

快速成型技术在水泵新产品研发中的应用

1 引言

水泵行业每年都有大量的新产品需要开发，新品开发过程一般是先画图纸，再按图纸开发模具。由于模具投入较大，制造周期长，所以很少进行多方案试制比较，大多以仿造为主。绝大多数水泵企业都是用传统的方法来开发新产品，所以开发技术比较落后，开发新产品的周期比较长，更难以实现小批量、多品种、改型快的要求。可是当前市场竞争愈演愈烈，产品更新换代加速，要保持产品在国内外市场的竞争力，迫切需要加大新产品开发投入力度，在增强创新意识的同时，积极采用先进的创新手段。而快速成型技术的出现，为水泵在新产品试制中进行比较成为可能。特别是熔融层积成型技术(FDM)，为水泵新产品试制过程中的水泵叶轮研制提供了科学、快速、廉价的试制方法，值得普遍推广。所谓熔融沉积法，其基本原理是FDM Insingllt 软件自动将3D数模分层，自动生成每层的模型成型路径和必要的支撑路径。材料的供给分为模型材料卷和支撑材料卷，相应的热融头也分为模型材料喷头和支撑材料喷头。热融头会把ABS材料加热至220℃成熔融状态喷出，由于成型室保持70℃，该温度下熔融的ABS材料既可以有一定的流动性，又能保证很好的精度。一层成型完成后，机器工作台下下降一个高度(即分层厚度)再成型下一层。如此直到工件完成。ABS材料能完全满足水泵叶轮的功能性测试要求。

2 FDM 在水泵新产品开发中的应用

目前，温岭市已引进了FDM快速成型机，建成了为泵业服务的快速成型服务平台，直接为泵业试制开发新产品服务，效果显著。该平台利用水泵水力性能CAD软件，设计水泵叶轮、蜗壳等，利用快速成型平台将设计结果直接转化为零部件，并进待多方案比较，从中择优，最大可能地提高水泵性能、减少造价，降低了模具制造风险，缩短了新产品开发周期。横型或样件可直接用于新产品的的设计验证、功能验证、外) 验证、工程分析、市场订货等，非常有利于优化产品设计，从而大大提高新产品开发的一次成功率。

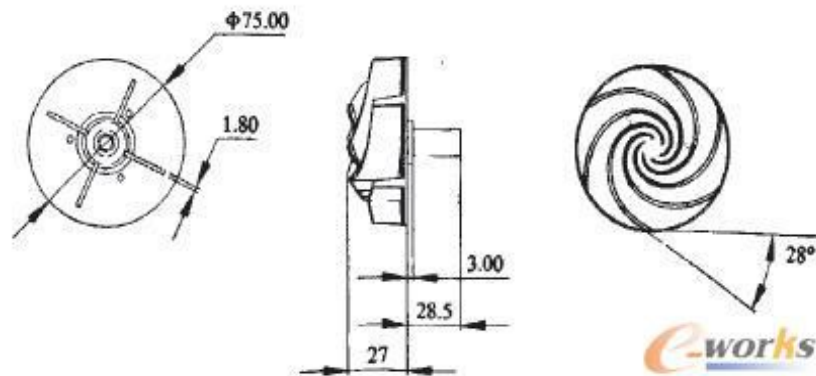


图1 水泵样品图

叶轮是水泵的最关键部件，在同样条件下，仅改变叶轮尺寸，就可使水泵性能改变。某公司的客户拿来一个水泵样品，如图1所示，要求水泵的外型尺寸不得改变。原性能为扬程4m，流量为 $3\text{m}^3/\text{h}$ ；现要求水泵性能达到扬程6m，流量为 $6\text{m}^3/\text{h}$ ，并要在一周内拿出样机。对于这样的要求，原来的工艺是先测绘样品的尺寸→修改水泵叶轮流道→做模型→制造叶轮→试验。对于这样的工艺，别说做模型费用很高，光是周期就很长，况且性能也不一定一次就能达到要求。利用快速成型制造技术，将样品叶轮通过三坐标测量，测得如图2所示的三维实体图后，再经过科学计算进行尺寸修改，将叶轮轴端尺寸缩短2mm，叶片高度增加

2mm。将得到的如图 3 所示的图纸输入快速成型机，4 个小时就将修改后的叶轮制造出来。通过试验性能达到流量为 $6\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程为 5m，与客户的要求还有一点差距。二次设计中修改了叶轮出口安放角，将原有 28° 的安放角改为 35° ，如图 4 所示。按此霞新制造标准件再试验，性能完全满足客户要求，时间只用了 5 天。

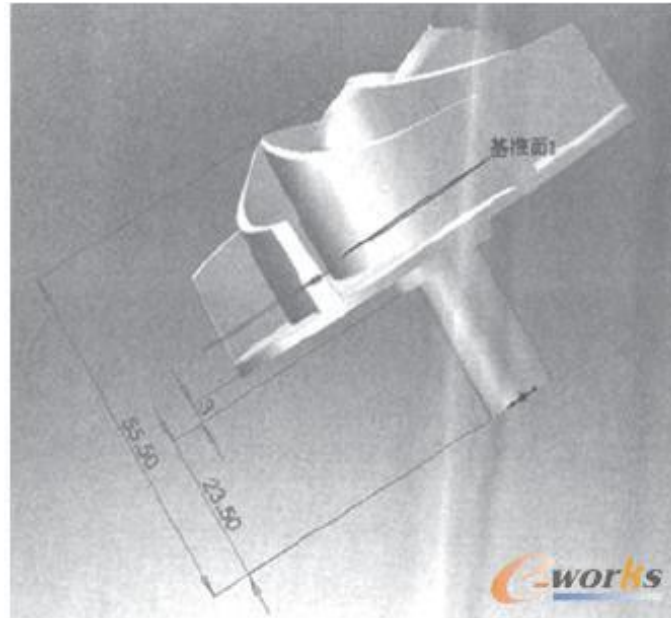


图 2 三维立体图

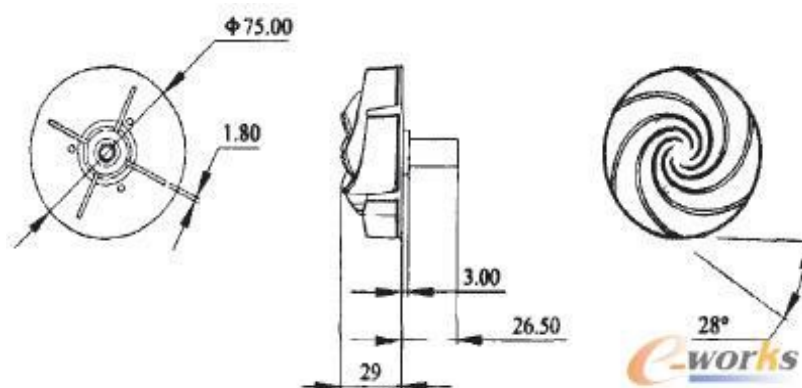


图 3 一次设计图

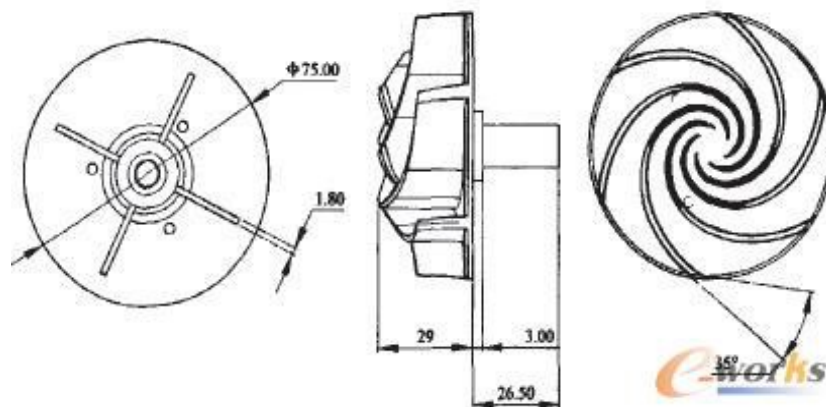


图 4 二次设计图

3 结束语

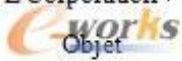
以前每一个新产品从开发，到样品试制成功，再到这个产品被市场接受，通常需要很大的投入和比较长的时间，如果新产品不被市场接受，往往会造成很大的损失。快速成型技术既可以为企业节约先期的模具投入资金，又可以大大缩短新产品开发周期，快速抢占市场。所以快速成型技术是新产品开发的重要手段，随着快速成型软硬件设备与快速成型材料的不断发展和完善，快速成型技术将在新产品开发中发挥越来越大的作用。

快速成型——拉近理想与现实的距离

一、快速成型简介

上世纪 70 年代，Alan Herbert 就提出快速成型（Rapid Prototyping-RP）的基本思想。直到 1986 年，Charles Hull 才在 UVY 的资助完成了第一个 RP 系统 SLA，即激光烧结（SLA）系统的前身，由此也标志着快速成型技术从理论跨入应用。至今为止，快速成型技术进入了高速发展阶段。

表 1 现今流行的几种快速成型方法

名称	缩写	创始人	创始时间	代表厂商
立体光固化成型法	SLA	Charles W.Hull	1986 年	3D Systems、AUTOSTRADE
分层实体制造法	LOM	Michael Feygin	1984 年	Helisys、Dundee
选择性激光烧结法	SLS	C.Deckard	1986 年	DTM、EOS
熔融沉积成型法	FDM	Scott Crump	1988 年	Stratasys
三维打印法	3DP	Emanuel Sachs	1989 年	Z Corporation、 

自从 80 年代中期 SLA 光成型技术发展以来到 90 年代后期，出现了几十种不同的 RP 技术。

二、快速成型基本原理

快速成型技术作为一门新兴起的制造技术，简单地说其基本成型原理为“离散原型”、“分层制造”、“逐层叠加”。它不同于传统的加工方法，其基本原理如图 1 所示：由原始的 CAD 三维模型进行 Z 方向的离散分层，得到每一个片层的数据进行加工，把每一层加工出实体的进行堆积叠加，由此生成完整的实体模型。

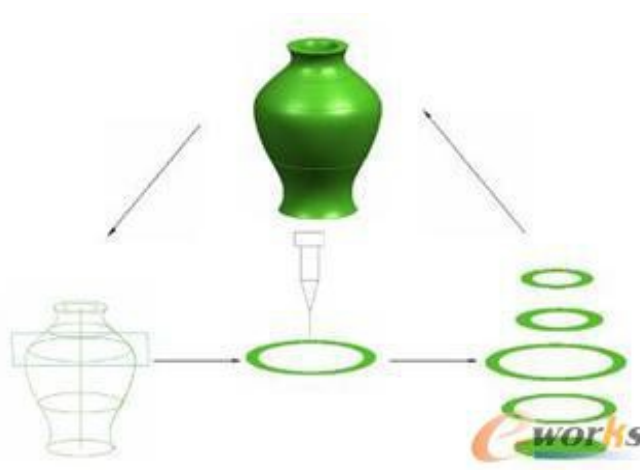


图 1 快速成型技术基本原理

快速成形技术集成了计算机辅助设计（CAD）、计算机数字控制（CNC）、精密机械、激光、

新材料技术等学科于一体的高新技术，能快速将 CAD 三维模型制成实物原型。其基本过程（见图 2）为：

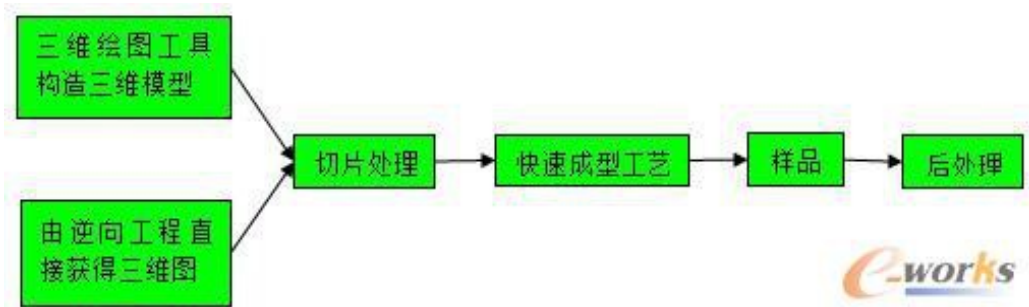


图 2 快速成型过程

构造三维模型：借助三维 CAD 软件设计或用实体逆向工程采集原型的几何形状、结构和材料的组合信息，得到样品的三维模型。

切片处理：用切片软件，在三维模型上，沿成型的垂直方向，每隔一定的间隔进行切片处理，以便提取界面的轮廓。

成型：选具体的成型工艺，在计算机的控制下，逐层加工，然后反复叠加，最终形成三维产品。

后处理：根据具体的工艺，采用适当的后处理方法，改善样品性能。

三、快速成型制造工艺及分类

目前，世界上已有几十种不同的快速成型工艺方法，其中比较成熟的技术就有十余种，光固化成型法 (SLA)、分层实体制造法 (LOM)、选择性激光烧结法 (SLS) 和熔融沉积法 (FDM) 四种方法自快速成型技术产生以来在世界范围内应用最为广泛。但值得一提的是，三维打印技术 (3DP) 已经成为最近两年最热门和发展最为迅速的工艺方法。

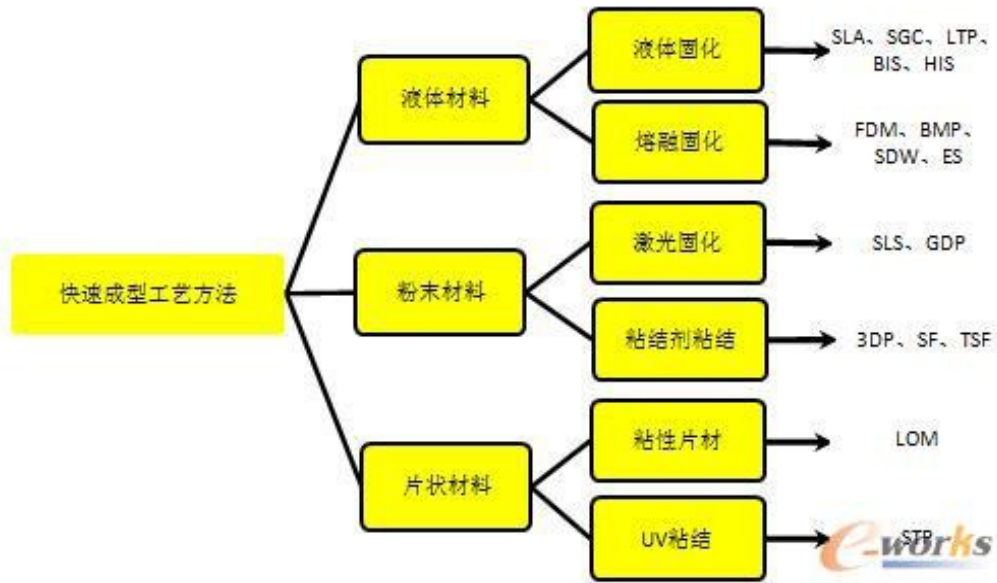


图 3 快速成型工艺方法

3.1 光固化成型法 (SLA)

光固化成型法也常被称为立体光刻或立体印刷成型，是最早发展起来的快速成型技术。它以光敏树脂为原料，通过计算机控制紫外激光按零件的各分层截面信息在光敏树脂表面进行逐点扫描！被扫描区域的树脂薄层产生光聚合反应而固化，形成零件的一个薄层。一层固化完成后，工作台下移一个层厚的距离，以使在原先固化好的树脂表面再敷上一层新的液态树脂，如此重复，直至得到三维实体模型。如图 4 所示。

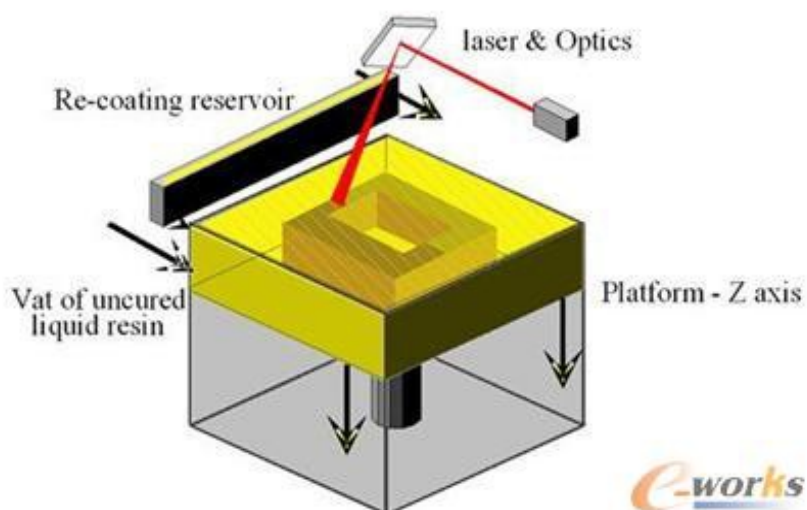


图 4 光固化成型法工作原理

该种成型方法成型速度快，自动化程度高、可成形任意复杂形状、材料的利用率接近 100%、尺寸精度高、成形件强度高，根据以上特点，SLA 法主要应用于复杂、高精度、有艺术用途的精细件快速成型。图 5 为 SLA 成型的产品。



图 5 采用 SLA 工艺成型的产品

3.2 分层实体制造法 (LOM)

分层实体制造也称薄形材料选择性切割。它根据 CAD 三维模型每一个截面的轮廓线，在

计算机的控制下，用激光对薄形材料进行切割，逐步得到各层截面，并粘结在一起，这样反复逐层切割，粘合直至形成所需产品。零件轮廓以外的部分用激光剪切成小碎片以便零件制作完毕之后移去。如图6所示。

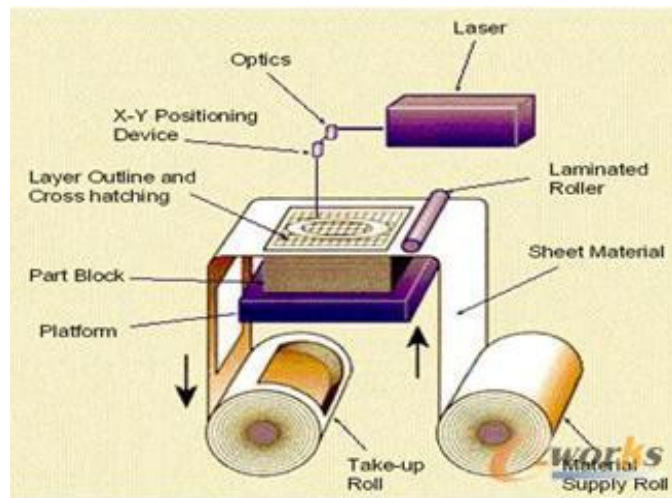


图6 分层实体制造法工作原理

分层实体制造法在成型后无需后固化处理、无需支撑结构、原材料价格便宜，成本低，根据以上特点 LOM 法主要适合成型大中型的实体零件。如图7为采用 LOM 技术生成的产品。



图7 采用 LOM 技术生成的产品

3.3 选择性激光烧结法 (SLS)

选择性激光烧结法又称为选区激光烧结。它的原理是预先在工作台上铺一层粉末材料（金属粉末或非金属粉末），激光在计算机控制下，按照界面轮廓信息，对实心部分粉末进行烧结，然后不断循环，层层堆积成型，如图8所示。

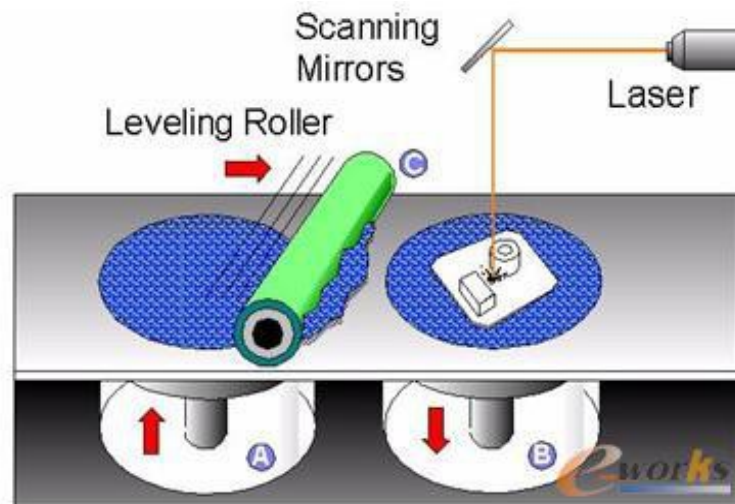


图8 选择性激光烧结法工作原理

由于该类成型方法有着制造工艺简单，柔性度高、材料选择范围广、材料价格便宜，成本低、材料利用率高，成型速度快等特点，针对以上特点 SLS 法主要应用于铸造业，并且可以用来直接制作快速模具。如图9为采用 SLS 技术生成的4缸发动机。



图9 采用 SLS 技术生成的4缸发动机

3.4 熔融沉积成型(FDM)

熔融沉积法又被称为熔丝沉积法或丝状材料选择性熔覆。它是将丝状的热熔性材料加热融化，同时三维喷头在计算机的控制下，根据截面轮廓信息，将材料选择性地涂敷在工作台上，快速冷却后形成一层截面。然后重复以上过程，继续熔喷沉积，直至形成整个实体造型。如图10所示。

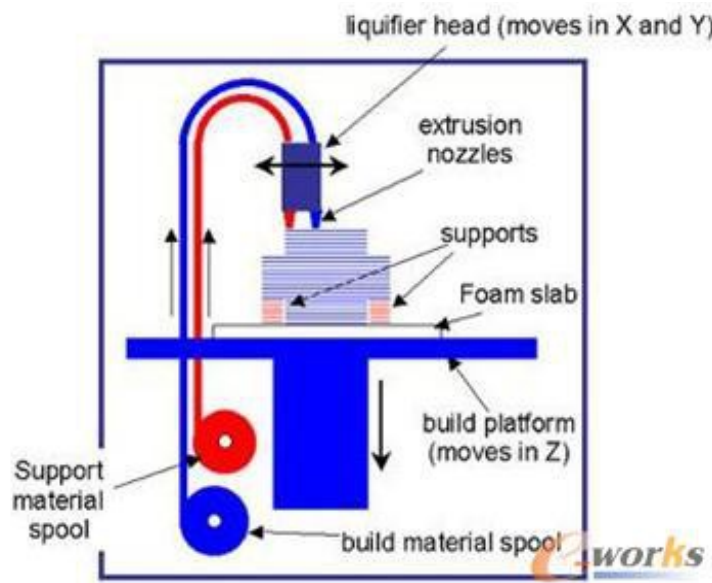


图 10 熔融沉积法工作原理

由于其成型材料种类多，成型件强度高、精度高，表面质量好，易于装配、无公害，可在办公室环境下进行等特点，熔融沉积法主要适用于成型小塑料件。如图 11 为采用 FDM 法制作的产品。

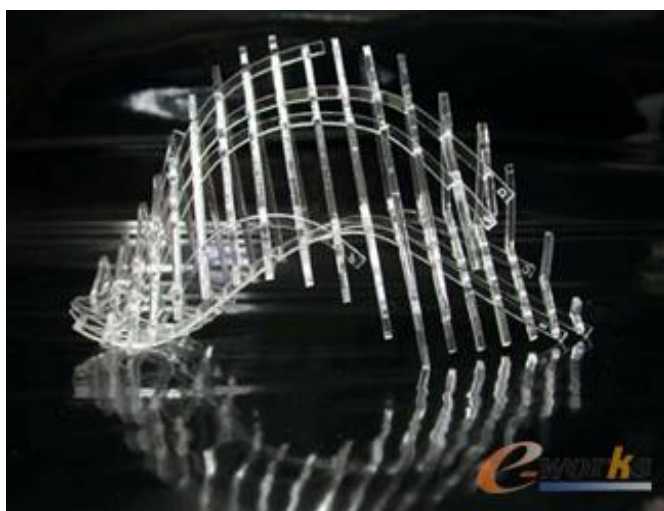


图 11 由 FDM 法制作的产品样品

3.5 三维打印技术(3DP)

三维打印也称为粉末材料选择性粘结，它的原理是喷头在计算机控制下，按照截面轮廓信息，在铺好的一层粉末材料上，有选择性地喷射粘结剂，使部分粉末粘结，形成截面层。然后如此循环形成三维产品。如图 12 所示。

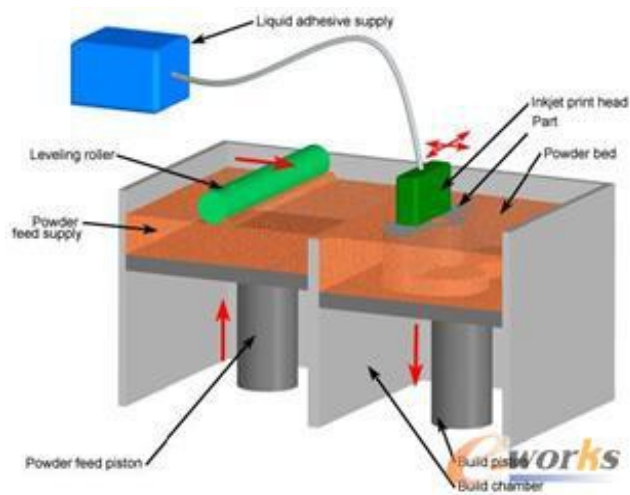


图 12 三维打印法工作原理

由于其成型速度快、成型设备便宜的优点，成为近两年发展非常迅速的一种快速成型方法。

3.6 典型快速成型工艺比较

几种典型的快速成型工艺比较如表 2 所示：

表 2 几种典型的快速成型工艺比较

	光固化成型 SLA	分层实体制造 LOM	选择性激光烧结 SLS	熔融沉积成型 FDM	三维打印技术 3DP
优点	(1) 成型速度快, 自动化程度高, 尺寸精度高; (2) 可成形任意复杂形状; (3) 材料的利用率接近 100%; (5) 成形件强度高。	(1) 无需后固化处理; (2) 无需支撑结构; (3) 原材料价格便宜, 成本低。	(1) 制造工艺简单, 柔性度高; (2) 材料选择范围广; (3) 材料价格便宜, 成本低; (4) 材料利用率高, 成型速度快。	(1) 成型材料种类多, 成型件强度高; (2) 精度高, 表面质量好, 易于装配; (3) 无公害, 可在办公室环境下进行。	(1) 成型速度快; (2) 成型设备便宜。
缺点	(1) 需要支撑结构; (2) 成型过程发生物理和化学变化, 容易翘曲变形; (3) 原材料有污染; (4) 需要固化处理, 且不便进行机。	(1) 不适宜做薄壁原型; (2) 表面比较粗糙, 成型后需要打磨; (3) 易吸湿膨胀; (4) 工件强度差, 缺少弹性; (5) 材料浪费大, 清理废料比较困难。	(1) 成型件的强度和精度较差; (2) 能量消耗高; (3) 后处理工艺复杂, 样件的变形较大。	(1) 成型时间较长; (2) 需要支撑; (3) 沿成型轴垂直方向的强度比较弱。	(1) 一般需要后序固化; (2) 精度相对较低。
应用领域	复杂、高精度、艺术用途的精细件	实体大件	铸造件设计	塑料件外形和机构设计	应用范围广泛
国内用户	诺基亚中国研发、联想集团、华硕、吉利、安踏、伊顿、上海日用-友捷、耐克、阿迪达斯国内 OEM 厂家、清华大学、西安交通大学、南京理工大学、上海东华大学等。				
常用材料	热固性光敏树脂等	纸、金属箔、塑料薄膜等	石蜡、塑料、金属、陶瓷粉末等	石蜡、塑料、低熔点金属等	各种材料粉末
发展趋势	稳步发展	逐渐淘汰	稳步发展	飞速发展	飞速发展
设备费用	高昂	中等	高昂	低廉	低廉

3.7 其他快速成型工艺

除以上五种方法外, 其它许多快速成型方法也已经实用化, 如实体自由成形 (solid freeform fabrication, SFF)、形状沉积制造 (shape deposition manufacturing, SDM)、实体磨削固化 (solid ground curing, SGC)、分割镶嵌 (tessellation)、数码累计成型 (digital brick laying, DBL)、三维焊接 (three dimensional welding, 3DW)、直接壳法 (direct shell production casting, DSPC)、直接金属成型 (direct metal deposition, DMD) 等快速成型工艺方法。

四、快速成型的特点与应用

4.1 快速成型的案例

青岛 DND 机电科技股份有限公司, 成立于 1997 年, 该公司主要从事台式电动工具、空压机、金工机床、木工机床及电焊机等产品的研发、生产和销售。

公司每年研发的新产品超过 50 种, 在新产品开发过程中, 公司对产品的质量要求较高, 并且要求尽量做到“周期短、质量好”。而在以往的环境中进行产品设计验证时, 有些问题比较棘手: 如进行产品设计时, 无法直观零件与零件之间是否有干涉、碰撞, 全凭工程师的

设计经验；制作一个很小的产品模型也需要通过模具开模得到，每次模具的制作大约要耗时 2—3 周，制作周期很长，而且花费的成本也比较高。

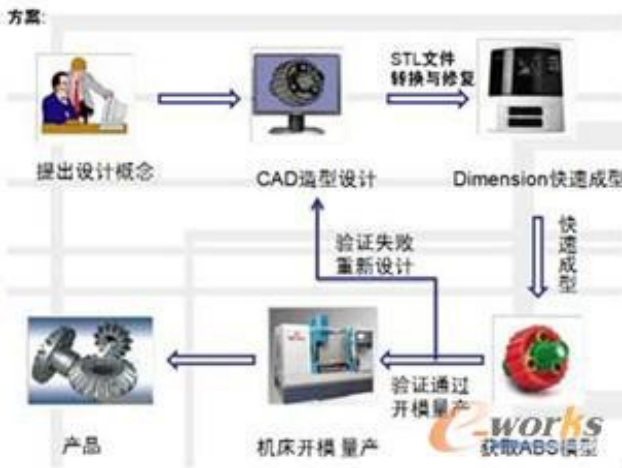


图 13 快速成型技术为企业提供的解决方案

自公司引进 Dimension SST 1200 快速成型机后，通过快速成型技术成形产品的模型样件，进行验证，从而有效的缩短产品研发周期，节约研发的时间、费用成本等。表 2 为快速成型工艺与传统工艺的效益对比。

表 3 快速成型工艺与传统工艺的效益对比

	快速成型工艺	传统工艺
研制周期	1—2 个小时	2—3 周
成本核算	快速成型制作一个小型模具只需约 100 元的成本	制作模具开模费用为 1000 元左右
产品精度	高	低
研发风险	很小	大

据 DND 集团设计工程师介绍，通过采用快速成型技术模拟设计产品后，产品的设计效率提高了将近 80%，新产品开发周期比之前缩短了三分之一，新产品的开发成本也下降了近 66%，由此可见采用快速成型技术所带来的效益是显著的。

4.2 快速成型的应用

目前，快速成型技术已经广泛应用于生物、工程、医学等领域，今后快速成型技术的将会大大扩展在制造业的应用，并有可能渗透到更多的应用领域。

现有的快速成型产品中，有的已成型真是的原型件，但他们只局限于某些商业应用，随着市场产品更新换代的加快，对快速制造技术在缩短周期、降低成本、提高精度、延长寿命等方面都会提出更高的要求，而由此各种快速成型工艺亦会不断的成熟与完善。

快速成型技术主要在汽车、摩托车、电子消费类、教育以及各类科研机构中有着广泛的应

用。国外典型用户有：福特、保时捷、克莱斯勒、摩托罗拉、诺基亚、惠普、索尼、耐克、阿迪达斯、哈佛、麻省理工、美国航空航天局等。国内典型用户有：吉列、合朗、英华达、伊顿、联想集团、上海日用-友捷(通用汽车配套)、耐克、阿迪达斯国内 OEM 厂家、总参六十四所、南京理工大学、上海东华大学、江南大学工业设计学院等。

五、快速成型技术的发展趋势

1 快速成型设备的大型化和小型微型化

目前，技术向两个方向发展：一是工业化大型系统，用于制造高精度、高性能零件。另一方面是自动化的桌面小型系统，此类系统称为概念模型机或台式机，主要特点是成型速度快、精度适中、设备小巧、运行可靠、清洁、无噪声。

2 快速成型行业的标准化

由于快速成型技术刚刚起步，在很多方面缺乏标准，因此，迫切需要制定合理的行业标准，这样有利于快速成型技术的推广应用。

3 先进材料的应用

先进材料应用于快速成型技术是未来几年重要的发展方向。目前，光子晶体材料、热敏聚合物材料、微制造快速成型材料、功能梯度复合材料等各类先进材料已经得到应用。

4 绿色制造

产品的绿色设计、制造、清洁化生产以及人类的可持续发展是当今的研究热点。因此快速成型技术是否符合绿色制造要求，直接关系到该技术的可持续发展，所以绿色材料、绿色工艺将成为快速成型亟需解决的问题。

六、主流快速成型供应商

1 3D Systems

美国 3D Systems 成立于 1986 年，是世界最大的快速成型设备开发公司之一，于 1986 年推出第一台快速成型机，并在短时间内占有了市场大部分份额，如今，3D Systems 公司已经成为了全球最大的提供快速成型解决方案的厂商。

其产品包括 SLA 快速成型系列的 iPro™ SLA®与 Viper™ SLA®, SLS 快速成型系列的 sPro™、Sinterstation® HiQ™与 Sinterstation® Pro™等产品。



(1) 基于 SLA 技术的 iPro™快速成型机 (2) 基于 SLS 的 sPro™快速成型机

图 14 3D Systems 公司快速成型机

公司网站: www.3dsystems.com/

2 Helisys

美国 Helisys 公司的 Michael Feygin 于 1986 年研制出 LOM 工艺，该公司已推出 LOM-1050 和 LOM-2030 两种型号成型机。



图 15 LOM 2030 快速成型机外观

Helisys 公司研制出多种 LOM 工艺用的成型材料，可制造用金属薄板制作的成型件。该公司还与 DAYTON 大学合作开发基于陶瓷复合材料的 LOM 工艺。

3 DTM

1986 年，美国 Texas 大学的研究生 C. Deckard 提出了选择性激光烧结 (简称 SLS) 的思想，稍后组建了 DTM 公司，于 1992 年开发了基于 SLS 的商业快速成形系统。



图 16 Sinterstation2500 快速成型机

DTM 公司推出了 Sinterstation 系列成型机及多种成型材料。

公司网站: <http://www.dtm-corp.com>

4 EOS

德国 (Electro Optical System) EOS 公司成立于 1989 年，是世界著名的快速成型设备制造商和 e-制造方案提供商，EOS 公司的选区激光烧结快速成型设备在汽车零件、覆盖件和家用电器外壳的原型制造中得到广泛的应用。

EOS 公司主要快速成型产品有 FORMIGA P、EOSINT P 系列等。



(a) FORMIGA P100 快速成型机 (b) EOSINT P390 快速成型机
图 17 EOS 公司快速成型机

公司网站: <http://www.eos.info/>

5 Stratasys

美国 Stratasys 公司是快速成型技术市场的领导者，成立于 1988 年，1991 年正式推出商用快速成型机，在快速成型市场出货量及机器安装数量方面，至今已连续 10 年排名第一。Stratasys 公司具有专利的快速成型制程技术称为 Fused Deposition Modeling (Fortus™)，即融熔挤制沉积成型技术。



图 18 Stratasys FDM 360mc 快速成型机

Stratasys 公司的主要有 Vantage 系列、FDM 系列、Fortus 系列等产品。

公司网站: <http://www.stratasys.com/>

6 Phenix Systems

Phenix Systems 公司, 该公司位于法国, 以金属 SLS 技术为主, 设备名称为 PXL 和 PM 系列产品。



(a) PXL 型快速成型机 (b) PM250 快速成型机

图 19 Phenix Systems 公司快速成型机

公司网站: <http://www.phenix-systems.com/>

7 Z Corporation

Z Corporation 公司成立于 1994 年, 最早由美国麻省理工学院 (MIT) 于 1993 年开发的三维打印成型技术 (3DP™), 奠定了 Z Corporation 原型制造过程的基础。目前, Z Corporation 是世界上速度最快三维成型机的开发商、制造商和营销商。



(a) ZPrinter®310 Plbu 系列快速成型机 (b) Spectrum Z™510 快速成型机

图 20 Z Corporation 公司快速成型机

Z Corporation 公司产品主要是基于 3DP 技术而成的, 主要有 ZPrinter®、Spectrum Z™、ZScanner®、ZEdit™等产品。

公司网站: <http://www.zcorp.com/>

8 Objet

Objet 公司成立于1998年,总部位于以色列雷霍沃特市的高科技开发中心。公司通过其位于欧洲和香港的全资子公司,以及全球经销商伙伴网络向日益增长的全球客户群提供服务。Objet 拥有40多个专利与未决专利的发明。



图 21 Objet Eden500V™专业级三维打印机

Objet 的系统以公司拥有专利,并经过市场验证的 PolyJet™ 聚合物喷射技术为基础,公司目前的主要产品包括 Eden™、Connex、Alaris™等。

公司网站: <http://www.objet.com/>

9 DSM Somos

自上世纪80年代后期,Somos 就积极投身快速成型材料的开发工作。自1992年第一种商用 Somos 立体光刻树脂的引入,到今天 Somos 12120 的引入,DSM 公司已在此过程中为 Somos 奠定了良好声誉——持续的材料创新、卓越的产品质量和热诚的客户服务。

公司网站: www.dsmsomos.com

10 北京隆源自动成型有限公司

北京隆源自动成型系统有限公司1993年开始研发 AFS 系列选区粉末烧结激光快速成型机并取得自主知识产权,1994年正式投产和销售。该公司生产销售的 AFS 系列选区粉末烧结激光快速成型机被广泛应用于科研院校、航空航天、船舶兵器、汽车摩托车、家电玩具和医学模型等行业的设计试制部门。

目前公司主要的 AFS 系列产品有 AFS-320、AFS-360、AFS-500 等产品。

公司网站: <http://www.lyafs.com.cn>

11 北京殷华激光快速成型与模具技术有限公司

北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司是清华大学企业集团下属的高科技企业,主要从事快速成形系统,快速制模设备以及专用耗材的开发、生产和销售。公司联合上游的机械三维设计软件供应商和下游的真空注塑、逆向工程设备厂商,为客户提供全面的产品开发、试制、小批量生产解决方案。

目前该公司主要产品有 FDM 工艺设备 (MEM) 系列、激光固化树脂 RP 设备 (AURO-350) 分层实体 RP 设备 (SSM) 系列。

公司网站: <http://www.rpyinhua.com>

熔融沉积快速成型工艺成型精度的影响因素及对策

快速成型技术 (Rapid Prototyping and Manufacturing, RP&M), 又称快速原型制造技术, 是继数控技术之后制造业的又一次重大革命。它能以最快的速度将设计思想物化为具有一定结构和功能的三维实体, 低成本制作产品原型甚至零件, 非常适合当代市场竞争的需要。因为该技术对促进企业产品创新、缩短新产品开发周期、提高产品竞争力有积极的推动作用, 所以自问世以来, 已经在制造业、工业设计、文化艺术、建筑工程以及医疗卫生等领域得到了广泛的应用, 并由此产生了一个新兴的技术领域。

1 FDM 工艺的发展

工业界越来越多的采用快速成型技术来进行产品开发, 据调查, 现在常用的几种类型的成型机在实际应用中具备各自的优点, 而目前国际销售市场上, 占份额最大的是基于 FDM 的快速原型设备 (占 43%), 这种设备有小巧、价格低廉、应用材料范围广泛、可直接制成工业产品的优点, 在企业设计之中有着广泛的应用, 图 1 所示是使用 FDM 成型机制作的模型照片。

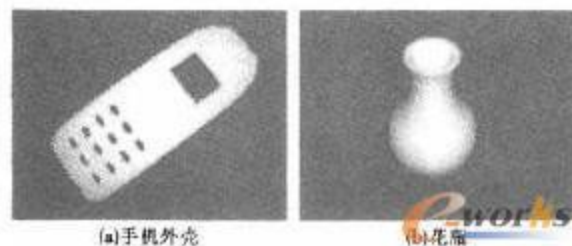


图 1 FDM 工艺制作的手机外壳和花瓶模型

成型精度是快速成型技术在工业应用中的关键问题之一, 也是 RP 研究的重点, 本文总结了大量的模型制作实践过程中的成型精度影响因素, 并提出相应的对策。

2 FDM 成形过程中精度的影响因素分析及相应对策

2.1 CAD 模型离散化过程中的两重精度损失

采用 STL 文件格式的三角面片来近似逼近 CAD 模型, 这一网格化过程给模型精度带来一重损失: 分层后的层片文件采用 CLI 格式用线段近似逼近曲线引起另一重精度损失。

针对这两种文件表示格式引起的精度损失, 我们只能靠寻求更优的 CAD 接口数据标准来提高精度、减少损失, 如现在有些学者已经着手研究用 STEP 标准替代 STL 标准来进行模型的表示, 可以借鉴推广。

2.2 材料收缩性能引起的尺寸误差

FDM 系统所用材料为热塑性材料 (如石蜡、ABS 等), 成形过程中材料会发生两次相变过程: 一次是由固态丝状受热熔化成熔融状态; 另一次是由熔融状态经过喷嘴挤出后冷却成固态。在凝固过程中, 材料的收缩变化直接影响成形过程及成形件精度, 如 ABS 树脂, 其收缩主要表现为两种。

1) 热收缩, 即材料因其固有的热膨胀率而产生的体积变化, 它是收缩产生的最主要原

因，由热收缩引起的收缩量为

$$\Delta L = \delta \times (L + \Delta/2) \times \Delta t \quad (1)$$

其中， δ 为材料的线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ 为零件 X/Y 向尺寸，mm； Δt 为温差， $^\circ\text{C}$ ； Δ 为制件的公差(按留有加工余量进行取大补偿)

2) 分子取向收缩，即高分子材料固有的收缩取向；水平方向(即填充方向)的收缩率大于高度方向(即堆积方向)的收缩率。

材料所具有的收缩率和收缩取向会直接影响成形件的尺寸精度、同时凝固过程中的体积收缩也将会产生内应力，这个内应力严重者会导致制作件的翘曲变形及脱层现象。所以 FDM 工艺中，材料性能影响制件的精度主要反映在以下二点：

① 固化收缩(即热收缩)引起制件尺寸误差和翘曲变形，由喷头挤出的是热熔融状的 ABS 树脂，材料固有的热膨胀引起的体积变化在冷却固化的过程中产生收缩，收缩引起制件的外轮廓向内偏移、内轮廓向外偏移，造成较大的尺寸误差，如图 2 所示，轮廓线 I 为 CAD 造型的理想零件轮廓，轮廓线 II 为固化收缩后的实际零件轮廓；同时，收缩也是产生翘曲变形的根本原因，翘曲变形对制件成型精度影响很大，可能造成严重的失真，如图 3 所示。



图 2 制件产生尺寸收缩



图 3 制件产生翘曲变形

② 材料分子的收缩取向使各向尺寸收缩量不均。成形过程中，熔态的 ABS 分子在填充方向上被拉长，又在随后的冷却过程中产生收缩，而取向作用会使堆积丝在填充方向的收缩率大于与该方向垂直的方向的收缩率，所以填充方向上的收缩量可按收缩计算公式(1)矫正和改进为：

$$\Delta L_1 = \beta \times \delta_1 \times (L + \Delta/2) \times \Delta t \quad (2)$$

堆积方向(即 Z 向)上的收缩量查有关材料按 $\delta_2 = 0.7 \delta_1$ ，所以收缩量为：

$$\Delta L_2 = \beta \times \delta_2 \times (L + \Delta/2) \times \Delta t \quad (3)$$

式中， β 为考虑实际零件尺寸的收缩还受零件形状、打网格的方式以及每层成形时间长短等因素单独或交互的制约，经实验估算 β 为 0.3； δ_1 ， δ_2 分别为材料水平方向和垂直方向的收缩率。

针对以上的几种严重影响精度的变形情况，可以采取以下两种措施对其进行校正或将

其影响降低到最低限度。

1) 针对尺寸收缩采取 CAD 造型阶段的预先尺寸补偿，对于填充方向即 X/Y 方向对其增加 ΔL_1 的补偿量；而堆积方向(即 Z 向)增加 ΔL_2 的补偿量。

2) 对于制件的翘曲变形，我们可以采用多种合理的制作方法减少收缩应力。如：对截面实心部分进行虚线填充扫描，先 X 而后 Y 方向交织扫描，这样可以减少扫描线的绝对收缩量，使其收缩应力充分释放、减少变形；对轮廓线采取先填充后扫描的方法，这样也有利于收缩应力的释放，避免轮廓线的变形，提高表面质量；也可先在垫层上用材料与造型相同、底面略大的薄层底座，然后在底座上面造型，使变形都在底座上，而实际造型时产生的内应力相互抵消；或者设计合理的支撑结构限制翘曲变形等。

2.3 喷丝宽度引起的喷涂轮廓线的误差

成型过程中，由于喷丝具有一定的宽度，造成填充轮廓路径时的实际轮廓线超出理想轮廓线一些区域，因此，需要在生成轮廓路径时对理想轮廓线进行补偿。补偿量应当是挤出丝宽度的一半，而实际工艺过程中挤出丝的形状、尺寸受到喷嘴孔直径、分层厚度、挤出速度、填充速度、喷嘴温度、成形室温度、材料粘性系数及材料收缩率等诸多因素的影响，因此，挤出丝的宽度不是一个固定值，模型如图 4 所示，这里我们可以借鉴有些学者的研究成果，确定补偿量如下：

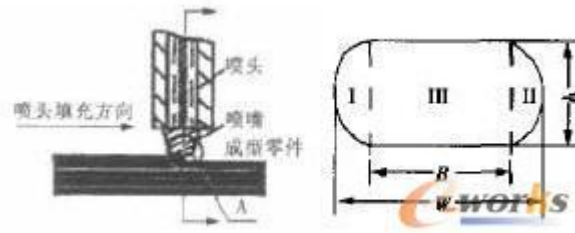


图 4 FDM 工艺挤出丝的截面形状模型

1) 当挤出速度不太大，截面可直接简化成图 4 中的矩形 III。

计算公式为
$$W = B = \frac{\pi d^2}{4h} \frac{v_E}{v_F}$$

式中， v_E 为挤出速度； v_F 为填充速度； d 为喷嘴直径； h 为分层厚度； B 为丝截面矩形区域的宽度； W 为丝截面的宽度即丝宽。

2) 当挤出速度增大到一定值时，则应考虑二次曲线部分的面积。

计算公式为

$$W = B + \frac{h^2}{2B}, B = \frac{\lambda^2 - h^2}{2\lambda}, \lambda = \frac{\pi d^2}{2h} \frac{v_E}{v_F}$$

2.4 重要工艺参数的优化、匹配对成型件质量的影响

2.4.1 喷嘴温度和环境温度的影响

喷嘴温度是指系统工作时将喷嘴加热到的一定温度，环境温度是指系统工作时原型周围环境的温度，通常是指工作室的温度喷嘴温度决定了材料的粘结性能、堆积性能、丝材流量以及挤出丝宽度，应在一定的范围内选择，使挤出的丝呈粘弹性流体状态，即保持材料粘性系数在一个适用的范围内。喷头温度太低，则材料粘度加大，挤丝速度变慢，这不仅加重了挤压系统的负担，极端情况下还会造成喷嘴堵塞，而且材料层间粘结强度降低，还会引起层间剥离；而温度太高，材料偏向于液态，粘性系数变小，流动性强，挤出过快，无

法形成可精确控制的丝，制作时会出现前一层材料还未冷却成形，后一层就加压于其上，从而使得前一层材料坍塌和破坏。环境温度则会影响成形零件的热应力大小，影响原型的表面质量。所以应选择适宜的喷嘴温度和工作室温度，研究表明对特定的材料应根据其特性选择不同的喷嘴温度，而成型室温度一般设定为比挤出丝熔点温度低 1-2° C。

2.4.2 挤出速度与填充速度的影响

挤出速度是指喷头内熔融态丝从喷嘴挤出的速度；填充速度是指扫描截面轮廓速度或打网格的速度。为了保证连续平稳地出丝，需要将挤出速度和填充速度进行合理匹配，使得喷丝从喷嘴挤出时的体积等于粘结时的体积（此时还需要考虑材料的收缩率）。填充速度比挤出速度快，则材料填充不足，出现断丝现象，难以成形；相反填充速度比挤出速度慢，匹配后出丝太快，熔丝堆积在喷头上，使成型面材料分布不均匀，表面会有疙瘩，影响造型质量。因此，填充速度与挤出速度之间应在一个合理的范围内匹配。

2.5 分层厚度及台阶现象对表面质量的影响

分层厚度是指将三维数据模型进行切片时层与层之间的高度，也是 FDM 系统在堆积填充实体时每层的厚度；RP 方法制作有斜面的零件模型时，侧表面会出现像阶梯一样的不连续现象，使表面粗糙度变差。分层厚度较大时，原型表面会有明显的“台阶”，影响原型的表面质量和精度；分层厚度较小时，原型精度会较高，但需要加工的层数增多，成型时间也就较长。这里我们采用选择合适的分层方向即进行分层方向优化，如图 5 所示，图 5(a)、(b) 两种分层方向中，图 5(b) 方向显然优于图 5(a)，此方向堆积的制件台阶效应小、材料纹理好，并且还不需要支撑，为最优分层制作方向；方向优化后，再进行自适应分层，根据表面形状在一定的范围内（如 0.1-0.4 mm）调整分层厚度（如图 5(b) 切中画线部分示意的分层方式），这样既能提高表面质量，又不会显著延长制作时间，有时甚至能缩短制作时间。

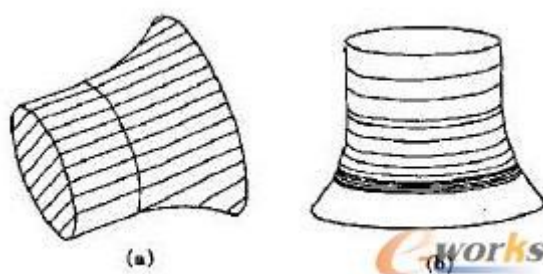


图 5 不同的分层方向及不同的分层厚度示意

3 结论

由以上分析可知，在 FDM 工艺成形过程中，影响成形件精度主要因素有：CAD 的离散化过程、喷丝材料的性能、喷涂过程中喷丝宽度误差以及重要工艺参数的优化、匹配如温度（喷嘴的温度和成形室的温度）、挤出速度和填充速度和分层厚度及分层方向等；相应地，针对各项影响因素得出了如下几条提高 FDM 工艺成型精度的途径：

1) 突破 STL 格式的束缚，寻求更优的 CAD 借口数据标准来提高精度、减少损失，如 SETP 标准等；直接对 CAD 模型数据进行参数化分层或采用更优的层片接口文件减少层片文件的精度损失。

2) 合理的扫描填充制作方法，减少应力变形；智能化的支撑设计，限制制件的翘曲变形。

3) 造型阶段准确的尺寸固化收缩预补偿和喷丝宽度预补偿。

4) 进行工艺参数的优化设置：如设置合适的喷嘴温度和环境温度；匹配最优的挤出速

度和填充速度。

5) 分层方向的优化和自适应分层。

LOM 快速原型技术与应用

前言

快速成型系统技术其结合了计算机信息、机械设计、自动控制、高能光束学、材料科学等领域的知识而成。快速成型系统特色为可整合设计与制造，即在产品的设计时间便以模型测试设计之可行性、可制造性、外观、功能等，并可缩短设计时间。产品外形可很复杂，中空状工件不需模心，适合制造小尺寸工件。此外，工件可用多种材质、颜色来建构组成。刚度、密度、热传导性等机械性质可由制程中予以优化控制至所需要条件。不需发展特殊刀具、模具，可节省制作模具之成本，而且不需要设计到制造间之转换过程或定义复杂之加工程序。由于LOM快速原型系统所使用之CO₂雷射仪对原型件外形轮廓(outline of shape)进行切割，此过程如与SLA(Stereo lithography Apparatus)快速原型系统相较，LOM快速原型系统是所有快速原型系统中，效率最高(the most efficient process)的一种快速原型系统，LOM快速原型系统可以制作大型(large)、复杂(complex)与体积大(voluminous)原型件。因此，本文针对LOM快速原型系统原理进行简介，接续介绍LOM快速原型系统应用。

快速原型技术概述

快速原型系统(Rapid Prototyping System, RP)乃是使用计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)之产品数据或其他数字数据藉由快速高自动化的制程而可直接制作三维的立体对象(physical model)。快速原型机的基本原理，将由CAD设计出来的模型(model)，经由计算机程序将模型分割成一层一层(layer by layer)，再一层一层堆栈出各层轮廓(profile)。快速原型机自从推出之后，逐渐受到学术界与产业界的注意，其中最主要的原因便是省时且易于使用。此种趋势在先进国家中特别明显，因为人工极为昂贵，以快速原型机替代传统制造原型的方法便不失为一项可以考虑的选择。

快速原型加工过程，如图1所示。由一个计算机辅助设计的模型开始，这一个计算机辅助设计的模型最好是一个由封闭曲线组成的模型，且这个计算机辅助设计的模型被送到一个快速原型机系统，系统会依用户所设定厚度(thickness)进行模型切割(slicing)成为非常细的薄片，切片的目的是要将薄片一片一片的制造出，藉由一片一片的堆栈，堆栈出三维立体原型件，如图2所示。

快速原型机的特色在于加工成型的原型件形状几乎没有任何限制，而且可以完成切削刀具所无法达到的形状。另外，快速原型机成型可以由机器自动将计算机辅助设计档案转化成为快速原型机可用的档案，因此并不需要太多人工，加工条件远比切削加工简单，技术层面没有传统切削加工那么复杂。目前快速原型系统做出来的原型件，主要的用途仍然是在原型的制作，另外可以使用于设计的检讨与讨论、实验分析用模型、样品或造型设计等方面或用于精密脱腊铸造(investment casting)的模型也是相当多。

快速成型系统技术其结合了计算机信息、机械设计、自动控制、高能光束学、材料科学等领域的知识而成，目前已商业化的快速成型系统，虽然其成型的方法不同，但其设计制作流

程大都为以下四个步骤：(a)设计三维物体模型与支撑、(b)接口转换(*.STL文件)、(c)计算机分层(Slicing)处理并产生加工路径与(d)快速成形机产生原型对象。计算机取出最底端的一层几何数据，做为计算机定位控制之位置数据，将能量及原料”累积(additive)”在几何数据所指示的位置；依此程序，自底端一层到顶端一层，逐片把原料填上而接合在一起，如此既可自动快速的制作三维的立体原型件。

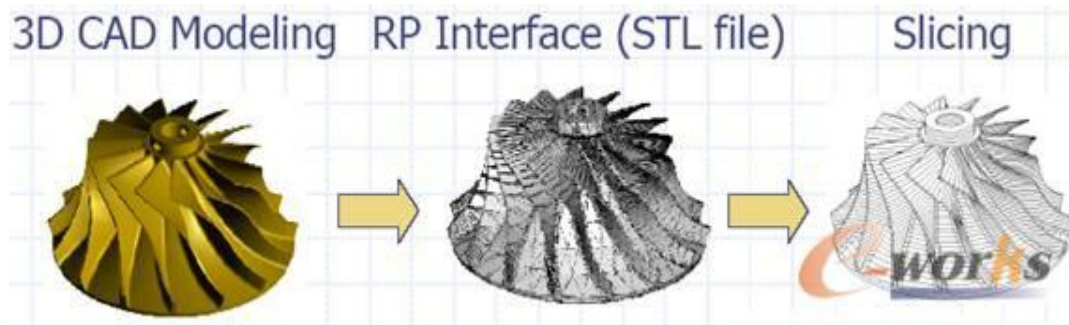


图1 快速原型加工过程

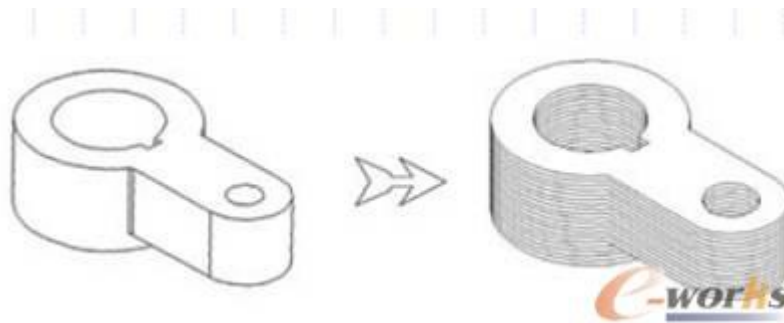


图2 藉由一片一片的堆栈，堆栈出三维立体原型件

LOM 快速原型技术原理

Michael Feygin 研发出 LOM(laminated object manufacturing)快速原型技术，并由美国 Helisys 公司生产与销售，于 2000 年 Helisys 公司终止(cease)营运，并将 LOM 快速原型技术转让给 cubic technologies。LOM 快速原型技术系以披覆黏着剂(binder)之薄片材料(sheet materials)，利用雷射光依计算机二维几何数据切割外形，割妥之薄片以热滚筒滚压而与前一层薄片黏合，并将工作物之平台下降一层的厚度，此厚度视材料的不同而有所差异，一般而言厚度为 0.002"-0.02"，再度进料面到完成成品。理论上纸张、金属、橡胶、合成材料、复合材料等材料皆可应用。LOM 加工原理，如图 3 所示，乃透过 CO2 或 YAG 雷射依据工件截面的外围轮廓(profile)，切割被覆有热熔性黏结剂(heat-activated adhesive)的薄片材料，如纸、塑料、金属薄片和布等，并以左右两个滚筒(heated roll)来传递薄板材料，一个边的滚筒功能为供给材料(source roll)；另一个的滚筒功能为收集余废料(used roll)，当滚筒滚至正确位置时，另有一个加热滚筒滚过材料表面，使材料下方之热黏性胶体熔化并黏附于上一层，再以雷射来切割所要剖面之轮廓，并且将轮廓以外之材料切割成棋盘状，以利去除余废料之后处理，如此一层一层的循环，直到工件完成，工件完成时是整个包在加工之材料里面，将切成棋盘状之余料剥离即可得到成品。此系统在成形的过程中，材料不会因受热而收缩变形，但在工件取出后须注意防潮；截面外部的材料在最后才清除，不会产生支撑的问题，但却可能使内部的材料无法或不易取出，此需要有经验的操作者加以克服，LOM 原型件制作完成后拆解原型件情形，如图 4 所示。目前此种制

程最常用的材料是纸，其所完成的原型件感觉类似木模，所以非常适合翻砂铸造(sand casting)，当然也可以运用于其他的应用，本制程主要的优点是不需要建支撑架，也不需后处理，而且也能加工出既大又便宜的产品，但是缺点是所制出之工件其精度较差，而且工件之几何形状限制也最多。LOM 原型技术材料种类涵盖：一般强度 LOM 纸(standard LOM paper)、高强度 LOM 纸(high performance LOM paper)、塑料纸(LOM plastic paper)以及复合材料(LOM composite)。

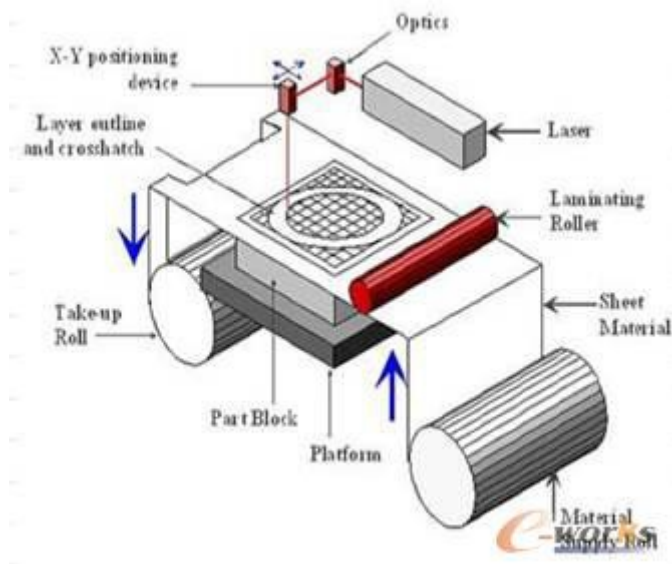


图 3 LOM 快速原型加工示意图

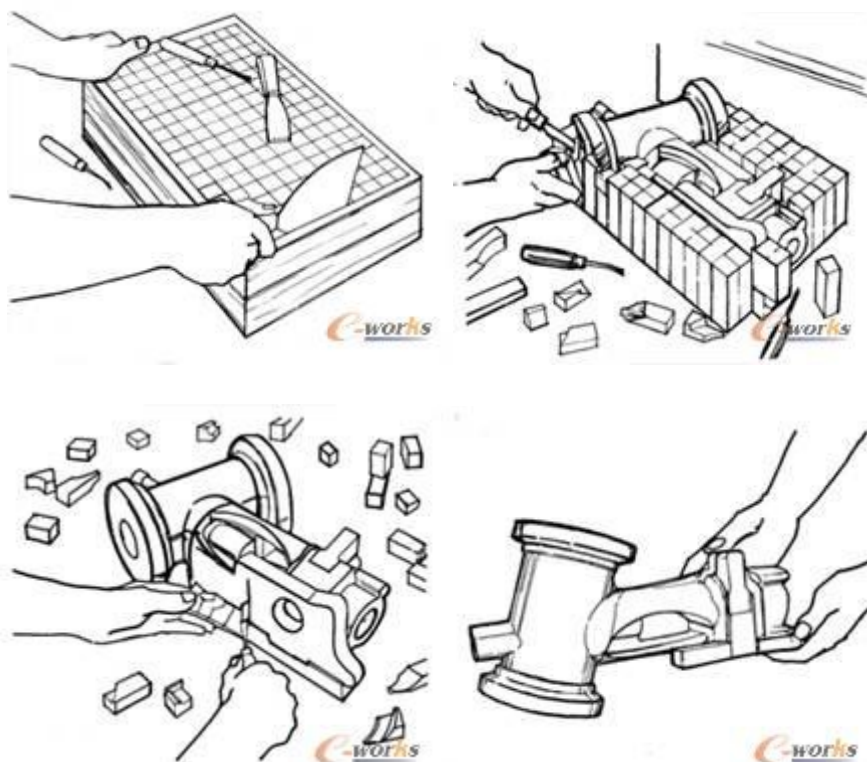


图 4 LOM 原型件制作完成后拆解原型件情形

图5 为 LOM 2030 H 机器外观，图6 LOM 1015 PLUS 机器外观。LOM 2030 H 与 LOM 1015 PLU 机器详细规格，如表 1 所示。由图与表可以发现，LOM 2030 H 机台规格大于 LOM 1015 PLU，因此可以制作出较大尺寸原型件。

LOM 快速原型系统的优点(advantages)：

1. 原型件制作过程中，材料无化学变化(no chemical change)产生以及无多余热量影响未加工材料，因此运用 LOM 快速原型系统所制作原型件之缩收以及热应力所导致之原型件几何形状变形等缺失，可以忽略。
2. LOM 快速原型系统所使用之 CO2 雷射仅对原型件外形轮廓(outline of shape)进行切割，此过程如与 SLA(Stereo lithography Apparatus)快速原型系统比较的话，LOM 快速原型系统将节省大量地加工时间(process times)。LOM 快速原型系统是为所有快速原型系统中效率最高(the most efficient process)的一种快速原型系统。
3. LOM 快速原型系统可以制作大型(large)、复杂(complex)与体积大(voluminous)原型件。
4. LOM 快速原型系统如与 FDM(Fused Deposition Modeling)快速原型系统相互比较，LOM 快速原型系统建构原型件时不需要支撑(support)结构。
5. 加工后零件可以直接使用，无需进行后矫正。
6. 运用 LOM 快速原型系统所制作出原型件，可以直接使用，无环境污染问题。
7. LOM 快速原型系统机台保养费用低廉。
8. LOM 快速原型系统所使用之材料不具毒性(non-toxic materials)。
9. 小型的 LOM 快速原型系统，例如：LOM 1015 PLUS，可适用于桌上型(desktop operation)的原型件加工。

LOM 快速原型技术的缺点(disadvantages)：

1. 可实际应用的原材料种类较少，尽管可选用若干原材料，例如纸、塑料、陶土以及合成材料，但目前常用的只是纸，其他种类之材料仍继续研发当中。
2. 所制作完成之快速原型件表面是粗糙的(rough)，必须经过后续加工(post processing)，才可进行快速模具(rapid tooling)的应用。
3. 所制作完成之快速原型件很容易吸收外在水气，因此必须立即进行后处理，例如：上漆。
4. 很难制作出尺寸微细之原型件，此缺失受限於原型件必须剥离废料之后才可取出，因此当原型件之特征结构(feature structure)细微时，剥离废料动作很容易损害原型件，因此 LOM 快速原型技术，很难制作出尺寸微细之原型件。
5. 运用 LOM 快速原型件于铸造应用时，燃烧原型件的时间必须注意空气流通(ventilation)。
6. 运用 LOM 快速原型系统制作原型件时，有部分的材料是浪费(wasted)的。



图 5 LOM 2030 H 机器外观



图 6 LOM 1015 PLUS 机器外观

表 1 LOM 2030 H 与 LOM 1015 PLU 机器规格

	LOM 2030 H	LOM 1015 PLU
Specification	Detail	Detail
Part envelope	813 x559 x 508 mm	381 x 254 x 356 mm
Laser power	50 W	25 W
Laser beam diameter	0.203-0.254 mm	0.20-0.26 mm
Material thickness	0.076-0.254 mm	0.08-0.254 mm
Material size	roll width: 711 mm roll diameter: 711 mm	roll width: 356 mm roll diameter: 356 mm
Power supply	220 VAC, 20 A, 60 Hz	115 VAC, 15 A, 60 Hz

Environmental	Outside venting	Outside venting
Input formats	STL files	STL files
Control computer	PC with special software	PC with special software
Network	N/A	Ethernet

LOM 快速原型技术应用

LOM 快速原型系统可以于不同领域(field)制作出原型件, 例如: 概念模型(concept model)、设计验证(design verification)、模型制作(patternmaking)、艺术品制作 (art)以及儿童玩具(toy designing)制作... 等等。快速原型件制作时间, 视产品大小不同, 从数小时至数天。图 7 为运用 LOM 快速原型系统所制作薄壳件(thin-wall)。图 8 为运用 LOM 快速原型系统所制作太极球(Taiji ball), 由图可以发现太极球表面非常优良, 此太极球如运用 FDM 快速原型系统来制作, 那支撑将是一个非常严重的问题, 然而运用 LOM 快速原型系统来制作太极球, 并不会产生支撑问题。图 9 为运用 LOM 快速原型系统所制作汽车零部件, 图 10 为运用 LOM 快速原型系统所制作出几何形状复杂之原型件, 由图可以发现原型件几何形状相当复杂。图 11 为运用 LOM 快速原型系统于铸造应用, 因为运用 LOM 快速原型系统所制作之原型件, 可以于铸造前进行砂模(sand mold)制作, 以利后续金属浇注作业, 翻制金属件(metal parts), 金属成品的公差(tolerance)可达 1/5 “至 3/100”。实际运用方面, 如图 12 所示, 左图为 LOM 快速原型件, 右图为铸造成品。图 13(上)为运用 LOM 快速原型系统所制作之电缆套管(cable sleeve)原型件, 图 13(下)为铝材铸造件。于医学上的应用, 图 14 为运用 LOM 快速原型系统与头盖骨(skull)制作, 图左边头盖骨内部为人脑(brain), 此一部份原型件系运用 Z-Corporation 之 Z402 快速原型系统制作。此外, 也可运用 LOM 快速原型件于石膏模制作(plaster casting)以及硅胶模(RTV silicone rubber mold)制作, 并可浇注出 10 至 30 件 PU 成品(polyurethane parts)。

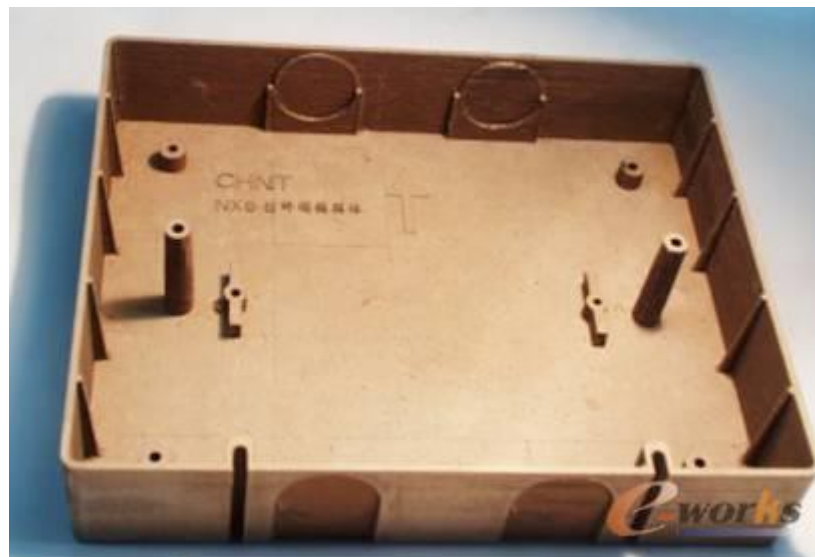


图 7 运用 LOM 快速原型系统所制作薄壳件



图 8 运用 LOM 快速原型系统所制作太极球



图 9 运用 LOM 快速原型系统所制作汽车零组件



图 10 运用 LOM 快速原型系统所制作出几何形状复杂之原型件



图 11 运用 LOM 快速原型系统于铸造应用

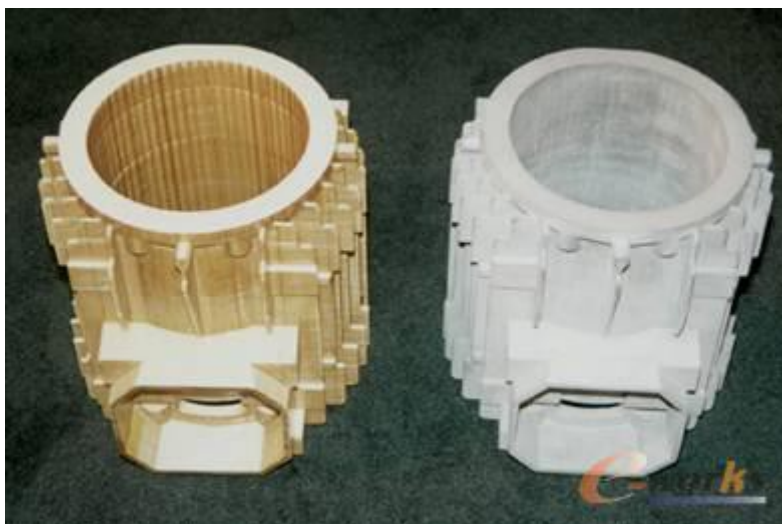


图 12 LOM 快速原型件(左)与铸造成品(右)

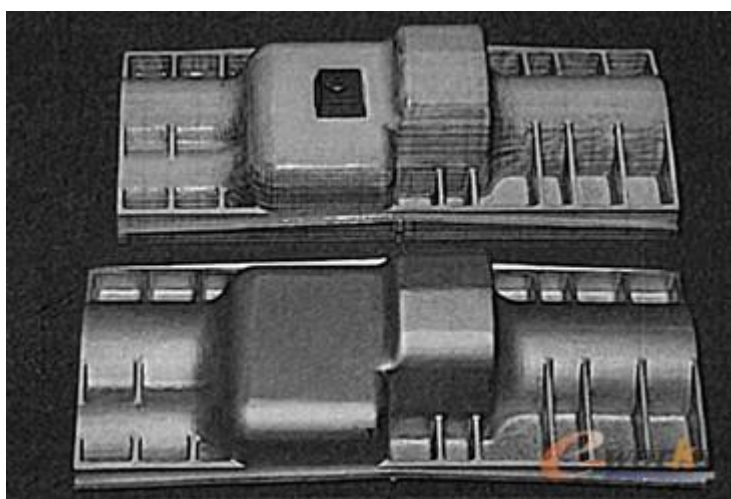


图 13 运用 LOM 快速原型系统于电缆套管制作



图 14 运用 LOM 快速原型系统于头盖骨制作

结论

LOM 快速原型系统是所有快速原型系统中，效率最的一种快速原型系统，LOM 快速原型系统可以制作大型、复杂与体积大原型件。但是缺点为可实际应用的原材料种类较少、所完成之

快速原型件很容易吸潮，因此原型件之尺寸容易变形以及所制作完成之原型件机械强度仍不足。所以，LOM 快速原型系统仍有诸多地方须改善，这一些地方均是未来接续 LOM 快速原型技术研发之重要研究方向。