

圆锯片锯切加工曲面过程中干涉检查算法研究

张珂,张立奇,赵德宏

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究锯切加工中锯片与曲面之间的干涉问题,在传统的干涉检查方法的基础上提出一种新的检查算法,可以快速准确地检查出存在干涉点的位置.方法 设定一特定曲面,使用检查线法进行干涉点分析,根据检查线与代加工面之间的坐标关系判断曲面上加工点的干涉情况.结果 通过仿真软件对锯切过程进行模拟实验,得到了三种不同曲率曲面的干涉点分布图,当锯片半径为25 cm,30 cm,35 cm时,对应检查出干涉点数量为2 200,3 000和3 200个.结论 通过算法检查出了曲面中存在干涉情况的点,验证了算法的可行性和准确性,对锯切加工工艺的发展有一定的指导作用;提出的干涉检查算法将锯切加工应用于曲面开粗的加工过程中,加快了硬脆材料加工过程中的加工效率、节约了经济成本和时间成本.

关键词 异型石材;自由曲面;锯切加工;干涉检查

中图分类号 TU754.4;TH122 文献标志码 A

Study on Interference Checking Algorithm during Surface Machining Process by Round Saw Blade

ZHANG Ke, ZHANG Liqi, ZHAO Dehong

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the interference between saw blade and surface, a new detection algorithm is proposed in this paper based on the traditional interference checking method. The position of the interference point can be checked quickly and accurately. A surface is specified, the check-line method for interference point analysis is used, and the interference situation of the processing point is judged on the surface based on the coordinate relationship between the check-line and the processing surface. The interference point distribution map of three different curvature surfaces is obtained through simulation experiments by the simulation software, and the number of interference points is calculated. When the radius of the saw blade is 25cm, 30cm, and 35cm, the corresponding number of interference points is 2200, 3000, and 3200. Points of interference in the surface are checked through the algorithm, and the feasibility and accuracy of the algorithm are verified. It has certain guidance for the development of saw cutting process. The interference checking algorithm proposed in this paper applies sawing machining to the roughening process of curved surface,

收稿日期:2018-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51675353);沈阳市双百工程重大科技成果转化项目(Z17-5-060)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事石材加工方面研究.

which accelerates the processing efficiency and saves the economic and time cost in the processing of hard and brittle materials.

Key words: irregular shape stone; free surfaces; sawing; interference check

在我国人民生活水平日益提高的同时,对生活品质的追求也相应地有了大幅度提高.石材行业作为高端豪华的装潢相关行业,在大好的背景下也获得了飞速的成长.石材类制品广泛地应用于日常生活中的房屋装修、花园景观和园区摆设等各个方面,以其独特的硬度、质量、光泽等天然特性和漂亮的纹理在各个领域占据着重要的地位^[1-2].

锯切加工在异型石材中的应用主要是针对荒料开采后的切割,在加工特定异型石材制品中并未有高效的应用,相比之下铣削加工则在加工中占据着主导地位.然而锯切加工效率高、速度快且成本相比较低,有着独特的优势.在大型石材异型制品加工中,单纯使用铣削加工必然会使加工时间增长,加工成本升高,因此推广金刚石圆锯片锯切开粗来代替传统模式的粗铣刀开粗是有必要的^[3].金刚石工具切割石材的主要方法有3种:金刚石圆锯片锯切、框架锯锯切和金刚石串珠绳锯切.在现今自动化机床占据主导地位的大环境下,金刚石圆锯片锯切是最主要的锯切方式.

关于锯切加工方面的研究,国外已经开始研制专业的锯切加工中心和配套的加工程序.美国 Northwood 公司的 Satellite XL 型数控加工中心,该加工中心采用五轴联动数字控制技术,可实现任何角度的五个外形表面的加工^[4];意大利 OMAG 公司设计的 formacolonne - CN 型加工中心,该机采用四轴联动控制技术,配备两个工作头^[5];德国欧马克公司的一款集仿形加工、锯切、雕刻、车铣等于一体的 3~6 轴数字加工中心^[6].在国内锯切加工还未发展得如国外一般先进,但是也已经开始了相关的系列研究.徐西鹏等^[7]研究了花岗岩锯切过程中的锯切力特征,对

锯切花岗岩过程中的锯切力与锯切方向和锯切参数的关系,并得到了随锯切加工进行时单颗金刚石颗粒的受力情况;张绍和等^[8]进行了干切花岗岩的金刚石小锯片试验研究,分别采用 HF1、HF2、HF3 预合金粉末作为锯片基体分析了锯片加工直到寿命结束过程中工作层的变化,根据实验情况得出了最佳基体材质.

笔者在加工平面浮雕这一加工过程中,针对金刚石圆锯片开粗待加工曲面的加工工艺,在传统的干涉点检查方法的基础上提出一种新的检查算法,可以在加工前检查出待加工曲面中可能会发生过切、碰撞等干涉情况的部分.根据加工参数要求,以适当的间隔在待加工曲面上选取一系列的点,分别对这些点进行干涉检查,即可完成曲面上所有可能发生干涉点的检查并对整个曲面锯切过程进行仿真分析,模拟出干涉点的排布图,并统计曲面中干涉点的数量.

1 锯切加工工艺

我国作为国际石材市场中的石材加工和出口大国,对于石材行业中的新兴技术和高效的技术革新高度重视.在当今社会环境下,智能机械化的石材加工技术相对于古老的人力手工加工无疑有着压倒性的优势,但在对于石材浮雕和雕塑等复杂的曲面异型石材产品,手工加工更依赖于工人师傅的手工技艺,机械加工则不能体现出人工的手法技术,这一类加工是机械无法代替的^[9].然而在加工一系列普通类型的曲面石材制品时,并不需要追求过高的艺术家之时,采用手工加工或传统的加工手法则会消耗大量的时间,例如日常可见的板材加工、浮雕景观、石材类装饰品等.现在加工这类制品主要还是采用铣削

加工,加工刀具为金刚石铣刀或金刚石涂层刀具^[10]。这种铣削加工精度高,表面效果好,但是同时加工成本较高,耗时依然较长。这是因为金刚石铣刀铣削石材时主要是依靠附着在刀具表面的金刚石颗粒进行加工,加工参数不可设置过高,否则会影响刀具使用寿命,严重时会造成刀具损坏。

1.1 锯切加工工艺特性

锯切加工的特点突出显示在其高速的线速度,可以快速地对石材表面进行脆性去除。锯切加工相比于传统机械加工中的铣削磨削加工,具有加工效率更快,加工时间更短,时间成本更低的优势^[11]。锯片刀具相比于传统的铣刀,价格更加低廉,寿命更长,表面精度更高,加工经济成本更低。国内外的锯切加工中,最常用的锯切加工工具就是金刚石锯切刀具。金刚石锯切刀具以其切削性能和耐磨损性能,在石材、金属等许多行业中得到了广泛的应用。

对一个普通的异型石材制品来讲,从板材成型开始,必定要经历两个阶段,粗加工和精加工^[12]。所谓粗加工即对板材材料中大部分多余的材料进行快速去除,因此在粗加工中第一要保证的是切削效率高,这样可以不必浪费时间在无用的材料去除上。提高粗加工的加工效率要从改善圆锯片的结构和改进加工参数两方面入手。由于圆锯片的尺寸形状限制,使用圆锯片进行精加工在加工面情况复杂的条件下并不适用,因此锯切加工着重于粗加工以及半精加工。随着数控机床的发展和研发,通过主轴的配合可改善锯切加工的机动性,对推广锯切加工应用有着重要的意义。

1.2 干涉产生机理

在机械加工中,干涉问题是编程设计中不可回避的问题之一。加工中大体上可将加工刀具的干涉类问题大体分为两类:一类是全局干涉,另一类为局部干涉^[13-15]。

全局干涉指的是在加工过程中,刀具与

加工系统整体之间的干涉问题,比如刀具与夹具之间的干涉,刀具与工件之间的干涉,刀具与机床的碰撞等等。此类干涉一旦发生将会造成刀具、加工件以及机床本身的损害,在设计时应该严禁发生。

局部干涉指的是相对于整体干涉而言较为细小的干涉,都是发生在加工工件表面和周边的,例如由于待加工面的形状较为复杂,刀具在进行加工时对加工点的切削不到位或加工时影响到其他部位的形状和精度,产生过切和欠切等问题,这将会导致我们得不到理想的加工面,加工出的成品工艺参数不合格。随着数控软件的不断优化,利用先进的数控编程软件并选用合理的刀具,能基本避免局部干涉的情况。但是由于锯片锯切的研究较少,使用较少,各个加工程序对其应用极为有限,常规的编程软件根本无法得到相应的加工程序,避免干涉发生更是无从谈起。因此在开发曲面锯切程序的同时,干涉点的检查与排除也是极为重要的一点。

由于异型石材曲面特征复杂,在加工曲面的凹区域或者结构较为复杂特征曲面的区域时,刀具就可能会与石材加工曲面产生干涉^[16]。当使用大尺寸圆锯片加工时,如果待加工曲面上部分区域曲率半径较小,则在加工中会对凹进部分及附近与平面相接的部分产生过切加工,影响工件的正常加工和工件的表面质量,在粗加工时虽然会留有一定的余量,但在加工中可通过减少切削材料部分从而控制对过切点的过度加工。干涉问题是机械加工编程过程中必须考虑和处理好的一个环节,否则在加工中一旦出现问题将会造成不可弥补的后果。因此,干涉处理既能够避免过切问题的产生又能对导致欠切的部分进行有效的后续加工。

1.3 干涉点排除方法

在不同类型的石材加工中,有两种主要的检测工具和方法来避免干扰:

(1) 先行限制^[17]. 该方法通过对曲面的分析, 分析要处理的曲面的复杂特性, 并对刀道进行了划分, 以选择刀道中的最小曲率半径. 由于锯切过程的特点, 如果锯切过程不想干涉, 那么圆锯片的有效加工半径就不能超过最小曲率半径, 从而可以提前防止干涉. 对于复曲面, 这种方法得到的最小曲率半径太小, 无法选择合适的圆锯片进行加工.

(2) 刀具路线优化方法^[18]. 该方法是基于预先约束方法中遇到的复杂曲面. 笔者根据圆形锯片的尺寸对选择的圆形锯片进行了优化, 并优化了每个锯片超过圆形锯片曲率范围的路径.

笔者针对异性石材加工中平面浮雕加工这一工艺过程进行研究, 采用锯切方式对待加工工件进行开粗加工, 主要针对加工中锯片与曲面之间的干涉问题进行研究, 在传统的刀路优化方法的基础上, 提出了一种新的检查算法, 可以快速准确地检查出干涉点的位置, 对提高锯切加工工艺有重要的意义.

2 锯切加工中干涉检查方法

2.1 构建锯切加工模型

结合锯切加工中的实际工作情况, 建立如图 1 所示的加工模型. 其中平面 S 为拟定的待加工曲面, 点 $O(X_o, Y_o, Z_o)$ 代表锯片加工曲面过程中中心点的位置, 即刀位点所在位置坐标. $C(X_c, Y_c, Z_c)$ 代表锯切过程中锯片与待加工曲面的接触点, 即刀触点所在位置坐标. 直线 L 为引入时刻垂直 XOY 面的检查线, 该线同时与锯片和待加工曲面相交, 得到所需的两个交点 $A(X_a, Y_a, Z_a)$ 和 $B(X_b, Y_b, Z_b)$.

2.2 检查线法

锯片加工某一自由曲面的运动过程, 可以看成是锯片在该曲面上的滚动切割运动, 锯片与曲面的接触点就是两者的相切点. 由于锯片的几何特性, 无论锯片切割至曲面上的任意一点时, 该点的法向量始终指向锯片圆心方向, 与锯片法向量重合, 这样每确定一

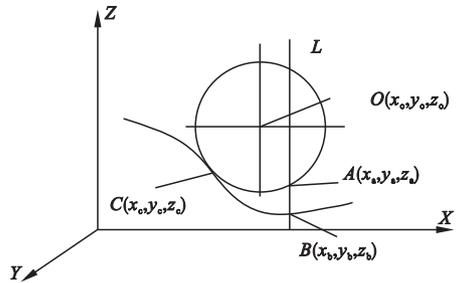


图 1 锯切模型

Fig. 1 Saw cutting model

个加工接触点, 锯片和曲面的相对位置关系即可确定, 刀位点、检查线与锯片接触点坐标信息也可以确定.

在实际生产加工中, 待加工曲面是由设计师绘制图纸交由工人师傅加工, 即所加工的曲面均是已知的图形, 由图纸即可得到或拟合出待加工曲面的方程, 相应的曲面上各点法向量均可得到. 也就是说在已知加工曲面和锯片参数的前提下, 我们可以由刀触点 C 计算出图中所需的所有参数. 在得到这些参数后, 即可比对检查出是否发生过切、碰撞等干涉情况, 为此在图中引入了一条检查线 L ^[19], 该线垂直于 XOY 面, 相交待加工曲面和锯片于 A 、 B 两点 (由于锯切加工过程中, 锯片始终保持下半部分参与工作, 因此检查线与锯片上部分交点可不考虑), 通过比对 Z_a 与 Z_b 的大小关系, 即可看出锯切加工过程中锯片与待加工曲面的位置关系, 也就可以作为在该检查点处是否发生干涉的判断依据^[20].

图 1 中引入的检查线 L 实际上在锯片的直径范围内有无数条, 旨在对加工过程中的每一点都能进行检查, 具体数量可根据锯片参数和加工工艺参数设定. 根据加工参数要求, 以适当的间隔在待加工曲面上选取一系列的点, 分别对这些点进行干涉检查, 即可完成曲面上所有可能发生干涉点的检查.

通过比较 A 和 B 的 Z 轴坐标取值可以检查出是否发生干涉, 比较整个检测过程中可能出现的情况如下:

(1) $Z_b \geq Z_a$, 锯片加工该点过程中会产生过切等干涉问题。

(2) $Z_b < Z_a$, 锯片可正常加工该点。

根据算法检查机理绘制如图2所示的检查流程图。

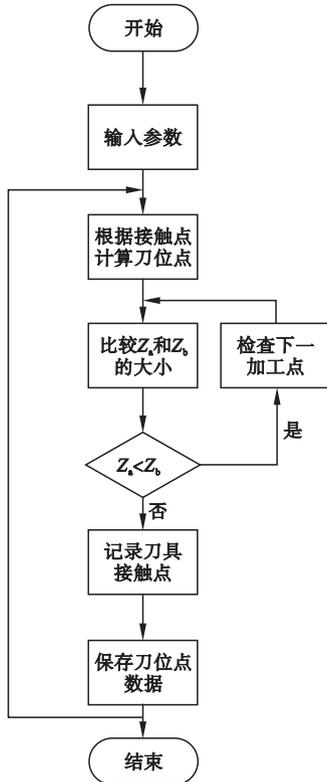


图2 检查流程图

Fig. 2 Flowchart of interference checking

2.3 干涉检查方法的数学表达

由图1可知,在锯切加工过程中,锯片底端工作区域时刻与待加工曲面相切,接触点处法向量与锯片法向量时刻保持重合,法向量计算公式如下:

$$n = ((r' \times r'') \times r') / \| (r' \times r'') \times r' \| \quad (1)$$

此时可得刀位点 P_o 和刀触点 P_c 之间关系:

$$P_o = P_c + \text{sign}(\det[r', r'']) \times R \times n_s = P_c + \text{sign}(\det[r', r'']) \times R \times \frac{((r' \times r'') \times r')}{\| (r' \times r'') \times r' \|} \quad (2)$$

锯切加工过程中 $\text{sign}(\det[r', r''])$ 取1。

整理可得图1中各点间几何关系如下:

$$\begin{cases} X_a = X_b, \\ Y_a = Y_b, \\ Z_a = Z_o - \sqrt{R^2 - (X_a - X_o)^2}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X_o = X_c + R \cdot \vec{n}_x, \\ Y_o = Y_c + R \cdot \vec{n}_y, \\ Z_o = Z_c + R \cdot \vec{n}_z. \end{cases} \quad (4)$$

由于锯切加工工艺主要针对于硬脆材料复杂曲面的开粗加工中,锯片厚度在其中影响因素极小,在理论分析中忽略不计,因此在坐标计算中将 Y 方向尺寸忽略不计。

2.4 干涉检查程序

干涉检查算法根据计算所得的各点信息可进行算法执行如下:

(1) 设初始加工点 $S_0(a_0, b_0, c_0)$, 锯片控制点 (x, y, z) 锯片半径 r , 行间距 h , 误差精度 ε ;

(2) 根据刀具控制点与检测点之间关系计算检测点, $z = c_0 + r \cdot \vec{n}_z$;

(3) 对 $a \in (x-r, x+r)$ 间所有点进行检査, $c_a = c_0 - \sqrt{r^2 - (a-x)^2}$;

(4) 若 $c_a \leq c_b$, 则加工点 S_0 处发生干涉, 标记出 S_0 , 转(5); 若 $c_a > c_b$, 则加工点 S_0 处无干涉, 直接转(5);

(5) 加工曲面上同一行下一加工点 S_1 , 令 $S_0 = S_1$. 若 a_0 为偶数次边界点则转(6), 否则重复步骤(2)~(4);

(6) 若 b_0 为边界点, 则检查结束; 否则令 $b_0 = b_0 + h$, 重复步骤(2)~(5)。

在整个锯切加工中,干涉点检查的作用是为下一步的刀具路径生成提供准备,在检查出干涉点后,记录下该点信息,在排除干涉点后计算新的刀触点,进而计算出对应的刀位点信息,最终生成刀具路径。

3 实例验证

在计算机软件 MATLAB2015 中建立方程 $z = 0.00001 \times (3x^3 - 4x + 2y^4 + 3y^3)$ 的图

形,生成拟定的连续曲面如图3(a)所示.该曲面表面连续规则,弯曲程度能够完整的表达算法的效果,模型中所需的各点信息数据均可由计算得出.

锯片直径的大小会影响到锯切加工中待加工曲面上的干涉点数量,随着锯片尺寸增加,则干涉点数量也会对应增多.笔者选取三种不同尺寸的锯片进行待加工曲面干涉检查,

由于笔者选择的曲面在 Y 方向上均为同等平行平面,故选取边界上的一条曲线确定该线上的干涉点,则曲面上对应 X 坐标的直线上的干涉点均有相同性质.实验中设立了锯片半径分别为25 cm,30 cm,35 cm三种尺寸规格进行检查,由设定的检查算法进行检查分析,最终可得到图3(b)~(d)的检查情况,统计出干涉点的数量分别为2 200,3 000,3 200个.

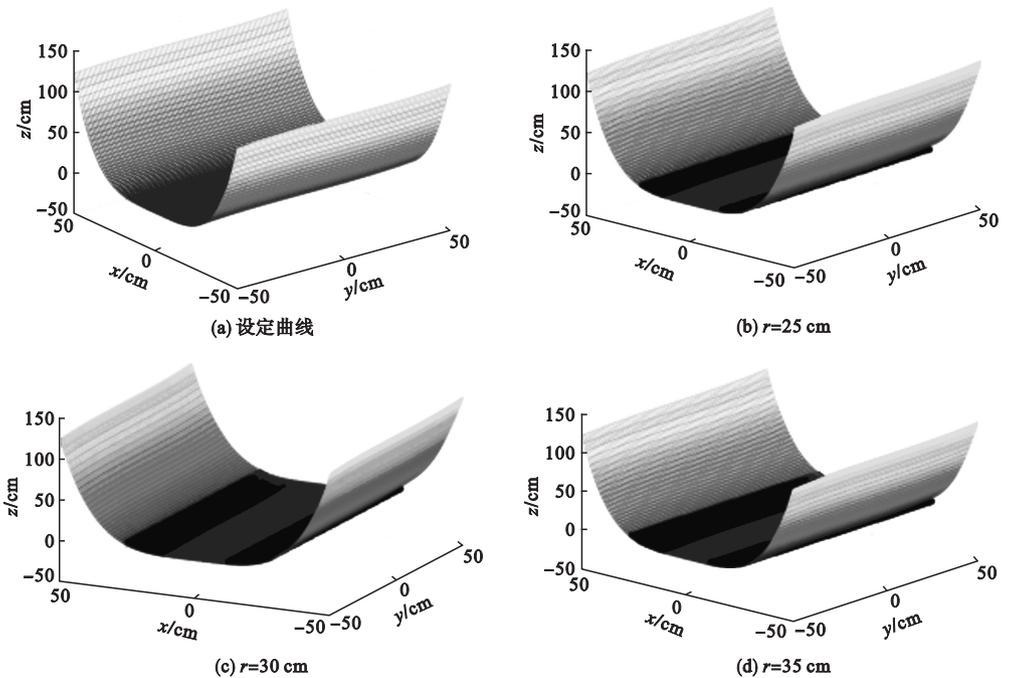


图3 干涉检查图

Fig. 3 Interference checking diagram

4 结论

(1)针对锯切加工自由复杂曲面中的干涉碰撞问题,提出了一种简便通用可实现的干涉检查算法,并在计算机模拟软件的辅助下得到了证实.

(2)为了体现算法应对较复杂曲面时的检查精度,笔者选取了曲率变化范围比较大的曲面进行试验,结果证明笔者阐述的算法行之有效,检查结果符合要求且清晰直观.

(3)提出的干涉检查算法将锯切加工应用于曲面开粗的加工过程中,加快了硬脆材料加工过程中的加工效率、节约了经济成本

和时间成本,对加工中选取锯片尺寸参数有一定的帮助,对将来石材及硬脆材料加工行业具有一定的指导作用,同时锯切加工异型曲面的干涉检查算法对普通金属机械加工等锯切领域也有一定的适用性.

参考文献

- [1] 吴玉厚,赵德宏.异型石材数控加工装备与技术[M].北京:科学出版社,2011.
(WU Yuhou, ZHAO Dehong. Equipment and technology of numerical control of irregular shape stone [M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [2] 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.
(WU Yuhou, ZHAO Dehong, YAN Guangyu.

- Research on sawing process algorithm of irregular curve surface based on cutter contact path intersection line method[J]. Journal of Dalian university of technology, 2017, 57(4): 352 - 359.)
- [3] 张进生, 张良智, 王志. 石材异型制品加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. (ZHANG Jinsheng, ZHANG Liangzhi, WANG Zhi. Processing technology of stone type products [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.)
- [4] 高强. 异型石材典型制品的数控加工与仿真技术研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011. (GAO Qiang. Research on NC machining and simulation technology of typical stone products [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [5] BAO P, LUAN F J, ZHANG K, et al. Algorithm research of profiled surface stones sawing processing algorithm on digital [C]. International conference on advanced control, 2015.
- [6] ALMASI S N, BAGHERPOUR R, MIKAEIL R, et al. Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate[J]. Bulletin of engineering geology & the environment, 2017: 1 - 15.
- [7] 徐西鹏. 岩石材料的金刚石锯切研究进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 17 - 21. (XU Xipeng. Research progress on diamond saw cutting of rock materials [J]. Journal of mechanical engineering, 2003, 39(9): 17 - 21.)
- [8] 张绍和, 陈平, 马欢, 等. 干切花岗岩的金刚石小锯片试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009(1): 39 - 43. (ZHANG Shaohe, CHEN Ping, MA Huan, et al. Research on small diameter diamond sawblade for dry-cutting granite [J]. Diamond and abrasives engineering, 2009(1): 39 - 43.)
- [9] LANGE C, POLTHIER K. Anisotropic smoothing of point sets[J]. Computer aided geometric design, 2005, 22(7): 680 - 692.
- [10] 周志雄, 周秦源, 任莹晖. 复杂曲面加工技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 105 - 113. (ZHOU Zhixiong, ZHOU Qinyuan, REN Yinghui. Current research and development trends of complex surface machining technology [J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(17): 105 - 113.)
- [11] 关砚聪, 贾涛, 姚德明. 金刚石砂轮加工石材的综合影响因素分析[J]. 机械工程师, 2009(7): 40 - 42. (GUAN Yancong, JIA Tao, YAO Deming. The analysis of the comprehensive influencing factors of the diamond wheel in machining stone materials [J]. Mechanical engineer, 2009(7): 40 - 42.)
- [12] 刘威, 周来水, 安鲁陵. 截面线等误差步长法计算点云刀具路径规划[J]. 机械科学与技
- 术, 2013, 6: 824 - 828. (LIU Wei, ZHOU Laishui, AN Luling. The generation algorithm of tool path based on the discrete data points with curves of cross sections [J]. Mechanical science and technology, 2013, 6: 824 - 828.)
- [13] 吴玉厚, 赵德宏, 陆峰, 等. 异型石材制品加工技术与设备发展概述[J]. 石材, 2007(8): 30 - 33. (WU Yuhou, ZHAO Dehong, LU Feng, et al. An overview of the development of the processing technology and equipment of different stone products [J]. Stone, 2007, 32(8): 30 - 33.)
- [14] 包芑. 异型石材加工中锯切加工工艺与算法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014. (BAO Peng. Study on saw cutting process and algorithm in different stone processing [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [15] 虞付进. 高速切削机理的研究现状与思考[J]. 机械工程师, 2003, 10: 12 - 15. (YU Fujin. On the current state and consideration of researches into high speed machining mechanism [J]. Mechanical engineer, 2003, 10: 12 - 15.)
- [16] CAMPOS J G, MARTIN R M, ARMESTO J I, et al. Stone cutting automation technology based on features [C]//International conference on mechatronics malaga, Spain: IEEE ICM, 2009: 1 - 6.
- [17] 刘峰, 罗忠辉. 石材锯切加工工艺分析研究[J]. 机械工艺师, 2001, 6: 27 - 44. (LIU Feng, LUO Zhonghui. Technology analysis and research on stone sawing [J]. Mechanical craftsman, 2001, 6: 27 - 44.)
- [18] 任莹晖, 罗源婧, 周志雄, 等. 带锯锯切力数值仿真及工艺实验研究[J]. 工具技术, 2017(6): 15 - 19. (REN Yinghui, LUO Yuanqiang, ZHOU Zhixiong, et al. Numerical simulation and process experiment research on sawing force of band-saw [J]. Tool engineering, 2017(6): 15 - 19.)
- [19] 何敬德, 何雪明. 自由曲面3轴NC加工的全干涉检查研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(3): 326 - 332. (HE Jingde, HE Xueming. Interference detection in three-axis NC machining of freeform surfaces [J]. Mechanical science and technology, 2006, 25(3): 326 - 332.)
- [20] 黄志东, 张雷, 赵继. 双曲面加工干涉区域分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 322 - 326. (HUANG Zhidong, ZHANG Lei, ZHAO Ji. Analysis of interference area in machining hyperboloidal surface [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(4): 322 - 326.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)