过程中，加式制造引起了我们的注意，但当时由于专家意见不一致，特别是人力、物力和时间的缺乏，只能将加式制造作为实验

室的一个跟踪课题予以关注。然而，3D 打印技术和社会制造的发展速度却大大超过我们的预期。很明显，社会制造是计算机和互联网引发的信息革命之后的又一场产业革命，而且是一场虚实结合的革命，其规模和速度都将是前所未有的，意义重大，并更具挑战性。这场革命对从业人员的素质与专业水平以及运营环境的要求都与我们现行的教育科研和产业管理体制有明显的冲突。如不认真应对，轻则可能发生西方国家所期望的制造业从中国等发展中国家向发达国家回流的现象，重则严重影响中华民族复兴的伟业。

希望像蒸汽机一样，3D 打印机能够通过社会制造的理念和实践，使人类社会再一次从以开发“地下”资源为主的“工业”社会，一步跃入以开发“地上”数据和智力资源为特征的“智业”社会，充分发挥人类共有的智力，使数据真正地成为驱动和支撑大数据时代社会发展的“石油”和“黄金”矿藏。

正如怀宇博士在书中提到的，3D 打印是个技术密集型的行业，需要依托包括信息技术、精密机械和材料科学等多个学科领域的共同发展，才能加速“中国制造”转型升级为“中国智造”的过程，并以此推动“全球第三次工业革命”。在此衷心期望各界人士能够齐心协力、携手并进，共同抓住这次伟大技术变革的历史机遇，一起实现我国科技的跨越式发展。

王飞跃 研究员

中国科学院自动化研究所

复杂系统管理与控制国家重点实验室 主任

IEEE Transactions on ITS 主编、中国自动化学会秘书长

## 推荐序二

3D 打印火了。

实际上，作为技术本身，3D 打印并不新。30 年前，3D 打印就已出现在大公司和科研院所的实验室里，业界称之为快速成型或增材制造。

成名似乎是在一夜间。2012 年，英国著名经济学杂志《经济学人》发表封面文章，声称 3D 打印将引发全球第三次工业革命。2013 年，“3D 打印”随即成为各大媒体的“宠儿”。

随着探讨的深入，亦有一些不同的声音：如果它真是一项突破性技术，为什么直到 30 年后的今天才开始引发第三次工业革命呢？

从一位公众的角度，我也是带着这个疑问，对全书进行了阅读，希望能从中找到一些答案或线索。

身为这一领域的专业人士，吴怀宇博士用文字还原了真实的 3D 打印及其未来愿景。所谓“第三次工业革命”，其实是“一盘很大的棋”，并不能仅靠一项技术来支撑，而是需要信息技术、先进制造技术、新能源技术、新材料技术、生物技术等众多领域共同发力。当 3D 打印以这些新兴技术为基础，经过 30 年的历练，形成了一个新兴的交叉学科和丰富的技术集群，其对社会产生的影响将足以引发一场综合性变革。

在作者看来，第三次工业革命是以“智能数字化制造及新型材料应用”为代表的崭新时代，其典型特征概括成一个词那就是“智能数字化”。智能数字化技术提高了设计制造工艺的精度和效率；随着数字化车间乃至数字化工厂的出现，生产系统将向着具有感知、决策、执行能力的智能化系统发展。

在这一过程中，制造业原有的发展模式将被改变。3D 打印、智能数字化、新材料以及机器人技术的发展，将使得制造业依靠较少的自然资源和人力资源投入，也能取得良好的经济效益。其中，3D 智能数字化利用计算机来智能地生成数字化的 3D 模型，使得低成本的大规模个性化定制成为可能。3D 智能数字化与 3D 打印技术的完美结合，让设计师和工程师从产品制造工艺的束缚中解放出来，更加专注于产品本身的智力创造，即所谓“想法到产品 (Mind to Product)”及“所想即所得”的全新智造时代。

对我而言，最感兴趣的是这本书从产业经济的宏观视角和技术方法的微观视角对 3D 打印、3D 智能数字化、创客、中国智造、全球第三次工业革命这五者的关系进行了翔实的讨论，并以此为逻辑主线将各章节贯穿在一起。

而谁又是 3D 打印直接的推手呢？本书给出了回答——创客 (Maker)。

这个名词在国内目前并不为大家所熟知，但实际上，创客运动在欧美已如火如荼。美国《连线》杂志前主编克里斯·安德森在《创客：新工业革命》一书中已做了详细介绍。创客指喜欢动手制作，努力把各种创意转变为现实产品的人。他们会使用 3D 打印机、数控机器、电子电路、激光切割机、3D 智能数字化技术等功能强大的数字桌面工具进行创造。创客，既是工具的发明者，也是工具的使用者。

2008 年，英国一名叫 Adrian Bowyer 的创客发布了第一款开源的桌面级 3D 打印机 RepRap，并把机械设计图纸、电路图纸、控制源代码等无偿放到了网上供人免费下载。这使得原本动辄几十万元的 3D 打印机降价到现在几千元即可买到，从此走入了普通用户家庭。如果没有创客，没有他们的开



源共享精神，现在的3D打印机还会这么便宜吗？为此，将创客运动称作第三次工业革命的启蒙运动非常贴切。

公众需要这样一本书，能够将看似高深的3D打印深入浅出，又不失专业性地展示出来。怀宇的这本新书语言易懂、图文并茂，根据读者群的不同诉求，划分出了五大派别：操作实战派、技术方法派、商业运作派、大局宏观派、学院理论派，从而增加了这本书的可读性和趣味性。

正如克里斯·安德森所说：“所有重要的科技都是在短时间内被过度炒热，其功能性也被高估；但从长期来看，它们造成的影响却远被低估。”或许不久，“上千元买台3D打印机”能被更多的人所接受；也或许，“根据自己的个性化需求打印”遍地开花尚需时日。

但毋庸置疑的是，第三次工业革命已“山雨欲来”，那么中国将在其中扮演一个什么角色呢？面对这一次历史新机遇，中国会依旧只是个追随者吗？这是这本书所引发的更重要的思考之所在。

黄明明

《中国科学报》技术经济周刊 主编



## 推荐序三

吴怀宇博士请我给他这本关于 3D 打印的书写个序，可能是因为我做了 25 年多的三维计算机视觉研究，而三维视觉和 3D 打印有紧密联系之故。刚好我对 3D 打印很有兴趣，苦于没有系统跟踪，就欣然答应。我利用圣诞和元旦假期，对本书原稿从头到尾读了一遍。吴博士用笔风趣幽默，对三维智能数字化创造充满激情，对 3D 打印看似庞大的生态系统提纲挈领，对深奥的理论和细节深入浅出，对这项新工业的经济技术发展的现状和趋势娓娓道来、引人入胜。他对 3D 打印、三维智能数字化、创客、中国智造、全球第三次工业革命之间的内在紧密关联有着深入的研究。我从读前言开始就被吸引，爱不释手，在此强烈推荐。你们不会失望的。

3D 打印早已从理论变为现实。3D 打印机近几年变得越来越便宜，1000 美元就能买到一台三维桌面打印机。微软推出的 Windows 8.1 操作系统也开始支持 3D 打印，其操作简单，能和打印文本一样轻松实现 3D 打印。另一方面，除了日常物品，在高端商业物品和部件制造领域，比如燃气轮机，3D 打印技术也都在发生日新月异的进展，而且很有可能在不远的将来为了医疗目的对人类器官进行生物打印。

尽管 3D 打印技术有了长足发展，但仍有很多需要改进和完善的地方，期待着我们去创新，去发现商机。我们可从 3 个层次考虑：打印技术、内容创造和生态系统。

- 打印技术：从设备角度来看，目前，3D 打印是一个添加式制造过程，而传统制造是一个削减式生产过程，能否将两者整合？在材料上，目前还基本停留在“黑白”，什么时候能打印出栩栩如生物件？从软件支持方面，能否在保质的基础上自动编辑打印内容以减少耗材？
- 内容创造：没有丰富的、吸引人的、有用的 3D 数字化产品，3D 打印不可能产生巨大的消费市场，也就不可能推动全球第三次工业革命。要想使产品设计大众化，离不开一个简单易用的三维数字化设计软件。能否用类似 Kinect 的传感器，开发一种自然用户界面（NUI），让用户像创作雕塑一样在数字空间里自然直观地设计产品？能否轻松地将现实世界的物体转换成数字模型？如何在现实物体上增加虚拟成分？这些都有赖于计算机图形学、计算机视觉、模式识别、机器学习等交叉学科的知识，而本书也通俗易懂地介绍了这些技术。
- 生态系统：一个新兴行业的生态系统需要精心呵护，既不能扼杀创客们的热情和创造性，也不能完全放任自由。随着越来越多的创新产品和个人信息数字化及商业行为云端化，如何保护知识产权？如何保护信息安全？如何保护隐私？……这里既需要政策的支持，也需要研究和创新，还有很多的商业机遇。

本书讲 3D 打印，不光对 3D 打印机的原理和结构有一个系统的描述，更强调三维智能数字化技术对推动全球第三次工业革命的核心作用。只要我们抓住机遇，转换思维，从传统制造的束缚中解放出来，学习、研究并牢牢掌握三维智能数字化的核心技术，发挥我们的想象力和创造力，在多学科的碰撞中产生灵感和火花，我们一定能超越“中国制造”的成就，创造出更大的“中国智造”的辉煌。

张正友

微软研究院首席研究员，研究经理  
国际电气电子工程师学会院士（IEEE Fellow）  
美国计算机协会院士（ACM Fellow）

## 推荐序四

---

3D printing is an emerging technology that has attracted much attention in recent years. The profound applications of this technology are likely to revolutionize many aspects of our life, ranging from rapid manufacturing, mass customization to health care devices. As discussed and demonstrated by the author, it is likely to make the third wave of industrial revolution.

The timely topics covered in this book provide an excellent introduction of topics related to 3D printing and the involved techniques. The author first gives a thorough review of the latest development of 3D printing and draw connections to the future of manufacturing in China. All the important techniques in 3D printing are then discussed and explained in the following chapters. In particular, the author uses 3D photography as an example to discuss its relevance to 3D printing. In addition, the author explains several computer vision algorithms on how to recover 3D model from images. The future of 3D printing is then discussed with numerous examples to motivate research problems for readers to ponder. For completeness, the author also discusses the underlying mathematics and algorithms related to 3D reconstruction.

In summary, this book provides an excellent introduction of the emerging and important topics of 3D printing. The discussed material not only covers topics of great interest to all readers but also algorithms for practitioners in computer vision. I highly recommend this book to readers interested in 3D printing or computer vision.

Ming-Hsuan Yang  
Associate Professor  
Electrical Engineering and Computer Science  
University of California at Merced, USA

杨明玄  
美国加州大学终身教授  
IEEE Transactions on PAMI、IJCV 副主编，ICCV/CVPR/AAAI 领域主席

## 推荐序五

3D Printing, proclaimed by some as a symbol for the third industrial revolution, has been a very hot topic in recent years. While there are literally over one thousand books about 3D printing that are currently available for sale on Amazon.com, what sets this book apart, I believe, is its comprehensiveness. It covers a broad range of topics from 3D printing principles, hardware, digitization/modeling, to practices. In particular, it emphasizes the software aspect of 3D printing, which is 3D digitalization and modeling. There is no 3D printer that can produce a 3D object without a digital 3D model. This software, i.e., modeling, aspect is somehow overlooked by many 3D printing literatures. I am very happy to see a book that gives a comprehensive and balance treatment of all aspects involved in the 3D printing pipeline.

This book is well suited for both beginners and intermediate practitioners. Beginners can learn the basic principles of 3D printing involving both hardware and software. For intermediate practitioners, who already know the basics, this book provides an under-the-hood view of 3D printing hardware and modeling software. In this regard, this book is particularly useful for innovators who want to develop the next kill-app for 3D printing. The various modeling tools and optimization algorithms introduced in this book are the building blocks for 3D printing applications, such as 3D photography, which is used as the driving example.

The author of this book, Dr. Wu, is an expert in 3D modeling and its applications to 3D printing. The writing style is easy to follow, with many examples and references to related literatures. It is a joy for me to read this book. I highly recommend this book for anyone who is interested in learning 3D printing and applications.

Ruigang Yang

Professor, University of Kentucky

3D 打印被称为是第三次工业革命的象征。它一直是近年来非常热门的话题。目前在 Amazon.com 有很多有关 3D 打印的书籍。本书的最大特点，我认为，是它的全面性。它涵盖了 3D 打印的全部过程，从打印原理、硬件、数字化造型，到以 3D 照相为例子的实践，特别的是它对三维数字化建模软件的强调。三维数字模型是任何 3D 打印的源泉，没有数字模型的 3D 打印只能是缘木求鱼。3D 打印硬件对建模软件的依赖性是被市面上很多 3D 打印书籍或多或少忽视的一个问题，我很高兴地看到本书对 3D 打印的整个流程给出了一个全面、平衡的阐述。

本书非常适合初学者和中级从业人员。初学者可以全面地学习 3D 打印的基本原理，其中包括硬件的和软件的。对于已了解基本知识的中级从业者，本书提供了对 3D 打印硬件和数字化建模软件的深入分析。在这方面，本书对开发应用程序的 3D 打印创新者特别有用。另外，本书对各种建模工具和优化算法进行了详细的介绍和分析，这些是开发新的 3D 打印应用的必备知识。

本书的作者，吴博士，是在三维数字化建模及其在 3D 打印上应用的专家。他的文风深入浅出、通俗易懂。书中有很多示例并详细列出了大量相关参考文献。我强烈地向任何有兴趣学习 3D 打印及其应用的人士推荐本书。

杨睿刚

美国肯塔基大学 终身教授



## 推荐序六

计算机发展到今天，其最成功的应用集中在信息的处理、储存和传递。这些应用极大地改变了人们的生活。然而，随着计算机功能的逐步增强和计算技术的进一步发展，越来越多的应用已经不局限于从信息到信息，而是将信息用于改变客观世界以及人与客观世界的交互。3D 打印就是这样的技术。这样的技术无疑将会对我们的生活产生更大的影响。

3D 打印一反传统的切削去除材料加工方法，采用增材制造技术，可以加工出任意复杂形状的物体。这项技术经过 30 年的发展，从材料的性能到加工的精度都有了很大的改进。另一方面，人工智能的研究经过几十年的波折，终于有了新的突破，给 3D 打印提供了强有力的软件支持。正是这两方面的发展汇聚在一起才使得人们相信一个全新的设计和制造方式正在形成，并将彻底地改变现有的工业结构。

要想看懂 3D 打印的过程并有效地解决实际问题需要掌握硬件和软件两方面的知识，而软件方面所涉及的范围则尤其广泛。吴怀宇博士的这本书的独到之处是综合了这两方面的知识并且用通俗易懂的语言解释出来。这正是当前大多数想要了解这个新兴领域的读者所需要的。作者抓住了“三维智能数字化”这个关键的要素，详细地介绍了基于当前最新研究成果所提供的工具。书中既有概念和算法的描述，又有编程和软件的指导，还有关于具体操作的问题解答。

三维智能数字化的核心目标是为客观世界的物体建立计算模型。这样的模型为 3D 打印提供了理想的工具。近年来这个处于计算机视觉、计算机图形学和模式识别交叉处的学科取得了令人兴奋的成果，也吸引了一大批有才华的研究人员。吴怀宇博士在这个领域做了广泛的工作并取得了出色的成绩。本书体现了他对这个学科的深入理解。

如果你想了解 3D 打印并自己动手制作模型，或者你想进一步学习 3D 算法和相关的数学方法，就请阅读本书吧！

Shu Chang (舒畅)

Senior Research Scientist (资深科学家)

National Research Council of Canada (加拿大国家研究委员会)

# 前 言

《诗经·小雅·鹤鸣》有云：“它山之石，可以攻玉”。本书取名《3D打印：三维智能数字化创造》，灵感源自于笔者发表在《光明日报》上的一篇3D打印综述文章的标题《3D打印：智能数字化》。其实笔者最初提交的是一个又长又绕口的题目，非常感谢《光明日报》的编辑以金刚钻般的犀利进行了打磨，使3D打印的本质顿时“彰明较著”，也让我那篇文章的条理和纹路立刻清晰了许多！所以本书也受此启发，起了一个相似的名字。

相信大多数读者在拿起这本书的时候，对3D打印或多或少已有耳闻。确实，自从《经济学人》、《福布斯》、《纽约时报》等欧美主流媒体声称3D打印将引发第三次工业革命开始，全世界各类媒体都对3D打印做了大量的跟踪报道。那么，为什么欧美这么看好3D打印？3D打印又为什么会引发一场新工业革命？3D打印不是30年前就有了吗？那时只是一种快速成型工具而已，难道一种“新瓶装旧酒”的工具就会引发一场全球范围内的工业变革？这场变革与我们中国的制造业会有关联吗？此外，媒体上经常报道国外“创客”通过3D打印机造出了创意新奇的作品，可当我们也深受鼓舞买回一台，却会发现3D打印远没有2D打印轻松，其中最头疼的事情莫过于要设计和处理所谓的3D数字化模型了。那么，3D数字化和3D打印到底是什么关系？我们又该如何轻松应对呢？

以上这些最基本的问题，实际上已经引出了多个主题，归纳一下：有**3D打印、3D智能数字化、创客、中国智造、全球第三次工业革命**这5个关键词，而且都互有关联。忽略掉其中任何一个，都无法完整地回答读者的上述诸多问题。这是摆在本书面前的一个艰巨的任务。倘若选择性忽略，只讨论其中的某一个或几个方面，则3D打印机与一般人眼中的2D打印机或一台普通机床又有什么差别呢？3D打印无须模具就可加工任意复杂的中空形状，用户也无须掌握各种复杂的制造工艺和加工技能，这样大幅降低了制造业的技术门槛。3D打印的巨大威力虽然源于技术，但其产生的重要影响力却又远超于此。

依我看来，欧美现在之所以看好3D打印，主要是希望将制造业回流到欧美，而不是继续转移到中国和印度。2007年爆发的全球金融危机，根源在于美国重视房地产、金融、消费等第三产业的发展而将大量的制造业外包给了其他国家，导致自身产业空心化问题日益严重。3D打印这种快速成型制造技术最近几年的突然火爆，有一个重要原因和转折点，那就是2008年**创客们**发布了第一款完全开源的个人**3D打印机 RepRap**，并把机械设计图纸、电路图纸、智能控制代码无偿放到了网上供人免费下载。几年下来，原本极其昂贵（几十万元起价）的3D打印机降到现在几千元即可买到，变得大众化，由此掀起了“个人智造”、“家庭智造”、“网络社区智造”的热潮。欧美正是希望借创客运动和“全民智造”的东风，激发国民的创造精神，上下齐心来实现这次战略大转移。2014年1月，3D打印的激光金属烧结技术也将因专利到期而开源，这将为3D打印的发展注入更大活力。

与此同时，我国政府也非常渴望将原本处于产业链低端的“中国制造”转型为“中国智造”，从加工组装环节升级到上游的设计研发环节。“中国智造”的核心在于智能化和数字化（简称“智

能数字化”），不仅要建立数字化工厂提高各种设计制造工艺的精度和效率，同时要使生产系统向着具有感知、决策、执行能力的智能化系统发展，以做大做强“高端制造”。“中国智造”在3D打印产业上的竞争力可以通过发展3D智能数字化来提升。实际上，“当今世界是平的”，在经济全球化的背景下，中国制造业的深度发展离不开全球市场化布局。因此，“中国制造”向“中国智造”转型升级历程，实际上也是共同推动和实现“全球第三次工业革命”的过程，并将在其中扮演越来越重要的角色。

具体来说，第三次工业革命是以智能数字化制造及新型材料应用为代表的崭新时代，具体特点可描述为：智能数字化、分布式网络化、个性定制化、绿色可持续化，典型特征为“智能数字化”。3D打印、智能数字化、新材料以及机器人技术的发展，将极大地改变制造业原有的投入模式，使得依靠较少的自然资源和人力资源投入，就能取得良好的经济效益，并将远离产品千篇一律的大规模制造模式，向更具个性化的定制规模发展。

以上就是全书的基本思路和逻辑线索。下面，具体介绍一下本书的主要内容。

本书首先从产业经济的宏观视角对3D打印的发展现状和未来进行了详尽的讨论。为了能使读者对3D打印、3D智能数字化、创客、中国智造、全球第三次工业革命之间的内在紧密关联有比较深入的理解，我们对这五者的相互作用和关系进行剖析。

3D打印将虚拟的智能数字化技术与实实在在的工业产品桥接在一起，跨越了虚拟的比特世界和实体的原子世界之间的鸿沟。为了让读者对3D打印有透彻的了解，我们从专业技术的角度对3D打印的原理结构、成型工艺和实际操作进行了详细介绍，包括对10多种典型的成型工艺进行优劣分析和比较，乃至手把手地、从无到有地组装一台3D打印机，以便让大家看得清清楚楚、明明白白。本书对每一个操作步骤都进行了图文并茂的详细描述，包括实际运作一家3D照相馆的所有技术细节。

3D智能数字化是3D打印的“孪生兄弟”，通过利用计算机来智能化地设计或获取一个3D数字化模型，以便输出到3D打印机。这是本书要讨论的重点所在：为了让用户“所想即所得”地进行数字化创造，计算机需要知道如何更好地生成形状，即能够智能地理解用户的意图。

我们可以使用智能数字化设计软件，从无到有地设计3D数字化产品。最普通的方法是采用传统的建模工具进行实体建模和曲面建模。而手工建模是一件比较烦琐、费时的工作，研究人员于是推出了参数化建模、直接建模工具来减轻设计负担。更加智能化的是编程式设计，计算机把形状的设计过程描述成一系列有特定顺序的操作步骤，有点像按照食谱而不是最终的外观来制作蛋糕。编程式智能设计可以轻易地在这个蛋糕上绘制几百万个规则的精美图案，而这对于手工设计来说犹如噩梦。

为了生成更加丰富多变的个性图案，还可采用复杂的生长式智能系统，即所谓的过程建模。智能化达到一定层次后，更可以让设计的形状根据未知环境实时调整，适应各种物理和美学约束条件。比如，基于算法的智能设计软件能够根据物理环境（如在月球上）调整建筑结构的空间形状，以此来动态获得一个最优的设计形状，从而使建筑结构更加稳定。

当然，并非人人都有能力自己设计3D形状，因此3D智能数字化的另外一种方法就是3D扫描（俗称3D照相），基于计算机视觉、计算机图形学、模式识别与智能系统、光机电一体化



控制等技术对现实存在的3D物体进行扫描采集，以获得逼真的数字化重建。在获得数字化模型之后，通常还需要进行个性化编辑定制。特别是对于“大批量定制”，如为一万名用户打印定制个性化的眼镜、服装、帽子、鞋子，则需应用智能化数字技术，如采用视觉计算方法，利用摄像头自动采集、分析提取每位用户的体貌个性特征，进行匹配和定位，并自动根据视觉美感进行形状设计、颜色肤色搭配等，可极大地缩减定制周期。

以开办一家3D照相馆为例，这是3D智能数字化的典型案例。首先需要对人体进行3D扫描或根据多视角照片进行立体重建，然后利用数字几何处理的方法对缺失和噪声数据进行修补，并拼接得到一个完整的3D模型。其中头发的快速修复就是一个值得研究的课题，涉及视觉计算技术。此外，用户很可能还希望对3D人体形状或表情进行美化、编辑、修改、迁移等，这涉及图形图像、模式识别、机器学习等多个领域。在输出打印前，还涉及形状的自平衡处理、形状分析以提高表现力、大尺寸形状自动分块、形状优化生成轻质结构以节省耗材、利用增强现实预览融入环境的效果等。

当3D数字化模型变得跟目前的MP3歌曲一样普及甚至泛滥时，又会遇到如何快速检索的难题。不像MP3那样可以通过歌名与歌手名这些结构化的文本信息来定位，3D模型的检索要复杂得多，涉及非结构化数据的特征提取、相似度度量以及分类算法的设计。更让人头疼的是，在这个大数据时代，我们将被信息的海洋淹没而变得迷失，以至于都不知道每天应该挑选哪些3D模型打印出来。这时，通过对大数据的挖掘，个性化推荐系统可以对你的个性偏好进行分析，把你可能会感兴趣的3D模型推荐给你。其中，深度学习这种模拟人类大脑进行智能分析学习的方法，将获得越来越广泛的应用。

通过智能感知设备，3D打印机还可控制制造的行为，对打印的过程进行实时监控，然后根据反馈信息随时做出调整。也就是说，这台3D打印机具有学习和控制的能力。将来，通过把人工智能从计算机拓展到现实世界，还可打印具备感知和学习能力的智能物品。此时，3D打印机就是新一代智能机器人，它们能设计、制造、修理、回收其他机器，甚至能够改进和升级机器自身，达到“机器制造机器”的新境界。

可以说，3D智能数字化技术是3D打印实现“规模定制”的基础和关键所在。因此，本书详细讨论了上面提到的各种3D智能数字化理论及其实现方法（如MVS、SVM、AAM、AdaBoost、粒子滤波、Mean Shift、Visual Hull、深度学习），涉及3D计算机图形学、计算机视觉、模式识别、机器学习。我们面向3D打印和3D数字化行业人士，将这些非常专业化的智能算法理论以通俗易懂的方式娓娓道来，这也是本书的一大特色。

“创客”不仅创造了个人3D打印机，同时也是第三次工业革命的启蒙者。这是任何一本3D打印书籍都绕不开的话题，因此，我们详细介绍了创客，并专门开设一章介绍四轴飞行器的DIY制作，以实例的方式讲解创客们喜爱做的东西，将3D打印、智能数字化技术这些先进的工具融入到创客实践当中。

综上，本书是一本以最新视角阐述新工业经济发展趋势、详细讲解3D打印与3D智能数字化技术原理方法、手把手实战型教学的综合类技术书籍，因此无论对于国内还是国外的广大3D打印爱好者、学术圈、工业界、政府产业经济决策层均具有重要的参考价值。

另外，本书提供丰富的网络资源下载，其中的内容包括：Ultimaker 原理图纸、3D 模型头发修复视频教程、四轴飞行器完整资料。如有需要，读者可在 [www.broadview.com.cn/22063](http://www.broadview.com.cn/22063)（博文视点官网）和 <http://www.sigvc.org/why/book/>（作者主页）下载。

凭一己之力是无法完成本书的，在此要衷心感谢多年来一直关心和支持我的师长、朋友、同事和学生。本书在写作过程中得到了汪凌峰博士、王颖博士、刘利刚教授、吴毅红研究员、邓小明副研究员、汪国平教授、唐俊副教授、王俊、王润元、张华、隋伟、赵松、沙金正、李成华、吴挺的帮助和支持。此外，参与编写工作的还有刘庆芳、刘孟起、吴炳根、丁根秀、文桂秀、魏淑芹、张云铎、王铭东、黄文论、王真龙、刘倩、达其双、陈鑫、滕音。感谢电子工业出版社各位老师的辛勤工作，最后特别感谢永远关爱着我的家人。

本书的编写工作得到了国家自然科学基金（No. 61272049）、北京市自然科学基金（No. 4132075）的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在纰漏，欢迎广大读者批评指正。在阅读过程中，如果发现问题，请发送 E-Mail 电子邮件告知，以便今后再版时加以修正。



吴怀宇

中国科学院

E-mail : [huaiyuwu@gmail.com](mailto:huaiyuwu@gmail.com)

主页网址 : <http://www.sigvc.org/people.htm#why>

于 北京中关村

# 目 录

第1章 3D打印与“全球第三次工业革命” .....	1
1.1 3D打印：体验造物奇迹 .....	1
1.2 全球第三次工业革命的导火索 .....	10
1.2.1 从“第一次工业革命”到“第三次工业革命” .....	10
1.2.2 3D打印的显著优势 .....	11
1.2.3 3D打印的应用现状 .....	13
1.3 对3D打印的质疑 .....	15
1.3.1 来自传统制造业大佬的质疑：不看好3D打印 .....	15
1.3.2 关于“3D打印技术的可实现性”释疑 .....	16
1.3.3 关于“3D打印技术的经济性”释疑 .....	17
1.3.4 关于“3D打印产业的成长性”释疑 .....	18
1.4 3D智能数字化与3D打印：用“虚拟”再造“现实” .....	20
1.4.1 3D智能数字化设计技术的发展现状 .....	20
1.4.2 智能数字化扫描技术的发展现状 .....	21
1.4.3 智能云网：云端智能服务和云制造 .....	22
1.4.4 3D打印技术的发展现状 .....	23
1.5 创客DIY：新工业革命的启蒙运动 .....	25
1.5.1 以小博大：创客挑战巨头公司 .....	26
1.5.2 聚沙成塔：改变工业社会的组成结构 .....	27
1.6 “中国制造”向“中国智造”转变的机遇 .....	28
1.6.1 “中国制造”需转型升级 .....	28
1.6.2 来自“德国制造”的启示 .....	29
1.6.3 “中国智造”的发展机遇 .....	30
第2章 3D打印机的原理与种类 .....	37
2.1 3D打印时间简史——源自1860 .....	37
2.2 3D打印机的工作原理和家族 .....	41
2.2.1 3D打印机的工作原理与流程 .....	41
2.2.2 FDM：熔融沉积成型（FFF：熔丝制造） .....	42
2.2.3 3DP：三维打印黏结成型（喷墨沉积） .....	44
2.2.4 SLS：选择性激光烧结 .....	45
2.2.5 SLA：光固化立体成型（立体光刻） .....	47
2.2.6 PolyJet：多头喷射技术（Material Jetting：材料喷射） .....	49
2.2.7 DLP：数字光处理 .....	50