

快速成型与快速模具 制造技术及其应用

王广春 赵国群 编著

第2版

KUAI SU CHENG XING YU
JISHU JIQI YINGYONG KUAI SU MUJU
ZHIZAO



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TG39/6

2008

快速成型与快速模具 制造技术及其应用

第 2 版

王广春 赵国群 编著

机械工业出版社

本书详细介绍了目前典型的快速成型技术的原理与特点、工艺过程及关键技术,快速成型材料及设备,快速成型技术中的数据处理及基于快速成型的快速模具制造技术,快速成型技术的应用领域及基于快速成型与快速模具技术的产品快速设计与制造集成系统等。

本书可作为高等院校机械类和材料加工类专业本科与研究生教学的教材和参考书,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

快速成型与快速模具制造技术及其应用/王广春,赵国群编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2008.3

ISBN 978-7-111-23513-2

I. 快… II. ①王…②赵… III. ①工程材料—成型②模具—制造
IV. TB3 TG760.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第020247号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:周国萍 责任校对:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京富生印刷厂印刷

2008年4月第2版第1次印刷

169mm×239mm·9.625印张·374千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23513-2

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

自从1988年美国3D Systems公司推出第一台商品化快速成型设备SLA250以来的20年间,快速成型技术及快速模具技术在世界范围内得到了高度重视和迅速发展。

国内于20世纪90年代初在国家相关部委和部分地方政府与科技部门的支持下,较快地启动了快速成型技术的研究与开发工作。刚开始时技术引进较多,1994年以来,我国已有几十家企业或机构从国外引进快速原型设备,加快了企业的新产品开发,取得了巨大的经济效益。同时,一些高等院校和研究机构积极开展快速成型技术研究,并取得了较大的进展,在典型快速成型工艺的设备商品化、原型材料、控制软件、成型工艺及关键技术等多方面都取得了显著进展,综合技术水平和规模得到了国际同行业的广泛认可。同时,随着我国机械制造行业的复苏,尤其是国内快速成型制造设备质量的提高和销售价格的降低,该项技术在国内的应用也得到了迅速发展,涌现出以该项技术为核心的生产力促进中心等服务机构。

作者所在单位从1997年底开始开展快速成型及快速模具技术的研究工作,购置了多种快速成型制造设备、反求设备、真空注塑设备及UG、CATIA、SURFACER、DEFORM、DYNAFORM、MOLDFLOW、MARC等CAD/CAE/CAM/软件,组建了以快速成型技术为核心的产品/模具快速设计与制造集成系统,10年来,开展了多方面的研究工作和广泛的对外服务工作,积累了许多有价值的研究成果和经验。同时,作者也相继开展了快速成型及快速模具技术的研究生与本专科生的教学工作,在传授该项技术过程中积累了较多的文献资料。

本书自2004年第1版出版以来,由于书中阐述的基础性内容简练、系统,介绍的工艺流程清晰实用,得到了广大专业技术人员及高等院校教研人员的普遍欢迎,也成为众多高校本科生和研究生的教学用书及参考书。

快速成型及基于快速成型的快速模具制造技术是一门崭新的技术,近年来随着研究和应用的不断深入,原有的技术不断成熟,新的技术和思想不断出现,为适应学习和应用该项技术的要求,本书对第1版中的内容进行了补充和局部的重新编排。在典型的快速成型工艺内容中增加了原型制作精度及质量控制等内容,

介绍了典型工艺方法中几种具有发展前景的新的成型思想。在快速模具制造技术内容中，重点补充了基于快速原型的金属钢质硬模制造技术，并从应用角度，补充了快速成型数据处理的内容。

由于时间仓促和水平有限，书中内容难免有不恰当之处，敬请读者批评指正。

作 者

第1版前言

自从1988年美国3D Systems公司推出第一台商品化SLA250设备以来的十几年来,快速成型及基于快速成型的快速模具制造技术在世界范围内得到了高度重视和迅速发展。

快速成型与快速模具制造技术仅有十几年的发展历史,是当今机械制造领域最具潜力的先进制造技术之一。国内于20世纪90年代初在国家科技部、国家基金委、原机械工业部及部分地方政府与科技部门的支持下,启动了快速成型与快速模具制造技术的研究与应用工作,被迅速地推向制造业的前沿,在设备商品化以及工艺、材料、软件等多方面取得了显著进展,许多单位建立了相应的服务机构,开展快速成型与快速模具制造技术的研究应用推广和社会服务。

作者所在单位从1997年开始开展该项技术的研究工作,购置了快速成型与快速模具设备、反求设备及数据处理软件、CAD/CAM软件和CAE软件等,组建了产品/模具快速设计与制造系统,5年多来进行了大量的工艺、材料、质量控制等方面的研究工作,以产品/模具快速设计与制造为核心,为国内众多企业进行了较广泛的技术支持与服务工作,积累了许多有价值的成果和经验。同时,作者在本单位也相继开展了快速成型与快速模具制造技术的研究生与本专科生的教学工作,在传授该项技术过程中积累了较多的文献资料。

目前,国内有关快速成型与快速模具制造技术方面的书籍很少,相关的文献资料又比较繁杂,从教学、工程应用与交流尤其是普及和推广该项技术的角度来看,迫切需要一本能够系统介绍典型快速成型工艺、典型快速模具制造技术、材料与设备选择、数据处理内容及相关软件、工程应用领域等方面的书籍。正是基于这样的初衷,结合所在单位多年来的研究与应用积累,作者进行了本书的编著工作。在编写过程中,作者得到了所在单位的工作人员和研究生的大力支持,没有同事们5年来的鼎力合作,就没有本书中体现出来的内容。

由于时间仓促和水平有限,书中内容难免有不恰当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2003年7月15日

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 概论	1
1.1 快速成型技术的早期发展	2
1.2 快速成型技术市场及学术领域	5
1.3 快速成型技术的特点	9
1.4 快速成型技术的优越性	10
第2章 快速成型制造工艺	12
2.1 快速成型工艺过程及分类	12
2.2 光固化成型工艺	13
2.2.1 光固化成型工艺的基本原理和特点	13
2.2.2 光固化成型的工艺过程	16
2.2.3 光固化成型的激光扫描方法	19
2.2.4 光固化成型的支撑结构	21
2.2.5 光固化成型的收缩变形	22
2.2.6 光固化成型的精度及控制	23
2.2.7 光固化成型的制作时间	33
2.2.8 微细结构光固化成型数据处理及成型工艺	37
2.2.9 微光固化快速成型制造技术	38
2.2.10 光固化成型的应用	44
2.3 叠层实体制造工艺	46
2.3.1 叠层实体制造工艺的基本原理和特点	46
2.3.2 叠层实体快速成型的工艺过程	48
2.3.3 提高叠层实体成型制作质量的措施	51
2.3.4 叠层实体制造工艺后置处理中的表面涂覆	56
2.3.5 新型叠层实体快速成型工艺方法	58
2.3.6 叠层实体快速原型的应用	60
2.4 选择性激光烧结成型工艺	63
2.4.1 选择性激光烧结工艺的基本原理	63
2.4.2 选择性激光烧结工艺的特点	65
2.4.3 选择性激光烧结工艺	65
2.4.4 高分子粉末烧结件的后处理	71

2.4.5 选择性激光烧结工艺参数	72
2.4.6 选择性激光烧结工艺的应用	74
2.5 熔融沉积快速成型工艺	75
2.5.1 熔融沉积成型工艺的基本原理	75
2.5.2 熔融沉积成型工艺的特点	77
2.5.3 熔融沉积工艺成型过程影响因素分析	78
2.5.4 气压式熔融沉积快速成型系统	80
2.5.5 熔融沉积快速成型技术的应用	82
2.6 其他快速成型工艺	84
2.6.1 三维喷涂粘接工艺	85
2.6.2 光掩膜法	88
2.6.3 弹道微粒制造	90
2.6.4 数码累积成型	90
2.7 快速成型技术的发展趋势	91
第3章 快速成型材料及设备	96
3.1 快速成型材料	96
3.1.1 光固化快速成型材料	97
3.1.2 叠层实体快速成型材料	103
3.1.3 熔融沉积快速成型材料	105
3.1.4 选择性激光烧结快速成型材料	107
3.2 快速成型制造设备	109
3.2.1 光固化快速成型制造设备	109
3.2.2 叠层实体快速成型制造设备	114
3.2.3 选择性激光烧结快速成型制造设备	117
3.2.4 熔融沉积快速成型制造设备	119
3.2.5 三维喷涂粘接设备	123
第4章 快速成型技术中的数据处理	125
4.1 CAD三维模型的构建方法	125
4.1.1 概念设计	125
4.1.2 反求工程	126
4.2 STL数据文件及处理	129
4.2.1 STL文件的格式	129
4.2.2 STL文件的精度	132
4.2.3 STL文件的纠错处理	133
4.2.4 STL文件的输出	137
4.2.5 分割与拼接处理软件	142
4.3 三维模型的切片处理	149
4.3.1 切片方法	150

4.3.2 切片算法	153
4.4 STL 数据编辑与处理软件 Magics RP	154
4.4.1 Magics 软件编辑功能	154
4.4.2 Magics 软件修复功能	155
4.4.3 Magics 软件施加支撑及切片	157
4.5 CT 图像数据处理软件 Mimics	160
4.5.1 Mimics 软件简介	160
4.5.2 Mimics 软件应用实例	161
第5章 基于快速原型的软模快速制造技术	165
5.1 快速模具的分类及基本工艺流程	165
5.2 硅橡胶模具快速制造技术	167
5.2.1 硅橡胶模具的特点	168
5.2.2 基于快速原型的硅橡胶模具制作工艺	168
5.2.3 硅橡胶模具制作的若干问题	170
5.2.4 经济型硅橡胶模具制作的一种工艺方法	172
5.2.5 硅橡胶模具的应用	175
5.3 电弧喷涂快速模具制造技术	176
5.3.1 电弧喷涂快速制模工艺	177
5.3.2 电弧喷涂制模关键技术及工艺参数控制	187
5.3.3 电弧喷涂模具的注塑应用	192
5.4 环氧树脂模具快速制造技术	194
5.4.1 环氧树脂模具制作工艺	194
5.4.2 环氧树脂配方	196
5.5 纤维增强聚合物压制模	197
第6章 基于快速原型的金属钢质硬模快速制造技术	200
6.1 Keltool™ 法快速制模技术	200
6.1.1 Keltool™ 法的基本原理及工艺流程	200
6.1.2 Keltool™ 法的工艺特点	201
6.1.3 Keltool™ 法的应用	202
6.2 RapidTool™ 法快速制模技术	203
6.2.1 RapidTool™ 法的工艺原理及流程	203
6.2.2 RapidTool™ 法的工艺特点	204
6.2.3 RapidTool™ 法的工艺制模材料及设备	204
6.2.4 RapidTool™ 法工艺的应用	205
6.3 DirectTool™ 法快速制模技术	206
6.3.1 DirectTool™ 法的工艺原理及流程	206
6.3.2 DirectTool™ 法的工艺制模设备	206
6.3.3 DirectTool™ 法的工艺材料	207

6.4	LENS TM	209
6.4.1	LENS TM 的基本原理	209
6.4.2	LENS TM 的特点	210
6.4.3	LENS TM 的制模设备及应用	210
6.5	ExpressTool TM 法快速制模技术	211
6.5.1	ExpressTool TM 法制模工艺流程及相关技术问题	212
6.5.2	ExpressTool TM 法制模工艺特点及应用	214
6.6	其他快速制模技术	215
6.6.1	电铸镍壳-陶瓷背衬模 (NCC Tooling)	215
6.6.2	气相沉积镍壳-背衬模制造工艺	217
6.6.3	熔模铸造金属模制造工艺	219
6.6.4	直接金属三维打印制模技术	219
第7章	快速成型制造技术的应用	222
7.1	引言	222
7.2	在产品中的应用	223
7.3	快速模具的母模	226
7.4	在铸造领域的应用	227
7.4.1	熔模铸造	227
7.4.2	直接模壳铸造	229
7.5	在医学领域的应用	230
第8章	基于快速成型技术的产品快速设计与制造系统	241
8.1	基本功能及结构	241
8.2	系统软硬件资源	243
8.3	产品快速设计与制造系统的构建	244
8.4	产品快速设计与制造系统的应用	245
8.4.1	产品快速设计与制造实例	245
8.4.2	产品结构优化设计实例	248
附录	快速成型及快速模具技术研究与服务机构	252
参考文献		295

第 1 章 概 论

从 20 世纪 90 年代开始,市场环境发生了巨大变化。一方面表现为消费者需求日益主体化、个性化和多样化;另一方面则是产品制造商们都着眼于全球市场的激烈竞争。面对市场,不但要迅速地设计出符合人们消费需求的产品,而且还必须很快地生产制造出来,抢占市场。随着计算机技术的迅速普及和 CAD/CAM 技术的广泛应用,产品从设计造型到制造都有了很大发展,而且产品的开发周期、生产周期、更新周期越来越短。从 20 世纪开始,企业的发展战略已经从 60 年代的“如何做得更多”、70 年代的“如何做得更便宜”、80 年代的“如何做得更好”发展到 90 年代的“如何做得更快”。因此,面对一个迅速变化且无法预料的买方市场,以往传统的大批量生产模式对市场的响应就显得越来越迟缓与被动。快速响应市场需求,已成为制造业发展的重要走向。为此,自 20 世纪 90 年代以来,工业化国家一直在不遗余力地开发先进的制造技术,以提高制造业的发展水平。计算机、微电子、信息、自动化、新材料和现代化企业管理技术的发展日新月异,产生了一批新的制造技术和制造模式,制造工程与科学取得了前所未有的成就。

快速成型(也称快速原型)制造技术(Rapid Prototyping & Manufacturing, RP&M)就是在这种背景下逐步形成并得以发展的。它借助计算机、激光、精密传动和数控等现代手段,将计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)集成于一体,如图 1-1 所示,根据在计算机上构造的三维模型,能在很短时间内直接制造产品模型或样品,无需传统的机械加工机床和模具。该项技术创立了产品开发的新模式,使设计师以前所未有的直观方式体会设计的感受,感性而迅速地验证和检查所设计的产品结构和外形,从而使设计工作进入了一种全新的境界,改善了设计过程中的人机交流,缩短了产品开发的周期,加快了产品更新换代的速度,降低了企业投资新产品的风险。

快速成型技术制作的原型可用于新产品的评价,也可用于制造硅橡胶模具和熔模铸造模具的母模等,从而批量地生产塑料及金属零件。用这种方法制造样品较传统法的显著优点是,制造周期大大缩短(由几周、几个月缩短为若干个小时),成本大大降低。

而以 RP&M 原型作母模来翻制模具的快速模具制造技术(Rapid Tooling, RT),进一步发挥了快速成型制造技术的优越性,可在短期内迅速推出满足用户需求的一定批量的产品,大幅度降低了新产品开发研制的成本和投资风险,缩短

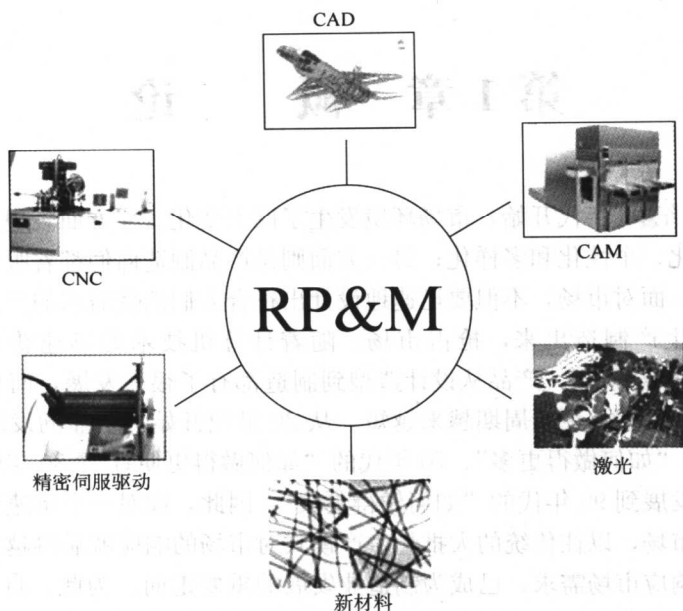


图 1-1 快速成型技术的支撑技术

了新产品研制和投放市场的周期，在小批量、多品种、改型快的现代制造模式下具有强劲的发展势头。模具制造是制约我国汽车、家电、轻工等行业发展的瓶颈和关键。随着快速成型软、硬件设备与快速成型材料的不断发展和完善，快速原型件的强度和精度得到不断的提高，快速成型技术已经逐渐地深入到快速模具制造领域。基于快速成型方法制造各类简易经济的快速模具已成为 RP&M 应用的热点问题。

1.1 快速成型技术的早期发展

快速成型技术的基本原理是基于离散的增长方式成型原型或制品。在历史上，很早以前就有“增长”这种制造方式。快速成型技术的早期根源可以追溯到早期的地形学工艺领域。

早在 1892 年，Blanthier 在他的美国专利中曾建议用叠层的方法来制作地图模型。该方法包括将地形图的轮廓线压印在一系列的蜡片上并沿轮廓线切割蜡片，然后堆叠系列蜡片产生三维地貌图。1940 年，Perera 提出相似的方法，即沿轮廓线切割硬纸板，然后堆叠，使这些纸板形成三维的地貌图。1964 年，Zang 进一步细化了该方法，建议用透明的纸板，且每一块均带有详细的地貌形态标记。1972 年，Matsubara 提出在上述方法中使用光固化材料，光敏聚合树

脂涂到耐火颗粒上（例如石墨粉或沙砾），然后这些耐火颗粒被填充到叠层，加热形成与叠层对应的板层，光线有选择地投射或扫射到这个板层，将规定的部分硬化，没有扫描或没有硬化的部分被某种溶剂溶化，用这种方法形成的薄板层随后不断地堆积在一起形成模型。1976年，DiMatteo进一步明确地提出，这种堆积技术能够用来制造用普通机加工设备难以加工的曲面，如螺旋桨、三维凸轮和型腔模具等。在具体实践中，通过铣床加工成沿高度标识的金属层片，然后通过粘接成叠层状，采用螺栓和带锥度的销钉进行联接加固，制作了型腔模，如图1-2所示。

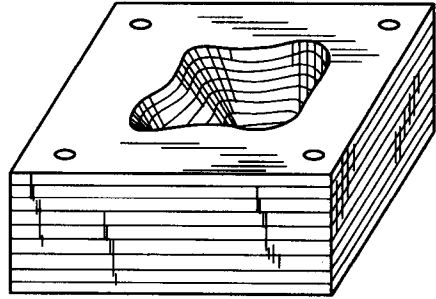


图 1-2 由 DiMatteo 制作的型腔模叠层模型

1977年，Swainson 在他的美国专利中提出，通过选择性的三维光敏聚合物体激光照射直接制造塑料模型工艺。同时 Battelle 实验室的 Schwerzel 也进行了类似的工作。1979年，日本东京大学 Nakagawa 教授开始用薄板技术制造出实用的工具，如落料模、成型模和注塑模等。其中特别值得一

提的是，Nakagawa 教授提出了注塑模中复杂冷却通道的制作可以通过这种方式来实现。1981年，Hideo Kodama 首先提出了一套功能感光聚合物快速成型系统，应用了如下三种不同的方法制作叠层：

1) 用过滤罩控制 UV 光源的照射面积，并且将模型向下浸入到光敏聚合物中来获得新的叠层。

2) 过滤罩位于缸底，向上拉动模型来得到新的叠层。

3) 采用 1) 中的方法浸渍模型，但是利用 x-y 平面坐标移动和光学纤维来照射新的叠层。

在快速成型技术和方法发展过程中，还出现了一系列具有重要价值的专利技术，表 1-1 列出了其中的部分专利。

表 1-1 快速成型技术和方法发展过程中出现的部分专利

专 利 人	题 目	日 期	国 家
Housholder	成型工艺	1979.12	美 国
Murutani	光学成型方法	1984.05	日 本
Masters	计算机自动制造工艺和系统	1984.07	美 国
Andre <i>et al.</i>	制作工业零部件的设备	1984.07	法 国
Hull	通过光固化成型制作三维物体的设备	1984.08	美 国
Pomerantz <i>et al.</i>	三维制图与模型设备	1986.06	以色列

(续)

专 利 人	题 目	日 期	国 家
Feygin	以叠层的方式整体制作模型的设备及方法	1986.06	美 国
Deckard	选择烧结方法制作模型的设备及方法	1986.10	美 国
Fudim	通过光固化聚合物来制成三维物体的方法及设备	1987.02	美 国
Arcella <i>et al.</i>	浇注成型	1987.03	美 国
Crump	制作三维物体的设备及方法	1989.10	美 国
Helinski	通过粒子沉积制作三维模型的方法	1989.11	美 国
Marcus	三维计算机控制的选择性气流沉积	1989.12	美 国
Sachs <i>et al.</i>	三维印刷	1989.12	美 国
Levent <i>et al.</i>	热喷涂沉积制作三维模型的方法及设备	1990.12	美 国
Penn	制作三维模型的系统、方法及工艺	1992.06	美 国

在快速成型技术和设备的早期商业开发中, Willeme 光刻实验室从 1861 年到 1868 年获得了商业成功。但是, 由于需要具有跟踪仪器设备的木工雕刻劳动力问题, Willeme 光刻实验室很快就脱离了商界。后来进行的著名的商业尝试是 1977 年 Swainson 的 Formagraphic 发动机公司, 该公司后来与 Battelle 实验室合作更名为 Omtec 复制公司。1977 年 Dimatteo 成立了名为 “Solid Photography” 公司, 1981 年 Solid photography 改名为 Robotic Vision。Solid photography 和 Solid Copier 公司作为 Robotic Vision 的附属公司, 运行至 1989 年。

表 1-2 给出了早期 RP 系统商业开发的标志性的开发商、工艺和起始时间等。1988 年, 当 3D Systems 公司将 SLA—250 光固化设备系统运送给 3 个用户时, 标志着快速成型设备的商品化正式开始。美国在快速成型设备商业化的过程中走在欧洲和日本等国家的前面, 而且美国有多种不同的成型工艺方法, 而在日本, 除 Kira 公司以外, 均采用激光光敏聚合物工艺。

表 1-2 早期 RP 系统商业开发

公 司	国 别	成 型 工 艺	开始时间	出售时间
Aaroflex	美 国	光固化成型	1995	不详
BPM	美 国	喷墨技术	1989	1995
DTM	美 国	选择性激光烧结	1987	1992
DuPont Somos	美 国	光固化成型	1987	不祥
Helisys	美 国	薄板成型	1985	1991
Light Sculpting	美 国	光掩膜技术	1986	不祥
Quadrax	美 国	光固化成型	1990	1990

(续)

公 司	国 别	成 型 工 艺	开始时间	出售时间
Sanders Prototyping	美 国	喷墨技术	1994	1994
Soligen	美 国	3D印刷	1991	1993
Stratasys	美 国	熔融沉积	1988	1991
3D Systems	美 国	光固化成型	1986	1988
CMET	日 本	光固化成型	1988	1990
Cubital	以色列	照相工艺学	1987	1991
Denken	日 本	光固化成型	1985	1993
DMEC	日 本	光固化成型	1990	1990
EOS	德 国	光固化成型、选择性激光烧结	1989	1990
Fockele&Schwarze	德 国	光固化成型	1991	1994
Kira	日 本	薄板技术	1992	1994
Meiko	日 本	光固化成型	1991	1994
Mitsui	日 本	光固化成型	1991	1991
Sparx	瑞 典	薄板技术		1994
Teijin Seiki	日 本	光固化成型	1991	1992
Ushio	日 本	光固化成型		1994

1.2 快速成型技术市场及学术领域

快速成型技术按照所使用的材料和零件的建造技术的不同可分为多种工艺,其中包括光固化技术 (Stereolithography Apparatus, SLA)、选择性激光烧结技术 (Selective Laser Sintering, SLS)、层状物体制造技术 (Laminated Object Manufacturing, LOM) 及熔融沉积制造技术 (Fused Deposition Manufacturing, FDM) 等。

快速成型技术研究仅有十几年时间,但却得到了工业界的迅速重视与应用。例如美国 Ford 汽车公司、Dupont 公司已在他们的生产线上采用了 RP&M 技术,美国 Pratt & Whitney 公司已应用 RP&M 技术制造铸造熔模。美国在 RP&M 系统(设备)研制、生产、销售方面占全球主导地位。生产 RP&M 设备系统的公司主要有 3D Systems (SLA 等)、Stratasys (FDM)、Helisys (LOM)、DTM (SLS)、Sanders (3D Plotting System)、Aeroflex (SLA) 等。欧洲和日本等国家也不甘落后,纷纷进行 RP&M 技术、设备研制等方面的研究工作,如德国的 EOS 公司、以色列的 Cubital 公司以及日本的 CMET 公司等。

1995 年, RP&M 被列为我国今后十年十大模具工业发展方向之一, 我国近期与远期自然科学学科发展战略调研报告(机械制造学科)也将快速成型与制造技术、自由造型系统及计算机集成系统研究列为重点研究领域之一。

在美国制造工业中, 快速成型技术正起着极其重要的作用, 并得到制造业的重视。1994 年, 密西根 Denton & Co 公司对美国 312 家快速成型用户的调查与统计表明, 地面运输公司占 24%, 航空航天用户占 23%, 家用电器制造用户占 14%, 商业机器制造用户占 11%。快速成型技术具有显著的经济和时间效益, 例如, Pratt & Whitney 公司快速铸造成型实验室工程方法分析家 John Martin 指出: 1994 年, Pratt & Whitney 公司共生产了两千件快速成型铸件, 其成本在 60 万美元到 70 万美元之间, 但采用常规方法, 这些铸件的成本将在 700 万美元左右, 此外, 还节省了 70%~90% 的时间。美国工程自动化咨询公司总裁 Terry Wohlers 指出, 对于快速成型与制造业, 1994 年是美国关键的一年, 1994 年销售的快速成型设备比过去两年的总和还要多, 共出售 330 台快速成型与制造设备, 并且完成了大量的快速成型应用工作, 估计产值为 2 亿美元, 如果再考虑零件复制, 其产值可达 2.8 亿美元。

据美国工程自动化咨询公司的 RP 市场 2002 年调查报告, 该行业 2002 年的产值接近 7 亿美元, 如图 1-3 所示。与 CNC 初期市场相比, RP 行业的发展速度是相当惊人的, 1988~1997 年, RP 产值以 53.6% 的年平均速度增长, 而在 1970~1981 年, CNC 市场的年平均增长率为 22%。所以有人比喻 RP 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。

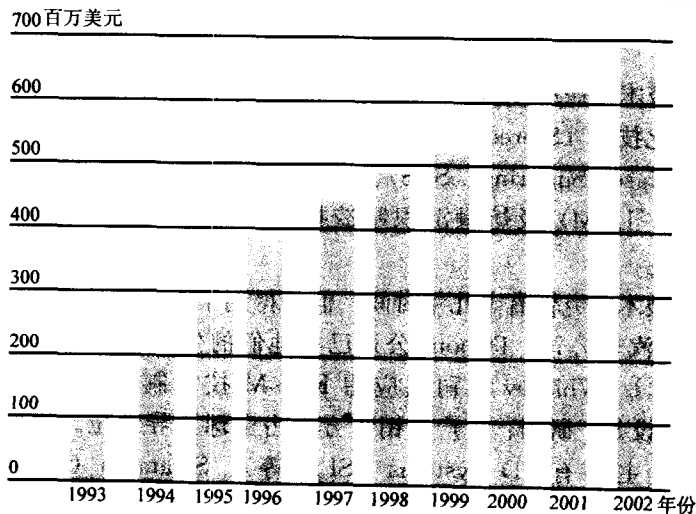


图 1-3 RP 行业的年收益及增长

图 1-4 给出了 Wohlers Associates 咨询公司对世界范围内 RP 系统的安装统计情况, 图 1-5 给出的是各种主要 RP 系统截止到 2001 年底的安装统计情况。

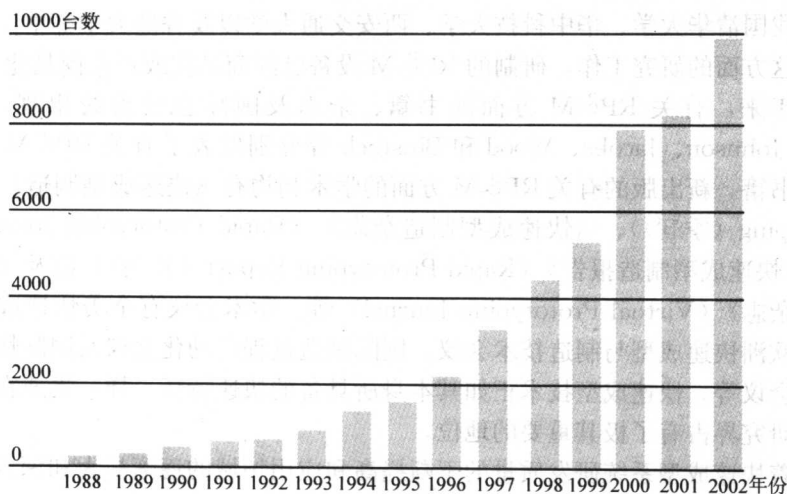


图 1-4 RP 系统年安装统计

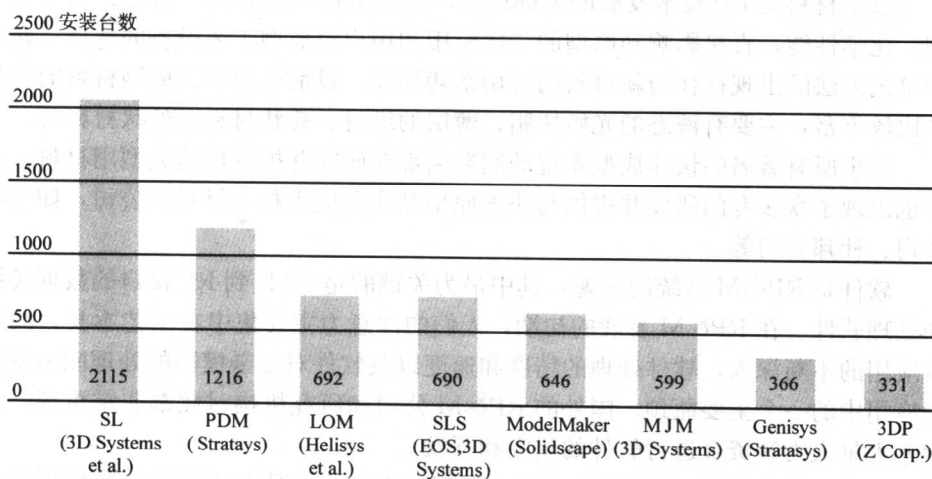


图 1-5 各主要 RP 系统的安装统计

研究 RP&M 模型材料的高校主要有美国 Dayton 大学、Michigan 大学、Virginia 技术大学。此外，美国的 Virginia 大学、Clemson 大学、Georgia 大学以及英国的 Nottingham 大学快速成型与制造中心等单位较早地开展了 RP&M 技术研究与服务方面的工作。从事 RP&M 设备系统方面开发研究的国外高校主要有美国麻省理工学院 (MIT)、Stanford 大学、Texas 大学及 Utah 大学等。此外，加拿大 Calgary 大学、荷兰 Delft 技术大学、芬兰 Helsinki 技术大学、德国