

国家自然科学基金重点项目

快速原型制造技术

RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING TECHNOLOGY

王秀峰 罗宏杰 编著



0.66

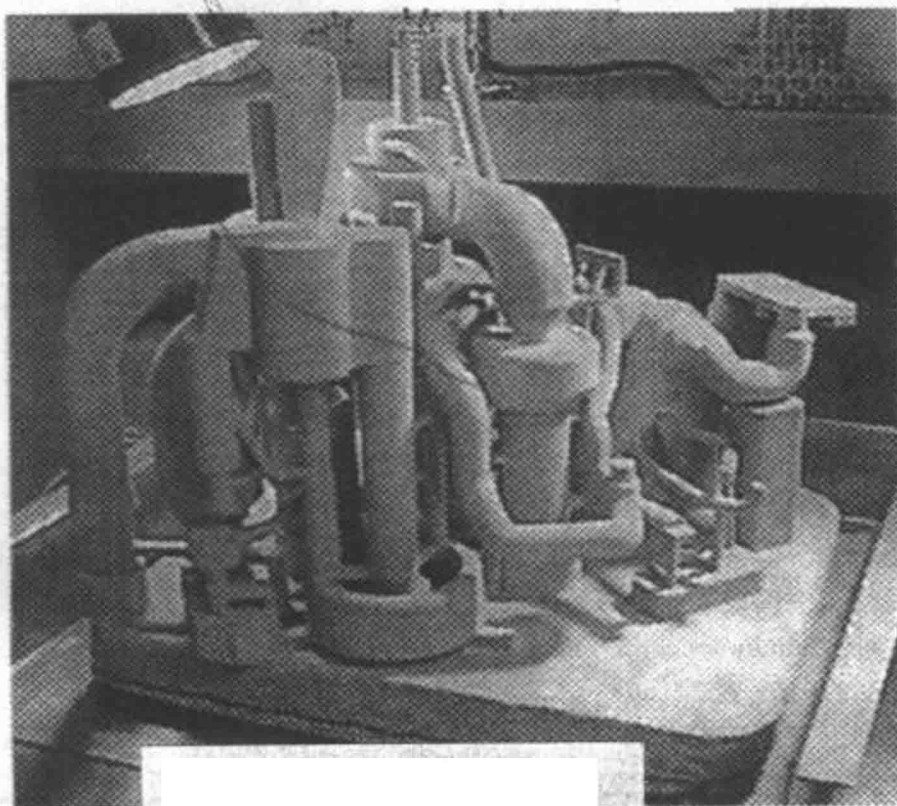
轻工工业出版社


国家自然科学基金重点项目

快速原型制造技术

Rapid Prototyping Manufacturing Technology

王秀峰、罗宏杰 编著



 中国轻工业出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

快速原型制造技术 / 王秀峰, 罗宏杰编著. —北京:
中国轻工业出版社, 2001. 1
国家自然科学基金重点项目
ISBN 7-5019-2945-9

I. 快... II. ①王... ②罗... III. 材料-成型
IV. TQ320. 66

中国版本图书馆CIP数据核字 (2000) 第44200号

责任编辑: 李建华

策划编辑: 李建华 责任终审: 滕炎福 封面设计: 崔云

版式设计: 丁夕 责任校对: 李靖 责任监印: 崔科

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街6号, 邮编: 100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

联系电话: 010—65241695

印 刷: 三河市艺苑印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2001年1月第1版 2001年1月第1次印刷

开 本: 850×1168 1/32 印张: 8.875

字 数: 231千字 印数: 1~2500

书 号: ISBN 7-5019-2945-9/TH·057 定价: 20.00元

• 如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换 •

内 容 简 介

快速原型制造技术是20世纪80年代末出现的一门综合性、交叉性前沿技术，内容涉及产品的设计、制造、经营、管理和市场的各个方面，是关系到生产力水平的先进制造技术之一。本书根据国外、国内发展以及作者近年来的研究成果写成。书中收集了快速原型制造技术的最新内容，建立了比较系统的内容结构体系；详细阐述了快速原型制造技术的概念、基本内容和主要技术手段，比较了不同工艺的特点；重点对已经商业化的制造技术原理和工艺过程作了深入分析；探讨了数据处理与软件开发、材料选择和工程应用等问题，介绍了相关的设备，并指出了这一技术今后的发展方向。书后列有参考文献并附有国内外主要从事快速原型制造技术的公司与研究机构的地址、网址以及重要的英中文字术语。

本书的特点是内容新、资料全、系统性强。本书可作为机械工程、工业工程、材料工程等相关学科和专业的教学参考书和研究生教材，也可供有关专业的管理人员和科技人员学习使用。

前 言

公认产品市场竞争能力高低的五个要素是：市场的需求性、生产周期、质量保证、价格、服务。这五个要素相辅相成，缺一不可。

制造的目的在于采用有效的方法，将原材料转化为产品并投放市场，以满足人们的需要。社会的发展和进步离不开制造业的革新，因而制造技术的发展是一个国家经济持续增长的根本动力。为了赢得市场，就必须对制造技术给予充分的重视，在竞争要素上寻找突破点：一、开发出市场急需、功能实用、按用户要求制造的产品；二、尽可能缩短从产品设计到投放市场的时间；三、保证产品质量的优异，并满足环保的要求；四、不断降低产品的成本；五、能够提供有效的服务。

面对市场的激烈竞争和新技术的不断涌现，制造业在产品结构、生产模式和生产过程方面正发生着深刻的变化。产品结构朝着实用、高效、节能、小型、优质方向发展，生产模式朝着多品种、小批量、单件、柔性方向发展，生产过程则朝着短周期、精密、自动化方向发展。现在，各国科技人员都在竞相采用新的计算方法、材料技术、信息资源和新的质量管理手段用于产品开发。

快速原型制造是20世纪80年代后期国际上出现的新技术，引发了制造技术思维方式和生产效率的变革，受到世界许多国家政府、企业界和学术界的高度重视。结合精良生产（Lean-Production）、零库存、无废品及并行工程（Concurrent Engineering，亦称同步工程Simultaneous Engineering）理论，快速原型制造技术综合了产品市场竞争能力高低的五个要素，能够使

企业尽可能快而且大地占领市场，获得利润。

快速原型制造技术（Rapid Prototyping Manufacturing Technology）是将原型（或零件、部件）的几何形状、所选材料的构造和有关的组合信息建立数字化描述模型，将这些信息输出到计算机控制的机电集成制造系统进行材料的“添加”加工过程。与数控机床的“去除”加工原理不同，快速原型制造能够快速、有效地制造复杂形状和结构的实体。尽管这项新技术取得了巨大的成功，但在实用技术的发展 and 理论研究方面仍有许多需要解决的问题。

为了推动快速原型制造技术在我国的研究和应用，给相关学科的教师、研究生、大学生、企业技术人员、管理和决策人员及政府官员提供一本全面、系统地介绍快速原型制造技术及其最新发展的教材和参考书，我们编写了这本《快速原型制造技术》。

本书共分11章，系统地介绍了快速原型制造技术的概念、原理、主要技术手段和应用领域；重点分析了已经商业化的制造技术原理和工艺特点，介绍了软件工程、材料开发等基础理论和相关的设备，结合这一技术的最新成果，阐述了快速原型制造技术的发展方向，建立了比较系统的内容结构体系。

本书第1章至第5章、第8章至第11章由王秀峰编写，第6章、第7章由罗宏杰编写。在本书编写过程中，参阅了国内外同行的专著、学术论文、学位论文、研究报告、网络信息及厂商广告，在此向这些研究成果的始作者和发布者表示感谢。

由于快速原型制造技术的概念提出的时间不长，还未形成完整的理论体系，加之新技术、新方法不断出现和发展，更限于作者水平和学识，书中疏漏、谬误之处，敬请读者指正。

作者

2000年7月

目 录

第1章 概论	1
1.1 快速原型制造技术的概念 及与其他学科的关系	1
1.2 快速原型制造技术的特点	9
1.3 快速原型制造技术的分类	11
1.4 快速原型制造技术应用事例	14
1.5 快速原型制造技术的发展历史与现状	15
1.6 快速原型制造技术的发展趋势	21
第2章 立体印刷成型	30
2.1 概念	30
2.2 工艺原理	31
2.3 系统组成与工艺步骤	33
2.4 精度与工艺改进	41
2.5 立体印刷成型技术的研究 现状与存在的问题	50
2.6 应用	53
第3章 层合实体制造	57
3.1 概念	57
3.2 工艺原理	58
3.3 系统组成与工艺步骤	60
3.4 精度与工艺改进	65
3.5 应用	73
第4章 选域激光烧结	79

4.1 概念	79
4.2 工艺原理	80
4.3 系统组成	82
4.4 工艺步骤	88
4.5 应用	94
4.6 商用制造设备的开发	98
第5章 熔融沉积造型	103
5.1 概念	103
5.2 工艺原理	104
5.3 制造系统及其特点	105
5.4 精度分析与控制	108
5.5 应用	112
第6章 其他技术	116
6.1 三维喷涂粘接	117
6.2 焊接成型技术	121
6.3 掩膜光刻	124
6.4 数控加工	131
第7章 数码累积	133
7.1 概念	133
7.2 空间单元表示法	134
7.3 数码累积制造的研究意义	136
7.4 数码累积制造的主要研究内容	140
7.5 在古陶瓷复制制中的应用研究	141
第8章 数据处理与软件开发	149
8.1 几何建模和计算机内部表示	149
8.2 数据处理方法与改进	151
8.3 应用软件系统	160
8.4 CAD过程	170
8.5 CAM过程	174

8.6 自适应轨迹特征的插补算法	175
第9章 实体数据测量与反求	178
9.1 实体数据测量与反求的概念	178
9.2 反求的目的和内容	180
9.3 实体数据测量与反求方法	183
9.4 测量数据处理与误差修正	189
9.5 基于全景图像的快速体元造型	190
第10章 材料工程与原型制造	194
10.1 材料的选择	194
10.2 原型制造基础	197
10.3 快速原型制造技术在铸造中的应用举例	206
10.4 用于快速原型制造的材料特性研究	208
第11章 快速原型制造技术的应用	212
11.1 原型制造	212
11.2 模具制造	216
11.3 模型制造	224
11.4 零部件及工具制造	226
参考文献	229
附录A 快速原型制造技术研究机构、 公司、服务机构名录	239
附录B 英中文术语	264
后 记	269

第1章 概 论

快速原型制造技术20世纪80年代起源于日本，很快发展到美国和西欧，是近20年来制造技术领域的一次重大突破。快速原型制造技术是CAD、数控技术、激光技术以及材料科学与工程的技术集成，它可以自动、快速地将设计思想物化为具有一定结构和功能的原型或直接制造零部件，从而可以对产品设计进行快速评价、修改，以响应市场需求，提高企业的竞争能力。快速原型制造技术的出现，反映了现代制造技术本身的发展趋势以及激烈的市场竞争对制造技术发展的重大影响。

1.1 快速原型制造技术的概念及与其他学科的关系

1.1.1 快速原型制造技术的概念

1.1.1.1 原型

原型（Prototype）是指用来建造未来模型或系统基础的一个初始模型或系统（An initial model or systems that is used for constructing future models or systems）。美国麻省理工学院K T Ulrich认为，原型是产品在我们感兴趣的一维或多维空间中的一种表示。换句话说，产品开发人员认为有意义的产品在某个方面的表示，都可以看作是原型，即包括了从概念设计到具有完整功能制品的有形和

无形的表示。

根据上述定义，原型可以分为物理原型和分析原型。物理原型是近似或直接为产品的有形实体表示。物理原型是实际存在的，可以进行检测和试验，在视觉和触觉上都类似于产品。分析原型是产品的非有形表示。实际中分析原型没有被制造出来，但它们是以仿真、视觉图像、方程或分析结果表示的。在大多数情况下，原型是指物理原型，即是物体在三维空间的实物表示。本书以下所称原型均指物理原型。

原型是能基本代表零部件性质和功能的试验件，从表面质量、色彩等方面可具有零部件的特征，但不具备或不完全具备零部件的功能。零部件是最终产品，具有最佳特性、功能和成本。原型一般数量较少，主要是用于实体观察、分析、试验、校核、展示、直接使用或间接制造模具。与二维图纸相比，原型可以对于产品设计和开发过程提供许多有价值的资料。在设计部门内部、其他部门以及市场上的用户之间，原型是交流设计概念的最好工具。今天比过去更需要原型还在于产品复杂性和人们审美标准的提高。

原型可以由两种方法产生，一种是利用已有的知识和技术，按目的要求进行设计、加工，或由设计者利用CAD/CAM系统，通过构想在计算机上建立原型的三维电子模型并加工成实物。另一种方法则是通过反求技术实现，即由用户提供一个实物样品，原封不动或经过局部修改后得到这个样品的复制品或仿制品。

1.1.1.2 快速原型制造

原型制造 (Prototyping) 是设计、建造原型的過程。

一般来说，物体成型的方式分为三类：去除成型 (Dislodge Forming)、添加成型 (Adding Forming) 和静尺寸成型 (Net Forming)，原型的制造也是如此。

去除成型指从标准工件中除去某些部分而达到设计要求的零部件的形状和尺寸，如车削、铣削、刨削、磨削、切割、钻孔等。现

代的电火花加工、激光切割、激光打孔等加工方法也是去除成型。去除成型最早实现了数字化控制，是目前主要的成型方式。

添加成型又称堆积成型（Stacking Forming），是通过逐步连接原材料颗粒、丝杆、层板等，或者是通过流体（熔体、液体或气体）在指定位置凝固定形达到目的，如连接与焊接、安装、涂层、固化等，其最大特点是不受成型零件复杂程度的限制。

净尺寸成型又称受迫成型（Forced Forming），是利用材料的可成型性（如塑性等），在特定外围约束（边界约束或外力约束）下将半固化的流体材料挤压成型后再硬化、定形，或挤压固体材料而达到要求，如浇铸、锻压、冲压粉末冶金、注塑、改性等，多用于毛坯成型、特种材料或特种结构成型，或直接用于最终零件成型等。

还有一种方式，即生长成型（Growth Forming），通过模拟、利用自然界中生物发育过程实现材料的生物活性成型。目前人为系统中还没有这种成型方式，但随着生命科学、仿生学、材料科学及制造科学与工程的发展，人们有可能采用这种成型方式进行人工生物成型。

在前三种成型方式中，去除成型与净尺寸成型均属于传统成型方式。多数情况下，原型或零件难以用净尺寸成型工艺一次达到成品要求，而且成型也会产生工艺废料，如浇冒口、飞边等。现代去除成型工艺可以由三维CAD/CAM软件进行产品造型，生成数控代码，然后通过数控设备加工出所需要的零件来。这种方法可用于批量较大、形状规则的零件。但是，对于形状不规则且内部结构复杂的零件来说，用材料去除成型工艺加工起来很困难，有时甚至不可能。同时，去除成型会产生切削屑，材料利用率较低。这种情况下就可以采用添加成型工艺进行加工制造。添加成型工艺在成型思想上突破了传统的成型方法，通过快速、自动成型系统与计算机数据模型相结合，能够制造各种复杂形状的原型或零件，可以使生产周期大大缩短，生产成本大幅度降低。

快速原型制造技术是一种借助计算机辅助设计，或用实体反求方法采集得到有关原型或零件的几何形状、结构和材料的组合信息，从而获得目标原型的概念并以此建立数字化描述模型，之后将这些信息输出到计算机控制的机电集成制造系统，通过逐点、逐面进行材料的“三维堆砌”成型，再经过必要的处理，使其在外观、强度和性能等方面达到设计要求，达到快速、准确地制造原型或实际零件、部件的现代化方法。其技术原理见图1-1。快速原型制造技术需要研究、考察各种原型建造方法、转换技术和测量技术，寻求更好的原型材料并评价原型对于制造业的影响。

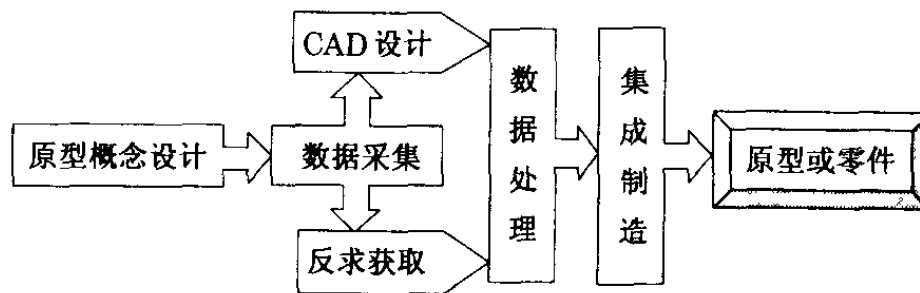


图 1-1 快速原型制造技术原理

目前，快速原型制造技术的原理都是采用分层累加法，即用CAD造型、生成STL文件、分层切片等步骤进行数据处理，借助计算机控制的成型机完成材料的形体制造。事实上，这是一种材料的添加成型制造工艺，是随着CAD/CAM技术、数控技术、激光加工技术、材料技术而发展起来的。这种新技术随着发明者和制造工艺特点的不同而产生了许多名称，例如快速原型制造（Rapid Prototyping Manufacturing）、增材制造（Material Increase Manufacturing）、直接CAD制造（Direct CAD Manufacturing）、快速制造（Rapid Manufacturing）、实体自由成型（Solid FreeForm Fabrication）、无模制造（Non-Model Manufacturing）、桌面制造（Desktop Manufacturing）等，但尚无统一的标准名称。也有按不同工艺路线而得名的立体印刷成型（Stereo Lithography

Apparatus)、层制造(Layer Manufacturing)、三维打印(3D Printing)、立体印刷(Stereo Printing)、激光切割胶合(Laser Cutting Cohering)等。不论何种名称,其基本思想都是相近的,只是不同的工艺有不尽相同的制造原理和工艺路线,采用不同的原材料,设备有不同的使用功能。

在已经商业化的快速原型制造技术中,单体制成品中采用的材料往往是单一的。现在,这一技术越来越多地采用了其他学科的先进设计思想、工艺手段和研究成果,并在更广泛的领域里获得了应用。例如,在生物工程材料方面,在艺术品的设计与加工方面,在文物的复制与仿制方面,在建筑设计模型和新产品展示方面,在复合结构、梯度结构、不规则结构、包含一定孔结构的材料的制备方面,甚至在具有特定的力学、电学、声学、光学、化学与生物学功能的多种材料制备等方面都有了突破性进展,原有的快速原型制造技术的内涵已经发生了很大的变化。

根据这一技术的基本原理、实现制造的过程和特点,我们将以数据图像处理 and 材料三维堆砌为基础的各种加工工艺统称为快速原型制造技术。其中,工艺原理、计算机技术、所用材料特性和集成加工设备是决定性因素,见图1-2。

这种新技术的思路源于三维实体被切割成一系列微小单元的逆过程,通过不断地把材料按指定路径添加到未完成的制件上,采用聚合、粘结、熔结、烧结等化学的和(或)物理的手段,有选择性地固化液体或粘结固体材料,从而制作出所要求形状的原型或零部件。通常,原型或零件是逐层累积起来,并最终达到设计的式样和性能要求。

快速原型制造技术的一般步骤是:①建立三维数据模型;②

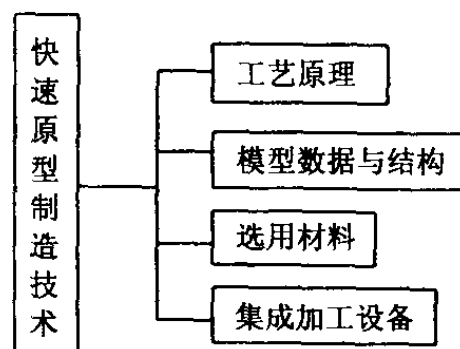


图 1-2 快速原型制造技术的要素

寻找可加工、应用的材料，如流体、粉末、丝线、板材或块体；③使用不同物理原理的高度集成化设备；④原型或零件的堆砌制造；⑤原型或零件的后处理。

快速原型制造技术也是近年来增长最快的工业领域之一。随着快速原型制造技术不断成熟和应用领域逐渐扩大，这一技术将发展成为一种能被企业普遍采用的手段，给企业自身和社会带来巨大的经济效益。传统的制造、加工过程，按零件的复杂程度和采用的方法往往需要几周甚至几个月的时间。基于计算机对物体几何形状、结构与连接状态的描述，快速原型制造技术旨在直接、快速地在三维空间呈现真实的物体。使用这一技术后，典型原型或零件的制造时间从几小时到几十小时便可完成。1998年，由快速原型制造技术产生的直接经济收入高达10亿美元。毫无疑问，快速原型制造技术将与20世纪50年代的数控技术和最近20年发展起来的特种加工技术一样对材料的生产、加工过程和制造工程产生重要的影响。

1.1.2 快速原型制造技术与相关学科之间的关系

快速原型制造技术是多个学科的技术集成，与许多学科有密切的关系。它是这些学科协调发展的结果，同时又为这些学科的发展增添了新的研究内容。

1.1.2.1 与 CAD/CAM 技术之间的关系

CAD/CAM技术是快速原型制造技术产生的前提和基础。以前，人们对新产品的开发沿用构思—绘图设计—制造原型—模具加工—零件生产的工艺路线。由于原型制造是在设计过程结束后进行的，很难在设计的前期阶段发现原型的缺陷或不足。要弥补这些缺陷，就需要重复产品的设计过程，从而大大延长了产品的开发周期，提高了制造成本。

CAD/CAM技术的产生和发展，不仅为设计者提供了简便易行

的显示和修改手段,更重要的是,这种方法可以获得完整的、便于重复利用、修改和进一步处理的数据。同时,快速原型制造技术的发展,又促进CAD/CAM技术的发展,如数据交换STL文件、分层软件等的开发。快速原型制造技术使得CAD/CAM的几何图形实体化,是CAD/CAM技术的发展。

1.1.2.2 与加工能源技术之间的关系

快速原型制造技术的成型过程采用以激光为主、多种形式的能源。一类是基于激光能量的固化、切割或熔化的方法,另一类是非激光能量堆积成型的方法。能源的选用必须与所使用的原材料综合考虑。特别是在以激光为能源的制造系统中,需考虑到激光束的直径、聚焦、散焦等各种因素。

相比较而言,以激光作为能源的工艺,发展早,更完善,应用也多。激光具有能量集中、易于控制、光斑小、波长恒定等特点,尤其适合作为快速原型制造技术能源。激光技术的发展促进了快速原型制造技术的产生。从几十毫瓦的He-Cd激光器到上千瓦的CO₂激光器、氦离子激光器等在快速原型制造技术中都有应用。

1.1.2.3 与数控技术之间的关系

数控技术是实现快速原型制造技术的桥梁,而快速原型制造技术也向数控技术提出了新的研究课题。不同的工艺方法对数控系统的要求有所不同,由此需要引入可变参数的数控系统。例如,在每次加工一层的掩膜光刻中,控制方式为简单的一轴控制;而在逐层扫描工艺中,数控系统则需要二轴连动,即在X-Y平面内进行加工,Z轴只是在X-Y平面内的加工完成后有规律地调整高度;采用数码累积方式则需要三轴连动或二轴半数控系统。

除了控制运动方式之外,数控技术在快速原型制造技术中的应用还包括了对加工参数的控制,即为了制作出高质量的薄层,要求控制系统能够实现对激光光学参数、几何参数、温度补偿、

功率控制和材料进给作实时补偿控制。此外，与切削加工数控技术相比，快速原型制造要求扫描速度快，定位精度高而且负荷小。所以，快速原型制造技术与数控技术密不可分。

1.1.2.4 与材料科学与工程之间的关系

快速原型制造技术的关键是材料。材料是成型工艺可行与否的前提，材料的性质不但影响原型的质量，而且对原型的应用有决定性影响。例如，立体印刷成型工艺采用的特种光敏树脂要具有高的感光灵敏度、确定的感光波段，固化后能适应各种不同用途；层合实体制造工艺采用涂有粘结剂的纸张，要求纸厚胶薄，纸和胶在切割时不炭化。此时，所使用的粘结剂在很大程度上决定了原型的加工质量和使用性能。

快速原型制造中可使用的材料种类很多。材料研究一直是快速原型制造技术研究中一个热门的、高难度课题。材料科学与工程的发展，尤其是新材料的出现，将会对快速原型制造技术的发展产生重大的影响。反之，这一技术又向材料科学与工程提出新的要求，促进材料设计、制造技术的发展。材料研究的最终目标是开发出可以直接制成所要求性能的实用零部件。

1.1.2.5 与其他相关学科之间的关系

快速原型制造技术还与机械工程、检测技术、电子与信息技术密切相关。机械工程奠定了快速原型制造技术的工艺基础，并为原型的设计提供理论指导。快速原型制造技术推动了快速制模（Rapid Tooling, RT）和快速制造（Rapid Manufacturing, RM）的发展。检测技术利用反馈加工信息了解成型的质量，进而通过这些信息确定补偿的措施，是原型制造过程的必备手段。电子与信息技术则使得各个子系统相互协调并集成在一起。

我们还需要积极探索快速成型技术与电铸、电弧喷涂、等离子喷涂、等离子熔射成型、浇注、精密铸造、电火花等特种加工方法的组合工艺技术，为特殊性能材料零件、金属、非金属零件以及合金属模具的快速制造提供崭新的技术手段。