

激光选区熔化工艺晶格支撑结构快速建模

郑晓龙¹, 刘 远¹, 郑国磊¹, 周 敏²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 针对激光选区熔化成型工艺中的支撑结构, 提出一种晶格单元自动填充生成支撑的快速建模方法。首先, 分别对两种典型晶格支撑结构——杆架结构和孔隙结构的组成单元实现参数化造型, 并建立支撑结构数字化模型; 其次, 设计实现杆件单元和孔隙单元的造型算法; 最后, 提出一种单元自然生长算法, 实现对支撑空间快速填充。实例结果表明, 晶格结构可以对不同类型金属产品结构实现有效稳定支撑; 相比实体材料, 平均可以节省 72% 的材料用量, 具有重要的工程意义。

关 键 词: 激光选区熔化; 支撑结构; 晶格结构; 数字化建模

中图分类号: V 262.3

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2018050879

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2018)05-0879-07

Rapid Modeling of Lattice Support Structures for Selective Laser Melting

ZHENG Xiaolong¹, LIU Yuan¹, ZHENG Guolei¹, ZHOU Min²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aimed at the support structures in laser selective melting, a rapid modeling method is proposed that the lattice cells can be automatically filled to generate support structures. First of all, the parameterized modeling is applied on the units of two typical lattice support structures-struss structures and porous structures, and the digitalized model of the support structures is established. Secondly, the design and implementation are made on the modeling algorithm of struss and porous unit. Finally, a rapid filling for supporting spaces is realized through a cell natural growth algorithm. The results of the examples show that the lattice structure can provide effective and stable support for different types of structures. Compared with the solid materials, lattice structure's material consumption can be saved by 72% on average, which has an important engineering significance.

Keywords: selective laser melting; support structures; lattice structures; digital modeling

激光选区熔化(selective laser melting, SLM)^[1]成型区别于传统减材制造, 是指依据产品三维 CAD 模型, 对其进行切片分层来获取截面数据, 利用高能量激光束选择性地熔化各层金属粉末材料, 逐步堆叠成三维产品的数字化制造技术。支撑结构^[2-3]作为一种用于承接熔固粉末层、限制变形、控制定位精度以及固定已成型部分制件的

工艺结构, 具有重要的研究意义。国内外学者均对支撑结构建模与优化进行了相关研究。陈岩等^[4]针对熔融沉积(fused deposition modeling, FDM)三维打印, 设计了一种能够自动寻找并添加支撑杆的方法, 此外还调整了支撑杆连接结构以便于去除; VANEK 等^[5]提出了一种优化产品放置方向和支撑点的算法, 来达到节省支撑材料和制作时间的

收稿日期: 2017-11-15; 定稿日期: 2018-01-29

第一作者: 郑晓龙(1994-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生。主要研究方向为数字化建模与晶格结构建模。E-mail: xlzheng@buaa.edu.cn

通信作者: 郑国磊(1964-), 男, 福建莆田人, 教授, 博士。主要研究方向为数字化建模与智能 CAD 理论及技术等。E-mail: zhengguolei@buaa.edu.cn

目的; MIRZENDEHDEL 和 SURESH^[6]结合拓扑优化, 引入拓扑分布规则约束支撑的设计, 最终达到减少产品支撑结构的目标。然而, 现有成熟支撑方案多为孤立柱状结构; 此外, 现有研究主要针对 FDM 成型工艺, 而以 SLM 为代表的金属成型与其相比有 3 个显著区别^[7-8]: ①金属粉末熔融要求更高成型温度, 由散热不均引起的应力变形更明显; ②金属制件有较大的重量, 对于支撑稳定性要求更高; ③金属粉末价格昂贵, 应尽可能减少材料用量。而孤立柱状结构不利于散热, 容易引起较大应力变形, 对于悬垂几何特征需要大量支撑才能满足要求, 所以其不适用于 SLM 成型。

针对 SLM 工艺支撑结构问题, HUSSEIN 等^[9]首次设计并用实验论证了在 SLM 成型中, 运用晶格结构实现支撑作用的可行性, 晶格结构具有内部中空、表面积小、较高的强度重量比、利于传热等特点, 周期性分布可生成理想的支撑结构。此后 HUSSEIN 等^[10]在进一步实验研究中指出, 通过设计不同晶格结构, 能够节省多达 92% 的打印材料和时间, 实验表明这样稀疏的晶格结构也非常容易去除。但是该方法是基于隐式三角周期函数建模, 只能针对特定的孔隙晶格, 无法生成杆架或更复杂的晶格单元, 存在一定的局限性。CALIGNANO^[11]运用参数化方法对晶格结构建模, 并运用田口实验法, 得到晶格结构的最优化参数。VAIDYA 和 ANAND^[12]构造了八面体和菱形十二面体晶格单元, 结合 Dijkstra 最短路径算法生成优化的支撑结构。

针对上述问题, 本文选择可以适应不同形状结构的晶格结构作为支撑。首先构造了两种类型晶格单元, 并实现其参数化造型, 最后基于仿生自然思想, 设计单元自然生长算法, 完成支撑结构快速建模。

1 晶格支撑结构表示模型

1.1 晶格支撑结构及其组成单元

支撑结构有 3 个方面的设计要求^[13]。首先, 支撑需具有高强度与稳定性, 以确保其自身和其所支撑的零件不会发生变形。若支撑与零件或工作台的结合强度不够, 或支撑本身的层间结合力小于支撑内部作用力, 就会引起支撑结构层间变形; 而支撑结构稳定性不足, 直接导致在成型过程中, 支撑的变形或位置偏移。其次, 在满足支撑功能的条件下, 尽可能减少支撑体积, 多余的支撑意味着额外的材

料、制造时间和后处理任务。最后, 支撑要具有易去性, 支撑结构在零件制作完成后, 要与原型零件进行分离。支撑的易去性与支撑和零件的粘结程度有关, 在设计支撑时, 应当尽量减少彼此之间的接触面积。

为满足支撑的设计要求, 如图 1 所示, 典型晶格支撑结构可分为两种: ①杆架结构, 多由细长圆柱杆件相互交叉连接形成的空间网状结构; ②孔隙结构, 为实体及分布在其中的大量孔隙构成的多面体结构。无论杆架结构或孔隙结构, 均可看成是由不同形式的晶格单元及其变形的空间组合而成。常见的晶格单元及其参数化定义见表 1, 分为杆件和孔隙两类单元。其中, O 为晶格单元的建模基准点, 坐标系 $OXYZ$ 为晶格单元建模坐标系, 二者共同确定一个单元的空间位置。

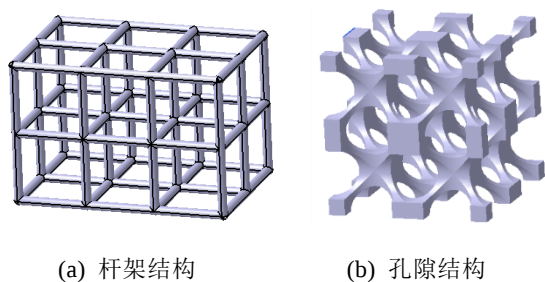


图 1 典型晶格支撑结构

1.2 晶格支撑结构数字化模型

据上述分析, 一个支撑结构 S 可形式化定义为

$$S(R, C) \quad (1)$$

其中, $R = \{r_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 为 S 中各个单元的定位与组合方式(简称定组方式); $C = \{u_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为构成 S 的相关单元类型。 S 中一个单元的定组方式 r 定义为

$$r(l_u(o_u, v_{u,1}, v_{u,2}), t_u, a_u) \quad (2)$$

其中, $l_u(o_u, v_{u,1}, v_{u,2})$ 为 u 在 S 中组合基准, 用于确定单元的空间位置和方向, 包含一个位置 o_u 和两个不重合方向 $v_{u,1}$ 和 $v_{u,2}$ ($v_{u,1}$ 和 $v_{u,2}$ 均为单位方向矢量); t_u 为某个晶格单元 u 的标识; a_u 为 u 在 S 中的组合方式, 如添加、去除和定位等形式, 对应分别用 1、-1、0 表示。晶格单元 u 的参数化定义形式为

$$u = (t, P(p_1, p_2, \dots, p_k)) \quad (3)$$

其中, t 为 u 的类型标识; $p_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 为 u 的一系列定义参数, 1.1 节中定义晶格单元及其参数见表 2。

表 1 晶格单元参数化表示

单元类型		杆件单元		
类型标识		Cube(立方体)	Tetrahedron(四面体)	Octahedron(八面体)
参数化表示				

单元类型		孔隙单元		
类型标识		Porosity-1	Porosity-2	Porosity-3
参数化表示				

表 2 晶格单元参数表

类型标识(t)	参数(P)
Cube	(l, d)
Tetrahedron	(l, d)
Octahedron	(l, d)
Porosity-1	(l, d, D)
Porosity-2	(l, D, D ₁)
Porosity-3	(l, d)

支撑结构 S 的表示模型如图 2 所示, 其中“方形”结点代表支撑结构及其组成单元, “圆形”结点表示各个定组方式。这是一个三级层次结构, 其中顶层为根, 表示总体支撑结构; 中层为各组成晶格单元的定组方式; 底层为未被定位和组合的所有晶格单元类型。支撑结构直接由多个定组方式构成, 同时每个定组方式有且只能指向一个类型晶格单元, 但同一类型晶格单元可具有多个定组方式, 如图 2 中 u_2 有 r_2 、 r_3 、 r_5 等 3 个定组方式。

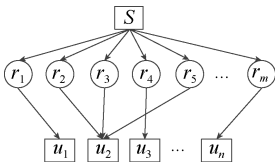


图 2 支撑结构表示模型

2 快速建模算法

2.1 支撑结构设计流程

基于晶格支撑结构及其单元表示模型, 提出

SLM 工艺支撑结构的快速建模方法, 图 3 为总体设计流程。

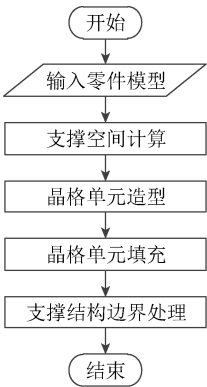


图 3 支撑结构快速建模流程

(1) 输入零件模型。在三维空间中输入零件模型。根据零件结构特点, 按照从下到上打印材料用量总体最少的原则选择零件空间放置方位, 以达到尽可能减少支撑结构的目的。

(2) 支撑空间计算。支撑空间即为晶格单元填充形成支撑结构的范围。确定零件空间位置及方向后, 选择模型中悬空结构特征作为支撑元素, 对支撑元素沿着打印方向向下投影得到各投影面。每个支撑元素与对应投影面分别作为上、下底面形成柱状空间, 用关系式 $f(x, y, z)$ 来表示一个柱状空间, 所有支撑元素投影得到的柱状空间即为支撑空间, 即 $\Omega_v = \{(x, y, z) | f_1(x, y, z), \dots, f_n(x, y, z)\}$ 。

(3) 晶格单元造型。根据支撑结构中类型要求, 对 $C = \{u_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 中晶格单元进行造型建模。

(4) 晶格单元填充。即在给定初始单元的前提

下,用晶格单元致密填充整个支撑空间。在此选择并设计一种模仿自然界细胞生长的方式,逐层向外自动填充,详细算法见单元自然生长算法。

(5) 支撑结构边界处理。为满足支撑易去除以及材料用量少等要求,在填充完成后,对支撑结构的边界以及与零件接触部分进行裁切等处理。

2.2 关键技术

2.2.1 晶格单元造型算法

对应两种支撑结构类型,杆件单元和孔隙单元分别采用不同的造型算法。

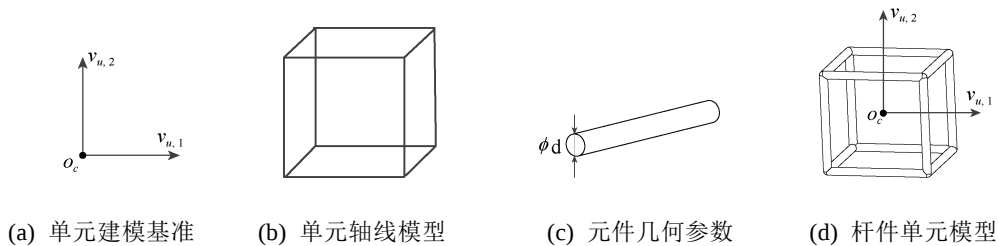


图4 杆件单元模型参数分解

杆件单元造型算法如图5所示,主要步骤分为:

步骤 1. 构造晶格单元轴线模型。首先提取建立单元建模基准,根据选定单元类型的参数化定义,计算轴线模型中所有端点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$,依次连接各线元的起点和终点。线元 l_u^i 及其端点组成单元轴线模型 A_u 。

步骤 2. 元件生成。依次遍历轴线模型中所有线元 l_u^i ,在每个线元基础上生成圆柱形元件。

步骤 3. 接头处理。杆件单元生成元件后,各元件接头处有交叉重叠定义的部分,需进行接头处理。

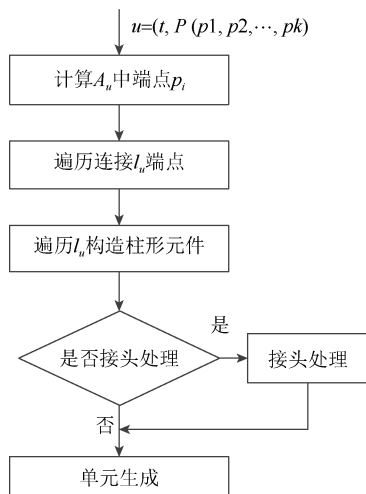


图5 杆件单元造型算法

(1) 杆件单元。如图4所示,杆件单元参数信息分为3部分:①单元基准,包含一个基准位置 o_u 和两个不重合方向 $v_{u,1}$ 、 $v_{u,2}$;②单元轴线模型,杆件单元所有构成杆件的轴线为轴线模型,可以表示为 $A_u = \{l_u^i | i=1,2,\dots,m\}$,其中 l_u^i 为构成轴线模型的直线段,称为线元,其由两个端点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 连接而成;③元件几何参数,在每条轴线基础上生成对应的实体为元件,杆件单元中元件均为圆柱体,参数包括圆柱截面直径 d 。

(2) 孔隙单元。孔隙单元参数信息分为两个部分:①单元基准,与杆件单元表示意义相同;②体素表示及运算,先构造立方体基体素,而后构造不同体素并进行布尔运算。

如图6所示,体素 V_u 表示为

$$V_u = (<\text{体素类型}>, <\text{运算类型}>, <\text{参数1}>, <\text{参数2}>, \dots, <\text{参数n}>) \quad (4)$$

其中,体素类型为 Cube(立方体)、Cylinder(圆柱)、Sphere(球体);运算类型为 Intersection(交)、Union(并)、Difference(差);参数表根据不同体素类型确定;特别的, V_0 为基体素。

孔隙结构单元造型流程包括:①构造基体素,提取建立单元建模基准,根据定义构造基体素;②体素生成及运算,依次遍历输入参数中,依据体素参数定义构造体素并进行运算。

2.2.2 单元自然生长算法

单元自然生长算法原理为模仿自然界细胞生长方式,以初始单元作为母细胞,逐层依次向外扩展填充单元。

结合该算法,通过输入:初始单元基准点 O_0 ,初始单元空间方向 $v_{u,1}$ 、 $v_{u,2}$, $C = \{u_i | i=1,2,\dots,n\}$,支撑空间 Ω_v ;即可快速、自动输出支撑结构 $S(R, C)$ 。其算法策略为:在生长算法中,当前填充层单元表示为 $\{u_n^i | i=1,2,\dots,k_n\}$, k_n 为单元数。

首先依次遍历 u_n^i , 由式(5)计算得到 u_n^i 的所有相邻单元基准点 $\{O_{n,i}^j\} (j=1,2,\dots,k_i)$, 并判断 $O_{n,i}^j$ 是否位于支撑空间内 Ω_V , 若是, 引用并生成对应晶格单元 $u_{n,i}^j$, 并将其存入下一层单元 $\{u_{n+1}^i\}$ 中。之后循环遍历下一填充层单元 $\{u_{n+1}^i\}$ 作为当前填充层单元, 当某一填充层单元的所有相邻单元都位于支撑空间 Ω_V 外时, 支撑空间填充完成。

$$O_{n,i}^j = \begin{cases} O_n^i \pm d \cdot \mathbf{v}_{u,1} \\ O_n^i \pm d \cdot \mathbf{v}_{u,2} \\ O_n^i \pm d \cdot (\mathbf{v}_{u,1} \times \mathbf{v}_{u,2}) \end{cases} \quad (5)$$

以平面区域填充为例说明, 将第 3 层单元 $\{u_3^1, u_3^2, u_3^3, u_3^4, u_3^5, u_3^6\}$ 作为当前层进行遍历填充完成第 4 层单元 $\{u_4^1, u_4^2, u_4^3, u_4^4, u_4^5, u_4^6\}$ 的过程如图 7 所示。

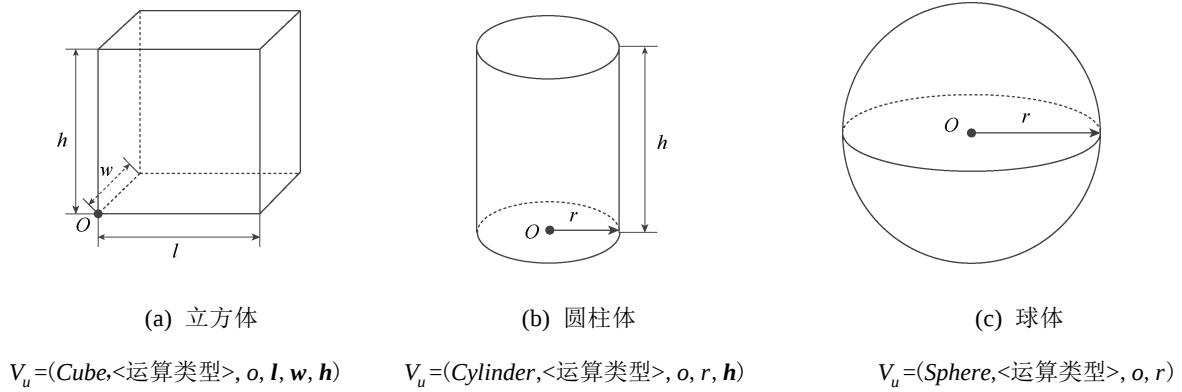


图6 体素表示

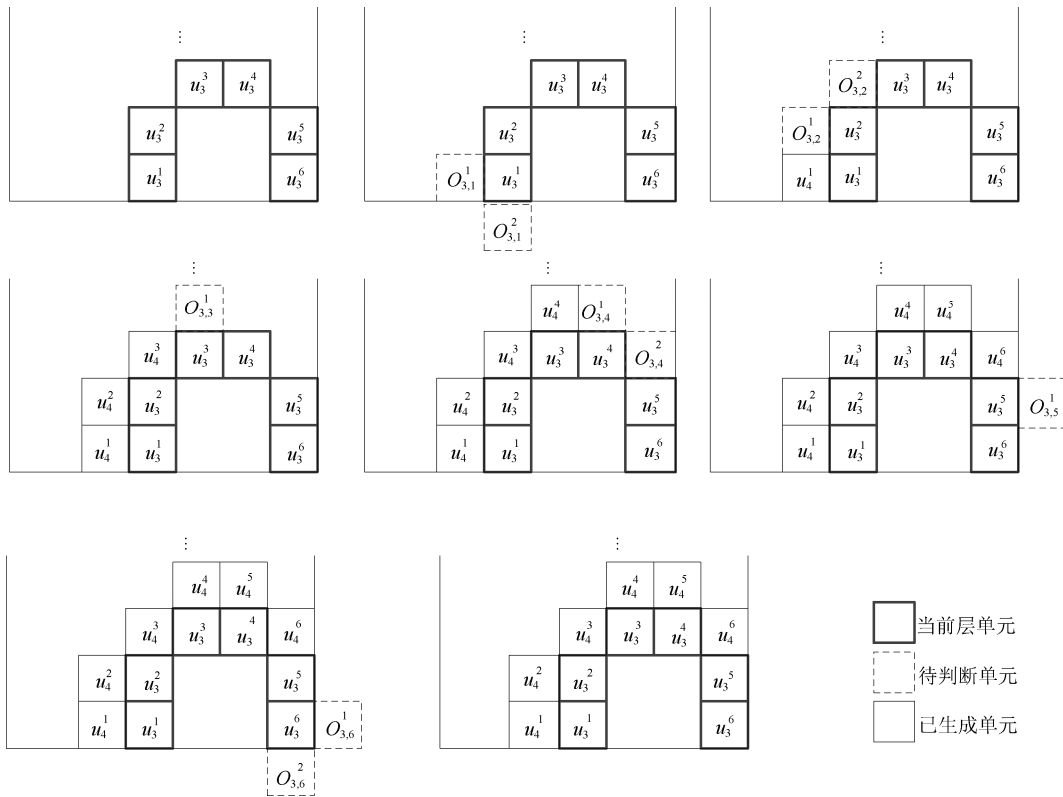


图7 生长算法平面填充图示

详细算法流程如图 8 所示。

步骤 1. 设定初始单元 u_0 。

步骤 2. 将 u_0 存入 $\{u_n^i\}$ 作为当前填充层单元。

步骤 3. 令 $i=1$ 。

步骤 4. 若 i 小于或等于当前层单元数, 则转步

骤 5; 否则令 $n=n+1$, 继续以下一层单元 $\{u_{n+1}^i\}$ 作

为当前层单元，之后转步骤 12。

步骤 5. 计算单元 u_n^i 所有相邻单元并得到其基准点列表 $\{O_{n,i}^j\}$ 。

步骤 6. 令 $j=1$ 。

步骤 7. 若 j 小于或等于基准点数 $k_{n,i}$ ，则转步骤 8；否则令 $i=i+1$ ，之后转步骤 4。

步骤 8. 判断点 $O_{n,i}^j$ 是否在支撑空间域 Ω_v 内，若在，则转步骤 9；否则转步骤 11。

步骤 9. 计算基准点 $O_{n,i}^j$ 对应单元的方向角 $v_{u,1}$ 、 $v_{u,2}$ 。

步骤 10. 生成晶格单元 $u_{n,i}^j$ ，并将其存入下一层单元列表 $\{u_{n+1}^i\}$ 。

步骤 11. 令 $j=j+1$ ，之后转步骤 7。

步骤 12. 判断当前层单元数 k_n 是否大于 0，若是，转步骤 3；否则结束。

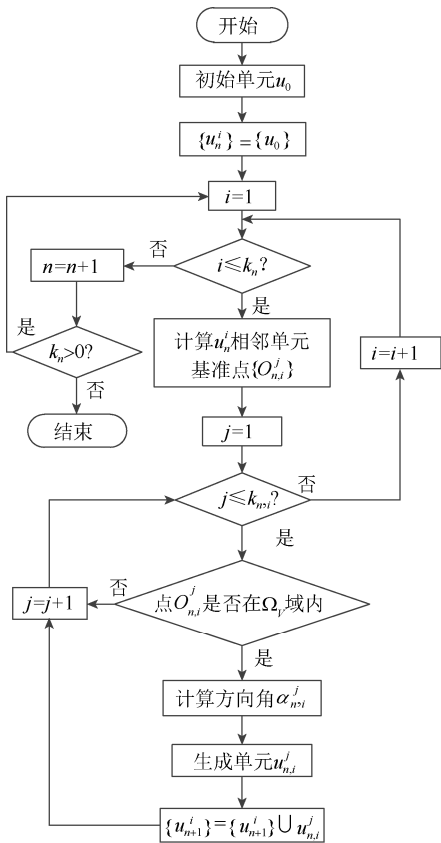


图 8 单元自然生长算法

3 实 例

基于 CATIA V5 软件平台，利用专业的开发工具 CAA(component application architecture)，在 Visual Studio 2008 环境中使用 VC++编程语言对本

文所研究的内容进行开发，并在此基础上开发了“支撑结构快速建模系统”。

如图 9、10 所示，为本系统分别利用 2.1 节中 Cube 和 Porosity-3 单元，针对支座、叶轮零件选择支撑元素后生成的晶格支撑结构。对比实体类型支撑结构和 6 种晶格支撑结构的相对材料用量比率、节省材料比率(表 3)，可以看出采用杆架和孔隙结构能节省大量的材料，尤其是 Cube 单元生成的杆架结构能节省 90%以上；表 4 中本系统在支撑结构生成时间远小于手动建模时间，提高时间效率均达到 80%以上，验证了本文研究内容的正确性和有效性。

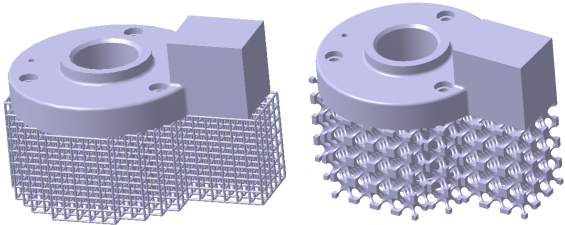


图 9 支座零件支撑结构

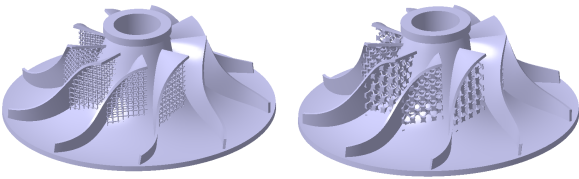


图 10 叶轮零件支撑结构

表 3 晶格支撑结构材料用比(%)

单元类型	晶格单元类型	材料用量比率	节省材料比率
杆件单元	Cube	9.42	90.58
	Tetrahedron	13.32	86.68
	Octahedron	26.64	73.36
孔隙单元	Porosity-1	60.59	39.41
	Porosity-2	17.69	82.31
	Porosity-3	35.67	64.33

表 4 建模时间对比

零件类型	晶格类型	平均耗时(min)		提高效率(%)
		手工	自动	
基座零件支撑	Cube	30	5	83.3
	Porosity-3	40	8	80.0
叶轮零件支撑	Cube	30	2	93.3
	Porosity-3	35	2.5	92.9

4 结 束 语

为满足金属制件成型,本文针对激光选择熔化成型工艺设计实现了晶格支撑结构建模系统,取得的具体成果如下:

(1) 实现了两种典型晶格结构单元——杆件单元和孔隙单元的参数化造型算法,在晶格支撑结构数字化模型的基础上提出了一种结构单元自然生长算法实现对支撑空间的快速填充。

(2) 实例表明,该算法能对零件产品悬空几何元素实现稳定支撑;设计的6种单一类型的支撑结构平均节省材料用量72%;对比手动建模时间,提高建模效率达到80.0%以上。

此外,可以根据设计需求,扩展晶格单元类型,考虑晶格单元多定组情况,并开发相关算法;对于支撑效果的衡量,需要从工艺角度进行实验探究晶格单元大小、支撑类型等参数对散热、变形的影响,有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] BRANDL E, HECKENBERGER U, HOLZINGER V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [J]. *Materials & Design*, 2012, 34:159-169.
- [2] CHENG B, CHOU K. Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing [J]. *Computer-Aided Design*, 2015(69): 102-111.
- [3] 宋国华, 敬石开, 许文婷, 等. 面向熔融沉积成型的树状支撑结构生成设计方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(3): 583-588.
- [4] 陈岩, 王士玮, 杨周旺, 等. FDM 三维打印的支撑结构的设计算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(2): 259-269.
- [5] VANEK J, GALICIA J A G, BENES B. Clever support: efficient support structure generation for digital fabrication [J]. *Computer Graphics Forum*, 2015, 33(5): 117-125.
- [6] MIRZENDEHDEL A M, SURESH K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing [J]. *Computer-Aided Design*, 2016(81): 1-13.
- [7] JÄRVINEN J P, MATILAINEN V, LI X, et al. Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56(10): 72-81.
- [8] GAN M X, WONG C H. Practical support structures for selective laser melting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 474-484.
- [9] HUSSEIN A, YAN C, EVERSON R, et al. Preliminary investigation on cellular support structures using SLM process [C]//*Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. London: Taylor & Francis Group Press, 2011: 609-612.
- [10] HUSSEIN A, HAO L, YAN C, et al. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(7): 1019-1026.
- [11] CALIGNANO F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2014, 64(9): 203-213.
- [12] VAIDYA R, ANAND S. Optimum support structure generation for additive manufacturing using unit cell structures and support removal constraint [J]. *Procedia Manufacturing*, 2016(5): 1043-1059.
- [13] 谢文凡. SLM 工艺支撑结构快速建模技术[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017: 21-22.