



概述

第一节 概念、历史、发展



一、概念

快速制造 (RM-rapid manufacturing) 是基于离散堆积成形原理的先进制造技术的总称。

快速原型技术是快速制造大家族中最先产生的制造技术，在此基础上，又出现了快速工具、快速模具和快速生物支架制造等等。

RM 的主要特点有：

- ① 产品的三维 CAD 设计是 RM 的前提；**
- ② 无需任何专用工具，产品的设计数据直接驱动 RM 设备堆积材料而进行成形制造过程；**
- ③ 所完成的是具有使用功能的零件 (functional parts) ；**
- ④ 所完成的功能零件之结构与形状无限制**

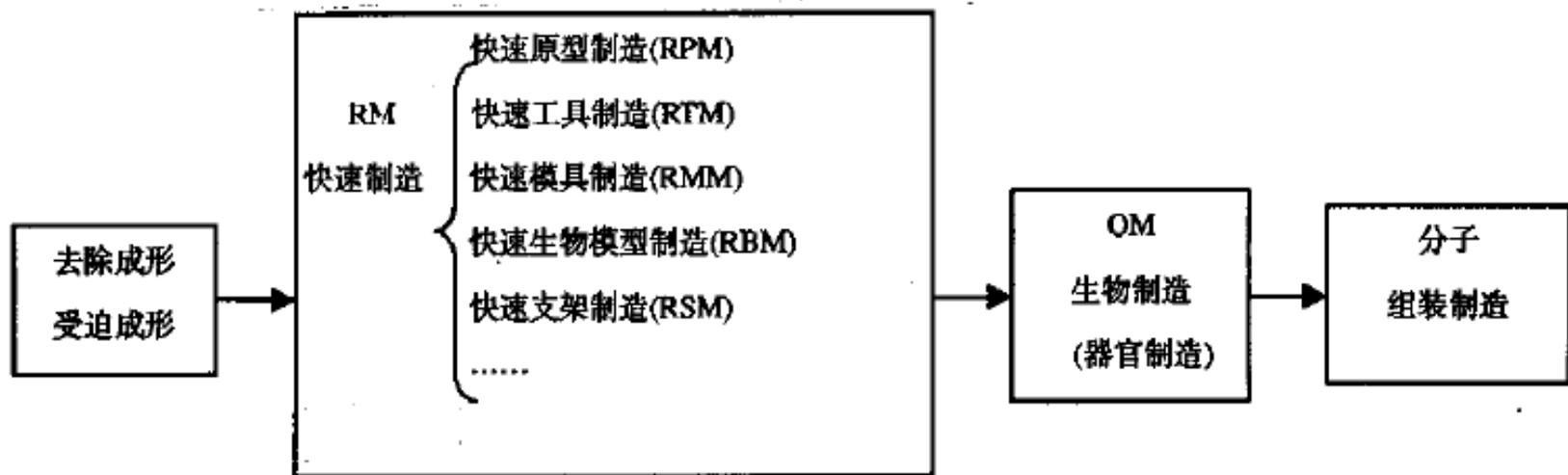


RM 可分为直接快速制造和间接快速制造

:

① 直接快速制造 (direct rapid manufacturing) : 通过 RM 直接完成功能零件 ;

② 间接快速制造 (indirect rapid manufacturing) : 通过 RP 完成工、模具制造, 再采用工、模具进行批量生产。间接制造完成工、模具生产, 也可达到低成本和快速性, 但与直接制造相比, 其快速性要差。



宏观尺度 (传统制造)

宏观尺度

介观尺度

微观尺度

图 1 制造科学技术的发展链

注：与 RM 相比，RM 中的微滴为材料单元，在 OM 中则变成了细胞 - 材料单元，即组装对象从无生命的材料变成有生命的细胞，但它所遵循的制造科学的原理则是相同的——即离散 - 堆积成形。





英国 Loughborough 大学的 P.M.Dickens 等人指出，RM 的最重要的获益是：

- ① 直接快速制造可以避免繁复的工、模具制造；**
- ② 产品制造的耗时可有实质性的降低；**
- ③ 使产品的制造成本有较大的下降。**

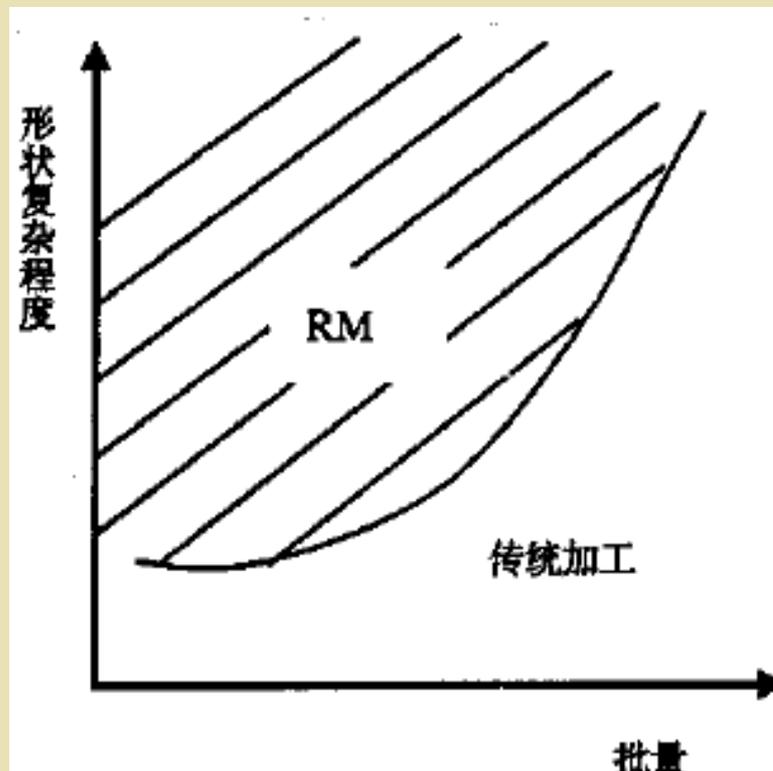


图 2 快速制造与传统加工的对比

由图 2 可见，越是形状复杂且批量小的零件，越应当采用快速制造技术。

Dickens 教授还指出，在成本上，传统工艺制作注塑模与快速制造技术制造注塑模有一个交叉点。

对于 SLS 工艺，当成形件的批量低于 14 000 件时，采用 SLS 工艺快速制造的模具成本低于传统工艺；这个交叉点对于 FDM 工艺是 6 500 件，而对于 SL 工艺是 5 000 件。批量低于上述件数，快速制造模具具有成本上的优势；反之，传统注塑模制造工艺比较合适（图 3）。

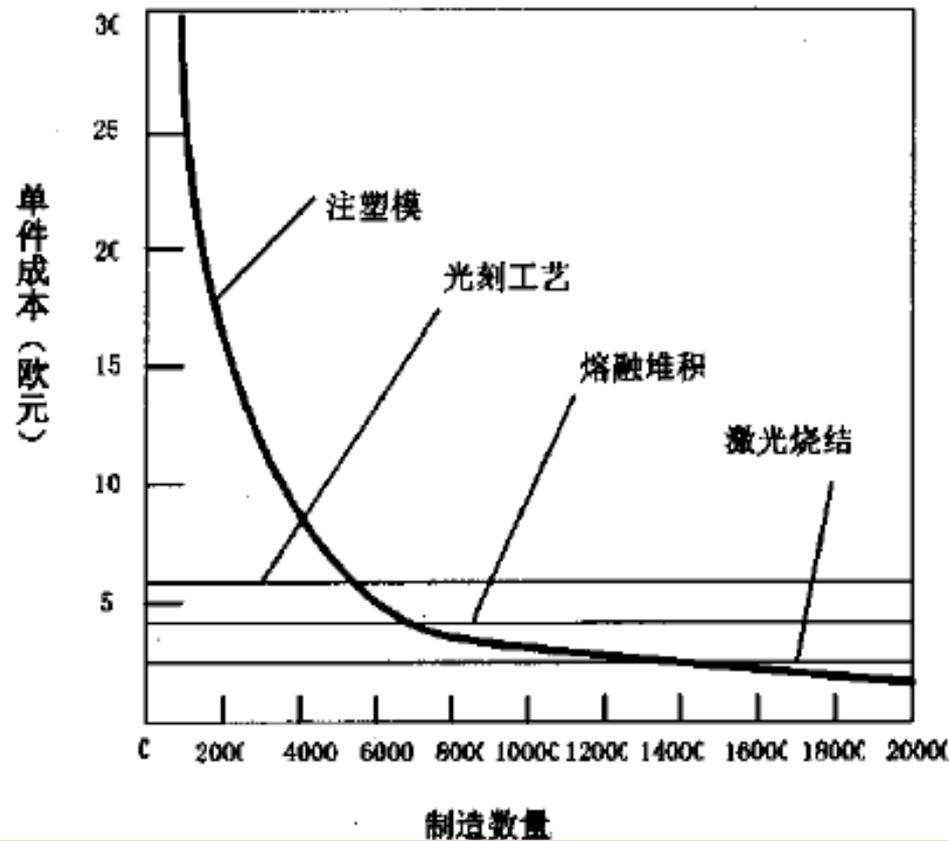


图 3 快速制造工艺选择原则



二、历史

20 世纪 70 年代末到 80 年代初期，美国 3M 公司的 Alan J. Herbert (1978 年)、日本名古屋市工业研究所的小玉秀男 (1980 年)、美国 UVP 公司的 Charles W. Hull (1982 年) 和日本大阪工业技术研究所的丸谷洋二 (1993 年)，各自独立地提出了快速成型 (Rapid Prototyping-RP) 的技术设想，即利用连续层的选区固化生产三维实体。



在 1984 年美国 UVP 公司的 Charles W. Hull 申请了世界上第一台激光固化快速成型 SLA 设备 (SLA-1) 的专利，并且于 1986 年获得通过（美国专利号 US4,575,330），这标志着 RP 技术从研究阶段进入了使用阶段。此后 20 余年间，快速成型技术迈入快速发展期（如表 1）

名称/maker.com	简称	发展时期（年）
立体光成型	SLA	1986-1988
逐层固化法	SGC	1986-1988 这种技术于1999年消失
分层实体制造	LOM	1985-1991
熔丝沉积造型	FDM	1988-1991
选择性激光烧结	SLS	1987-1992
三维喷绘	3DP	1985-1997

表1 快速成型技术的发展沿革

* 摘自：G.N. Levy, R. Schindel, J.P.Kruth, Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives, Annals of the CIRP Vol. 52/2/2003



三、发展

国际统计资料表明，RP 原型中 1/3 被用来作为可视化的手段，用于评估设计、协助设计模具，沟通设计者与制造商及工程投标，1/3 被用来进行试装配和性能试验，如空气动力学试验、应力分析等，1/4 以上用于协助完成模具制造。原型制造的另一个重要应用领域是医疗。它用于制作教学或手术参考的模型，或帮助制造假肢，用于外科修复。



基于快速成形的快速制造技术的最新进展

:

(一) 快速零件制造

(1) 高能束流金属直接熔敷 / 烧结成形 - 激光束聚焦于由金属粉末注射形成的熔池表面，整个装置处于惰性气体保护之下。通过激光束的扫描运动，使金属粉末材料逐层堆积，最终形成复杂形状的零件或模具。

(2) 立体光刻快速制造 - 改进光固化树脂，在保留其高精度的同时，大大提高其强度和韧性



(3) 熔融挤压或三维喷射成形制造 - 改进熔融挤压的材料和成形工艺，提高成形件的强度和精度，使之达到直接快速制造功能零件的目的。

(4) 电子束熔化快速制造 -EBM(electron beam melting) 称为电子束熔化快速制造技术，利用电子束选区熔化金属粉末成形，它由瑞典 Arcam 公司申请专利并进行商业化运行。



(5) 基于电沉积技术的纳米结构零件制造 - 南京航空航天大学快速成形研究中心采用类似于电铸的电沉积技术，研制出相应设备，完善了成形工艺，采用如 Ni、Cu、Co、Ni-Fe、Ni-P、Ni-SiC 等纳米粉材料，实现各种纳米材料零件的制造，其晶粒尺寸为 30 ~ 50nm。



(二) 快速模具制造

(1) 粉末冶金快速模具 - 美国 3D Systems 公司还推出了一种粉末冶金快速模具工艺，这种工艺称作 3D Keltool。

它的制作过程为：首先用 SLA 原型翻制出硅胶模作为中间转换模，然后将混有树脂粘结剂的工具钢粉末灌注到中间模具中，待材料凝固后取出，得到模具生坯件，通过烧结去除粘结剂，得到内部疏松结构（约 30% 孔隙率）的模具熟坯件，最后经过渗铜处理增加材料的致密度和机械强度，通过简单机加工进一步保证模具的精度（可达 0.04 mm），即得 Keltool 模具。

该模具 70% 为钢，30% 为铜，其特性与 P20 工具钢模具类似，可以承受 20 000 ~ 25 000 Pa 的压力和 650 °C 的高温。



(2) 快速精密铸造模具 -Quick Casting 是美国 3D Systems 公司推出的一种工艺。它利用立体光刻 (SLA) 工艺获得零件 / 模具的半中空 RP 原型，然后在原型的外表面挂浆，使一定厚度和粒度的陶瓷壳层紧紧地包裹在原型的外面，再放入高温炉中烧掉半中空原型，得到中空的陶瓷型壳，即可用于精密铸造。浇铸后得到的金属模具还需进行必要的机加工，使其表面质量和尺寸精度达到要求。

该方法的优点是用 SLA 原型代替原来精密铸造中的蜡型，从而大大提高了铸造原型的精度，并且大大加快了制造速度。



(3) 基于沉积技术的模具制造 - 美国斯坦福大学的 Prinz 等采用形状沉积制造 (SDM) 工艺直接制造出含复杂内流道的多组元材料注射模，经过一定的后处理之后，模具的尺寸精度与表面质量均达到要求，这种注射模由于包含其他方法所不能做到的内流道，注射时的冷却效果非常好，因此受到人们的重视。



(4) 光固化直接模具制造 - 美国 3D Systems 公司开发出一种称为直接 AIM 快速制模工艺，它使用立体光刻设备，采用 SL 工艺与特种材料，直接制造出 ACES(accurate clear epoxy solid) 注射模。目前看来这种工艺也有缺点，主要是模具寿命较短，注射零件的复杂程度也受到限制。



(5) 电铸模 - 电铸模是一种结合快速原型和传统电铸工艺的快速模具技术。

它的基本过程为：首先对 RP 原型表面进行必要的处理，如打磨、抛光、涂敷导电层等，然后置入电铸槽中，通过常温电铸获得金属壳层，该壳层的内表面精确地复制出了 RP 原型的外表面，通过中高温烧结去除金属壳内的原型，然后在模具框和金属壳外侧之间浇铸低熔点合金或铝粉 - 树脂混合材料作背衬，即可得到电铸模。



第二节 快速成型技术 (RP)

一、CAD 模型的优缺点

随着设计对象复杂程度的提高，随着旨在提高设计效率、缩短设计周期和提高一次成功率的并行工程的实施，在设计过程早期对模型的要求显得越来越迫切。目前，广泛应用的 CAD 技术在一定程度上帮助设计师掌握创新和风险之间的平衡。



CAD 模型具有很多优点：采用 CAD 生成的三维 CAD 模型，可以进行结构、性能分析，可以进行模拟装配，可以进行外观造型的渲染，甚至可以在虚拟现实环境下进行操作和使用。

但是，CAD 模型的出现，无法、也不可能完全替代其它形式的模型，特别是具有三维实体形态的实体模型。

例如：在产品的造型设计中，不仅要考察产品的外形、色彩效果，甚至要考察其手感；在航空、航天器的设计中，没有因为三维 C



同样，汽车工业中任一新车型开发过程中也不能不进行结构安全性的“碰撞”试验；尽管有十分详尽的军事地图，在大型战役的指挥中，“沙盘”仍是不可缺少的。这一切都源于 CAD 模型的缺陷：

- 1、CAD 模型无法提供产品的全部信息（如手感）；
- 2、CAD 模型只能模拟我们已知的环境条件；
- 3、三维空间中的实体模型比二维屏幕上

的 CAD 模型更缺乏“真实感”和“可制造



4、CAD 模型本身也需要接受实际验证。因此，在大力研究和应用三维 CAD 基础上的拟实设计、拟实制造的同时，还要积极研究和采用同样是在三维 CAD 基础上产生和发展起来的快速成型（RP）技术。CAD 技术和 RP 技术的结合为设计师带来完美的解决方案。



二、快速成形技术工作原理

首先设计出所需零件的计算机**三维模型**（**数字模型、CAD模型**），然后根据**工艺要求**，按照一定的规律将该模型离散为一系列有序的单位，通常在Z向将其按一定厚度进行离散（习惯称为**分层**），把原来的三维CAD模型变成一系列的层片；再根据每个层片的轮廓信息，输入加工参数，自动生成数控代码；最后由成形机成形一系列层片并自动将它们联接起来，得到一个三维物理实体。



三、快速成型技术分类

快速成型技术根据成型方法可分为两类：

(1) 基于激光及其他光源的成型技术 (Laser Technology) ,

例如：光固化成型 (SLA)、分层实体制造 (LOM)、选域激光粉末烧结 (SLS)、形状沉积成型 (SDM) 等；

(2) 基于喷射的成型技术 (Jetting Technology)



四、快速成型技术应用范围

目前 RP 技术的发展水平而言，在国内主要是应用于新产品（包括产品的更新换代）开发的设计验证和模拟样品的试制上，即完成从产品的概念设计（或改型设计）-- 造型设计-- 结构设计-- 基本功能评估 -- 模拟样件试制这段开发过程。对某些以塑料结构为主的产品还可以进行小批量试制，或进行一些物理方面的功能测试、装配验证、实际外观效果审视，甚至将产品小批量组装先行投放市场



快速成型的应用主要体现在以下几个方面：

(1) 新产品开发过程中的设计验证与功能验证。 RP 技术可快速地将产品设计的 CAD 模型转换成物理实物模型，这样可以方便地验证设计人员的设计思想和产品结构的合理性、可装配性、美观性，发现设计中的问题可及时修改。如果用传统方法，需要完成绘图、工艺设计、工装模具制造等多个环节，周期长、费用高。如果不进行设计验证而直接投产，则一旦存在设计失误，将会造成极大的损失。



(2) 可制造性、可装配性检验和供货询价、市场宣传，对有限空间的复杂系统，如汽车、卫星、导弹的可制造性和可装配性用 RP 方法进行检验和设计，将大大降低此类系统的设计制造难度。对于难以确定的复杂零件，可以用 RP 技术进行试生产以确定最佳的合理的工艺。此外，RP 原型还是产品从设计到商品化各个环节中进行交流的有效手段。比如为客户提供产品样件，进行市场宣传等，快速成型技术已成为并行工程和敏捷制造的一种技术途径



(3) 单件、小批量和特殊复杂零件的直接生产。对于高分子材料的零部件，可用高强度的工程塑料直接快速成型，满足使用要求；对于复杂金属零件，可通过快速铸造或直接金属件成型获得。该项应用对航空、航天及国防工业有特殊意义。



(4) 快速模具制造。通过各种转换技术将 R P 原型转换成各种快速模具，如低熔点合金模、硅胶模、金属冷喷模、陶瓷模等，进行中小批量零件的生产，满足产品更新换代快、批量越来越小的发展趋势。快速成型应用的领域几乎包括了制造领域的各个行业，在医疗、人体工程、文物保护等行业也得到了越来越广泛的应用。



五、快速成型技术在各行业中的应用：

(1) 汽车、摩托车：外形及内饰件的设计、改型、装配试验，发动机、汽缸头试制。

(2) 家电：各种家电产品的外形与结构设计，装配试验与功能验证，市场宣传，模具制造。

(3) 通讯产品：产品外形与结构设计，装配试验，功能验证，模具制造。



(4) 航空、航天：特殊零件的直接制造，叶轮、涡轮、叶片的试制，发动机的试制、装配试验。

(5) 轻工业：各种产品的设计、验证、装配，市场宣传，玩具、鞋类模具的快速制造。

(6) 医疗：医疗器械的设计、试产、试用，CT扫描信息的实物化，手术模拟，人体骨关节的配制。



(7) 国防：各种武器零部件的设计、装配、试制，特殊零件的直接制作，遥感信息的模型制作。

总之，快速成型技术的发展是近 20 年来制造领域的突破性进展，它不仅在制造原理上与传统方法迥然不同，更重要的是在目前产业策略以市场响应速度为第一的状况下，RP 技术可以缩短产品开发周期，降低开发成本，提高企业的竞争力。



第三节 快速模具技术 (RT)

传统的采用锻件或型材通过机械加工获得模具的方法，其设计加工周期长，生产成本低，特别是对形状复杂或具有内腔的模具，锻造和加工都很困难，甚至不能实现现代工业的发展，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快速模具已成为 RP&M 应用的热点问题。



一、快速制模技术工作原理

快速制模技术大都是依据快速成型制作的实体模型即样模（母模）采用拷贝方式（如金属喷涂、电镀、复合材料浇注、精铸等）来快速制造模具主要工作零件（凸、凹模或模腔、模芯）的。

其制造周期一般为传统的数控切削方法的 $1/5 \sim 1/10$ ，而成本却仅为其 $1/3 \sim 1/5$ 。



二、快速制模技术分类

目前的快速制模方法大致有：

- (1) 间接制模法
- (2) 直接制模法

基于 RP 快速制造模具的方法多为间接制模法。

依据材质不同，间接制模法生产出来的模具有：

- (1) 软模
- (2) 桥模
- (3) 硬模



(1) 软模 (soft tooling) 通常指的是硅橡胶模具。用 SLA、 FDM、 LOM 或 SLS 等技术制作的原型，再翻成硅橡胶模具后，向模中灌注双组份的聚氨酯，固化后即得到所需的零件。

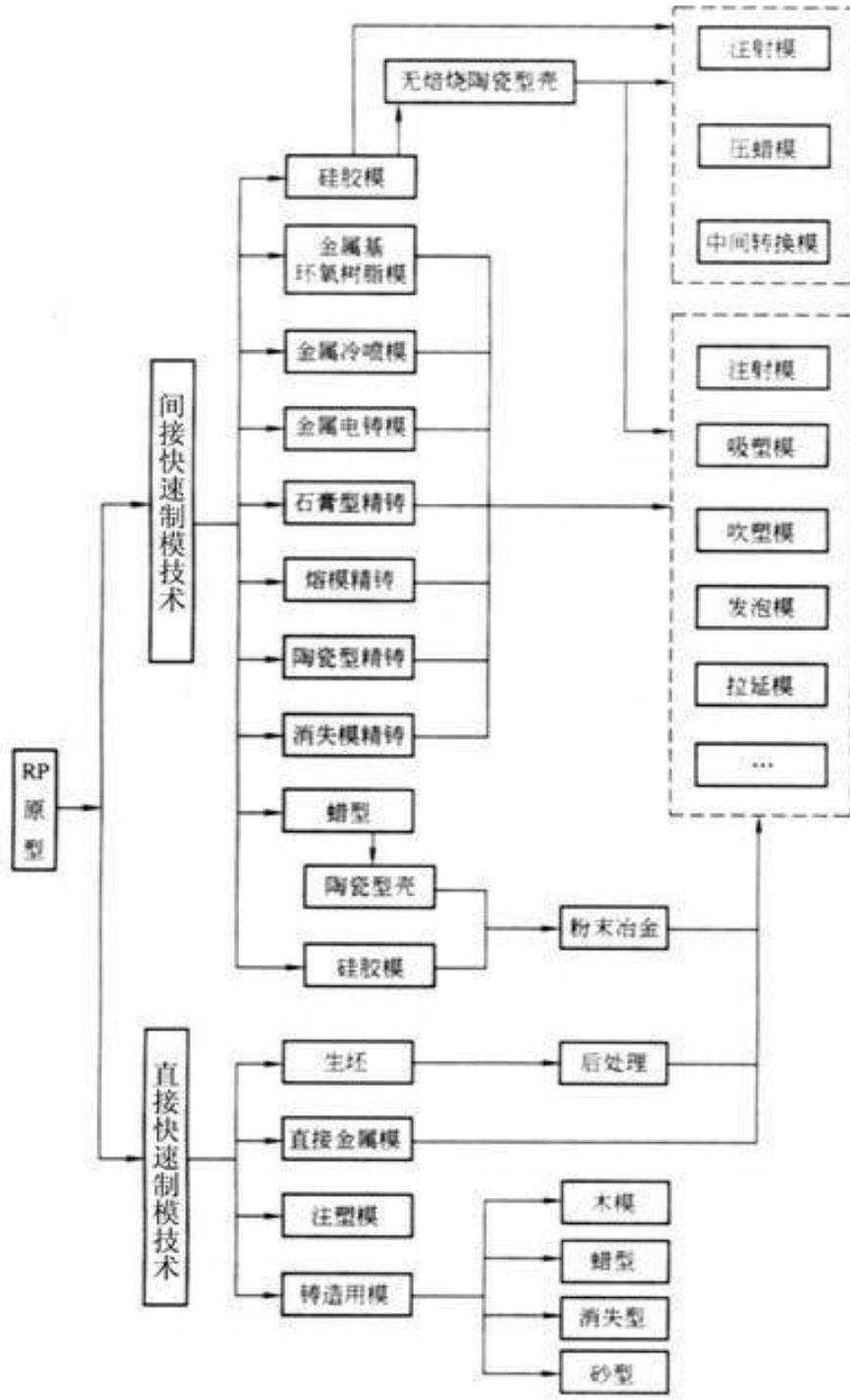


(2) 桥模 (bridge tooling) 通常指的是可直接进行注塑生产的环氧树脂模具。

采用环氧树脂模具与传统注塑模具相比，成本只有传统方法的几分之一，生产周期也大大减少。模具寿命不及钢模，但比硅胶模高，可达 1000 ~ 5000 件，可满足中小批量生产的需要。



(3) 硬模 (hard tooling) 通常指的就是钢质模具，即用间接方式制造金属模具和用快速成形直接加工金属模具。





三、快速制模技术特点及应用

快速制模技术制模周期短、工艺简单、易于推广、制模成本低、精度和寿命能满足某种特定的功能需要，综合经济效益良好，是一种快捷、方便、实用的模具制造技术，特别适用于新产品开发试制、工艺验证和功能验证以及多品种小批量生产。



第四节 与快速制造相关的新技术

一、三维 CAD 技术

已经出现了许多成功的三维 CAD 商用软件，如 Pro/E、UG、CATIA、I-Deas、Solid Works、CAXA 等



二、数据反求技术

(一) 数据反求技术的出现

尽管已经出现了许多成功的三维 CAD 商用软件，如 UG、Pro/E、I-Deas、Solid Works 等，但运用这些软件建立一个复杂的零件模型，还是相当费时的工作。有时工程界提供的往往是实物，需要由实物制造模具或在它的基础上作出设计上的改进。



(二) 数据反求技术的实现

快速检测及三维 CAD 重构技术提供了由实物直接获得 CAD 模型的途径。

(三) 检测的方法分类：

(1) CMM (三坐标测量机) 方法，CMM 法检测精度高，但较慢，有时还必须事先知道曲面形状，以编制 CNC 检测程序。

(2) 激光扫描法，它采用光刀法或振镜法实现每个截面的扫描，用 CCD 传感器摄像，获得密集的数据。这种方法的精度稍差，目前可达 0.05mm。缺点具有光学上的死点，对零件的

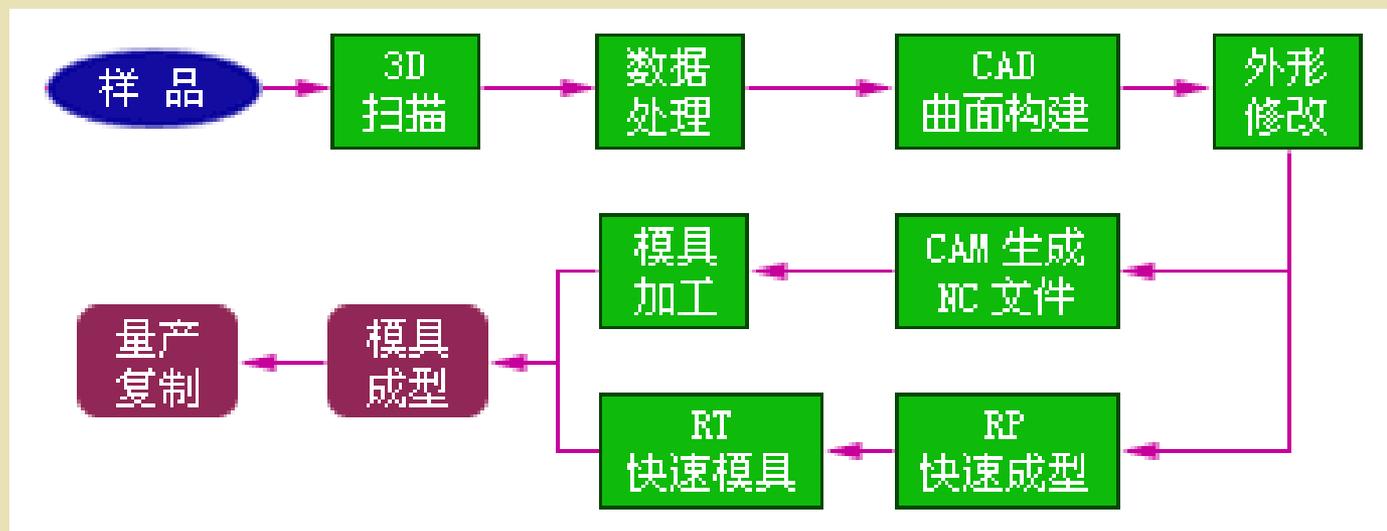


(3) 层切法：RP 生长成型的逆过程。它用充填剂将零件内外封装起来，用铣刀一层层铣出截面来，CCD 摄象获得截层数据，精度可达到 0.02mm，可以满足工程所需的精度要求。

(四) 三维重构软件

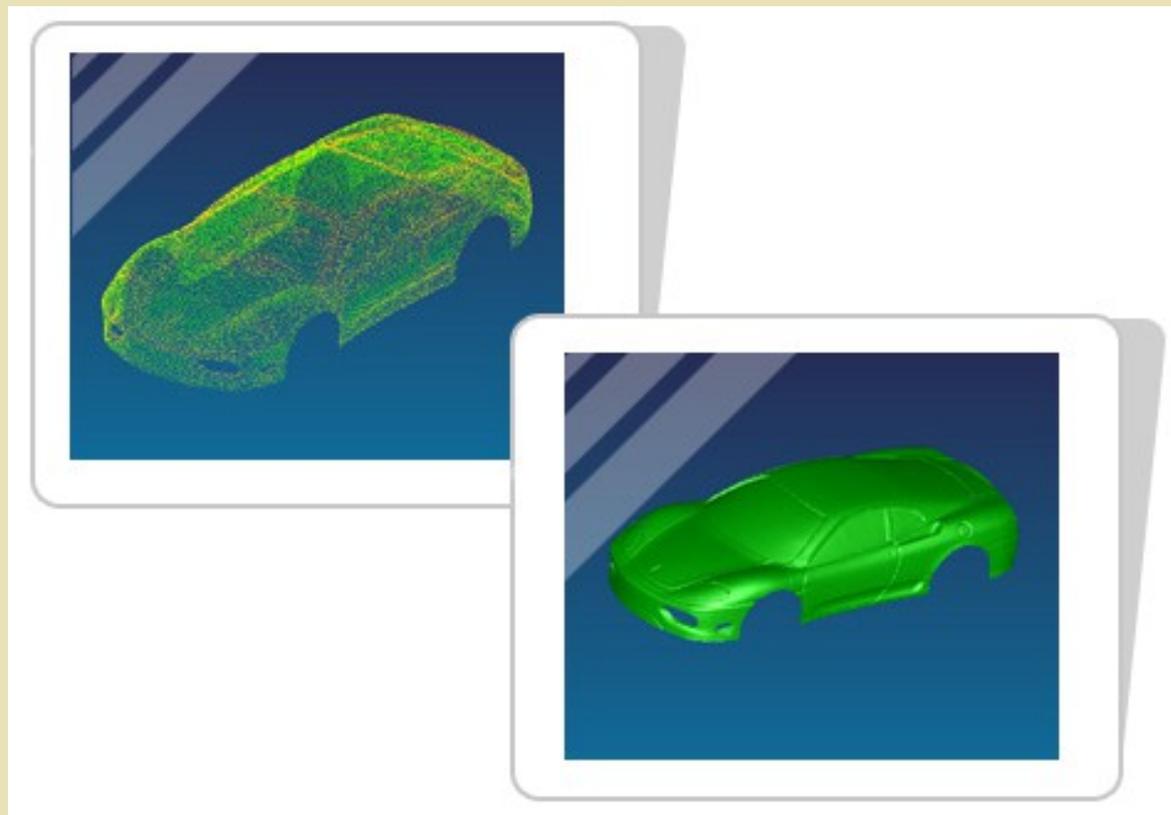
三维重构软件的功能是精化海量数据（点云），找出曲面的交界点及特征点，使数据与 CAD 软件合理匹配。最后通过调用 CAD 软件，自动获得 CAD 模型。

逆向工程流程：



逆向工程流程图

二、数据反求技术实例



汽车外壳实例