



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510026233.X

[45] 授权公告日 2007年1月17日

[11] 授权公告号 CN 1295071C

[22] 申请日 2005.5.27

[21] 申请号 200510026233.X

[73] 专利权人 上海大学

地址 200444 上海市宝山区上大路99号

[72] 发明人 刘廷章 叶冰 马静 柏静波

[56] 参考文献

CN1603095A 2005.4.6 B29C67/00

US4575330A 1986.3.11 B29D11/00

US5340433A 1994.8.23 B65C11/04

审查员 王华

[74] 专利代理机构 上海上大专利事务所
代理人 何文欣

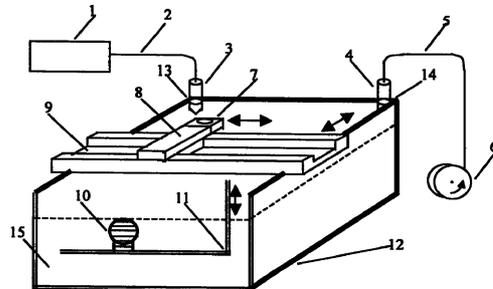
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

[54] 发明名称

光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法和装置

[57] 摘要

本发明涉及一种光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法和装置。其方法包括光固化成形法和熔融沉积成形法，由所述的光固化成形法进行成形外部精细的轮廓，而由所述的熔融沉积成形法进行成形内部大块区域。其装置包括一个光固化成形系统和一个熔融沉积成形系统，该两系统之间有一个成形头自动切换系统，由一个微机控制系统协同数控该两系统及两系统间的成形头自动切换。本发明集两快速成形法优点而克服其缺点，光固化成形法成形精度高，制作细节能力强，原型表面质量好，而熔融沉积成形法选用材料范围广，原型件性能好，制作成本较低。适用于检测用具、模具、美学制品、医学机械等精密件的制造。



1. 一种光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法，包括光固化成形法和熔融沉积成形法，其特征在于由所述的光固化成形法进行成形外部精细的轮廓，而由所述的熔融沉积成形法进行成形内部大块区域。
2. 根据权利要求1所述的光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法，其特征在于操作步骤如下：
 - (1)建立数控数据：
 - ①建立目标实体原型件的三维CAD模型；
 - ②对上述模型进行分层处理，得到由一系列的X-Y二维平面组成的分层轮廓数据；
 - ③对各分层轮廓划分出外部精细轮廓区域和内部大块填充区域；
 - ④对上述的外部精细轮廓区域给出X方向-Y方向的双向十字形网格填充线数据，而对上述的内部大块填充区域给出X方向或Y方向的单向填充线数据。
 - (2)制作过程：据上述数控数据，作如下成形制作：
 - ①在基础平台上，先从最下层开始，先采用熔融沉积法对最下层的内部大块填充区域进行熔融沉积成形，然后使光固化液体与已填充区域齐平，在光固化液体中对最下层的外部精细轮廓区域进行光固化成形；
 - ②对最下第二层先采用熔融沉积法对该层的内部大块填充区进行熔融沉积成形，然后下降—上升基础平台，使光固化液体与新的已填充区域齐平，在光固化液体中对最下第二层的外部精细轮廓区域进行光固化成形。以上述方式逐层进行成形直至最上层而完成整体成形。
3. 一种权利要求1所述光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法用的装置，包括一个光固化成形系统和一个熔融沉积成形系统，其特征在于所述的光固化成形系统与熔融沉积成形系统之间有一个成形头自动切换系统，由一个微机控制系统协同数控光固化成形系统和熔融沉积成形系统以及该两系统之间成形头的自动切换。
4. 根据权利要求3所述的光固化与熔融沉积集成的复合快速成形装置，其特征在于所述的熔融沉积成形系统的结构是：有一个成形槽(12)其上设置X轴运动支架(9)，X轴运动支架(9)上设置Y轴运动支架(8)，在Y轴运动支架上设置成形头自动切换系统(7)，一个熔融丝材送丝机构(6)将熔融丝材(5)送至熔融沉积成形喷头(4)，

该成形喷头(4)未工作时处于成形槽(12)右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置(14)上,由微机控制系统控制而工作时自动切换到成形头自动切换系统(7)的启闭夹子中;所述的光固化成形系统的结构是:在上述的成形槽(12)中盛有光固化液体(15),成形槽(12)中设有供分层成形用的升降基础平台(11),一个光源(1)经光纤光路系统(2)连接光聚焦头(3),该光聚焦头未工作时处于成形槽(12)左上角的光聚焦头搁置位置(13)上,由微机控制系统控制而工作时自动切换到成形头自动切换系统(7)的启闭夹子中。

光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法和装置

技术领域

涉及一种快速成形工艺的快速成形方法和装置，特别是一种光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法和装置。

背景技术：

快速成形制造（Rapid Prototyping & Manufacturing—RPM）技术是 20 世纪 80 年代末发展起来的一项高新制造技术，它彻底突破了传统制造模式，基于材料累加法实现任意复杂零件的整体成形，它对制造业的影响可与数控技术相媲美。最早出现的 RPM 方法是采用激光作为成形能源的光固化法（Stereolithography — SL），日本三菱公司于 1974 年申请了 SL 的第一个专利，但不久就放弃了；日本 Nagoya Prefecture 研究所的 Kodama 博士在 1980 年申请了另一个专利，但在 1987 年也放弃了；随后美国加利福尼亚州 UVP 公司的 Charles Hull 详细研究了采用激光光源通过选择性地固化树脂薄层来逐层累加制造三维实体的 SL 方法，并于 1984 年申请了专利（Hull C., 通过 SL 制作三维实体的设备，美国专利号 4575330，1986 年 3 月 11 日），同时，Hull 和 UVP 的股东 Raymond Freed 联合创立了 3D System 公司开发 SL 的商业应用，并成为目前市场上 SL 成形设备的主要厂商。另一种典型的 RPM 方法是熔融沉积成形法（Fused Deposition Modeling — FDM），它采用常规热源作为成形能源，其成形思想由美国明尼阿波利斯的工程师 Scott Crump 于 1988 年提出，1992 年开发了第一台商业机型 3D-Modeler 并申请了专利（Crump S., 三维实体成形设备，美国专利号 5340433，1994 年 8 月 23 日），其所在公司 Stratasys 是目前 FDM 设备的主要生产商。除了上述 SL 和 FDM 方法外，目前已经开发出了选择激光烧结 SLS、分层实体制造 LOM、掩模固化 SGC 等十几种 RPM 方法和设备，并已成功应用于产品设计检验、市场预测、工程测试、装配测试、模具制造、医学、美学等领域。

目前主要的几种快速成形工艺方法都各有特点，如下表所示：

名称	光固化法 SL	激光烧结法 SLS	分层实体制造法 LOM	熔融沉积法 FDM	掩模固化法 SGC
制造商	3D,CMET 公司	DTM 公司	Helisys 公司	Stratasys 公司	Cubital 公司
成形能源	激光 紫外光源	激光	激光	热源	紫外光源
材料	光敏树脂	PVCs 聚碳酸酯 尼龙 铸造蜡	纸 塑料 复合材料	尼龙, 铸造蜡 合成橡胶 ABS 塑料	光敏树脂
优点	公认精度最高,尺寸 100mm 以内为 ± 0.1 , 大于 100mm 不超过 0.5%; 制作效率高; 材料利用率接近 100%	价格低,无气味材料,可用多种机械性能比光敏树脂更好的材料; 不需夹具	制作效率高于其他方法 5~10 倍,原因是激光只作轮廓扫描; 材料便宜无气味; 成型机价格低	材料便宜无气味; 不需夹具	声称精度更高; 不需支撑或夹具
缺点	需要支撑材料较脆 树脂材料昂贵,有气味	精度比 SL 低; 工艺较新,发展历史较短; Z 向精度较难控制	精度比 SL 低;需去除激光切口处的毛刺及废料; 某些结构废料不易剥离;激光导致的内应力易造成翘曲;材料利用率低	精度比 SL 低;需要支撑; 模型外表呈灰色; 某些结构不易生成	设备造价高; 工艺复杂;可靠性差;体积庞大

从上表可以看出,SL 工艺方法存在的主要问题为:

- (1) 可以使用的成形材料有限,目前主要采用环氧或丙烯酸光敏树脂;
- (2) 由于材料的局限,成形出的原型件力学和机械性能较差,容易产生变形,影响了后续的模具制造精度;
- (3) SL 方法主要采用激光作为成形能源,而激光系统(包括激光器、冷却器、电源和外光路)价格及维护费用昂贵,加之树脂材料也较贵,所以制作成本较高。

而 FDM 存在的问题主要是:

- (1) 由于采用液态丝材冷却凝固成形,而丝材凝固时的直径很难精确控制,所以

成形出的原型件精度和表面质量较差;

(2) 某些结构不易生成.

综上所述,不同的 RPM 工艺方法各有千秋,但在成形精度、效率、成本、材料以及原型件性能等方面均存在这样或那样的局限性.然而随着 RPM 技术应用的深入,工业用户已越来越不满足于 RPM 目前的制作能力和原型件性能,提出了更高的要求;另一方面,随着 CNC 加工中心和高速加工技术飞速发展,传统制造技术的精度、表面质量、效率成本等得到很大改善,也向 RPM 提出了新的挑战.因此,RPM 在成形精度、效率、成本、材料以及原型件性能等方面的局限性日趋突出,已经成为目前该技术的主要瓶颈问题。

发明内容

本发明的目的在于提供一种光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法和装置,能够有效集成典型的熔融沉积成形方法 FDM 和典型的光固化成形方法 SL,通过二者的优势互补,实现高性能原型件的复合成形。

本发明要解决的技术问题是:

目前的快速成形技术具有技术初期的典型特点,即每一种成形方法均有其对应的成形设备,硬件结构自成体系、相对封闭,而且 FDM 和 SL 的实现机构有很大的差异性,原有的机构体系无法实现不同成形方法的互补集成,所以要实现不同快速成形方法 FDM 和 SL 的复合成形,必须解决以下技术问题:

- (1)可兼容 FDM 和 SL 两种快速成形方法的硬件体系结构;
- (2)FDM 和 SL 两种方法集成的复合成形工艺及其控制方法。

为了达到上述目的,本发明的构思是:

本发明提出不同快速成形工艺过程集成的复合成形思想,它不同于 FDM 和 SL 等快速成形单体技术,也不同于以往的快速成形集成方法,采用 FDM 和 SL 两种工艺共同制作三维实体,着眼于制作工艺过程的集成,由于各快速成形方法都基于相同的分层/累加成形原理,故集成成本低,易于实现。

(1) 复合成形新结构

通过对 FDM 和 SL 各成形方法的功能需求分析,评估各成形机构功能模块的通用度,提出了复合成形的新体系结构,主要由三维运动系统和成形自动切换系统组成。

SL 与 FDM 均需三维运动系统,但采用不同的机构实现:SL 通过振镜转动实

现 X-Y 平面光路扫描，基础平台实现 Z 向升降运动，如图 1 所示；FDM 将喷头安装在 X-Y 平面运动机构上，喷头可实现 X-Y 平面扫描运动和 Z 向升降运动，基础平台也可做 Z 向升降运动，如图 2 所示。二者原有机构很难直接集成。

如果将 SL 基于光学器件的刚性光路系统改造为基于光纤的柔性光路系统，则二者的运动系统可统一成 X-Y 平面移动机构和 Z 向升降平台组成的三维运动系统，唯一区别是移动机构上夹持的成形头不同，这样可方便、低成本地实现二者集成。

本发明由 X-Y 平面运动机构和 Z 向升降基础平台组成统一的三维运动系统，并将 SL 基于光学器件的刚性光路成形系统改造为 SL 柔性成形头系统，该柔性成形头系统包含成形光源、光纤组成的柔性光路系统和光聚焦头，从而使上述三维运动系统可兼容 FDM 与 SL，如图 3 所示。

为了实现 FDM 与 SL 的复合成形，上面的 SL 柔性成形头和 FDM 喷头必须可自由切换，因此本发明在 X-Y 平面运动机构上安装一个启闭式夹持机构形成成形头自动切换系统，如图 4 所示。该夹持机构可以夹持或放下 FDM 喷头，也可夹持或放下 SL 成形头，从而实现不同成形头的自由切换；该夹持机构可以在 X-Y 平面上实现任意轨迹运动，实现 FDM 和 SL 工艺要求的扫描运动。

(2) 复合成形工艺及控制方法

和 SL 及 FDM 工艺一样，复合成形工艺首先需要建立目标实体原型件的三维 CAD 模型，并对该模型在 Z 轴方向进行分层处理，得到由一系列的 X-Y 二维平面组成的分层轮廓数据。

其次，对于 SL 和 FDM 工艺而言，都需要进行分层轮廓的内部填充，其中 FDM 只需进行 X 方向或 Y 方向的单向填充，而 SL 则需进行 X 方向—Y 方向的双向填充以形成十字网格。所以，复合成形工艺需要根据 SL 和 FDM 各自的工艺特点，即 FDM 适宜成形内部大块区域，SL 适宜成形外部精细轮廓，按照合适的区域划分策略，把每层轮廓内部区域划分为 SL 填充区域和 FDM 填充区域，如图 5 所示；然后针对 SL 填充区域生成双向填充线数据，针对 FDM 填充区域生成单向填充线数据。

将上面生成的实体分层轮廓数据和内部填充线数据转化成数控数据，即可驱动快速成形执行机构进行分层制作。

在制作过程中，通过合理的成形过程控制方法保证复合成形工艺流程的实现。首先确定每层制作中 SL 和 FDM 工艺的启动次序，例如每层先进行 FDM 制作，然后进行 SL 制作；然后采用图 6 所示的控制系统，根据该次序控制成形头自动切换系统选

取第一种成形头成形该区域薄层；再控制成形头自动切换系统切换第二种成形头成形该区域薄层；在成形不同区域之间的界面时，通过相应的控制策略来调节热量输出，以增强界面的再交联；如此分区域成形一层实体薄片后，控制 Z 向升降平台运动，制作下一层；逐层复合成形，最后制作出要求的三维实体。

根据上述发明构思，本发明采用的技术方案是：

一种光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法，包括光固化成形法和熔融沉积成形法，其特征在于由所述的光固化成形法进行成形外部精细的轮廓，而由所述的熔融沉积成形法进行成形内部大块区域。

上述的复合快速成形方法的操作步骤如下：

(1)建立数控数据：

- ①建立目标实体原型件的三维 CAD 模型；
- ②对上述模型进行分层处理，得到由一系列的 X-Y 二维平面组成的分层轮廓数据；
- ③对各分层轮廓划分出外部精细轮廓区域和内部大块填充区域；
- ④对上述的外部精细轮廓区域给出 X 方向-Y 方向的双向十字形网格填充线数据，而对上述的内部大块填充区域给出 X 方向或 Y 方向的单向填充线数据。

(2)制作过程：据上述数控数据，作如下成形制作：

- ①在基础平台上，先从最下层开始，先采用熔融沉积法对最下层的内部大块填充区域进行熔融沉积成形，然后使光固化液体与已填充区域齐平，在光固化液体中对最下层的外部精细轮廓区域进行光固化成形；
- ②对最下第二层先采用熔融沉积法对该层的内部大块填充区进行熔融沉积成形，然后下降—上升基础平台，使光固化液体与新的已填充区域齐平，在光固化液体中对最下第二层的外部精细轮廓区域进行光固化成形。

以上述方式逐层进行成形直至最上层而完成整体成形。

一种上述光固化与熔融沉积集成的复合快速成形方法用的装置，包括一个光固化成形系统和一个熔融沉积成形系统，其特征在于所述的光固化成形系统与熔融沉积成形系统之间有一个成形头自动切换系统，由一个微机控制系统协同数控光固化成形系统和熔融沉积成形系统以及该两系统之间成形头的自动切换。

上述的熔融沉积成形系统的结构是：有一个成形槽 12，其上设置 X 轴运动支架 9，X 轴运动支架 9 上设置 Y 轴运动支架 8，在 Y 轴运动支架上设置成形头自动

切换系统 7, 一个熔融丝材送丝机构 6 将熔融丝材 5 送至熔融沉积成形喷头 4, 该成形喷头 4 未工作时处于成形槽 12 右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置 14 上, 由微机控制系统控制而工作时自动切换到成形头自动切换系统 7 的启闭夹子中; 所述的光固化成形系统的结构是: 在上述的成形槽 12 中盛有光固化液 15, 成形槽 12 中设有供分层成形用的升降基础平台 11, 一个光源 1 经光纤光路系统 2 连接光聚焦头 3, 该光聚焦头未工作时处于成形槽 12 左上角的光聚焦头搁置位置 13 上, 由微机控制系统控制而工作时自动切换到成形头自动切换系统 7 的启闭夹子中。

本发明与已有技术相比较, 具有如下显而易见的突出实质性特点和显著优点:

从成形机理来看, 光固化 (SL) 方法采用激光等紫外光成形, 而熔融沉积方法 (FDM) 采用热能成形, 前者成形精度高, 制作细节能力强, 原型件表面质量好, 但可用材料有限, 制件力学和机械性能差, 而且成本较高; 后者可选用材料范围广, 原型件性能好, 制作成本也较低, 但精度和表面质量较差。这两类成形工艺在制作能力和制件性能方面各有所长, 互补性强, 因此本发明采用集成方法, 与原有的 SL 和 FDM 工艺方法相比, 具有以下优点: (1) 用 FDM 的低成本材料成形内部大块区域, 用 SL 光敏树脂材料成形外部精细轮廓, 可以有效降低材料成本; (2) 由于复合成形过程的大部分时间采用 FDM 常规热源, 大大降低了昂贵的激光器使用时间, 所以有效降低了设备使用成本; (3) 由于 FDM 成形效率较高, 所以原型件的复合成形效率比 SL 工艺方法有大幅提高; (4) 由于外部轮廓采用 SL 成形, 而成形精度较差的 FDM 材料局限在原型件内部, 所以原型件保持了 SL 的原有精度和表面质量, 而比 FDM 提高很多; (5) 由于原型件内部主要采用性能较好的 FDM 材料, 所以整个原型件的力学和机械性能比 SL 有很大改善; (6) 虽然在原型件内部不同成形区域结合界面处的材料在复杂的物理、化学反应下形成的精度、粗糙度很差, 但由于局限在原型件的内部, 不影响轮廓表面质量; (7) 由于 SL 和 FDM 工艺采用不同的材料成形, 所以这种复合成形方法自然实现了材料的集成, 可以制作多材料相原型件, 并可通过材料的选择实现其性能的分区域定制, 这是快速成形方法与其它传统工艺 (如车削、铣削、磨削等) 集成所不能实现的。

综上所述, 本发明可集成 SL 和 FDM 优点, 在精度、效率、成本、原型件表面质量及性能等多方面优势互补, 从而实现 RPM 技术综合性能的整体提高, 高效低成本地制作高性能原型件。

本发明适用于检测用具、模具、美学制品、医学机械等精密件的制造。

附图说明

图 1 是光固化成形的原理图。

图 2 是熔融沉积成形原理图。

图 3 是本发明的复合成形装置的基本结构示意图。

图 4 是成形头自动切换系统结构示意图。

图 5 是成形分层截面内部区域划分示意图。

图 6 是微机控制系统原理框图。

具体实施方式

本发明的一个优选实施例是：

本光固化与熔融沉积集成的复合快速成形装置的结构：

本项目在数控加工中心的框架下集成已有的光固化 SL（原理如图 1 所示）和熔融沉积成形 FDM（原理如图 2 所示）工艺，开发在基础平台上按要求图形通过连续成形多层材料来制作预定形状的三维物理实体的方法，基本实现机构包含一个基座平台、X-Y 平面运动机构、FDM 成形头系统、SL 成形头系统、FDM 成形头与 SL 成形头的自动切换系统、计算机控制系统，如图 3 和图 6 所示。

（1）图 3 中，SL 成形头系统包含光源 1、光纤组成的光路系统 2、光聚焦头 3，其中光聚焦头待用时放置于成形槽 12 左上角的光聚焦头搁置位置 13，成形槽 12 中盛有光固化液 15，即光敏树脂，成形槽 12 中设置升降基础平台 11，在该基础平台 11 上成形三维实体原型件 10；

（2）图 3 中，FDM 成形头系统包含 FDM 成形喷头 4、FDM 成形丝材 5、FDM 丝材送丝机构 6，其中 FDM 成形喷头待用时放置于成形槽 12 右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置 14；

（3）图 3 中，X-Y 平面运动机构包含由电机驱动的 X 轴运动支架 9、安装于 X 轴运动支架上由电机驱动的 Y 轴运动支架 8，该机构可实现二维平面运动；

（4）图 3 中的成形头自动切换系统 7 如图 4 所示，由夹持机构和控制夹持机构开合的继电器组成，继电器受控于计算机控制系统。夹持机构处于夹持状态时继电器处于失电状态，夹持机构通过弹簧夹紧成形头；计算机控制继电器得电时，继电器强迫夹持机构打开处于释放状态。图 3 中成形头自动切换系统 7 安装于 Y 轴运动支架 8 上 X-Y 轴交点处，它通过 X-Y 平面运动机构可以在 X-Y 平面上实现任意轨迹运动。计算机控制系统可控制 X-Y 平面运动机构带动成形头自动切换系统 7 移动到成形槽

12 左上角的光聚焦头搁置位置 13 夹持或放下 SL 光聚焦头 3，或移动到成形槽 12 右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置 14 夹持或放下 FDM 成形喷头 4，从而实现夹子上所夹持成形头的自动切换；

(5) 图 3 中，基础平台 11 包含设定尺寸的平面托板及驱动其做 Z 轴升降运动的电机，平面托板位于成形槽 12 中，通过升降运动与上面夹持机构上夹持的成形头保持设定间距。当夹子上夹持 FDM 成形喷头 4 时，FDM 成形喷头可随 X-Y 平面运动机构按要求图形实现与基础平台 11 的相对平面运动，平面托板接受 FDM 成形喷头落下的流体材料，该流体材料自然冷却凝固成形一层实体薄片；当夹子上夹持 SL 光聚焦头 3 时，光源 1 发出的光线经光纤光路系统 2 传输到光聚焦头 3 形成聚焦光斑，该光斑可随 X-Y 平面运动机构按要求图形实现与基础平台 11 的相对平面运动，移动的光斑照射到平面托板上承载的光敏树脂材料液面上使其固化，从而成形一层实体薄片；

(6) 计算机控制系统如图 6 所示，由计算机及接口电路实现，包含 X-Y 平面扫描控制、Z 轴升降控制、成形头自动切换控制、FDM 丝材送丝机构控制及其它辅助控制模块。

工艺实现步骤

- (1) 首先对目标实体原型件的三维 CAD 模型在高度方向进行分层处理，将三维模型转化成一系列的 X-Y 二维平面，形成三维实体的分层轮廓数据；
- (2) 针对每层的轮廓数据，按照合适的区域划分策略，把每层轮廓内部区域划分为 SL 填充区域和 FDM 填充区域；

合适的区域划分策略举例如下，但不排除其它方法：可以采用等距线方法，即对本层所有轮廓线向实体方向求等距线，等距线相对于轮廓线的偏移距离范围可以为 1~5mm，则等距线与轮廓线之间的区域为 SL 填充区域，等距线之间的区域为 FDM 填充区域，如图 5 所示；也可以采用简单分区法，即针对本层所有轮廓线向实体方向作辅助矩形，矩形每条边与该轮廓线 X、Y 方向的极值点保持设定距离，该设定距离范围可以为 1~5mm，则矩形与轮廓线之间的区域为 SL 填充区域，矩形之间的区域为 FDM 填充区域。

- (3) 针对 SL 填充区域生成 X 向和 Y 向的双向填充线数据，针对 FDM 填充区域生成 X 向或 Y 向的单向填充线数据；
- (4) 将分层轮廓数据和轮廓内部填充线数据转化成数控文件；
- (5) 图 6 计算机控制系统控制图 3 中的基础平台 11 上升一定高度，上升高度等于

- 分层厚度（也就是 FDM 与 SL 的统一成形层厚），使当前层的制作底面与成形槽的光敏树脂液面齐平；
- (6) 图 6 计算机控制系统控制图 3 中的成形头自动切换系统 7 移动到成形槽 12 右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置 14，夹持 FDM 成形喷头 4，选中 FDM 成形头系统；然后根据 FDM 填充区域的填充线数据，控制 X-Y 平面运动机构实现要求的扫描运动，FDM 成形喷头 4 就可在基础平台 11 上成形出该层 FDM 填充区域的实体薄片；最后计算机控制系统控制成形头自动切换系统返回成形槽 12 右上角的熔融沉积成形喷头搁置位置 14，放下 FDM 成形喷头 4，完成本层 FDM 成形；
 - (7) 图 6 计算机控制系统控制图 3 中的基础平台 11 下降一定高度，例如 2 倍成形层厚，使已成形的实体部分完全浸入光敏树脂液面下，保证树脂流平并充满未成形区域；然后控制图 3 中的基础平台 11 上升一定高度，例如一个成形层厚，使已成形的 FDM 实体顶部与光敏树脂液面齐平；
 - (8) 图 6 计算机控制系统控制图 3 中的成形头自动切换系统 7 移动到成形槽 12 左上角的光聚焦头搁置位置 13，夹持 SL 光聚焦头 3，选中 SL 成形头系统；然后根据本层轮廓线数据和 SL 填充区域的填充线数据，控制 X-Y 平面运动机构实现要求的扫描运动，SL 光聚焦头 3 就可在基础平台 11 上成形出该层 SL 填充区域的实体薄片；最后计算机控制系统控制成形头自动切换系统返回成形槽 12 左上角的光聚焦头搁置位置 13，放下 SL 光聚焦头 3，完成本层 SL 成形；
 - (9) 重复（6）～（8）步骤，用同样方法制作下一层实体薄片；逐层复合成形，最后制作出要求的三维实体原型件 10。

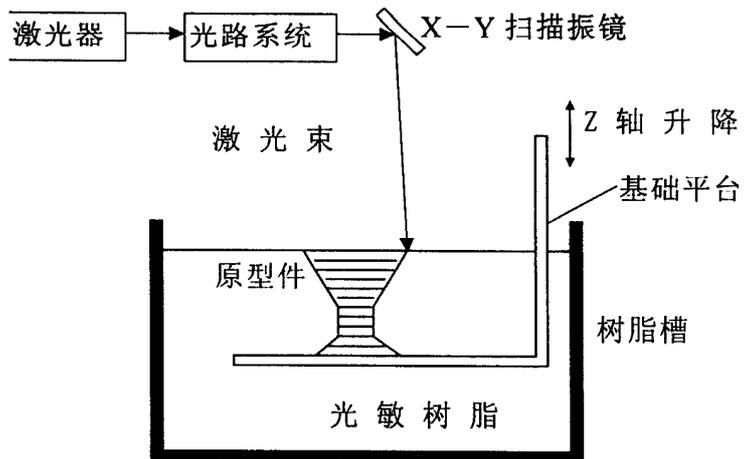


图 1

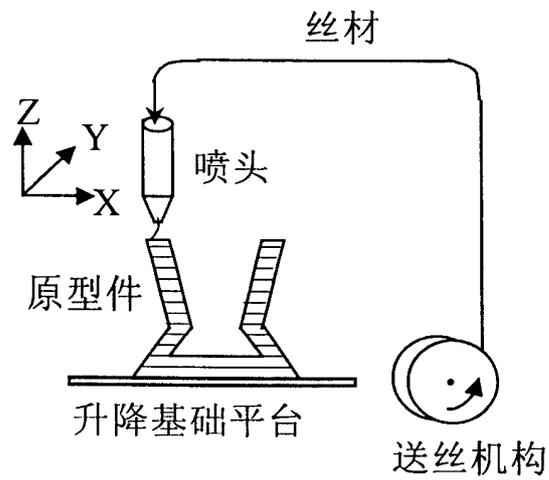


图 2

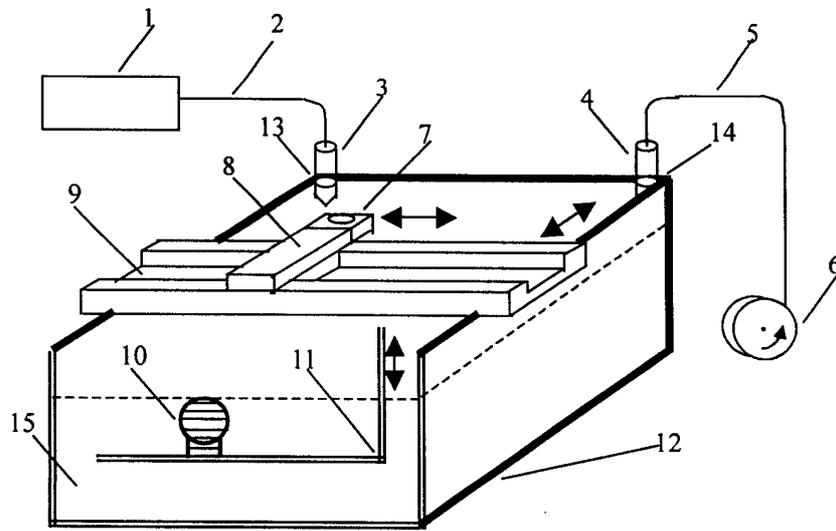


图 3

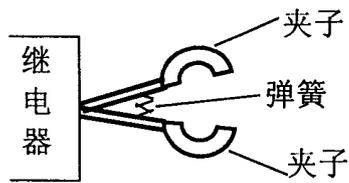


图 4

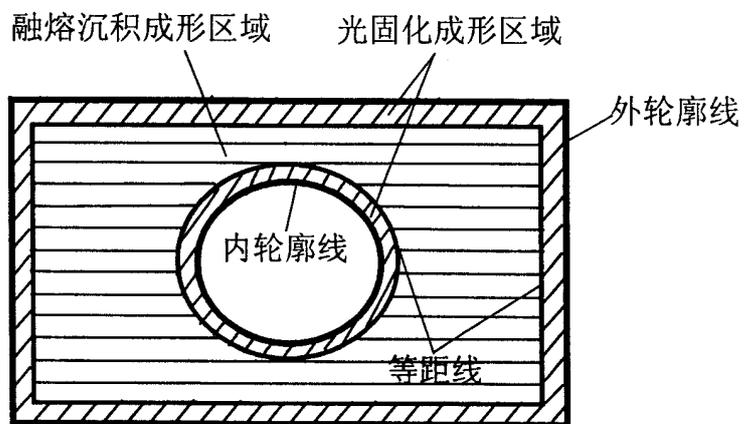


图 5

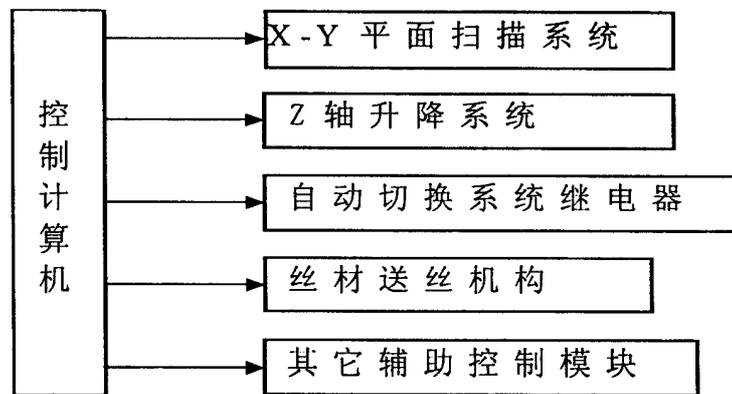


图 6