

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201911028



# 异型石材高效锯切优化策略

钱平<sup>1,2</sup>, 邵辉<sup>1,2</sup>, 尹方辰<sup>3</sup>, 兰欣<sup>1,2</sup>, 王达<sup>1,2</sup>

- (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:** 针对异型石材铣磨效率低下的问题,利用金刚石圆锯片大切割深度的优势,提出一种异型石材高效锯切粗加工优化策略.首先,用边界表示法描述锯切过程中的工件数据结构;其次,提出以八叉树算法搜索材料去除最大深度,获取相应的特征切削点和特征工件顶点,用于构造锯切平面,以实现工件材料去除量最大化;接着,以锯切加工时间最小为优化目标,分析金刚石圆锯片沿锯切平面走刀产生的截交面多边形特性,结合一刀切透方式,给出一种最短锯切行程的进给方向优化方法;最后,对路障球进行锯切工仿真实验.仿真结果表明:在材料去除量为  $1.091 \times 10^7 \text{ mm}^3$  时,相比传统磨削加工,所提锯切加工策略使去材效率提高了近 7 倍.

**关键词:** 锯切加工; 金刚石圆锯片; 异型石材; 材料去除; 进给方向优化

**中图分类号:** TH 164; TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)03-0277-08

## Optimization Strategy of High Efficient Sawing for Special-Shaped Stone

QIAN Ping<sup>1,2</sup>, SHAO Hui<sup>1,2</sup>, YIN Fangchen<sup>3</sup>,  
LAN Xin<sup>1,2</sup>, WANG Da<sup>1,2</sup>

- (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:** Aiming at low efficiency of milling and grinding for special-shaped stone, taking advantage of large cutting depth of diamond circular sawblade, an optimization strategy of highly efficient sawing for special-shaped stone was proposed. First, the boundary representation was used to describe the data structure of workpiece in the sawing process. Second, the maximum material removal depth was searched by octree algorithm, and the corresponding removal points and workpiece convex vertexes were also obtained to construct the sawing plane in order to maximize the removal volume of the material. Third, taking the minimum sawing time as the optimization objective, a feed direction optimization method for shortest cutting stroke was proposed with one-cutting-fits-all machining mode on the basis of analyzing the characteristics of the intersecting polygons generated by sawing workpiece. Finally, the simulation experiment of sawing roadblock ball was carried out. The simulation results show that when the material removal amount is  $1.091 \times 10^7 \text{ mm}^3$ , the material re-

收稿日期: 2019-11-09

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: 国家自然科学基金资助项目(51905181);福建省自然科学基金资助项目(2019J01084);福建省泉州市科技计划项目(2017T001)

moval efficiency of the proposed sawing strategy is nearly 7 times higher than that of traditional grinding.

**Keywords:** sawing; diamond circular sawblade; special-shaped stone; material removal; feed direction optimization

石材行业的发展对石材加工提出更高的要求,尤其是在粗加工阶段,加工效率倍受关注.传统的石材粗加工多采用金刚石砂轮磨削或线锯锯切的方式<sup>[1-2]</sup>,然而,这些加工方式的时间消耗往往不能很好地满足粗加工高效率的需求.金刚石圆锯片因切割深度深、切割线速度大,被广泛应用于石材的切断工艺<sup>[3]</sup>.随着多轴联动技术的发展与 5~6 轴数控机床的应用,三维锯切加工逐渐成为研究热点.近年来,国内外学者开始采用圆锯片代替传统刀具,用于粗加工工序的研究.吴玉厚等<sup>[4]</sup>提出一种基于刀触点路径截面线法,利用圆锯片对小曲率的曲面进行粗加工,相比砂轮磨削,其加工效率提高了 5 倍.针对数控加工过程中实时仿真的工件建模方法,现有的方法多采用基于留量的 Z-map 模型反映工件的残留情况<sup>[5]</sup>,但大量的数据计算会占用较大的存储空间.张霞等<sup>[6]</sup>提出一种基于 B-rep 的工件表面动态几何模型,但对模型适用性没有作出进一步的分析.传统数控粗加工一般采用等参数线偏置法<sup>[7]</sup>和截面线层切法<sup>[8]</sup>进行材料去除规划,以生成刀具轨迹.然而,这些方法存在刀路冗长或计算获取不易等局限性.

已有文献对金刚石圆锯片在异型石材大块锯切粗加工中应用的研究较少,本文结合石材粗加工阶段的特点与金刚石圆锯片优势,以材料去除量和锯切加工时间为评价指标,提出基于圆锯片的异型石材粗加工优化策略.

1 关键问题

粗加工是数控加工的重要工序之一,其任务是快速切除工件毛坯上的大部分多余材料,只保留后续工序的适当余量<sup>[9]</sup>.金刚石圆锯片粗加工三维异型石材,具有实现高效化、自动化的大块锯切粗加工能力,其大块锯切示意图,如图 1 所示.

研究解决的关键问题描述有以下 3 点.

- 1) 对锯切粗加工而言,应着重于刀具与工件模型的几何求交快速性和工件数据操作高效性.因此,需建立一种适用于锯切过程中工件数据的高效动态管理的工件模型及数据结构.
- 2) 锯切粗加工应尽量保证每次锯切的材料去除量大,因此,需要在三维异型石材表面搜索材料去除深度最大时对应的特征切削点,进而构建确定圆锯片姿态的锯切平面.
- 3) 在进给速度一定时,锯切加工时间主要由锯切进给行程确定,为实现最短锯切加工时间,必须确定最短锯切的进给行程.

实际加工过程中,需要综合考虑加工效率和加工余量.为实现材料去除规划与进给方向优化策略,作出以下 3 个假设:1) 基于材料去除最大深度的锯切平面搜索是在毛坯工件选定为合理加工余量的前提下展开的;2) 算法产生的锯切平面姿态均在机床的机构约束范围之内;3) 仅对工件在粗加工过程中的单工序、不换刀情况进行进给方向优化.

2 工件建模

材料去除过程中,工件的几何形状与数据随锯切的进行而动态变化,这是一个大计算量和大信息存储的复杂过程<sup>[10]</sup>.圆锯片大块锯切石材的过程,不需要工件表面形貌的精确表示,而需要简单且能详细描述构成物体表面几何特征的描述方法.工件模型的边界表示法,如图 2 所示.边界表示法具有几何元素的信息及相互间的拓扑关系描述能力<sup>[11]</sup>,可以方便地提取和动态存储物体的各个组成面、面的边界及各个顶点的数据信息.因此,工件的

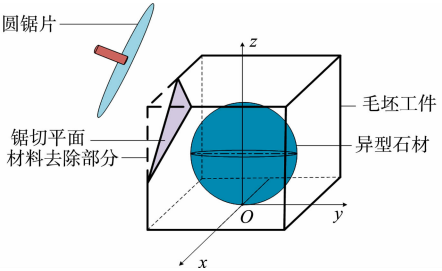


图 1 大块锯切示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of block sawing using circular sawblade

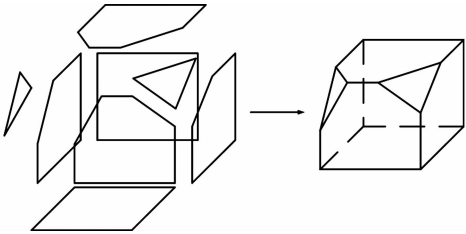


图 2 工件模型的边界表示法  
Fig. 2 Boundary representation of workpiece model

动态描述过程可用边界表示法. 物体的实体( $S_H$ )可通过它的空间平面方程及一定拓扑关系的边界面顶点表示,其表达式为

$$S_H = (P_H, E_H, F_H). \tag{1}$$

式(1)中: $P_H$ ,  $E_H$  和  $F_H$  分别表示实体相应的顶点集、边集和边界面集,  $P_H$  包含顶点的坐标信息,  $E_H$  包含构成边的邻接顶点信息,  $F_H$  包含构成边界面的顶点及其法向量信息.

工件模型数据结构,如图 3 所示. 图 3 中:Id solidno, Id faceno, Id Edge, Id Vertex 分别为体表、面表、边表、顶点表中各实体、面、边及顶点的编号;Face\_prevs, Face\_nexts 为与面相邻编号的两个面,体表、边表,顶点表规则与之类似;Face\_vector 为面的法向量;Edge\_vtx1 为边的约束顶点;Vertex\_coordinate 为顶点的空间坐标.

实体(solid)由体表构成,表达封闭表面围成的有限空间;边界面(face)由面表构成,表达实体表面,带有方向性;边(edge)由边表构成,表达相邻边界面的相交边,每条边由两个邻接顶点约束;顶点(vertex)由顶点表构成,体现边的约束顶点.

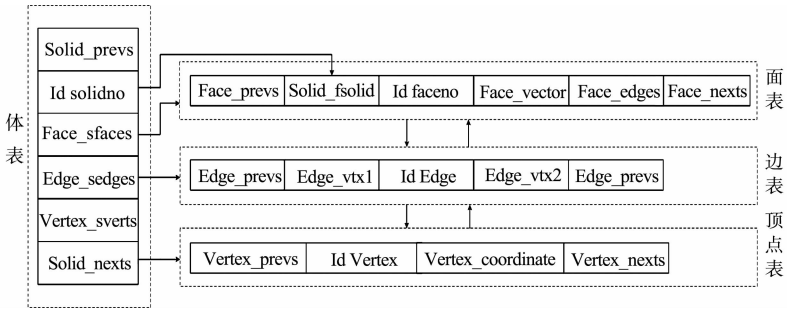


图 3 工件模型数据结构

Fig. 3 Data structure of workpiece model

3 材料去除规划

不同于传统粗加工方法,锯片可实现大块锯切,依据此特点进行材料去除规划. 对于凸体形状的工件材料,由空间几何推理可知,锯切材料去除量正相关于材料去除最大深度<sup>[12]</sup>. 基于此,提出一种基于材料去除最大深度的锯切平面算法.

3.1 算法流程

高去除量锯切示意图,如图 4 所示. 材料去除最大深度的锯切平面算法流程,如图 5 所示. 图 4, 5 中: $D_{m,max}$  为材料去除最大深度; $P_{bc}$ ,  $P_{objc}$  分别为材料去除最大深度对应的特征工件顶点与特征切削点; $P_{bp,out1}$ ,  $P_{bp,out2}$  为锯切去除工件顶点; $P_{b1} \sim P_{b8}$  为工件顶点; $L_{h1}, L_{h2}, L_{h4}, L_{h5}$  为锯切相关邻边; $L_{h3}$  为锯切无关邻边; $\pi_c$  为高去除量锯切平面; $P_{b,new1} \sim P_{b,new4}$  为圆锯片沿  $\pi_c$  锯切工件后,在工件表面产生的截面顶点.

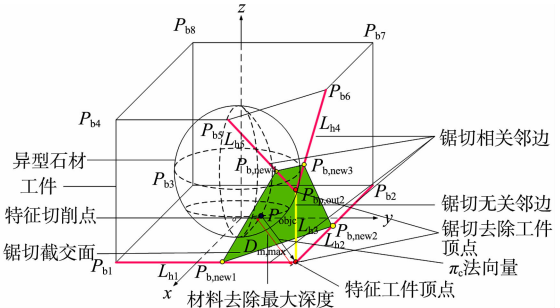


图 4 高去除量锯切示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high removal sawing

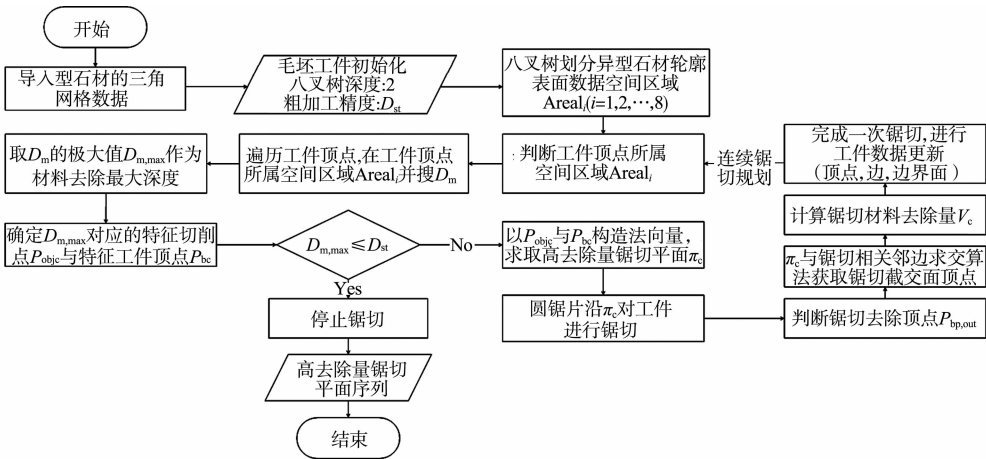


图 5 材料去除最大深度的锯切平面算法流程

Fig. 5 Flow chart of sawing plane algorithm of material removal maximum depth

3.2 三角网格模型的八叉树划分

八叉树是一种通过生成立方体空间节点包络空间点集,并递归形成树状层次结构的三维体素化方法<sup>[13]</sup>.为提高特征切削点搜索效率,首先,基于异型石材的三角网格模型表面数据点集 $(x,y,z)$ 的分布范围,根据合理加工余量的假设条件,构建一个紧致包围盒将点集数据完全包含,得到八叉树第0层的根节点;然后,根据设定的八叉树深度,沿着3个坐标轴方向,对该节点进行递归划分.八叉树划分空间区域示意图,如图6所示.

以常见异型石材制品路障球为例,其直径为400 mm,实际加工时,通常将毛坯工件设置与加工目标尺寸相近,尺寸(长×宽×高)为440 mm×440 mm×400 mm,保证一定的加工余量,以减少切割工序为准,对于异型石材,取均匀加工余量为最佳.当八叉树层数较多时,八叉树储存空间占用和节点查询时间消耗的代价会随之增加<sup>[14]</sup>.综合考虑搜索效率与节点查询时间消耗等因素,以8个近邻子空间建立深度为2层的八叉树,将路障球三角网格实体模型表面数据划分为8组,分别纳入子空间节点区域 $Areal_i(i=1,2,\cdots,8)$ ,从而在异型石材轮廓表面数据点与八叉树的节点之间建立联系.路障球的八叉树区域划分,如图7所示.

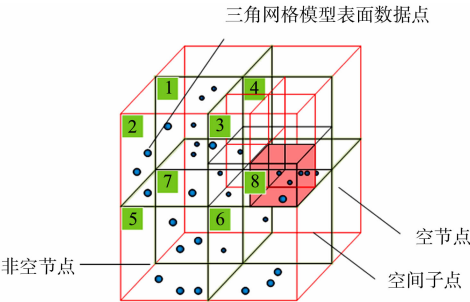


图6 八叉树划分空间区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of space area division with octree

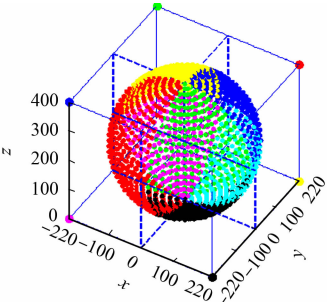


图7 路障球的八叉树区域划分

Fig. 7 Roadblock ball division with octree

3.3 高去除量锯切平面构造

设定毛坯工件尺寸与异型石材的三角网格模型包围盒一致.在此基础上,根据工件顶点与八叉树划分的空间节点区域的位置关系,判断工件顶点所属空间节点区域 $Areal_i$ ,并在该空间节点区域中搜索工件顶点到异型石材轮廓表面的距离 $D_m$ .将 $D_m$ 的极大值 $D_{m,max}$ 作为材料去除最大深度,逆向搜索得到相应的特征切削点 $P_{objc}(x_{objc},y_{objc},z_{objc})$ 与特征工件顶点 $P_{bc}(x_{bc},y_{bc},z_{bc})$ .

以特征切削点与特征工件顶点构造 $\pi_c$ 的法向量 $K(K_A,K_B,K_C)$ ,即

$$K(K_A,K_B,K_C) = (x_{bc} - x_{objc}, y_{bc} - y_{objc}, z_{bc} - z_{objc}). \tag{2}$$

由于特征切削点属于 $\pi_c$ 的切点,通过解析几何求解,可以得到 $\pi_c$ 的平面方程为

$$K_A \cdot x + K_B \cdot y + K_C \cdot z + K_D = 0. \tag{3}$$

式(2),(3)中: $K_A,K_B,K_C,K_D$ 为锯切平面的系数.

锯切平面算法用于连续锯切规划,通过算法得到有序的锯切平面 $\pi_c$ ,圆锯片沿 $\pi_c$ 进行锯切加工可以保证高材料去除量指标.高去除量锯切平面,如图8所示.

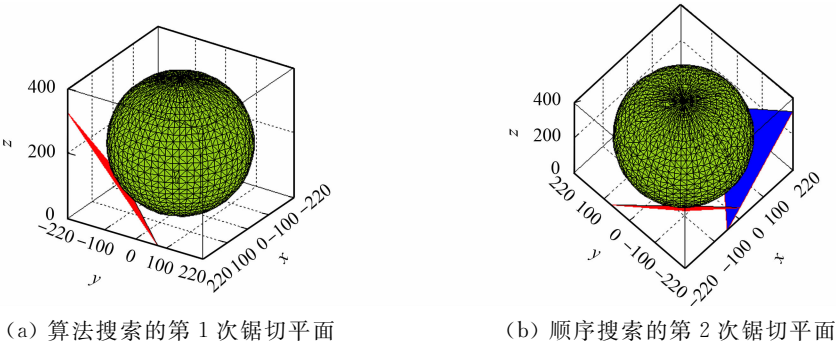


图8 高去除量锯切平面

Fig. 8 High removal sawing planes

### 3.4 锯切材料去除量计算

为观测圆锯片每次锯切去除材料的效果, 需要对锯切材料去除量  $V_c$  进行计算, 有以下 3 个步骤.

**步骤 1** 判断锯切去除工件顶点.  $\pi_c$  将全空间分割成两个半空间<sup>[15]</sup>, 通过其法向量定义正、负半空间. 以  $\pi_c$  为边界, 其法向量所指向的一个半空间为正半空间, 即锯切去除部分所在的半空间, 负半空间为工件材料保留部分. 利用工件顶点和  $\pi_c$  的平面方程, 根据二叉空间分割算法, 判断锯切去除顶点, 即

$$\left. \begin{aligned} f(x, y, z) &= K_A \cdot x + K_B \cdot y + K_C \cdot z + K_D, \\ f &> 0, \quad \text{顶点属于 } P_{bp, out}, \\ f &< 0, \quad \text{顶点不属于 } P_{bp, out}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

**步骤 2** 求解锯切截面顶点. 分析  $\pi_c$  与工件的相交位置关系, 提出锯切平面与锯切相关邻边求交算法. 将锯切相关邻边的空间直线方程与  $\pi_c$  平面方程构建方程组, 即

$$\left. \begin{aligned} K_A \cdot x + K_B \cdot y + K_C \cdot z + K_D &= 0, \\ A_{hx1} \cdot x + B_{hx1} \cdot y + C_{hx1} \cdot z + D_{hx1} &= 0, \\ A_{hx2} \cdot x + B_{hx2} \cdot y + C_{hx2} \cdot z + D_{hx2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中:  $A_{hx1}, B_{hx1}, C_{hx1}, D_{hx1}, A_{hx2}, B_{hx2}, C_{hx2}, D_{hx2}$  分别是锯切相关邻边的空间直线方程系数. 求解方程组, 得到锯切截面顶点  $P_{b, new} = \{P_{b, new1}, P_{b, new2}, \dots, P_{b, newn}\}$ .

**步骤 3** 计算锯切材料去除量. 根据工件去除体与锯切截交面的关系可知,  $P_{bp, out} = \{P_{bp, out1}, P_{bp, out2}, \dots, P_{bp, outm}\}$  与  $P_{b, new} = \{P_{b, new1}, P_{b, new2}, \dots, P_{b, newn}\}$  构成工件去除体的所有顶点. 考虑材料去除过程中工件去除体与工件完全分离, 因而, 可以将工件去除体视为规则的凸多面体. 根据三维空间多面体体积公式<sup>[16]</sup>, 可计算工件去除体体积, 进而得到锯切材料去除量  $V_c$ , 即

$$V_c = \frac{1}{6} \sum d(P_{bp, out1}, P_{bp, out2}, \dots, P_{bp, outm}, P_{b, new1}, P_{b, new2}, \dots, P_{b, newn}). \quad (6)$$

式(6)中:  $d(P_{bp, out1}, P_{bp, out2}, \dots, P_{bp, outm}, P_{b, new1}, P_{b, new2}, \dots, P_{b, newn})$  为工件去除体表面多边形顶点按逆时针排列时, 顶点坐标所构成的正向行列式.

## 4 锯切加工时间优化

### 4.1 锯切加工时间优化模型

考虑一次锯切走刀切透的方式<sup>[17]</sup> (简称一刀切透方式), 沿前文规划的锯切平面  $\pi_c$  加工. 在忽略非锯切运动消耗时间的前提下, 锯切加工时间优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \sum_{m=1}^M (t_m), \quad t_m = \frac{d_{c, m}}{v_f}, \\ \text{s. t.} \quad & d_{c, m} < R, \\ & P_1 P_2 \dots P_n \subset S. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中:  $M$  为锯切次数;  $t_m$  为沿锯切平面加工所消耗的时间;  $d_{c, m}$  为沿锯切平面加工的锯切进给行程 (一刀切透方式下的锯切深度);  $v_f$  为锯切进给速度;  $R$  为圆锯片半径;  $P_1 P_2 \dots P_n$  为锯切截面多边形;  $S$  为一刀切透方式下的锯切弧区<sup>[18]</sup>.

$M$  由材料去除规划获取的  $\pi_c$  数量决定, 实际加工中,  $v_f$  通常取定值. 为了最小化锯切加工时间, 应保证每次锯切加工所消耗的时间  $t_m$  最小, 而  $t_m$  与  $v_f, d_{c, m}$  直接相关.

### 4.2 优化方法

由时间优化模型可知, 锯切进给行程是影响锯切加工时间的主要因素, 其与进给方向及下刀点选取有关. 不同进给方向的锯切进给行程, 如图 9 所示. 由图 9 可知: 刀轴始终保持垂直于锯切截面多边形  $P_1 P_2 P_3$ , 选取不同的进给方向和下刀点均能实现一刀切透, 但锯切进给行程存在差异; 相比进给方向 1, 进给方向 2 的锯切进给行程更长, 在相同的进给速度条件下, 进给方向 2 的锯切加工时间也会相应增加. 因此, 欲获得最小的锯切加工时间, 需要对锯切截面多边形进行分析, 寻找使锯切进给行程最短的进给方向和下刀点.

**4.2.1 锯切截面多边形分析** 为了方便锯切截面多边形分析, 给出如下 4 个定义.



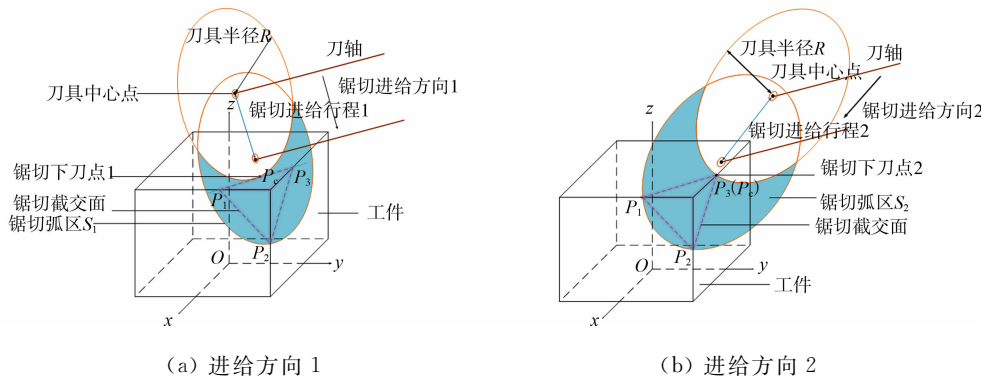


图 9 不同进给方向的锯切进给行程

Fig. 9 Sawing feeding strokes for different cutting directions

**定义 1** 设  $P_1P_2\cdots P_n$  是锯切截交面的三维空间凸多边形,其顶点按逆时针排序.

**定义 2** 设  $L_{i,i+1}=\{P_i,P_{i+1}\}$  为  $P_1P_2\cdots P_n$  的一条边,顶点  $P_j(j=1,2,\cdots,n)$  到边  $L_{i,i+1}$  的距离为  $D_{i,j}$ ,则称  $h_{i,j}=\max(D_{i,j})(j=1,2,\cdots,n)$  为边  $L_{i,j}$  的高,其对应的顶点称为高顶点  $P_h$ .

**定义 3** 设  $h_{i,j}$  为多边形  $P_1P_2\cdots P_n$  的一条边的高,则称  $h_{\min}=\min(h_{i,j})$  为多边形的最短高,最短高的长度称为多边形  $P_1P_2\cdots P_n$  最小跨度.

**定义 4** 多边形  $P_1P_2\cdots P_n$  最小跨度  $h_{\min}$  对应的边为锯切特征边  $L_p$ .

以锯切截交面多边形  $P_1P_2P_3$  与  $P_1P_2P_3P_4$  为例,锯切截交面多边形的最小跨度,如图 10 所示.图 10 中: $P_1P_2P_3$  中最短高为  $h_{3,1}$ ,高顶点  $P_h$  为  $P_2$ ,锯切特征边  $L_p$  为  $L_{3,1}$ ,最小跨度为  $h_{3,1}$  的长度; $P_1P_2P_3P_4$  中最短高为  $h_{2,3}$ ,高顶点  $P_h$  为  $P_4$ ,锯切特征边  $L_p$  为  $L_{2,3}$ ,最小跨度为  $h_{2,3}$  的长度.

分析锯切截交面多边形特性可知,最小跨度一定存在于多边形的某一条边的高  $h_{i,j}$  中.

**4.2.2 进给方向优化方法** 选取锯切截交面多边形最小跨度的进给方向和满足多轴机床几何特性的下刀点,进而可以确定最短锯切进给行程,具体优化方法如下.

首先,对锯切截交面多边形  $P_1P_2\cdots P_n$  进行分析,在其边集合  $L=\{L_{1,2},L_{2,3},\cdots,L_{n,1}\}$  中依次取边  $L_{i,i+1}$ ,根据  $L_{i,i+1}=\{P_i,P_{i+1}\}$ ,求出边的空间直线方程为

$$\left. \begin{aligned} k_{A,i}x+k_{B,i}y+k_{C,i}z+k_D &=0, \\ k'_{A,i}x+k'_{B,i}y+k'_{C,i}z+k'_D &=0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

然后,依次取锯切截交面多边形顶点  $P_j(j=1,2,\cdots,n)$ ,根据点到空间直线的距离公式,求解所有顶点  $P_j$  到边  $L_{i,i+1}$  的距离  $D_{i,j}(j=1,2,\cdots,n)$ ,并得到边  $L_{i,i+1}$  的高  $h_{i,j}$ .进而,确定锯切截交面多边形的最短高、最小跨度、锯切特征边  $L_p$  及其对应的高顶点  $P_h$ .

最后,分析锯切特征边与其对应高顶点的位置关系,以确定进给方向和锯切下刀点.若锯切特征边  $L_p$  对应的高顶点  $P_h$  位于  $L_p$  的下方,则选取该  $P_h$  在  $L_p$  上的垂足点为锯切下刀点,以其对应的最短高  $h_{\min}$  方向为最优进给方向,最短锯切进给行程为锯切截交面多边形的最小跨度;若锯切特征边  $L_p$  对应的高顶点  $P_h$  位于  $L_p$  的上方,则选取该  $P_h$  为锯切下刀点,以其对应的最短高  $h_{\min}$  方向为最优进给方向,为实现一刀切透方式,最短锯切进给行程为锯切截交面多边形的最小跨度加上一定的锯切补偿深度.

## 5 仿真实例与对比分析

### 5.1 仿真结果分析

考虑一定的粗加工余量,选定尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 440 mm $\times$ 440 mm $\times$ 400 mm 的长方体毛坯工

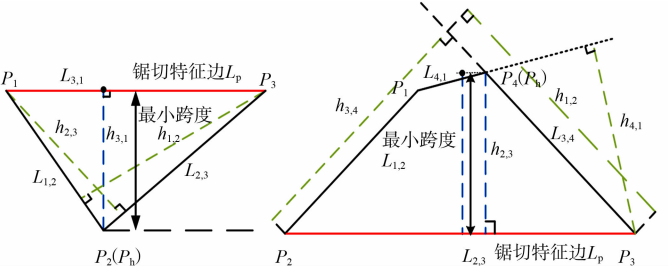


图 10 锯切截交面多边形的最小跨度

Fig. 10 Smallest span of intersecting polygon

件,取粗加工精度为  $D_{st}=26\text{ mm}$ ,圆锯片半径为  $400\text{ mm}$ ,锯切进给速度设定为  $180\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,经过 19 次锯切后,材料去除规划获取的 19 个锯切平面,如图 11(a)所示.边界表示法对粗加工锯切后的工件重建效果图,如图 11(b)所示.可见锯切后的工件轮廓已逐渐逼近路障球形状.

锯切加工时间的对比,如图 12 所示.由图 12 可知:优化后的总锯切加工时间约为  $25\text{ min}$ ,相较于未优化的锯切加工时间减少了约  $9.5\%$ .

锯切加工过程中,单位时间锯切材料去除量( $V_t$ )的对比,如图 13 所示.由图 13 可知:锯切材料去除量达到  $1.091\times 10^7\text{ mm}^3$ ,约占应去除毛坯材料总量的  $81.2\%$ .

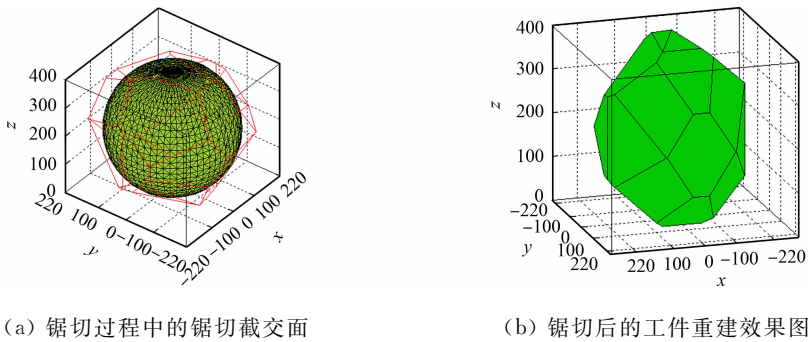


图 11 仿真实验结果

Fig. 11 Simulation experiment results

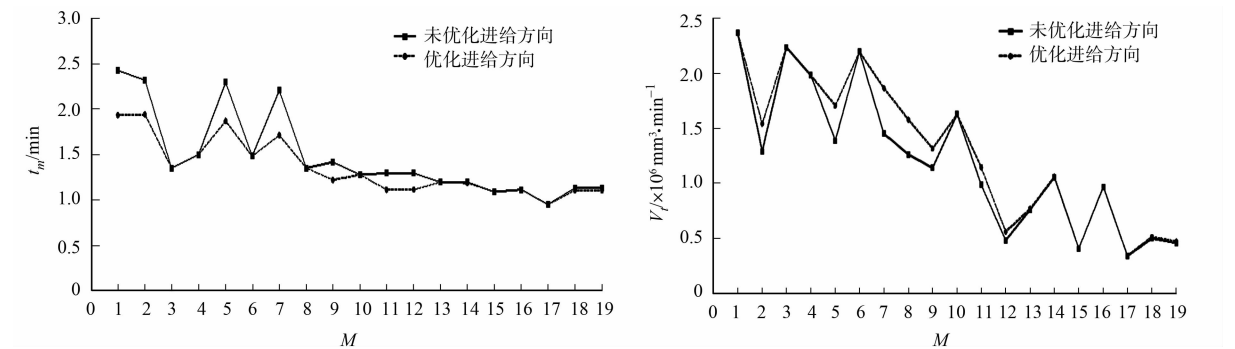


图 12 锯切加工时间的对比

Fig. 12 Comparison of sawing time

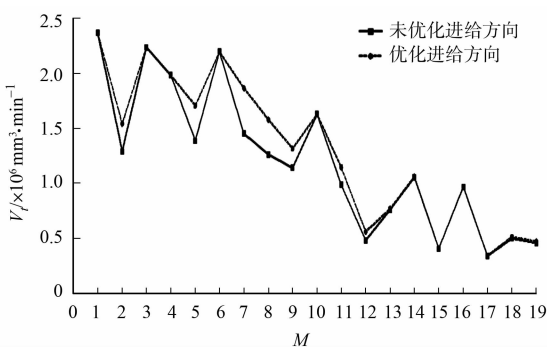


图 13 单位时间锯切材料去除量的对比

Fig. 13 Comparison of removal amount of sawing material per unit time

### 5.2 锯切和磨削加工对比分析

为了验证锯切粗加工方法对提高异型石材制品加工效率的有效性,选择石材粗加工常用的磨削加工方式作为对比.砂轮加工参数如下:加工深度  $a_p$  为  $2\text{ mm}$ ;加工宽度  $a_w$  为  $22.5\text{ mm}$ ;进给速率为  $5\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .圆锯片的锯切加工参数如下:圆锯片半径为  $400\text{ mm}$ ;锯切进给速率为  $180\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .在相同材料去除量  $1.091\times 10^7\text{ mm}^3$  的情况下,磨削加工时间为  $177\text{ min}$ ,锯切加工时间为  $25\text{ min}$ .

对比两种加工方式消耗的时间可知:在相同材料去除量的前提下,锯切粗加工效率约为磨削粗加工的 7 倍.主要原因是磨削加工受到磨削深度的限制,其最大磨削深度仅能达到  $2\text{ mm}$ ,且对于加工深度较深的情况必须采用分层磨削的方法;而文中的锯切加工方法能直接达到最大深度进行大块锯切,因此,加工效率显著提高.

## 6 结束语

采用边界表示法建立适用于锯切粗加工的工件模型及以边界面与顶点为核心的数据结构,实现了材料去除过程中工件表面数据的高效动态管理.提出基于材料去除最大深度的锯切平面算法用于锯切粗加工规划.在忽略非锯切运动的基础上,建立锯切加工时间优化模型.通过分析进给方向和锯切下刀点对锯切进给行程的影响,结合一刀切透方式,给出一种进给方向优化方法,实现了锯切加工时间最小化目标.在相同材料去除量条件下,通过锯、磨削加工时间对比,验证了文中锯切粗加工策略的高效性.

## 参考文献:

- [1] KIM D, KIM H, LEE S. Characterization of diamond wire-cutting performance for lifetime estimation and process optimization[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(2): 847-852. DOI: 10. 1007/s12206-016-0139-0.
- [2] CHUNG C H, TSAY G D, TSAI M H. Distribution of diamond grains in fixed abrasive wire sawing process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(9/10/11/12): 1485-1494. DOI: 10. 1007/s00170-014-5782-y.
- [3] 尤芳怡, 徐西鹏. 平面磨削中金刚石砂轮有效磨粒数的研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(9): 1092-1096. DOI: 10. 3321/j. issn: 1004-132X. 2007. 09. 022.
- [4] 吴玉厚, 赵德宏, 闫广宇. 基于刀触点路径截面线法的不规则曲面锯切加工算法研究[J]. *大连理工大学学报*, 2017, 57(4): 352-359. DOI: 10. 7511/dllgxb201704004.
- [5] LEE S K, KO S L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model[C]// 2nd International Conference on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology. Haeundae: *Journal of Materials Processing Technology*, 2002: 608-617. DOI: 10. 1016/S0924-0136(02)00761-6.
- [6] 张霞, 杨岳. 基于 B-rep 的工件表面动态几何模型[J]. *计算技术与自动化*, 2012, 31(3): 96-99. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6199. 2012. 03. 023.
- [7] 李亮, 湛永祥, 李永桥. 自由曲面数控加工刀位轨迹生成方法的研究[J]. *制造业自动化*, 2009, 31(1): 17-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-0134. 2009. 01. 005.
- [8] 朱淑梅, 刘威, 朱俊俊. 基于散乱点云的层切法粗加工刀轨规划方法研究[J]. *制造业自动化*, 2017, 39(8): 81-85. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-0134. 2017. 08. 021.
- [9] 刘司伟, 张丽艳. 基于散乱测量数据点的三轴数控粗加工刀位轨迹生成算法[J]. *机械制造与自动化*, 2005, 34(2): 6-10. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-5276. 2005. 02. 003.
- [10] 徐建国, 张友良, 张谓, 等. 加工过程的可视化仿真[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(12): 1265-1269. DOI: 10. 3321/j. issn: 1004-132X. 2006. 12. 015.
- [11] KIM B C, MUN D. Stepwise volume decomposition for the modification of B-rep models[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(9/10/11/12): 1393-1403. DOI: 10. 1007/s00170-014-6210-z.
- [12] 林志树, 黄辉, 郑生龙. 多线往复式线锯切割中单位长度材料去除量的理论分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(13): 208-214. DOI: 10. 3901/JME. 2018. 13. 208.
- [13] 吴晓军, 刘伟军, 王天然. 基于八叉树的三维网格模型体素化方法[J]. *工程图学学报*, 2005, 26(4): 1-7. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0158. 2005. 04. 001.
- [14] KIM Y H, KO S L. Improvement of cutting simulation using the octree method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28(11/12): 1152-1160. DOI: 10. 1007/s00170-004-2462-3.
- [15] 刘忠铁, 马东立. 一种高效空间分割算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(4): 434-437. DOI: 10. 13700/j. bh. 1001-5965. 2010. 04. 025.
- [16] ARVO J. *Graphics gems*[M]. New York: Academic Press, 1991.
- [17] 龚愿愿. 弧区变化对蓝宝石晶片锯切机理的影响研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2016.
- [18] 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.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)