# 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化

刘 杰 杨永强 王 迪 肖冬明 苏旭彬
(华南理工大学机械与汽车工程学院，广东 广州 510640)

**摘要** 为了提高选区激光熔化(SLM)成型悬垂结构的质量，从调节成型方向和能量输入入手研究悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化。以减小零件模型整体难成型悬垂面的面积为目标，以零件模型非成型方向的两个旋转角度为优化变量，建立成型方向的优化模型，并基于遗传算法实现优化模型参数的求解。通过遍历零件模型中的所有三角面片，建立倾斜角静态查找表，并在成型时查表实现能量输入的实时调节。实验结果表明，经成型方向优化，零件模型难成型悬垂面的面积从 555.12 $mm^2$ 减小为 16.211 $mm^2$，所需支撑数量明显减少；成型后所得零件无明显悬垂物和翘曲变形，成型质量明显改善。

**关键词** 激光技术；选区激光熔化；悬垂结构；成型质量；计算机辅助工艺参数优化
**中图分类号** TN249；TH164 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201239.0503001

# Computer-Aided Optimization of the Process Parameters for Fabricating Overhanging Structure by Selective Laser Melting

Liu Jie Yang Yongqiang Wang Di Xiao Dongming Su Xubin
(*School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong* 510640, *China*)

**Abstract** To improve the fabricating quality of overhanging structure in selective laser melting (SLM), the computer-aided optimization of process parameters is studied, which focuses on the fabrication orientation and the power input. The optimization model of the fabrication orientation, which is aiming at reducing the difficultly fabricating overhanging surface area, is proposed. The genetic solution for the model is studied. The static lookup table to adjust the energy input duly is built by traversing all the triangles in the stereo lithography (STL) file. The experimental results show that the difficultly fabricating overhanging surface area reduces from 555.12 $mm^2$ to 16.211 $mm^2$ after the optimization of the fabrication orientation, which leads to the less support needs, and the fabrication quality is obviously improved without so much overhang and deformation.

**Key words** laser technique; selective laser melting; overhanging structure; fabricating quality; computer-aided optimization of the process parameters
**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

选区激光熔化(SLM)是一种利用金属粉末直接制造出冶金结合、相对密度接近 100%且具有较高尺寸精度和较好表面粗糙度的金属零件的技术，是当前快速成型领域的研究热点。SLM 技术理论上可以成型任意复杂形状的金属零件，但不能完美地成型所有的几何特征，特别是悬垂结构。悬垂结构在成型过程中会产生悬垂物和翘曲变形[1]，使得零件的局部形状精度、尺寸精度不能达到要求，甚至会导致成型失败。同时，悬垂结构成型也是 SLM

**收稿日期**：2011-11-10；**收到修改稿日期**：2012-01-17
**基金项目**：广东省教育部产学研结合重点项目(2010A090200072)和华南理工大学优秀博士学位论文创新基金资助课题。
**作者简介**：刘 杰(1983—)，男，博士研究生，主要从事激光快速成型方面的研究。E-mail：jie.liu.scut@gmail.com
**导师简介**：杨永强(1961—)，男，教授，博士生导师，主要从事激光加工方面的研究。
E-mail：meyqyang@scut.edu.cn(通信联系人)

直接成型免装配机构的难点之一[2]。针对悬垂结构的成型，目前主要是先通过添加支撑结构来保证成型过程的稳定性，再采用后续去除支撑结构和表面打磨的方法保证悬垂面的形状。也有少数情况下是在 SLM 成型后，通过机械加工方式获得悬垂面。但是当零件结构精细复杂或悬垂面在零件内部时，这些手段都不再适合。所以，如果能够在不添加支撑结构的情况下将悬垂结构直接成型出来，或者是在设计阶段避免或尽量减少悬垂结构，对 SLM 工艺的提升和应用范围拓展很有益。

目前，国内外已经开展针对 SLM 直接成型悬垂结构的研究。Kruth 等[3]通过反馈控制的方式，在成型过程中利用传感器实时监测熔池状态，并自动调节成型参数，以实现熔池的稳定，从而改善悬垂结构的成型质量。卢建斌等[1]通过工艺实验，研究了倾斜角、扫描速度和扫描线长度对悬垂结构成型的影响，提出根据倾斜角度实时调整能量输入来优化成型质量的方法，并取得了良好的效果。苏旭彬等[2]研究了悬垂结构的极限成型角，提出通过增大悬垂结构的倾斜角度来确保可靠成型的方法，实现了免装配机构的 SLM 直接成型。从已有的研究来看，反馈控制存在稳定性问题和系统时滞[4]，且系统构成复杂，很难应用于高速的 SLM 成型；而从工艺参数入手，通过调节成型方向增大悬垂结构的倾斜角和根据不同的倾斜角调节能量输入是确保悬垂结构成型质量的有效途径。但是，当零件模型较为复杂的时候，很难通过人工来进行这些操作。为此，本文分析了调节成型方向和能量输入的途径，采用理论分析和实验验证相结合的方法，以求实现 SLM 成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化。

## 2　悬垂结构成型的工艺参数优化分析

悬垂物和翘曲变形是 SLM 成型悬垂结构经常发生的两种缺陷[1]。有两方面因素导致产生悬垂物。一方面，当激光入射到实体支撑区时(图 1 中的 $A$ 点)，热传导率高，而当激光入射到粉末支撑区时(图 1 中的 $B$ 点)，热传导率可能只有实体支撑区域的 1/100 或是更少。若采用扫描实体支撑区的激光参数去扫描粉末支撑区，会因为热传导率低，导致熔池过大。熔池在重力作用和毛细管力作用下沉陷到粉末中，形成悬垂物[3]。另一方面，激光扫描在粉末支撑区时，近似扫描在无限厚的粉层上。由于无法将粉层完全穿透熔化，松散的粉末颗粒几乎对熔池没有约束力，这时熔池在凝固过程中因表面张力作用会迅速成球，发生严重球化，从而形成悬垂物[5]。

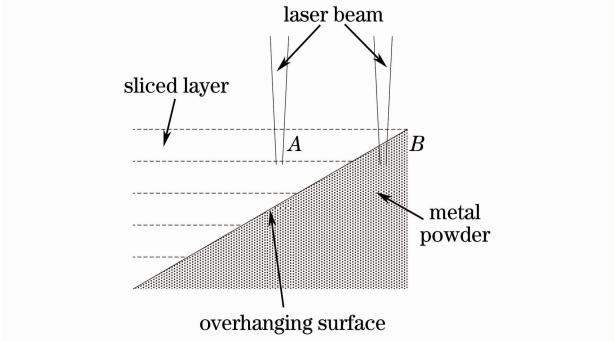


图 1　激光扫描悬垂面的示意图

Fig. 1　Schematic diagram of overhanging surface scanned by laser beam

翘曲变形是由于 SLM 成型过程中存在的热应力超过材料的强度，发生塑性变形引起的。悬垂结构翘曲变形的主要原因是缺少支撑将其固定，热应力拉伸导致其向中心翘曲。根据卢建斌等[1,2]已有的研究，可考虑从成型前和成型过程中两个方面来优化 SLM 成型悬垂结构的工艺参数。

在成型前，通过调整成型方向，从整体减少零件的难成型悬垂面。极限倾斜角为 SLM 可直接成型悬垂面的最小倾斜角。根据倾斜角度的不同，悬垂面可分两种：倾斜角大于等于极限倾斜角的为可直接成型悬垂面，倾斜角小于极限倾斜角的为难成型悬垂面。难成型悬垂面在成型过程中，必须加入支撑结构，而且也不能保证成功成型[1]。成型前，通过调整成型方向从整体上减少零件的难成型悬垂面，进而减少零件成型时所需的支撑数，缓解零件的变形程度，提高零件成型的成功率。在光固化成型等工艺中，调节成型方向属于一个多目标优化问题，还需要综合考虑台阶效应和制作时间等因素[6~8]。台阶效应会降低零件表面粗糙度，与零件的切片层厚成正比。但不同于光固化成型，SLM 中零件的切片层厚一般仅有 0.020～0.035 mm，台阶效应对零件表面的影响不大。对于零件的制作时间而言，若零件成型失败，则耗费的时间将会更多，而且可通过同时成型多个零件进行优化。零件的成功稳定成型才是 SLM 应考虑的主要因素[2]。故在调整成型方向时，不考虑台阶效应和零件制作时间。

在成型时，针对不同的倾斜角度来调节能量输入。能量输入通常是指单位时间内激光在单位面积上的能量输入大小，与扫描速度成反比而与激光功率成正比[9]。在一定范围内，能量输入与致密度成正比[10]。如果能量输入过大，超出合理范围，则会

使零件产生翘曲变形等缺陷，尤其是在成型悬垂面时。但如果能量输入不足，则会降低零件的致密度，严重的会导致粉末不能完全熔化，使得零件处于烧结状态。悬垂面的倾斜角与能量输入相互制约，根据卢建斌等[1]的研究，当激光功率为150 W时，扫描速度与该速度下能成型的最小倾斜角存在如图 2 所示的关系。该曲线从另一个侧面也反映了在 150 W 的功率下，不同倾斜角所能接受的最低扫描速度。倾斜角越小，能接受的扫描速度就越大，能量输入就相应越小。成型时，针对不同切片层所处位置的倾斜角度来调节能量输入，能保证该切片层在成型时获得最佳的能量输入，在确保悬垂面成功成型的同时尽量提高零件的致密度。

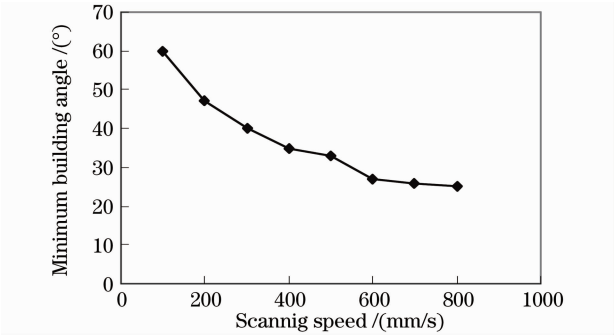


图 2　最小成型角与扫描速度的关系

Fig. 2　Relation between the minimum building angle and scanning speed of overhanging surface

## 3　成型方向的优化调节

成型方向优化调节的目的是减少零件的难成型悬垂面。可考虑以面积为度量值，以减少零件整体难成型悬垂面的面积为目标来进行优化。

### 3.1　优化模型的建立

三角面片(STL)文件是快速成型常用的零件模型数据格式，任意 STL 格式零件模型的表面积 $S_s$ 可通过将零件模型中所有三角面片的面积相加获得：

$$S_s = \sum_{m=1}^{n_1} S(m), \tag{1}$$

式中 $n_1$ 为零件模型三角面片的个数，$S(m)$ 为零件模型中的第 $m$ 个三角面片的面积，可用海伦公式求得。

任意零件模型，若其某个三角面片与水平面的夹角小于最小倾斜角，则可近似地认为这个三角面片属于一个难成型悬垂面。如图 3 所示，$\angle ACB$ 是某个三角面片的倾斜角。$\overrightarrow{AB}$ 是该三角面片的单位法向量，它与水平面的夹角 $\angle ABC$ 与倾斜角 $\angle ACB$ 互余($\angle ABC + \angle ACB = 90°$)。过点 $A$ 做一条垂直于水平面的辅助线 $AD$，可得 $\angle BAD = \angle ACB$。设极限倾斜角为 $\theta_l$($0° \leqslant \theta_l < 90°$)，则当 $0° \leqslant \angle BAD < \theta_l$ 时，该三角面片属于一个难成型悬垂面。如图 3 所示，可得 $\sin 0° \leqslant \sin\angle BAD < \sin\theta_l$，即 $|BD| < \sin\theta_l$。而 $|BD| = \sqrt{i^2 + j^2} = \sqrt{1 - k^2}$，$i$、$j$、$k$ 是单位法向量$\overrightarrow{AB}$ 在 $x$、$y$、$z$ 轴的坐标值。

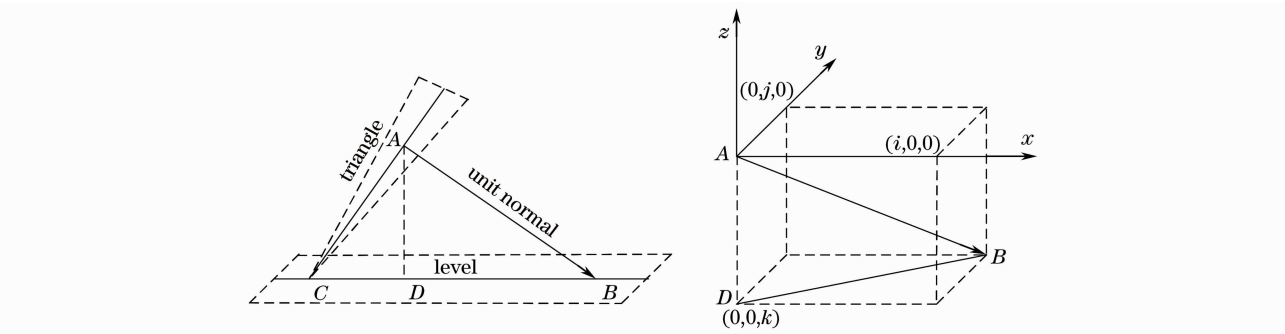


图 3　倾斜角与单位法向量在水平面投影的关系

Fig. 3　Relation between the tilt angle and unit normal

对于任意的三角面片，若其单位法向量 $(i,j,k)$ 满足：1) $k < 0$(悬垂面的必要条件)；2) $\sqrt{1-k^2} < \sin\theta_l$，则可判定该三角面片属于一个难成型悬垂面。据此，构造函数 $C(m)$ 用以判断零件模型中的第 $m$ 个三角面片是否属于一个难成型悬垂面：

$$C(m) = \begin{cases} 0, & k_m \geqslant 0 \\ \dfrac{\left|\sin\theta_l - \sqrt{1-k_m^2}\right| + \sin\theta - \sqrt{1-k_m^2}}{2\left|\sin\theta_l - \sqrt{1-k_m^2}\right|}, & k_m < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 $k_m$ 是第 $m$ 个三角面片的单位法向量在 $z$ 轴的坐标值。当 $k_m$ 满足难成型悬垂面判定条件时，$C(m) = 1$；否则，$C(m) = 0$。将 $C(m)$ 代入(1)式可得零件模型的难成型悬垂面面积公式：

$$S_{\mathrm{d}}=\sum_{m=1}^{n}[C(m)\times S(m)]. \tag{3}$$

每个三角面片的面积是固定的，但其单位法向量可以通过对零件模型的旋转来进行改变。如图 3 所示，若单位法向量 $\overrightarrow{AB}$ 沿 $x$ 轴或 $y$ 轴进行旋转，则它在 $z$ 轴的坐标值 $k$ 可相应在[0,1]范围内发生变化。根据(2)、(3)式，改变 $k$ 能够改变零件模型的难成型悬垂面面积。

设零件模型沿 $x$ 轴的旋转角为 $\theta_x$，沿 $y$ 轴的旋转角为 $\theta_y$，则其某个三角面片的单位法向量$(i,j,k)$旋转后得到的新向量$(i_{\mathrm{r}},j_{\mathrm{r}},k_{\mathrm{r}})$为[11]

$$\begin{bmatrix} i_{\mathrm{r}} \\ j_{\mathrm{r}} \\ k_{\mathrm{r}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix}\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}. \tag{4}$$

展开(4)式可得新向量在 $z$ 轴的坐标为

$$k_{\mathrm{r}}=-i\times\sin\theta_y+\cos\theta_y\times(j\times\sin\theta_x+k\times\cos\theta_x). \tag{5}$$

将(5)式代入(2)式和(3)式，得到难成型悬垂面的优化模型为

$$\min S_{\mathrm{d}}=\sum_{m=1}^{n}[C_{\mathrm{r}}(m)\times S(m)], \tag{6}$$

满足

$$C_{\mathrm{r}}(m)=\begin{cases} 0, & k_{\mathrm{r}m}\geqslant 0 \\ \dfrac{|\sin\theta-\sqrt{1-k_{\mathrm{r}m}^2}|+\sin\theta-\sqrt{1-k_{\mathrm{r}m}^2}}{2|\sin\theta-\sqrt{1-k_{\mathrm{r}m}^2}|}, & k_{\mathrm{r}m}<0 \end{cases}$$

$$k_{\mathrm{r}m}=-i_m\times\sin\theta_y+\cos\theta_y\times(j_m\times\sin\theta_x+k_m\times\cos\theta_x),\quad 0^\circ\leqslant\theta_x<360^\circ\quad 0^\circ\leqslant\theta_y<360^\circ$$

该模型的优化变量为 $\theta_x$ 和 $\theta_y$，优化目标为寻找合适的优化变量使得难成型悬垂面的面积最小，这属于一个复杂非线性规划问题。

### 3.2　基于遗传算法的模型求解

可考虑通过遗传算法求解优化模型，编码是遗传算法求解问题的前提。先分别将优化变量 $\theta_x$ 和 $\theta_y$ 进行二进制编码，再组合得到如图 4 所示的二进制编码。其中 $n_2$ 为单个参数的编码长度，和需要的求解精度有关，如：精度为 1°，$n_2=9$；精度为 0.1°，$n_2=12$。解码是编码的逆向过程，是进行适应度判定和获得最终结果的前提。解码后得到的角度取值可能会超出[0°,360°)，如：精度为 1°时，解码后得到的角度值范围为[0°,511°)。这虽然不会影响三角函数的求解，但会扩大搜索范围，因此需要将解码后的值对 360°求余以缩小搜索范围。

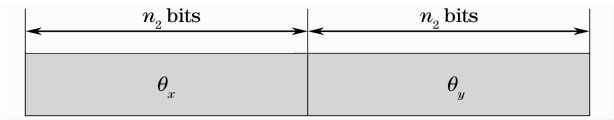


图 4　两轴旋转角度的二进制编码

Fig. 4　Binary code for two-axis rotations

适应度函数是对遗传算法的解进行适度值计算的函数。适度值越高的解越接近最优解，也越容易被选中进入下一代遗传操作。本文的优化模型是求解最小值问题，需要用“界限构造法”[12]来构造适应度函数。由于零件模型的难成型悬垂面面积 $S_{\mathrm{d}}$ 恒小于零件模型的表面积 $S_{\mathrm{s}}$，所以可以选用零件模型的表面积 $S_{\mathrm{s}}$ 作为界限来构造适应度函数：

$$f=S_{\mathrm{s}}-S_{\mathrm{d}}=\sum_{m=1}^{n}\{[1-C_r(m)]\times S(m)\}. \tag{7}$$

收敛条件是遗传算法的终止条件。可将难成型悬垂面的完全消除作为终止条件之一，即 $S_{\mathrm{d}}=0$。但是，对于很多零件模型，无法做到完全消除难成型悬垂面，需要设置求解次数作为另一个终止条件。本文优化问题的遗传算法求解步骤为：

1）通过零件模型建立适应度函数；

2）随机生成初始解集；

3）用适应度函数计算解集中每个解的适度值；

4）通过选择、交叉、变异等遗传操作获得新解集；

5）判断新解集是否满足收敛条件，若满足则转步骤 7)，若不满足则转步骤 6)；

6）用新解集替换老解集，转到步骤 3)；

7）选择新解集中适度值最高的解作为最终解。

## 4　能量输入的优化调节

能量输入调节的依据是当前成型层所处位置的

倾斜角。在成型过程中，很难实时识别倾斜角的大小。可考虑在成型前以切片层的层数为关键字，以切片层所在位置的倾斜角为记录，建立倾斜角静态查找表。然后在成型时，控制系统通过查表获得的当前层的倾斜角，然后根据倾斜角优化调节能量输入。

### 4.1　倾斜角静态查找表的建立

分为两步建立倾斜角静态查找表：

1）初始化，其主要目的是为静态查找表预先分配空间、填充初始值。空间大小为切片层数。初始值是为了下一步填表时进行比较，设置为可能出现的最大角度值 180°。表 1 为切片层数为 $n$ 时的初始倾斜角静态查找表。

表 1　初始倾斜角静态查找表

Table 1　Initial tilt angle static lookup table

| Key word | 1 | 2 | … | $n+1$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Record /(°) | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |

2）填表，通过遍历零件的 STL 模型来完成。当遍历到某个三角面片时，首先判断通过它的切片层，然后将该三角面片的倾斜角值填入对应的表位。如图 5 所示，当遍历到三角面片 $ABC$ 时，将该三角面片的倾斜角值填入切片层 $m$ 至 $m+5$ 对应的表位。填写时，需要与表位当前值进行比较。若填写值小于当前值，则填写。否则不填写。假如某个切片层所在位置存在多个不同的倾斜角，则该层填表后的值为所在位置的最小倾斜角（如图 6 所示）。

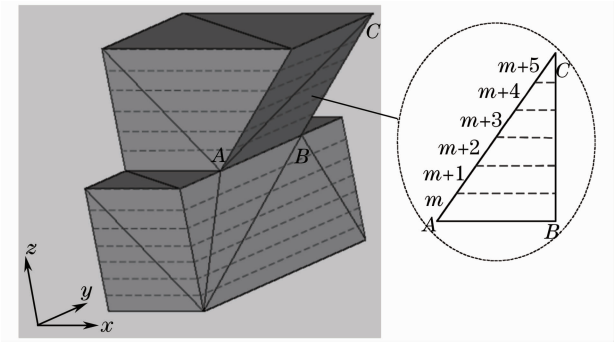


图 5　遍历三角面片时的情况

Fig. 5　Situation when traversing one of the triangles

### 4.2　倾斜角静态查找表的使用

成型时，控制系统通过查表，可获得当前成型层的倾斜角，再针对不同的倾斜角来调整能量输入。例如：可根据图 2 所示的倾斜角与扫描速度的关系结合实际来调整扫描速度。表 2 为图 6 所示位置的能量输入示例。对于第 $m+4$ 层，0°的位置还需要添加支撑结构。

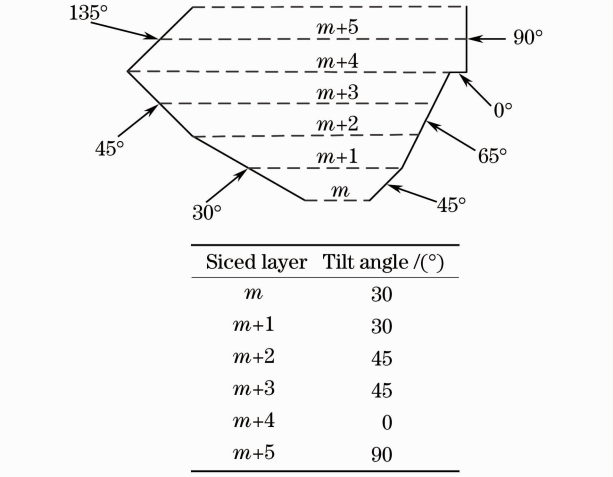


图 6　某个切片层所在位置存在多个不同的倾斜角的情况

Fig. 6　Different tilt angles located at the same sliced layer

表 2　能量输入示例

Table 2　Example of power input

| Sliced layer | Tilt angle /(°) | Scanning speed /(mm/s) | Laser power /W |
|---|---|---|---|
| $m$ | 30 | 600 | 150 |
| $m+1$ | 30 | 600 | 150 |
| $m+2$ | 45 | 200 | 150 |
| $m+3$ | 45 | 200 | 150 |
| $m+4$ | 0 | 800 | 150 |
| $m+5$ | 90 | 100 | 150 |

## 5　优化对比实验

### 5.1　实验数据的准备

为进行工艺优化实验，编程开发了 SLM 成型悬垂结构的工艺参数优化软件，如图 7 所示。该软件能根据第 3 节的算法优化零件模型的成型方向（设定求解精度为 1°），并能根据第 4 节的算法生成零件模型的倾斜角静态查找表。

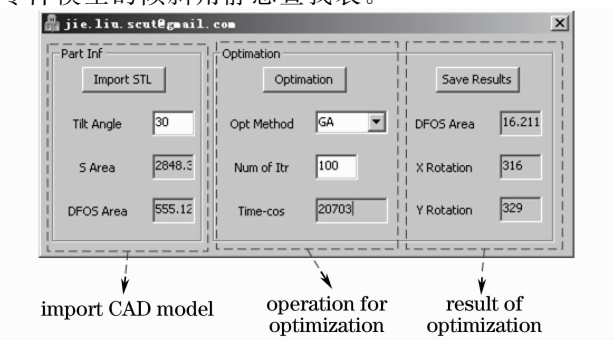


图 7　计算机辅助工艺参数优化软件

Fig. 7　Computer-aided optimization of the process parameters software

选用图 8 所示的零件模型作为实验对象导入工艺优化软件进行优化求解。软件根据(3)式求得该模型未优化前在极限倾斜角 $\theta_l=30°$时的难成型悬垂面的面积为 555.12 $mm^2$。用软件进行优化求解时,设置求解次数为 100,遗传算法的交叉和变异概率是随机生成的。经求解,得到零件模型在 $x$ 轴的旋转角度 $\theta_x=316°$,在 $y$ 轴的旋转角度 $\theta_y=329°$。零件旋转后难成型悬垂面的面积为 16.211 $mm^2$,与旋转前相比有明显减少。图 9 为优化后的零件模型。利用软件生成优化后的零件模型的倾斜角静态查找表,并导出为 Excel 数据。图 10 为该数据对应的折线图,关键字(层数)为 $x$ 轴,记录(倾斜角)为 $y$ 轴。

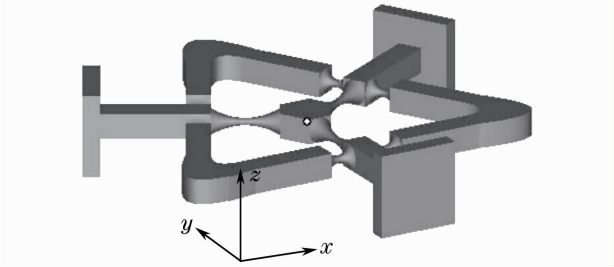


图 8　成型方向优化前

Fig. 8　Fabrication orientation before the optimization

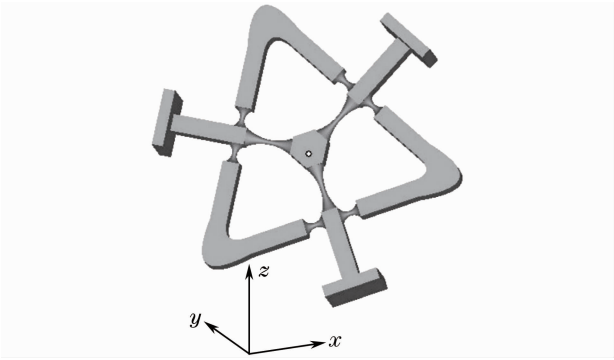


图 9　成型方向优化后

Fig. 9　Fabrication orientation after the optimization

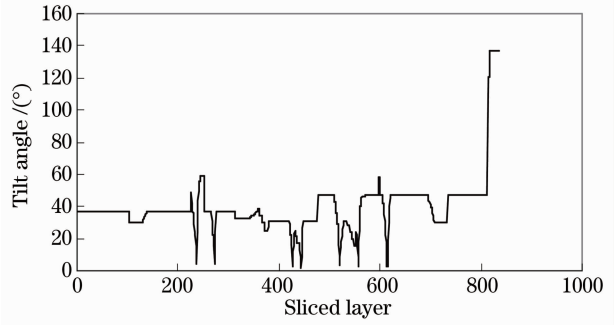


图 10　倾斜角静态查找表的折线图

Fig. 10　Scatter chart of the tilt angle static lookup table

### 5.2　实验方法及结果

为进行对比,同时成型了两个零件。零件 1 选用图 8 所示的未优化模型,能量输入参数根据图 2 设为临界最低,即扫描速度 800 mm/s,激光功率 150 W。零件 2 选用图 11 所示的优化模型,能量输入参数根据图 10 所示的静态查找表进行实时调节。成型所用材料为−500 目(25 μm)气雾化 316 L 不锈钢粉。成型过程采用纯氮气保护。零件的支撑结构由 Magics 软件生成。切片层厚为 0.035 mm。成型后得到的零件如图 11 所示,零件 1 所需支撑数明显多于零件 2 所需的,而且由于存在大面积倾斜角为 0°的难成型悬垂面,因此成型过程出现了严重的缺陷。零件 2 所需支撑数明显减少,无明显悬垂物和翘曲变形,零件的成型质量较零件 1 有明显的改善。

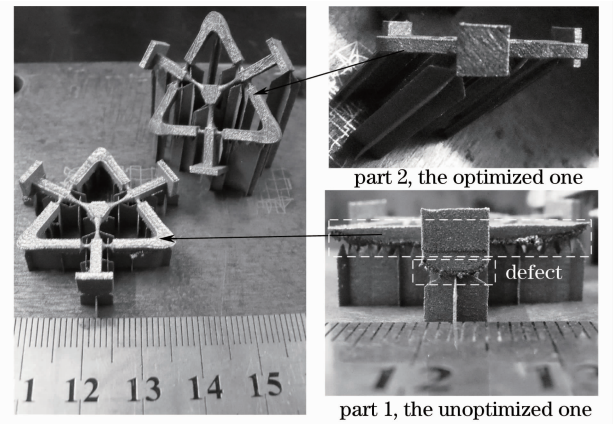


图 11　对比实验结果

Fig. 11　Contrast of experimental results

## 6　结　　论

以减小零件整体难成型悬垂面的面积为目标,以零件非成型方向的两个旋转角度为优化变量,建立了成型方向的优化模型。并用遗传算法对该模型进行了求解。实现了成型方向的计算机辅助优化调节。以切片层为关键字,以切片层所在位置的最小倾斜角为记录,建立了能量输入的静态查找表。通过在成型过程中的查表操作,实现了能量输入的计算机辅助优化调节。开发了 SLM 成型悬垂结构的工艺参数优化软件。经软件优化的零件模型,将难成型悬垂面的面积从 555.12 $mm^2$ 减小为 16.211 $mm^2$,成型时需要的支撑明显减少。成型的零件,无明显悬垂物和翘曲变形,成型质量明显改善。

## 参　考　文　献

1 Lu Jianbin, Yang Yongqiang, Wang Di *et al*.. Analysis of

affecting factors of overhanging surface quality by selective laser melting[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(2): 148～151
卢建斌，杨永强，王　迪 等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术，2011，**35**(2)：148～151

2 Su Xubin, Yang Yongqiang, Wang Di *et al*.. Study on process of non-assembly mechanisms directly fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603021
苏旭彬，杨永强，王　迪 等. 免装配机构的选区激光熔化直接成型工艺研究[J]. 中国激光，2011，**38**(6)：0603021

3 J. P. Kruth, P. Mercelis, V. Vaerenbergh *et al*.. Feed back control of selective laser melting[OL]. [2008-02-17]. https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/185342/1 /krufcs.pdf

4 M. S. Ali, Z. H. Hou, M. N. Noori. Stability and performance of feedback control systems with time delays[J]. *Computers and Structures*, 1998, **66**(2-3): 241～248

5 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di . Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(5): 110～115
吴伟辉，杨永强，王　迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2010，**38**(5)：110～115

6 Zhao Jibin, He Liying, Liu Weijun *et al*.. Optimization of part-building orientation for rapid prototyping manufacturing[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, **18**(3): 456～463
赵吉宾，何利英，刘伟军 等. 快速成型制造中零件制作方向的优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2006，**18**(3)：456～463

7 Hong Jun, Wu Dianliang, Li Dichen *et al*.. Multi-objective optimization of the part building orientation in stereolithography [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, **35**(5): 506～509
洪　军，武殿梁，李涤尘 等. 光固化快速成型中零件制作方向的多目标优化问题研究[J]. 西安交通大学学报，2001，**35**(5)：506～509

8 Liu Houcai, Chu Aimin. Part building orientation optimization in rapid prototyping of three dimensional printing[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2009, (3): 41～45
刘厚才，储爱民. 三维打印快速成型零件制作方向的优化研究[J]. 工程图学学报，2009，(3)：41～45

9 A. Simchi. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features[J]. *Materials Science & Engineering*, 2006, **428**(1-2): 148～158

10 E. Yasa, T. Craeghs, M. Badrossamay *et al*.. Rapid manufacturing research at the Catholic University of Leuven [OL]. [2009-07-04]. http://iweb.tntech.edu/rrpl/rapidtech2009/yasa.pdf

11 Sun Jiaguang, Yang Changgui. Computer Graphics: The New Version [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 344～348
孙家广，杨长贵. 计算机图形学：新版[M]. 北京：清华大学出版社，1995. 344～348

12 Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic Algorithm——Theory, Application and Software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 25～28
王小平，曹立明. 遗传算法——理论，应用与软件实现[M]. 西安：西安交通大学出版社，2002. 25～28

**栏目编辑**：宋梅梅