

增材制造中耦合零件表面粗糙度及支撑面积的建造方向优化

王 玉¹, 陈子谦², 李后起², 高庆勇², 胡志桥², 于 颖²

(1. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 以熔融沉积(fused deposition modeling, FDM)技术为基础,研究了建造方向对于零件表面粗糙度以及支撑的影响.通过实验测试新型聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)材料零件不同建造方向下的表面粗糙度,结合理论及经验公式,建立符合实际情况的粗糙度综合预测模型.对于复杂多面体零件,通过选择功能性表面,建立建造方向集合,在有限的方向集合内选择最优建造方向,从而整体提升零件表面粗糙度.提出了基于光固化立体造型术(stereolithography, STL)文件格式的支撑面积数学模型,以支撑面积最小为优化目标,使用遗传算法(genetic algorithm, GA)进行单目标优化,搜寻最优建造方向.针对不同建造方向下,表面粗糙度和支撑面积的耦合问题,建立多目标优化模型,使用遗传算法全局搜寻最优建造方向.

关键词: 熔融沉积; 建造方向; 表面粗糙度; 支撑面积; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

Optimization of Building Orientation Coupling Supporting Area and Surface Roughness in Additive Manufacturing

WANG Yu¹, CHEN Ziqian², LI Houqi², GAO Qingyong², HU Zhiqiao², YU Ying²

(1. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the fused deposition modeling (FDM) technology, the influences of building orientation on surface roughness and supporting area are studied. The surface roughness of parts made by poly-lactic acid (PLA) at different building orientations is tested in experiments, and combined

with the theoretical and empirical formula, a novel model for surface roughness prediction is established which conforms to the actual situation in manufacturing. Through the determination of functional surface, the set of building orientations is established in which the best building orientation can be found aiming at improving the surface quality of a complex multiple-surface part. Based on the stereolithography (STL), a mathematical model for the supporting area is established. The single objective genetic algorithm (GA) is used to optimize the building orientation to minimize the supporting area. Coupling surface roughness and supporting area, a multi-objective optimization based on GA is established to search for the global optimal solution.

Key words: fused deposition modeling (FDM); building orientation; surface roughness; supporting area; genetic algorithm (GA); multi-objective optimization

熔融沉积(fused deposition modeling, FDM)制造技术目前已成为发展最快的增材制造技术之一,由于其建造柔性,不同的建造方式对零件性能会产生较大影响,其中尤以建造方向对零件性能的影响最大.在成型零件的性能中,表面粗糙度是一个重要的评定标准,特别是零件的某些功能性表面,往往对其表面粗糙度有特定要求.在 FDM 制造技术中,影响表面质量的因素有很多,包括层厚、成型方向、打印参数(速度、温度)、填充密度、支撑结构等都会影响最后的零件表面质量.意大利学者 Boschetto 等^[1]通过大量实验数据的分析,得出了 30°~150°范围内,影响表面质量的因素主要为层厚和成型方向,并以此为基础,提出了在 FDM 技术中表面粗糙度 R_a

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675383)

第一作者: 王 玉(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为增材制造、数字化设计与制造、多体动力学仿真、有限元分析等. E-mail: yuwang@tongji.edu.cn

通信作者: 于 颖(1977—),女,副教授,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为增材制造、故障的预测性维护及远程诊断等. E-mail: cdhawyy@tongji.edu.cn

的公式. 韩国教授 Ahn 等^[2]和其团队发现了成型角度在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和 $150^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内, 模型预测值和实际测量值会出现较大的偏差. 对于成型零件表面粗糙度的优化问题, Pandey 等^[3]考虑了表面精度和打印时间两个优化目标, 使用遗传算法 NSGA-II 来确定 Pareto 解集, 该方法主要适用于 FDM.

理论上, 增材制造技术可以用于任何复杂型面的加工制造, 但是当涉及到零件精度时, 支撑问题成为限制其使用的主要因素之一. 零件支撑是增材制造过程中的一个重要环节. FDM 制造过程类似于“堆积木”, 从下往上逐层堆积, 如果上下两层丝材位置偏离程度较大时, 挤出头挤出的熔融丝材来不及和下层固化层黏结就会坠落, 打印无法顺利进行. 而对于零件支撑面积, 往往越小越好, 一方面节省材料, 另一方面, 较小的支撑面积意味着支撑材料去除后较小的零件表面损坏面积. 目前对于零件支撑结构的研究主要集中在如何寻找支撑部位和如何添加支撑结构上. 支撑对于建造方向的优化问题, 通常和其他性能联系在一起研究, 诸如打印时间和零件表面质量, 因此诸多学者在此领域建立了多目标优化算法^[4-6].

目前各学者的研究中, 未提出在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内能较好预测成型零件表面粗糙度的模型, 往往在较小角度范围和较大角度范围的预测上存在较大误差; 未提出性能耦合下表面粗糙度和支撑面积的优化问题. FDM 增材制造中, 建造方向扮演着重要角色, 一方面影响着支撑结构的产生和成型零件的表面粗糙度; 另一方面, 建造方向的选择处于零件增材制造的前期处理阶段, 易于调整. 本文就 FDM 制造过程中不同建造方向下, 零件表面粗糙度的预测, 表面粗糙度和支撑面积这两个性能的优化, 以及多因素耦合下的多目标优化问题进行了探讨.

1 基于零件表面粗糙度的建造方向优化

由于成型表面主要受熔融沉积加工过程中的台阶效应影响, 因此成型方向和分层厚度对于表面质量的影响最为重要^[7]. 在实际制造过程中, 缩小层厚虽然可以降低表面粗糙度, 但当分层厚度减小一倍, 则理论上加工时间增加一倍. 而成型方向对于总体加工时间的影响则柔性很多. 这里主要通过图 1 所示思路研究建造方向对于表面粗糙度的影响, 建立优化算法选择最佳建造方向.

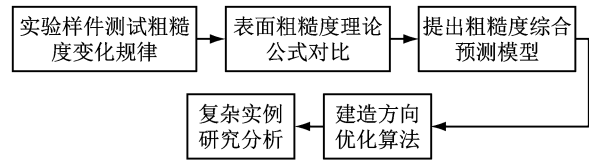


图1 技术路线

Fig.1 Research outline

1.1 FDM 成型零件表面粗糙度理论公式实验研究

使用 Truncheon 测试零件进行不同建造角度下表面粗糙度的测量验证^[8]. 考虑到打印时间和打印机的尺寸等, 设计 Truncheon 测试零件递进角度为 5° , 总共包含 19 个四方体, 每个四方体尺寸为 $10\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$, 整体尺寸为 $210\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$, 打印材料选用聚乳酸 (polylactic acid, PLA). 通过打印后的成品 (图 2) 可以看到, 成型角度在 90° 范围附近, FDM 技术成型零件表面质量较好, 随着成型角度的变化, 样件的粗糙度逐渐恶化, 整体粗糙度变化趋势符合理论计算模型中的描述.

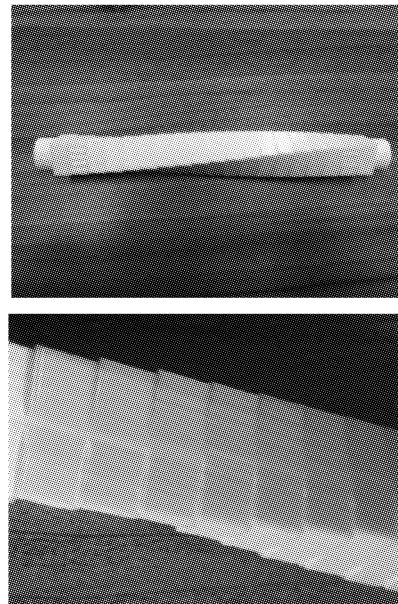


图2 Truncheon 测试样件

Fig.2 Truncheon test piece

采用探针式表面粗糙度轮廓仪, 对成型零件的表面粗糙度进行测量. 利用轮廓算术平均偏差 R_a 公式和阶梯斜高计算公式推导出的表面粗糙度理论计算公式为^[9]

$$R_a = 1\ 000 \times \frac{l_t}{2} |\cos \theta|, 0^{\circ} < \theta < 180^{\circ} \quad (1)$$

式中: l_t 为层厚; θ 为成型角度.

将成型零件的表面粗糙度测试值与理论计算公式进行对比, 见图 3, 可发现实际测得的表面粗糙度数值与理论公式得到的值存在误差: ① $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围

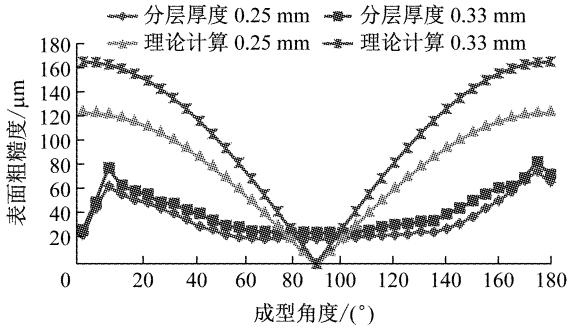


图 3 实际表面粗糙度测试结果和理论公式对比

Fig. 3 Comparison of measured results of actual surface roughness and theoretical formulas

内存在着明显的背离趋势;② 10°~70°, 110°~170° 范围内粗糙度呈现减小的趋势,但实验值明显小于理论值;③ 80°~100° 范围内理论公式在 90° 位置趋近于 0,而实际测得的数值趋于平稳,大于理论数值.

1.2 表面粗糙度预测模型的建立

对于表面粗糙度的预测模型,Campbell,

Mason,Byun 等人都做出了研究并提出了理论公式. 每个模型对于外层丝材沉积轮廓的描述都做了不同的假设,包括了矩形、椭圆形以及抛物线形等等,进而分别给出了熔融沉积表面粗糙度的预测公式. 下面将 Campbell 等^[10]、Mason^[11]、Byun 等^[12]、Ahn 等^[13]、Pandey 等^[14]、Boschetto 等^[1] 分别提出的较为著名的经验预测公式与标准测试零件在分层厚度 0.25 mm 下测得的实验数据进行对比,结果见图 4.

实验发现,不同的经验公式各有利弊,通常在某一范围内给出了较为精确的预测,而在其他成型角度,预测值和实际值往往差距过大:①Campbell 和 Boschetto 的预测公式在 0°~20° 和 160°~180° 范围内的值远大于实际测量值;②Mason 的预测公式的值普遍大于实际测量值;③Ahn 的预测公式的值普遍大于实际测量值,0°~90° 范围内的值的变化趋势与实际测量值变化趋势相背离,且在成型角度 90° 处的值出现跳跃;④Byun 的预测公式在 70°~110° 范

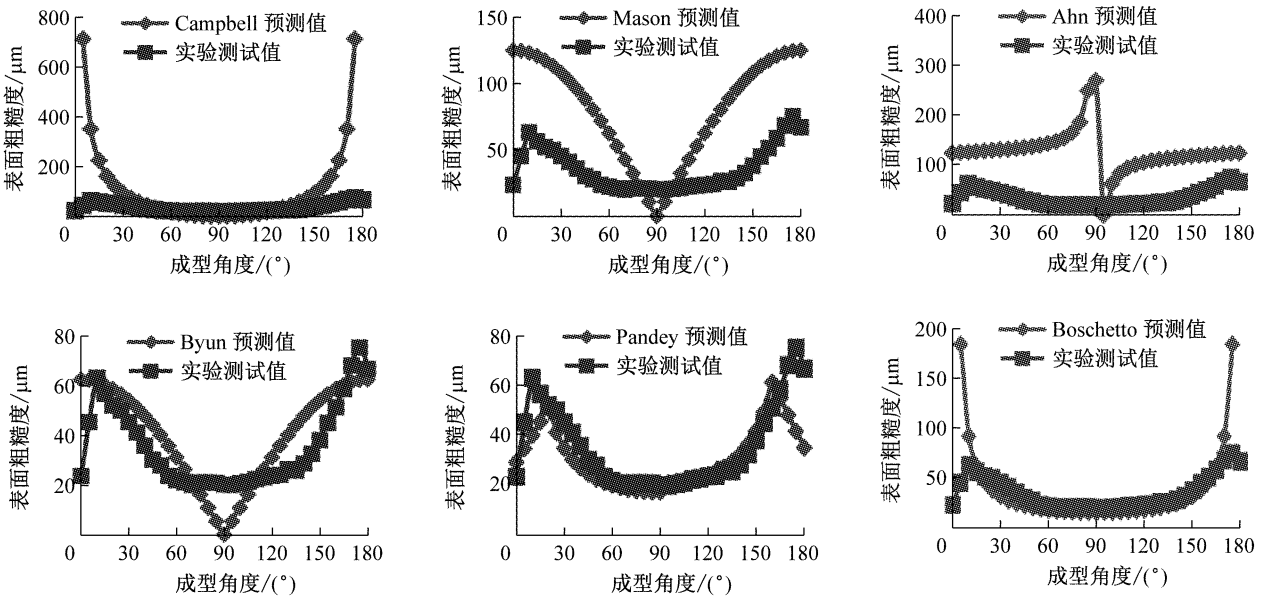


图 4 实际表面粗糙度测试结果和经验公式对比

Fig. 4 Comparison of measured results of actual surface roughness and empirical formulas

围内的值远小于实际测量值;⑤Pandey 的预测公式在 170°~180° 范围内的值大于实际测量值.

在此选用平均绝对百分误差 e_1 作为衡量预测模型好坏的标准.

$$e_1 = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - F_i}{Q_i} \right| \quad (2)$$

式中: Q_i 表示某一建造方向的实验值; F_i 为该方向的预测值; n 为建造方向的个数.

结合实验的结果,将成型角度分为 4 个范围,分

别为 0°~20°, 20°~90°, 90°~135°, 135°~180°. 通过 e_1 值对不同成型角度区间内对应的不同经验公式进行对比,见图 5. 由图 5 可以看出,在各个范围内,分别为 Pandey, Boschetto, Pandey, Byun 所建立的模型 e_1 值最低.

基于以上的分段分析,建立了新的综合粗糙度预测模型. 对于任意建造方向,其表面粗糙度计算公式如下:

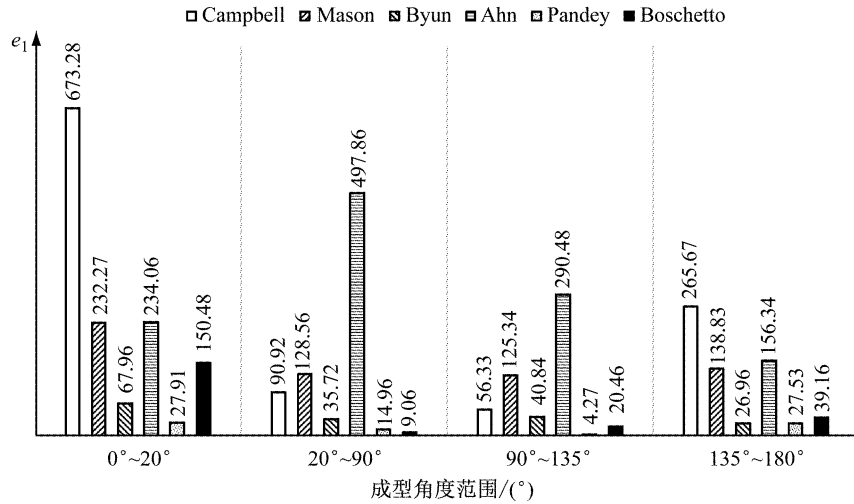


图 5 各经验公式 e_1 对比

Fig.5 Comparison of e_1 of empirical formulas

$$R_a = \begin{cases} 117.6l_t & \theta=0^\circ \\ \frac{1}{20}(90R_{a20}-70R_{a0}+(90-\theta)(R_{a0}-90R_{a20})) & 0^\circ < \theta < 20^\circ \\ 1000 \frac{l_t}{\sin \theta \cdot 9\sqrt{3}} & 20^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 84 \left| \frac{l_t}{\cos(\theta-90)} \right| & 90^\circ < \theta \leq 135^\circ \\ 1000 \frac{l_t}{4} \cos \theta - \frac{(R_1^2+R_2^2)\left(1-\frac{\pi}{4}\right) \sin \theta}{l_t} + \frac{\left((R_1^2+R_2^2)\left(1-\frac{\pi}{4}\right)\right)^2}{l_t^3} \tan \theta \sin \theta & 135^\circ < \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中:如图 6 所示, l_t 为层厚,mm; θ 为建造方向与打印表面法向量的夹角,(°); R_1 为圆角半径,对于 FDM 制造工艺取 0.045 mm; R_2 为基部圆角半径,取 0.01 mm; R_{a20} 为 θ 角等于 20° 时的粗糙度, R_{a0} 为 θ 角等于 0° 时的粗糙度。

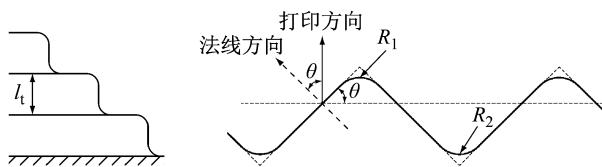


图 6 部分参数说明图^[12]

Fig.6 Illustrations of parameters^[12]

将样品实验测试值与综合预测模型进行对比,从图 7 可以看出,在 0°~180° 范围内,综合预测模型的预测值均能较好反映出实际测试值,其误差范围平均保持在 10 μ m 以内,避免了前述经验预测公式在小角度(0°~20°)及大角度(135°~180°)范围内出现的较大误差情况,能够较为全面地反映表面粗糙度的变化情况。另外由于各个角度范围内选取了 e_1 值最小情况的经验公式,故整体的 e_1 值相较于单一理论模型的值减小,同时对于分层厚度为 0.25 mm 和 0.33 mm 两种情况其一致性较好。

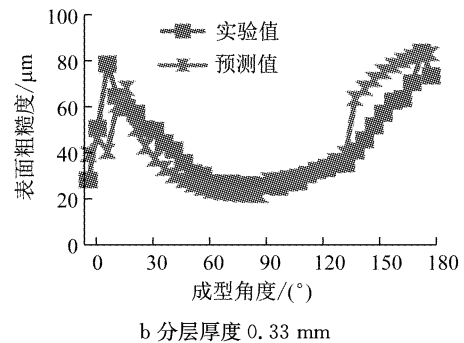
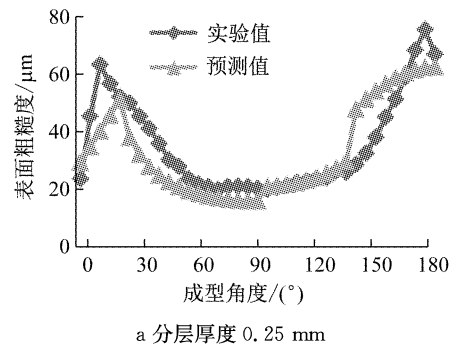


图 7 综合粗糙度预测模型与实验数据的对比

Fig.7 Comparison of comprehensive roughness prediction model and experimental data

1.3 基于功能性表面粗糙度的建造方向优化算法

面对简单的零件,角度的调整较为直观简单.而对于较为复杂的零件,需要考虑到其功能性表面的制造要求,如某些零件表面需要和其他零件表面接触,起到密封作用或是有相对滑动,这一类表面的粗糙度会有特殊标注,工艺上粗糙度必须符合一定的范围要求才能满足诸如保证密封、减小摩擦之类的工艺要求.

确定各个功能性表面后,根据每个表面对应的最佳建造方向,得到最佳建造方向集合.最佳建造方向的选择需要考虑零件特征的对称性(几何)、可加工性以及增材制造的工艺特性等因素.例如,为减小表面粗糙度及得到较好的成型效果,对于平面特征,其最佳建造方向为平行于平面法线的方向;对于柱面或孔特征,其最佳建造方向为平行于其轴线方向.另外,对于具有较为复杂几何外形(同时具备多种几何特征)的零件,选择多个几何特征作为功能性表面后,需要综合考虑的因素较多,此时可供选择建造方向集合的元素往往多于选择的功能性表面的数量.

这里使用前文中建立的表面粗糙度综合预测模型分别计算集合内各建造方向下零件整体的表面粗糙度,选择整体粗糙度最小的方向作为最优建造方向.

建立优化算法,见图 8,首先根据初始模型和功能性要求,选择功能性表面.之后通过功能性表面最优建造方向准则,确定建造方向集合.在初步得到建造方向集合之后,通过外部诸如加工条件、装配条件以及标准化的限制,进一步对建造方向集合进行筛选,得到最终集合.随后通过 MATLAB 软件开发,将集合内的建造方向分别输入程序.在一个建造方向下,遍历零件所有的光固化立体造型术文件格式(stereolithography, STL)下的三角面片,根据三角

面片中法方向信息计算该面片和建造方向的夹角,使用上文中建立的综合粗糙度预测模型对每一个三角面片进行表面粗糙度的计算.每个面片的粗糙度乘以该面片的面积,得到整体零件的粗糙度情况.最后除以零件的整体表面积求得表面粗糙度的平均值.通过比较不同建造方向下的平均表面粗糙度,得到整体粗糙度最优的建造方向.

2 耦合支撑面积及表面粗糙度的建造方向优化

在制造过程中,工程师总是希望支撑材料越少越好,一方面是考虑到节省材料的问题,因为这些支撑材料需要被去除;另一方面,外力去除支撑的过程中也会对已经成型的表面产生破坏,从而影响表面质量.

2.1 基于支撑面积的建造方向优化数学模型

支撑面积就是打印过程中需要生成支撑结构以完成打印的零件表面在成型平台的投影面积.本文针对 STL 格式的数据进行分析研究,规定当三角面片的法方向与建造方向的夹角大于 90°时,该三角面片的朝向向下.对于常用的桌面级 FDM 打印机,通常夹角大于 135°时,系统默认底部需要支撑结构,如图 9 所示.

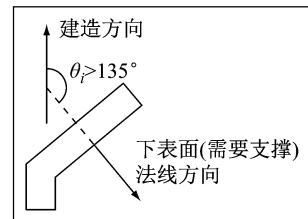


图 9 零件表面支撑结构生成条件

Fig.9 Generation conditions of supporting structures on the surface of parts

因此在建模时,以 135°角为阈值,计算 STL 模型中,法向量与建造方向夹角大于 135°的三角形面片到成型平台的投影面积的总和,其数学模型如下:

$$f_1(\theta_i) = \min \sum |A_i \cdot \cos \theta_i \cdot \delta| \quad (4)$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} \delta = 1, \theta_i > 135^\circ \\ \delta = 0, \theta_i \leq 135^\circ \\ 0^\circ < \theta_i \leq 180^\circ \end{cases}$$

式中: δ 为阈值函数; θ_i 为三角面片法方向和建造方向的夹角; A_i 为三角面片的面积.设建造方向的单位向量 $N_p = x + y + z$,建造方向 N_p 与 z 轴的夹角为 β , N_p 在 XOY 平面的投影与 x 轴的夹角为 α ,则 x ,

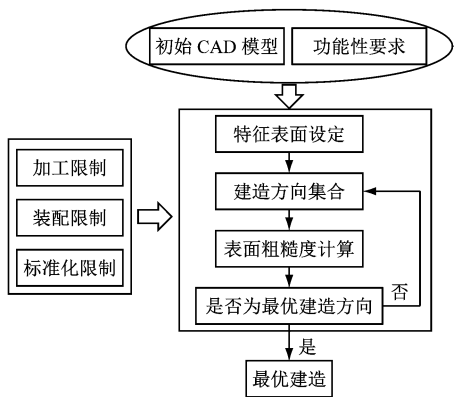


图 8 优化算法流程图

Fig.8 Flowchart of optimization algorithm

y, z 可表示为

$$\begin{cases} x = \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ y = \sin \beta \cdot \sin \alpha \\ z = \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

其中 $0 \leq \alpha \leq 2\pi, 0 \leq \beta \leq \pi$. 这样,在求建造方向时, x, y, z 三个变量就转化为 α 和 β . 通过程序遍历 STL 格式中所有三角面片的法方向,进而将建造方向转化为球坐标系的变量 α 和 β ,在 $0 \leq \alpha \leq 2\pi, 0 \leq \beta \leq \pi$ 范围内,通过步进 α 和 β 的值,来展现全部建造方向内的支撑面积变化情况.

2.2 耦合表面粗糙度和支撑面积的建造方向优化数学模型

由前述模型及实验结果可知,关于建造方向分别对于零件整体表面粗糙度和支撑面积的影响存在着以下几个问题:①由图 4、图 7 可知,虽然 0° 和 90° 的建造方向对于功能性表面的表面粗糙度最好,但是对于一个 90° 的平面,在 $60^\circ \sim 135^\circ$ 的建造方向范围内,粗糙度的增幅是不明显的,因此对于功能性表面的建造方向准则,可以允许一定角度内的偏离;②有限数量的建造方向的集合,往往可能漏掉全局最优解. 因此需要一个更加精确的方法,遍历整个建造方向空间,全局搜寻最优解;③在 FDM 制造中,以上两个性能往往存在着耦合. 提升其中某一个性能指标的同时,往往会造成另一个性能的恶化.

由于涉及到的角度变量范围较大,涉及到的数据量较多,需要进行大量的计算,同时为了在较大的角度范围内得到最优解,避免陷入局部较小值,可以使用遗传算法来解决. 对于第三个问题,同时考虑到两个质量因素,由于涉及两个目标函数,因此该问题需转化为多目标优化问题,根据不同目标的重要性,可以得到一组最优解集.

(1) 以支撑面积为目标的数学模型,即为前述公式(4).

(2) 以表面粗糙度为优化目标的数学模型

$$f_2(\theta) = \min \sum A_i C_i \quad (6)$$

式中: C_i 为三角面片的粗糙度; A_i 为三角面片的面积.

在此引入权重 ω_i , 将多目标函数整合为一个单目标函数.

$$\min f(x) = \sum \omega_i f_i(x) \quad (7)$$

对于权重的选择,主要依据各个目标的重要性,需要和相关设计人员进行沟通. 考虑到支撑面积与表面粗糙度在此多目标化问题中的同等重要性,因此分别将两目标函数的权重设为 0.5. 另外, f_1 和 f_2

的量纲不同, f_2 的计算值远大于 f_1 . 由于 $|\cos \theta|$ 取值区间为 $[0, 1]$, 因此这里对表面粗糙度 C_i 进行归一化处理.

$$C_i = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (8)$$

式中: C_i 为三角面片的粗糙度,由前述综合粗糙度预测模型计算得出; C_{\max}, C_{\min} 分别为粗糙度最大和最小的两种情况,对于 0.25 mm 的分层厚度,粗糙度最大值和最小值分别为 65.0 μm 和 16.5 μm .

3 综合算例

建立零件模型对上述提出的优化算法及数学模型进行实例运算. 零件为带有不同特征的多表面零件体,见图 10,包括两个面分别带有通孔的呈 L 型的底座和与底面夹角为 60° 的圆柱台阶. 打印材料为 PLA,打印温度为 $180 \sim 200^\circ\text{C}$,打印速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

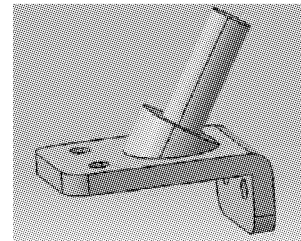


图 10 零件模型

Fig.10 Model of the part

在测试不同建造方向下的支撑面积以及表面粗糙度时,需要进行大量的计算,因此考虑使用遗传算法来解决该问题. 遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的寻优方法,通过筛选对环境适应强的基因进行保留,进而基因杂交产生新的后代,保证了适应度较高的基因存活下来. 同时为了防止种群的过早成熟,通过一定程度的变异,将新的基因带入种群中,丰富种群多样性. 在标准遗传算法中,主要运行参数包括数据结构、初始种群个数、进化代数、适应度、选择算子、交叉概率、变异概率等.

3.1 基于功能性表面建造方向优化

选取 L 型底座上表面及圆柱台阶圆柱面作为特征表面,见图 11. 通过 MATLAB 软件读取零件 STL 格式文件. 该零件的三角片个数 348 个,零件整体表面积 $5\,844 \text{ mm}^2$. 基于确定的功能性表面,为使得建造方向的选择最大程度考虑零件几何特征、增材制造工艺特性以及可加工性等因素,最终确定建造方向集合,见表 1. 考虑到零件在建造平台上的放置

稳定性,最大程度减小支撑面积,共选取 5 个建造方向,与此同时,方向 1 的选择考虑到底座上表面这一特征面的制造特征(建造方向垂直于平面),方向 2 的选择考虑到了避免底座下部所需的大面积支撑,方向 3 的选择同方向 2,方向 4 的选择同时避免了 L 形台阶垂直边所需支撑,方向 5 的选择考虑到圆柱形台阶圆柱面这一特征面的制造特征(建造方向平行于圆柱轴线),其中坐标轴方向定义如图 12a 所示.实例中设置零件分层厚度为 0.25 mm.使用前文所建立的综合粗糙度预测模型,计算可得各个建造方向下的平均表面粗糙度的值,见表 2.其中,建造方向 2 使得整体表面粗糙度最小,选择其作为基于功能性表面的最优建造方向.

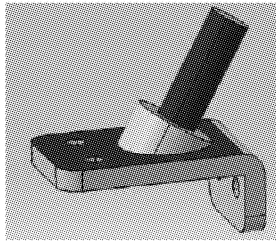


图 11 零件特征面选择

Fig.11 Selection of part characteristic surface

表 1 最终建造方向集合

Tab.1 Set of construction directions

方向	方向 1	方向 2	方向 3	方向 4	方向 5
向量	(0,0,1)	(1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,1/2,√3/2)

表 2 不同建造方向下零件整体表面粗糙度

Tab.2 Overall surface roughness of parts in different construction directions

方向	方向 1	方向 2	方向 3	方向 4	方向 5
R_a	28.42	27.16	27.75	27.86	27.53

由于计算值为整体零件的平均粗糙度,难以反映零件各个表面的粗糙度情况.为了便于设计人员或者工程师直观了解零件各个表面质量情况,通过嵌入零件粗糙度计算模型程序,开发了表面粗糙度可视化程序,将粗糙度的变换情况直观呈现.可以看到,如图 12 所示,在不同的建造方向下,零件的不同表面粗糙度将随之变化.

通过一个球面零件来验证该算法的可靠性,如图 12 所示.该零件包含 8 424 个点,三角型面片数为 2 808 个.通过运行自主开发的程序,图像较为直观地反应了整体零件粗糙度的变动情况,可以看到零件的表面质量变化趋势符合之前的综合粗糙度预测模型的预测值.由于球形中部面片的成型角度约为

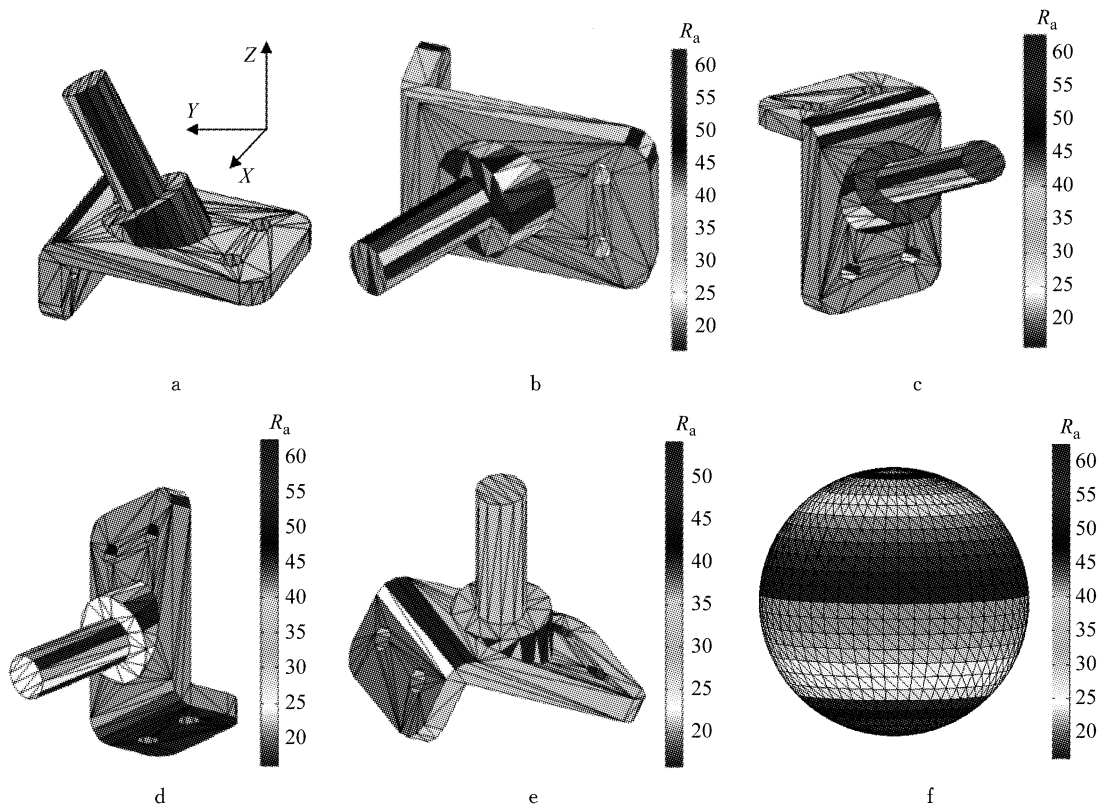


图 12 不同建造方向下零件表面粗糙度可视图及球面零件表面粗糙度验证图

Fig.12 Visual chart of surface roughness of parts and verification chart of surface roughness of spherical parts in different construction directions

90°,因此表面质量最好,随着三角面片成型角度逐渐远离 90°,表明粗糙度逐渐增加. 对于上、下半球,可以看到表面质量不是简单地对称,由于上半球不需要支撑,因此表面质量相较于下半球较好,反映了支撑对于零件表面粗糙度的影响. 实例证明该程序运行稳定,兼容性强,可运用于大多数零件的 STL 文件.

3.2 基于支撑面积的建造方向优化

针对上述零件模型,使用基于支撑面积的建造方向优化数学模型,分析支撑面积的大小随模型中参数 α 和 β 的变动情况. 如图 13 所示,可以发现,存在两个建造方向,即 (α, β) 对应于 $(90^\circ, 45^\circ)$ 以及 $(158^\circ, 89^\circ)$ 时使得支撑面积取最小值.

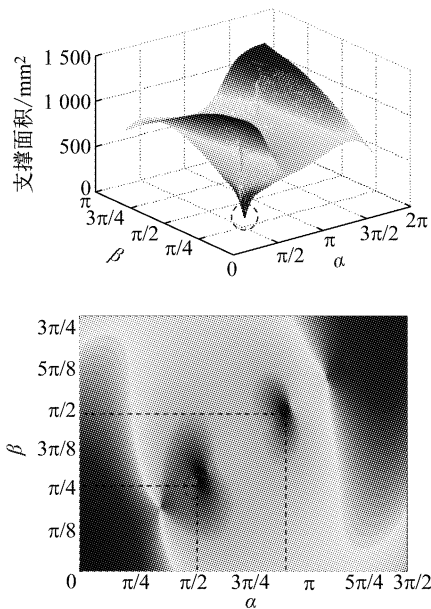


图 13 建造方向变化对支撑面积的影响
Fig. 13 Influences of construction direction on supporting area

使用遗传算法,进行以支撑面积为目标的建造方向单目标优化. 根据遗传算法结果,如图 14 所示,从最原始的种群开始,经过 100 次的遗传迭代,支撑面积趋于稳定,从 70 代以上收敛于 9. 242 2,对应 N_p 方向为 $(0. 088 5, 0. 704 5, 0. 707 0)$. 通过公式 (5),可得 α 和 β 分别为 85° 和 45° ,与图 13 的情况较为一致.

3.3 耦合表面粗糙度和支撑面积的建造方向优化

为直观反映两个性能耦合情况,将表面粗糙度模型(图 15)与支撑面积模型(图 13)进行对比(图 15 中框选出的范围为对应支撑面积与表面粗糙度最低处),可以看到支撑表面最小和粗糙度最小所对应的 α 和 β 存在差异. 因此在多目标优化中,需要权

衡两者的重要程度.

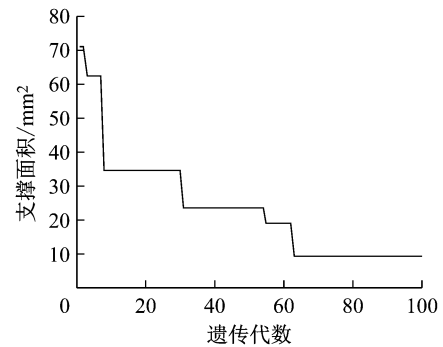


图 14 以支撑面积为优化目标的单目标优化遗传算法结果
Fig. 14 Result of GA with supporting area as single-optimization objective

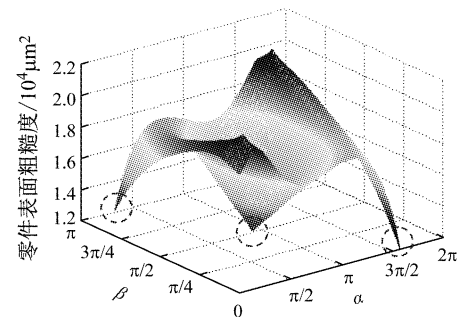


图 15 建造方向变化对表面粗糙度的影响
Fig. 15 Influences of construction direction on surface roughness

针对上述零件模型,根据多目标优化算法模型,使用 MATLAB 编写含有权重的表面粗糙度和支撑面积的双目标优化遗传算法. 该零件模型有 348 个三角面片,设置分层厚度 0. 25 mm.

通过表 3 所示的优化结果可以看出,在使用有限数量的建造方向集合时,得到的表面粗糙度并不是全局最优的情况. 在使用单目标遗传算法进行表面粗糙度优化时,整体的表面粗糙度可以进一步下降,遗传算法通过全局搜索建造方向,使得整体表面粗糙度降为最低. 使用单目标遗传算法进行支撑面积优化时,得到的建造方向使支撑面积取得最小值,但是整体表面粗糙度反而恶化,这反映了前文提到的支撑面积和表面粗糙度的性能耦合情况. 使用带有权重的多目标遗传算法,最终得到的建造方向使得表面粗糙度接近于全局最小的值,同时支撑面积也在可接受的范围内,实现了双目标同时优化. 可以看到,在权重均为 0. 5 的情况下,建造方向趋近于单目标优化粗糙度的情况,这说明,虽然粗糙度及支撑面积对于建造方向的选择处于同等重要地位,同时具有耦合性影响,但粗糙度对建造方向选择的影响

程度更大.

表 3 遗传算法优化结果

Tab.3 Optimization result of GA

优化方法	x	y	z	整体表面粗糙度/ μm	支撑面积/ mm^2
优化前	1	0	0	158 778	60.38
单目标优化(表面粗糙度)	-0.608 4	0.674 3	0.418 6	136 485	30.83
单目标优化(支撑面积)	0.088 5	0.704 5	0.707 0	152 600	9.24
多目标优化(表面粗糙度及支撑面积)	-0.557 5	0.688 9	0.463 4	137 310	23.47

4 结论

本文以 FDM 技术为基础,研究了建造方向对于零件表面粗糙度和零件支撑面积这两个目标的影响,以及制造过程中这两个性能的耦合下的优化.

(1) 在表面粗糙度方面,通过 PLA 材料制造的 Truncheon 样件测试不同成型方向下的表面粗糙度,分析了理论模型和实际工况下的差异.结合前人的经验公式,建立了符合实际情况的粗糙度综合预测模型.对于复杂的多面体零件,通过选择功能性表面,得出建造方向集合,并对集合内每个建造方向下的零件整体平均表面粗糙度进行计算,通过对比不同建造方向下的零件平均粗糙度来选择最优的建造方向.

(2) 在零件支撑方面,建立了基于支撑面积的建造方向优化数学模型.使用遗传算法进行单目标优化求解,得到制造过程中支撑面积最小的制造方向,但表面粗糙度反而变大.最后,针对支撑面积和表面粗糙度的耦合问题,将这两个目标联立,建立多目标优化模型,使用遗传算法来寻求全局最优解,实现双目标耦合下的同时优化.

在表面粗糙度方面,实际打印过程中,除了建造方向之外,打印的层厚,速度和冷却温度都会直接或间接地影响表面质量.在支撑面积方面,影响因素有很多,如冷却温度和打印速度等.包括这些因素的耦合问题等,都是值得未来继续研究的.

参考文献:

- [1] BOSCHETTO A, GIORDANO V, VENIALI F. Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9): 945.
- [2] AHN D, KWEON J H, KWON S, *et al.* Representation of surface roughness in fused deposition modeling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15): 5593.
- [3] PANDEY P M, THRIMURTHULU K, REDDY N V. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(19): 4069.
- [4] JIN Yuan, HE Yong, FU Jianzhong. Support generation for additive manufacturing based on sliced data [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9): 2041.
- [5] 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.
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.
- [6] 刘厚才, 廖艳春. 基于 Pareto 最优解的零件制作方向优化研究[J]. 工程图学学报, 2011, 32(1): 157.
LIU Houcai, LIAO Yanchun. Part building orientation optimization based on Pareto optimal solutions[J]. Journal of Engineering Graphics, 2011, 32(1): 157.
- [7] 汪绍兴. 基于 PLA 丝材的 FDM 试件机械性能分析及优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
WANG Shaoxing. Analysis and optimization of the mechanical properties for FDM specimens based on PLA filament [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [8] REEVES P E, COBB R C. Reducing the surface deviation of stereolithography using in process techniques [J]. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3(1): 20.
- [9] 李生鹏. 熔融沉积成型零件精度及机械性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
LI Shengpeng. Research on accuracy and mechanical property for fused deposition modeling part [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [10] CAMPBELL R I, MARTORELLI M, LEE H S. Surface roughness visualization for rapid prototyping models [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(10): 717.
- [11] MASON. Multi-axis hybrid rapid prototyping using fusion deposition modeling [D]. Ontario: Ryerson University, 2006.
- [12] BYUN H S, LEE K H. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multicriteria decision making [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(1): 69.
- [13] AHN D, KIM H, LEE S. Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(2): 664.
- [14] PANDEY P M, REDDY N V, DHANDE S G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review [J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5): 274.