



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

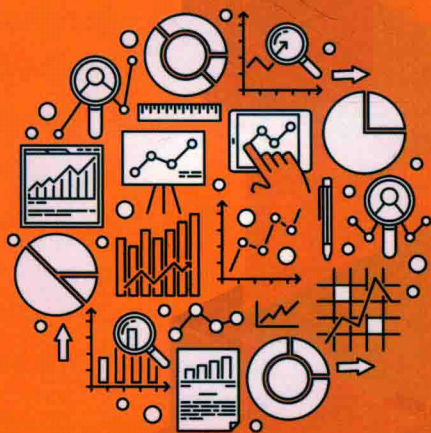
3D 打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

3D 打印数据格式

张李超 张楠◎著

3D DAYIN SHUJU GESHI



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

3D打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

3D打印数据格式

张李超 张楠◎著

3D DAYIN SHUJU GESHI



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

3D 打印技术是以数字模型为基础,将材料逐层堆积制造出实体的先进制造技术,体现了信息技术、材料技术与制造技术的交叉融合。随着当前多材料、多尺度结构一体化 3D 打印技术的发展,其涉及的信息处理不再局限于模型的几何信息,往往还要包括模型内部的材料组分信息、多尺度结构填充信息乃至与打印模型性能密切相关的 3D 打印工艺信息,从而在 3D 打印数据处理中可抽象出多层次、多维度的数据模型,并由此在 3D 打印数据处理中呈现出一个丰富的数据格式体系。

本书首先介绍了现代 3D 打印技术的发展脉络及其完整生命周期的数据处理模型,然后从 3D 实体、2D 切片、1D 加工路径三个层次分别介绍了相关的各种主流数据格式,其中既包括 3D 打印领域传统的、事实标准的 STL、SLC、CLI 及 GCode 等格式,也包括现代的 AMF、3MF 格式,并涉及与传统制造、图像及测量领域交互的 IGES、STEP、SAT、PLY、OBJ、VRML/X3D、FBX、DICOM、BMP、PNG、HPGL 等格式。

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印数据格式/张李超,张楠著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.3

(3D 打印前沿技术丛书)

ISBN 978-7-5680-4827-9

I. ①3… II. ①张… ②张… III. ①立体印刷-印刷术-数据格式 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 047237 号

3D 打印数据格式

张李超 张楠 著

3D Dayin Shuju Geshi

策划编辑:张少奇

责任编辑:刘飞

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:武汉市洪山区佳年华文印部

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:11.5

字数:226千字

版次:2019年3月第1版第1次印刷

定价:92.00元



华中师大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



3D 打印前沿技术丛书

顾问委员会

主任委员 卢秉恒(西安交通大学)
副主任委员 王华明(北京航空航天大学)
聂祚仁(北京工业大学)

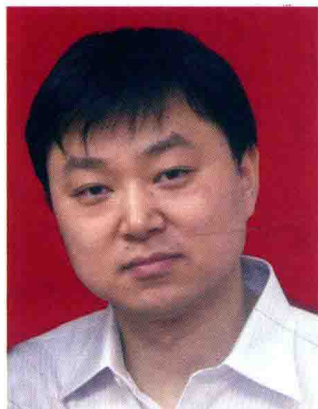
编审委员会

主任委员 史玉升(华中科技大学)
委 员 (按姓氏笔画排序)
朱 胜(中国人民解放军陆军装甲兵学院)
刘利刚(中国科学技术大学)
闫春泽(华中科技大学)
李涤尘(西安交通大学)
杨永强(华南理工大学)
杨继全(南京师范大学)
陈继民(北京工业大学)
林 峰(清华大学)
宗学文(西安科技大学)
单忠德(机械科学研究总院集团有限公司)
赵吉宾(中国科学院沈阳自动化研究所)
贺 永(浙江大学)
顾冬冬(南京航空航天大学)
黄卫东(西北工业大学)
韩品连(南方科技大学)
魏青松(华中科技大学)



About Author

作者简介



张李超 华中科技大学副教授,主要研究领域为 3D 打印及激光先进制造软件。主持国家“863 计划”项目 1 项、国家自然科学基金项目 1 项、04 重大专项子课题 1 项,主持省部级及横向科研项目 10 余项。获国家技术发明二等奖 1 项、省部级一等奖 5 项。获发明专利 10 余项,论文 SCI 检索近 20 篇。主持研发了华中科技大学 HRP、HK3D 系列工业级 3D 打印装备,以及多种高档数控折弯机、光纤激光切割机、大型伺服压力机和金属无模成形机的 CAM 软件及数控系统。



张楠 华中科技大学博士研究生,研究方向为 3D 打印基础算法与软件平台,研究兴趣为 CAD/CAM、DFAM(design for additive manufacturing)、CG(computational geometry)。主持校级创新项目 1 项,参与国家“863 计划”项目、国家重点研发计划项目及国家自然科学基金项目等的研发工作。获发明专利 3 项,撰写 SCI 论文 1 篇。



总序一

“中国制造 2025”提出通过三个十年的“三步走”战略,使中国制造综合实力进入世界强国前列。近三十年来,3D 打印(增材制造)技术是欧美日等高端工业产品开发、试制、定型的重要支撑技术,也是中国制造业创新、重点行业转型升级的重大共性需求技术。新的增材原理、新材料的研发、设备创新、标准建设、工程应用,必然引起各国“产学研投”界的高度关注。

3D 打印是一项集机械、计算机、数控、材料等多学科于一体的,新的数字化先进制造技术,应用该技术可以成形任意复杂结构。其制造材料涵盖了金属、非金属、陶瓷、复合材料和超材料等,并正在从 3D 打印向 4D、5D 打印方向发展,尺度上已实现 8 m 构件制造并向微纳制造发展,制造地点也由地表制造向星际、太空制造发展。这些进展促进了现代设计理念的变革,而智能技术的融入又会促成新的发展。3D 打印应用领域非常广泛,在航空、航天、航海、潜海、交通装备、生物医药、康复产业、文化创意、创新教育等领域都有非常诱人的前景。中国高度重视 3D 打印技术及其产业的发展,通过国家基金项目、攻关项目、研发计划项目支持 3D 打印技术的研发推广,经过二十多年培养了一批老中青结合、具有国际化视野的科研人才,国际合作广泛深入,国际交流硕果累累。作为“中国制造 2025”的发展重点,3D 打印在近几年取得了蓬勃发展,围绕重大需求形成了不同行业的示范应用。通过政策引导,在社会各界共同努力下,3D 打印关键技术不断突破,装备性能显著提升,应用领域日益拓展,技术生态和产业体系初步形成;涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业,形成了若干产业集聚区,整个产业呈现快速发展局面。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、



工艺装备、生物医疗、创新设计等领域。本套丛书不仅可以成为我国有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,也是我国科技人员展示研究成果的国际平台。

近年来,中国高校设立了 3D 打印专业,高校师生、设备制造与应用的相关工程技术人员、科研工作者对 3D 打印的热情与日俱增。由于 3D 打印技术仅有三十多年的发展历程,该技术还有待于进一步提高。希望这套丛书能成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,促进作者、读者在应用中凝练关键技术和科学问题,在解决问题的过程中,共同推动 3D 打印技术的发展。

我乐于为本套丛书作序,感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们对本套丛书长期的支持与关注。

西安交通大学教授

中国工程院院士

卢秉恒

2018 年 11 月



总序二

3D 打印是一种采用数字驱动方式将材料逐层堆积成形的先进制造技术。它将传统的多维制造降为二维制造,突破了传统制造方法的约束和限制,能将不同材料自由制造成空心结构、多孔结构、网格结构及梯度功能结构等,从根本上改变了设计思路,即将面向工艺制造的传统设计变为面向性能最优的设计。3D 打印突破了传统制造技术对零部件材料、形状、尺度、功能等的制约,几乎可制造任意复杂的结构,可覆盖全彩色、异质、梯度功能材料,可跨越宏观、介观、微观、原子等多尺度,可整体成形甚至取消装配。

3D 打印正在各行业中发挥作用,极大地拓展了产品的创意与创新空间,优化了产品的性能;大幅降低了产品的研发成本,缩短了研发周期,极大地增强了工艺实现能力。因此,3D 打印未来将对各行业产生深远的影响。为此,“中国制造 2025”、德国“工业 4.0”、美国“增材制造路线图”,以及“欧洲增材制造战略”等都视 3D 打印为未来制造业发展战略的核心。

基于上述背景,华中科技大学出版社希望由我组织全国相关单位撰写“3D 打印前沿技术丛书”。由于 3D 打印是一种集机械、计算机、数控和材料等于一体的新型先进制造技术,涉及学科众多,因此,为了确保丛书的质量和前沿性,特聘请卢秉恒、王华明、聂祚仁等院士作为顾问,聘请 3D 打印领域的著名专家作为编审委员会委员。

各单位相关专家经过近三年的辛勤努力,即将完成 20 余部 3D 打印相关学术著作的撰写工作,其中已有 2 部获得国家科学技术学术著作出版基金资助,多部将与爱思唯尔(Elsevier)联合出版英文版。

本丛书内容覆盖了 3D 打印的设计、软件、材料、工艺、装备及应用等全流程,集中反映了 3D 打印领域的最新研究和应用成果,可作为学校、科研院所、企业等



单位有关人员的参考书,也可作为研究生、本科生、高职高专生等的参考教材。

由于本丛书的撰写单位多、涉及学科广,是一个新尝试,因此疏漏和缺陷在所难免,殷切期望同行专家和读者批评与指正!

华中科技大学教授

2018 年 11 月

前言

3D 打印(3D printing)技术,又称为增材制造(additive manufacturing, AM)技术,是以数字模型为基础,将材料逐层堆积制造出实体的先进制造技术,体现了信息技术与先进材料技术、数字制造技术的交叉融合。相对于传统的减材制造(材料去除,如切削加工)技术,3D 打印是一种“自下而上”进行材料累加的制造方法。自 20 世纪 80 年代末诞生以来,3D 打印技术不断发展,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)等技术。名称各异的叫法分别从不同侧面表达了该制造技术的特点。但总的说来,3D 打印技术的核心是基于离散降维思想的材料累加制造,即将具备复杂形貌乃至多材料、多尺度结构特征的三维零件分解为一系列二维离散层面(可以为平面或者曲面)或者连续的一维加工路径,由此以一种统一的、简单的方式实现零件的逐点逐域成形,并且完全(针对平面分层)或很大程度上(针对曲面分层)规避了加工头与待完成零件间的干涉效应。相对传统的减材制造而言,增材制造极大地缓解了复杂零件的制造难度,且可实现全自动工艺编程。由于上述特征,一般认为未来的制造技术,如 4D 打印(增加时间维度,基于智能材料、具备刺激-响应特征的零件制造)和 5D 打印(基于活性材料、具备自生长特征的实体制造)也将以 3D 打印作为重要的实现方式。

基于离散降维的思想,3D 打印技术涉及的数据格式也可分解为 3D、2D、1D 三个层次。在传统 3D 打印突破了形状复杂性(几乎任意复杂形状的一体化制造)后,现代 3D 打印技术正在逐步突破材料复杂性(异质材料、梯度材料零件的一体化制造)、层次复杂性(跨越多个尺度,从微观结构到宏观结构的一体化制造)和功能复杂性(省略装配过程的复杂功能结构零件乃至系统的一体化制造),从而要求现代 3D 打印涉及的数据信息不再仅仅限于制造中的几何信息,还需要包括零件模型的结构信息、颜色信息、材料信息乃至具体加工过程中的工艺信息,由此呈现出一个多维度、多尺度的数据格式体系。其中包括了 3D 打印领域传统的、事实标准的 STL、SLC 文件,以及现代的 AMF、3MF 文件,并涉及与传统制造领域、测量领域交互的 IGES、DICOM 等文件。本书力图建立一个较为完整的,囊括现代 3D 打印技术整个生命周期的数据处理流程,对其中有影响力的文件数据格式逐一介绍,希望可以为从事 3D 打印软件领域研究的读者提供一本关于 3D 打印数据处理的参考性读物。



在本书的撰写过程中,张楠博士研究生为全书做了大量充分且细致的工作,对于具体的文件格式,胡汉伟、何森、杨非凡、陈骞等人参与撰写了 AMF、SLC、CLI 等内容,王燕宁、陈楠、胡祺、刘云飞参与撰写了 STL、HPGL 等内容,田俊杰、赵星、袁小军、陈锦锋等人参与撰写了 STEP、IGES 等内容,牛其华、李子建、盛伟等人参与撰写了 VRML、PLY 等内容。由于水平有限,书中难免有所缺陷,希望广大读者给予批评和指正。

作 者

2018 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 3D 打印概述	(1)
1.2 3D 打印工艺分类	(2)
1.3 3D 打印技术优势	(4)
1.4 3D 打印发展趋势	(4)
1.5 3D 打印的未来	(6)
第 2 章 3D 打印的数学模型	(7)
2.1 3D 打印的本质	(7)
2.2 实体建模方法	(8)
2.3 传统 3D 打印	(10)
2.4 现代 3D 打印	(13)
第 3 章 3D 打印中三维实体建模数据格式	(16)
3.1 STL 格式	(17)
3.2 AMF 格式	(31)
3.3 3MF 格式	(47)
3.4 IGES 格式	(59)
3.5 SAT 格式	(72)
3.6 STEP 格式	(76)
3.7 PLY 格式	(81)
3.8 OBJ 格式	(86)
3.9 VRML/X3D 格式	(98)
3.10 FBX 格式	(105)
3.11 DICOM 格式	(110)
3.12 PCD 格式	(118)

第 4 章 3D 打印中二维层面数据格式	(124)
4.1 SLC 格式	(124)
4.2 CLI 格式	(128)
4.3 ZIF 格式	(130)
4.4 BMP 格式	(134)
4.5 PNG 格式	(141)
4.6 HPGL 格式	(146)
第 5 章 3D 打印中加工层次数据格式	(149)
5.1 GCode 语言	(149)
5.2 ST 语言	(154)
参考文献	(165)

第 1 章 绪 论

1.1 3D 打印概述

3D 打印(3D printing)技术,又称为增材制造(additive manufacturing, AM)技术,是以数字模型为基础,将材料逐层堆积制造出实体的一种先进制造技术,体现了信息技术、先进材料技术与数字制造技术的交叉融合。相对于传统的减材制造(材料去除,如切削加工)技术,3D 打印是一种“自下而上”进行材料累加的制造方法。3D 打印技术自 20 世纪 80 年代末诞生以来不断发展,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)等技术。名称各异的叫法分别从不同侧面表达了该制造技术的特点。

3D 打印作为一个术语,有多个层次的含义。美国材料与试验协会(ASTM) F42 国际委员会对增材制造和 3D 打印两个词汇有明确的概念定义。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一种逐层累加的制造过程。狭义层次上的 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,在特指设备时,3D 打印通常指相对价格或总体功能低端的增材制造设备;广义层次上的 3D 打印也常用来表示增材制造技术,在本书中,取其广义含义。

3D 打印技术不需要传统的刀具、夹具及多道工序,利用三维设计数据在一台设备上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”,解决许多过去难以制造的复杂结构零件的成形问题,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期。而且对于结构越复杂的产品,采用 3D 打印技术制造的优势越显著。

近 30 年来,3D 打印技术取得了快速的发展,在各个领域都取得了广泛的应用,如在消费电子产品、汽车、航空航天、医疗、军工、地理信息、艺术设计等领域。3D 打印最显著的特点是特别适合单件或小批量的快速制造,这一技术特点决定了 3D 打印在产品创新中具有显著的作用。同时,美国惠普公司的多射流熔融(multi-jet fusion)与惠普金属喷射(HP metal jet)技术,美国 Carbon 3D 公司的连续液面生产(continuous liquid interface production)等新型 3D 打印技术则有望在

批量制造(万件甚至更高)中获得与传统注塑机及加工中心基本一致的生产效率,而加工的形状可以非常复杂,每一件产品都可以具备个性化的设计,有可能颠覆未来的制造业。美国《时代》周刊将 3D 打印列为“美国十大增长最快的工业”之一。英国《经济学人》杂志于 2012 年 4 月发表《第三次工业革命:制造业与创新》的专题报道,其中将 3D 打印技术与前两次工业革命技术(蒸汽机技术、电力技术)进行类比,并定义了以 3D 打印技术为代表的第三次工业革命。该报道认为该技术改变了未来的生产与生活模式,实现社会化制造,每个人都可以成为一个工厂,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。例如,日后的制造业,原材料的形式有可能是粉体或液体材料,每个家庭都可以成为一个工厂,企业可能只生产一些控制部件,外壳之类的部件完全可以自己打印。这一方面节约了成本,另外也能满足个性化的需求。设计师也有可能不再隶属于某个企业,而是成为一个“创客”,他们的设计可直接放在云计算平台上,顾客看到漂亮的设计图可以直接购买、下载、打印。

1.2 3D 打印工艺分类

自 20 世纪 80 年代美国出现第一台商用 3D 打印设备(光固化成形机)后,3D 打印技术在至今 30 多年时间内得到了快速发展,各种风格迥异的 3D 打印工艺层出不穷。但它们都是基于离散降维思想的材料累加制造,即将具备复杂形貌乃至多材料、多尺度结构特征的三维零件分解为一系列二维离散层面(可以为平面或者曲面)或者连续的一维加工路径,由此以一种统一的、简单的方式实现零件的逐点逐域成形。ASTM 在 3D 打印工艺层面将当前主流的 3D 打印技术分为以下七类:材料挤压(material extrusion)、光固化(vat photopolymerization)、粉末床融化(powder bed fusion)、黏合剂喷射(binder jetting)、材料喷射(material jetting)、层积(sheet lamination)、定向能量沉积(directed energy deposition)。

(1) 材料挤压工艺,所用的材料为塑料丝材或者泥浆(建筑打印领域)等,通过加热在挤出头以液态的形式挤出,逐层打印最终在成形台面形成 3D 实体制件,如图 1-1(a)所示。该工艺设备价格低廉,系统构造原理和操作简单,支撑去除简单,无须化学清洗,可用于桌面打印办公环境,且打印出来的制件结构性能较高。在市场上应用此工艺的典型技术有:FDM(fused deposition modeling)等。

(2) 光固化工艺,所用的材料主要是光敏树脂,利用光敏树脂在激光、紫外线或者投影的照射下发生固化反应,凝固成产品的形状,如图 1-1(b)所示。该工艺成形过程自动化程度高,成形制件具有较高的尺寸精度和表面质量。在市场上应用此工艺的典型技术有:SLA(stereo lithography apparatus),DLP(digital light processing)、FFF(fused filament fabrication)等。

(3) 粉末床融化工艺,所用的材料主要是塑料、金属粉末、陶瓷粉末、砂等,通

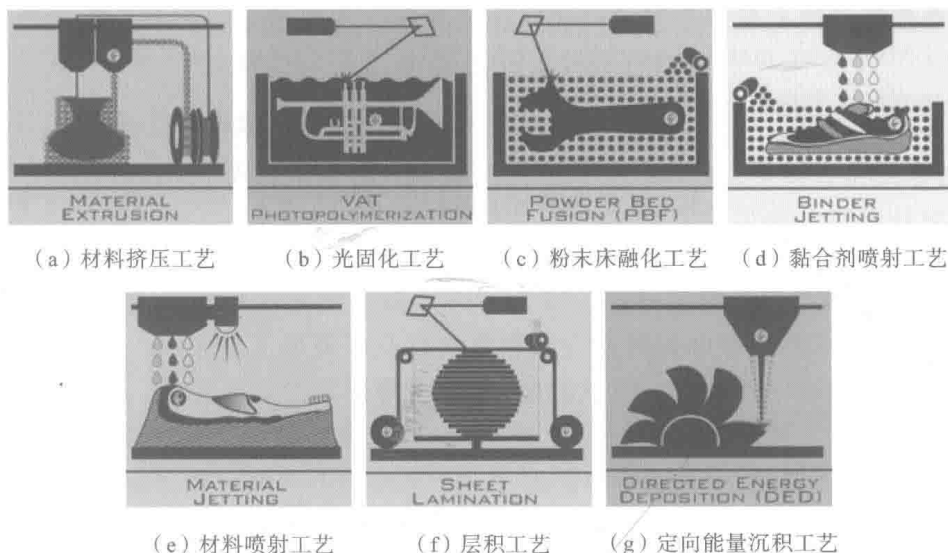


图 1-1 ASTM 划分的七种 3D 打印工艺

过每一层有选择性地融化粉末床材料,逐层打印最终成形制件实体,如图 1-1(c)所示。该工艺所用材料广泛,打印的过程不需要考虑支撑情况,制作工艺比较简单。在市场上应用此工艺的典型技术有:SLS(selective laser sintering)、SLM(selective laser melting)、EBM(electron beam melting)、MJF(multi-jet fusion)、DMLS(direct metal laser sintering)等。

(4) 黏合剂喷射工艺,所用的材料主要是塑料粉末、金属粉末、陶瓷粉末等,通过喷射黏合剂逐层挤入到材料粉末床上,最终成形制件实体,如图 1-1(d)所示。该工艺所用材料广泛且支持全彩打印,粉末在成形过程中起支撑作用,且成形结束后比较容易去除。在市场上应用此工艺的典型技术有:3DP(3D printing)等。

(5) 材料喷射工艺,所用的材料主要是树脂、蜡等,将材料一层一层地铺放,并通过化学树脂、热熔材料成形制件,如图 1-1(e)所示。该工艺可以打印出高质量、细节清晰的 3D 模型,可以成形全彩制件以及同时含有多种材料的制件。在市场上应用此工艺的典型技术有:PolyJet、SCP(smooth curvatures printing)、MJM(multi-jet model)等。

(6) 层积工艺,所用的材料主要是纸张、塑料以及金属铂等,将片状材料利用黏胶化学方法或者超声焊接、钎焊的方式压合在一起,多余的部分被层层切割,并在最终制件成形后剥离取出,如图 1-1(f)所示。该工艺打印成本较低。在市场上应用此工艺的典型技术有:LOM(laminated object manufacture)、SDL(selective deposition lamination)、UAM(ultrasonic additive manufacturing)等。

(7) 定向能量沉积工艺,所用的材料主要是金属粉末、金属丝材、陶瓷等,利用激光或者电子束将金属粉末或者金属丝材等材料在制件表面上熔融固化,如图 1-1(g)所示。此工艺容易实现大尺寸制件加工,且配合机械手加工自由度较高,可

以在同一种制件上采用多种材料进行加工处理。在市场上应用此工艺的典型技术有:LMD(laser metal deposition)、LENS(laser engineered net shaping)、DMD(direct metal deposition)等。

1.3 3D 打印技术优势

3D 打印技术将三维实体加工变为若干二维平面的堆积成形,规避了刀具干涉效应,因而不需要考虑传统的刀具和夹具以及多道加工工序,在一台设备上可快速精密地制造出任意复杂形状的制件,大大降低了制造复杂度,从而实现了零件“自由制造”。而且产品结构越复杂,其优势就越显著。基于逐点逐域成形原理,现代多材料 3D 打印技术可以实现在一个零件的不同部分选用不同的材料、微结构乃至调节微观组织结构,实现传统加工技术难以实现的材料-结构一体化加工。概括地说,3D 打印技术正在逐步突破以下四个方面的制造技术复杂性瓶颈。

- 形状复杂性:3D 打印几乎可以制造任意复杂程度的形状和结构。
- 材料复杂性:3D 打印既可以制造单一材料的产品,又能够实现异质材料乃至梯度功能材料零件的直接制造。
- 层次复杂性:3D 打印允许跨越多个尺度(从微观结构到零件级的宏观结构)的模型设计与整体制造。
- 功能复杂性:3D 打印可以在一次加工过程中完成功能和结构的一体化制造,从而简化甚至省略装配过程。

1.4 3D 打印发展趋势

纵观当前 3D 打印技术发展现状,3D 打印技术应用领域已经涵盖社会生产生活的方方面面。传统 3D 打印技术可以轻易突破形状复杂性,即克服传统制造技术在形状复杂性方面的技术瓶颈,快速制造出传统工艺难以加工甚至无法加工的复杂形状及结构特征。随着 3D 打印技术的不断发展,现代 3D 打印技术已经超越传统 3D 打印的单材均质加工技术的限制,向突破其余的三个复杂性发展。即在材料复杂性层面实现多材料、梯度功能材料、多色及真彩色表面纹理贴图零件的直接制造;在层次复杂性层面可实现跨越多个尺度(从微观结构到零件级的宏观结构)直接制造;在功能复杂性层面可以在一次加工过程中完成功能和结构的一体化制造,从而简化甚至省略装配过程。

3D 打印技术的发展趋势具体表现为以下几个方面。

1. 向日常消费品制造方向发展

3D 打印技术可直接将计算机中的三维图形输出为三维的彩色物体,在科学