

熔融沉积式 3D 打印路径优化算法研究

韩兴国^{1,2} 宋小辉^{2,3} 殷 鸣¹ 陈海军¹ 殷国富¹

(1. 四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065; 2. 桂林航天工业学院机械工程学院, 桂林 541004;
3. 南安普顿大学环境与工程学院, 南安普顿 SO17 1BJ)

摘要: 针对目前 3D 打印加工耗时长、生产效率低的特点, 提出一种熔融沉积式 3D 打印路径优化算法。针对部分零件切片轮廓封闭曲线多的情况, 提出一种基于蚁群算法的轮廓路径规划方法, 合理规划各轮廓的打印顺序。采用平行扫描对切片截面进行填充, 分析扫描线角度对打印效率和打印质量的影响, 确定最优扫描线角度, 将填充区域进行区域划分, 提出了一种基于四点法的区域合并算法, 并采用临近法对合并区域打印次序进行优化。运用该算法进行零件打印实验, 与传统的平行扫描法比较, 3 组零件的单层轮廓路径长度分别缩短了 19.5%、12.5%、10.7%, 打印时间缩短了 12.6%、11.6%、8.9%, 打印零件的尺寸精度和表面质量均有所提高, 结果表明, 该算法健壮有效并且打印效率更高。

关键词: 3D 打印; 熔融沉积; 路径规划; 蚁群算法; 区域合并

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0393-09

Path Optimization Algorithm of 3D Printing Based on Fused Deposition Modeling

HAN Xingguo^{1,2} SONG Xiaohui^{2,3} YIN Ming¹ CHEN Haijun¹ YIN Guofu¹

(1. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China
2. College of Mechanical Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China
3. Faculty of Engineering and Environment, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK)

Abstract: In view of faults of the current 3D printing technology such as the long processing time and low production efficiency, a path optimization algorithm of 3D printing based on fused deposition modeling was developed. Because the slice contour of some printing parts was comprised of many closed curves, the starting point of each closed curve was determined by the nearest neighbor method and the 3D printing contour path planning was transformed into the traveling salesman problem. A contour path planning algorithm based on ant colony algorithm was developed in order to plan printing sequence of the contour paths reasonably. Parallel scanning method was adopted for filling the slice cross-section. Influence on printing efficiency and quality for different scanning angles was analyzed and optimal scanning angle was selected. The scanning area was divided into different areas and a region merging algorithm based on four-point method was developed. The printing sequence of the different areas was optimized by the nearest neighbor algorithm, which improved the scanning efficiency and molding quality. The experiment of printing parts was done by means of the path optimization algorithm. Compared with the traditional parallel scanning method, single layer contour path scanning lengths of the three parts were decreased by 19.5%, 12.5% and 10.7%, the printing time was decreased by 12.6%, 11.6% and 8.9% and the dimensional accuracy and surface quality were improved. The result showed that the path optimization algorithm was robust and effective and its efficiency was high.

Key words: 3D printing; fused deposition; path planning; ant colony algorithm; region merging

收稿日期: 2017-10-25 修回日期: 2017-12-27

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAF27B01)、国家自然科学基金项目(51705094)、四川省科技计划项目(2015GZ0036、2016GZ0195)和广西高校中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB535)

作者简介: 韩兴国(1981—),男,博士生,桂林航天工业学院副教授,主要从事机电一体化技术研究,E-mail: hanxingguo2004@163.com

通信作者: 殷国富(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事 CAD/CAM 和智能制造及装备研究,E-mail: gfyin@scu.edu.cn

0 引言

熔融沉积式 3D 打印凭借高温将材料融化成液态,通过打印头挤出后固化,其材料主要是 ABS 和聚碳酸酯 PC 等^[1]。3D 打印是一个由点到线、由线到面、由面到三维实体逐层累积的过程,需进行大量的路径扫描工作,打印路径关系到零件打印效率和表面质量^[2],因此,对 3D 打印路径进行规划有广泛的应用需求,具有重要的理论价值和工程应用背景。

3D 打印路径规划包含轮廓路径规划和填充路径规划,目前对轮廓路径规划的研究较少,填充路径规划方法较多,主要有平行扫描^[3-5]、星形发散扫描^[6]、分形扫描^[7-8]、螺旋线扫描^[9]和基于 voronoi 图的扫描^[10]等。平行扫描法又称为 zigzag 法,应用极其广泛,为了提高 3D 打印的生产效率,许多学者提出了一些与之相关的路径规划算法^[11-18]。

文献[11-18]提出的路径规划算法在一定程度上提高了 3D 打印效率和成型质量,但都有一定的局限性,未对填充子区域的合并和打印次序进行阐述,打印效率仍有进一步提升的空间,且对轮廓路径规划的研究较少,当打印零件截面轮廓包含的封闭环多且复杂时,轮廓路径规划不合理会影响打印效率。针对以上问题,本文提出一种熔融沉积式 3D 打印路径优化算法,通过最优扫描线角度选取、填充子区域合并和合并区域打印序列优化等一系列算法对填充路径合理规划,此外,提出一种基于蚁群算法的轮廓路径规划方法,合理规划各轮廓的打印顺序。

1 方法概述

3D 打印是对零件逐层打印,零件每层切片轮廓的形状可能各不相同^[19]。某零件切片后的截面图如图 1 所示,该截面包含 9 个封闭环,对层面轮廓各封闭环的打印次序进行规划,即轮廓路径规划,各封闭环之间为零件实体,以直线方式对各封闭环之间的区域进行填充,并对填充路径进行规划,3D 打印的路径规划主要包括轮廓路径规划和填充路径规划,为了防止零件发生变形和翘曲,先进行轮廓打印,后进行填充打印。对零件的轮廓路径和填充路径进行合理、有效的规划,对于提高打印效率和打印质量具有重要的意义。本文所述路径规划方法实施步骤如下:

- (1)对打印零件进行切片,形成层面轮廓,基于蚁群算法对层面轮廓中的各封闭环的打印次序进行规划。
- (2)综合考虑效率因素和打印质量,确定各切片层填充区域扫描线的最优角度。

- (3)将填充区域进行子区域划分,采用四点法将能够连续打印的子区域进行合并。
- (4)采用临近算法对合并后的各区域打印次序进行优化。

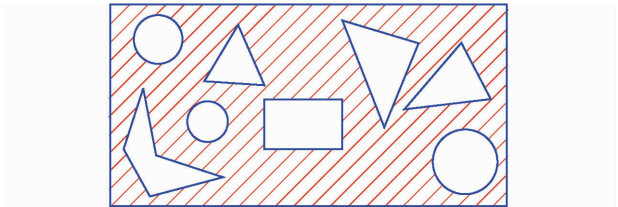


图 1 某零件截面轮廓图

Fig.1 Skeleton map of part cross-section

2 轮廓路径规划

对零件进行切片,得到各切片层的截面图,截面轮廓是由 n 条封闭曲线(封闭环)构成,轮廓路径规划就是对封闭环逐个打印。每个封闭环需确定一个打印起点,也是终点,整个截面中有 n 个起始点,不难看出,轮廓的路径规划问题可归结为经典的旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP),即在 n 个起始点中寻找一条最优路径,使每个起始点只被穿越一次,这样可以减少零件的打印时间。

2.1 封闭环起始点确定

确定起始点的原则是每个封闭环仅有一个起始点且各封闭环的起始点之间的距离最小,本文采用一种改进的近邻法确定起始点。假设截面轮廓包含 n 个封闭环, $Loop = \{Loop_1, Loop_2, \dots, Loop_n\}$, 轮廓中所有封闭环由 m 个顶点构成,顶点集为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 任一封闭环的顶点集为 $P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ik_i}\}$, 其中 $m = k_1 + k_2 + \dots + k_n$, 确定起始点的具体步骤如下:

- (1)取顶点集 P 中第 1 个顶点 P_{11} 作为封闭环 P_1 的起始点,令 $S_1 = P_{11}$,并将 P_1 从 P 中去除。
- (2)依次求解顶点 S_1 到 P 中各点的距离,将距离顶点 S_1 最近的顶点 $P_{ij} (1 \leq j \leq k_i)$ 取出,令 $S_2 = P_{ij}$,并将 P_i 从 P 中去除。
- (3)按照步骤(2)的思路,依次求解顶点 S_i 到 P 中各点的距离,找到距离顶点 S_i 最近的顶点作为 S_{i+1} ,依次遍历所有的未访问封闭环顶点集,直到在 P 中的最后 1 个封闭环中找到 S_n ,依次求出 $S_3, S_4, \dots, S_n$,可得起始点集 $C_1 = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。
- (4)依次求解 C_1 中相邻两点间的距离,并求和 $d_1 = S_1S_2 + S_2S_3 + \dots + S_{n-1}S_n + S_nS_1$ 。
- (5)依次选取 P 中的顶点作为相对应封闭环的起始点,按照步骤(1)~步骤(4)的思路,可依次求解出 m 个起始点集 C_r ,并求出相对应的 d_r ,其中, $1 \leq r \leq m$ 。

(6) 比较 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 之间的大小, 将最小的 d_r 对应的 C_r 作为最优的起始点集。

其中, 若封闭环由非直线的曲线构成, 可取该封闭环的几何重心作为该封闭环的伪顶点, 即该封闭环只有一个顶点, 求过伪顶点和前一个封闭环的起始点的直线, 该直线和封闭环的交点作为该封闭环的起始点。

2.2 基于蚁群算法的轮廓路径规划

蚁群算法是 20 世纪 90 年代初提出的一种模拟进化算法, 主要用于解决组合序列优化问题, 典型的应用案例就是旅行商问题^[20]。

用改进的近邻法确定各封闭环的起始点后, 将各环起始点作为待访城市, 假设蚂蚁群体中蚂蚁的个数为 u , 封闭环的个数为 v , 封闭环 i 的起始点与封闭环 j 的起始点之间的距离为 $d_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, v)$, t 时刻封闭环 i 起始点与封闭环 j 起始点连接路径上的信息素浓度为 $\tau_{ij}(t)$, 蚂蚁 $w (w = 1, 2, \dots, u)$ 根据各封闭环起始点连接路径上的信息素浓度决定其下一个访问的城市, 从封闭环 i 的起始点转移到封闭环 j 的起始点的概率公式为

$$P_{ij}^w = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{s \in allow_w} (\tau_{is}(t))^\alpha (\eta_{is}(t))^\beta} & (s \in allow_w) \\ 0 & (s \notin allow_w) \end{cases}$$

(1)

其中 $\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}}$

式中 $\eta_{ij}(t)$ ——启发函数
 $allow_w$ ——蚂蚁 w 待访封闭环起始点的集合
 α ——信息素重要程度因子
 β ——启发函数重要程度因子

当所有蚂蚁完成一次循环后, 各封闭环起始点连接路径上的信息浓度需要重新更新, 即

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \\ \Delta\tau_{ij} = \sum_{w=1}^u \Delta\tau_{ij}^w \end{cases}$$

(2)

式中 $\Delta\tau_{ij}^w$ ——第 w 只蚂蚁在封闭环 i 的起始点与封闭环 j 的起始点之间的路径上释放的信息素浓度
 $\Delta\tau_{ij}$ ——所有蚂蚁在封闭环 i 的起始点与封闭环 j 的起始点之间的路径上释放的信息素浓度之和
 ρ ——信息素的挥发程度系数, $0 < \rho < 1$

针对蚂蚁释放素问题, 采用 ant cycle system 模型, 在该模型中, $\Delta\tau_{ij}^w$ 的计算公式为

$$\Delta\tau_{ij}^w = \begin{cases} \frac{Q}{L_w} & (i \rightarrow j) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

(3)

式中 Q ——蚂蚁循环一次所释放的信息素总量, Q 为常数

L_w ——第 w 只蚂蚁经过路径的长度

综上所述, 采用蚁群算法确定各封闭环打印次序的最优解, 主要包括初始化参数、构建解空间、更新信息素和判断是否终止 4 个步骤, 其具体步骤如图 2 所示。

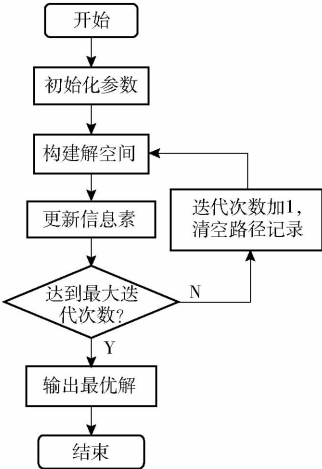


图 2 蚁群算法求解封闭环打印次序最优解的步骤
Fig.2 Steps of solving optimal solution of closed loops printing order based on ant colony algorithm

2.3 轮廓路径规划实例

对图 1 中的零件进行轮廓路径规划, 其截面包含 9 个封闭环, 采用改进的近邻法确定各封闭环的打印起始点, 采用蚁群算法寻找打印各封闭环的最优次序, 设蚂蚁数量为 50, 迭代次数为 200, 可得最优的轮廓路径规划如图 3 所示。图 4 给出了用蚁群算法求解轮廓路径的平均轨迹长度和最短轨迹长度。

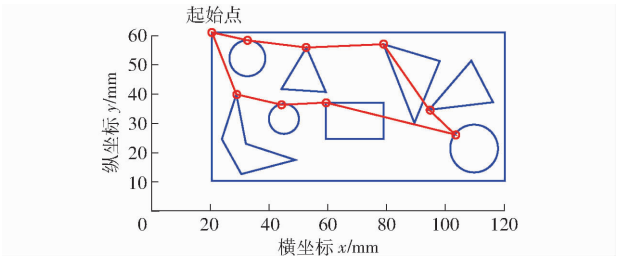


图 3 基于蚁群算法的轮廓路径规划图
Fig.3 Contour path planning of part based on ant colony algorithm

将图 1 所示零件按传统的平行扫描路径规划方法 (zigzag 法) 进行轮廓路径规划, 其轮廓路径规划如图 5 所示。将本文提出的方法与 zigzag 法进行比较, 本文方法的每层轮廓路径长度为 196.81 mm,

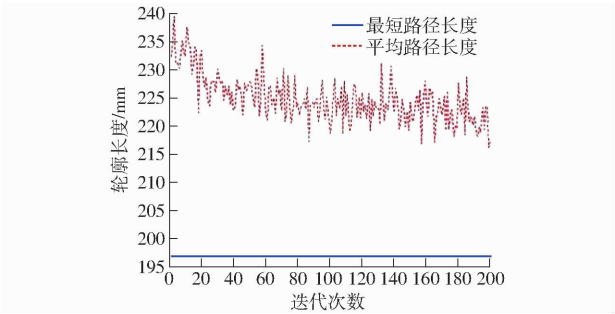


图4 基于蚁群算法的轨迹长度比较

Fig. 4 Trajectory length comparison of ant colony algorithm

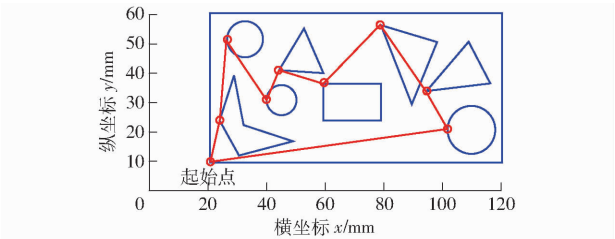


图5 基于zigzag法的轮廓路径规划

Fig. 5 Contour path planning of part based on zigzag

zigzag 法的轮廓路径长度为 244.45 mm,轮廓路径长度缩短了 19.5%。

3 填充路径规划

填充路径规划是在零件的某切片截面层上封闭轮廓间区域的填充次序进行合理规划,本文采用平行扫描填充内部轮廓,在边界线内往复扫描,平行扫描示意图如图 6 所示。影响平行扫描法打印质量和效率的主要因素有扫描线角度选取、填充子区域合并和合并区域打印序列优化,这 3 个影响因素决定了 3D 打印的效率和精度。

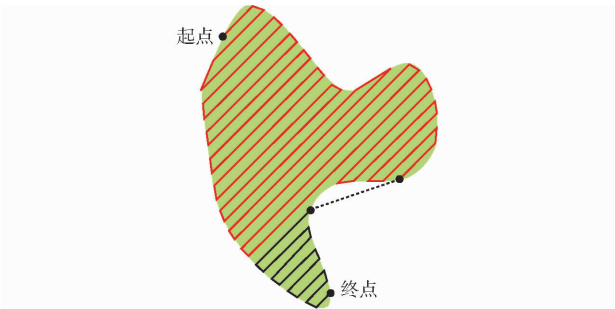


图6 平行扫描路径生成示意图

Fig. 6 Scheme of path generation based on direction-parallel scanning method

3.1 选取最优的扫描线角度

平行扫描的路径主要由直线构成,各直线相互平行,每条直线路径结束后,打印喷头停止运动,直线运行至下一条扫描线的起点,继续直线扫描打印,循环往复,如图 7 所示。打印过程中,打印喷头必然反复启停,不能无间断运动,在拐角处只能低速运行并且存在启停和加减速问题,影响打印效率且这些

区域易引起零件变形、翘曲等问题^[11]。为减少这些问题,须减少平行扫描中拐角的存在,而拐点的数量和扫描线的角度存在必然的联系。

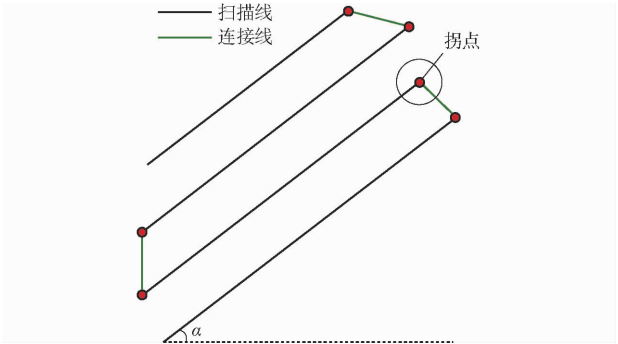


图7 直线扫描路径

Fig. 7 Direction-parallel scanning method

假设零件的某一切片轮廓由封闭曲线 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $\cdots$ 、 $f_n(x)$ 构成,假设扫描线角度为 $\alpha(0 \leq \alpha \leq \pi)$,则第 1 条扫描线的直线方程为

$$g_1(x) = kx + b_1 \tag{4}$$

其中 $k = \tan\alpha$

式中 b_1 ——第 1 条扫描线截距

k ——扫描线斜率

第 m 条扫描线的方程为

$$g_m(x) = kx + b_1 + (m - 1)b \tag{5}$$

式中 b ——两相邻扫描线之间的距离,即打印头喷嘴直径

直线 $g_1(x)$ 分别与 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $\cdots$ 、 $f_n(x)$ 的交点数构成集合 $U_1 = \{u_{11}, u_{12}, \cdots, u_{1n}\}$,同理, $g_m(x)$ 分别与 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $\cdots$ 、 $f_n(x)$ 的交点数构成集合 $U_m = \{u_{m1}, u_{m2}, \cdots, u_{mn}\}$,可得第 1 条扫描线和第 m 条扫描线于各封闭曲线交点数之和为

$$U_{sum1} = u_{11} + u_{12} + \cdots + u_{1n} \tag{6}$$

$$U_{summ} = u_{m1} + u_{m2} + \cdots + u_{mn} \tag{7}$$

扫描线所构成的直线方程和封闭曲线 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $\cdots$ 、 $f_n(x)$ 的交点即为平行扫描的拐点位置,假设在打印零件的一个切片层面所构成的封闭空间中有 m 条扫描线,则该层面拐点数总共为 U_{sum} ,即

$$U_{sum} = U_{sum1} + U_{sum2} + \cdots + U_{summ} \tag{8}$$

当扫描线的角度 α 取不同值时,拐点数也不同,若打印效率最高,需拐点数为最小,即

$$U_{summin} = \min(U_{sum}(\alpha)) \quad (0 \leq \alpha \leq \pi) \tag{9}$$

拐点数数量不仅影响打印效率,对打印质量也有影响。由于扫描线在拐角处频繁的起停、加速和减速,容易在打印零件的边缘处造成打印材料熔融沉积时分布不均,表面光滑度较差,在边缘处,有的位置材料熔融沉积 2 次,有的位置无材料沉积,如图 8 所示。重复沉积区域和无沉积区域面积相等,与拐

角的角度有关,如图 9 所示,具体推导如下

$$S = S_{\triangle OCA} + S_{\triangle OCB} - S_{OAB} \tag{10}$$

式中 S ——重复沉积或无沉积区域面积

$S_{\triangle OCA}$ ——三角形 OCA 的面积

$S_{\triangle OCB}$ ——三角形 OCB 的面积

S_{OAB} ——扇形 OAB 的面积

根据平面几何知识,可得

$$S = r^2 \cot \frac{\theta}{2} - \left(\frac{\pi - \theta}{2\pi} \pi r^2 \right) = r^2 \left(\cot \frac{\theta}{2} + \frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \tag{11}$$

式中 r ——打印喷头半径

θ ——扫描线拐角的角度

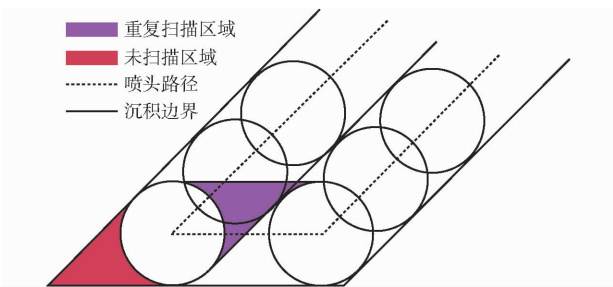


图 8 拐角处材料沉积示意图

Fig. 8 Deposition scheme at corners

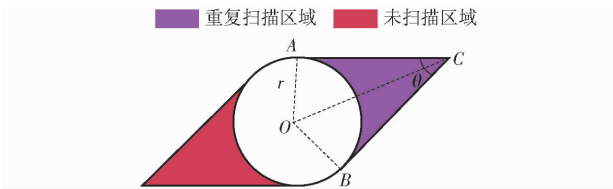


图 9 拐角处的材料沉积情况分析

Fig. 9 Deposition analysis scheme at a corner

根据以上分析可知,拐角的数量越多,拐角处重复扫描区域和未扫描区域越多,表面质量越粗糙,并且在拐角处由于电机反复起停和加减速,导致零件打印时间变长,因此控制拐角数量,对打印质量和效

率具有重要的影响。扫描线与截面交点数和拐点数量相等,扫描线角度不同,拐点数量不同。图 6 零件在不同角度下的截面扫描图如图 10 所示。

假设扫描线宽度(喷头直径)为 0.4 mm,对图 1 和图 6 中的切片截面轮廓进行扫描线角度优选,拐点个数与扫描线角度关系如图 11 所示,不难看出,图 1 所示零件在扫描线角度为 0°(或 180°)时,拐点个数最少;图 6 零件在扫描线角度为 90°时,拐点个数最少。

为实现应力分散,选取相邻两层之间的扫描线相互垂直,因此,本文提出的扫描线角度为每两层选取一次。此外,本文算法采用完整的区域填充扫描方式,实际应用中也可采用镂空内部加支撑的扫描方式。

3.2 扫描区域的合并

扫描线角度确定后,扫描线与切片轮廓之间形成一些封闭的区域,每个区域由一系列的扫描线往复扫描构成,每个区域包含 4 个关键点,即该区域第一条扫描线的起点和终点、最后一条扫描线的起点和终点。3D 打印过程中,需对每个区域逐一扫描,扫描策略是先扫描临近区域,后扫描非临近区域,非临近区域的扫描,需要打印喷头进行一段空行程运动,降低了效率,所以在打印时可对连续打印的临近区域进行合并,合并后的区域可以一次扫描完毕,连续打印且无空行程运动。本文采用四点法对一些相邻子区域进行合并。

四点法:若某子区域的最后一条扫描线的终点是另一子区域第一条扫描线的两个端点之一,可将该端点作为另一子区域的起点,将这两个子区域合并。基于四点法的扫描区域的合并算法如下:

(1)扫描线角度确定后,假设打印零件切片截面图被划分为 n 个子区域。

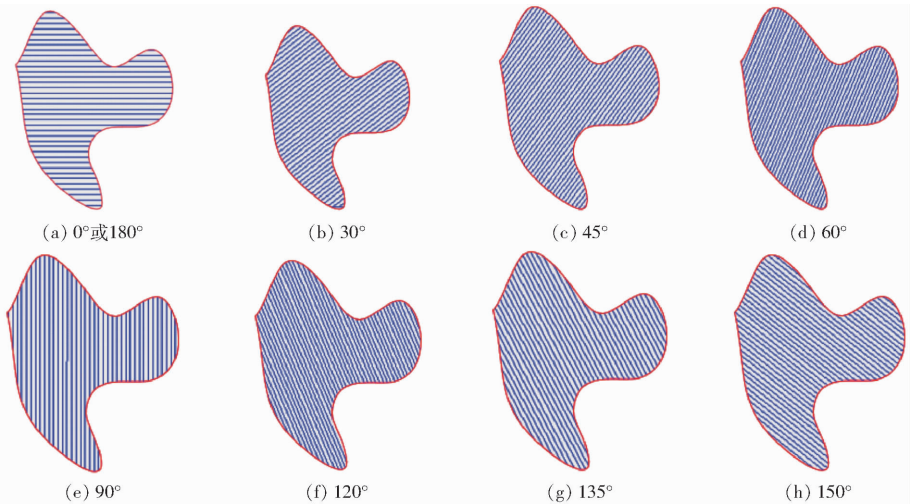


图 10 不同角度下的零件(图 6)扫描图

Fig. 10 Tool-path of part (as shown in Fig. 6) with different inclinations

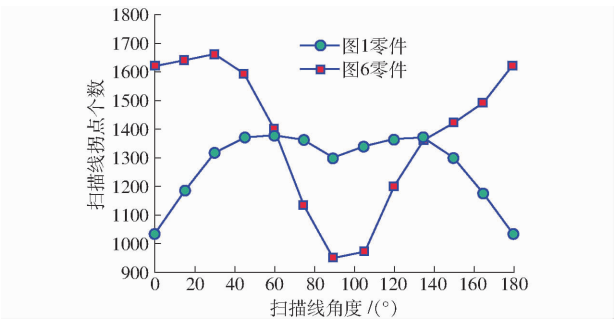


图 11 拐点数和扫描线角度关系

Fig. 11 Relationship between corner quantity and scanning line angle

(2) 每个子区域包含 4 个关键点, 即该区域第一条扫描线的起点和终点、最后一条扫描线的起点和终点, 建立 $n \times 4$ 维矩阵数组 A , 对子区域关键信息按从左到右、从上到下次序进行存储, 则 A 为

$$A = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & m_{n4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 m_{ik} ——第 i 个子区域的第 k 个点, $1 \leq i \leq n$;
 $1 \leq k \leq 4$

m_{i1} 、 m_{i2} ——第 i 个子区域起始扫描线的端点
 m_{i3} 、 m_{i4} ——第 i 个子区域最后一条扫描线的端点

(3) 令子区域编号 $i = 1$, 假设合并后的区域数为 u , 令合并后子区域编号 $j = 1$, 确定第 i 个子区域的起点 $m_{istart} = m_{i1}$, 假如该子区域扫描线的数量为奇数, 则该区域的终点 $m_{iend} = m_{i4}$, 假如该子区域扫描线的数量为偶数, 则该区域的终点 $m_{iend} = m_{i3}$, 令合并后的第 j 个子区域起点 $s_{jstart} = m_{i1}$ 。

(4) 查阅编号为 $i + 1$ 至 n 的子区域中所有点, 判断是否存在某点坐标值等于 m_{iend} , 若存在该点, 则执行第 5 步, 若不存在该点, 则执行第 6 步。

(5) 若第 $t(i + 1 \leq t \leq n)$ 区域存在和 m_{iend} 相同的点, 将矩阵第 t 行移至第 $i + 1$ 行, 第 $i + 1$ 行至第 $t - 1$ 行下移一行, 令 $i = i + 1$, $m_{istart} = m_{(i-1)end}$, 根据第 i 区域中扫描线的奇偶性, 按步骤 (3) 所示方法确定 m_{iend} , 执行第 7 步。

(6) 若剩余区域内不存在和 m_{iend} 相同的点, 则令 $s_{jend} = m_{iend}$, 然后令 $j = j + 1$, $i = i + 1$, $m_{jstart} = m_{i1}$, 根据第 i 区域中扫描线的奇偶性, 按步骤 (3) 所示方法确定 m_{iend} , 执行第 7 步。

(7) 判断 i 是否等于 $n + 1$, 若不相等, 执行第 4 步, 若相等, 则程序结束, 合并后区域构建起始点矩阵为 s , s 为

$$s = \begin{bmatrix} s_{1start} & s_{1end} \\ s_{2start} & s_{2end} \\ \vdots & \vdots \\ s_{ustart} & s_{uend} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 u ——合并区域数量
 s_{jstart} ——第 j 合并区域的起点, $1 \leq j \leq u$
 s_{jend} ——第 j 合并区域的终点, $1 \leq j \leq u$

某零件的截面划分子区域如图 12 所示, 共包含 12 个子区域, 根据该算法, 合并后区域如图 13 所示, 共包含 4 个区域。

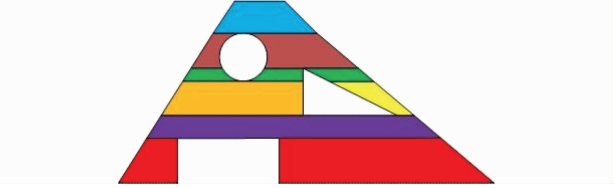


图 12 零件截面区域划分

Fig. 12 Area partition of part cross-section

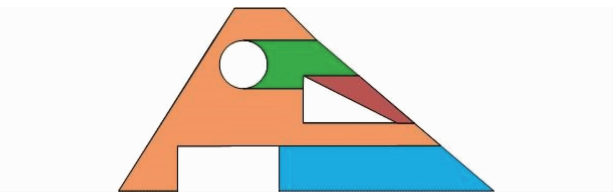


图 13 零件截面区域划分合并

Fig. 13 Area merging of part cross-section

3.3 合并区域的打印次序优化

扫描区域合并后, 需对合并后的区域逐一打印, 考虑效率因素, 打印次序需满足各合并区域间的空行程路径之和最短, 这里采用一种临近算法, 具体步骤如下:

(1) 构建合并区域的起始点矩阵 s , 如式 (10) 所示, 令 $j = 1$, 则 $s_{jstart} = s_{1start}$, $s_{jend} = s_{1end}$ 。

(2) 从矩阵 s 的第 $j + 1$ 行起, 寻找距离 s_{jend} 最小的点, 若该点在第 $t(j + 1 \leq t \leq u)$ 行, 则将矩阵 s 第 $j + 1$ 行和 t 行互换位置。

(3) 若 $s_{(j+1)end}$ 与 s_{jend} 距离最短, 将 $s_{(j+1)end}$ 和 $s_{(j+1)start}$ 的值互换, 若 $s_{(j+1)start}$ 与 s_{jend} 距离最短, 则保持不变。

(4) 令 $j = j + 1$, 判断 j 是否等于 u , 若不相等, 则执行步骤 (2), 否则, 程序结束, 矩阵 s 中各区域的起始点次序即为最终的合并区域进行打印次序。

对图 13 中的合并区域按上述方法进行打印次序优化, 打印次序按 $(A_1 - A_2) - (B_1 - B_2) - (C_1 - C_2) - (D_1 - D_2)$ 进行, 如图 14 所示。

4 实验

为证明上述路径规划方法的可行性, 对图 15 所

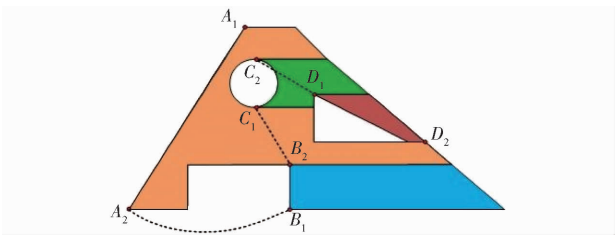


图 14 合并区域打印次序
Fig. 14 Printing order of merging areas

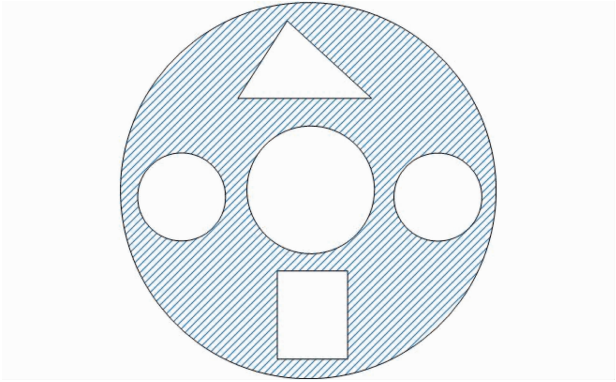


图 15 某零件截面轮廓图
Fig. 15 Skeleton map of part cross-section

示零件进行路径规划,该零件截面包含 6 个封闭轮廓,采用改进的近邻法确定各封闭环的打印起始点,采用蚁群算法寻找打印各封闭环的最优次序,设蚂蚁数量为 50,迭代次数为 200,可得最优的轮廓规划路径如图 16 所示。

对图 15 所示零件进行切面轮廓填充,不同角度下扫描线的拐点情况如图 17 所示,不难看出,当扫描线角度为或时,扫描线的拐点个数最小,考虑效率和精度的因素,选择扫描线角度为 0°。

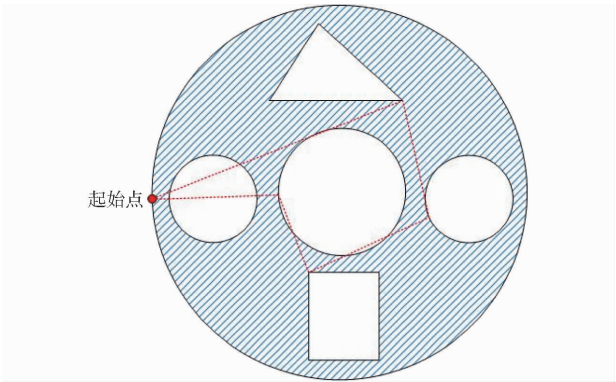


图 16 轮廓路径规划图
Fig. 16 Contour path planning-graph

对图 15 所示切片截面进行区域划分,划分后的区域如图 18 所示,共包含 16 个子区域。按照四点法对划分后的子区域进行区域合并,合并后的区域如图 19 所示,共包含 6 个区域。按本文所示方法对合并区域的打印次序进行优化,如图 20 所示,打印次序按 $(A_1 - A_2) - (B_1 - B_2) - (C_1 - C_2) - (D_1 -$

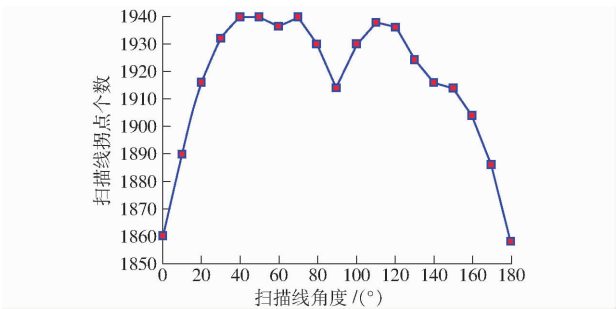


图 17 拐点个数与扫描线角度关系曲线
Fig. 17 Relationship curve between corner quantity and scanning line angle

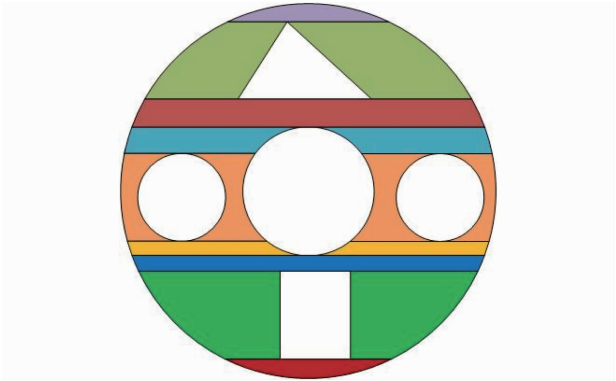


图 18 截面子区域划分图
Fig. 18 Sub-region division of part cross-section

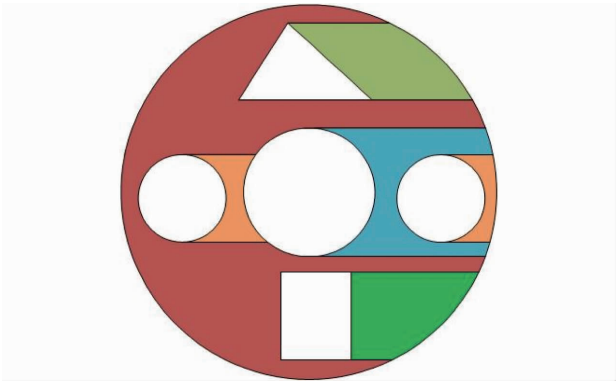


图 19 截面子区域合并图
Fig. 19 Sub-region merging of part cross-section

$D_2) - (E_1 - E_2) - (F_1 - F_2)$ 进行。

在图 21 所示的悬臂式 3D 打印实验平台上进行实验,该打印装置控制系统选用倍福控制器 C6920,该控制器采用面向工业 4.0 的 EtherCAT 总线,具有较强的实时性能和灵活性,采用 Win7 操作系统,基于 Twincat 2 软件采用 NCI 控制指令调用控制程序控制各轴联动实现 3D 打印功能,按本文提出的路径优化方法对路径进行规划。

对图 1、图 12 和图 15 所示零件进行打印,打印材料为 ABS,喷嘴直径 0.4 mm,零件分层厚度 0.2 mm,喷头打印移动速度是 120 mm/s,空程速度是 160 mm/s,打印零件如图 22 ~ 24 所示。

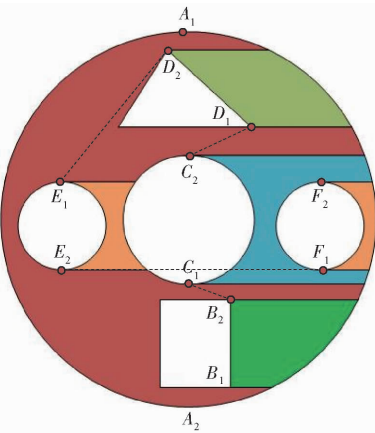


图 20 合并区域打印次序图

Fig. 20 Printing order of merging regions

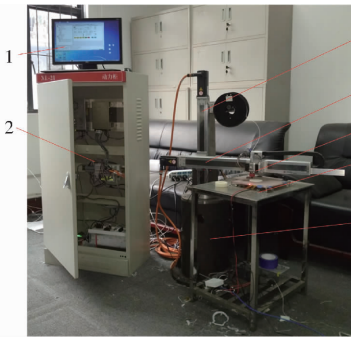


图 21 悬臂式 3D 打印实验平台

Fig. 21 Cantilever 3D printing robot experiment platform

1. 人机交互界面 2. 控制系统 3. 垂直导轨 4. 水平导轨
5. 挤出机 6. 工作台 7. 底座

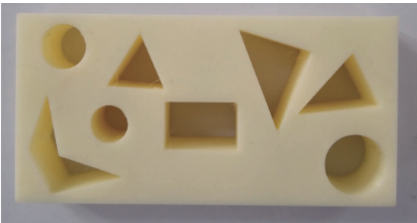


图 22 图 1 所示零件打印图

Fig. 22 Printing part (as shown in Fig. 1)

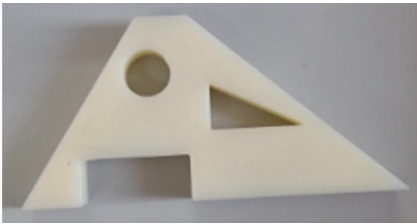


图 23 图 12 所示零件打印图

Fig. 23 Printing part (as shown in Fig. 12)

将本文提出的路径规划算法与传统的 zigzag 法进行比较,打印时间和轮廓长度情况如表 1 所示。由表 1 可以看出,本文提出的路径规划算法在打印时间和单层轮廓路径长度方面比传统的 zigzag 法都有所降低,图 1 零件打印时间比 zigzag 法缩短了 12.6%,轮廓路径长度缩短了 19.5%,图 12 零件打

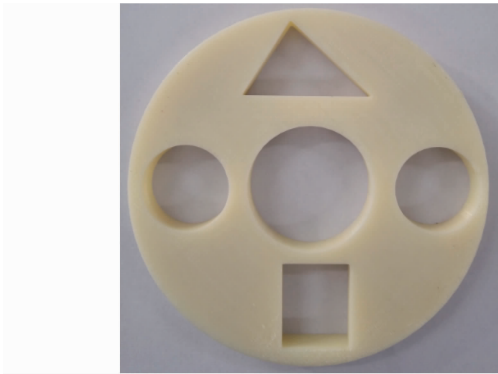


图 24 图 15 所示零件打印图

Fig. 24 Printing part (as shown in Fig. 15)

印时间比 zigzag 法缩短了 11.6%,轮廓路径长度缩短了 12.5%,图 15 零件打印时间比 zigzag 法缩短了 8.9%,轮廓路径长度缩短了 10.7%,由此可见,打印效率明显提高。

表 1 打印时间和轮廓长度比较

Tab. 1 Comparison between two methods about printing time and contour length

零件	路径规划方法	单层时间/s	单层轮廓路径长度/mm
图 1 零件	zigzag 法	141. 2	244. 45
	本文方法	123. 4	196. 81
图 12 零件	zigzag 法	80. 5	55. 33
	本文方法	71. 2	48. 40
图 15 零件	zigzag 法	180. 6	180. 23
	本文方法	164. 5	160. 90

针对 3D 打印的尺寸精度情况,将本文提出的路径规划算法与传统的 zigzag 法进行比较,对 2 种方法打印图 1 所示零件的尺寸进行测量,如表 2 所示。

表 2 尺寸精度比较

Tab. 2 Dimension accuracy comparison mm

测量尺寸	设计值	本文算法测量值	zigzag 法测量值
长度	100	99. 752	99. 614
宽度	50	49. 856	49. 725
厚度	20	20. 141	20. 221

针对 3D 打印的表面质量情况,将本文提出的路径规划算法与传统的 zigzag 法进行比较,对 2 种方法打印零件(图 1、图 12、图 15)上表面和侧面的表面粗糙度进行测量,测量结果如表 3 所示。

由表 2 可以看出,按本文方法打印的图 1 零件长、宽、高尺寸偏差分别为 0. 248、0. 144、0. 141 mm,按传统的 zigzag 法打印图 1 零件长、宽、高的尺寸偏差分别为 0. 386、0. 275、0. 221 mm,可见按本文方法打印的零件尺寸精度有所提升。

由表 3 可以看出,按传统的 zigzag 法打印的零

表 3 表面粗糙度比较

Tab.3 Surface roughness comparison		μm	
测量位置	路径规划方法	R_a	R_z
图 1 零件上表面	zigzag 法	18.654	245.832
	本文方法	14.878	208.213
图 1 零件侧面	zigzag 法	10.721	124.375
	本文方法	6.756	95.568
图 12 零件上表面	zigzag 法	18.032	238.814
	本文方法	13.941	204.649
图 12 零件侧面	zigzag 法	10.986	113.420
	本文方法	6.534	92.252
图 15 零件上表面	zigzag 法	19.581	252.144
	本文方法	14.987	210.396
图 15 零件侧面	zigzag 法	11.208	128.716
	本文方法	6.824	98.829

件的上表面粗糙度 R_a 在 18 ~ 20 μm 之间,轮廓最大高度 R_z 为 235 ~ 250 μm ;侧面粗糙度 R_a 为 10 ~ 12 μm ,轮廓最大高度 R_z 在 110 ~ 130 μm 之间。按本文方法打印的零件的上表面粗糙度 R_a 在 13 ~ 15 μm 之间,轮廓最大高度 R_z 为 200 ~ 211 μm ;侧面粗糙度 R_a 在 6.5 ~ 7.0 μm 之间,轮廓最大高度 R_z 在 90 ~ 100 μm 之间。由此可见,采用本文提出的路径规划算法和传统算法相比,打印零件的表面质量有所改善。

需要注意的是,不同的打印条件和环境、不同的

打印设备,所测量的尺寸精度和表面粗糙度是不同的,因此,本文所测量的尺寸精度和表面粗糙度是在特定的打印条件下和打印设备上测量的,不具有广泛的普适性,但是,采用本文提出的路径规划算法和传统算法相比,本文算法在尺寸精度和打印质量的提升是显而易见的。

5 结论

(1)采用蚁群算法对熔融沉积式 3D 打印轮廓路径的打印序列进行优化,寻求最短的轮廓打印路径,以提高打印效率。

(2)综合打印效率和加工表面质量等因素,选择最优的扫描线角度,提出了一种基于四点法的打印区域合并算法,采用临近法对合并区域的打印次序进行优化,从而改善熔融沉积式 3D 打印填充效率和质量。

(3)实验结果表明:本文算法与传统的 zigzag 法相比较,3 组零件单层的轮廓路径长度分别缩短了 19.5%、12.5%、10.7%,打印时间缩短了 12.6%、11.6%、8.9%,提高了打印效率,能够快速、有效地进行 3D 打印,无翘曲和变形产生。此外,本文算法与传统的 zigzag 法相比较,打印零件的尺寸精度和表面质量都有一定提高。实验结果验证了该路径规划算法的可行性和有效性。

参 考 文 献

1 杨建军,张志远,兰洪波,等. 基于 EHD 微尺度 3D 打印喷射机理与规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 401 - 407. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160653&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.053.
YANG Jianjun, ZHANG Zhiyuan, LAN Hongbo, et al. Jetting mechanism and rules of micro scale 3D printing based on EHD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):401 - 407. (in Chinese)

2 刘利刚,徐文鹏,王伟明,等. 3D 打印中的几何计算研究进展[J]. 计算机学报, 2015, 38(6): 1243 - 1267.
LIU Ligang, XU Wenpeng, WANG Weiming, et al. Survey on geometric computing in 3D printing[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1243 - 1267. (in Chinese)

3 ASIABANPOUR B, KHOSHNVIS B. Machine path generation for the SIS process[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(3): 167 - 175.

4 TARABANIS K A. Path planning in the proteus rapid prototyping system[J]. Rapid Prototyping Journal, 2001, 7(5):241 - 252.

5 YANG Y, LOH H T, FUH J Y H, et al. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(1): 30 - 37.

6 ONUH S O, HON K K B. Application of the Taguchi method and new hatch styles for quality improvement in stereolithography[J]. Journal of Engineering Manufacture, 1998, 212(6):461 - 472.

7 YANG J, BIN H, ZHANG X, et al. Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering(SLS) [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(3):293 - 300.

8 CHIU W K, YEUNG Y C, YU K M. Toolpath generation for layer manufacturing of fractal objects[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(4): 214 - 221.

9 ZHAO Haisen, GU Fanglin, JORGE G, et al. Connected fermat spirals for layered fabrication[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4):100.

10 KIM D S. Polygon offsetting using a Voronoi diagram and two stacks[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(14):1069 - 1076.

11 BRANDLEY T, HWAN-SIK Y. Efficient path planning algorithm for additive manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2014, 4(9):1555 - 1563.

12 RAJAN V T, SRINIVASON V, KONSTANTIONS A T. The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region[J]. Rapid Prototyping Journal, 2001, 7(5):231 - 240.

13 卞宏友,杨光,李英,等. 金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171 - 176.
BIAN Hongyou, YANG Guang, LI Ying, et al. Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11):171 - 176. (in Chinese)

- LU Changming, ZHANG Libin, JIANG Jiandong, et al. Variational design of small agricultural machinery based on templates reconfiguration[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 101–106. (in Chinese)
- 10 张开兴, 杭晟煜, 赵秀艳, 等. 面向设计重用的三维 CAD 模型局部结构检索方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 405–412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170752&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.052.
- ZHANG Kaixing, HANG Shengyu, ZHAO Xiuyan, et al. Effective subpart retrieval method of 3D CAD models for design reuse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 405–412. (in Chinese)
- 11 李海生, 孙莉, 吴晓群, 等. 基于模型内二面角分布直方图的非刚性三维模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(6): 1128–1134.
- LI Haisheng, SUN Li, WU Xiaoqun, et al. Non-rigid 3D shape retrieval based on inner dihedral angle histogram[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(6): 1128–1134. (in Chinese)
- 12 高雪瑶, 李慧楠, 张春祥, 等. 基于蚁群搜索的三维 CAD 模型相似性计算[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 416–423.
- GAO Xueyao, LI Huinan, ZHANG Chunxiang, et al. Similarity calculation of 3D CAD model based on ant colony searching[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 416–423. (in Chinese)
- 13 王玉, 马浩军, 何玮, 等. 机械三维 CAD 模型的聚类检索[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 924–928.
- WANG Yu, MA Haojun, HE Wei, et al. Clustering & retrieval of mechanical 3D CAD models [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 924–928. (in Chinese)
- 14 孙家广. 计算机图形学[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- 15 王洪申, 张树生, 白晓亮, 等. 三维 CAD 模型局部结构检索属性图算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 316–320.
- WANG Hongshen, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. A partial retrieval algorithm of 3D CAD models based on attributed graphs[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(3): 316–320. (in Chinese)
- 16 刘雪梅, 张树生, 崔卫卫, 等. 逆向工程中基于属性邻接图的加工特征识别[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(6): 1162–1167.
- LIU Xuemei, ZHANG Shusheng, CUI Weiwei, et al. Machined features recognition based on attributed adjacency graph in reverse engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(6): 1162–1167. (in Chinese)
- 17 Open CASCADE technology [EB/OL]. (2006–5–10). <http://www.epencascade.org>.
- 18 BORN C, KERBOSCH J. Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph [J]. Communications of the ACM, 1973, 16(9): 575–579.
- 19 KOCH I. Enumerating all connected maximal common subgraphs in two graphs [J]. Theoretical Computer Science, 2001, 250(1): 1–30.
- 20 JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 939–953.
- 21 FENET S, SOLNON C. Searching for maximum cliques with ant colony optimization[J]. Application of Evolutionary Computing, LNCS, 2003, 26(11): 236–245.
- 22 李亮, 张树生, 白晓亮, 等. 基于遗传算法的三维 CAD 模型多特征融合和检索[J]. 制造业自动化, 2013(3): 78–81.
- LI Liang, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. 3D CAD model retrieval using a genetic feature combination method[J]. Manufacturing Automation, 2013(3): 78–81. (in Chinese)

(上接第 401 页)

- 14 卞宏友, 刘伟军, 王天然, 等. 激光金属沉积成形的扫描方式[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 171–175.
- BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran, et al. Scanning mode for laser metal deposition shaping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 171–175. (in Chinese)
- 15 HAN Wenbiao, MOHSEN A J, STEPHEN C D, et al. Tool path-based deposition planning in fused deposition processes[J]. ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2002, 124(5): 462–272.
- 16 JIN Yuan, HE Yong, FU Jianzhong, et al. Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology[J]. Additive Manufacturing, 2014(4): 32–47.
- 17 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 选择性激光烧结新型扫描方式的研究及实现[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 35–39.
- SHI Yusheng, ZHONG Qing, CHEN Xuebin, et al. Research and implement of a new kind of scanning mode for selective laser sintering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 35–39. (in Chinese)
- 18 黄雪梅, 牛宗伟, 董小娟. 快速成型技术中的分区扫描路径产生算法[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(1): 80–82.
- HUANG Xuemei, NIU Zongwei, DONG Xiaojuan. An algorithm of sub-regional scanning path generation for rapid prototyping manufacturing[J]. Machine Design and Research, 2007, 23(1): 80–82. (in Chinese)
- 19 李大伟, 戴宁, 姜晓通, 等. 密度感知的 3D 打印内部支撑结构轻量化建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(5): 841–848.
- LI Dawei, DAI Ning, JIANG Xiaotong, et al. Density aware internal supporting structure light-weighting modeling of 3D printed objects[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(5): 841–848. (in Chinese)
- 20 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的工业机器人全局路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18–27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150903&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.003.
- LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18–27. (in Chinese)