

◆ 刘光富 李爱平 编著

快速成形

KUAI SUC HENG XING YU KUAI SU ZHI MO JI SHU



与快速制模技术



同济大学出版社

快速成形与快速制模技术

刘光富 李爱平 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书首先分析快速成形技术的产生原因,论述了快速成形技术的发展过程、应用领域和由此产生的经济效益。继而就快速成形过程与前处理、液态光敏聚合物选择性固化、薄型材料选择性切割、丝状材料选择性熔覆、粉末材料选择性激光烧结、低价位的快速成形机、快速模具制造等作了详细阐述。

本书可用作大专院校机械设计、机械制造、工业工程、工业造型、自动化等专业的研究生和高年级学生的专业课教材,也可作为制造企业、科研单位从事生产、管理的领导者和工程技术人员的学习或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

快速成形与快速制模技术/刘光富,李爱平编著. —上海:同济大学出版社,2004.5
ISBN 7-5608-2856-6

I. 快… II. ①刘…②李… III. ① 金属压力加工 ② 制模工艺 IV. ① TG3 ② TG24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 033129 号

快速成形与快速制模技术

刘光富 李爱平 编著

责任编辑 曹焯康 责任校对 徐 栩 封面设计 李志云

出 版 行 同济大学出版社
(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏句容排印厂印刷
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 11
字 数 220 000
印 数 1—1 500
版 次 2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5608-2856-6/TG·7
定 价 18.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

作者简介



刘光富 1963年生,安徽肥西人。1988年于合肥工业大学机械工程学院硕士研究生毕业,获硕士学位后留校任教,1996年任副教授。2002年于同济大学机械工程学院博士研究生毕业,获工学博士学位。2002年7月,同济大学经济与管理学院从事博士后研究工作,任上海市博士后联谊会副理事长和同济大学博士后联谊会理事长,中国机械工程学会高级会员。

长期以来,一直从事先进制造技术的研究,主持或参与国家、部、省、市20多项科研课题。从20世纪90年代开始研究快速成形技术,主要从事“螺旋挤压熔融沉积快速成形过程的研究及其过程参数的优化”、“螺旋挤压 Desktop RP Modeler 的研究”和“三维实体零件分层处理软件的研究与开发”等,其中一项申请国家实用新型专利。已发表学术论文和国际、国内会议论文近40篇,为本书的撰写打下良好的基础。

1996年获合肥工业大学杰出青年教师讲课竞赛第一名,获1995~1999年合肥工业大学董事会基金奖。2000年4月应邀去香港理工大学工业中心,进行教学与科研项目合作,所得成果获2001年上海市教学成果二等奖。先后两次获得中国博士后科学研究基金的资助。



李爱平 山东无棣人。哈尔滨工业大学工学博士,教授,博士生导师,中国机械工程学会高级会员,现任同济大学现代制造技术研究所所长。1993~1994年德国波鸿鲁尔大学自动化研究所高级访问学者。近年来主持和参加完成了国家、省部级等各种科研和教学项目近20余项,发表论文40余篇。主要研究方向:网络化制造及其相关技术、基于知识的工程(KBE)、制造系统及自动化、基于CAD/RE/RP/RT技术集成的产品快速开发与实现技术等。曾获上海市科学技术进步二等奖、国家机械工业局科学技术进步二等奖、上海市教学成果二等奖、上海市普通高校优秀教材三等奖、同济大学第七届优秀教材二等奖、同济大学第八届优秀教材三等奖等。

序

中国正在迈向制造强国,2003年中国制造业的增加值已经居世界第四位。但是,我们应该清醒地认识到,要达到期望的彼岸,必须大力提高产品创新意识和新产品的快速开发能力。

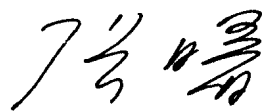
快速成形和快速制模技术是构成产品快速开发能力的基础技术。自从20世纪80年代中期基于叠层制造原理的快速成形技术出现以来,发展非常迅速,已经商品化和正在研究中的各种快速成形技术已经超过数十种。快速成形从根本上改变了传统的零件成形工艺方法,相对从毛坯上切除多余材料的切削加工而言,它是一种生长型制造工艺,相对强制变形的压力加工而言,它是一种自由成形制造工艺。

借助快速成形技术可以制作各种原型件,用于新产品的概念设计验证、装配验证、功能试验、展品制作以及快速制模的母模等,大大缩短了新产品的开发周期,加快了新产品的上市速度,增强了企业的竞争能力,赢得更多的市场机遇。在快速成形技术基础上发展起来的快速制模技术超越了传统模具只适用于大量生产的观念,可以在短期内制造出适合生产几件到几万件零件的模具。

《快速成形与快速制模技术》一书是作者在收集大量国内外快速成形技术资料的基础上、结合攻读博士期间的研究成果撰写而成。他首先分析了快速成形技术的产生背景,论述了快速成形技术的发展过程、应用领域和由此带来的经济效益。继而对快速成形过程及其前处理、液态光敏聚合物选择性固化、薄型材料选择性切割、丝状材料选择性熔覆、粉末材料选择性激光烧结、低价位的快速成形机、快速模具制造等作了详细阐述,重点分析了已经商业化的快速成形技术原理、工艺特点和相关系统

设备。

我深信,本书的出版将促进这种新技术和新工艺知识的普及。特别是作为教材纳入高等工业院校的教学过程以后,必将引起我国制造企业的进一步重视,借助快速成形和快速制模技术提高新产品开发能力。

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '张辉' (Zhang Hui) in a cursive style.

2004年4月

前 言

21 世纪人类社会将进入知识经济新时代,制造业作为新世纪的战略产业将面临着剧烈的挑战和经历一场深刻的技术变革。随着全球市场一体化的形成,制造业的竞争十分激烈,新产品的开发和上市速度已成为市场竞争的关键因素。尽管借助虚拟产品开发技术可缩短新产品的设计周期,但在许多情况下,仍然需要或希望能够快速制造出产品的物理原型(样机、样件),以便征求包括用户在内的各方面意见,反复进行修改,在短期内形成能投放市场的定型产品。用传统的方法制造物理原型时,通常需要使用多种机床设备和工模具,既费时又费钱。20 世纪 80 年代末出现了快速成形技术,它涉及 CAD/CAM 技术、数据处理技术、材料技术、激光技术和计算机软件技术等,是各种高新技术的综合应用。

快速成形(Rapid Prototyping,简称 RP)的基本原理是依据计算机上构成的工件三维设计模型,对其进行分层切片,得到各截面的二维轮廓。按照这些二维轮廓,成型头选择性地固化一层一层材料,形成各个截面轮廓,并逐步有序地叠加成三维工件。快速成形主要的成形工艺有四种:液态光敏聚合物选择性固化(SLA)、薄型材料选择性切割(LOM)、粉末材料选择性激光烧结(SLS)、丝状材料选择性熔融沉积(FDM)。

虽然快速成形技术问世不久,由于它给制造业带来的巨大效益,使得这一技术的应用日益广泛。美国、日本、德国、英国和法国等国家非常重视快速成形技术的应用,已经取得了明显的经济效益,尤其在工业、医学、军事、汽车、航空和航天等领域已经得到广泛应用。

本书是在上述背景下经过两年的努力,再结合博士学位论

文的研究成果撰写而成的。作者首先分析了快速成形技术的产生原因,论述了快速成形技术的发展过程、应用领域和由此产生的经济效益。继而就快速成形过程与前处理、液态光敏聚合物选择性固化、薄型材料选择性切割、丝状材料选择性熔覆、粉末材料选择性激光烧结、低价位的快速成形机、快速模具制造等作了详细阐述,重点分析了已经商业化的制造技术原理、工艺特点和相关系统设备。

作者收集、整理了大量的国内外快速成形技术的相关资料,再结合近几年的研究成果,将最新的快速成形技术及其相关内容贯穿于每一章,是大专院校机械设计、机械制造、工业工程、工业造型和自动化等专业的研究生、高年级学生的专业课教材,也是制造企业、科研单位从事生产、管理的领导者和工程技术人员学习或参考用书。

在本书撰写过程中,得到各方面朋友的关心、支持和帮助,特别得到同济大学张曙教授和华中科技大学王运赣教授的指点,参阅了国内、外同行的专著、学术论文、学位论文、研究报告、网络信息及其厂家广告,在此一并向这些研究成果的原作者和发布者表示感谢。

由于作者水平有限,加之快速成形技术本身就是一门发展迅速的新兴学科和技术,新的工艺、材料和应用不断出现,书中难免有错误和疏漏之处,敬请广大读者给予批评指正。

作 者

2003年5月于上海

目 录

序 前言

1 快速成形制造技术概论	(1)
1.1 快速成形技术产生的背景	(1)
1.2 快速成形原理	(2)
1.3 快速成形与产品创新	(3)
1.3.1 产品创新的概念和含义	(3)
1.3.2 产品快速开发的支撑技术	(4)
1.4 快速成形技术在产品设计和制造中的作用	(6)
1.4.1 概述	(6)
1.4.2 快速成形技术在工业领域中的应用	(8)
1.4.3 快速成形技术在医学上的应用	(11)
思考题	(11)
2 快速成形过程与三维模型的建立	(13)
2.1 快速成形过程	(13)
2.2 几何建模	(14)
2.3 三维模型的构造	(15)
2.3.1 计算机辅助设计软件	(15)
2.3.2 模型输出常用的文件格式	(16)
2.3.3 用扫描机构造三维模型	(17)
2.4 三维模型的近似处理	(22)
2.4.1 STL 格式文件	(22)
2.4.2 STL 文件格式的规则和缺陷	(23)
2.5 线宽自动补偿	(25)
2.5.1 实体截面轮廓的内、外边界的自动识别	(25)
2.5.2 截面轮廓边界的走向确定	(27)
2.5.3 边界顶点的凹凸性判别及制件侧角度的求取	(27)
2.5.4 线宽自动补偿类型的确定	(28)
思考题	(28)

3 液态光敏聚合物选择性固化	(29)
3.1 概述	(29)
3.2 液态光敏聚合物选择性固化成形的基本原理与系统	(30)
3.2.1 液态光敏聚合物选择性固化成形的基本原理	(30)
3.2.2 液态光敏聚合物选择性固化成形系统	(30)
3.3 液态光敏聚合物选择性固化快速成形机	(33)
3.3.1 3D SYSTEMS公司的SLA系列快速成形机	(33)
3.3.2 西安交通大学的系列快速成形机	(35)
3.4 光敏树脂	(38)
3.5 精度与操作事项	(39)
3.5.1 精度	(39)
3.5.2 操作事项	(40)
3.6 应用案例	(41)
思考题	(44)
4 薄型材料选择性切割	(45)
4.1 概述	(45)
4.2 薄型材料选择性切割的基本原理	(45)
4.3 薄型材料选择性切割的快速成形机	(47)
4.3.1 HELISYS公司的快速成形机	(47)
4.3.2 清华大学激光快速成形中心的SSM系列快速成形机	(47)
4.3.3 华中科技大学快速制造中心的HRP系列快速成形机	(51)
4.3.4 新加坡KINERGY公司ZIPPY系列快速成形机	(53)
4.3.5 上海富奇凡机电科技发展有限公司的SPEEDA2000快速成形系统	(54)
4.4 影响成形精度的主要因素	(58)
4.4.1 CAD模型的前处理造成的误差	(58)
4.4.2 快速成形机的误差	(59)
4.4.3 成形过程中的误差	(59)
4.4.4 成形后环境变化引起的误差	(60)
4.4.5 制件后处理不当造成的误差	(60)
4.5 LOM型快速成形机用材料	(60)
4.6 应用案例	(60)
思考题	(62)

5 丝状材料选择性熔覆	(63)
5.1 概述	(63)
5.2 丝状材料选择性熔覆的基本原理与系统组成	(64)
5.2.1 丝状材料选择性熔覆的基本原理	(64)
5.2.2 FDM 快速成形机的系统组成	(64)
5.3 丝状材料选择性熔覆的快速成形机	(66)
5.3.1 STRASYS 公司的快速成形机与建立材料	(66)
5.3.2 清华大学激光快速成形中心的 MEM 系列快速成形机	(71)
5.3.3 新加坡 KINERGY 公司 SW 系列快速成形机	(74)
5.4 快速成形制件可能出现的缺陷	(76)
5.4.1 快速成形制件可能出现的表面缺陷	(76)
5.4.2 快速成形制件可能出现的内部缺陷	(77)
5.5 应用案例	(79)
思考题	(82)
6 粉末材料选择性激光烧结	(83)
6.1 概述	(83)
6.2 粉末材料选择性激光烧结成形原理与系统组成	(83)
6.2.1 粉末材料选择性激光烧结成形原理	(83)
6.2.2 SLS 成形机的系统组成	(84)
6.3 粉末材料选择性激光烧结快速成形系统	(86)
6.3.1 ATI 公司粉末材料选择性激光烧结系统	(87)
6.3.2 3D SYSTEMS 公司粉末材料选择性激光烧结系统	(88)
6.3.3 EOSINT 公司(德国)的粉末材料选择性激光烧结系统	(90)
6.3.4 北京隆源自动成形系统有限公司的粉末材料选择性激光烧结系统	(90)
6.3.5 华中科技大学快速成形中心的粉末材料选择性激光烧结系统	(92)
6.4 粉末材料选择性激光烧结系统使用的一些材料及其性能	(94)
6.4.1 LaserForm™ ST-100	(94)
6.4.2 CastForm™ PS	(94)
6.4.3 DuraForm™	(95)
6.4.4 几种 SLS 材料的性能	(95)
6.5 SLS 快速成形机的特点	(96)
6.6 扫描方式	(97)
6.7 应用案例	(100)
思考题	(101)

7 低价位快速成形机	(103)
7.1 国际市场上低价位快速成形机的现状	(103)
7.2 低价位快速成形机实例	(104)
7.2.1 ThermoJet 3D Printer 快速成形机	(104)
7.2.2 Objet Quadra 快速成形机	(107)
7.2.3 Z-CORPORATION 公司的低价位快速成形机	(108)
7.2.4 STRATASYS 公司的低价位快速成形机	(110)
7.2.5 Model Maker II 型低价位快速成形机	(115)
7.2.6 TSJ 系列低价位快速成形机的研究与开发	(118)
7.3 国际市场上低价位快速成形机特点	(119)
7.4 应对低价位快速成形机的策略	(120)
思考题	(120)
8 快速模具制造	(121)
8.1 概述	(121)
8.1.1 实现快速制模的意义	(121)
8.1.2 传统制模方法	(121)
8.1.3 快速制模技术	(122)
8.1.4 快速模具的局限性	(124)
8.1.5 快速制模技术的发展	(125)
8.2 快速软模(Soft Tooling)制造	(126)
8.2.1 快速软模特性	(126)
8.2.2 快速软模制作用材料	(127)
8.3 快速过渡模(Bridge Tooling)制造	(134)
8.3.1 铝填充环氧树脂(CAFÉ)模	(134)
8.3.2 SLA 成形的树脂壳-铝填充的环氧树脂背衬(Direct AIM)模	(135)
8.3.3 SLS 直接烧结低碳钢-渗铜模	(136)
8.3.4 低熔点金属模	(137)
8.3.5 三维打印-渗铜(Prometal)模	(137)
8.3.6 纤维增强聚合物压制(SwifTool)模	(139)
8.4 快速批量生产用模具	(139)
8.4.1 直接金属激光烧结模	(139)
8.4.2 3D Keltool 模	(140)
8.4.3 直接金属沉积	(141)
8.4.4 金属喷射沉积	(142)

8.4.5 “打印”粉末金属	(143)
8.4.6 电铸模	(143)
8.4.7 快速熔模铸造金属模	(145)
8.5 快速模具制造在铸造中的应用	(147)
8.6 硅砂直接激光烧结与它在快速制模上的应用	(148)
思考题	(149)
参考文献	(151)

快速成形制造技术概论

1.1 快速成形技术产生的背景

随着全球市场一体化的形成,制造业的竞争十分激烈,新产品的开发和上市速度已成为市场竞争的关键因素。尽管借助虚拟产品开发技术可缩短新产品的设计周期,但在许多情况下,仍然需要或希望能够快速制造出产品的物理原型(样机、样件),以便征求包括用户在内的各方面意见,反复进行修改,在短期内就形成能投放市场的定型产品。用传统的方法制造物理原型时,通常需要使用多种机床设备和工模具,费时又费钱。有些企业往往由于缺乏原型制作能力而造成产品设计不尽合理或上市太慢,错过大好的市场机遇。

由于产品复杂程度的增加,其信息量随产品设计和制造过程的进展而增大,生成和修改信息的费用也随之增高,设计自由度减少。因此,人们希望在设计初期能通过计算机仿真和成形增加产品信息量,以便实施并行工程(Concurrent Engineering,简称CE),将产品和过程的设计加以集成,防止投产后发现问题造成不可挽回的损失。为此,对集成化的产品和过程设计来说,物理成形的实物信息仍然是不可缺少的组成部分。此外,为了满足客户在品种、批量和供货时间上越来越苛刻的需求,以及新产品推销和展览的需要,企业还必须掌握灵活性强、市场响应速度快、能以小批量甚至单件生产而不明显增加产品成本的技术。

针对这一问题,20世纪80年代末出现了快速成形技术(Rapid Prototyping,简称RP)。它涉及CAD/CAM技术、数据处理技术、材料技术、CNC技术、测试传感技术、激光技术和计算机软件技术等,是各种高技术的综合应用,如图1.1。

快速成形技术、数字原型和虚拟原型技术一起,都是产品创新和快速开发的重要手段,他们已成为先进制造技术群的重要组成部分。20世纪80年代末期出现的快速成形技术就是在这样的背景下产生的。RP技术在不需要任何刀具、模具及工装卡具的情况下,可将任意复杂形状的设计方案快速转换为三维的实体模型或样件,这就是RP技术所具有的潜在的革命意义。它为技术人员之间,以及技术人员与企业

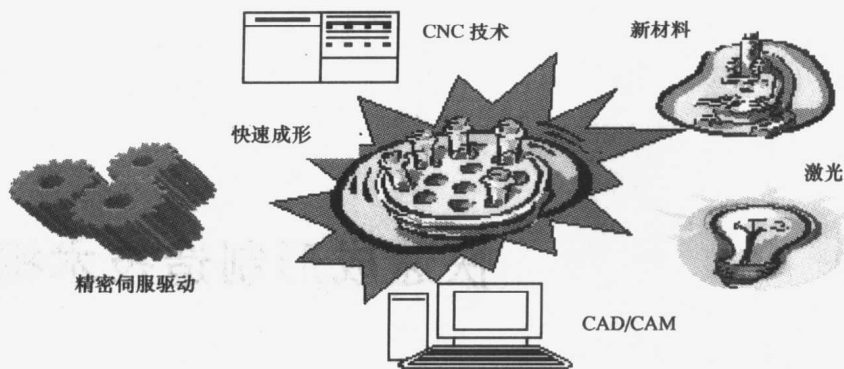


图 1.1 快速成形——多种先进技术的集成

决策者、产品的用户等非技术人员之间提供了一个更加形象、完整、方便的工程交流工具。快速、准确、以及制造复杂模型的能力是 RP 技术突出的优点。用 RP 技术快速制造出的模型或样件可直接用于新产品设计验证、功能验证、外观验证、工程分析、市场订货以及企业的决策等,非常有利于早找错、早修改、早优化,从而大大提高了新产品开发的一次成功率,缩短了开发周期,降低了研发成本。同时,RP 技术有力地支持了同步工程的实施,可为制造业企业带来不可估量的收益。

1.2 快速成形原理

快速成形将计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机数字控制(CNC)、激光、精密伺服驱动和新材料等先进技术集于一体。依据计算机上构成的工件三维设计模型(图 1.2a),对其进行分层切片,得到各截面的二维轮廓(图 1.2b)。按照这些二维轮廓,成形头选择性地固化一层一层的液态树脂(或切割一层一层的纸、烧结一层一层的粉末材料、喷涂一层一层的热熔材料或黏结剂等),形成各个截面轮廓(图 1.2c),并逐步有序地叠加成三维工件(图 1.2d)。

快速成形技术彻底摆脱了传统的“去除式”加工法——部分去除大于工件的毛坯上的材料来得到工件。而采用全新的“添加式”加工法——用一层一层的二维模型逐步叠加成大工件,将复杂的三维加工分解成简单的二维加工组合,因此,它不必采用传统的加工机床和模具,快速成形建立产品样品或模具的时间和成本只有传统加工方法的 10%~30%和 20%~35%。由于快速成形具有上述突出的优势,所以近年来发展迅速,已成为现代先进制造技术中的一项支柱技术,是实现并行工程必不可少的手段。

快速成形法具有下列特点和优点:

(1) 更适合于形状复杂的、不规则零件的加工。

(2) 减少了对熟练技术工人的需求。

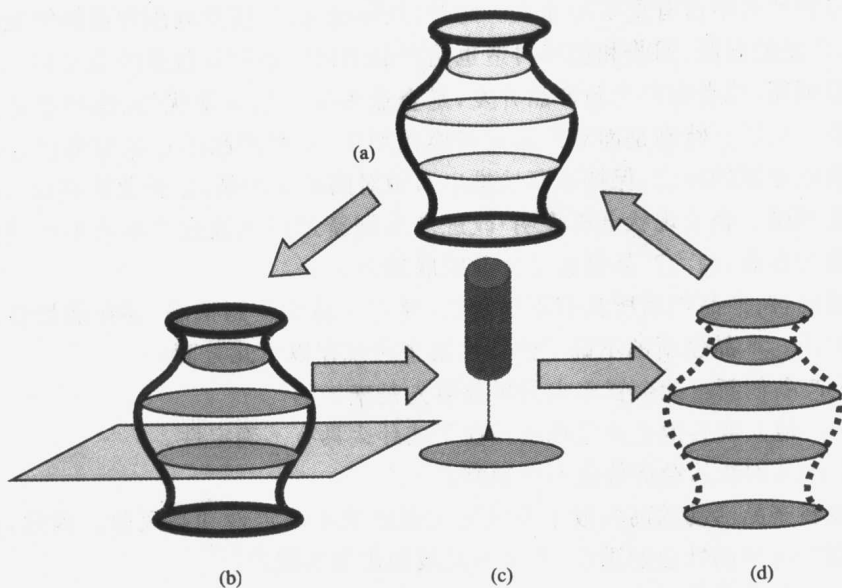


图 1.2 快速成形的成形过程

- (3) 没有或极少废弃材料,是一种环保型制造技术。
- (4) 成功的解决了计算机辅助设计中三维造型“看得见,摸不着”的问题。
- (5) 系统柔性高,只需修改 CAD 模型就可生成各种不同形状的零件。
- (6) 技术集成,设计制造一体化。
- (7) 具有广泛的材料适应性。
- (8) 不需要专用的工装、夹具和模具,大大缩短新产品试制时间。
- (9) 零件的复杂程度与制造成本关系不大。

以上特点决定了快速成形法适合于新产品开发、快速单件及小批量零件制造、复杂形状零件的制造、模具设计与制造,也适合于难加工材料的制造、外形设计检查、装配检验和快速反求工程等。

1.3 快速成形与产品创新

1.3.1 产品创新的概念和含义

什么是产品?随着科学技术的进步,产品越来越复杂,更新换代日益加速,产品的生命周期不断缩短,产品的概念也发生了根本的变化。产品不仅是物质形态的,还有知识形态的。大多数的产品实质上已经同时包括了物质和知识两种形态。产品的生产不仅是对物质的加工,还有对大量知识的加工以及融入。产品不仅是在市场上销售的货品,而且是为顾客提供解决问题的方案。顾客的响应度是产品的重要指标,