

DOI: 10.3969/1673-808X.2021353

引用本文: 钟艳如, 葛云艳, 曹良斌, 等. 基于聚合算子的 SLM 零件成形方向的自动生成方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2023, 43(5): 396-404.

ZHONG Yanru, GE Yunyan, CAO Liangbin, et al. Automatic generation method of selective laser melting part build orientation based on aggregation operators[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2023, 43(5): 396-404.



基于聚合算子的 SLM 零件成形方向的自动生成方法

钟艳如, 葛云艳, 曹良斌, 罗笑南

(桂林电子科技大学 计算机与信息安全学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对选择性激光熔化工艺中零件成形方向的规划问题, 提出一种基于模糊信息聚合算子的选择性激光熔化零件成形方向自动生成方法。首先, 采用基于面片聚类的候选成形方向生成方法生成选择性激光熔化零件的候选成形方向; 其次, 构造 2 个用于属性值聚合的算子, 并对支撑结构体积、体积误差、表面粗糙度、成形时间及成形成本进行估算, 以获取属性值, 在此基础上建立标准模糊决策矩阵, 并将其输入构造的聚合算子中完成聚合, 根据聚合值生成所有候选成形方向的排名确定最佳成形方向。通过案例模型证明了所提方法的可操作性和有效性; 实验分析给出一组自由曲面零件模型, 结合现有方法验证了所提方法的准确性。对比分析突出了所提方法具有捕获属性间相互关系和降低极端值对聚合结果影响的优势。

关键词: 增材制造; 选择性激光熔化; 工艺规划; 成形方向; 聚合算子

中图分类号: TH162

文献标志码: A

文章编号: 1673-808X(2023)05-0396-09

Automatic generation method of selective laser melting part build orientation based on aggregation operators

ZHONG Yanru, GE Yunyan, CAO Liangbin, LUO Xiaonan

(School of Computer and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the part build orientation planning problem in the selective laser melting process, an automatic generation method of selective laser melting part build orientation based on fuzzy information aggregation operators was proposed. First, a set of alternative build orientations of a selective laser melting part was generated using a facet clustering-based generation method. Second, two operators for attribute value aggregation were constructed, and the support volume, volumetric error, surface roughness, build time and build cost in each alternative build orientation were estimated to obtain attribute values. Based on this, a normalized fuzzy decision matrix was established. The fuzzy information in the matrix was aggregated using the constructed operators. According to the aggregation values, a ranking of all alternative build orientations was generate, and the optimal build orientation was determined on the basis of the ranking. A case model illustrates the operability and effectiveness of the proposed method. The experimental analysis gives a set of freeform surface models, and the accuracy of the proposed method is verified by combining the existing methods. The comparative analysis highlights the advantages of the proposed method to capture the relationship between attributes and reduce the influence of extreme values on the aggregation results.

Key words: additive manufacturing; selective laser melting; process planning; build orientation; aggregation operator

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(62166011)

通信作者: 钟艳如(1965—), 女, 教授, 研究方向为知识图谱, 多源感知, 位置服务, 知识表示与推理。E-mail: Rosezhong@guet.edu.cn

选择性激光熔化(selective laser melting, 简称 SLM)是一种利用高能激光束根据规划路径对金属粉末床进行扫描以逐层成形金属零件的增材制造(additive manufacturing, 简称 AM)工艺。与传统减材制造工艺相比, SLM 工艺最大特点是能在几乎不增加额外成本的前提下制造复杂几何形状零件。因此, 一些学者预测, SLM 工艺很有可能会给制造业带来革命性的变化^[1]。虽然 SLM 工艺拥有突出的优点, 但是其在工业中尚未得到广泛应用, 主要是因为现有技术难以保证 SLM 工艺的可重复性和 SLM 产品的可再生产性^[2]。为消除上述缺陷, 需在许多方面开展研究工作^[3-6], 其中零件成形方向的优化研究十分重要。

在 SLM 中, 零件成形方向指的是金属粉末逐层堆积以成形零件的方向。较佳的零件成形方向能够减小支撑结构体积, 减少成形时间, 降低成形成本, 提高表面质量和零件特性等, 因此大量研究人员以此为f标开展零件成形方向优化方面的研究。Chowdhury 等^[7]使用加权优化模型, 依据零件质量和可制造性指标来确定零件的最优成形方向; Raju 等^[8]采用混合粒子群和细菌觅食优化算法对熔融沉积成形工艺参数进行优化, 考虑力学和表面质量属性影响, 通过寻找最佳参数设置来确定最优成形方向; Matos 等^[9]采用类电磁机制算法来求解成形方向优化问题; Shen 等^[10]使用改进的多目标粒子群优化算法, 在保证构建时间最小化的前提下最小化支撑结构体积, 求得帕累托解。直接搜索零件最优成形方向的穷举法又称为“一步法”^[11], 其存在如下弊端: 迭代优化过程中需要设置迭代步长, 若步长设置过小, 则迭代次数大幅增加, 导致计算量庞大, 增加了计算成本; 若步长设置过大, 则增加了错过最优成形方向的风险。

此外, 针对最优成形方向定位问题中的聚合多个属性值信息问题, Nezhad 等^[12]基于帕累托算法对立体光刻零件候选成形方向属性信息进行优化, 同时独立考虑成形时间、支撑量和表面粗糙度, 找出了一系列最优零件成形方向; Zwier 等^[13]利用最小-最大函数定位悬垂量最小且有效表面积最大的成形方向为最优成形方向; Zhang 等^[14]通过加权和f方法对零件模型在成形时间、成形成本等属性进行评价统计, 并定位成形方向。上述研究均在属性相互独立的条件下进行, 但实际生产过程中多个属性往往相互影响。例如, 成形成本分为零件成本和支撑结构成本, 当同时考虑成形成本和支撑结构体积属性以确定最优成形方向时, 若支撑结构体积增加, 则势必造成成形成本增加,

支撑结构体积对成形成本产生直接影响。

鉴于此, 提出了一种基于模糊信息聚合算子的 SLM 零件成形方向自动生成方法, 两步即可确定 SLM 零件的成形方向。首先, 从无限的成形方向中生成稳定良好的候选集, 即采用 HDBSCAN 聚类算法^[15]生成 SLM 零件成形方向的候选集; 其次, 从候选集中定位最佳成形方向, 即基于构建的模糊信息聚合算子对 SLM 零件候选成形方向的支撑结构体积、体积误差、表面粗糙度、成形时间及成形成本的估算值进行聚合, 从而生成 SLM 零件的最佳成形方向。

1 预备理论

1.1 模糊集理论

模糊集的概念由 Zadeh^[16]提出。模糊集是将需要考察的对象及隶属度函数作为一定的模糊集合。模糊集定义如下。

定义 1 设 X 为论域, 定义在 X 上的模糊集表示为 $A = \{\langle x, \mu_A(x) \rangle | x \in X\}$ 。其中, $\mu_A(x) \in [0, 1]$, 代表元素 $x \in X$ 的隶属度。隶属度函数 $\mu_A(x)$ 的值即模糊数, 模糊集 A 中模糊数 $\alpha = \langle \mu_A(x) \rangle$, 可简记为 $\alpha = \langle \mu \rangle$ 。

定义 2 设 ω_i 与 ω_j 为任意 2 个模糊数, ω_i 与 ω_j 的距离定义为

$$d(\omega_i, \omega_j) = |\mu_i - \mu_j|。 \quad (1)$$

定义 3 设 ω 为任意模糊数, 则 ω 的计分函数为

$$S(\omega) = 2\mu - 1, S(\omega) \in [-1, 1]。 \quad (2)$$

根据计分函数, 模糊数间的比较方法为: 令 ω_i 和 ω_j 为任意 2 个模糊数, $i \neq j$, 若 $S(\omega_i) > S(\omega_j)$, 则 $\omega_i > \omega_j$; 若 $S(\omega_i) = S(\omega_j)$, 则 $\omega_i = \omega_j$ 。

1.2 基于 HTT 的模糊数运算定律

Hamacher T-norm 和 T-conorm(HTT)是阿基米德范数中的一种。基于 HTT 运算规则的聚合算子是代数和爱因斯坦聚合算子的扩展推广, 与代数和爱因斯坦聚合算子相比, 其利用参数获得了较高灵活性, 更具有优越性^[17]。定义基于 HTT 的模糊数的运算规则如下。

定义 4 令 $\omega = \langle \mu \rangle$, $\omega_1 = \langle \mu_1 \rangle$ 和 $\omega_2 = \langle \mu_2 \rangle$ 为任意 3 个模糊数, λ 和 δ 为任意正数, 则 ω_1 和 ω_2 间基于 HTT 的运算定律如式(3)、(4), λ 和 ω 间基于 HTT 的运算定律如式(5)、(6):

$$\omega_1 \oplus \omega_2 = \left\langle \frac{\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \mu_2 - (1 - \delta) \mu_1 \mu_2}{1 - (1 - \delta) \mu_1 \mu_2} \right\rangle, \quad (3)$$

$$\omega_1 \otimes \omega_2 = \left\langle \frac{\mu_1 \mu_2}{\delta + (1 - \delta) (\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \mu_2)} \right\rangle, \quad (4)$$

$$\lambda\omega = \left\langle \frac{(1+(\delta-1)\mu)^\lambda - (1-\mu)^\lambda}{(1+(\delta-1)\mu)^\lambda + (\delta-1)(1-\mu)^\lambda} \right\rangle, \quad (5)$$

$$\omega^\lambda = \left\langle \frac{\delta\mu^\lambda}{(\delta+(1-\delta)\mu)^\lambda + (\delta-1)^\lambda} \right\rangle. \quad (6)$$

1.3 MM 算子和 GMM 算子

MM 算子由 Muirhead^[18] 提出,用以聚合明确值,在捕获属性之间相互关系方面能力突出。MM 算子定义如下:

定义 5 设定 n 个参数的集合为 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 是一组实数的集合, Q 中任一元素 $q_i \geq 0$, 但各元素不同时为 0。 $p(i)$ 是 $(1, 2, \dots, n)$ 的任意一个排列, P_n 是 $(1, 2, \dots, n)$ 全部排列的集合, 则 MM 算子的聚合函数为

$$MM^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left(\frac{1}{n!} \sum_{p \in P_n} \prod_{i=1}^n \omega_{p(i)}^{q_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}. \quad (7)$$

GMM 算子是 MM 算子的对偶形式。GMM 算子定义如下:

定义 6 设定 n 个参数的集合为 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 是一组实数集, 且集合 Q 中任一元素 $q_i \geq 0$, 但各元素不同时为 0。 $p(i)$ 为 $(1, 2, \dots, n)$ 的任意一个排列, P_n 是 $(1, 2, \dots, n)$ 全部排列的集合, 则 GMM 算子的聚合函数为

$$GMM^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i} \left(\prod_{p \in P_n} \sum_{i=1}^n (q_i \omega_{p(i)}) \right)^{\frac{1}{n}} \right). \quad (8)$$

1.4 PA 算子

PA 算子由 Yager^[19] 提出。PA 算子能减少极端属性值对聚合结果产生的消极影响。PA 算子定义

如下:

定义 7 设定 n 个参数的集合为 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 则 PA 算子的聚合函数为

$$PA(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \frac{\sum_{i=1}^n ((1+t(\omega_i))\omega_i)}{\sum_{i=1}^n (1+t(\omega_i))}, \quad (9)$$

其中,

$$t(\omega_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n s(\omega_i, \omega_j), \quad (10)$$

$$s(\omega_i, \omega_j) = 1 - d(\omega_i, \omega_j). \quad (11)$$

令 ω_i 和 ω_j 为任意 2 个模糊数, $i \neq j$, 则 $s(\omega_i, \omega_j)$ 表示 ω_j 对 ω_i 的支持度。 $s(\omega_i, \omega_j)$ 有如下属性:

- 1) $0 \leq s(\omega_i, \omega_j) \leq 1$;
- 2) $s(\omega_i, \omega_j) = s(\omega_j, \omega_i)$;
- 3) 若 $|\omega_i - \omega_j| \geq |\omega_m - \omega_n|$, 则相应的支持度为 $s(\omega_i, \omega_j) \leq s(\omega_m, \omega_n)$ 。

2 成形方向自动确定方法

SLM 零件成形方向自动生成流程如图 1 所示。该方法将 SLM 零件的三维模型、选定的评估指标以及评估指标对应的权重作为输入, 将 SLM 零件生成的候选成形方向中的最佳成形方向作为输出。采用 HDBSCAN 聚类算法^[15] 生成输入 SLM 零件的若干候选成形方向, 选定评估指标包括支撑结构体积、体积误差、表面粗糙度、成形时间和成形成本, 输入评估指标对生成的 SLM 零件候选成形方向进行估算, 并获得属性值。

将属性值模糊化归一化后, 建立标准模糊决策矩阵, 并将其输入基于 HTT 构造的 WFAPMM 算子和 WFAPGMM 算子, 获取 SLM 零件候选成形方向的属

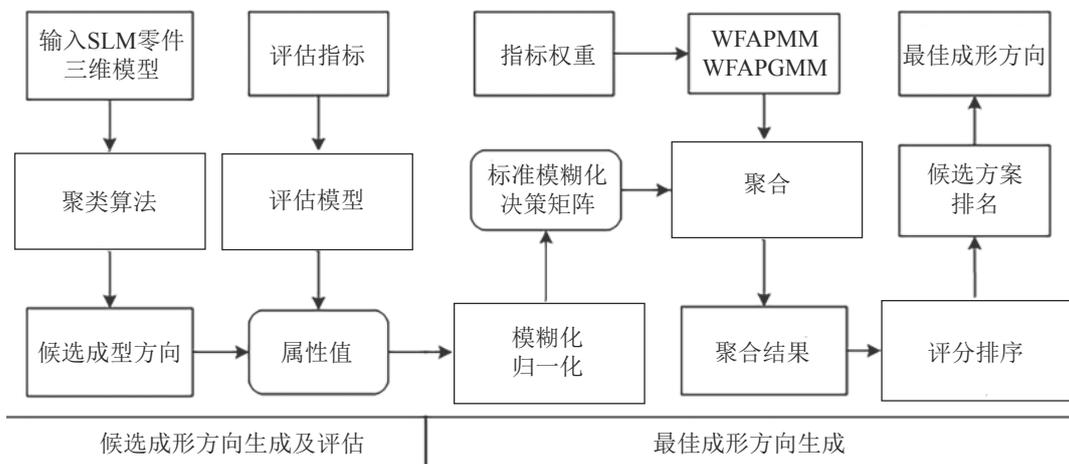


图 1 SLM 零件成形方向自动生成流程

性模糊信息在 2 个聚合算子作用下的聚合值。结合 2 个聚合算子对聚合结果计分, 生成候选方案的排名, 从而确定输入的 SLM 零件的最佳成形方向。

2.1 基于 HTT 的 WFAPMM 算子

为捕获 SLM 零件的多个属性间复杂的内部关系, 以降低极端属性值对聚合结果造成的消极影响, 结合 MM 算子和 PA 算子构造 UFAPMM 聚合算子。进一步地, 为考虑所需聚合模糊数的相对重要性, 对选定评估指标量化后的模糊值分别赋予权重, 构造 WFAPMM 聚合算子。WFAPMM 聚合算子定义如下。

定义 8 设定 $\omega_i = \langle \mu_i \rangle, i = 1, 2, \dots, n$ 是 n 个模糊数, $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 是一组实数集, 且集合 Q 中任一元素 $q_i \geq 0$, 但 Q 中元素不同时为 0。 $p(i)$ 是 $(1, 2, \dots, n)$ 的任意一个排列, P_n 是 $(1, 2, \dots, n)$ 全部排列的集合。 $d(\omega_i, \omega_j)$ 是模糊数 ω_i 和 ω_j 间的距离, $s(\omega_i, \omega_j)$ 为模糊数 ω_j 对 ω_i 的支持度, 对应 $\omega_i = \langle \mu_i \rangle, i = 1, 2, \dots, n$ 的 n 个模糊数的权重分别为 W_1, W_2, \dots, W_n ,

$i = 1, 2, \dots, n$, 其中 $0 \leq W_i \leq 1$, 且 $W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1$, 并有

$$t(\omega_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n s(\omega_i, \omega_j), \quad (12)$$

则定义 WFAPMM 的聚合函数为

$$\text{WFAPMM}^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left(\frac{1}{n!} \oplus \bigotimes_{p \in P_n} \bigotimes_{i=1}^n \left(\frac{n W_{p(i)} (1 + t(\omega_j))}{\sum_{j=1}^n W_j (1 + t(\omega_j))} \omega_{p(i)} \right)^{q_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}. \quad (13)$$

定理 1 基于 HTT 和式 (3) ~ (6) 模糊数间的运算定律, 由上述 WFAPMM 聚合函数运算得到显式表达式 WFAPMM_H^Q 聚合函数为

$$\text{WFAPMM}_H^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left\langle \frac{\delta(\mu' - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}}{(\mu' + \delta^2 - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}} + (\delta - 1)(\mu' - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}} \right\rangle, \quad (14)$$

$$\mu' = \prod_{p \in P_n} \left(\frac{\prod_{i=1}^n \left(\frac{(\delta + (1 - \delta)(1 - \mu_{p(i)}))^{n\varphi_{p(i)}} + (\delta^2 - 1)(1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}}}{(\delta + (1 - \delta)(1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}} - (1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}})} \right)^{q_i} + \delta^2 - 1}{\prod_{i=1}^n \left(\frac{(\delta + (1 - \delta)(1 - \mu_{p(i)}))^{n\varphi_{p(i)}} + (\delta^2 - 1)(1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}}}{(\delta + (1 - \delta)(1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}} - (1 - \mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}})} \right)^{q_i} - 1} \right)^{\frac{1}{n!}}, \quad (15)$$

且 $\varphi_{p(i)}$ 和 $\phi_{p(i)}$ 分别为

$$\varphi_{p(i)} = \frac{(W_{p(i)} \phi_{p(i)})}{\sum_{k=1}^n (W_k \phi_k)}, \quad (16)$$

$$\phi_{p(i)} = \frac{(1 + t(\omega_j))}{\sum_{j=1}^n (1 + t(\omega_j))}. \quad (17)$$

2.2 基于 HTT 的 WFAPGMM 算子

GMM 算子是 MM 算子的对偶形式。GMM 算子同样在捕获属性中复杂的内部关系方面具有突出能力。与此同时, 为了降低潜在的极端属性值对聚合结果造成的不利影响, 结合 GMM 算子和 PA 算子构造了 UFAPGMM 算子。考虑到所需聚合的模糊数间的

相对重要性, 赋予评估指标权重并构造 WFAPGMM 聚合算子。WFAPGMM 聚合算子定义如下。

定义 9 基于定义 8 和式 (16), 构造 WFAPGMM 聚合函数:

$$\text{WFAPGMM}^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i} \left(\bigotimes_{p \in P_n} \bigotimes_{i=1}^n (q_i \omega_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}}) \right)^{\frac{1}{n!}} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}. \quad (18)$$

定理 2 由式 (18) 和式 (3) ~ (6) 模糊数间的运算定律可构造基于 HTT 的 WFAPMM 聚合函数的显式表达式 WFAPMM_H^Q 聚合函数:

$$\text{WFAPGMM}_H^Q(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left\langle \frac{(\mu' + \delta^2 - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}} - (\mu' - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}}{(\mu' + \delta^2 - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}} + (\delta - 1)(\mu' - 1)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n q_i}}} \right\rangle, \quad (19)$$

$$\mu' = \prod_{p \in P_n} \left(\frac{\prod_{i=1}^n \left(\frac{(\delta + (1 - \delta)\mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}} + (\delta^2 - 1)\mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}}}{(\delta + (1 - \delta)\mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}} - \mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}})} \right)^{q_i} + \delta^2 - 1}{\prod_{i=1}^n \left(\frac{(\delta + (1 - \delta)\mu_{p(i)})^{n\varphi_{p(i)}} + (\delta^2 - 1)\mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}}}{(\delta + (1 - \delta)\mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}} - \mu_{p(i)}^{n\varphi_{p(i)}})} \right)^{q_i} - 1} \right)^{\frac{1}{n!}}. \quad (20)$$

2.3 成形方向自动生成步骤

基于模糊信息聚合算子自动生成 SLM 零件最佳成形方向系统 S 。候选成形方向集 $O_i, i = 1, 2, \dots, m$, 评估指标集 $\Omega_j, j = 1, 2, \dots, n$, 评估属性的权重向量为 $W_j, j = 1, 2, \dots, n$, 且 $W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1$ 。使用模糊信息聚合算子聚合 SLM 零件候选成形方向上各个评估指标的模糊信息, 对聚合结果计分并生成排名 R , 依据模糊值比较规则确定 SLM 零件的最佳成形方向 $O_k, k \in [1, m]$ 。成形方向自动生成步骤如下:

1) SLM 零件的候选成形方向的生成。输入一个 SLM 零件三维模型到系统 S , 三维模型采用 HDBSCAN 聚类算法^[15] 对面片分类聚簇生成有限个候选成形方向 $O_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。

2) 选定评估指标 $\Omega_j, j = 1, 2, \dots, n$, 并构造模糊信息聚合算子。评估指标包括支撑结构体积、体积误差、表面粗糙度、成形时间和成形成本。对选取的零件属性进行评估, 获得其具体属性值 $v_{i,j}$ 。构造基于 HTT 的 WFAPMM 算子及 WFAPGMM 算子。

3) 属性值量化。量化步骤由模糊化和归一化组成。根据

$$\alpha_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m v_{i,j}^2}}, \quad (21)$$

$M_F = [\alpha_{i,j}]_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \alpha_{i,j} \geq 0$,

将属性值模糊化, 建立模糊决策矩阵。

对模糊决策矩阵 M_F 归一化: 若 Ω_j 属性为效益属性, 则 $\beta_{i,j}$ 为 $\langle \alpha_{i,j} \rangle$; 若 Ω_j 属性为成本属性, 则 $\beta_{i,j}$ 为 $\langle 1 - \alpha_{i,j} \rangle$ 。基于归一化后的 M_F 建立标准模糊决策矩阵 $M_N = [\beta_{i,j}]_{m \times n}$ 。

4) 模糊信息聚合。使用基于 HTT 的 WFAPMM 算子和 WFAPGMM 算子分别对标准模糊决策矩阵 M_N 中的模糊信息进行聚合, 输出聚合值 μ_i^{MM} 和 $i^{GMM}, i = 1, 2, \dots, m$ 。

5) 聚合结果计分。对于聚合值 μ_i^{MM} 和 μ_i^{GMM} , 由式 (22) 获得计分 $S(\omega_i^{MM})$ 和 $S(\omega_i^{GMM})$, 计算两者均值 $S(\omega_i)$, 依据该均值和模糊数比较规则生成候选方案 $O_i, i = 1, 2, \dots, m$ 的排名 R 。

$$S(\omega_i) = 2\mu_i - 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (22)$$

6) 确定最佳成形方向。根据模糊数比较规则, 由排名 R 确定输入的该 SLM 零件的最佳成形方向 $O_k, k \in [1, m]$ 。

3 实验验证

3.1 模型实验

为说明基于模糊信息聚合算子自动生成 SLM 零件最佳成形方向的可行性, 通过以下步骤实现具体案例最佳成形方向自动生成的目的。

1) 生成 SLM 零件候选成形方向。输入一个选定的 SLM 零件的三维模型 (见图 2)。用于实验的 STL 文件模型下载自零件模型开源在线社区 <https://www.thingiverse.com/>。

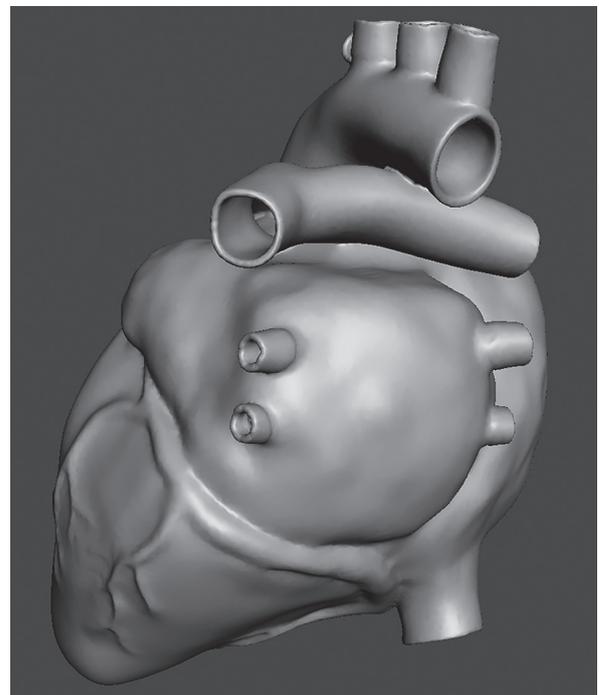


图 2 案例 SLM 零件模型

使用层次聚类 HDBSCAN 算法^[11] 对输入的 SLM 自由曲面模型生成 12 个面簇, 合并其相反向量, 则共有候选成形方向: $O_1', O_2', \dots, O_{24}'$, 其中因计算相反向量产生重复成形方向 $O_7' = O_8', O_{21}' = O_{22}'$; 删去重复成形方向 O_8' 和 O_{22}' , 对候选成形方向重新编号为 $O_{01}, O_{02}, \dots, O_{22}$ 。保持图 2 案例零件模型成形方向为左视图, 零件在增材制造设备中成形方向为竖直向上, SLM 零件模型成形方向候选集如图 3 所示。

2) 获取属性值。评估指标包括支撑结构体积、体积误差、表面粗糙度、成形时间和成形成本。上述零件属性的重要程度假设均赋权重 0.2, 利用 Meshmix 软件获取零件模型体积和支撑量, 进而求解该 SLM 零件模型各候选成形方向在打印方向上的高度, 将上述值输入 Qin 等^[11] 提出的评估模型中, 获得生成

的候选成形方向的属性值。

模糊化, 建立模糊决策矩阵 M_F , 归一化模糊决策矩阵,

3) 属性值模糊化和归一化。由式 (20) 对属性值

得到如下标准化模糊决策矩阵:

$$M_N = \begin{bmatrix} \langle 0.771\ 9 \rangle & \langle 0.786\ 9 \rangle & \langle 0.788\ 5 \rangle & \langle 0.795\ 8 \rangle & \langle 0.794\ 5 \rangle \\ \langle 0.781\ 4 \rangle & \langle 0.786\ 7 \rangle & \langle 0.788\ 5 \rangle & \langle 0.796\ 9 \rangle & \langle 0.795\ 9 \rangle \\ \langle 0.782\ 3 \rangle & \langle 0.786\ 7 \rangle & \langle 0.787\ 8 \rangle & \langle 0.795\ 6 \rangle & \langle 0.794\ 7 \rangle \\ \langle 0.787\ 3 \rangle & \langle 0.787\ 0 \rangle & \langle 0.787\ 8 \rangle & \langle 0.787\ 9 \rangle & \langle 0.787\ 7 \rangle \\ \langle 0.796\ 9 \rangle & \langle 0.786\ 8 \rangle & \langle 0.787\ 6 \rangle & \langle 0.741\ 6 \rangle & \langle 0.745\ 2 \rangle \\ \langle 0.760\ 7 \rangle & \langle 0.787\ 1 \rangle & \langle 0.787\ 6 \rangle & \langle 0.768\ 5 \rangle & \langle 0.768\ 9 \rangle \\ \langle 0.809\ 3 \rangle & \langle 0.786\ 8 \rangle & \langle 0.788\ 5 \rangle & \langle 0.806\ 1 \rangle & \langle 0.805\ 3 \rangle \\ \langle 0.776\ 5 \rangle & \langle 0.786\ 2 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.796\ 4 \rangle & \langle 0.795\ 2 \rangle \\ \langle 0.776\ 4 \rangle & \langle 0.786\ 9 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.796\ 4 \rangle & \langle 0.795\ 2 \rangle \\ \langle 0.775\ 1 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.796\ 2 \rangle & \langle 0.795\ 0 \rangle \\ \langle 0.781\ 4 \rangle & \langle 0.786\ 9 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.797\ 0 \rangle & \langle 0.796\ 0 \rangle \\ \langle 0.832\ 3 \rangle & \langle 0.786\ 3 \rangle & \langle 0.788\ 5 \rangle & \langle 0.812\ 0 \rangle & \langle 0.811\ 6 \rangle \\ \langle 0.811\ 6 \rangle & \langle 0.786\ 9 \rangle & \langle 0.788\ 5 \rangle & \langle 0.804\ 8 \rangle & \langle 0.804\ 2 \rangle \\ \langle 0.808\ 8 \rangle & \langle 0.787\ 0 \rangle & \langle 0.785\ 5 \rangle & \langle 0.816\ 2 \rangle & \langle 0.814\ 7 \rangle \\ \langle 0.828\ 0 \rangle & \langle 0.787\ 0 \rangle & \langle 0.785\ 5 \rangle & \langle 0.760\ 5 \rangle & \langle 0.763\ 7 \rangle \\ \langle 0.777\ 7 \rangle & \langle 0.787\ 1 \rangle & \langle 0.787\ 0 \rangle & \langle 0.788\ 4 \rangle & \langle 0.787\ 9 \rangle \\ \langle 0.779\ 0 \rangle & \langle 0.786\ 8 \rangle & \langle 0.787\ 0 \rangle & \langle 0.791\ 7 \rangle & \langle 0.791\ 0 \rangle \\ \langle 0.773\ 1 \rangle & \langle 0.786\ 4 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.795\ 9 \rangle & \langle 0.794\ 7 \rangle \\ \langle 0.776\ 0 \rangle & \langle 0.786\ 9 \rangle & \langle 0.786\ 1 \rangle & \langle 0.796\ 3 \rangle & \langle 0.795\ 1 \rangle \\ \langle 0.773\ 9 \rangle & \langle 0.787\ 1 \rangle & \langle 0.787\ 6 \rangle & \langle 0.796\ 0 \rangle & \langle 0.794\ 8 \rangle \\ \langle 0.805\ 4 \rangle & \langle 0.787\ 1 \rangle & \langle 0.783\ 6 \rangle & \langle 0.731\ 0 \rangle & \langle 0.735\ 7 \rangle \\ \langle 0.764\ 3 \rangle & \langle 0.786\ 8 \rangle & \langle 0.783\ 6 \rangle & \langle 0.761\ 7 \rangle & \langle 0.762\ 7 \rangle \end{bmatrix}.$$

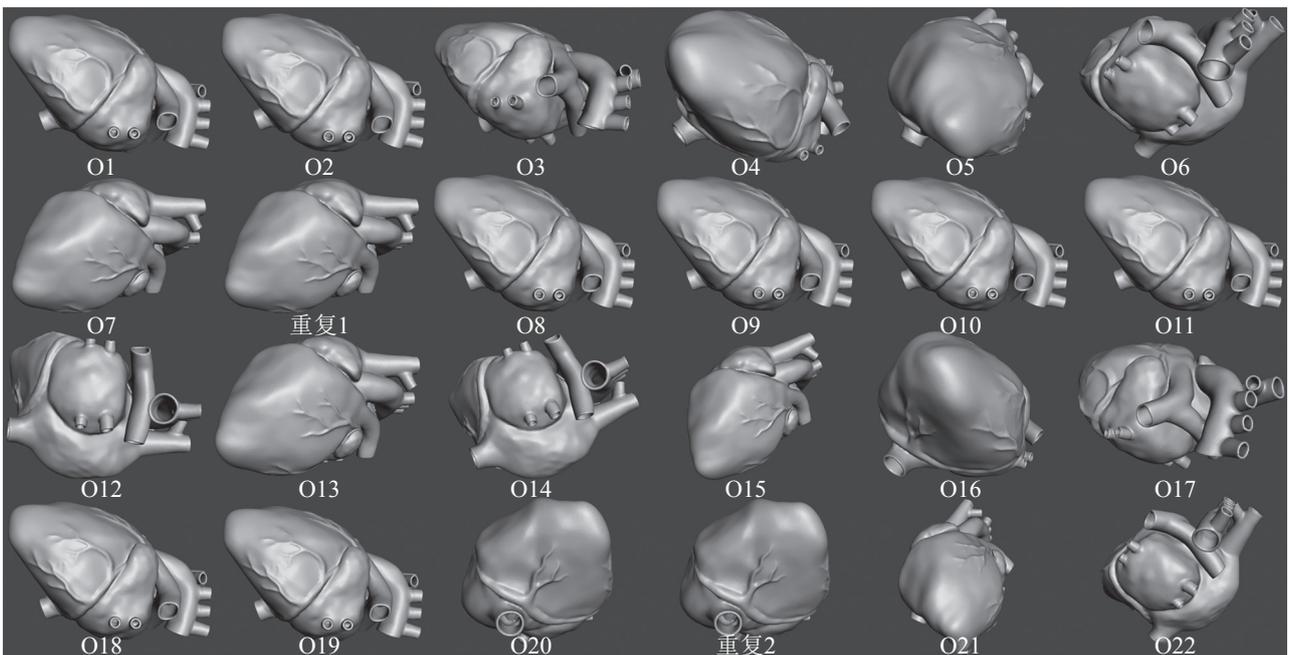


图 3 SLM 零件模型成形方向候选集

4) 属性模糊信息聚合。构造基于 HTT 的 WFPMM 算子和 WFAPGMM 算子, 如式 (14)、(18) 所示。将标准化模糊决策矩阵 M_N 输入构造的模糊信息聚合算子中, 输出候选成形方向的属性模糊数信息聚合结果值: $\mu_i^{MM}, \mu_i^{GMM}, i = 1, 2, \dots, N$ 。

5) 聚合结果计分。根据式 (22), 步骤 4) 中聚合值 μ_i^{MM} 和 μ_i^{GMM} 的计分分别为 $S(\omega_i^{MM})$ 和 $S(\omega_i^{GMM})$ 。取两者

均值, 则候选成形方向最终得分 $S(\omega_i)$ 依次为 0.575 2, 0.579 9, 0.578 9, 0.575 0, 0.544 2, 0.549 3, 0.598 6, 0.576 3, 0.576 5, 0.575 5, 0.579 0, 0.612 9, 0.598 6, 0.605 3, 0.571 2, 0.571 3, 0.574 3, 0.574 6, 0.576 3, 0.575 9, 0.538 7, 0.543 8。

6) 生成候选成形方向排名。依据模糊数比较规则对候选成形方向生成排名: $O_{12} > O_{14} > O_{13} = O_{07} >$

$O_{02} > O_{11} > O_{03} > O_{09} > O_{08} = O_{19} > O_{20} > O_{10} > O_{01} > O_{04} > O_{18} > O_{17} > O_{16} > O_{15} > O_{06} > O_{05} > O_{22} > O_{21}$ 。

7)确定该输入 SLM 零件模型的最佳成形方向为 O_{12} 。

3.2 实验分析

对生成的 SLM 零件成形方向方法分别进行可行性分析、定量比较和优势对比分析。

3.2.1 可行性分析

基于 Qin 等^[20]采用的简单加权平均算子,确定成形方向方法中案例零件,选取其中自由曲面零件模型零件 7~12 分别对应图 4 的 6 个零件。将其逐一输入模糊信息聚合算子方法的确定 SLM 零件成形方向,输出各零件的最佳成形方向和部分排序,将其与简单加权平均算子方法确定的成形方向结果进行对比,结果如表 1 所示。

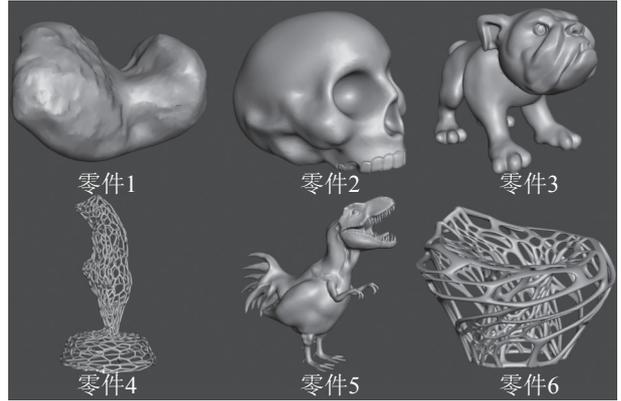


图 4 自由曲面零件模型

由表 1 可知,基于模糊信息聚合算子生成的 SLM 零件最佳成形方向与 Qin 等^[20]提出的简单加权平均模型生成的零件最佳成形方向一致,验证了基于模糊信息聚合算子方法的可行性和准确性。

表 1 可行性分析实验结果

零件	简单加权平均算子 ^[20]	模糊信息聚合算子
1	$O_{04} > O_{16} > O_{21} > O_{15} > O_{18} > O_{07} > O_{08} > O_{11}$	$O_{04} > O_{16} > O_{21} > O_{15} > O_{18} > O_{07} > O_{03} > O_{08}$
2	$O_{09} > O_{03} > O_{15} > O_{13} > O_{07} > O_{01} > O_{02} > O_{22}$	$O_{09} > O_{03} > O_{15} = O_{13} > O_{07} > O_{01} > O_{02} > O_{22}$
3	$O_{17} > O_{05} > O_{23} > O_{06} > O_{24} > O_{21} > O_{18} > O_{08}$	$O_{17} > O_{05} > O_{23} > O_{06} > O_{24} > O_{21} > O_{18} > O_{08}$
4	$O_{08} > O_{09} > O_{10} > O_{07} > O_{18} > O_{17} > O_{12} > O_{23}$	$O_{08} > O_{09} > O_{10} > O_{07} > O_{18} > O_{17} > O_{12} > O_{23}$
5	$O_{01} > O_{02} > O_{08} > O_{10} > O_{07} > O_{16} > O_{09} > O_{15}$	$O_{01} > O_{02} > O_{08} > O_{10} > O_{07} > O_{16} > O_{09} > O_{06}$
6	$O_{15} > O_{02} > O_{11} > O_{23} > O_{01} > O_{16} > O_{05} > O_{24}$	$O_{15} > O_{02} > O_{11} > O_{23} > O_{01} > O_{16} > O_{05} > O_{24}$

3.2.2 定量比较

使用相同的 SLM 零件模型对不同成形定位方法进行定量比较。使用图 2 案例 SLM 零件模型,比较基于模糊信息聚合算子方法与简单加权平均成形定位方法,结果见表 2。

由表 2 可知,与当下使用较多的简单加权方法相比,基于模糊信息聚合算子的定位方法重点突出了捕捉属性间相互关系的能力。

表 2 定量比较结果

方法	属性	候选成形方向排序	最佳成形方向
Qin 等 ^[22]	相互独立	$O_{12} > O_{14} > O_{13} = O_{07} > O_{02} > O_{11} > O_{03} = O_{09}$	O_{12}
所提方法	相互关联	$O_{12} > O_{14} > O_{13} = O_{07} > O_{02} > O_{11} > O_{03} > O_{09}$	O_{12}

比较案例 SLM 零件模型生成的候选成形方向排序,基于模糊信息聚合算子方法在 O_{03} 和 O_{09} 之间的关系中更加敏感,其余排序无明显变化,最佳成形方向定位结果一致。

3.2.3 优势分析

基于简单加权平均算子实现规则曲面和自由曲面模型的零件最佳成形方向的生成,无法捕获属性之间的相互关系,也不具备降低极端属性值对最佳成形方向生成结果的影响。因此,通过引入 MM 算子及 GMM 算子捕获属性之间的相互关系,引入 PA 算子

以降低极端属性值对聚合结果造成的不利影响,对实现 SLM 零件成形方向的自动生成更具优势。

为直观地显示简单加权平均方法与模糊信息算子方法之间的差异,进行了以下实验。

实验一:用于验证基于 HTT 的模糊信息聚合算子能够捕获属性间相互关系。

M_N 中 $\beta_{1,1}$ 的值为 0.781 2,调整 $\beta_{1,1}$ 值,如图 5 中横坐标刻度值。假设基于简单加权平均模型与聚合模型的评估指标权重均为 0.2,计算结果如图 6 所示。

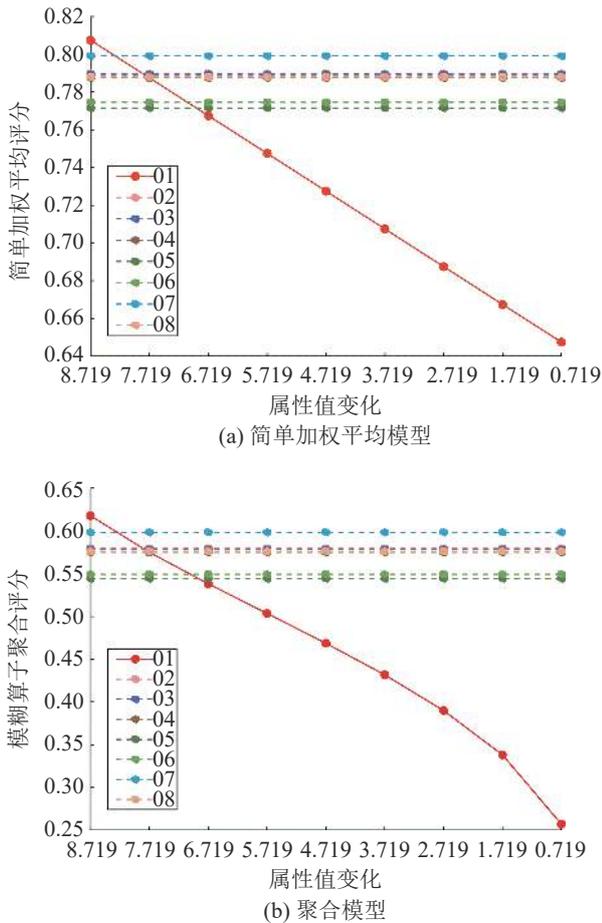


图5 基于不同模型的排名曲线

由图5(a)可知,随着 $\beta_{1,1}$ 的值下降,基于简单加权平均算子 O_{01} 的排名呈直线下降;由图5(b)可知,基于模糊信息聚合算子 O_{01} 的排名则呈现曲线下降。主要是因为简单加权平均模型中,假设属性相互独立,忽略了属性间相互关系,而模糊信息聚合模型能够捕获属性之间相互关系,故呈现曲线下降。

实验二:用于验证模糊信息聚合模型能够降低极端值对聚合结果造成的影响。

为清楚显示 O_{01} 的不同属性对应的权重值变化,分别赋支撑结构体积、表面粗糙度、体积误差、成形时间和成形成本属性的指标权重初始值为:0.3、0.2、0.15、0.21、0.24。调整 M_N 中 $\beta_{1,1}$ 的值如图6横坐标所示。

图6中动态权重矩阵 $\varphi_{p(1)}$ 中对应的 $\beta_{1,1}$ 表示支撑结构体积的权重值 φ_1 持续减小,故减小到一定程度的 $\beta_{1,1}$ 值对 O_{01} 候选成形方向模糊信息聚合结果的贡献也相应减少。 O_{01} 候选成形方向的 $\varphi_2 \sim \varphi_5$ 分别表示除支撑结构体积外的表面粗糙度、体积误差、成形时间和成形成本的权重值,随着 $\beta_{1,1}$ 值减小,其在动态权重矩阵中所获得的权重值逐渐增加。因此,相较于简单加权平均算子赋予固定权重不因属性值变化而

调整,基于模糊信息聚合算子自动生成 SLM 零件成形方向的方法能够减少极端值(这里属性值的偏差值可视作极端值)对聚合结果的消极影响。

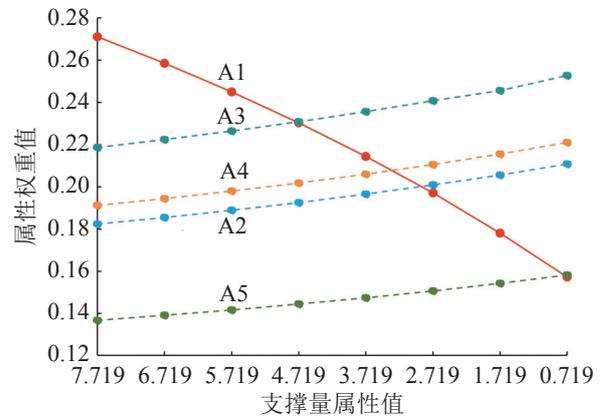


图6 属性权重值变化

4 结束语

1)以 SLM 零件的成形方向为研究对象,提出了基于两步骤自动生成 SLM 零件最优成形方向的方法,并对一系列自由曲面零件模型进行最优成形方向定位。实验验证了所提方法的有效性。

2)使用 SLM 零件模型面片聚类分簇生成稳定的候选集,从中定位最佳成形方向,与直接搜索一定长角度旋转生成候选集的穷举法比较,大大减少了无意义成形方向的计算成本。

3)建立了基于 HTT 的模糊信息聚合算子,将其用于捕捉多个属性间复杂的内部关系和降低属性偏差值对聚合结果的消极影响,相较于简单加权平均方法的基于属性间相互独立评价统计成形方向,更为合理,且符合属性间现实关系。

4)提出了对 SLM 零件模型面片聚类生成候选集,基于建立的模糊信息聚合算子自动定位最佳成形方向。相对于传统操作员依据经验手工定位的不确定性,该方法保证了零件质量、SLM 工艺的可重复性和 SLM 产品的可再生产性。

参考文献:

[1] GAO W, ZHANG Y B, RAMANUJAN D, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering[J]. Computer-Aided Design, 2015, 69: 65-89.
 [2] NGUYEN C H P, CHOI Y. Concurrent density distribution and build orientation optimization of additively manufactured functionally graded lattice structures[J]. Computer-aided Design, 2020, 127: 102884.
 [3] 李慧贤,王硕,马良. 金属增材制造中的并行化异构切

- 片算法[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(12): 1906-1911.
- [4] 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): 2819-2826.
- [5] 陈旭斌, 葛翔, 祝毅, 等. 选择性激光熔化零件微观结构及摩擦学性能研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 63-72.
- [6] 刘晓晨, 孙宇, 敬石开, 等. 增材制造工艺匹配性评估的宏微观决策模型[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(21): 2598-2603.
- [7] CHOWDHURY S, MHAPSEKAR K, ANAND S. Part build orientation optimization and neural network-based geometry compensation for additive manufacturing process[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(3): 031009.
- [8] RAJU M, GUPTA M K, BHANOT N, et al. A hybrid PSO-BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30(7): 2743-2758.
- [9] MATOS M A, ROCHA A M A C, PEREIRA A. Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(5/6): 1993-2005.
- [10] SHEN H Y, YE X X, XU G H, et al. 3D printing build orientation optimization for flexible support platform[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2020, 26(1): 59-72.
- [11] QIN Y C, QI Q F, SHI P Z, et al. Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(5/6): 1295-1328.
- [12] NEZHAD A S, BARAZANDEH F, RAHIMI A R, et al. Pareto-based optimization of part orientation in stereolithography[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224(10): 1591-1598.
- [13] ZWIER M P, WITS W W. Design for additive manufacturing: Automated build orientation selection and optimization[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 55: 128-133.
- [14] ZHANG Y C, HARIK R, FADEL G, et al. A statistical method for build orientation determination in additive manufacturing[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(1): 187-207.
- [15] QIN Y C, QI Q F, SHI P Z, et al. Automatic generation of alternative build orientations for laser powder bed fusion based on facet clustering[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, 15(3): 307-324.
- [16] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [17] LIU P F, WANG P. Multiple-attribute decision-making based on archimedean bonferroni operators of q-rung orthopair fuzzy numbers[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(5): 834-848.
- [18] MUIRHEAD R. Some methods applicable to identities and inequalities of symmetric algebraic functions of n letters[D]. Scotland: University of Glasgow, 1904: 144-162.
- [19] YAGER R R. The power average operator[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A Systems and Humans*, 2001, 31(6): 724-731.
- [20] QIN Y C, QI Q F, SHI P Z, et al. Automatic determination of part build orientation for laser powder bed fusion[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, 16(1): 29-49.

实习编辑: 高波