

# DLP 光固化 3D 打印关键技术研究

张超<sup>1,\*</sup>, 马文茂<sup>2</sup>

1. 中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120

2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081

**摘要:** 针对复杂构件制造快速原型开发需求, 开展了基于数字光投影固化快速成形技术的 3D 打印关键技术研究, 以涡轮盘的打印过程为主线, 研究了 DLP 光固化 3D 打印的前处理技术、成形工艺参数设计、后处理技术, 并对打印成品进行了测量分析。研究结果可为后续进行 DLP 光固化 3D 打印工程样件的快速制造提供理论基础。

**关键词:** 3D 打印; 光固化; DLP; 涡轮

中图分类号: V261.9

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.04.047

3D 打印技术这一“具有工业革命意义的制造技术”正在迅速发展, 仅利用三维数模就可以在一台设备上快速地制造出几乎任意复杂形状的零件, 无需模具, 材料利用率高, 可有效缩短设计周期, 在非批量化生产中具有明显的成本和效率优势, 特别适用于航空制造业的单件小批量生产或快速原型制造。

根据打印方式和打印材料的不同, 目前主流的 3D 打印技术有熔融沉积快速成形 (Fused Deposition Modeling, FDM)、光固化快速成形 (Stereolithography Appearance, SLA)、选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 等<sup>[1]</sup>。其中, 光固化快速成形是以液态光敏树脂为原料, 通过控制紫外光束扫描液态光敏树脂, 使其有序固化并逐层叠加成形<sup>[2]</sup>。在光固化成形技术体系中, 数字光处理 (Digital Light Processing, DLP) 是一项使用在投影仪和背投电视中的显像技术, 该技术使用一种较高分辨率的数字光处理器来固化液态光聚合物, 一层层对液态聚合物进行固化, 以此循环往复, 直到最终模型的完成。

本研究以某涡轮盘的 3D 打印工艺过程为主线, 对成形过程中所涉及的关键技术展开研究, 为今后开展以 3D 打印为基础的快速原型开发工作奠定基础。

## 1 光固化快速成形原理

光固化快速成型技术是目前加工精度最高的一种 3D 打印技术, 其基本原理可概括为: 以液态光敏树脂为原材料,

计算机控制固化光源按加工零件的截面信息逐层对光敏树脂进行扫描, 受照射的树脂将发生光聚合反应并固化形成零件的一个截面; 当前层固化完毕之后, 支撑平台移动一个层厚的高度, 液态树脂将在之前固化好的树脂表面再形成新的固化层, 新固化层牢固地黏合在前一层上, 依次重复直至零件打印完毕。

SLA 和 DLP 同属于光固化成形, 其中 SLA 采用激光点聚焦到液态光聚合物, 而 DLP 成形技术是采用数字光处理器来照射固化光聚合物。SLA 在成形时一般都是点到线、线到面, 而 DLP 则是以面叠加的方式成形。因此, DLP 成形速度远高于 SLA 成形速度。DLP 技术与 SLA 技术所采用的光敏树脂一致, 主要成形紫外光波段为 365nm 及 405nm。大部分材料都是以光敏树脂为基材进行改性处理<sup>[3]</sup>, 配置出不同性能, 并且可根据需要选择合适的颜色配比和透明度。图 1 给出了一般 DLP 型打印机的成形原理。

DLP 投影硬件的厂商通常采用 DLP 系列控制芯片, 结合半导体光开关数字微镜器件 DMD 组件实现 LED 光源投射效果, DLP 技术的核心器件是 DMD。DLP 成形技术在制造物体时一般都是将成形物体逐渐从光敏树脂材料中拉出来。本研究中使用的是美国 FSL 3D 推出的 Phoenix Touch Pro 型 DLP 打印机。

收稿日期: 2017-12-13; 退修日期: 2018-01-24; 录用日期: 2018-03-05

\* 通信作者: Tel.: 010-62038693 E-mail: 29147275@qq.com

引用格式: Zhang Chao, Ma Wenmao. Research on key technologies of DLP light curing 3D printing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (04): 47-51. 张超, 马文茂. DLP 光固化 3D 打印关键技术研究 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (04): 47-51.

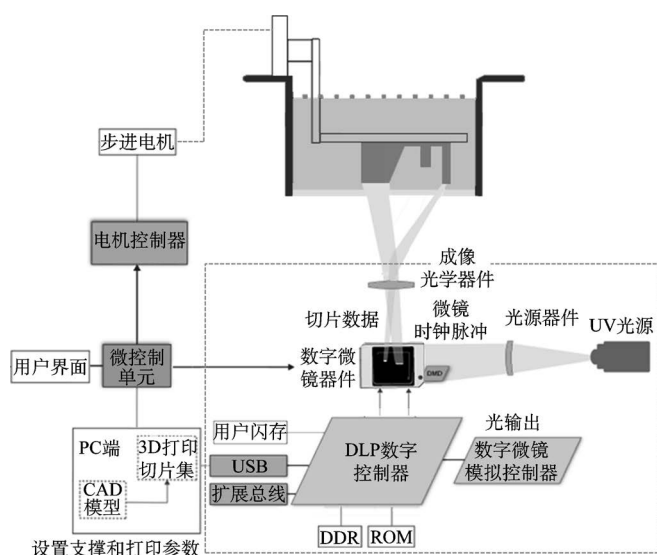


图1 DLP成形原理  
Fig.1 DLP molding principle

## 2 技术特点

DLP光固化快速成形技术具有以下优点：(1) 成形速度快，从CAD设计到完成原型打印，一般只需几小时到十几小时，加工周期相较于传统的制模、加工可节约70%以上时间。(2) 高度柔性化，只要在设备成形尺寸范围内，几乎可以加工任意形状的零件，甚至是装配体。逐层扫描成形的

制造工艺与零件的复杂程度无关，也无需专用夹具或工装。(3) 成形精度高，DLP通过光学技术使来自DMD的各个像素成像，而不是让光源直接在树脂上成像，大幅优化了分辨率和特征尺寸。最小层厚可达0.05mm，能打印出精密的特征，包括各种薄壁结构，成品件表面细腻光滑。(4) 自动化，整个生产过程可实现自动化、数字化，通过加载预置的打印配置参数，零件的制造与修改相对灵活，可实现设计制造一体化。

## 3 DLP成形工艺过程

具体的DLP光固化3D打印成形过程如图2所示，下文将依次介绍相关技术要点。

### 3.1 CAD模型优化

本研究中CAD模型优化主要指抽壳设计，为了节约3D打印材料、提高零件制作速度，在保证强度的条件下对零件三维模型进行轻量化，形成一定壁厚的空腔结构。抽壳设计工作既可以在CAD模型设计阶段进行，也可以在3D打印机的控制软件中进行。区别在于，CAD模型设计优化阶段抽壳具有更高的灵活性，可以对不同特征配置不同的壁厚，而一般3D打印机的控制软件只能对模型进行均匀厚度的抽壳操作。CAD模型优化的关键技术是在保证所需零件结构强度的前提下，使用合适的抽壳方式，确定合理的壳体厚度。

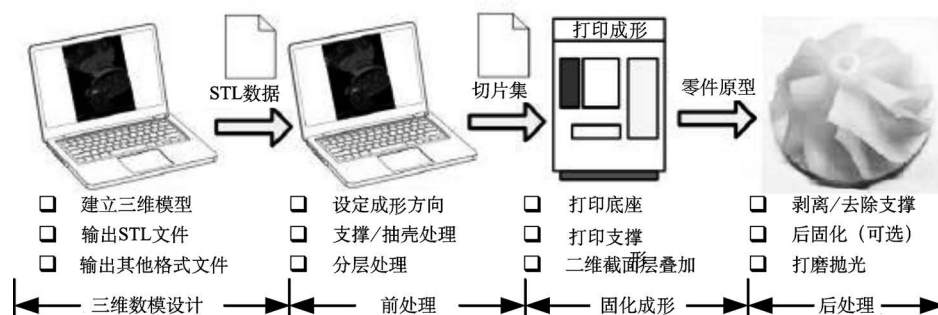


图2 DLP成形过程  
Fig.2 DLP molding process

### 3.2 数据模型前处理

数据模型前处理的关键技术主要包括选择成形方向和支撑设计。成形方向布置是指将模型合理地布置在3D打印机工作平台上，即模型造型方向、定位。

造型方向对零件打印的质量有重要影响。尽管当前DLP的成形精度可达0.05mm，仍然存在一定程度的台阶效应的问题<sup>[4]</sup>。在选择零件成形方向时，应尽可能将重要模型表面布置在水平方向。此外，目前DLP成型一般是将零件从树脂液槽

中提拉出来的，由于重力作用，应考虑让投影面积大的特征先打印出来，否则可能需要添加额外的支撑，影响表面质量<sup>[5]</sup>。

除造型方向外，光固化模型制作时需要在平台与模型表面之间、模型不同表面之间制作辅助支撑。合理的支撑设计对打印件的成形质量也尤为重要，甚至关系到一次打印的成败。支撑可分为壳内支撑和外部支撑两种。对于抽壳后的中空模型，合理的壳内支撑可以保证零件的总体强度，主要参数包括内部支撑间距和支撑杆大小。外部支撑设计主要包

括选择支撑区域、选择支撑类型以及支撑形状结构设计等,其控制参数包括基本厚度、圆锥长度、端点分支、分叉最小高度等。支撑设置过多或过于粗壮,一方面会导致树脂材料的浪费,另一方面也导致后期处理时剥离这些支撑变得困难,还会影响零件表面质量;支撑太细或者太稀疏容易导致模型制作过程中产生缺陷,如塌陷、变形等。这些参数的确定可通过打印试验确定。值得注意的是,生成支撑的模型表面在去除支撑后,其表面粗糙度将明显高于其他位置,需要通过适当的打磨来提高表面质量。因此,建议在设计支撑时应尽可能把支撑区域设置在对表面质量要求不高或者易于打磨处理的位置。

3.3 成形工艺参数配置

与 SLA 打印不同,DLP 成形关键工艺参数主要包括配置层厚度、首层曝光时间、单层曝光时间、单层冷却时间等,其余参数可由 DMD 自动配置。其中,层厚度决定了零件 Z 方向精度,也对打印效率有直接影响。层厚越大,则台阶效应越明显;层厚越小,成形后表面质量越高,但将耗费更长的打印时间。本研究选取了设备所能支持的最小扫描层厚 0.025mm,其余参数由打印试验确定。

3.4 后处理技术

光固化完成后处理关键技术主要包括拆卸、清洗、去除支撑和表面打磨等,通过适当的后处理工艺才能获得合格零件。其中,拆卸是指打印完成后将基板从设备上取下并剥离树脂原型件;在清洗步骤,需用酒精将树脂原型件表面附着的液态树脂清洗掉;去除支撑是指通过工具或者手工移除因加工工艺需要而生成的辅助支撑;表面打磨是指用水砂纸打磨原型件表面,特别是支撑部位,对于本文中采用的 Phoenix Touch Pro 打印设备,除支撑部位外,其余部分无须打磨仍能保持良好的表面光洁度。

4 打印试验与结果分析

4.1 打印任务数据准备

在三维建模软件 Pro Engineer 中将涡轮模型(如图 3 所示)导出为 STL 格式,该模型由 16630 个三角面构成。

将 STL 文件导入 3D 打印切片软件后,调整模型的摆放方向、位置,并配置打印参数。同时,为节省树脂材料,设置了通过切片软件对模型进行自动抽壳操作。相关参数配置整理见表 1。自动添加支撑后的效果如图 4 所示,抽壳效果见如图 5 所示,由图 5 可以注意到,切片软件在模型抽壳后空腔部分自动添加了支撑。从液态树脂到固化后产生的总收缩量对成型零件的尺寸精度造成直接影响,补偿因子需根据具体选用的树脂液试验确定,当前设定补偿因子为 1.02。

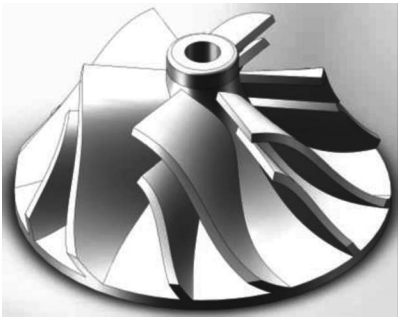


图 3 涡轮模型  
Fig.3 Turbine model

表 1 切片参数配置  
Table 1 Slice parameter configuration

| 总体分层数        | 基础高度/mm      | 分层厚度/mm      | 支撑间距/mm        |
|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 1037         | 0.5          | 0.025        | 3              |
| 接触点<br>直径/mm | 支撑杆<br>半径/mm | 壳最小<br>厚度/mm | 壳内部支撑<br>间距/mm |
| 0.75         | 0.75         | 2.5          | 6.5            |

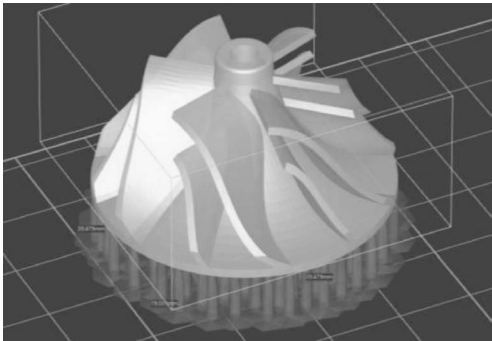


图 4 涡轮添加支撑后  
Fig.4 Turbine after adding support

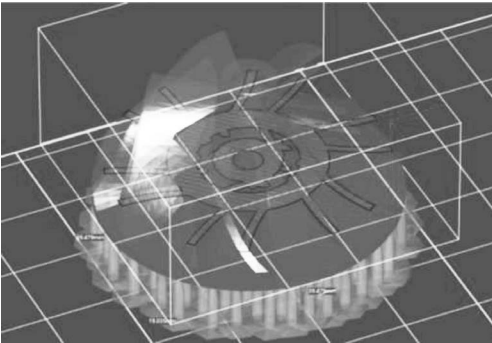


图 5 涡轮抽壳后(截面)  
Fig.5 After the turbine shell (section)

生成了支撑后即可导出打印任务到打印设备,此时切片软件将自动检查可能导致失败的脆弱结构并进行高亮提示。

4.2 执行打印

在打印机上执行打印操作时,首先进行电机校正,然后



加入光敏树脂,本研究所使用的光敏树脂主要参数如下:配方使用 UV Plastic,液态密度 1.14,固态密度 1.19,抗拉强度 38MPa,拉伸模量 1620MPa,热变形温度 61℃;下一步对打印机进行关键参数的配置(见表 2),包括首层曝光时间、单层曝光时间、单层冷却时间,否则易导致打印失败。由于 DLP 光固化成形是光敏树脂被 UV 投影光束扫描后发生聚合反应,固化成截面轮廓后,工作台托板携零件重新回到树脂液面以上,散去因固化反应产生的热量<sup>[6]</sup>,然后回到树脂槽底部,再次扫描固化,重复此过程直到整个零件成形。在此过程中,首层曝光时间影响到零件能否稳固附着在基板上;单层曝光时间影响到当前切片的固化程度,如果曝光时间不够,在基板拉起时可能导致零件破损;单层冷却时间影响到树脂液的温度均匀程度,该值受环境温度影响。本研究中 3D 打印设备所处环境温度为 20℃,经多轮试验,前述参数设置见表 2。

表 2 打印参数配置  
Table 2 Print parameters configuration

| 首层曝光时间 /s | 单层曝光时间 /s | 单层冷却时间 /s |
|-----------|-----------|-----------|
| 2         | 1.1       | 2         |

4.3 后处理

打印过程结束后,将打印基板从设备上取出,仔细剥离零件后用酒精进行冲淋,然后用工具去除支撑,此时零件表面层仍可能附着少量未完全固化的树脂,置入紫外灯箱照射约 1h 即可完全固化,最后对零件的支撑面进行打磨。最终打印成形的叶轮如图 6 所示。对比图 3 与图 6 可以看出,DLP 打印的成品件高度真实地还原了涡轮数字模型的特征,如顶部的倒圆角、叶片边缘等特征。

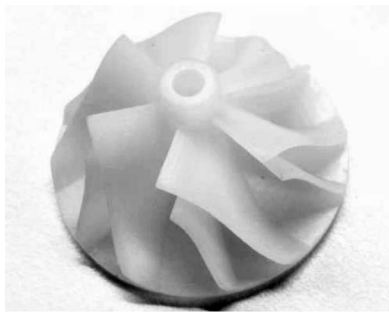


图 6 涡轮成品  
Fig.6 Turbine finished product

为研究 DLP 光固化打印技术对零件成形尺寸的影响,使用电子数显游标卡尺对打印件进行测量,其中电子数显卡尺的分辨率为 0.01mm,示值误差小于 0.03mm,手工测量了打

印件模型的 5 个位置:轴部外径、轴部内径、叶片厚度、盘外径、盘厚度,如图 7 所示。每个位置测量 10 组数据,取所测数据的几何平均值与零件模型的理论值做比较,结果见表 3。

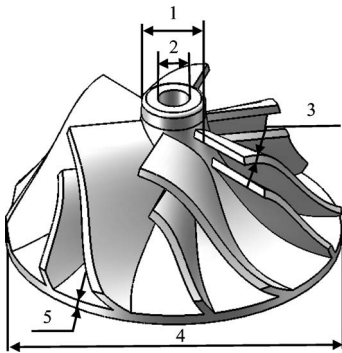


图 7 涡轮测量位置  
Fig.7 Turbine measurement position

表 3 涡轮尺寸测量结果  
Table 3 Turbine size measurement results

| 位置号 | 理论值/mm | 实测值几何平均/mm | 绝对误差/mm | 尺寸精度等级 |
|-----|--------|------------|---------|--------|
| 1   | 7.52   | 7.47       | -0.05   | IT10   |
| 2   | 3.76   | 3.71       | -0.05   | IT11   |
| 3   | 1.18   | 1.30       | 0.12    | IT13   |
| 4   | 39.48  | 39.29      | -0.19   | IT11   |
| 5   | 0.94   | 0.97       | 0.03    | IT10   |

由表 3 可知,涡轮数值模型的尺寸精度等级范围从 IT10~IT13,其中涡轮盘受支撑结构影响,其厚度的尺寸绝对误差有 0.12mm。

5 结论

DLP 光固化打印技术突破了传统加工模式,在较大程度上缩短了新产品的研发周期,快速制出零件原型可以验证设计思想,并进一步做功能性和装配性检验。尤其在航空制造领域,光固化快速成形制件可用于可制造性、可装配性检验,提前发现不合理结构,确定合理的制作工艺,从而有效地缩短研发周期并提高制件成功率。本研究通过对涡轮盘的 DLP 光固化研究,可形成以下结论:

(1) 在模型切片时,缩放比率需要根据具体的光敏树脂牌号通过试验确定。在选择成形方向时应尽可能多地把重要的模型表面布置在水平方向以避免台阶效应,设计支撑时应选择合理的支撑位置,避免影响表面质量。

(2) 光固化树脂材料价格较贵,可抽壳的零件模型应在保证基本强度的条件下尽量减小壁厚。

(3) 在打印工艺参数设置时,首层曝光时间、单层曝光时间、单层冷却时间是重要的影响参数,需根据零件固化效果并兼顾零件制作时间设定。如果单层曝光时间能根据零件形态特征动态自适应,有望显著提高打印速度和成品质量。 **AST**

#### 参考文献

- [1] 席骏. 3D 打印技术及产品简介 [J]. 数码印刷, 2014 (2): 27-29.  
Xi Jun. 3D printing technology and product introduction[J]. Digital Printing, 2014 (2): 27-29. (in Chinese)
- [2] 吴懋亮, 诸文俊, 李涤尘, 等. 光固化成形中的变形分析 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33 (9): 90-93, 97.  
Wu Maoliang, Zhu Wenjun, Li Dichen, et al. Analysis of cure deformation in stereolithography[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33 (9): 90-93, 97. (in Chinese)
- [3] 戴京涛, 赵培仲, 魏华凯, 等. 光固化复合材料的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2016, 44 (3): 15-16.  
Dai Jingtao, Zhao Peizhong, Wei Huakai, et al. Research progress of photocuring composite materials [J]. New Chemical Materials, 2016, 44 (3): 15-16. (in Chinese)
- [4] 李东方, 陈继民, 袁艳萍, 等. 光固化快速成型技术的进展及

应用 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (12): 1769-1774.

Li Dongfang, Chen Jimin, Yuan Yanping, et al. Progress and application of light curing rapid prototyping technology[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (12): 1769-1774. (in Chinese)

- [5] 邵中魁, 姜耀林. 光固化 3D 打印关键技术研究 [J]. 机电工程, 2015, 32 (2): 180-184.  
Shao Zhongkui, Jiang Yaolin. Research on key technology of photo curing 3D printing [J]. Electrical and Mechanical Engineering, 2015, 32 (2): 180-184. (in Chinese)
- [6] 谢鹏程, 宋乐, 李月林, 等. 光固化模塑成形制品尺寸精度动态演化规律 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (4): 90-95.  
Xie Pengcheng, Song Le, Li Yuelin, et al. Dynamic evolution of dimensional precision of light-cured molding articles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (4): 90-95. (in Chinese)

#### 作者简介

张超 (1981— ) 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 三维设计及仿真优化。

Tel: 010-62038693 E-mail: 29147275@qq.com

## Research on Key Technologies of DLP Light Curing 3D Printing

Zhang Chao<sup>1,\*</sup>, Ma Wenmao<sup>2</sup>

1. China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China

2. Mechanical and Electrical School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract:** Aiming at the demand of rapid prototyping of the aviation manufacturing, key technologies of 3D printing based on digital photo-projection curing rapid prototyping technology were researched. The printing process of turbine disc was taken as the main line. The 3D printing pre-processing technology, the molding process parameter design, the post-processing technology, and printed finished products were measured and analyzed. The research results can provide the theoretical basis for the rapid manufacturing of 3D printing engineering samples.

**Key Words:** 3D printing; light curing; DPL; turbine

Received: 2017-12-13; Revised: 2018-01-24; Accepted: 2018-03-05

\*Corresponding author. Tel.: 010-62038693 E-mail: 29147275@qq.com