

基于 SLM 的多内腔结构件自适应分层算法优化

孙玉龙

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: SLM 成形多内腔结构件时, 分层算法的有效性会直接影响零件的成形精度与加工效率。因此, 通过对多内腔结构零件的特征分析, 提出了该类结构特征的两个判别式, 并基于面积偏差比值的自适应分层算法进行了优化, 有效解决了该算法无法识别切片面积变化率为零的问题, 并设计了相关实验方案。经过实验验证的结果表明该优化算法在保证打印精度的前提下, 大大提高了分层打印的效率。

关键词: SLM; 多内腔结构; 面积偏差比; 自适应分层

中图分类号: TP202⁺.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2020)04-0124-04

Adaptive Layered Algorithm Optimization of Multi-cavity Structure Based on SLM

SUN Yulong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The forming accuracy and production efficiency of the part could be affected by the effectiveness of the layering algorithm when multi-cavity structural parts are formed by SLM. Therefore, this paper analyzes the characteristics of the multi-cavity structural parts, proposes two discriminants for this kind of structural features, and optimizes the adaptive layering algorithm based on AAD. It effectively solves the problem that the algorithm cannot be used to recognize the slice area with zero change rate, then, the related experiment scheme is done. The result shows that the optimized algorithm can be used to greatly improve the layered printing efficiency under the premise of ensuring printing accuracy.

Keywords: SLM; multi-cavity structure; AAD; adaptive layering

0 引言

20 世纪 80 年代, 3D 打印(three dimensional printing)首次被提出, 被称为“第三次工业革命的重要工具”^[1]。1995 年, 德国首次提出选区激光熔化成型(selective laser melting, SLM)技术^[2]。SLM 采用 3D 打印原理, 层叠成型, 可设计性好, 成形连续, 有较好的表面质量和物理性能。因此该技术适合成形具有复杂形状的金属结构件。

目前针对复杂内腔结构的相控阵雷达天线, 国内常采用传统机加工进行制造并焊接装配。该方式存在着加工时间长、成品率不高、电性能不足等缺陷。因此本文基于 SLM 技术, 通过对传统分层算法的优化, 提出新的自适应分层算法。

目前分层算法研究主要包括两方面: 等厚分层和不等厚分层。国内外众多学者对此进行了相关研究。JAMIESON R 等^[3]规范了等厚分层方法, 即直接分层算法(DS)。直接分层是 3D 打印中最基础的分层方法, 其核心参数是分层厚度。当层厚值确定后, 所有分层得到的二维轮廓线信息也随之确定。等厚分层方法虽然比较简单, 但在 STL 模型轮廓曲率变化较大处, 如果分层厚度过大, 会产生明显的阶梯效应^[4]。DOLENC A 等^[5]针对成形过程中出现的阶梯效应, 提出了一种自适应分层方法。该方法

通过定义分层切片与三角面片交点处的允许切削深度值, 来确定分层层厚; 虽然该算法能够有效抑制台阶效应带来的表面质量降低问题, 但没有针对性, 对于内腔结构较少甚至均为实体的区域, 会大大降低分层及加工效率。TYBERG 等提出了一种针对模型局部特征进行自适应分层的方法。该算法能够有效成形局部特征, 但由于 SLM 成形刮粉时得到的粉层厚度是一致的, 因此若要加工的内外层厚不同, 对设备的要求非常高, 甚至无法有效实现。CORMIER 等人基于非统一的切削深度值对成形表面的影响, 提出了一种算法, 可以允许用户根据零件表面质量需求, 定义不同层面的最大切削深度, 满足不同区域的分层要求。印度理工学院的 CHAKRABORTY D 等^[6]提出的算法可以直接输出基于表面与平面相交算法的分层文件等。文献[7]提出相邻分层的面积偏差比值来自动调整分层厚度, 由于基准面积是不断变换的, 很难控制, 导致计算的分层厚度不准确。文献[8]提出了在“阶梯效应”中建立体积误差模型, 通过控制参数实现自适应分层。但当分层厚度超过某些三角面片时, 会导致特征遗失或体积偏差较大, 因此很难得到准确的分层厚度。

上述分层算法的原理研究已趋于成熟, 并形成了种类繁多的分层算法。但是目前较为成熟的算法, 对多内腔结构零件成形时的分层问题依然不能很好地处理, 因此本文在相对面积偏差比值的分层算法上提出了优化算法, 以满

作者简介: 孙玉龙(1993—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为激光增材制造。

足成形分层要求。

1 特征结构的自适应分层算法

本文以毫米波雷达为对象,其结构剖面如图 1 所示。该研究对象内部包含了多种不同尺寸的内腔结构。本节将基于相对面积偏差比值的自适应分层算法进行优化。

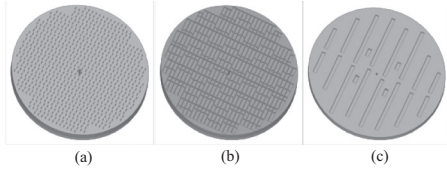


图 1 多缝隙内腔结构天线剖面示意图

1.1 相对面积偏差比值分层算法

相对面积偏差比值定义为:

$$\varepsilon = \left| \frac{A_{i+1} - A_i}{A_i} \right| \leq \varepsilon_0$$

其中 A_i 和 A_{i+1} 是分层中相邻两个切片的面积。这里参数 ε_0 由需要的表面精度值来确定,一般选择该值为 $\varepsilon_0 = 5\%$ 。

每层轮廓有内、外环等多环的情况,因此第 i 层面积为:

$$A_i = \sum A_i^{\text{out}} - \sum A_i^{\text{in}}$$

其中: $\sum A_i^{\text{out}}$ 为第 i 层切片中外轮廓的总面积; $\sum A_i^{\text{in}}$ 为第 i 层切片中内轮廓的总面积。

对于沿打印方向有曲率变化的零件,总能找到一个厚度值,使截取的轮廓面积差值在某个范围内。基于该原理,可以先采用最大层厚进行切分,然后判断 ε 是否小于指定值。若 ε 超过标准值,则表明当前模型表面特征有较为明显的变化,此时按照一定的规则,使用较小的分层厚度继续进行细分直到满足条件。

基于相对面积偏差比值的自适应算法判别条件简单,易实现。但在某些特殊情况下,其分层的自适应效果并不理想,例如相邻两层轮廓面积差为 0 的情况。

如图 2 所示,为毫米波天线轴向的局部剖面图。在该方向可分为 7 个特征区域,每个区域都由多个内腔组成。

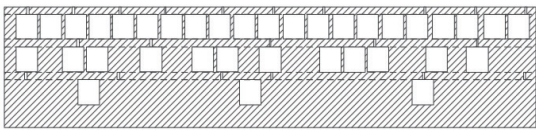


图 2 毫米波天线局部剖面图

在这 7 个区域交接处,切片轮廓面积会发生突变,因此采用面积偏差比值的自适应算法会有很好的分层效果。但在同一区域内,切片轮廓面积差为 0,因此采用最大层厚进行切分,会使成形的内腔特征精度不足。

1.2 自适应分层算法优化

上述算法不足之处在于无法有效识别面积偏差比值为 0 的多内腔结构。通过对大量内腔体结构件的对比分析,发现该类结构的横截面有以下几个特征:

- 1) 所有截面内环面积之和占外轮廓面积的比值较高;
- 2) 截面内环的总数量较多。

若不能同时满足以上特征,则不能判断为多内腔结构。如图 3 所示。

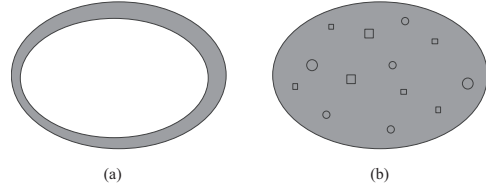


图 3 非多内腔结构示意图

在图 3(a)中,内腔轮廓总面积很大,但只有一个;图 3(b)中,虽然内腔数量较多,但其总面积较小,属于微小孔洞成形。张冬云等人^[9]针对薄壁和微孔结构成形过程的工艺进行了研究,因此该情况不在本文讨论范围内。

定义第 i 层切片内轮廓总面积相对外轮廓总面积的比值 σ ,即内轮廓面积占比为:

$$\sigma = \frac{\sum A_i^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}} \geq \sigma_0$$

σ_0 为常量,由用户根据待加工对象的结构特征要求进行定义;若对象内腔数量多、面积大,可以将 σ_0 的数值设置在较高水平,反之较低。

当内轮廓面积占比为定值时,内轮廓数量越多,每个内轮廓面积与外轮廓面积的比值会降低。定义内轮廓面积平均占比 μ 为:

$$\mu = \frac{1}{n} \left(\frac{A_1^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}} + \frac{A_2^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}} + \dots + \frac{A_n^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}} \right)$$

其中: n 为第 i 层内环轮廓数量; A_i^{out} 为第 i 层外轮廓面积; A_i^{in} 为第 n 个内轮廓面积;上式可以表示为:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum A_i^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}}$$

对于多内腔结构,在满足 $\sigma \geq \sigma_0$ 的情况下,内轮廓面积平均占比 μ 的值在一定范围内波动,即: $\mu_0 \leq \mu \leq \mu_1$ 。经过计算,在极端情况下, μ_0 的取值为 0.002 5。考虑到孔洞分布不均,外轮廓尺寸变化等因素,给出的判别下限取值余量 $\mu_0 = 0.005$ 。 μ_1 范围上限则由用户根据成形需求进行设置。

为了统一两个判别条件,定义判别系数 θ :

$$\theta = \text{int} \left\{ \frac{1}{4} \ln (\sqrt{\sigma - \sigma_0} + 55) \right\}$$

其判别效果为:若当前层内轮廓面积占比满足条件,则 $\theta = 1$,不影响后续内轮廓面积平均占比的计算;若当前层内轮廓面积占比不满足条件,则取值为虚数,直接采用既定的分层算法对当前层进行切分。

综上判别条件可以表示为:

$$\mu = \theta \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum A_i^{\text{in}}}{A_i^{\text{out}}}$$

因此,根据基于相对面积偏差比值的自适应分层算法的优化思想,设计出优化算法的代码流程如下:

- 1) 用户定义可允许的面积偏差比值 ε ,最小层厚 $l_{\min}$,

最大层厚 $l_{\max}$, 内轮廓面积占比 σ_0 及内轮廓面积平均占比 μ_1 ;

2) 读取 STL 文件, 并对模型数据进行预处理;

3) 获取所有面片顶点中 z 坐标值的最大和最小值 ($z_{\max}$ 和 $z_{\min}$), 并用 $Z_{\text{slice}} = z_{\min}$ 水平面切分模型得到的首个轮廓线并存储;

4) 计算 Z_{slice} 所切分模型得到的内外轮廓线面积: A_i^{in} 、 A_i^{out} , 存储该层内轮廓数量 n ;

5) 令 $Z'_{\text{slice}} = Z_{\text{slice}} + Z_{\text{step}}$, $Z_{\text{step}} = l_{\max}$, 判断 $Z'_{\text{slice}} \leq z_{\max}$, 成立则用 Z'_{slice} 的水平面切分模型得到相应轮廓线后并计算出面积 A_{i+1} , 不成立退出算法;

6) 计算 ε , 判断 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$, 成立跳至步骤 9), 不成立跳至步骤 7);

7) 令 $Z_{\text{step}} = Z_{\text{step}} - l_{\min}$, 判断 $Z_{\text{step}} < l_{\min}$, 成立则 $Z_{\text{step}} = l_{\min}$, 跳至步骤 10), 不成立继续步骤 8);

8) 用 $Z'_{\text{slice}} = Z_{\text{slice}} + Z_{\text{step}}$ 的水平面切分模型得到相应轮廓线后计算出其面积 A_{i+1} , 并计算 ε , 判断 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$, 成立则跳至步骤 9), 不成立跳至步骤 7);

9) 计算当前层判别系数 θ , 并计算内轮廓面积平均占比 μ 。若 $\mu_0 \leq \mu \leq \mu_1$ 成立, 则 $Z_{\text{step}} = l_{\min}$; 若 $\mu_0 \leq \mu \leq \mu_1$ 不成立, 则 $Z_{\text{step}} = l_{\max}$, 之后跳至步骤 10);

10) 令 $Z'_{\text{slice}} = Z_{\text{slice}} + Z_{\text{step}}$ 并切分模型得到相应轮廓线 A_{i+1} , 存储当前 A_{i+1} 对应的轮廓线, $A_i = A_{i+1}$, $Z_{\text{slice}} = Z'_{\text{slice}}$, 继续步骤 5);

11) 结束。

2 算法实现及实验验证

本文基于 MFC 开发平台, 利用面向对象编程技术及 OpenGL 图形库对模型文件进行读取与显示。由于研究对象原始尺寸较大 ($\varphi 256 \text{ mm} \times 16.4 \text{ mm}$), 而内部腔体结构呈中心对称分布, 因此为了研究方便, 仅截取中心 $\varphi 20 \text{ mm}$ 部分进行数据处理。为了对比研究, 算法采用了等厚分层、相对面积偏差比值的自适应分层以及优化后的分层方式。

为了更清晰直观地描述分层效果, 这里设置最大分层厚度 $l_{\max} = 0.1 \text{ mm}$, 远大于实际加工中最大层厚度 $50 \mu\text{m}$ 的尺寸, 而最小分层厚度 $l_{\min} = 0.03 \text{ mm}$, 同时设置每 5 层的显示效果。

如图 4 所示, 图 4(a) 为截取的天线局部模型; 图 4(b) 为等厚分层效果, 共得到 165 层切片信息, 包括在区域分界处的 11 层切片信息。图 4(c) 为采用相对面积偏差比值的自适应分层算法, 共得到 179 层切片信息; 图 4(d) 为采用优化后的自适应分层的分层结果, 共得到 264 层切片信息。

从切片结果可以明显看出, 相对面积偏差比值分层结果与等厚分层结果效果类似, 只有在区域分界处该算法对分层进行了细化, 除此之外的区域 (包括零件上半部分的多内腔结构) 都采用最大层厚的均匀分层方式进行切分。而优化的分层结果则表明, 对特征结构进行了有效细分。因此设计对比试验中, 为了更好地判断优化分层的加工效果, 采用几组等厚分层与优化算法进行对比。

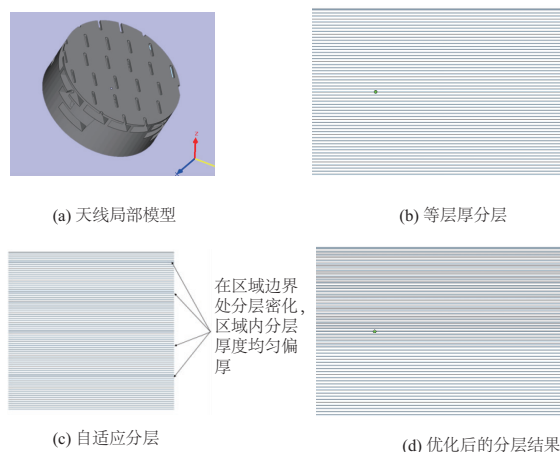


图 4 3 种分层算法的结果比较

为了对比本文优化算法下的加工精度可以达到的水平, 设置等厚分层下的加工试验作为对比:

1) 等厚分层成形方案: 首先以设备的加工参数库中最优加工层厚 $l = 30 \mu\text{m}$ 为参考基准, 并以该基准为标准, 上下各设置两组层厚, 分别为 $20 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $35 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$, 共对 5 组不同厚度分层进行试验。

2) 优化算法分层成形方案: 经过对本研究对象内腔结构的计算, 取各参数 $\sigma_0 = 0.45$, $\mu_0 = 0.005$, $\mu_1 = 0.167$, 取最大层厚 $l_{\max} = 40 \mu\text{m}$, 最小层厚 $l_{\min} = 20 \mu\text{m}$, 对模型进行切片, 导出 SLC 格式文件至打印设备进行打印。

成形后采用线切割将样件剖开, 取内腔表面 5 处不同的点进行表面粗糙度测量, 并取平均值作为该组试验的表面粗糙度。

为了保持试验条件的一致性, 对于内部轮廓填充, 两组试验均采用相同的扫描参数: 激光功率 140 W 、扫描速度 800 mm/s 、扫描线间距为 0.085 mm 、层间扫描角度偏移量为 90° 。

在加工前, 需要确定不同层厚下成形过程中的激光热影响区, 因此对本文设计的 5 种层厚分别做单道成形试验, 结果如图 5 所示。图 5(a) - 图 5(e) 分别为层厚 $20 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $35 \mu\text{m}$ 与 $40 \mu\text{m}$ 下的单道成形试验。本文所用设备的光斑半径实测值为 $70 \mu\text{m}$ 。通过对 5 种成形参数的单熔道尺寸测量, 可以得到实际的熔道宽度分别为 $112 \mu\text{m}$ 、 $116 \mu\text{m}$ 、 $118 \mu\text{m}$ 、 $121 \mu\text{m}$ 及 $126 \mu\text{m}$, 因此本文涉及的试验热影响区宽度分别为: $21 \mu\text{m}$ 、 $23 \mu\text{m}$ 、 $24 \mu\text{m}$ 、 $25.5 \mu\text{m}$ 及 $28 \mu\text{m}$, 以此来设置相应的补偿值。

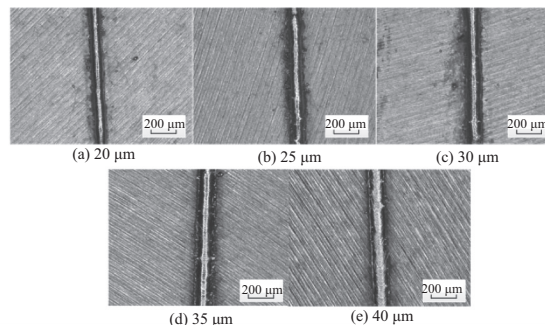


图 5 不同层厚的单道热影响区试验结果

试验结果如表 1 与表 2 所示。由表 1 可以看出,等厚分层成形下,最小层厚 $20\text{ }\mu\text{m}$ 与最大层厚 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的成形表面精度差距较大,表面粗糙度值相差约 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 。虽然最小

层厚 $20\text{ }\mu\text{m}$ 下的成形质量较好,但是分层总数明显较多,约为最大层厚的 2 倍,而成形时间增加 1 个多小时。

表 1 等厚分层成形试验结果

层厚/ μm	分层总数	成形时间/h	样件表面粗糙度/ μm	平均表面粗糙度/ μm
20	821	5.8	11.36	11.81
25	656	5.3	12.94	13.18
30	547	5.0	12.85	13.56
35	469	4.8	13.59	14.02
40	442	4.7	15.54	15.38

表 2 优化的自适应分层成形实验结果

名称	分层总数	成形时间/h	样件表面粗糙度/ μm	平均表面粗糙度/ μm
优化的自适应分层	612	5.20	11.68	11.70

而在表 2 中,由于采用优化的自适应分层算法成形,其成形质量与等厚分层中最小层厚的加工精度相当,但其加工时间与分层数量约处于等厚分层 $30\text{ }\mu\text{m}$ 左右的水平。由于本试验对象仅为天线局部,若对天线整机进行成形,则对于该试验中不同情况的加工时间差距会非常大。从上述试验数据可以得知,采用本文优化的自适应分层算法,能够在保证成形精度的前提下,减少分层厚度,提高加工效率。最终成形局部零件与表面形貌如图 6 所示。图 6(a) 为成形样件;图 6(b) 为线切割样件;图 6(c) 为放大 500 倍后的内腔微观形貌图,可以看出其表面除了迸溅点外,其余部分光滑,无凹凸点。

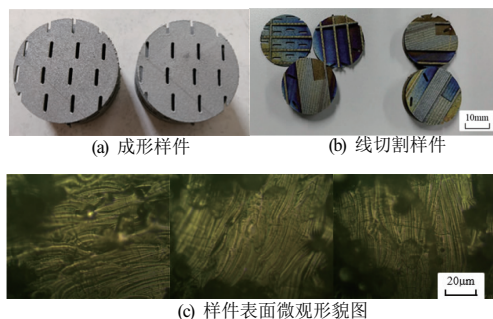


图 6 成形件及表面形貌图

3 结语

本文主要基于 SLM 成形技术,针对具有多内腔结构件的自适应分层算法进行了分析研究。通过研究发现,本文提出的优化算法能够在保证加工精度满足要求的情况下,尽可能减少分层所用时间,提高加工效率。

参考文献:

- [1] HUSON D, PARRAMAN C, WALTERS P, et al. 3D printing and colour: a multidisciplinary investigation [D]. Croatia: University of Zagreb, 2011.
- [2] VAN VAERENBERGH J. Benchmarking of SLS/SLM processes [C]. Belgium: Proceedings of the Ims Rapid Manufacturing Network Rapid Product Development Session Enabling Processes, 2005.
- [3] JAMIESON R, HACKER H. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping [J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(2): 4-12.
- [4] 罗楠, 王泉, 刘红霞. 一种快速 3D 打印分层方向确定算法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 140-146.
- [5] DOLENC A, MÄKELÄ I. Slicing procedures for layered manufacturing techniques [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(2): 119-126.
- [6] CHAKRABORTY D, CHOUDHURY A R. A semi-analytic approach for direct slicing of free form surfaces for layered manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2008, 13(4): 256-264.
- [7] CHEN K, PAN X D, CHEN D F. An adaptive slicing algorithm of rapid prototyping [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2014, 38(3): 547-551.
- [8] 郑华林, 王浩宇. 快速成型中有效保留模型特征的自适应分层方法 [J]. 应用光学, 2017, 38(5): 758-763.
- [9] 曹玄扬, 张冬云, 李丛洋. SLM 制造金属微小结构件的可行性研究 [C]. 厦门: 全国特种加工学术会议, 2015.

收稿日期: 2019-03-14