

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.013

基于改进式遗传算法的树形支撑算法

张书铭¹, 曹新雨¹, 章唐思远¹, 孙小宇², 张金柯¹, 韩小瑜¹

(1. 浙江科技大学生物与化学工程学院, 杭州 310000; 2. 浙江金兆智能装备制造有限公司, 浙江嘉兴 314213)

摘要: 在增材制造过程中, 由于零件模型的高倾角区域底部悬空, 常导致坍塌现象, 进而造成打印失败。针对这一问题, 提出了一种应用于立体光固化成型技术的树形支撑结构生成算法。该算法结合分层聚类算法与改进的遗传算法, 实现了树形支撑结构的自动化构建。同时, 为了提升 STL 文件中顶点存储的效率, 算法采用哈希算法进行顶点与三角面片之间关联的映射, 从而实现顶点与三角面片法向量的快速索引。通过对支撑区域进行二维投影网格划分, 并结合碰撞算法生成的三维支撑点, 利用改进式遗传算法的迭代优化, 获得了全局优化的树形支撑中间节点, 进而实现支撑结构的自动生成。与传统几何构建方法相比, 该算法在确保三维模型稳定打印的同时, 能够对解空间进行约束, 实现目标优化。此外, 算法在合理算法迭代次数范围内的计算效率较高, 有效降低了耗时。相较于市面上如 Materialise Magics 等国外商用软件的支撑算法, 该算法在不同复杂程度模型上可实现平均 20%~30% 的材料节省率, 具有较为明显的优化效果。

关键词: 增材制造; 树形支撑; 遗传算法; 聚类算法; 结构优化

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0092-08

Tree support algorithm based on improved genetic algorithm

ZHANG Shuming¹, CAO Xinyu¹, ZHANG Tangsiyuan¹, SUN Xiaoyu², ZHANG Jinke¹, HAN Xiaoyu¹

(1. Zhejiang University of Science and Technology, School of Biological and Chemical Engineering, Hangzhou 310000, China;

2. Zhejiang Jinzhao Intelligent Technology Co., Ltd., Jiaxing 314213, China)

Abstract : In the process of additive manufacturing, the bottom of the high inclination area of the part model is suspended, which often leads to collapse and printing failure. In order to solve this problem, a tree support structure generation algorithm applied to stereolithography technology was proposed. The algorithm combines hierarchical clustering algorithm and improved genetic algorithm to realize the automatic construction of tree support structure. At the same time, in order to improve the efficiency of vertex storage in STL files, the algorithm uses hash algorithm to map the association between vertices and triangular patches, so as to realize the fast index of normal vectors of vertices and triangular patches. By dividing the support area into two-dimensional projection grids and combining the three-dimensional support points generated by the collision algorithm, the iterative optimization of the improved genetic algorithm was used to obtain the tree-shaped support intermediate nodes with global optimization, and then the automatic generation of the support structure was realized. Compared with the traditional geometric construction method, the algorithm can constrain the solution space and achieve the goal optimization while ensuring the stable printing of the three-dimensional model. In addition, the algorithm has high computational efficiency in the range of reasonable algorithm iterations, which effectively reduces the time consumption. Compared with the support algorithms of foreign commercial software such as Materialise Magics on the market, this algorithm can achieve an average material saving rate of 20%-30% on different complexity models, and has a more obvious optimization effect.

Keywords : additive manufacturing ; tree support ; genetic algorithm ; clustering algorithm ; optimized structure

基金项目: 平湖市科技计划项目(GY202304)

通信作者: 张金柯, 高级工程师, 研究方向为含氟电子化学品开发; 韩小瑜, 教授, 研究方向为 3D 打印工艺及产品研发

收稿日期: 2024-09-07

引用格式: 张书铭, 曹新雨, 章唐思远, 等. 基于改进式遗传算法的树形支撑算法[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 92-99.

ZHANG Shuming, CAO Xinyu, ZHANG Tangsiyuan, et al. Tree support algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 92-99.

增材制造是一种快速成型技术,也被称为3D打印技术,它采用逐层堆叠材料的方法来制造物体。相比于传统的减材加工技术,3D打印技术可以直接将设计的三维模型转换为物理对象,无须制造模具或切削、铣削等加工过程。因此,3D打印技术可以用于生产各种复杂形状的零件,而且可以快速定制、迭代设计和制造出多样化的产品^[1-3]。

支撑结构是3D打印技术保证大倾角零件打印成功的关键步骤^[4]。在这些技术中,利用支撑能保证模型不会在打印过程中倒塌而造成实验失败。国内常见的支撑技术多为投影型支撑,其结构如图1所示。虽然该类型支撑能对模型起到很好的支撑效果,但其较为浪费耗材。对于复杂模型或大倾角区域较多的模型,其支撑耗材比甚至能占至全打印耗材比的50%。

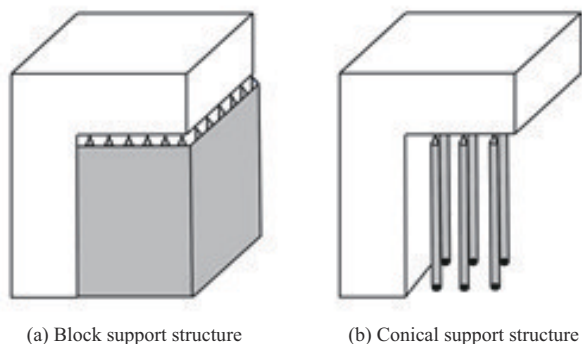


图1 投影型支撑结构

Fig. 1 Projection support structure

为解决因投影型支撑所带来的额外耗材,国内外已有许多有关3D打印的支撑技术研究,如Zhu等^[5]利用粒子群算法和贪婪算法构建具有物理约束的树形支撑;王燕宁等^[6]通过贪心算法与迭代思路构建树形支撑的伞形搜索算法,实现了局部逼近最优的树形支撑;Vanek等^[7]通过确定输入模型的最佳成型方向,以逐步建造支护结构,生成有效支撑悬挑结构的树形自支撑结构;徐文鹏等^[8]采用体素实现投影型支撑,通过体素分类提高待支撑区域识别效率;Zhang等^[9]利用分治策略提出了一种新的基于局部重心的树形支撑(LBTS)算法,利用构造的树拓扑,计算树节点的可变直径,以确保打印过程树形支撑的稳定性。国内外研究支撑的构建方式多为投影型支撑结构改善以及树形支撑的优化设计或是从模型本身出发进行拓扑优化。但在确定树形支撑中间节点时,常常利用几何方式寻找树形支撑中间节点,这种方式在应对复杂情况下效率不高且

鲁棒性较差。

为探寻在目标条件约束下的中间节点,笔者提出了一种结合改进遗传算法和分层聚类算法的树形支撑结构优化方法,以提高复杂情况下的支撑节点定位效率和鲁棒性。该方法通过全局搜索得到目标约束下的空间解集,并通过迭代优化,避免传统几何方法易陷入局部最优的问题,从而构建出适应度最高的全局最优支撑结构,特别适用于复杂模型的空间寻解

1 STL模型预处理

1.1 STL文件概述

STL文件也被称为“标准三角语言”或“标准曲面细分语言”。一个完整的STL文件记载了组成模型的所有三角形面片的法向量数据和三角面片的所在点对应坐标数据信息。

1.2 三角面片信息存取

正确的STL文件所表达的数据模型必须满足下列要求:1.每两个三角面片之间需要共享两个顶点,即包含一条公共边;2.每一个三角面片的边有且只有两个三角形面片相连,否则将不满足计算机图形学中流形的概念;3.模型必须为水密模型,同时保证模型法向量一致且连续朝外。

为存储文件信息,采用索引网格存储方式。利用哈希表存储模型顶点对应法向量及面片信息,实现高效查询,避免顶点的重复索引。

使用适用于大型数据的MurmurHash函数。与此同时,三角面片ID同样与法向量相关联,以此保证在常数时间效率内实现顶点的索引查询。最后根据上述待支撑区域悬吊面定义,筛选出三角面片法向量在垂直方向与Z轴所形成阈值角 θ 。

基于哈希关联的链式顶点存储算法的伪代码具体如下:输入为STL顶点信息(PV)和STL的法向量信息(PN),输出为Map{PV&PN}。第一步,创建Map1={PV & ID};Map2={PN & ID};第二步通过MurmurHash填充Map1和Map2的哈希ID;第三步利用生成的哈希ID进行PV到PN的映射,最后构建Map{PV & PN}。

1.3 STL文件切割

对于STL模型,设定了一种隐式切割平面算法实现对STL文件的切割,以此达到对支撑损耗的优化。算法中可以通过对隐式平面的移动旋转,得到需要的切割平面方向。在切割过后,文件会自动保

存被切割的文件并自动对切割面进行修复。图2、图3为切割面界面以及切割后的结果。

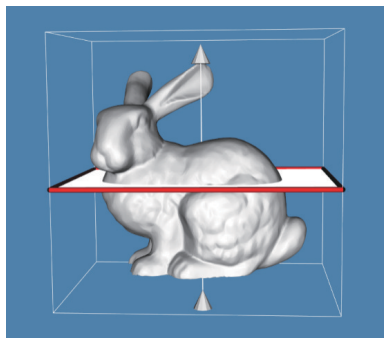
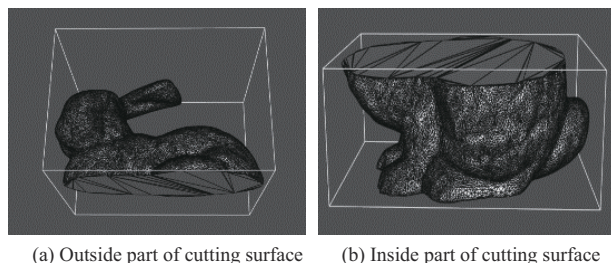


图2 隐式切割平面切割界面

Fig. 2 Implicit cutting plane cutting interface



(a) Outside part of cutting surface (b) Inside part of cutting surface

图3 隐式切割平面切割结果

Fig. 3 Cutting results of implicit cutting plane

1.4 树形支撑算法流程

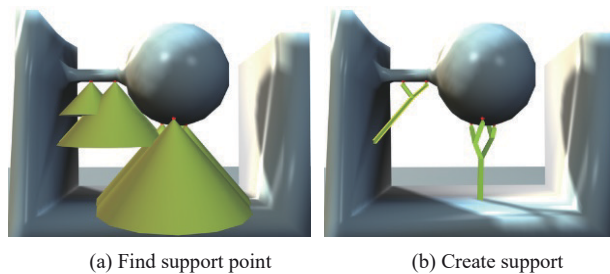
1.4.1 树形支撑概述

相较于投影类型的柱状支撑,树形支撑作为多层次支撑类型,在中小型器件的支撑效果更为优秀,但由于三维空间内树形支撑节点的确定在数学理论模型上需要考虑多优化目标如树形节点的确定,最短树形枝干构建,所构建树形支撑的稳固度以及易剥离程度等,这些问题导致树形支撑的构建至少是NP难问题^[7],也就是难以在多项式时间内求解的问题。

为提高树形支撑节点搜索的鲁棒性,同时减少在实际打印过程中的打印耗时与打印耗材,提出了一种基于遗传算法的树形支撑节点搜索算法,通过模拟自然界中生物进化过程,来进行全局支撑节点的搜索优化,以形成全局较优的树形支撑。同时,利用了球形辅助算法对树形支撑中间节点进行了辅助优化,增强树形支撑的稳定性。传统几何方式构建树形支撑仿真如图4所示。

1.4.2 算法流程图

为得到完整树形支撑结构,设计了如下算法流程,具体如图5所示。



(a) Find support point (b) Create support

图4 传统几何方式构建树形支撑图

Fig. 4 Tree support diagram constructed by traditional geometric method

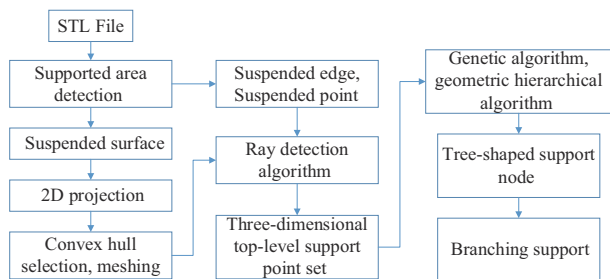


图5 树形支撑算法流程图

Fig. 5 Flow chart of tree support algorithm

树形支撑算法具体流程如下。

第1步:读取输入的 STL 文件并显示,进行旋转,切割操作。

第2步:识别预处理之后的模型的待支撑区域,如悬吊点,悬吊边,悬吊面等。

第3步:对待支撑区域进行二维投影,实现二维凸包构建以及区域网格划分,得到二维支撑点集。

第4步:利用射线-碰撞检测算法得到三维待支撑点集并进行特征划分。

第5步:对树形特征支撑点进行分层聚类算法以及改进式遗传算法,以生成树形支撑中间节点;对柱形特征支撑点进行投影式构建。

第6步:对最终支撑点集构建优化式支撑结构,并输出支撑 STL 文件,同时显示支撑与模型信息。

2 支撑区域检测及支撑点构建

2.1 支撑区域类型

待支撑区域的确定为支撑生成算法中的重要一步,在三维仿真界面,需要形成支撑的区域通常如图6所示,这种三维区域往往具备一系列特征^[10]。

(1)支撑区域所在三角面片在垂直方向上与 z 轴夹角处于一定的临界角范围 θ 内,这种三角面片所在区域被称为悬吊面区域。

(2)支撑区域为某个悬空的悬吊点,这种在吊点的特征往往低于其所连接的所有三角面片节点坐标值。

(3)支撑区域为某个悬空的悬吊线,这种悬吊线的特征为由两个三角面片连接起来构成的悬空区域,该线所在法向量往往为构成该线的两个端点所在法向量的平均值。

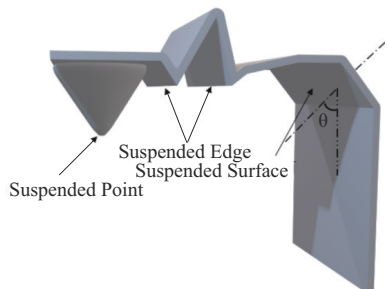


图6 待支撑区域仿真

Fig. 6 Simulation of support area

算法确定三维模型支撑面投影模拟图如图7所示:

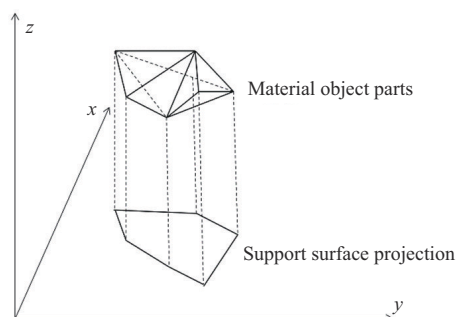


图7 待支撑区域模拟投影

Fig. 7 Simulated projection of area to be supported

由于实际光固化打印中,会因为模型因素,打印机参数因素以及温度因素导致模型器件对应临界角 θ 发生变化^[11]。因此本算法在默认参数(支撑扫描速率3 000/ms,填充速率5 000/ms,扫描间距0.14 mm)的情况下,选用刚性白色光敏树脂作为光固化3D打印原料,发现临界角达到45°或更高时,实验对象发生翘曲形变。因此,将临界角定为45°,以供后续算法开发。

2.2 自适应区域布点

在确定二维投影的待支撑区域后,通过确定待支撑区域的二维凸包,通过公式(1)和(2)构建以二维凸包为区域的网格,用户根据凸包投影大小输入网格值,以生成自适应二维支撑点集。

$$x_{\text{range}} = \text{len}(x) / \frac{\text{area}}{n} \quad (1)$$

$$y_{\text{range}} = \text{len}(y) / \frac{\text{area}}{n} \quad (2)$$

式中: $x_{\text{range}}, y_{\text{range}}$ 代表模型在 x, y 方向的范围,

area 是模型投影的网格面积, n 是网格的切分数量。

图8为实体零件斯坦福兔在临界角 θ 为45°的情况下所得到的二维待支撑区域平面以及以网格大小 $n=12$ 时得到支撑点集。

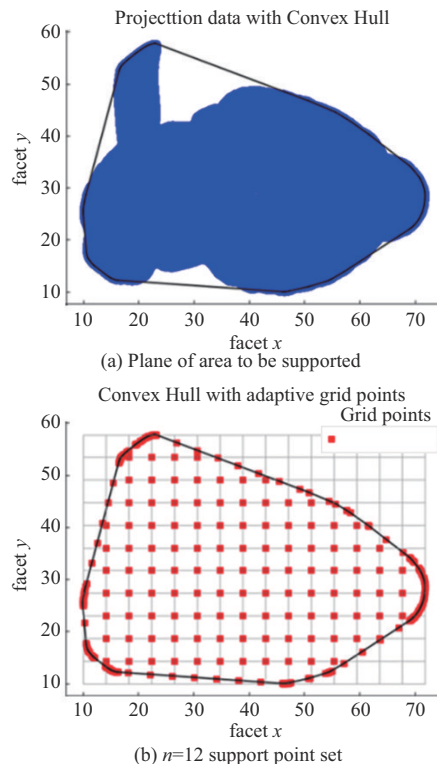


图8 二维支撑布点图

Fig. 8 Two-dimensional support layout

2.3 支撑点集构建

在得到支撑点二维点集与悬吊点、悬吊线的点集信息后,通过 Möller-Trumbore 碰撞检测算法^[12]实现对于三维支撑点集的构建,通过联立三维平面内射线公式与三角形任意一点公式,见式(3)~式(5)。

$$P = (1 - u - v)A - uB - vC \quad (3)$$

$$r(t) = O + td, 0 \leq t \leq \infty \quad (4)$$

$$t = \frac{S \cdot E_2}{E_1 \cdot S_1}, u = \frac{S_1 \cdot S}{E_1 \cdot S}, v = \frac{S_1 \cdot d}{E_1 \cdot S_1} \quad (5)$$

$$(t > 0, u + v \leq 1, u \geq 0, v < 1)$$

式中: A, B, C 是平面内的三个顶点; u, v 描述点 P 在平面内的位置; O 是射线的起点; d 是射线的方向向量; t 定义了射线上的点。

2.4 分层聚类算法

在得到三维支撑点集后,为防止多层级树形支撑在节点搜寻过程中出现模型与支撑之间交叉的现象^[15]。通过带约束的K值聚类算法将树形支撑顶层节点进行分层处理,并通过约束自动确定最佳分

簇结果。具体约束如下:①高度差:每个聚类的高度的最大绝对差值与平均高度的差值。高度差越大,表明聚类结果的高度变化越大。②距离差:每个聚类的中心到参数点的平均距离的最大绝对差值与平均距离的差值。距离差越大,表明聚类结果的形状变化越大。通过这两个约束条件,得到一个综合变化的约束指标,如果当前聚类数量导致的变化程度大于历史最高值,则更新最佳聚类数量,最终返回最佳聚类结果。图9为测试模型bunny在得到三维顶层支撑点后的分层聚类结果。

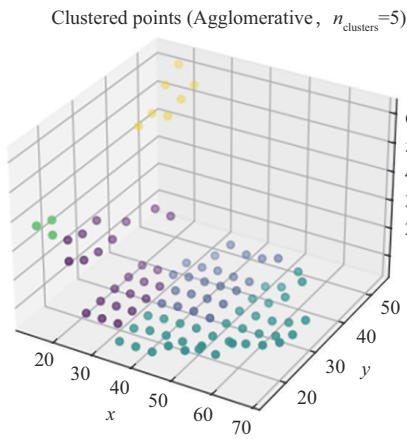


图9 分层聚类示例

Fig. 9 Hierarchical clustering example

2.5 基于遗传算法的下层节点搜寻

遗传算法是通过一种基于生物进化原理的搜索算法,通过模拟生物进化过程,通过选择交叉和变异,不断优化种群中的解集,来寻找多问题规模约束条件下的全局较优解集^[13-14]。同时由于遗传算法可以在整个搜索空间中进行搜索,因此可以避免陷入局部最优解。图10展示了遗传算法设计流程。

改进式遗传算法流程如下:

第1步:获取树形支撑顶层点集 P ,利用贪心算法寻找当前节点 P_i 的欧氏距离最近点 $P_j(i \neq j)$,将两点作为参数点 P_1, P_2 ;

第2步:判断参数点 P_1, P_2 投影圆位置关系,其中两圆半径需要通过临界角 θ 确定,如果相离,代表当前参数点不能产生临界角约束下的初始化种群,返回空值并结束,如果不是,进行第3步;

第3步:通过投影圆位置关系(相交,相切,包含)确定初始化种群生成范围,并随机生成初始化种群 T ,为加快遗传算法快速收敛,笔者采用实值编码;

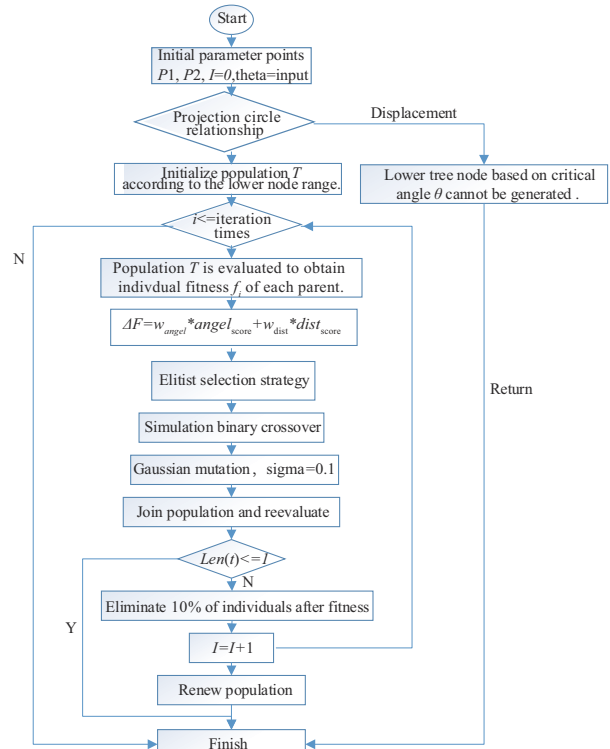


图10 遗传算法设计流程

Fig.10 Genetic algorithm design process

第4步:开始迭代,通过确定的适应度函数 Δf ,确定种群的适应度评估,其中 Δf 公式如式(6)所示:

$$\text{fitness} = w_{\text{dist}} \cdot \frac{1}{1+d} + w_{\text{angle}} \cdot \frac{\cos(\alpha_1 - \theta) + \cos(\alpha_2 - \theta)}{2} \quad (6)$$

第5步:在进行适应度评估过后,通过精英保留策略,选择个体适应度前10%的个体作为父代进行仿真二进制交叉(SBX),判断当前种群数量,如果 $T \leq 1$,则停止循环并返回当前个体适应度及坐标,如果不是,进行第6步;

第6步:为保证种群多样性,对生成的子代个体进行一定程度的高斯变异,变异率设定为0.1,并将变异个体加入种群,如果当前迭代值 $i >$ 最大迭代次数 num_iters ,则停止迭代,并输出当前种群最高适应度个体坐标,如果不是,则返回第4步,直到循环结束。

对目标函数及遗传算子细节进行详细说明。

目标函数:为探寻连续解空间以寻找当前参数点最合适的全局最优解,设定改进式的目标函数编写。(1)当前解与参数点所连接线在垂直方向上的夹角与临界角 θ 的关系,加权设定为0.6。(2)当前解与参数点所连接线的欧式距离和,加权设定为0.4。

通过设定该目标函数,能使得解空间往临界角 θ 的方向优化,同时还能约束两解之间的距离。

编码:由于种群处于三维状态情况下,为保证遗传迭代过程中的快速收敛,本文算法(ETS)采用实值编码,也就是直接使用坐标作为染色体编码,以此保证搜索空间的连续性。

选择、交叉、变异:通过初代按照一定比例所选择出的适应度高的个体,进行精英选择策略,通过选择适应度高的个体,以保证种群适应度的优秀性,在交叉方式中,选择仿真二进制交叉,通过控制交叉强度 η 保持父代的组合优势,以保留大部分父代优秀基因,最后通过高斯变异实现对交叉后个体的微小变异,增加种群多样性同时增加解的搜索空间。经过一定数目迭代,输出最后种群中适应度最高的个体,并将此作为当前参数点的下层节点。

表1为详细的算法参数,图11为传统GA算法^[15](无淘汰、随机选择、单点交叉、随机变异)与本文改进式GA算法(GA_{tree})某一个体适应度进化对比图。

表1 GA_{tree} 算法参数

Tab. 1 GA_{tree} algorithm parameters

Parameter	Numerical value
Iteration times	100
Initial population size	1 000
Chiasma intensity	$\eta = 20$
Sigma	0.1
Tolerability	30

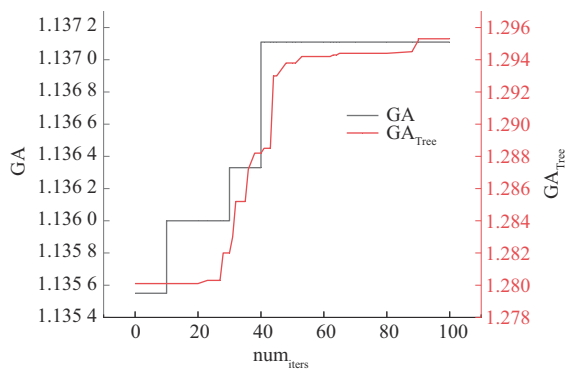


图11 个体适应度对比图

Fig. 11 Comparison diagram of individual fitness

实验中发现,未经目标函数约束下的GA算法,会过早收敛,导致种群不再变化,因此,多个子目标优化式目标函数约束是必要的。

图12为不同适应度个体的评估情况,其中 $P1$, $P2$ 分别为两个树形支撑顶层节点, $P3$, $P4$, $P5$ 分别为种群中的个体,其中 $P4$ 处于临界角约束条件下的

OMN区域内,为适应度高的个体,其余个体会因为高度小于 $0(P5)$,与参数角所形成角度大于临界角 θ ,导致打印过程会坍塌($P3$),此二者都为适应度低个体,在迭代过程中会被淘汰。

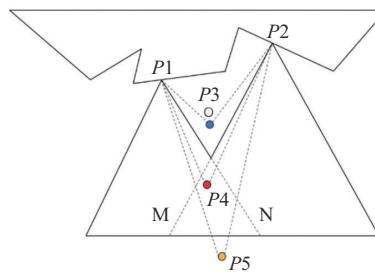


图12 不同适应度个体情况

Fig. 12 Individuals with different fitness

3 树形支撑构建及优化

在得到树形支撑的支撑节点后,需要根据STL文件形式构建合法的树形支撑。通过构建具有六棱柱形态的树形支撑(图13),以达到对于待支撑面的支持作用,为保证树形支撑稳定性,根据遗传算法每层迭代结果得到的节点层值,进行不同的加固处理^[16],如图14所示。在实际光固化增材制造过程中,树形支撑在对带有凸台结构的层间支撑稳定性不佳且难以去除,为加强层间支撑结构,通过投

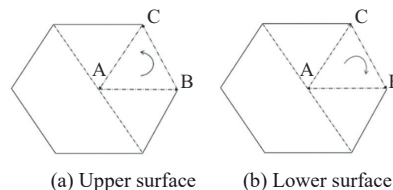


图13 棱柱型支撑连接示意图

Fig. 13 Schematic diagram of prismatic support connection

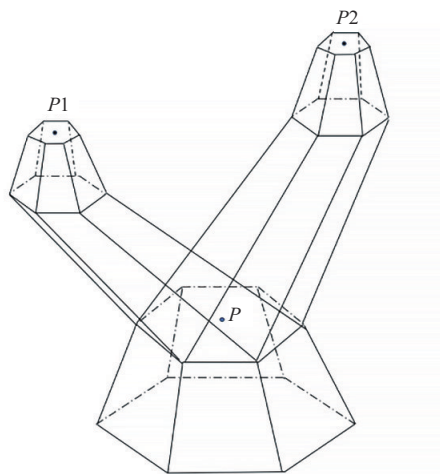


图14 树形支撑构建示意图

Fig. 14 Tree-shaped support construction diagram

影类型的柱形支撑与树形支撑相结合,实现了具有稳定结构的支撑效果,图15为二维平面下双支撑结合效果。

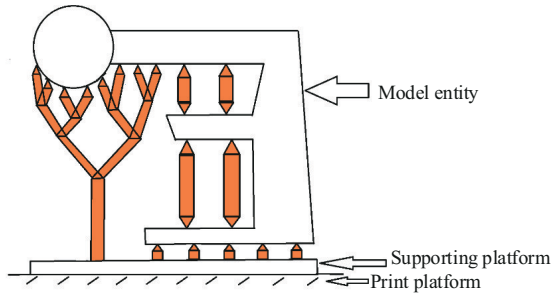


图15 双支撑效果图

Fig. 15 Double support effect diagram

4 实例分析

本算法基于Python 3.10进行代码编写,表2为实验模型参数,表3和表4展示了相同模型情况下,本文算法(ETS)与Materialise Magics软件对于不同数量级模型的支撑添加对比:

表2 实验模型参数

Tab. 2 Experimental model parameters

Part name(STL)	Number of facets	Volume/mm ³
Table lamp	7 451	2 939.818
Bunny	84 847	27 084.257
Pikachu	406 241	12 053.993

表3 实验结果对比(体积)

Tab. 3 Comparison of experimental results (volume)

Part name (STL)	Proposed algorithm	Magics algorithm	Saving material rate/%
Bunny	789.429	1 061.073	25.60
Table lamp	216.289	312.619	30.83
Pikachu	572.991	736.679	22.21

表4 实验结果对比(时间)

Tab. 4 Comparison of experimental results (time)

Part name (STL)	Magics algorithm	10 times	50 times	100 times	200 times
Bunny	3.86	1.21	1.98	2.33	4.11
Table lamp	1.33	0.21	0.58	0.92	1.71
Pikachu	2.42	0.83	1.92	2.62	3.87

实验结果显示,对于不同复杂度模型,节省材料比例分别为25.60%,30.83%,22.21%,综合省料率在26.21%,可以发现,算法对于面片数量级较小的模型执行效率较高,而实际实验时,平均省料率也在20%~30%区间,符合预估。此外,从时间效率上看,进化算法的优势得以体现,算法能够保证支撑体积的快速收敛,在100代取得了理想的结果。具体产品打印效果如图16所示。



图16 实际打印成品对比图[Magcis算法(左),ETS算法(右)]

Fig. 16 Actual printed product comparison map

[Magcis algorithm(left), ETS algorithm(right)]

5 结论

针对增材制造领域树形支撑中间节点构建方式较单一的问题,通过构建一种基于遗传算法与分层聚类算法的树形支撑算法,实现对于STL模型的悬吊区域的支撑添加,同时对于模型层间带凸台结构使用了柱形投影支撑,并对支撑与模型的接触面进行了细顶优化与接触面优化,以便后处理打磨使用。同时,通过设定多个子目标使得解空间在约束条件下得以不断优化,使得算法在寻找下层支撑点时不再依赖传统几何公式构建下层支撑点,增强了鲁棒性。实验证明,相较于Materialise Magics软件,平均模型支撑耗材可节省25%左右。

参考文献

- [1] GAO W, ZHANG Y, RAMANUJAN D, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering[J]. Computer-aided Design, 2015, 69:65-89.
- [2] QUAN H, ZHANG T, XU H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. Bioactive Materials, 2020, 5(1): 110-115.
- [3] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.
- [4] JIANG J, XU X, STRINGER J. Support structures for additive manufacturing: A review[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018, 2(4). DOI: 10.3390/jmmp2040064.
- [5] ZHU L, FENG R, LI X, et al. A tree-shaped support structure for additive manufacturing generated by using a hybrid of particle swarm optimization and greedy algorithm[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2019, 19(4). DOI:

- 10.1115/1.4043530.
- [6] 王燕宁,张李超,陈森昌,等.基于伞形搜索的树形支撑结构生成算法[J].计算机集成制造系统,2018,24(11):2 819–2 826.
- WANG Yanning, ZHANG Lichao, CHEN Senchang, et al. Tree support structure generation algorithm based on umbrella search [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(11): 2 819–2 826.
- [7] VANEK J, GALICIA J A G, BENES B. Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication[C]. Computer graphics forum, 2014, 33(5):117–125.
- [8] 徐文鹏,苗龙涛,侯守明,等.基于体素模型的3D打印支撑算法[J].图学学报,2018,39(2):228–234.
- XU Wenpeng, MIAO Longtao, HOU Shouming, et al. 3D printing support algorithm based on voxel model[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(2):228–234.
- [9] ZHANG N, ZHANG L C, CHEN Y, et al. Local barycenter based efficient tree-support generation for 3D printing[J]. Computer-Aided Design, 2019, 115:277–292.
- [10] GUO H, XU J, ZHANG S. et al. Multi-orientation optimization of complex parts based on model segmentation in additive manufacturing[J]. Mech Sci Technol, 2023. 37:317–331.
- [11] DAS P, CHANDRAN R, SAMANT R, et al. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1:343–354.
- [12] MÖLLER T, TRUMBORE B. Fast, minimum storage ray/triangle intersection[M]//New York, USA, Association for Computing Machinery, 2005.
- [13] GAO Y, WU L, YAN D M, et al. Near support-free multi-directional 3D printing via global-optimal decomposition[J]. Graphical Models, 2019, 104. DOI: 10.1016/j.gmod.2019.101034.
- [14] FENG R, LI X, ZHU L, et al. An improved two-level support structure for extrusion-based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 34(2):997–1 006.
- [15] FENG R, JIANG J, SUN Z, et al. A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for reducing material waste in extrusion-based additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, 27(10):1 872–1 885.
- [16] WANG Z, ZHANG Y, TAN S, et al. Support point determination for support structure design in additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47. DOI:10.1016/j.addma.2021.102341.
-
- (上接第 70 页)
- [17] XU Changan, LU Mangeng, TAN Zhiyou, et al. Study on the surface properties and thermal stability of polysiloxane-based polyurethane elastomers with aliphatic and aromatic diisocyanate structures[J]. Colloid and Polymer Science, 2020, 298(9):1 215–1 226.
- [18] XIE An, MAO Shenwei, CHEN Tianjiang, et al. Microstructure and properties of cerium oxide/polyurethane elastomer composites [J]. Rare Metals, 2021, 40(12):3 685–3 693.
- [19] 孙屹亭. 环氧环己烷二酯二醇改性PET的制备及其结晶性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
- SUN Yiting. Preparation of epoxycyclohexane diol glycol modified pet and its crystallinity[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [20] 宋文生, 张琳, 邓英丽, 等. MDI基热塑性聚酯型聚氨酯弹性体性能的研究[J]. 弹性体, 2011, 21(2):16–19.
- SONG Wensheng, ZHANG Lin, DENG Yingli, et al. Study on the properties of MDI-based thermoplastic polyester polyurethane elastomer[J]. Elastomer, 2011, 21(2):16–19.
- [21] ISKENDER Y, TUGBA E, SEVILAY B, et al. Influence of soft segment molecular weight on the mechanical hysteresis and set behavior of silicone-urea copolymers with low hard segment contents[J]. Polymer, 2011, 52(2):266–274.
- [22] HE Yong, XIE Delong, ZHANG Xinya. The structure, microphase-separated morphology, and property of polyurethanes and polyureas[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(21): 7 339–7 352.
- [23] NOZAKI S, MASUDA S, KAMITANI K, et al. Superior properties of polyurethane elastomers synthesized with aliphatic diisocyanate bearing a symmetric structure[J]. Macromolecules, 2017, 50(3):1 008–1 015.
- [24] GARRETT J T, RUNT J, LIN J S. Microphase separation of segmented poly(urethane urea) block copolymers[J]. Macromolecules, 2000, 33(17):6 353–6 359.
- [25] CHEN Kai, LIU Ruowang, ZOU Chao, et al. Linear polyurethane ionomers as solid-solid phase change materials for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 130:466–473.