

# 基于三维数字扫描与快速成型技术的 3D 复制机

---

**摘要：** 近年来，3D 打印技术正以前所未有的速度在传统技术工艺难以企及的领域创造奇迹。随着金属、陶瓷、玻璃以及塑料、感光树脂等快速成型材料应用技术的日趋成熟，3D 打印技术正引领“第三次工业革命”的到来。如今，传统的复印机早已经遍布社会生活的方方面面，且二维图像的复制技术早已成熟。然而，随着人类社会高速发展，三维实体的复制的需要急待解决。本文根据多技术融合的三维数字扫描技术与快速成型技术为出发点，提出一种新型 3D 复制机。通过立体摄影摄像技术、金属超声波探伤技术、计算机断层检测技术(CT 技术)、激光技术以及红外热成像技术来获取母体几何学及材料学信息，进而识别处理成 CAD 等包含 3D 打印机所需的精确打印指标的文件以完成复制。本系统对于大规模工业批量生产，以及特种工业领域的革命性作用是不可估量的。

**关键字：** 3D 打印技术，三维数字扫描，三维图像处理，快速成型技术

**Abstract:** In recent years, 3D printing is creating miracles at an unprecedented rate in traditional manufacturing. With metals, ceramics, glass, plastic, photosensitive resin and other rapid prototyping material application technology becoming mature, 3D printing is leading the arrival of the Third Industrial Revolution. Nowadays, the traditional duplicators have been popular in all aspects of the social life. 2D image reproduction technology has already mature. However, with the social rapidly developing, the demand of the three-dimensional entity replication needs presses for solution. This paper is based on 3D digital scanning technology and rapid prototyping technology and introduces a new 3D copy machine. The system uses the stereoscopic photography, ultrasonic flaw detection, computer fault detection technology (CT), laser technology and infrared thermal imaging technology to get maternal geometry and material science information, and change into CAD which containing the accurate index file to complete the copy. The system has immeasurable and revolutionary influence in large-scale industrial production and the special industry.

**Keywords:** 3D printing, 3D digital scanning, 3D image processing, Rapid prototyping

# 目录

摘要: .....	i
Abstract:.....	i
第一章 引言.....	1
1.1 创意来源.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 工作流程概述.....	2
第二章 三维数字母体采集单元.....	2
2.1 母体几何学信息采集单元.....	2
2.1.1 母体表观几何学信息采集单元.....	2
2.1.2 实体内部结构几何学信息获取.....	5
2.2 母体材料学信息采集单元.....	7
2.2.1 激光——红外热成像法.....	7
2.2.2 基于物质与射线相互作用的计算机断层技术（CT 技术） .....	8
第三章 信息处理单元.....	10
3.1 基于 IOR 技术的几何学信息识别与精确化处理单元 .....	10
3.1.1 噪声去除.....	11
3.1.2 边缘处理.....	14
3.1.3 黑白化.....	15

3.1.4 计算数值.....	15
3.1.5 色彩还原.....	15
3.1.6 人工校调.....	15
第四章 快速成型单元.....	16
4.1 数控机床.....	16
4.1.1 数控机床原理.....	16
4.1.2 数控机床技术缺陷.....	16
4.2 3D 打印技术原理.....	16
4.2.1 光固化快速成型技术（SLA） .....	17
4.2.2 分层实体制造技术（LOM） .....	18
4.2.3 选择性激光烧结技术（SLS） .....	19
4.2.4 熔融沉积制造技术（FDM） .....	20
4.3 三维实体后处理.....	21
4.4 产品检测单元.....	21
第五章 创新点与可行性分析.....	22
第六章 结束语.....	23

# 第一章 引言

## 1.1 创意来源

古今中外，实体复制都贯穿在各类科幻题材的小说漫画中，从《西游记》中孙悟空变出的替身，到日本漫画《机器猫》中那台能完美复制物体的仪器……实体复制就是无数人儿时的梦想。



图一

当下，二维图像的数码复印机早已普及。数码复印机总体原理为：CCD 传感器进行文稿图像的光电转换，之后将 CCD 输出的模拟电信号进行预处理并送入高速 AD 芯片，再将转换后的数字信号存入计算机的原稿图像还原单元，最终通过打印单元实现图像数据的复印。既然二维图像复印机是通过图片的光学采集与输出技术与光电信息转换技术实现，那么实体复制机也能通过相应技术采集相关信息并通过材料快速成型技术（俗称 3D 打印技术）实现。



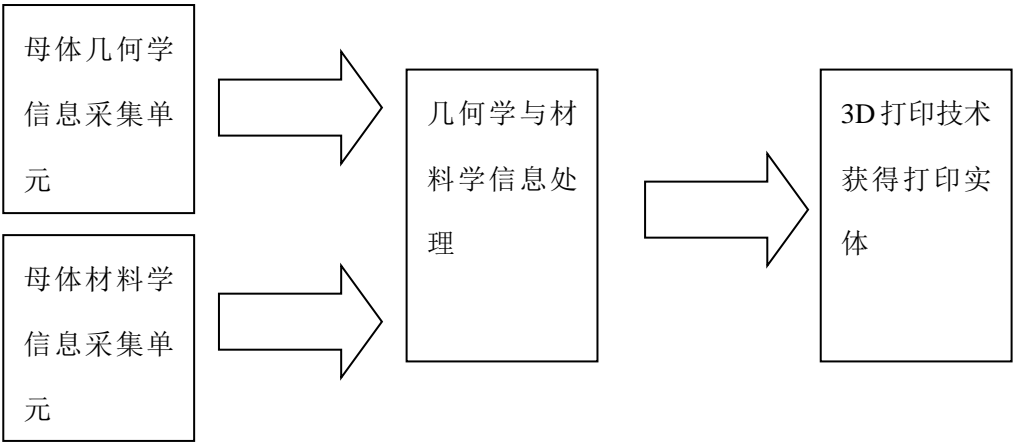
图二

## 1.2 国内外研究现状

1979 年东京大学的中川威雄教授，利用分层技术制造了金属冲裁模、成型模和注塑模。20 世纪 70 年代末到 80 年代初期，美国 3M 公司的 Alan J. Hebert、日本的小玉秀男、美国 UVP 公司的 Charles W. Hull 和日本的丸谷洋二，在不同的地点提出了快速成型技术的概念，即利用连续层的选区固化产生三维实体的新思想。1986 年自动零件制造系统 SLA-1 获得专利与美国 3D Systems 公司成立，快速成型技术发展到了第一个里程碑。在 90 年代后期，各种快速成型技术也进入到了商业化运营阶段，最终 SLA, LOM, SLS 和 FDM 在市场优胜劣汰的竞争中保留了下来。

我国的快速成型技术始于 1991 年，近年来，四种流行的快速成型技术的工艺方法在国内都可以找到相似的支持设备，商业化正逐步开展，性能也与国际水平相仿。北京航空航天大学教授王华明团队，瞄准大型飞机、航空发动机等国家重大战略需求，在国际上首次全面突破相关关键构建激光成型工艺、成套装备和应用关键技术，使中国成为迄今世界上唯一掌握大型整体钛合金关键构件激光成型技术并实现装机工程应用的国家。2011 年，华中科技大学史玉升教授开始为空客和欧洲航天局等单位制作飞机、卫星、航空发动机用大型复杂钛合金零部件的铸造蜡模。但总的来说，与工业化国家相比，我国快速成型技术的研究与应用乃至商业规模化、市场化程度仍具有较大差距。

1.3 工作流程概述

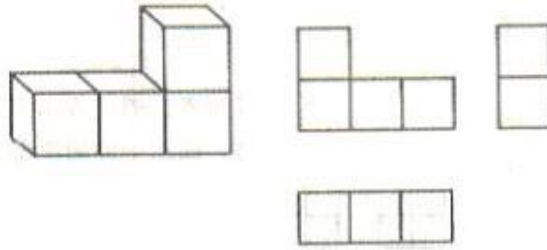


第二章 三维数字母体采集单元

2.1 母体几何学信息采集单元

2.1.1 母体表观几何学信息采集单元

众所周知，三维图像信息必然至少包括 X, Y, Z 三个维度的图形信息，即所谓的三视图。以最简单的正方体堆砌物体为例（图四），主视图，左视图与俯视图三幅图片便能确定整个实体的立体几何学信息。



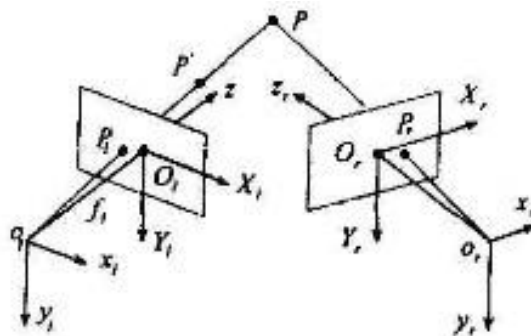
图四

然而，一个复杂的三维实体，必然不仅仅由简单的几何体堆砌而成。同时，真正意义上的母体图像采集必然包括实体各个表面的颜色与粗糙程度的信息。因此，本系统的母体图像采集单元将采用类似全景照相系统中的可旋转摄像机，即 1 台绕母体中心旋转的高分辨率 CCD 摄像机将分别获取母体 X, Y 平面、X, Z 平面与 Y, Z 平面图像信息。

全景照片通常指超过人双眼正常视角（水平方向  $120^\circ$ ，竖直方向  $70^\circ$ ）乃至达到水平方向  $360^\circ$  展示的图片。摄影师通过轻微地改变图像的线条与线条间交点来讲立体画面呈现在二维平面上。其工作原理，就是双目视觉基本原理的拓展。

#### 2.1.1.1 双目视觉基本原理

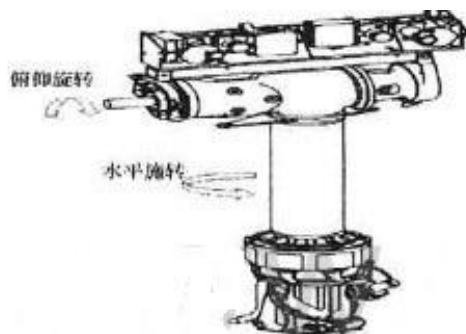
双目视觉是由两幅图像获取物体三维几何信息的方法，全景照片成像原理如图五所示。图中 P 为母体表面任意一点， $O_1$  和  $O_2$  分别为左右摄像机光心， $x_1o_1y_1$  与  $x_2o_2y_2$  为左右两摄像机坐标系， $P_1$  和  $P_2$  所在排名坐标系分别为左右摄像机成像坐标系。由图五易知，只有当左右 2 个摄像机同时观察 P 点，并且可以确定  $P_1$  与  $P_2$  对应的是空间上同一点，才能唯一确定空间 P 点所在位置。例如缺少右摄像机， $O_1P$  上任意一点  $P'$  的图像点都是  $P_1$ ，左摄像机只能获取左摄像机成像平面上物体的 X、Y 轴图像信息而不知 P 点相对于左摄像机的深度。



图五

#### 2.1.1.2 “勇气”号火星探测器全景照相系统

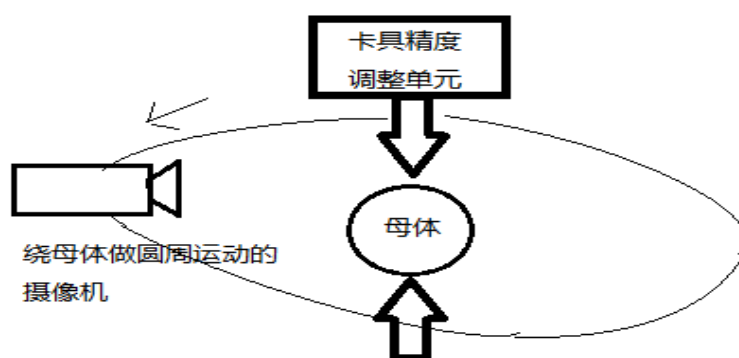
而美国发射的“勇气”号火星探测器的全景照相系统正式通过旋转其 2 台摄像机角度，结合虚拟现实技术，将火星上的水平方向与竖直方向  $360^\circ$  的图像信息展示在地球人眼前。全景照相系统安装在“勇气”号桅杆顶端的“相机横杆”上，该桅杆可以  $360^\circ$  水平旋转，也可以上下旋转得到  $180^\circ$  俯仰视角。从而当桅杆旋转一周且横杆旋转  $180^\circ$  之后，两台照相机得到的图像序列经过拼接与匹配重建就可以恢复所拍摄场景的三维信息。（图六）



图六

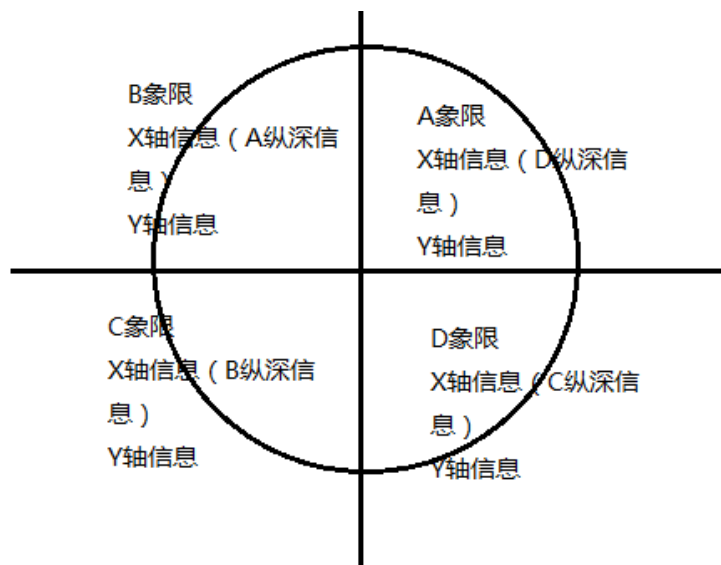
#### 2.1.1.3 公转式高分辨率 CCD 成像与象限分割法

因此，由于本系统摄像机旋转方式与全景照片迥异，全景照片技术中所采用的是摄像机自转式旋转取景，而本系统采用摄像机绕母体公转式旋转，采用一台高分辨率 CCD 采集设备即可完成（图七），减少了摄像设备的投入。本系统成像原理将  $360^\circ$  分为 4 个象限，先采集 A 象限图像的 X, Y 图像信息，在采集 B 象限的 X, Y 图像信息，则 B 象限的 X 维度信息便是 A 象限图像的纵深信息，以此运动一周后便可以在双目视觉基本原理上完成全景图像的采集（图八）。借鉴“勇气”全景照相系统，本复制机的母体图像采集流程如图九所示，每经过一个平面的卡具固定，就进行一次 CCD 系统绕母体  $360^\circ$  旋转的图像序列采集，再改变操作面，进行下一个平面的图像采集操作。

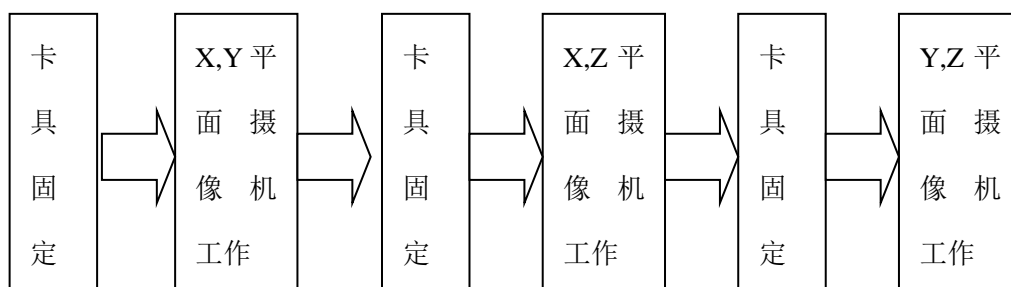


图七





图八

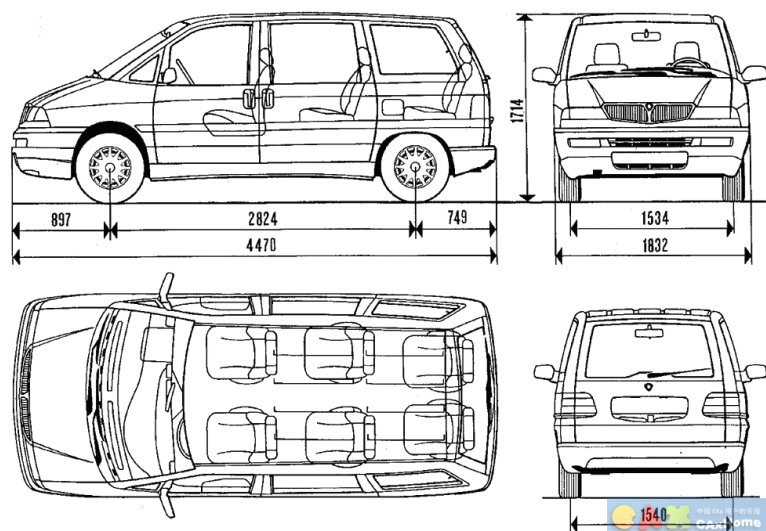


图九

高分辨率 CCD 成像单元将根据复制要求的需要调整镜头的距离、精度及旋转速度。例如，对于较精细的复制任务，摄像机可以选择成像分辨率高，对焦放大倍数大的镜头，则与之对应较为缓慢的摄像机旋转速度；反之，较为粗糙的复制任务则对应分辨率低、放大倍数小的镜头与较快的摄像机旋转速度。

### 2.1.2 实体内部结构几何学信息获取

然而，真正意义上的复制，并不仅仅是表面外观的复制那么简单。如果以复制一辆汽车为例，其内部构造信息的获取也是几何学信息获取的重难点。（如图十）



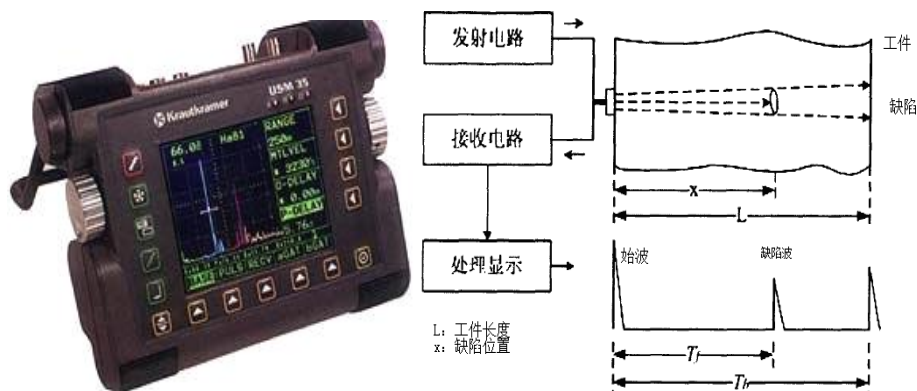
图十

本系统关于母体内部构造几何学信息的获取主要采用金属探伤技术与计算机断层技术（CT 技术）相结合，利用超声波与多种射线来获取母体内部构造信息。

#### 2.1.2.1 基于超声无损检测的金属探伤技术

基于超声无损检测的金属探伤技术是在现代工业生产中应用的非常广泛的一种无损检测方法。超声探伤仪以脉冲反射式超声探伤技术为基础。系统先向母体输入超声波或多种射线，计算机则可以获取采集系统输出的深度、水平、距离、波幅、孔径等母体对于超声波反馈的信息。

金属探伤仪器的测量方法可以简单叙述为：当测长扫描查询过程中缺陷反射波有多个高点时，探头沿着缺陷方向左右移动，找到缺陷两端的最大反射波，分别以这两个端点反射波高为基准，继续向左、右移动探头，当端点反射波高降低一半（或 6dB）时，探头中心线之间的距离即为缺陷指示长度。依此原理推广，则可以通过此系统获取母体内部构造信息。（图十一）



图十一

超声波在介质中传播时,在不同介质界面上具有反射的特性,如遇到缺陷(母体内部空间),其尺寸大于或等于超声波波长时,则超声波在缺陷上反射回来,探伤仪可将反射波显示出来;如缺陷的尺寸甚至小于波长时,声波将绕过射线而不能被反射。在实际应用中,母体内部结构的空洞空隙尺寸大多大于波长,而计算机亦可以根据人为设置的空隙尺寸标准来调整复制精度。

波声的方向性好,频率越高,方向性越好,以很窄的波束向介质中辐射,易于确定空隙位置。而超声波的传播能量大,如频率为 1MHZ 的超声波所传播的能量,相当于振幅相同而频率为 1000HZ 的声波的 100 万倍。因此,基本能覆盖母体内部的每一个角落,使系统获取完整的母体内部构造信息。

## 2.2 母体材料学信息采集单元

二维图形的复制所需要的信息通过光学扫描便能获取。这是因为图像信息中也包含着色彩信息。在打印子体时,黑白打印机(复印机)能根据原图像的对比度调整墨粉的用量,彩色打印机(复印机)则自动在多色墨盒选取一种最接近的组合,并通过调整喷点疏密程度的方法来表达不同的色彩与色阶。然而,实体复制机所需要获取与表达的信息远远没有那么简单。

还是以一辆最普通的汽车为例,汽车构件大多数由金属材料组成,钢、铁所占比例较高,而在汽车工业轻量化发展的当下,镁铝钛合金材料、塑料和复合材料亦广泛分布于汽车的每个角落。钢制的外壳,橡胶制的轮胎,铝合金制的轮毂,塑料制的管道……每一个位置所需要的材料都各不相同。

本系统的材料学信息采集单元亦用到了多种技术的复合。其核心思想为,A 仪器发出某种测量介质 a,在不同的材料上吸收该介质使得其物理化学指标 b 发生改变,从而通过 B 仪器对 b 的测量而获取母体材料学信息。

### 2.2.1 激光——红外热成像法

激光发射器对母体发出激光,由于不同材料对于激光的吸收程度不同而反映在不同区域温度的不同。从量热的角度出发,通过测量材料的温度变化并进行相应的热力学计算而获取母体材料学信息。参考几何学信息采集单元得到的物体内部构造信息,应用红外热成像技术来材料的热力学信息。

#### 2.2.1.1 集总参数法

当固体内部的导热热阻小于其表面的换热热阻时,固体内部的温度趋于一致,近似认为固体内部的温度 t 仅是时间  $\tau$  的一元函数而与空间坐标无关,这种忽略物体内部导热热阻的简化方法称为集总参数法。

#### 2.2.1.2 材料的激光吸收热功率

$$P_{\text{abs}} = mC_p \left( \frac{dt}{d\tau} \right)_{\text{heating}} + hA_1(t - t_0) + \lambda A_2(t - t_0)/\delta,$$

其中  $m$  为试件的质量,  $C$  为试件的比热容,  $h$  为对流换热系数,  $\lambda$  为周围介质的导热系数,  $A_1$  为对流换热面积,  $A_2$  为热传导的换热面积,  $\delta$  为周围介质的厚度,  $t$  为试件的温度,  $\tau$  为时间,  $t_0$  为初始温度。

### 2.2.1.3 红外热成像技术

根据物理学原理, 凡是高于空间绝对温度的物体, 都会形成热红外线辐射状态, 而低于空间绝对温度的物体不存在热红外线辐射。红外热像仪测温是靠接收被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。红外探测器和光学成像物镜接受被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上, 从而根据不同的电信号获得红外热像图, 这种热像图与物体表面的热分布场相对应。

实际测量时, 热像仪接收到的有效辐射包括部分目标自身辐射、环境反射辐射和大气辐射。

被测量物体的表面辐射亮度为:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) + \rho_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) + (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u)$$

其中第一部分为表面光谱辐射亮度, 第二部分为反射的环境光谱辐射亮度,  $T_o$  为被测物体表面温度,  $T_u$  为环境温度,  $\varepsilon$  为表面发射率,  $\rho$  为表面反射率,  $\alpha$  为表面吸收率。

作用于热像仪的辐射照度为:

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} [\tau_{a\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)]$$

其中,  $A_0$  为热像仪最小空间张角所对饮的目标的可是面积,  $d$  为该目标到测量仪器之间的距离, 通常一定条件下,  $A_0$  与  $d$  负 2 次方的商为一常数,  $\tau$  为大气的光谱透射率,  $\varepsilon$  为大气发射率。

与辐射功率想对应的信号电压为:

$$V_s = A_R \int_{\Delta\lambda} E_{\lambda} \mathcal{R}_{\lambda} d\lambda$$

至此, 母体的材料学信息由光学、热学转换为电学信息储存在计算机当中。

### 2.2.2 基于物质与射线相互作用的计算机断层技术 (CT 技术)

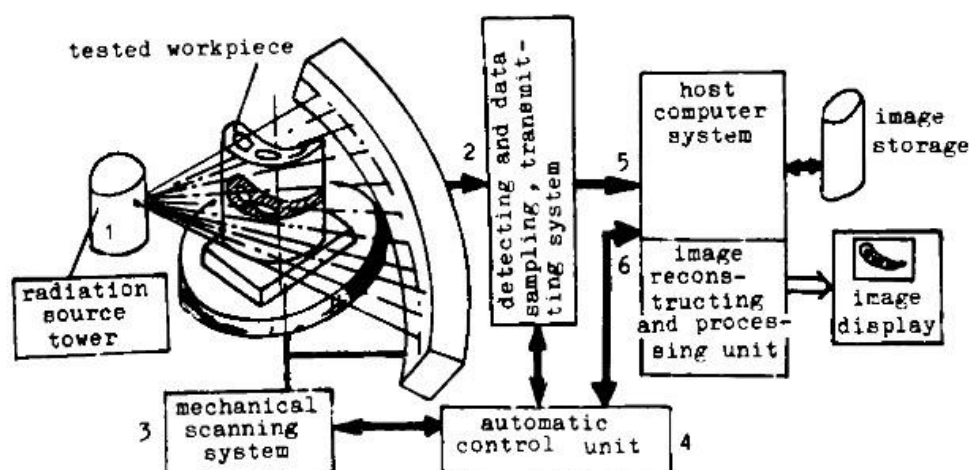
利用计算机断层技术 (CT 技术) 复合获取几何学与材料学信息。X 射线可以穿透非金属材料, 不同波长的 X 射线的穿透能力不同。而不同材料对于同一波长的 X 射线的吸收能力也不同, 物质密度越大, 原子序数越高, 对 X 射线的吸收能力越强。X 射线穿透物体时, 它的光强遵循下述方程:

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x)$$

式中： $I_0$  为 X 射线穿透物体前的光强； $I$  为 X 射线穿透物体后的光强； $\mu$  为被检测物体单位质量吸收系数； $\rho$  为物质密度； $x$  为入射 X 射线的穿透长度。

由于射线的衰减值为穿越各不同物质吸收作用的指数和。数学家 Radon 1917 年曾说“一副图像是由它的所有线积分所确定”因此，应用 CT 技术得到被测物所测断层图像需要取得多个方向上且数据量足够的射线衰减系数。若一个断层很薄可以近似认为是一个截面，考虑为由  $M \times N$  个质点（面素）组成。要得到该断面质量较好的图像，一般需要有在各个方向上所有射线穿越被测物体并形成  $M \times N$  个射线投影值组成的集合。按照一定的投影重建算法在计算机内运算就可以重建出包含着  $M \times N$  个像素的二维灰度图像。该图像的灰度变化直接反映被测物密度和吸收特性的变化，从而帮助我们判别被测物的物质组成。因此，若测出多个断面图像还可以进行三维重建，获得三维空间图像，即同时获取母体的材料学与几何学信息。

#### 2.2.2.1 复合材料学信息采集单元 CT 工作单元



图十二

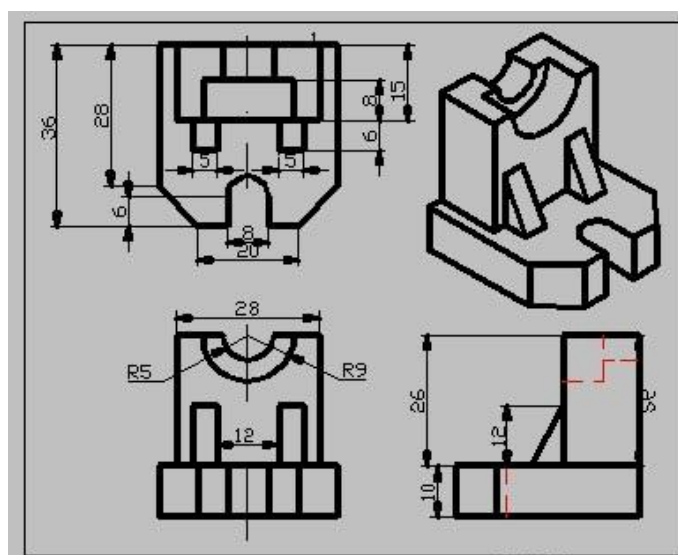
图十二为本系统 CT 工作单元的简易示意图

1. 辐射源：包括 X 射线源、中子源与  $\gamma$  源
2. 探测与数据采集传输系统
3. 传动控制单元：控制母体、放射源与探测器的相对运动

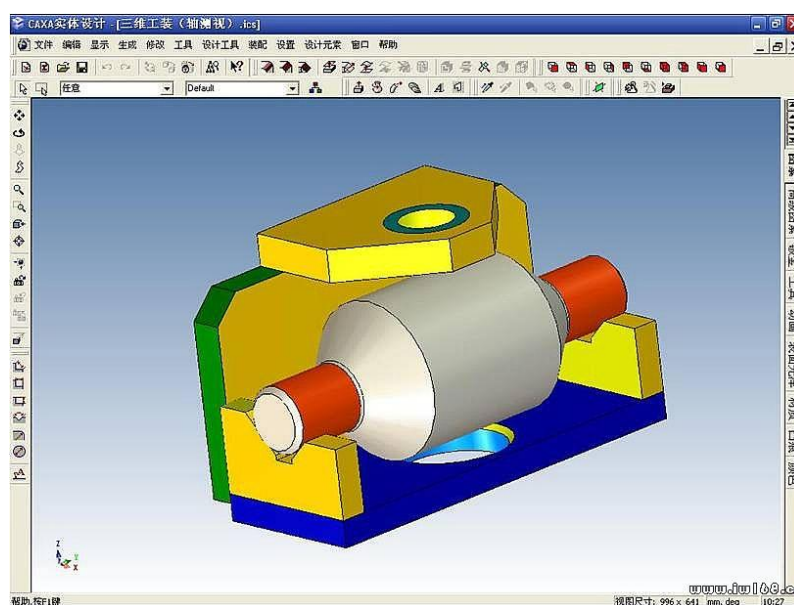
当然还包括最重要的计算机系统与图像重现与处理单元，对经过校正的数据按投影重建的方法实现快速准确的图像重建，并对重建的图像进行后期的处理。

### 第三章 信息处理单元

二维图像复印机需要将图像完整的采集到计算机中,按照像素的灰度、颜色、对比度等信息的不同选择不同的色彩组合进行二维图像的输出。然而对于输出三维实体,基于复合母体采集技术得到的母体几何学与材料学的信息是不够精确的,大规模批量生产的工业产品必然需要相当精确的数据。如图十三的标准化三视图与图十四的 CAD 模型。



图十三

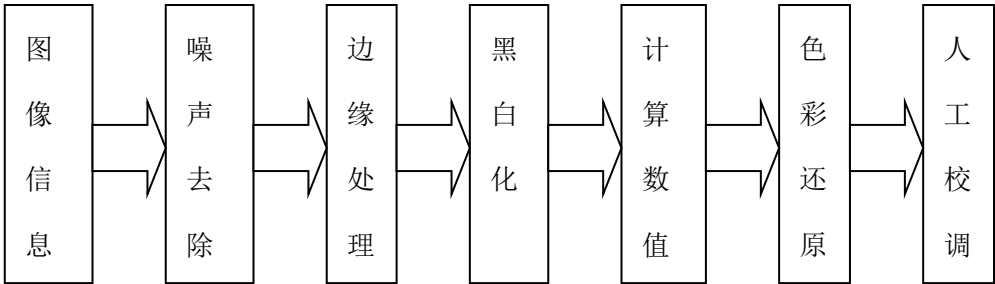


图十四

#### 3.1 基于 IOR 技术的几何学信息识别与精确化处理单元

OCR（Optical Character Recognition）技术是光学字符识别的缩写。当图像采集单元采集到了二维文字时，计算机便将此文字图片暗、亮的模式确定其形状，与标准字符库中的字形匹配，最终将图像转化为识别出的字符编码。

本文提出一种全新的概念 IOR（Intelligent Object Recognition，智能目标识别）技术。对于采集到的几何学图像文件与母体内部构造信息，将采取如图十五的流程处理成 3D 打印机支持的高精度文件。



图十五

### 3. 1. 1 噪声去除

任何图像的获取过程都会存在各种因素的干扰，而使得图像收到噪声的干扰。本系统将根据噪声的特征自动清除杂质像素。能否分辨出噪声与图像本体，以及辨识程度的强弱，都体现了 IOR 技术的人工智能性的高低。

现今图像去噪法主要分为两大类，一类是空间域法，另一类是变换域法。现在常用的两种方法为均值滤波算法和中值滤波算法。但它们二者却有截然不同的去噪特性，均值算法对于高斯噪声有较好的去噪能力，而对于脉冲噪声的去噪能力却较差；中指滤波算法却恰恰相反，它对于脉冲噪声的去噪能力很好，却对于高斯噪声无能为力。因此，单独采用任何一种滤波器甚至是自适应中心加权法、模糊加权法等改进方法，其去噪效果都不能达到最好。本系统将借鉴将两种去噪法复合使用的思路。首先将受脉冲噪声和高斯噪声污染的像素区分开，即运用局部阈值吧像素归类为收高斯噪声污染的像素和收椒盐噪声污染的像素。再对不同的噪声区应用不同的方法，以获取更为清晰的图像数据。

#### 3. 1. 1. 1 阈值分割

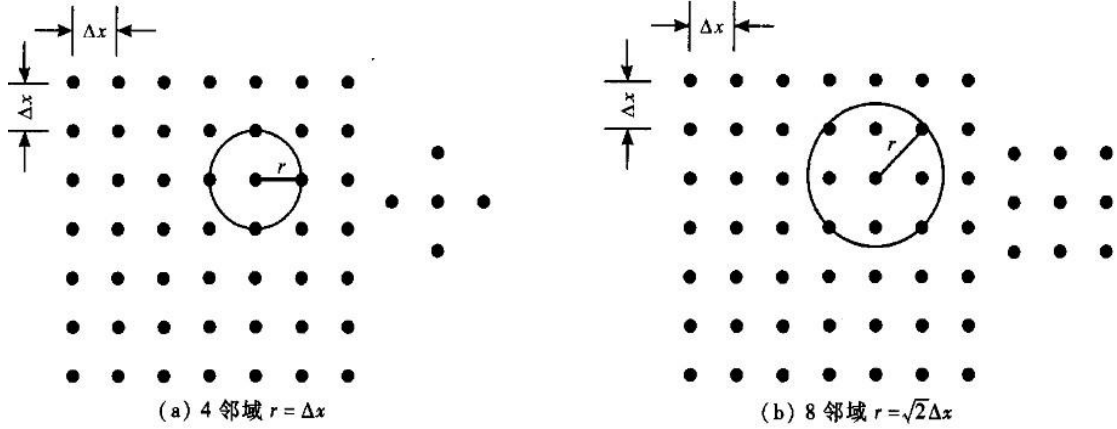
阈值分割法是一种基于区域的图像分割技术，其基本原理是通过特征阈值，将图像像素点分为若干类。直接来自原始图像的灰度或彩色特征、由原始灰度或彩色值变换得到的特征等都能作为特征阈值。若图像中的每一个像素点为一个关于其二维坐标的函数  $f(x, y)$ ，按照一定准则找到特征值  $t$ ，则可以将图像分割为两个部分，分割后的图像像素如下：

$$g(x, y) = \begin{cases} b_0 & f(x, y) < t \\ b_1 & f(x, y) \geq t \end{cases}$$



### 3.1.1.2 均值滤波算法

均值滤波算法又叫邻域平均法，即用几个邻域像素灰度平均值来代替每个像素的灰度值，其领域的选取通常以单位距离  $\Delta x$  构成的 4 邻域和根号 2 个单位距离为半径  $r$  构成的 8 邻域（如图十六）。



图十六

其噪声模型假设为  $g$ ，数值分析如下：

$$g(i,j) = f(i,j) + n(i,j)$$

经过邻域平

滑得到的图像为：

$$\begin{aligned} \hat{g}(i,j) &= \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} g(i,j) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} f(i,j) + \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} n(i,j) \end{aligned}$$

其中， $S$  为  $(i, j)$  点的邻域， $M$  为领域中的总点数。据统计分析可得第二项中，噪声方差为：

$$D\left(\frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in S} n(i,j)\right) = \frac{1}{M^2} \sum_{(i,j) \in S} D(n(i,j)) = \frac{1}{M} \sigma_{\text{noise}}^2$$

其中， $D$  表示求噪声方差运算， $\sigma^2$  为未经邻域平滑前原图像的噪声方差。由于经过图像的邻域平滑处理后，噪声的方差减少了  $M$  倍，因此起到了降低噪声平滑图像的作用。



### 3.1.1.3 中值滤波算法

中值滤波算法的基本原理是把数字图像或数字序列中的一点数值用该点的某个领域中所有点的中值代替。设  $\{x(i, j), (i, j) \in I \times I\}$  表示数字图像个点的灰度值，滤波窗口为  $S$  的二维中值滤波定义为

$$y(i, j) = \text{med} \{x(i, j)\} = \text{med} \{x(i+r, j+s)\}$$

而二维中值滤波的窗口既可以取方形，也可以选择圆形或十字形等。

尽管经典的中值滤波器在平滑脉冲噪声方面非常有效，且能较好地保持图像细节，但不管像素点的好坏均一致应用于整幅图像，必然会导致许多好的图像细节被破坏。因此，宜采用自适应中值滤波算法。其自适应机制是先在子窗口的 4 个主要方向（0°、45°、90°、135°）上分别进行中值滤波，再用原始图像与 4 个子图像的差值产生加权系数，之后进一步用 4 个子图像加权来合成新图像。

1. 首先在 4 个方向上分别进行中值运算得到  $y_1(i, j)$ 、 $y_2(i, j)$ 、 $y_3(i, j)$ 、 $y_4(i, j)$ ；
2. 将 4 个子图像与原始图像分别求差取绝对值得  $d_1, d_2, d_3, d_4$ ；
3. 求出各个方向的权重  $w$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )

$$w_i = \frac{1/d_i}{1/d_1 + 1/d_2 + 1/d_3 + 1/d_4}$$

4. 最终结果为

$$y(i, j) = \sum_{i=1}^4 w_i y_i$$

### 3.1.1.4 利用阈值分割复合运用滤波算法

设定特征阈值  $T_1, T_2$ 。设  $x$  为图像  $(i, j)$  的像素值，则其普通意义上的中值输出为  $m(i, j)$ 。定义  $l(i, j)$  为  $x$  与  $m$  之差的绝对值。 $P_1(i, j)$ 、 $P_2(i, j)$  为所取领域中与  $x(i, j)$  最接近的两点，令  $a$ 、 $b$  分别为  $P_1$ 、 $P_2$  分别与  $x$  之差的绝对值， $v(i, j)$  为  $a$  与  $b$  的算术平均值。去噪规则如下：

1. 若  $l \geq T_1$ ，且  $v \geq T_2$ ，则采用中值滤波算法；
2. 若  $l \geq T_1$ ，且  $v < T_2$ ，则采用均值滤波算法；
3. 若  $l < T_1$ ，则采用均值滤波算法。

### 3.1.2 边缘处理

边缘是图像最基本的特征。边缘指的是周围灰度有反差变化的像素集合，是图像分割、纹理分析和图像识别的重要基础。边缘检测依赖于算子检测、标示图像在灰度、色彩、纹理等方面不连续的位置、理想的边缘检测能正确解决边缘的有无、真假和定向定位。光线的变化显著的影响一个区域的外观，但是不会改变其边缘性质，这就是边缘在图像中最重要的不变性质，对于本系统的 IOR 单元有着重要作用。

#### 3.1.2.1 边缘检测

边缘检测技术大致可分为如下四种，本复制机的信息处理单元将根据实际需要选择适合的技术。

1. 检测梯度最大值。根据边缘发生在图像灰度值变化较大的特点，与之对应的连续情形便是函数梯度较大的地方。
2. 检测二阶导数的零交叉点。边缘处梯度去的最大值（可正可负），也就是灰度图像的拐点。又数学知识易知拐点函数的二阶导数为 0。
3. 统计学方法。利用对二阶零交叉点的统计分析得到图像中各个像素是边缘的概率进而得到边缘。
4. 小波多尺度边缘检测。

然而边缘检测结果并不能得到完美的答卷，因此还需要根据需要，采取不同的后续处理。

#### 3.1.2.2 边缘连接

边缘检测算法容易产生不连续的边界，应对这些边缘进行连接处理。分析图像中的每个点的小邻域。当满足改点与邻域中某点的幅度之差的绝对值小于非负门限  $E$  且梯度向量之差的绝对值小于非负门限  $A$  时，改点与某点具有相似性，判断属于同一边缘，则将两点连接。对于图像中的每个像素重复此操作，则可以完成边缘连接。

#### 3.1.2.3 边缘多响应处理

模板卷积后得到的边缘可能是跨跃好几个点而不是点，这样会使得原本应对只有简单的边界变粗了。应用非极值抑制法：边缘像素不只是一要大于阈值，而且在梯度方向上梯度的大小要比它的前者与后者都大。具体操作如下：

1. 根据 8-邻接将边缘方向量化为 8 个方向；
2. 对于每个非 0 幅值的像素，考察由边缘方向指出的两个邻接像素；
3. 如果两个邻接像素的幅值都超过当前考察像素的幅值，将它们标记；
4. 当所有像素都经过考察后，重新扫描图像，以 0 抹去所有标记过的像素。

该算法是基于 8 邻接,亦可以简化为 4 邻接或开放为更为复杂的边缘方向度量。

### 3.1.3 黑白化

#### 3.1.3.1 颜色的数据表示

图像的每个像素的颜色都是由 3 种基本颜色(红、绿、蓝)组合而成。其中没种颜色都可以去  $0 \sim 255$  的数值。因此,计算机中的颜色有  $255 \times 255 \times 255 = 1677$  万种颜色,而每种颜色都有自己的 RGB 值,即各三基色的数值组合。像素的颜色可以用一个长整形 4 字节数表示。

由于彩色图像所包含的信息量巨大,为了减少计算机的工作负荷,首先将采集到的图像信息做黑白话处理。根据色彩的对比度将原有的彩色图片转化为黑白图片。在计算机中,若 RGB 值都为 255 则为黑,若都为 0 则为白。取该像素的原 RGB 值的算术平均值为灰度值,则可以将原有的彩色图片转化为黑白图片。

#### 3.1.4 计算数值

由于经过噪声去除、边缘处理与黑白化过程,计算机根据图像中不同的对比度计算数值信息的速度将大大提高,其中包括长度,角度,弧度等几何学信息。并自动生成有标注的 CAD 文件。

这是可充分发挥数学运算理论的一个模块,根据不同的特征特性,选用不同的数学距离函数。利用各种特征比对方法的相异互补性,增强识别结果的信心度。

#### 3.1.5 色彩还原

原图像的色彩信息将被添加到处理好的黑白 CAD 源文件上。

#### 3.1.6 人工校调

计算机获取的实体几何学信息难免存在误差,通过认为观察、测量与校正,能够提高复制的精确度。该模块的存在,能够方便的随复制所需调整精确度。

## 第四章 快速成型单元

### 4.1 数控机床

#### 4.1.1 数控机床原理

现今应用较为普遍的数控机床为数控车床、数控铣床、加工中心与车削中心（车铣中心）。它们分别用于不同材料、不同工艺产品的加工。如用数控车床车削内外圆柱、圆锥面；用车削中心加工键槽、断面孔槽。但无论是何种数控机床，都采用的是“做减法”的总体思路，依据对零件的不同要求，采用不同的道具与运动回转方式将原始材料切削至所要求的部分，即所谓的材料去除成型。因此，尽管数控机床发展到最为先进的加工中心与车削中心，其技术先进性仅仅表现在拥有庞大的刀库、自动换刀、自动改变回转方式等。具体操作无外乎使用铣刀、钻头、丝锥等工具进行切削、打孔、篆刻等冷加工工艺。（图十七）



图十七

#### 4.1.2 数控机床技术缺陷

尽管，使用 CAXA 、 AutoCAD 等计算机辅助设计软件可以轻松的设计产品立体图，但由于数控机床的缺陷，某些产品部分是无法达到的。例如，数控车床无法切削出圆锥形的内凹槽，这是因为车刀无法与主轴成角度运动；数控加工中心无法加工出间距小于刀尖直径的两细槽，这是由于数控加工中心的产品分辨率有限。然而，这些传统工艺难以企及的“盲区”，运用 3D 打印技术，都能轻松解决。

### 4.2 3D 打印技术原理

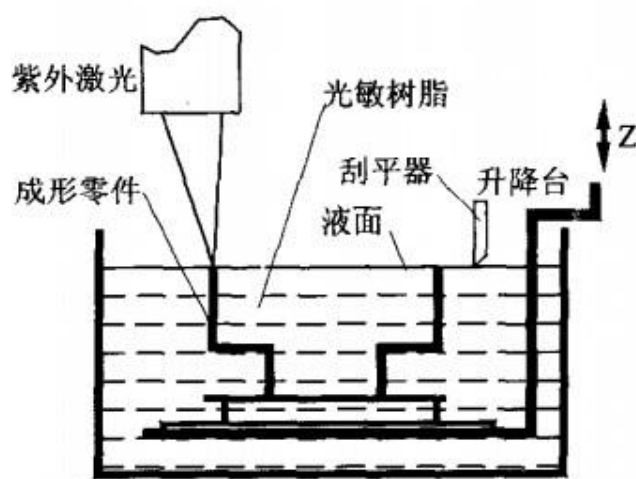
1986 年，美国工程师查克·赫尔通过喷墨打印机的原理发明了 3D 打印技术之一的光固化快速成型技术。他通过逐层叠加薄层与紫外线固化行程固体模型而将三维实体进行输出，并以此申请了专利。3D 打印技术的学名为快速成型技术，

主要基于光固化快速成型、分层实体制造、选择性激光烧结与熔融沉积制造技术，利用连续层的选区固化来输出三维实体。简而言之，与传统制造业中数控机床加工方式不同的是，3D 打印是逐层添加的“加法”过程，即所谓的材料添加成型。这是断层扫描的逆过程，断层扫描是把某个东西微分成无数叠加的面，3D 打印就是逐层的打印，进行叠加，成为一个三维实体。然而，现今流行的四种快速成型技术都有各自的优缺点，对于不同的材料，本系统将采用不同的快速成型技术，来获取最接近母体的三维实体输出。

#### 4.2.1 光固化快速成型技术（SLA）

首先运用分层离散软件将 CAD 模型离散，并输入 3D 打印机单元。用运动轨迹收到控制且具有特定波长与强度的激光聚焦到光固化材料的表面，使之由点到线，由线到面顺序凝固，完成一个层面的绘图作业，然后升降台在垂直方向移动一个层片的高度，再固化另一个层面，重复此过程，叠加构成三维实体。本技术的工作原理，是基于液态光敏树脂的光聚合原理而工作。该液态光敏树脂材料在一定波长（ $\lambda=325\text{nm}$ ）和强度（ $w=30\text{mW}$ ）的紫外光的照射下，就可以迅速地发生光聚合反应，分子量急剧增大，材料也就从液态转变成固态。只要控制紫外光的照射轨迹，便可以使得固化后的材料形成理想的形状。

本单元的结构如图十八所示，其具体工作流程为：液体槽中充满液态光固化树脂，激光束在偏转镜的作用下，能在液体表面上扫描，扫描的轨迹以及激光的有无均由计算机控制。当光点扫描到的地方，液体就固化了。成型开始时，工作平台在液面下一个确定的深度，液面始终处于激光的焦平面，聚焦后的光斑在液面上按计算机的指令逐个点扫描，即逐点固化。当一层扫描完成后，未被照射的地方仍是液态树脂；然后，升降台带动平台下降一层高度，已成型的层面上又被一层新的树脂覆盖，刮平器将黏度较大的树脂液面刮平，然后再进行下一层的扫描；新固化的一层牢固地黏在前一层上，如此重复直到整个零件制造完毕，输出三维实体完成。



图十八

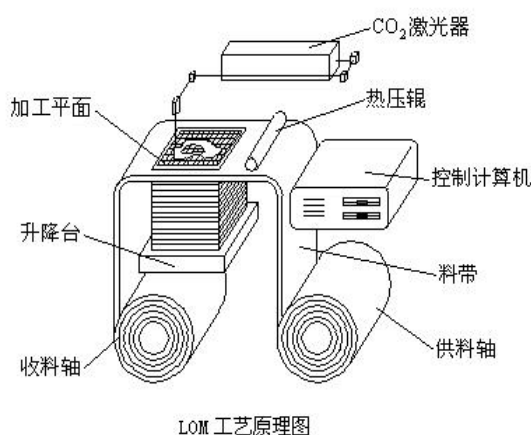
光固化成型技术具有如下优势：

1. 成型精度高，精度均值在 0.1mm 以内；
2. 成型尺寸大，可以加工 600mm × 600mm 的大尺寸工件；
3. 产品的表面质量光滑；
4. 系统分辨率高，能制造最小 0.5mm 壁厚的薄壁件
5. 最大加工速度可达 8m/s。

#### 4.2.2 分层实体制造技术（LOM）

分层实体制造技术工艺采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等。片材表面事先涂覆上一层热熔胶。加工时，热压辊热压片状材料，使之与下面已成形的工件粘接；用 CO<sub>2</sub> 激光器在刚粘接的新层上切割出零件截面轮廓和工件外框，并在截面轮廓与外框之间多余的区域内切割出上下对齐的网格；激光切割完成后，工作台带动已成形的工件下降，与带状片材（料带）分离；供料机构转动收料轴和供料轴，带动料带移动，使新层移到加工区域；工作台上升到加工平面；热压辊热压，工件的层数增加一层，高度增加一个料厚；再在新层上切割截面轮廓。如此反复直至零件的所有截面粘接、切割完，得到分层制造的实体零件。

分层实体制造技术的工作单元如图十九所示。具体工作成型的全过程可以归纳为前处理、分层叠加成型、后处理 3 个主要步骤。第一步同样还是将实体分割成层状薄片。接下来的具体工序为基底制作。由于工作台的频繁起降，所以必须将分层实体制造原型的叠件与工作台牢固连接，这就需要制作基底，通常设置 3~5 层的叠层作为基底，为了使基底更牢固，可以在制作基底前给工作台预热。制作完基底后，快速成型机就可以根据事先设定好的加工工艺参数自动完成原型的加工制作，而工艺参数的选择与原型制作的精度、速度以及质量有关，这其中重要的参数有激光切割速度、加热辊温度、激光能量、破碎网格尺寸等。



图十九

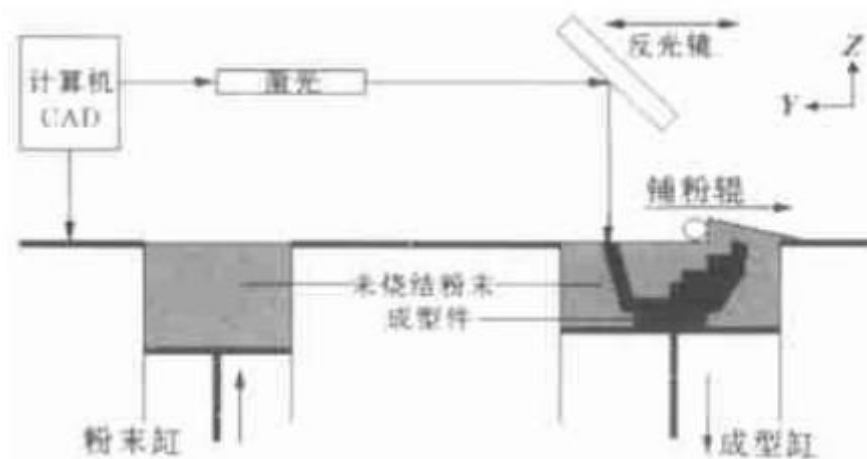
由于分层实体制造技术原理的缺陷，接下来需要进行余料去除。余料去除是一个极其烦琐的辅助过程，它需要工作人员仔细、耐心，并且最重要的是要熟悉制件的原型。这样在剥离的过程中才不会损坏原型。余料去除以后，为提高原型表面质量或需要进一步翻制模具，则需对原型进行后置处理，如防水、防潮、加同并使其表面光滑等，只有经过必要的后置处理工作，才能满足快速原型表面质量、尺寸稳定性、精度和强度等要求。

分层实体制造技术的特点如下：

1. 原型精度高，有较高的硬度和较好的机械性能，可进行各种切削加工；
2. 无须后固化处理，无须设计和制作支撑结构；
3. 废料易剥离；
4. 原材料价格便宜，原型制作成本低
5. 不能直接制作塑料工件，工件的抗拉强度和弹性不够好，易吸湿膨胀；
6. 工件表面有台阶纹。

#### 4.2.3 选择性激光烧结技术（SLS）

选择性激光烧结技术的突出优点就是能成型具有可靠结构的金属零件作为直接功能件使用。选择性激光烧结单元的工作流程如图二十所示。



图二十

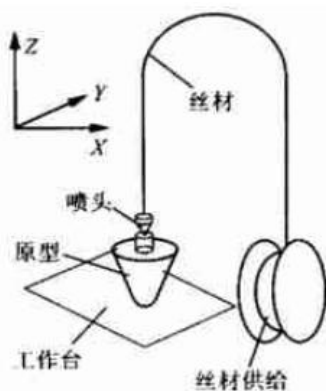
整个单元由粉末缸和成型缸组成，工作室粉末缸活塞（送粉活塞）上升，由铺粉辊将粉末在成型缸活塞（工作活塞）上均匀铺上一层，计算机根据原型的切片模型控制激光束的二维扫描轨迹，有选择的烧结固体粉末材料以及形成零件的一个层面。粉末完成一层后，工作活塞下降一个层厚，铺粉系统铺上新的粉末，控制激光束再扫描烧结新层。如此循环往复，层层叠加，知道三维零件成型。最

后，将未烧结的粉末回收至粉末缸中，并去除成型件。对于经书粉末激光烧结，在赵杰之前，整个工作台被加热至一定温度，可以减少成型中的热变形并利于层与层之间的结合。

选择性激光烧结技术的最大的优点便是使用的材料十分广泛。任何加热后能够形成原子间粘接的粉末材料都可以作为 SLS 的成型材料。目前，已经可以成功进行 SLS 成型加工的材料便有石蜡、高分子、金属、陶瓷粉末和以上物质的复合材料。

#### 4.2.4 熔融沉积制造技术（FDM）

熔融沉积制造技术单元示意图如图二十一。快速成型机的加热喷头受计算机控制，根据 CAD 的水平分层数据做  $x$ - $y$  平面运动。丝材由送丝机构送至喷头，经过加热、熔化，从喷头挤出粘接到工作台面，然后快速冷却并凝固。每一层截面完成后，喷头上升一层的高度，再进行下一层的造型。如此重复，直至完成整个实体的造型。每层的厚度根据喷头挤出的丝线直径大小确定。



图二十一

熔融沉积制造技术有如下特点：

1. 系统成本较低，不需要昂贵的激光器；
2. 成型材料价格低；
3. 适合有空隙结构，可节约材料与成型时间；
4. 适用于薄壳体零件及微小零件；
5. 成型速度较慢，精度较低。

对于不同的产品，根据不同的需求，选择不同的快速成型技术单元输出三维实体。四种不同快速成型技术所输出的三维实体的原型精度、表面质量、复杂程度、零件大小、材料价格、材料利用率、常用材料、制造成本、生产效率与设备费用信息如图二十二所示。



成型工艺	原型精度	表面质量	复杂程度	零件大小	材料价格	材料利用率	常用材料	制造成本	生产效率	设备费用
SLA	较高	优	中等	中小件	较贵	接近 100%	热塑性光敏树脂等	较高	高	较贵
LOM	较高	较差	简单或中等	中小件	较便宜	较差	纸、金属箔、塑料、薄膜等	低	高	较便宜
SLS	较低	中等	复杂	中小件	较贵	接近 100%	石蜡、塑料、金属、陶瓷粉末等	较低	中等	较贵
FDM	较低	较差	中等	中小件	较贵	接近 100%	石蜡、塑料、低熔点金属等	较低	较低	较便宜

图二十二

当然，一件复杂的工业产品必然包含了许多不同材料制成的模块。因此，本系统支持对于单一产品复合使用各种快速成型技术。相比较传统工业的数控机床的切削加工制造工艺，快速成型技术突破了“毛坯→切削加工→成品”的传统工件加工模式，开创了不用刀具制作零件的先河，是一种前所未有的薄层叠加的加工方法。与传统的切削加工方法相比，快速成型加工技术可以迅速输出自由曲面和更为复杂形态的三维实体，如工件中的凹槽、凸肩和空心部分等。

#### 4.3 三维实体后处理

快速成型技术获得的三维实体后处理主要是对三维实体进行表面处理。去除部分技术输出实体产生的支撑部分。对部分实体表面进行处理，使得原型的精度、纹理、表面粗糙度等达到与母体匹配的要求。

#### 4.4 产品检测单元

对于产品的检测，常用的方法有三坐标测量仪法、激光三角形法、核磁共振法、断层成像（CT）法、光栅法和自动断动扫描仪法等。通过反求工程，可以对一次复制的产品进行快速准确的测量，找出产品设计中的不足，重新获取母体数据与校调数据。本单元可以对于复制过程经过多次反复迭代，使产品更加完善。因此，本系统又是一个集成母体采集、信息处理、设计、制造、检测的闭环反馈系统。

## 第五章 创新点与可行性分析

从战斗机发动机的涡轮叶片，到人类的血管组织，快速成型技术正在颠覆传统制造业。数量越来越多、精度要求越来越高的三维实体复制需求正逐步走入千家万户。本系统基于三维激光数字化母体采集单元获取产品原型，不仅包括产品的外观、表面纹理、三维构型等几何学信息，还包括材料组成与结构构成等材料学信息；运用逆向工程将采集的信息构建成三维 CAD 模型，最终通过快速成型技术输出三维实体。如果 3D 复制机的大规模普及，传统的制造业技术很有可能被终结。进入 21 世纪，特别是 2010 年前后，3D 打印技术正迎来它的春天。因此，3D 复制机的普及也为时不远。在金属、陶瓷、玻璃等材料陆续进入 3D 打印所支持的打印材料之后，3D 打印技术被经一部完善，让一些多步骤的应用不同材料的制造工艺的实现成为可能。理论上，只要利用合适的材料，3D 复制机能够通过 3D 打印技术输出任何三维实体。

因此，这一技术的成功应用，将在许多行业掀起颠覆性浪潮，特别在航空、医疗等邻域表现得尤为明显。例如，航空航天领域的金属材料加工对于材料加工技术的要求相当之高，传统技术对于零件的几何形状、复杂程度、性能、材料利用率等方面都无法完全达到要求。2000 年，美国 AeroMet 公司生产的三个激光立体成型零件便分别获得美国政府批准，在 F-22 与 F/A-18E/F 战斗机上使用。此外，使用 3D 打印技术生产出来的 F-22 战斗机连接杆由于制造工艺的先进而使得零件的成分更加致密，因此比传统零件寿命超出 30%。同时，由于材料及切削加工的节省，制造成本降低 20%~40%，生产周期缩短 80%。

当然，除去制造，对于零件维修也能充分发挥 3D 复制机的功能。对于现有零件，3D 复制机可根据三维数字扫描设备获取原零件几何学与材料学信息，再与计算机中原有的标准化零件数据比对，寻找损坏部分，再利用 3D 打印技术修补破损部分。例如航空发动机高温仓里半个巴掌大小的双层涡轮叶片，运用 3D 打印技术，能在几百美元的成本下维修造价炒超过一万美元的零件。

在医疗领域，如果能够分析出详细的人类细胞成分，以病人自身干细胞为打印材料，能够轻松的输出专能细胞、组织、皮肤、骨骼乃至其他的器官甚至系统，这对于未来医学的发展可谓有非同寻常的意义。一个因为疾病或者意外损伤器官乃至肢体的病人，能够通过 3D 复制机得到失去生物部分，这将大大减少人类的死亡率。1998 年，清华大学颜永年教授将快速成型技术引入生命科学领域，提出“生物制造工程”的学科概念和框架体系，并于 2001 年研制出生物材料快速成型机。相信在不久的将来，真正意义上的生物复制能够得以实现。

对于未来的 3D 复制机的推广模式，一方面可以以多种快速成型技术复合的高精度 3D 复制机，即扫描到何种材料就运用适用于该材料的快速成型技术单元；另一方面，可以发展单一快速成型技术模块，尽管降低了复制精读，但是同时也降低了设备成本与普及难度，提高复制效率。

## 第六章 结束语

相对于科研的艰难推进,3D 打印技术在中国的商业推广仍是举步维艰,2011 年装机量仅仅占全球的 9%。3D 打印技术与设备在市场的认可度仍然较低。此外,3D 打印在中国还没有形成产业链,一定程度制约了产业的发展。然而可喜的是,几年来,许多依托高校对 3D 打印设备进行产业化运作的公司实体相继成立:清华大学颜永年教授于 1993 年注册成立北京殷华激光快速成型与模具技术有限公司;华中科技大学于 1996 年组建武汉滨湖机电技术产业有限公司;西安交通大学于 1997 年成立山西恒通智能机器有限公司。2012 年 10 月 15 日,中国 3D 打印技术产业联盟在北京成立,北京航空航天大学材料学院王华明教授出任首任理事长,华中科技大学史玉升教授任第一副主任,清华大学颜永年教授任首席顾问。总而言之,快速成型技术是一种处在发展完善过程的高新技术,其技术本身和应用领域尚需进行大量的开发研究。21 世纪将是以知识经济和信息社会为特征的时代,制造业面临信息社会中瞬息万变的市场对小批量多品种产品要求的严峻挑战。在制造业日趋国际化、智能化的状况下,以 3D 复制机的形式能有效缩短产品开发周期和减少开发新产品投资风险。

[参考文献]

- [1] 顾征 苏显渝 李美菊. “勇气”号火星车的全景照相系统分析[J]. 《激光杂志》，2005 年，（第 4 期）.
- [2] 胡少兴 查红彬 张爱武. 大型古文物真三维数字化方法[J]. 《系统仿真学报》，2006 年，（第 4 期）.
- [3] 刘福顺 汤明. 无损检测基础[J]. 北京：北京航空航天大学出版社，2002.
- [4] 于智彬. 简析金属探伤技术上的若干问题处理[J]. 《才智》，2011 年，（第 25 期）.
- [5] 蔺秀川 邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. 《物理学报》，2001 年，（第 5 期）.
- [6] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 《红外技术》，1999 年，（第 4 期）.
- [7] 阴国富. 基于阈值法的图像分割技术[J]. 《现代电子技术》，2007 年，（第 23 期）.
- [8] 夏卿坤. 快速成型技术[J]. 《长沙大学学报》，2005 年，（第 5 期）.