

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201901013



石材桥式切割机多边形区域的 粗加工优化

胡海琪^{1,2}, 邵辉^{1,2}, 王达^{1,2}, 王福增³, 方慧娟^{1,2}

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 利用圆盘锯在粗加工方面具有切削深度较深和线速度大的优势, 扩大石材桥式切割机的加工范围, 研究其在多边形区域中的切削加工优化问题. 首先, 研究圆盘锯的切削几何特性, 根据圆盘锯切触面特性, 计算避免干涉现象的多边形内轮廓; 然后, 对多边形区域进行走刀方向优化, 以减少进退刀次数, 从而缩短加工时间; 最后, 为进一步缩短加工时间, 采用最邻近点法对加工轨迹进行优化. 通过对多边形区域加工的仿真研究, 验证了提出方法的有效性.

关键词: 石材桥式切割机; 圆盘锯; 轮廓偏置; 走刀方向; 最邻近点法

中图分类号: TH 164; TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)04-0444-08

Optimization of Rough Machining in Polygon Region of Stone Bridge Cutting Machine

HU Haiqi^{1,2}, SHAO Hui^{1,2}, WANG Da^{1,2},
WANG Fuzeng³, FANG Huijuan^{1,2}

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Taking advantage of the deep cutting depth and high linear speed in rough machining of circular sawblade, to enlarge the machining range of stone bridge cutting machine, the optimization of machining in polygon region was studied. First, the cutting geometry characteristics of circular sawblade were studied, and the polygonal inner contour was calculated to avoid interference according to the characteristics of the circular sawblade engagement. Second, the cutting direction of polygon region was optimized to reduce the number of approach-retract of sawblade for shortening the processing time. To further shorten the processing time, the machining path was optimized by the nearest point method. The effectiveness of method was verified by the simulation study of polygon region machining.

Keywords: stone bridge cutting machine; circular sawblade; contour offset; cutting direction; nearest point method

收稿日期: 2019-01-04

通信作者: 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划的研究. E-mail: shaohuihu11@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51705162); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01117); 福建省泉州市科技计划项目(2017T001)

近年来,我国的石材加工业蓬勃发展,传统的石材加工技术已经很难满足石材加工的要求^[1]. 目前,石材桥式切割机正逐渐向加工多样化、数控化、自动化和智能化的方向发展^[2-3]. 虽然石材桥式切割机安装的圆盘锯具有切割线速度大和切割深度深的特性,在进行大余量切削的加工过程中也具有很大的优势,但是目前对石材的加工优化研究依然是以铣刀的加工优化为主,对圆盘锯加工优化的研究相对较少. Demaine 等^[4]研究用任意大的圆盘锯切割多边形的可行性,并提出线性时间算法. Dumitrescu^[5]提出一种近似算法,用于圆盘锯对凸边形的裁剪. 此外,更多的文献资料对刀具加工路径进行了优化. Kumazawa 等^[6]提出基于待加工表面最优进给方向(PFD)场生成刀具轨迹,进而采用等扇形刀具加工路径,以减轻冗余加工. Park 等^[7]提出刀具路径规划算法,对全局进行走刀方向的路径规划,但是没有考虑局部图元的走刀方向. Jin 等^[8]采用穷举法得到加工的方向,该方法精度不高且算法复杂度大. Hu 等^[9]对走刀方向进行趋势分析,进而得到加工趋势方向,但其加工优化度仍比较小. 也有研究者采用遗传算法对加工路径进行优化^[10-12]. 本文基于圆盘锯的特性和切触面特性,计算无干涉内轮廓并确定加工轨迹的运动范围,同时,分析凸多边形的几何特性,得到较优的走刀方向;然后,利用最邻近点法优化加工轨迹,最终达到石材桥式切割机对多边形区域粗加工的目的.

1 圆盘锯切削的几何特性及无干涉内轮廓计算

1.1 圆盘锯切削的几何特性

为了便于研究石材桥式切割机对多边形区域的粗切削加工优化问题,需要确定圆盘锯切削加工过程形成的扫描体的几何体特性. 圆盘锯切削的几何特性,如图 1 所示. 图 1 中:采用一个半径为 R ,厚度为 W 的圆盘锯,以切削深度 a_p ,从某一点 $O_S=(x_S, y_S, z_0)$ 以进给速度 V_f 沿走刀方向 k_d 运动到 $O_E=(x_E, y_E, z_0)$ 时,圆盘锯加工完成后形成以矩形 $A_E B_E C_S D_S$ 为顶面的扫描体. 扫描体可分为两部分:一部分为已加工的长方体区域,该区域在 xy 平面投影可近似为一个宽度为 a_w 的矩形,其面积为

$$S_{\text{cut}} = a_w \times \sqrt{(y_E - y_S)^2 + (x_E - x_S)^2};$$

另一部分为圆盘锯切触区域^[13],其为圆柱体的部分体积. 该体积的顶面为图 1 中的矩形 $A_E B_E E_E F_E$ 和 $C_S D_S F_S E_S$,二者顶面正好构成矩形 $ABCD$,如图 2 所示.

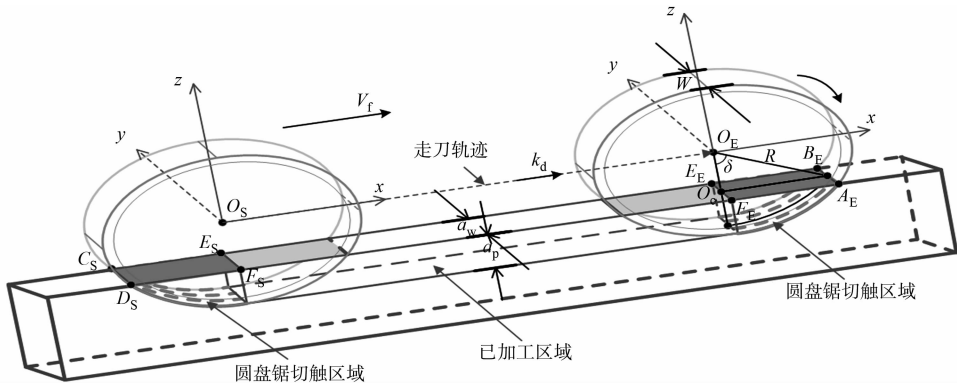


图 1 圆盘锯切削几何特性

Fig. 1 Cutting geometry characteristics of circular sawblade

定义该矩形为圆盘锯切触面投影. 该矩形的长度为 $2T_x = 2R\sin(\cos^{-1}(\frac{R-a_p}{R}))$;宽度为 $2T_y = a_w$, a_w 为走刀宽度. 这 2 个圆盘锯切触区域的顶面面积和为

$$S_{\text{part}} = 2T_x \cdot 2T_y. \tag{1}$$

该加工过程中,对应的运行时间为进给量 f 与圆盘锯进给速度 V_f 的比值为

$$t_f = \frac{f}{V_f} = \frac{\sqrt{(y_E - y_S)^2 + (x_E - x_S)^2}}{V_f}. \tag{2}$$

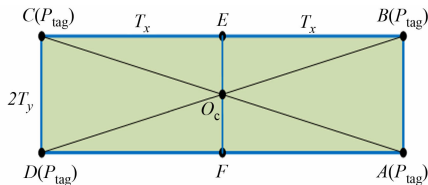


图 2 圆盘锯切触面投影

Fig. 2 Projection of circular sawblade engagement

1.2 圆盘锯无干涉内轮廓的计算方法

数控加工过程中的干涉包括 2 种:一是机床零件或者刀具后端与工件之间的干涉;二是刀具切触面与工件发生的干涉^[14]. 圆盘锯沿走刀方向加工石材过程中的干涉主要来源于圆盘锯切触面与石材模型的干涉,为了保证石材的粗加工表面质量,应避免该干涉发生,而避免该干涉应保证圆盘锯切触面投影边界 $AB(CD)$ 不与多边形轮廓线相交. 因此,在忽略第一种干涉的情况下,圆盘锯与多边形轮廓的干涉问题可等效为切触面投影与多边形的位置关系问题,解决该问题的关键在于切触面投影向多边形内部偏置位置的计算.

不同走刀方向的刀具偏置,如图 3 所示. 为了避免与多边形某一条斜率为 k 边上的一点 $P_{tag} = (x_{tag}, y_{tag}, z_{tag})$ 干涉,需要将圆盘锯切触面的中心点向多边形内部偏置距离为 X_{offset} 的横向偏置和距离为 Y_{offset} 的纵向偏置,由此得到新的目标点为

$$P_{new} = (x_{tag} \pm X_{offset}, y_{tag} \pm Y_{offset}, z_{tag}). \tag{3}$$

当多边形边界偏置到点 P_{new} 所在的线段上时,即避免了圆盘锯对多边形边界产生干涉.

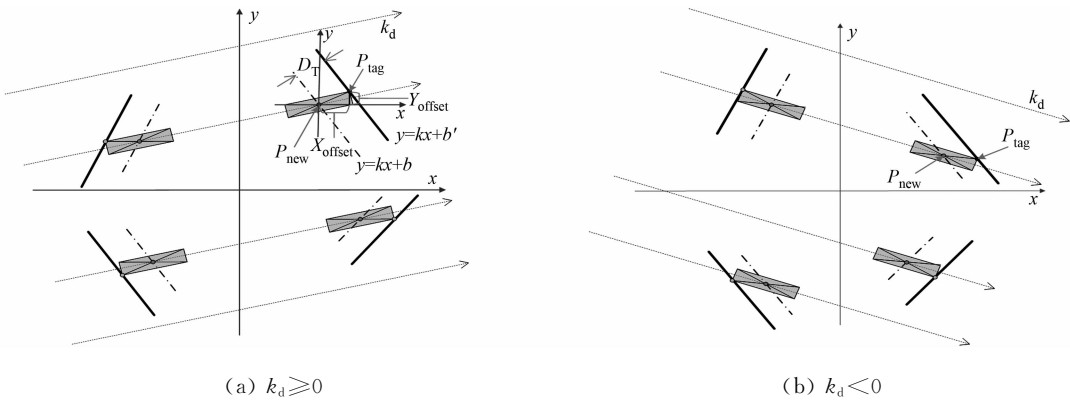


图 3 不同走刀方向的刀具偏置
Fig. 3 Tool offset for different passes

不失一般性,假设加工的五边形 $P_1P_2P_3P_4P_5$,如图 4 所示. 当走刀方向为 k_d 方向时,令直线 L_{k_d} 和线段 $L_{P_1P_2}$ 相交于线段 P_1P_2 的中心点 $N((x_1+x_2)/2, (y_1+y_2)/2)$. 为避免发生干涉,圆盘锯中心应从 N 偏置到 O'_E 或 O''_E ,即中心点形成的线段应偏置到直线 L_1 或 L_2 . 结合图 1,3,当 $k_d \geq 0$ 时,偏置后新的目标点坐标为 $O'_E(x_N - X_{offset}, y_N - Y_{offset})$, $O''_E(x_N + X_{offset}, y_N + Y_{offset})$. 此时,对应的偏置直线方程为

$$L_l: y = k_{d, best} x + b, \quad b = y_N \mp Y_{offset} - k(x_N \mp X_{offset}), \quad l = 1, 2. \tag{4}$$

当 $k_d < 0$ 时,偏置后新的目标点坐标为 $O'_E(x_N - X_{offset}, y_N + Y_{offset})$, $O''_E(x_N + X_{offset}, y_N - Y_{offset})$. 此时,对应的偏置直线方程为

$$L_l: y = k_{d, best} x + b, \quad b = y_N \pm Y_{offset} - k(x_N \mp X_{offset}), \quad l = 1, 2. \tag{5}$$

由几何位置关系可知, O'_E 或 O''_E 为内外轮廓线上的点,通过判断 O'_E 或 O''_E 所处位置,即可以判断 L_1 和 L_2 与多边形轮廓的位置关系. 由图 4 可知: V_i 为从点 O'_E 指向五边形顶点 $P_1P_2P_3P_4P_5$ 的矢量,求解 $V_1 \sim V_5$ 中相邻矢量之间的夹角和为

$$\theta_{sum} = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{V_i V_{i+1}}{|V_i| |V_{i+1}|} \right), \quad V_6 = V_1. \tag{6}$$

若 $\theta_{sum} \neq 360^\circ$, 则说明点不在内部,即点所在的线为外轮廓线;若 $\theta_{sum} = 360^\circ$, 则说明点在内部,即点所在的线为内轮廓线^[15]. 依次求得多边形所有边界的内轮廓线作为圆盘锯切触面的边界,由这些边界围成的封闭多边形区域,即为避免圆盘锯切触面与多边形轮廓发生干涉的走刀轨迹允许区域. 在设定走刀方向的情况下,圆盘锯在该区域平行走刀,即可完成对多边形区域的加工.

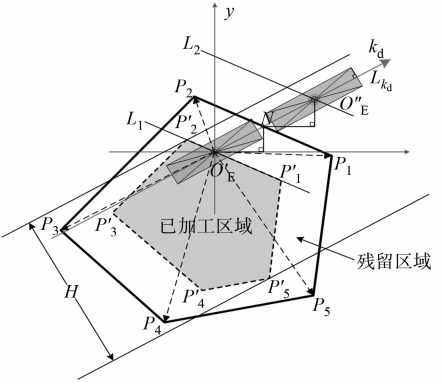


图 4 多边形区域的无干涉内轮廓
Fig. 4 No interference inner contour of polygon region

由平行走刀得到的加工轨迹可知,圆盘锯以走刀方向 k_d 从内轮廓边界上的一点 $O_{S,m}=(x_{S,m},y_{S,m},z_0)$ 运动到 $O_{E,m}=(x_{E,m},y_{E,m},z_0)$ 需要走刀 M 次. 其中, m 代表第 m 次走刀; $M=H/a_w$, H 为与内轮廓相交且斜率为 k_d 的最远平行线间距. 加工完成后,已加工区域的面积为

$$S_{\text{cut_all}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (a_w \sqrt{(y_{E,m} - y_{S,m})^2 + (x_{E,m} - x_{S,m})^2}). \tag{7}$$

由几何关系可知,面积 $S_{\text{cut_all}}$ 与图 4 阴影部分面积相等,该面积可以通过二维向量叉乘求三角形面积和的方法求解,具体计算式为

$$S_{\text{cut_all}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\mathbf{V}_{\text{IN},i} \times \mathbf{V}_{\text{IN},i+1}). \tag{8}$$

式(8)中: $\mathbf{V}_{\text{IN},i}$ 为从点 O'_E 指向内轮廓顶点 $P'_1P'_2P'_3P'_4P'_5$ 的矢量.

同理,多边形区域的总面积为

$$S_{\text{cut_all}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\mathbf{V}_i \times \mathbf{V}_{i+1}). \tag{9}$$

为了表示圆盘锯对多边形区域的去除效果,定义已加工表面面积与多边形区域面积的比值为加工率,即

$$\rho = \frac{S_{\text{cut_all}}}{S_{\text{all}}}. \tag{10}$$

式(10)中: $\rho \in [0,1]$, ρ 越接近于 1,加工完成后的残留区域的面积($S_{\text{next}}=S_{\text{all}}-\rho S_{\text{all}}$)就越少.

2 加工时间的优化

2.1 优化方法分析

通过无干涉的内轮廓计算,既避免了圆盘锯与石材模型发生干涉,同时也充分发挥了圆盘锯切削深度较深的优势. 这虽然能保证圆盘锯在加工一条较深的轨迹时,相较于其他刀具的加工时间更短,但是,并不能保证该过程的总粗加工时间最优. 因此,为了进一步提高加工效率,需要对圆盘锯粗加工时间做进一步的优化.

在圆盘锯对多边形区域进行切削过程中,总加工时间为粗加工工序与残留区域进行补加工工序的时间和,其长短与切削的轨迹、速度和补加工工序消耗时间密切相关,其关系可以表示为

$$t = t_r + t_{\text{next}} = \sum_{m=1}^M \left(t_{f_m} + \frac{QM_m}{v_q} \right) + 2Mt_1 + t_{\text{next}}. \tag{11}$$

式(11)中: t_r 为粗加工时间; t_{next} 为残留区域加工时间; M 为平行切削线段数量,即进退刀次数; t_{f_m} 为第 m 条加工表面线段消耗的时间; QM_m 为第 m 条空走行程; v_q 为空走速度; t_1 为抬刀时间.

由式(11)可知:粗加工工序中的切削线段数量 M 和空走行程长度 $QM = \sum_{j=0}^M QM_j$ 越少,粗加工时间越短. 而后续补加工相比于粗加工的加工效率更低,因此,后续补加工的工作量越少(即加工率 ρ 越大),总加工时间就越短. 综上所述,在速度设定不变的情况下,总加工时间的优化可等效为对切削线段数量 M 、空走行程长度 QM 和多边形区域的加工率 ρ 的优化.

2.2 走刀方向优化法

走刀方向不同将导致进、退刀次数不同,因此,为了减少进、退刀次数,需要对走刀方向进行优化. 不同走刀方向的平行线间距,如图 5 所示. 由图 5 可知:当走刀方向为斜率 $k_{d,1}$ 所示方向时,平行切削线段的数量 $M_1=H_{k_{d,1}}/a_w$,对应抬刀次数为 M_1 次;当走刀方向为斜率 $k_{d,2}$ 所示方向时,平行切削线段数量 $M_2=H_{k_{d,2}}/a_w$,对应抬刀次数为 M_2 次. 由 $H_{k_{d,1}} > H_{k_{d,2}}$ 可知,相较于与多边形边不同的方向,走刀方向与多边形边相同方向的进、退刀次数更少. 因此,多边形最短的最远平行线间距存在于多边形的高中,即应在多边形所有的高中求得较优的高,以得到较优的走刀方向.

以三角形为例,三角形的最优高和优化的走刀方向,如图 6 所示. 由图 6 可知:在 3 条边对应的高中, $H_{2,1}$ 为最短的高(下标 2 代表第 2 条边,下标 1 代表第 1 个顶点),则沿该高对应的边的方向进、退刀

次数最少,故此高的垂直方向为最小切削线数量方向. 三角形最短的高有如下 3 个定义.

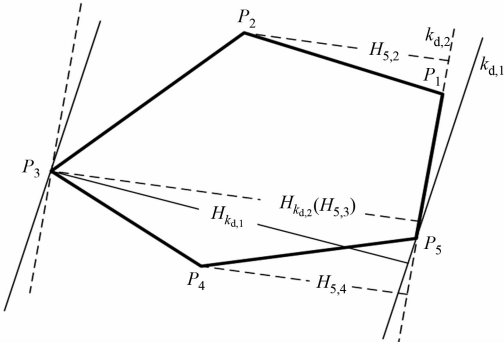


图 5 不同走刀方向的平行线间距

Fig. 5 Parallel line distance of different cutting directions

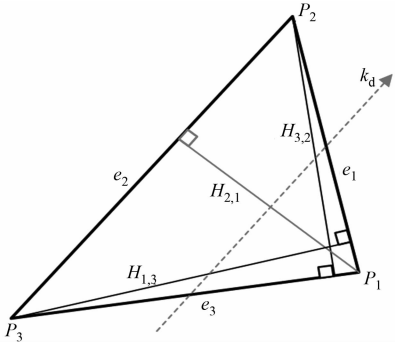


图 6 三角形的最优高和优化的走刀方向

Fig. 6 Optimal height and cutting direction of triangle

定义 1 设任意三角形 $P_1P_2P_3$, 高为 $H_{1,3}, H_{2,1}$ 和 $H_{3,2}$, 其中, 最短的一条高定义为三角形的最优高, 垂直于最优高的方向定义为垂直最优高方向.

由演绎推理, 可得任意凸 n 边形的最优高和垂直最优高方向, 给出相关定义 2.

定义 2 设 $P_1P_2 \cdots P_n$ 是由 n 个顶点围成的平面凸 n 边形, P_i 是 n 边形第 i 个顶点, $e_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 是 n 边形第 j 条边, $H_{i,j} (j \neq i, j \neq i+1)$ 表示底边 e_j 对应顶点 P_i 的高, 定义一条边 e_j 对应的所有高中, 最大的高为边最大高 H_{i,j_max} .

定义 3 设 H_{i,j_max} 为平面凸 n 边形 $P_1P_2 \cdots P_n$ 的边最大高(图 5 中 $H_{5,3}$ 为边 e_3 对应的边最大高), 则所有的边最大高之中最小的为最优高 H_{best} , 垂直于最优高的方向为 n 边形 $P_1P_2 \cdots P_n$ 的垂直最优高方向 k_{d_best} .

对任意平面凸 n 边形 $P_1P_2 \cdots P_n$ 进行加工, 由定义 2, 3 可求得 n 边形 $P_1P_2 \cdots P_n$ 的最优高 H_{best} 和相对应的垂直最优高方向 k_{d_best} . 此时, 平行切削线段数量为最优高与走刀宽度的比值 $M_{best} = H_{best}/a_w$.

最后, 根据走刀方向信息, 结合节 1.2 的方法得到的无干涉内轮廓和线扫描法^[16], 可求得内轮廓信息和相应的加工轨迹 $L_{k_d,m}$. 同时, 可通过计算得到已加工区域的面积和加工率.

2.3 最邻近点法

由于线扫描法计算加工轨迹过程仅考虑加工轨迹的生成, 却未考虑轨迹之间的空行程消耗, 因此, 生成的加工轨迹往往存在大量的空行程. 为了优化加工空行程, 在确定第一条加工轨迹的基础上, 对后续的轨迹采用最邻近点法进行优化, 使每一条轨迹距离下一条轨迹的空行程距离最短, 进而使总空行程距离优化.

分析圆盘锯的切削加工轨迹可知, 切削的每一条轨迹都存在唯一的起点和终点, 切削过程是对所有轨迹的遍历. 而最邻近点是指在点集合中距离当前点最近的一个点, 当一条轨迹加工到终点时, 即可通过最邻近点法找到下一条轨迹的起点进行下一步的加工, 如此循环完成区域的切削. 然而, 从轨迹起点到终点和从终点到起点是一个等效的过程, 所以, 在一条轨迹加工到终点时, 可通过寻找未加工轨迹的起点和终点数据找到欧氏距离最近的点. 一旦找到一条轨迹的终点为最邻近点, 就将该终点视为轨迹加工的起点并进行加工, 否则, 直接加工下一条轨迹. 该方法能有效减少刀具的空行程, 缩短总加工时间. 最邻近点法的具体流程图, 如图 7 所示.

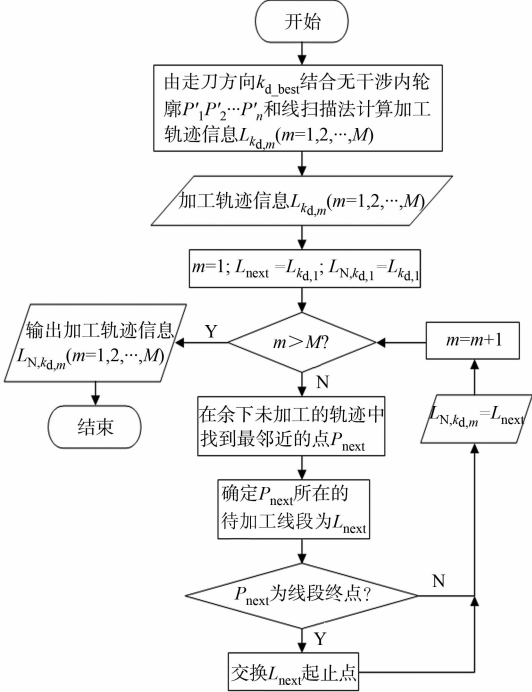


图 7 最邻近点法流程图

Fig. 7 Nearest point method flow chart

3 仿真验证与分析

3.1 多边形区域的粗加工

为了验证提出方法的有效性,根据实际机床尺寸,利用 VERICUT 软件搭建石材桥式切割机仿真模型^[17],如图 8 所示.图 8 中:圆盘锯半径 R 为 200 mm;厚度 W 为 3.6 mm.根据圆盘锯和花岗岩的特性,设定圆盘锯加工工艺参数^[18]如下:加工深度 a_p 为 20 mm,加工宽度 a_w 为 3.6 mm,进给速度 V_f 为 $2\,250\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.由此计算圆盘锯切触面投影尺寸 $T_x = R\sin(\cos^{-1}(\frac{R-a_p}{R})) = 87.178\text{ mm}$;宽度为 $T_y = W/2 = 1.8\text{ mm}$.

根据文中提出的方法,在 Visual Studio 平台上通过 C# 编程语言研发了相应的软件.该软件通过 OpenGL 实现显示,采用模型信息和加工工艺参数结合机床的后置处理方法,得到数控 G 代码.在此基础上,利用 G 代码在石材桥式切割机仿真模型中实现仿真实验,仿真结果如图 9 所示.

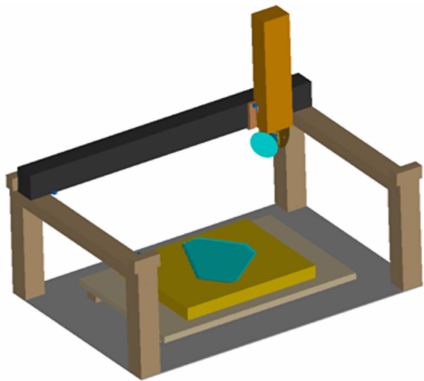


图 8 石材桥式切割机仿真模型
Fig. 8 Stone bridge cutting machine simulation model

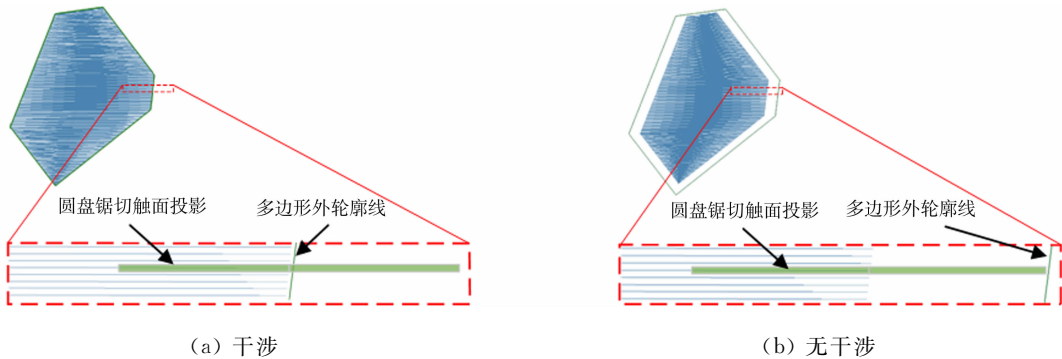


图 9 仿真实验结果
Fig. 9 Simulation experiment results

由图 9 可知:直接对多边形区域进行加工,圆盘锯切触面与多边形轮廓产生了干涉,此时,圆盘锯在进给的过程中出现了过切;对无干涉计算过后的内轮廓进行加工,此时,圆盘锯切触面与多边形外轮廓无干涉现象出现.

为了验证走刀方向优化和最邻近点法 2 个优化方法对多边形区域粗加工的优化效果,在不失一般性的前提下,对六边形区域进行 4 组对比实验,结果如图 10 所示.图 10 中:虚线示意加工过程中的空行程轨迹;实线示意刀具切削的加工轨迹;箭头方向示意走刀方向.

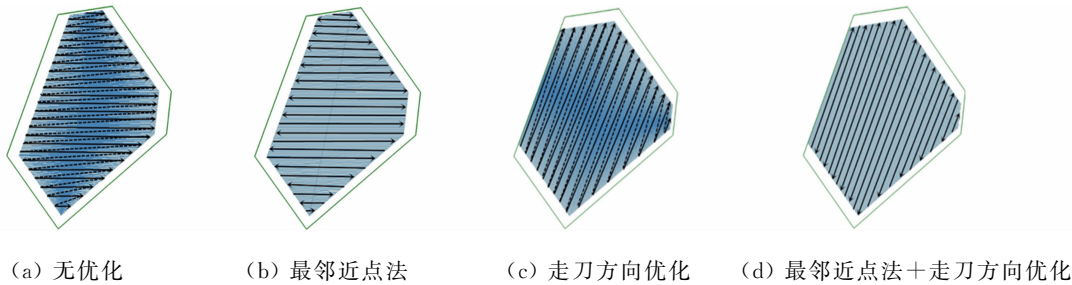


图 10 优化算法结果
Fig. 10 Optimization results

采用 4 种不同的加工优化方法所得的实验数据,如表 1 所示.表 1 中: t 为总加工时间.由表 1 可得以下 3 点结论.

1) 相较于未采用走刀方向优化的方法,采用走刀方向优化的进、退刀次数减少了 26%,加工率增加了 8.2%.由此可知,走刀方向优化既能有效地减少进、退刀次数,又提高了加工率.

2) 相较于未采用最邻近点法优化的方法,采用最邻近点法优化的空行程减少了约 99%,总加工时间减少了 23.8%或 25.7%.由此可见,最邻近点法能有效地减少空走行程长度和空行程时间.

3) 采用走刀方向和最邻近点法相结合的优化方法,其总加工时间减少了 3.4%~26.4%.

由此可知,采用走刀方向和最邻近点法优化的方法减少了总加工时间.

表 1 4 种加工优化方法的比较
Tab.1 Comparison of four processing optimization methods

加工方法	M/次	QM/mm	t/s	$\rho / \%$
无优化	371	225 841.10	12 484.38	76.63
最邻近点法优化	371	3 121.47	9 514.78	76.63
走刀方向优化	275	242 008.00	12 370.83	82.86
最邻近点法+走刀方向优化	275	3 217.88	9 186.96	82.86

综上所述,采用走刀方向优化和最邻近点法优化相结合的方法,可以很好地减少下刀次数,提高加工率,缩短空走行程长度,减少总加工时间.

3.2 不同刀具的加工比较

为了进一步验证圆盘锯加工多边形区域的可行性,选用意大利 NICOLAI 公司生产的金刚石圆盘锯和电镀金刚石砂轮对花岗岩的加工进行对比实验.金刚石圆盘锯的加工工艺参数同节 3.1 所选用的参数,金刚石砂轮的加工工艺参数^[19]如下:加工深度 a_p 为 1 mm;加工宽度 a_w 为 22.5 mm;进给速度为 5 000 mm · min⁻¹.

表 2 圆盘锯与砂轮的加工比较

Tab.2 Comparison of machining between circular sawblade and grinding wheel

参数	圆盘锯	砂轮	
		未优化	优化后
a_w / mm	3.6	22.5	22.5
a_p / mm	20	1	1
$V_f / \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	2 250	5 000	5 000
t / s	9 186.96	18 871.61	11 076.56

以图 10(d)所示深度为 20 cm 的多边形区域为例,当采用分层加工的方法对该区域进行加工时^[20],圆盘锯需以 $a_p=20$ mm 向下加工 1 层,而砂轮需要以 $a_p=1$ mm 向下加工 20 层.通过仿真计算得到的加工数据,如表 2 所示.表 2 中:圆盘锯列的加工过程采用走刀方向优化和最邻近点法优化;砂轮(未优化)列的加工过程未采用走刀方向优化;砂轮(优化后)列的加工过程采用走刀方向优化和最邻近点法优化.由表 2 可知:圆盘锯的总加工时间比砂轮减少了 17.1%~51.3%,由此可见,选用圆盘锯作为加工刀具深加工大多边形区域极大地提高了加工效率;此外,优化后的砂轮比未优化砂轮的总加工时间减少了 41.3%,可知走刀方向优化和最邻近点优化方法也有效地提高了砂轮加工石材的加工效率.

4 结束语

通过对加工的多边形区域进行分析可知,合理的走刀方向可以减少进、退刀的次数,进而缩短加工时间;合理的加工方式能缩短空行程的总长度.因此,在考虑圆盘锯特性和分析刀具切削轨迹的前提下,首先,根据圆盘锯切触面特性计算无干涉现象的多边形内轮廓;然后,通过走刀方向优化得到较优的走刀方向,以减少加工轨迹的进退刀次数;最后,利用最邻近点法对加工轨迹进行进一步的优化.相比于未优化的加工,文中提出的优化方法很好地缩短了进、退刀次数和空行程距离,减少了总加工时间.

参考文献:

[1] 晏辉. 从 2018 年中国厦门石材展看石材设备创新[J]. 石材, 2018(5):13-16. DOI:10. 14030/j. cnki. scaa. 2018. 0096.

[2] 吕振飞,刘建群,施为. 石材桥式切割机的开放式数控系统开发[J]. 机床与液压, 2013,41(1):100-103. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-3881. 2013. 01. 029.

[3] 王晶,黄身桂,黄辉,等. CAM 在石材数控雕刻中的应用[J]. 制造业自动化, 2018,40(1):95-102. DOI:10. 396910. j. issn. 1009-0134. 2018. 01. 022.

[4] DEMAINE E D,DEMAINE M L,KAPLAN C S. Polygons cuttable by a circular saw[J]. Computational Geometry,

- 2001,20(1/2):69-84. DOI:10.1016/S0925-7721(01)00036-0.
- [5] DUMITRESCU A. An approximation algorithm for cutting out convex polygons[J]. Computational Geometry,2004,29(3):223-231. DOI:10.1016/j.comgeo.2004.01.010.
- [6] KUMAZAWA G H,FENG H Y,FARD M J *et al.* Preferred feed direction field: A new tool path generation method for efficient sculptured surface machining[J]. Computer-Aided Design,2015,67/68:1-12. DOI:10.1016/j.cad.2015.04.011.
- [7] PARK S C,CHOI B K. Tool-path planning for direction-parallel area milling[J]. Computer-Aided Design,2000,32(1):17-25. DOI:10.1016/S0010-4485(99)00080-9.
- [8] JIN Guoqing,LI Weidong,POPPLEWELL K,*et al.* A hybrid and adaptive tool-path generation approach of rapid prototyping and manufacturing for biomedical models[J]. Computers in Industry,2013,64(3):336-349. DOI:10.1016/j.compind.2012.12.003.
- [9] HU Yehui,BI Qingzhen,SHI Jing,*et al.* Research on path planning for residual areas in complex milling[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Advanced Engineering Technologies, Dubai: Universal Researchers in Science and Technology,2014:229-236.
- [10] 俞武嘉,傅建中,陈子辰. 基于遗传算法的刀具路径优化排布方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2006,40(12):2117-2121. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2006.12.021.
- [11] 肖军民. 一种改进遗传算法在控群加工路径中的优化[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(2):151-153. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2015.02.043.
- [12] NASSEHI A,ESSINK W,BARCLAY J. Evolutionary algorithms for generation and optimization of tool paths[J]. CIRP Annals,2015,64(1):455-458. DOI:10.1016/j.cirp.2015.04.125.
- [13] 黄国钦,徐西鹏. 基于锯切弧区切向力分布的功率消耗模型[J]. 机械工程学报,2011,47(21):170-176. DOI:10.3901/JME.2011.21.170.
- [14] 王瑞秋,陈五一,金曼. 多点切触加工中的局部干涉分析[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(5):580-584. DOI:10.3969/j.issn.1001-5965.2006.05.019.
- [15] 汪嘉业,王文平,屠长河,等. 计算几何及应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [16] JIN Yuan,HE Yong,FU Jianzhong,*et al.* Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology[J]. Additive Manufacturing,2014,1/2/3/4:32-47. DOI:10.1016/j.addma.2014.08.004.
- [17] 邵辉,王磊,胡伟石,等. 采用C#的多轴联动石材桥切机控制系统设计与仿真分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(2):166-171. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201709054.
- [18] 李远,黄辉,朱火明,等. 花岗石锯切过程中的锯切力特征[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2002(4):15-19. DOI:10.3969/j.issn.1006-852X.2002.04.004.
- [19] 黄吉祥,刘舒颖,黄辉,等. 机械臂加工花岗岩的力和工具磨损特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(2):159-165. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201712065.
- [20] ZHAO Zhiwen,LAPERRIÈRE L. Adaptive direct slicing of the solid model for rapid prototyping[J]. International Journal of Production Research,2000,38(1):69-83. DOI:10.1080/002075400189581.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)