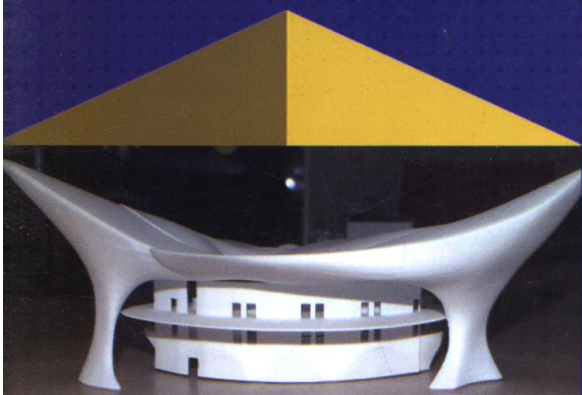




增材制造技术及 应用实例

王广春◎编著



3D打印技术在工业制造领域的应用实例

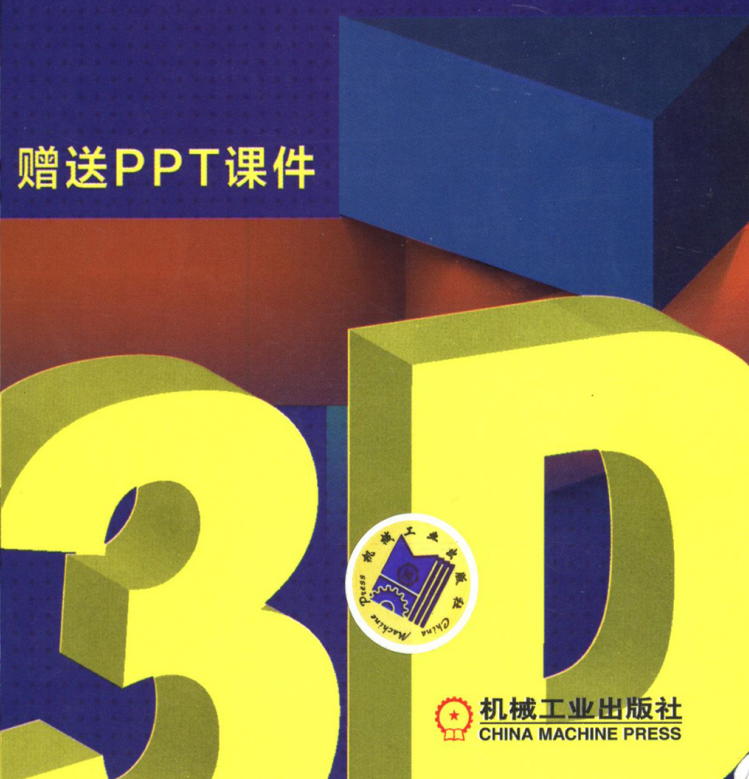
3D打印技术在医学领域的应用实例

3D打印技术在文艺创作领域的应用实例

3D打印技术在组织工程领域的应用实例



赠送PPT课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

增材制造技术及应用实例

王广春 编著



机械工业出版社

本书详细介绍了目前典型的增材制造工艺的基本原理、主要特点、工艺过程,包括箔材粘接工艺、光固化成型工艺、熔融沉积成型工艺、粉末激光烧结工艺、三维喷涂粘接成型工艺、三维打印成型工艺、金属粉末熔化成型工艺、金属粉末高能束流熔覆工艺、电弧喷涂成型工艺以及气相沉积成型、电铸成型等;当前各主要增材成型工艺相应的设备及所用材料;增材制造技术在工业制造、文化创意、医学及组织工程等领域的应用实例。为便于教师授课,可联系 296447532@qq.com 获取课件。

本书可作为高等院校机械类、材料加工类、临床与再生医学类本科生与研究生的教材和参考书,同时也可供相关工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

增材制造技术及应用实例/王广春编著. —北京:机械工业出版社, 2014.2
ISBN 978-7-111-45574-5

I. ①增… II. ①王… III. ①快速成型技术 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 016339 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍 高依楠

版式设计:常天培 责任校对:张薇

封面设计:马精明 责任印制:刘岚

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·349 千字

001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45574-5

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

策划编辑电话:(010) 88379733

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

Preface



为重振美国制造业，美国政府于 2012 年提出一系列方案，其中将增材制造列为十几项重要技术之一，优先进行支持和发展，并在同年 8 月成立国家增材制造创新研究院（NAMII），专门研发增材制造技术。增材制造正成为发达国家日益关注的战略性新兴产业核心技术。

增材制造，俗称 3D 打印，是指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，逐层加工的增材制造技术具有制造过程直接而无需工模具，不受结构复杂程度限制而为设计创新提供更自由的空间，材料利用率高，制造过程节能环保等诸多突出优势，满足了工业领域单件小批量制品、医学领域定制化的植入体、文化创意展示品、个性化日用品及其他众多领域物品制作日益发展的需求。

20 世纪 80 年代后期出现并迅速发展起来的快速成型或称自由成型技术，在新产品开发中具有显著效益，对制造业的贡献可与 20 世纪 60 年代出现的数控技术相媲美。目前的增材制造工艺方法中，仍以传统的快速成型诸多工艺方法为主。近年来，基于粉末材料的喷射成型与金属粉末高能束流熔覆成型工艺技术取得突破，促进了增材制造技术的发展，也进一步拓展了增材制造技术的应用范围，使传统的快速成型技术以制作模型和原型为主拓展到航空航天、汽车等领域的产品的直接制造，以增材制造技术为代表的新工业革命已初见端倪。

本书主要介绍了目前取得广泛应用的各种增材制造工艺的基本原理、主要特点、工艺过程，包括箔材粘接工艺、光固化成型工艺、熔融沉积成型工艺、粉末激光烧结工艺、三维喷涂粘接成型工艺、三维打印成型工艺、金属粉末熔化成型工艺、金属粉末激光近净成型工艺与电子束熔覆工艺、电弧喷涂成型工艺以及气相沉积成型、电铸成型等；当前各主要增材成型工艺相应的设备及所用材料；增材制造技术在工业制造、文化创意、医学及组织工程等领域的应用实例。

作者所在单位从 1997 年底开始开展增材成型与快速制造的研究与教学工作，先后购置了多种增材成型设备、反求设备及真空注型设备等。15 年来，开展了多方面的研究与广泛的对外服务工作，积累了许多研究成果和经验。作者在教授研究生与本科生有关增材制造技术的同时积累了较多的文献资料。

本书由山东大学王广春编著，在编写过程中，研究生倪菲参与了应用实例的整理。

增材制造技术涉及众多学科，限于作者水平，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

Cont 目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 增材制造技术的内涵	1
1.1.1 增材制造技术的工艺分类	1
1.1.2 增材制造技术的优点	3
1.2 增材制造技术的发展现状	3
1.2.1 增材制造技术国外发展现状	7
1.2.2 增材制造技术国内发展现状	8
1.3 增材制造技术的发展趋势	9
1.4 增材制造技术面临的挑战	11
第 2 章 增材制造工艺	14
2.1 箔材粘接工艺	14
2.1.1 箔材粘接工艺的原理和特点	14
2.1.2 纸材粘接工艺及其后处理技术	16
2.1.3 塑料薄膜粘接工艺	20
2.1.4 新型叠层实体成型工艺方法	22
2.2 光固化成型工艺	24
2.2.1 光固化成型工艺的基本原理和特点	25
2.2.2 光固化成型的工艺过程	27
2.2.3 微光固化成型技术	31
2.2.4 光掩膜法成型技术	37
2.3 熔融沉积成型工艺	39
2.3.1 熔融沉积成型工艺的原理和特点	39
2.3.2 熔融沉积成型工艺过程	41
2.3.3 气压式熔融沉积成型工艺	44
2.4 粉末激光烧结工艺	46
2.4.1 粉末激光烧结工艺的原理与特点	46
2.4.2 粉末激光烧结工艺过程	48
2.5 喷射成型工艺	52
2.5.1 三维喷涂粘接成型工艺	52
2.5.2 喷墨式三维打印成型工艺	55

2.6 金属粉末高能束流熔覆工艺	56
2.6.1 激光熔覆工艺	57
2.6.2 粉末选区激光熔化工艺	59
2.6.3 激光近净成型工艺	62
2.6.4 电子束成型工艺	65
2.7 其他增材制造工艺	68
2.7.1 电弧喷涂成型	68
2.7.2 气相沉积成型	72
2.7.3 堆焊成型	75
2.7.4 电铸成型	77
2.7.5 微粒悬浮喷射成型	80
第 3 章 增材制造材料	82
3.1 箔材	83
3.2 粉末材料	85
3.3 光固化材料	89
3.4 丝材	96
第 4 章 增材制造设备	101
4.1 箔材粘接成型设备	101
4.2 光固化成型设备	104
4.3 熔丝沉积成型设备	109
4.4 粉末激光烧结成型设备	113
4.5 喷射成型设备	117
4.6 金属粉末熔化成型设备	125
第 5 章 增材制造技术在工业制造领域的应用实例	133
5.1 汽车领域	134
5.2 航空航天领域	142
5.3 电子电器领域	149
5.4 其他领域	152
第 6 章 增材制造技术在医学领域的应用实例	155
6.1 医用模型	155
6.2 人工假体	158
6.3 种植体	162
6.4 颌面修复	164
6.5 颅骨修复	166
6.6 辅助治疗	168
6.7 其他应用	172

第 7 章 增材制造技术在文化创意领域的应用实例 174

7.1 玩具 174

7.2 文物 177

7.3 工艺品 180

7.4 建筑 184

7.5 文体娱乐用品 189

7.6 其他应用 192

第 8 章 增材制造技术在组织工程领域的应用实例 202

8.1 生物打印机 202

8.2 骨组织工程 203

8.3 皮肤 208

8.4 血管 210

8.5 内脏及其他组织 212

参考文献 216

第 1 章 绪论

1.1 增材制造技术的内涵

增材制造技术（Additive Manufacturing, AM），是相对于传统的车、铣、刨、磨机械加工等去除材料工艺，以及铸造、锻压、注塑等材料凝固和塑性变形成形工艺而提出的通过材料逐渐增加的方式而制造实体零件的一类工艺技术的总称。随着快速原型（成型）与制造（Rapid Prototyping & Manufacturing, RP&M）、自由成型制造（Free Form Fabrication, FFF）、快速模具（Rapid Tooling, RT）、3D 打印技术（Three Dimensional Printing, 3DP）等概念的出现及其工艺技术的发展，增材制造技术的内涵不断深入，其外延不断扩展。

20 世纪 50 年代以来，随着信息技术的发展，推动着传统制造技术的不断更新以及新兴制造技术的不断出现。60 年代出现的数控技术（NC）为制造业带来了变革，改变了传统制造业机械加工手工操作的方式。80 年代中后期出现并迅速发展起来的快速成型技术（RP）或称为自由成型技术（FFF），基于离散堆积原理以逐层添加的方式制造产品，无需工具和模具，变革了传统的材料去除加工及材料凝固成型与塑性变形等生产方式，使得产品的制造更为便捷，顺应了多品种、小批量、快改型的生产模式，满足了机械零件及产品等单件或小批量的快速、低成本制造的需求，同时，材料逐渐累积的制造方式具有高度的柔性，可实现复杂结构产品或模型的整体制造及复合材料、功能材料制品的一体化制造，满足文化创意等领域创新设计的实体展现及医学与生物工程领域的个性化制作等需求。以 3D 打印技术或快速原型与制造技术为主的增材制造技术，极大地促进了产品快速制造及其创新设计的进程，被预测为即将到来的第三次工业技术革命的引领者。

1.1.1 增材制造技术的工艺分类

狭义的增材制造技术是指当前出现的快速原型技术（或被称为 3D 打印技术），以及基于快速原型的快速模具与金属零件的快速制造技术等；广义的增材制造技术则以材料添加为基本特征，还包括焊接成型、沉积成型、喷涂成型等，如图 1-1 所示。

图 1-1 所示的增材制造技术是按工艺方法进行分类的。如果按照加工材料的类型分类，增材制造工艺又可以分为金属材料成型、无机非金属材料成型、高分子材料以及生物材料成型等；如果按照增材制造过程中的热源方式分类，可以分为激光束、电子束、等离子或离子束等高能束流建造方式以及光固化、喷涂粘接、熔融沉积等一般热源建造方式。高能束流快速制造主要面向金属材料的增材制造，在工业领域最为常见，尤其在航空航天工业领域用于对单件、大尺寸高性能合金的直接制造，是目前发

展最快的一个方向。

目前，应用较为广泛且带来显著经济和社会效益的增材制造工艺有：光固化成型工艺（Stereolithography Apparatus, SLA）、粉末激光烧结工艺（Selective Laser Sintering, SLS）、熔融沉积成型工艺（Fused Deposition Modeling, FDM）、激光熔覆成型工艺（Selective Laser Melting, SLM）、激光近成型（LENS, Laser Engineering Net Shaping, LENS）、电子束熔化（Electron Beam Melting, EBM）、三维喷涂粘接成型工艺（Three Dimensional Printing, 3DP 或 Three Dimensional Printing Gluing, 3DPG）、箔材粘接成型工艺（Laminated Object Manufacturing, LOM）、电弧喷涂成型工艺（Arc Spraying Process, ASP）、气相沉积成型工艺（Physical/Chemical Vapor Deposition, PVD/CVD）、堆焊成型（Overlay Welding, OW）或喷焊成型（Spray Welding, SW）等。各种增材制造工艺的本质特征都是基于离散的增长方式制造制品的，将上述各种增材制造工艺方法依据使用的材料及其构建技术进行分类，如图 1-2 所示。

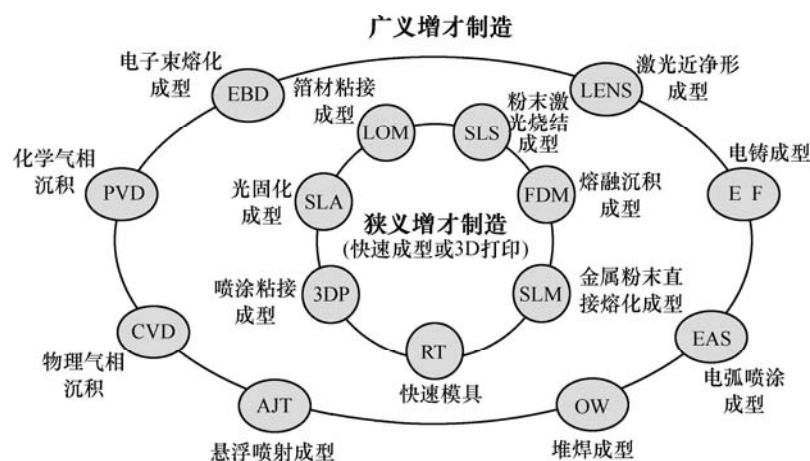


图 1-1 增材制造技术的内涵

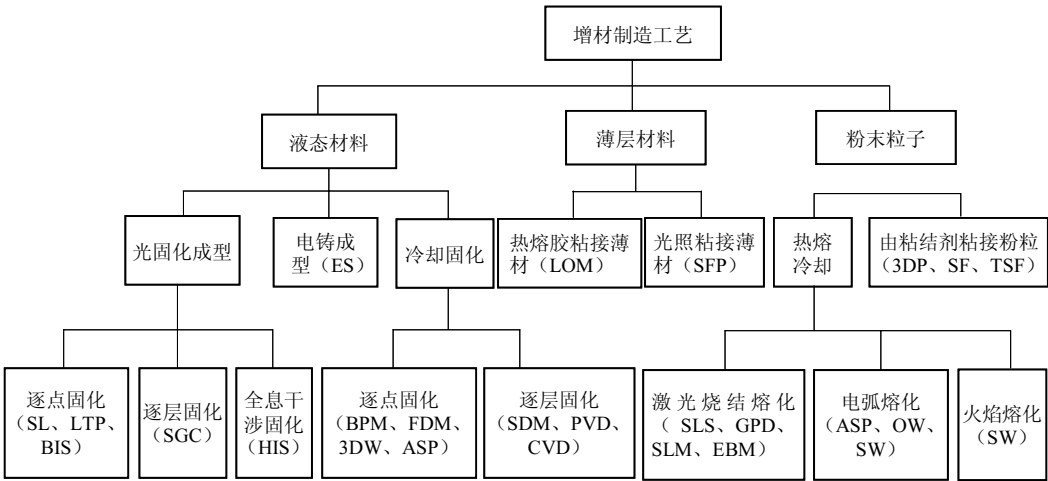


图 1-2 增材制造工艺分类

1.1.2 增材制造技术的优点

传统的零件加工工艺多为切削加工方法，是一种减材制造，相当于雕刻，材料利用率较低，有些大型零件其利用率不足 10%；材料成形工艺近似于等材制造，可显著提高材料的利用率和生产效率，但是需要特定的工装模具，对于复杂或大型零件，工艺流程长，装备吨位大；而增材制造技术是采用逐层累加方式制造零部件，材料利用率极高，流程短，其特点如下：

（1）自由成型制造 无需使用工具、模具而直接制作原型或制件，可大大缩短新产品的试制周期并节省工具、模具费用；同时成型不受形状复杂程度的限制，能够制作任意复杂形状与结构、不同材料复合的原型或制件。

（2）制造过程快速 从 CAD 数模到原型或制件，一般仅需要数小时或十几个小时，速度比传统成型加工方法快得多。随着个人 3D 打印机的发展及成本的逐渐降低，许多产品尤其是日用品，很多人可以在家里进行制造，省去了传统获取产品的从设计构思、零件制造、装配、配送、仓储、销售到最终客户手里的诸多复杂的环节。从产品构思到最终增材制造技术也更加便于远程制造服务，用户的需求可以得到最快的响应。

（3）添加式和数字化驱动成型方式 无论哪种增材制造工艺，其材料都是通过逐点、逐层以添加的方式累积成型的。这种通过材料添加来制造产品的加工方式是增材制造技术区别于传统机械加工方式的显著特征。

（4）突出的经济效益 在多品种、小批量、快改型的现代制造模式下，增材制造技术无需工具、模具而直接在数字模型驱动下采用特定材料堆积出来，可显著缩短产品的开发与试制周期，节省工具、模具成本的同时也带来了显著的时间效益。

（5）广泛的应用领域 除了制造原型外，该项技术特别适合于新产品的开发、单件及小批量零件制造、不规则或复杂形状零件制造、模具设计与制造、产品设计的外观评估和装配检验、快速反求与复制，也适合于难加工材料的制造等。这项技术不仅在制造业具有广泛的应用，而且在材料科学与工程、医学与生物工程、文化艺术以及建筑工程等领域也有广阔的应用前景。

1.2 增材制造技术的发展现状

相对于有近 150 年发展历史的传统去除式机械加工制造技术，增材制造技术仅是在近二十几年间取得了快速的发展。快速原型制造、自由成型制造、3D 打印成型、金属材料高能束流直接成型等，各异的叫法分别从不同侧面表达了该制造技术的特点。

增材制造技术出现以来便取得了快速发展，在消费电子产品、汽车、航天航空、医疗、军工、文化创意等多个领域都得到了广泛的应用。目前各类增材制造设备种类达到 20 多种。自 1988 年美国 3D Systems 公司推出第一台商品化光固化成型设备 SLA-250 以来，各种与增材制造工艺相对应的设备相继被开发出来，并相继商品化。

据美国从事增材制造技术的咨询服务协会（Wohlers Inc.）统计，1988 年至 1998 年的十年间，SLA、LOM、FDM、SLS、3DP 等各种增材制造设备的安装台数如图 1-3 所示。到 1998 年为止，全世界已拥有增材制造设备 4259 台，增材成型设备制造公司约 27 个，用增材成型设备进行对外服务的机构 331 个。该项技术出现以后，在制造业领域及医疗领域得到了迅速认可和广泛的应用。

据 Wohlers 公司 2002 年调查报告，该行业 2002 年的产值接近 7 亿美元，如图 1-4 所示。与 CNC 初期市场相比，增材成型技术的发展速度是相当惊人的，1988~1997 年度增材制造产值以 53.6%的年平均速度增长，而在 1970~1981 年度，CNC 市场的年平均增长率为 22%，所以有人比喻增材制造技术对制造业的冲击与贡献可以与 20 世纪 60 年代出现的数控（NC）技术相媲美。

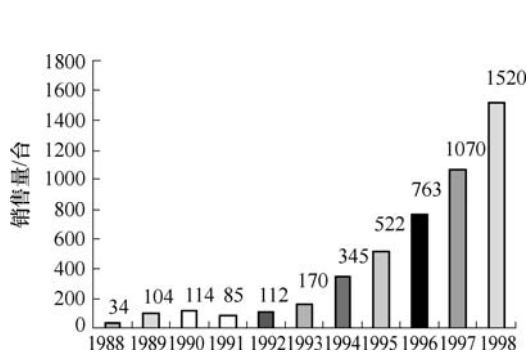


图 1-3 早期增材成型设备安装台数统计

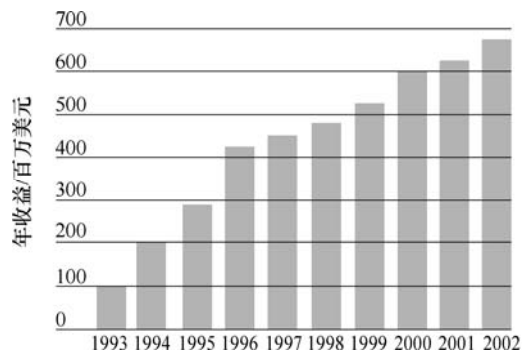


图 1-4 增材制造行业的年收益及增长

美国是世界上最重要的增材成型设备生产国。1999 年美国生产的增材成型设备占全世界的 81.5%，美国的增材制造技术发展水平及其趋势基本代表了世界增材制造技术的发展水平及趋势。图 1-5 给出了 Wohlers 公司对世界范围内增材成型系统的安装统计，图 1-6 给出的是各种主要增材成型系统截止到 2001 年底的安装统计。

在 Wohlers 公司 2011 年发布的年度报告中，对各行业应用增材成型技术的情况进行了分析，图 1-7 为增材成型技术的产业应用状况统计。消费品及电子领域仍占据主导地位，但比例从 23.7%降低到了 20.6%，汽车领域从 19.1%降低到 17.9%，医学和牙科领域从 13.6%增加到 15.9%，工业设备领域为 12.9%，航空航天领域为 9.9%，科研机构为 7.9%。此外，在军事、建筑等其他领域仍保持着一定程度的应用。在过去几年中，在医学和牙科领域以及航空航天领域的应用得到了较快发展。

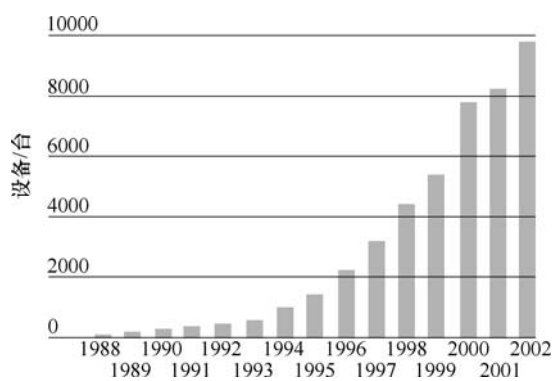


图 1-5 增材成型系统年安装统计

图 1-8 为 2011 年增材成型技术制作原型的主要应用功能比例。它包括：①直观教具：用于工程师、设计师、工具制造者、建筑师、医学专家与用户沟通交流的辅助工

具；②展示模型，如地理信息系统模型；③功能模型；④装配/总装；⑤快速模具原型，如硅橡胶模具；⑥金属铸造模型；⑦工具、模具部件；⑧直接零件制造，如定制化零件、替代物零件等。图 1-9 为 2012 年增材成型技术制作原型的主要应用功能比例。与图 1-8 各种功能的比例对比，一年来，采用增材成型技术直接生产零件的比例从 14.9% 增加到 19.2%。

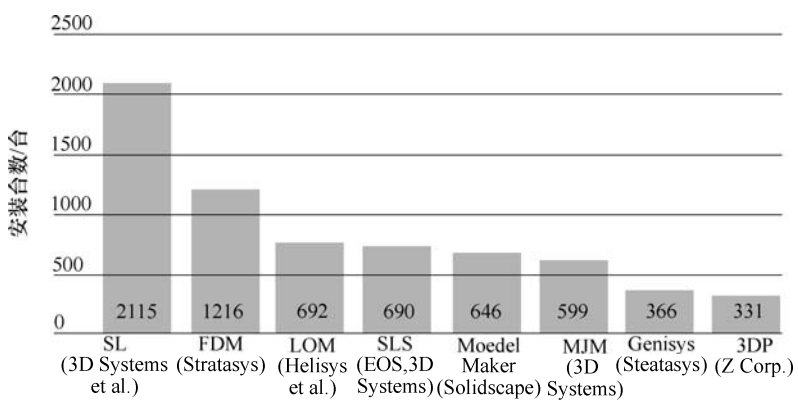


图 1-6 各主要增材成型系统的安装统计

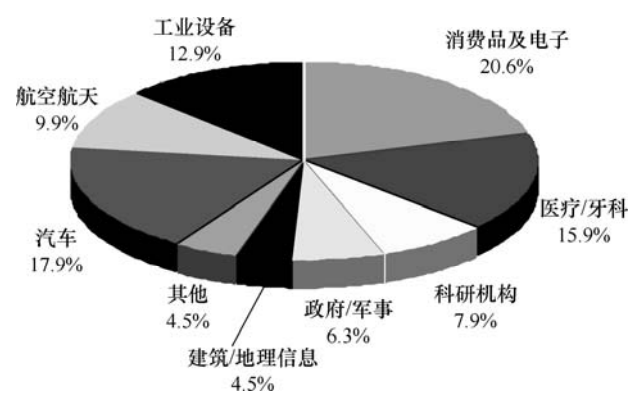


图 1-7 2011 年增材成型技术的行业应用状况统计

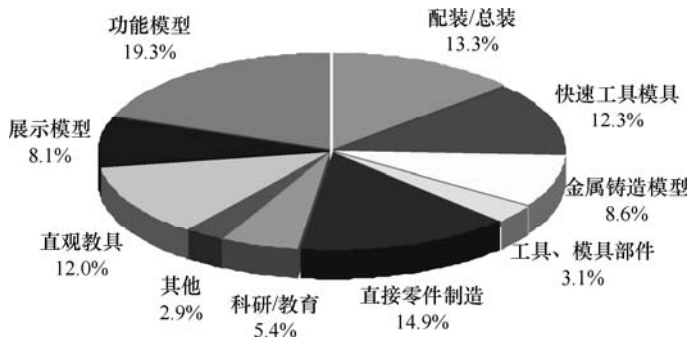


图 1-8 2011 年增材成型技术制作原型的主要应用功能比例

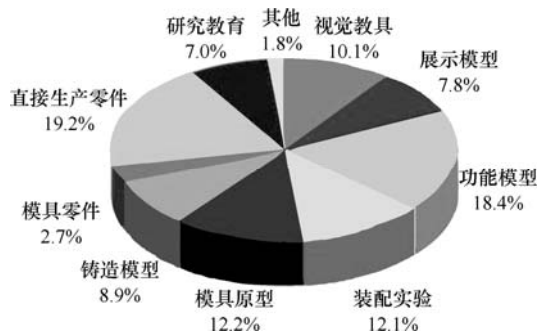


图 1-9 2012 年增材成型技术制作原型的主要应用功能比例

目前，世界上许多国家与地区都在开发或应用增材制造技术。增材制造系统的数量一定程度上表现了国家的经济活力与创新能力。2010 年主要国家和地区增材制造设备比例情况如图 1-10 所示。美国、日本、德国、中国成为主要的设备拥有国，美国增材制造设备的占有量仍遥遥领先于其他国家和地区。图 1-11 为 2011 年主要国家和地区的增材制造设备数量。与图 1-10 相比，中国增材成型设备由原来的 6.5% 增加至 8.6%，而美国由原来的 41.1% 下降至 38.3%。在增材成型设备中，近年来个人 3D 打印机得到了迅猛发展。图 1-12 给出了 2007~2011 年五年来个人 3D 打印机生产量的增长情况。从图 1-12 中可以看出，2011 年较上年增长 289%。据 Wholers 公司预测，到 2019 年，增材制造技术的产值将达到年 60 多亿美元，如图 1-13 所示。

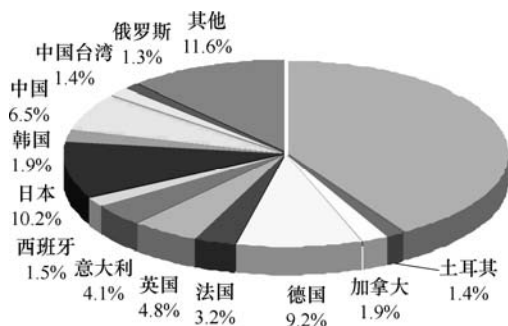


图 1-10 各国增材制造设备比例（截止至 2010 年）

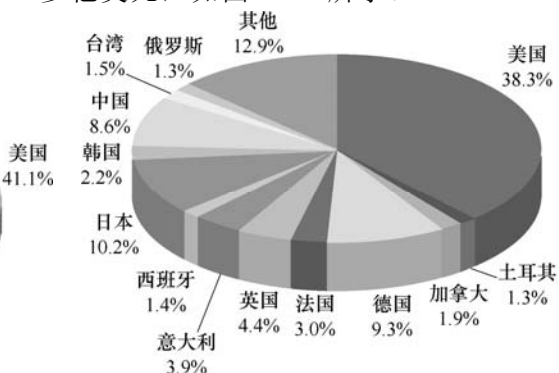


图 1-11 2011 年各国增材制造设备比例

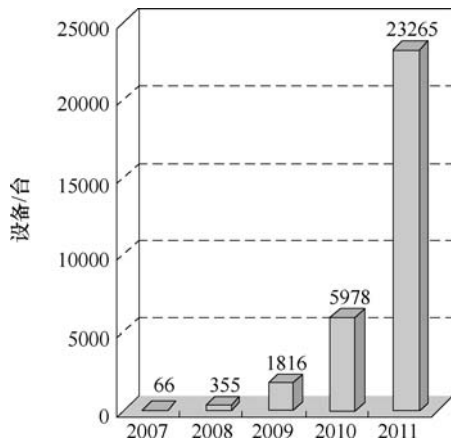


图 1-12 个人 3D 打印机 2007~2011 年五年来发展状况

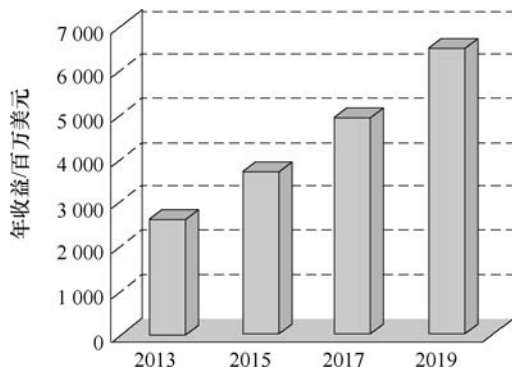


图 1-13 未来几年增材制造技术的产值

1.2.1 增材制造技术国外发展现状

欧美发达国家纷纷制定了发展和推动增材制造技术的国家战略和规划，增材制造技术已受到政府、研究机构、企业和媒体的广泛关注。2012 年 3 月，美国白宫宣布了振兴美国制造业的新举措，将投资 10 亿美元改革美国制造体系。其中，白宫提出实现该项计划的三大背景技术包括了增材制造技术，强调了通过改善增材制造材料、装备及标准，实现创新设计的小批量、低成本数字化制造。2012 年 8 月，美国增材制造创新研究所成立，联合了宾夕法尼亚州西部、俄亥俄州东部和弗吉尼亚州西部的 14 所大学、40 余家企业、11 家非营利机构和专业协会。

英国政府自 2011 年开始持续增加对增材制造技术的研发经费。以前仅有拉夫堡大学一个增材制造研究中心，现在诺丁汉大学、谢菲尔德大学、埃克塞特大学和曼彻斯特大学等相继建立了增材制造研究中心。英国工程与物理科学研究委员会中设有增材制造研究中心，参与机构包括拉夫堡大学、伯明翰大学、英国国家物理实验室、波音公司以及德国 EOS 公司等 15 家知名大学、研究机构及企业。

除了英国、美国外，其他一些发达国家也积极采取措施，以推动增材制造技术的发展。德国建立了直接制造研究中心，主要研究和推动增材制造技术在航空航天领域中结构轻量化方面的应用；法国增材制造协会致力于增材制造技术标准的研究；在政府资助下，西班牙启动了一项发展增材制造的专项，研究内容包括增材制造共性技术、材料、技术交流及商业模式等四方面内容；澳大利亚政府于 2012 年 2 月宣布支持一项航空航天领域革命性的项目“微型发动机增材制造技术”，该项目使用增材制造技术制造航空航天领域微型发动机零部件；日本政府也很重视增材制造技术的发展，通过优惠政策和大量资金鼓励产、学、研、用紧密结合，有力促进该技术在航空航天等领域的应用。

以快速成型技术为主的增材制造设备经过 20 多年的发展，已逐步形成系列化。2009 年世界范围内生产和销售增材制造装备的知名企业达 35 家，欧美占 29 家之多。美国 3D Systems 公司是历史最悠久的增材成型装备生产商之一。生产和销售多系列的 SLA、SLS 及 3DP 装备。SLA 设备的最大成型空间达到 1500mm×750mm×550mm。SLA 设备利用半导体泵浦固体激光器替代 He-Cd 激光器，使其寿命增长至 5000h 以上；采用专利涂层技术替代普通的刮板涂层技术，使最小涂层厚度由 0.1mm 减至 0.025mm，显著提高了制件成型精度；将扫描速度提高至 10m/s，提高了制件成型效率；应用双精度激光技术、小光斑激光成型微细结构、大光斑提高成型效率。该公司生产的应用喷头打印技术的 ProJet6000 系列装备，最小层厚为 0.05mm，尺寸精度达到 0.025mm，其结构和建造技术与传统的光固化设备相比，更接近于打印方式的成型。

美国 Stratasys 公司专营较低成本的使用丝材熔融堆积制件的 FDM 装备，是累计销售装备数量最多的企业，超过一万台套。该公司生产的 Dimension 型 FDM 装备向台面化方向发展，其 uPrint 系列个人 3D 打印装备的成型空间达 203mm×152mm×152mm，可成型八种颜色的 ABS 塑料制件。2010 年初，Stratasys 公司与著名的桌面打印装备生产企业 HP 建立合作联盟，开发了基于 FDM 原理的 HP 商标 3D 打印装备，并在欧洲

率先推广了 Designjet 3D 和 Designjet Color 3D 两款产品。

美国 Z Corp. 公司专营基于喷头打印的 3DP 装备。由于该技术无需激光器等昂贵元器件, 装备成本较低。较低成本的 3DP 系统其成型效率更高, 材料种类更多。另外, 3DP 技术是唯一可直接打印彩色零件的增材制造技术。基于以上优点, Z Corp. 公司的 3DP 装备被广泛应用于模型制作, 成为建筑、医疗和教育机构的首选装备。

德国 EOS 公司是近年来 SLS 和 SLM 装备销售最多、增长速度最快的制造商, 其装备的制造精度、成型效率及材料种类也是同类产品的世界领先水平。EOS 生产的系列 SLS 装备, 可用于铸造用蜡型、砂型制造, 以及尼龙等塑料零件的直接制造。EOS 生产的 SLM 装备也代表了世界最先进水平。生产的 EOSINT M270 型 SLM 装备可在 20h 内制造出多达 400 颗金属牙冠 (传统工艺中一位熟练的牙科技术人员一天仅能生产 8~10 颗牙冠)。EOS 还研发了专门用于模具制造的金属粉末与成型工艺, 加工的金属模具可批量生产百万计的塑料零件和数以千计的金属零件。

除了上述知名增材制造商外, 其他较为著名的设备制造商还有 LENS 装备生产商美国 Optomec 公司、SLM 装备生产商英国 MTT 公司、SLM 生产商德国 Concept 公司、EBM 装备生产商瑞典 Arcam 公司、可成型陶瓷材料的 SLM 装备生产商法国 Phenix 公司、直接喷印树脂材料的增材制造装备生产商以色列 Objet 公司等。

1.2.2 增材制造技术国内发展现状

我国自 20 世纪 90 年代初开始研究该项技术, 也经历了 20 年的研究历程。相比较其他制造领域, 增材制造技术与国外的差距并没有那么明显。在科技部多个五年计划的持续支持下, 华中科技大学、西安交通大学、清华大学等一批科研院所开展了快速成型制造技术研究, 研发出一批快速成型制造装备。重要的研发基地包括两个国家重点实验室 (华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室以及西安交通大学制造系统工程国家重点实验室)、1 个国家工程中心 (西安交通大学快速制造国家工程研究中心) 以及若干生产力促进中心, 在航空、汽车、生物、电子等行业进行应用, 为持续研究与应用推广打下了良好的基础。

西安交通大学于 1993 年在国内率先开展 SLA 技术的研究, 于 1997 年研制并销售了国内第一台光固化快速成型机; 并分别于 2000 年、2007 年成立了教育部快速成型制造工程研究中心和快速制造国家工程研究中心, 建立了一套支撑产品快速开发的快速制造系统, 研制、生产和销售多种型号的激光快速成型设备、快速模具设备及三维反求设备。

华中科技大学在国内率先开展 LOM 技术研究并于 1997 年推出 LOM 设备, 随后致力于研究 SLS/SLM 技术, 并于 2000 年左右研制成功了基于 CO₂ 激光器的 HRP 型 SLS 装备。最近, 为了满足大尺寸制件的快速直接制造, 该单位研制了具有世界最大工作台面 (1m×1m、1.2m×1.2m、1.4m×0.7m) 的大台面 SLS 装备。在 SLS 技术基础上, 华中科技大学从 2003 年左右开始研发直接制造金属零部件的 SLM 技术与装备, 目前该设备已投放市场。

清华大学与西安交通大学和华中科技大学几乎同时开展快速成型技术的研究与开

发, 并成功开发了多系列低成本 FDM 装备, 通过北京殷华激光快速成型与模具技术有限公司实现了商品化。

另外, 北京航空航天大学与西北工业大学研制了可用于航空航天复杂结构件快速制造的 LENS 装备, 并较为系统地研究了金属零件激光熔覆材料、工艺及零件性能, 在 LENS 成型航空用大型复杂钛结构件若干关键技术方面取得重要突破。北航在金属直接制造方面开展了长期的研究工作, 突破了钛合金、超高强度钢等难加工大型整体关键构件激光成型工艺、成套装备和应用关键技术, 解决了大型整体金属构件激光成型过程零件变形与开裂“瓶颈难题”和内部缺陷与内部质量控制及其无损检验关键技术, 飞机构件综合力学性能达到或超过钛合金模锻件, 已研制生产出了我国飞机装备中迄今尺寸最大、结构最复杂的钛合金及超高强度钢等高性能关键整体构件, 并在大型客机 C919 等多型重点型号飞机研制生产中得到应用。西北工大凝固技术国家重点实验室已经建立了系列激光熔覆成型与修复装备, 可满足大型机械装备的大型零件及难拆卸零件的原位修复和再制造。应用该技术实现了 C919 飞机大型钛合金零件激光立体成型制造。西北工大采用激光成型技术制造了最大尺寸达 2.83m 的机翼缘条零件, 最大变形量<1mm, 实现了大型钛合金复杂薄壁结构件的精密成型技术, 相比现有技术可大大加快制造效率和精度, 显著降低生产成本。

1.3 增材制造技术的发展趋势

1. 从快速原型与翻模制造向零部件直接制造转变

增材制造技术起初被称为快速原型制造技术, 主要针对新产品的开发快速制作模型, 并结合快速模具技术快速制作小批量产品, 在电子、汽车等领域得到了广泛应用。由于受成型材料的限制, 难以直接制造零、部件。例如, 采用纸质材料的 LOM 工艺, 采用光敏树脂材料的 SLA 工艺等。因此, 要实现原型制作向直接制造的转变, 首先必须发展成型材料, 使其达到或接近最终零件用材料的性能。

近年来, 采用金属粉末材料的增材制造技术成为零部件直接制造领域的研究热点和前沿。如激光净成型技术 (LENS)、电子束熔化技术 (EBM)、等离子喷射沉积成型技术 (PDM) 及选择性激光熔化技术 (SLM) 等。LENS 技术激光功率大、成型效率高, 美国采用 LENS 技术制造的次承力结构件在 F-18 战斗机上实现了装机应用, 但该工艺制造的零件精度较低; EBM 和 PDM 成型时需要较严格的真空条件, 装备成本相对较高; SLM 技术成型精度高, 尽管成型效率较其他工艺低, 但在钛合金、镍基高温合金等特种合金零件的快速制造方面显示出了强大的技术优势, 已应用于个性化生物零件、复杂结构散热零件、内空变截面超轻结构零件、功能梯度零件等快速制造。总体而言, LENS 和 SLM 技术在直接制造金属零件方面具有较为明显的优势。

2. 学科交叉融合, 应用领域不断扩大

随着制造技术与生物、信息、材料学科的交叉融合, 增材制造技术应用领域不断扩大, 如基于增材制造技术的生物制造、远程制造、MEMS 制造等技术得到不断发展,

并具有广阔的发展空间。基于增材制造技术的生物工程已成功制造出人体骨骼以及血管、肾脏等人体器官；基于增材制造技术的远程制造技术直接由用户通过因特网技术控制制造商的增材制造装备，实现产品的远程制造；借助微光固化微细加工系统，在硅基上制造出精度高达 $1\mu\text{m}$ 的微构件及陶瓷微齿轮。

3. 装备向零部件直接制造和专业化方向发展

增材制造设备经过 20 多年的发展，已逐步形成系列化。世界著名的几大典型增材设备制造商都有了自己系列设备，如美国的 3D Systems 公司的 SLA 系列光固化成型机、Projet 系列喷射成型机、Stratasys 公司的 FDM 系列熔融沉积成型机、DTM 公司 Sinterstation 系列粉末激光烧结成型机、Z Corp. 公司的 Z 系列 3DP 成型机，以及德国 EOS 公司的 EOSINT 系列烧结设备等。国内几家从事增材成型设备研发多年的公司也推出了各自的型号系列，如陕西恒通智能有限公司的 SPS 系列光固化成型机、武汉滨湖机电有限公司的 HRP 系列不同种类的增材成型机、北京隆源的 AFS 粉末激光烧结成型机等，不同的型号除了成型空间不同外，在成型精度、成效效率、所针对的材料以及制作模型的应用性能等都有所不同。这些有实力的公司也不断扩展其增材设备的类型，同时也将增材成型设备按照工业级、专家级和个人级进行专门开发，以及按照不同行业特殊需求进行专业性的开发，如开发面向珠宝行业、医疗行业、生物工程领域等的专业增材成型设备。近年来，增材制造技术最为显著的进展是金属结构件的直接制造取得了突破性的技术进步，也随即推出了面向航空航天及生物医学人体植入体等单件、定制化制作的金属粉末增材成型设备。零、部件直接制作以及特殊用途的增材制造设备将成为近期装备发展的重点。

4. 增材制造装备从高端型走向普及型

虽然 SLA 仍然是目前使用最广泛的增材成型制造技术，但其装备数量不到增材制造装备总量的 30%，主要是其材料成本和激光器等消耗成本较高。目前，使用的增材制造装备数量最多的是低成本的 FDM 装备。成本较 FDM 更低、成型材料更为广泛的 3DP 技术是在其他增材制造技术基础上发展而来的，被视为低端廉价增材制造技术的代表，表现出了强劲的发展势头。2009 年 3DP 装备销量增长了 17.8%。目前，3D 打印装备累计销量前两名的 Stratasys 公司和 Z Corp. 公司很少生产高端装备，主要专注于低成本的增材制造装备，说明增材制造装备从高端型向普及型快速转变。

5. 成型材料开发及其系列化、标准化

快速成型等增材制造技术的进步依赖于新型材料的开发和新设备的研制。发展全新的增材制造材料，如组织工程材料、梯度功能材料、纳米材料、非均质材料、其他传统方法难以制作的复合材料已是当前增材制造工艺技术中材料研究的热点。目前，国外增材成型技术的研究重点是其成型材料的研究开发及其应用，美国许多大学里进行增材成型技术研究的科技人员多数来自材料和化工专业。3D Systems 公司在其 Users Group Conference 年报上发表的文章称该公司已研制出一种新型的用于 SLS 工艺的 DuraForm AF 塑料，该塑料是一种类铝工程复合塑料，具有铝材的外观、尼龙的良好制品最终表面和性能以及工程化合物出色的硬度，是制作空气动力模型、夹具和固