

# 金属板材件三维激光切割轨迹生成

朱 虎 韩福辰 林雯雯

(沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要** 结合金属板材件成形工艺,提出一种基于切口填补模型的金属板材件三维激光切割轨迹自动生成方法。利用切口面之间的凹边实现了切口特征自动识别和选取,并采用顶点偏置算法实现了激光束半径自动补偿。在对切口特征进行填补,构建切口填补模型的基础上,利用共享切口边的两个三角面片的法向量计算出激光入射点处的法向量,进而确定了激光头的姿态,使得激光束始终与被切割表面保持垂直。应用实例表明,上述算法可行,系统运行稳定可靠。

**关键词** 激光技术; 板材成形; 激光切割; 切割轨迹; CAD/CAM

**中图分类号** TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0803007

## Generation of Three-Dimensional Laser Cutting Path for Sheet Metal Part

Zhu Hu Han Fuchen Lin Wenwen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University,  
Shenyang, Liaoning 110136, China)

**Abstract** A method for automatically generation of sheet metal three-dimensional (3D) laser cutting path based on the incision filled model is proposed considering the sheet metal forming process. Automatic selection of incision features is realized through automatic recognition of incision features by using the concave edges between the incision faces, and the laser beam radius compensation is done through the offset of the edge loop of incision by using vertex offset method. On the basis of the incision features filling and the remodeling of the model, the laser head posture is determined using two normal vectors of the two triangles that shares the edge on which the laser beam points are located, which ensures the laser head perpendicular to the surface of workpiece in the whole process of laser cutting. The case studies show that the above algorithm is feasible and the system is stable and reliable.

**Key words** laser technique; sheet forming; laser cutting; cutting path; CAD/CAM

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

五轴三维激光切割因具有柔性高、切割质量好、效率高等优点,广泛地应用于汽车、航空及造船等领域<sup>[1-2]</sup>。五轴三维激光切割技术研究的一个关键问题是切割轨迹生成,切割轨迹对切割质量和精度具有较大的影响。为了获得更高的切割质量和精度,在生成切割轨迹时有必要进行激光束半径补偿<sup>[3]</sup>,并使激光束与被切割表面垂直<sup>[4]</sup>。此外,当模型表面上存在大量不规则切口特征时,切口特征的选取费时费力,

易发生错误,所以切口特征的自动提取也非常必要。苏敏等<sup>[5]</sup>利用 UG 软件生成了五轴三维激光切割轨迹;Kang 等<sup>[6]</sup>和陈继民等<sup>[7]</sup>分别研究了基于 UG 软件和 Mechanical Desktop (MDT) 二次开发平台的五轴三维激光切割轨迹生成方法;吴问才等<sup>[8]</sup>提出了一种基于旋转轴旋转运动最低耗能的三维激光切割头空间位姿求解方法;邓前松等<sup>[9]</sup>研究了采用轨迹变换法降低激光切割尖角“烧蚀率”方法。

但上述研究都没有考虑激光束半径补偿和切口

**收稿日期**: 2013-03-04; **收到修改稿日期**: 2013-04-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175351)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2012006)

**作者简介**: 朱 虎(1964—),男,博士,教授,主要从事 CAD/CAE/CAM、激光切割技术等方面的研究。

E-mail: zhuhu10@163.com

特征自动提取等问题,这必将影响切割质量。朱虎等<sup>[10]</sup>研究了切口特征自动选取、激光束半径补偿和激光头姿态确定等问题,但也存在着一些不足:切口特征自动识别局限于切口面和外表面垂直的情况,而且由于采用直接偏置边的方法需进行空间线、面之间复杂的求交计算,此外由于只利用包含切口边的一个三角面片来确定激光头姿态,因此不可能在任何情况下都能保证激光束准确地与被切割面垂直。总之,目前有关激光切割方面的文献大多集中于激光切割工艺<sup>[11-14]</sup>,而针对激光切割轨迹生成方面的研究较少。

针对上述问题,本文研究了一种基于 STL 模型的金属板材件五轴三维激光切割轨迹自动生成方法。利用切口面之间的凹边实现切口特征自动识别和选取,并采用顶点偏置算法实现激光束半径自动补偿;通过离散切口边环确定激光束入射点位置,并

利用共享切口边的两个三角面片的法向量计算出切口边上激光入射点处的法向量进而确定激光头的姿态,以保证激光束始终与被切割表面保持垂直。

## 2 总体思路和算法流程

对于给定的切口板材件 STL 模型,首先在识别出切口特征的基础上,对切口板材件 STL 模型进行切口特征填充处理,进而构建新的成形加工曲面模型,同时提取切口边并将其偏置激光束半径大小来实现激光束半径补偿。然后对偏置后的切口边环进行离散进而确定出激光束入射点,并利用填充后的重建模型计算出模型表面在入射点处的法向量进而确定激光头姿态。最后依据确定出的激光束入射点和激光头姿态生成出五轴三维激光切割轨迹。整个算法流程如图 1 所示。

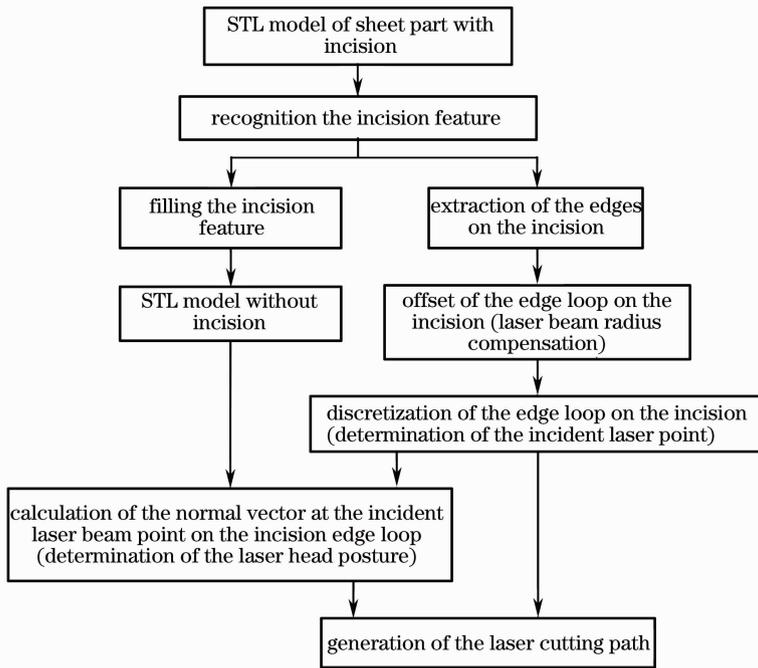


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithms flow

## 3 切口特征自动识别

金属板材件由外表面、内表面以及切口面组成,如图 2 所示。对于用 STL 模型表示的金属板材件来说,外表面的三角形面片法向量的  $z$  坐标值都是正的,内表面的三角形面片法向量的  $z$  坐标值都是负的,切口面的三角形面片法向量  $\mathbf{N}$  的  $z$  坐标值有正也有负,特殊情况也有可能为零。图 2(a)为三角面片法向量  $z$  值均为等于零的切口面;图 2(b)为三

角面片法向量  $z$  值均为大于零的切口面;图 2(c)为三角面片法向量  $z$  值均为负的切口面;图 2(d)为三角面片法向量  $z$  值既有正又有负的切口面。

为了进行后续的激光束半径补偿和激光头姿态确定,需要提取如图 3 所示的切口外边环,提取算法如下:

1) 提取 STL 模型的所有三角面片中法向量的  $z$  坐标值为正的三角面片,得到由外表面和部分切

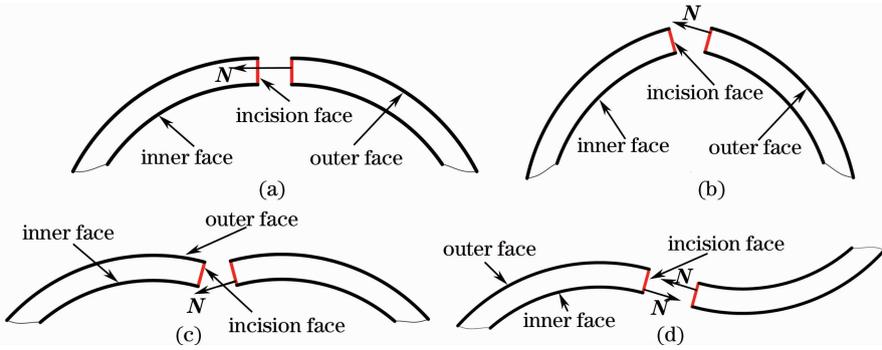


图 2 切口面

Fig. 2 Incision faces

口面上的三角面片组成的三角面片集。

2) 在该三角面片集中找出只被一个三角面片包含的边,并对其按首尾连接关系进行连接得到切口边环,如图 3 所示。该切口边环有如下几种情况:一、位于模型最底端的边环,利用该边环可把成形以后多余的板材件边缘切割掉[图 3(a)];二、三角面片法向量  $z$  坐标均为负值的切口面上的边环,该边环是切口的外边环[图 3(b)];三、三角面片法向量  $z$  坐标均为零的切口面上的边环,该边环是切口的外边环[图 3(c)];四、三角面片法向量  $z$  坐标均为正值的切口面

上的边环,该边环是切口的内边环[图 3(d)];五、由在三角面片法向量  $z$  坐标为非正值的切口面上的切口外边环、在三角面片法向量  $z$  坐标均为正值的切口面上的切口内边环以及分界外边环和内边环的凹边组成[图 3(e)]。

3) 该凹边是切口的外边环和切口的内边环的分界边,是指两面角小于  $180^\circ$  的两个三角面片共享的边,可利用共享该边的两个三角面片的法向量夹角来判断。

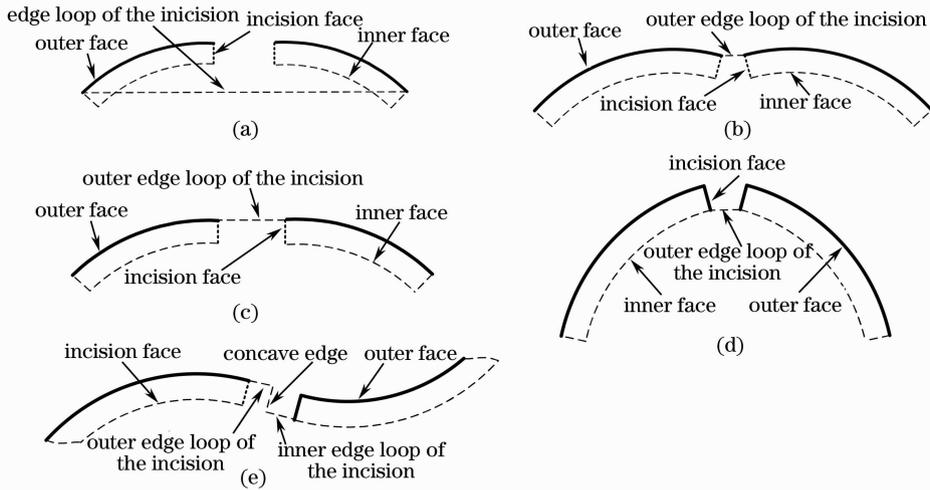


图 3 切口上的边环

Fig. 3 Edges loop of incision

4) 在所有边环中,各顶点的  $z$  坐标值最小的边环[第一种边环,图 3(a)所示],也就是位于模型最底端的边环,就是金属板材件外边缘切口的外边环。

5) 切口边环中,如果有某一条边是一个凹边,而且共享该凹边的两个三角面片中上位三角面片的法向量  $z$  坐标值为非正值,而下位三角面片的法向量  $z$  坐标值为正,那么该边环为既有切口外边环又有切口内边环的边环[第五种边环,如图 3(e)所示]。找出与切口内边连接的法向量  $z$  坐标值为正

的三角面片,并把这些三角面片上不在内边上的顶点连接起来就得到与该内边环对应的外边环。

6) 分离出第一种、第五种边环后,需区分第二种、第三种和第四种边环,方法如下:一、找出与边环相连的法向量  $z$  坐标值为正的三角面片的顶点构成的边环;二、检查两个边环上对应边之间的垂直距离,如果在误差范围内等于板材的厚度,则该边环就是切口内边环[第四种边环,如图 3(d)所示]。而与该边环相连的法向量  $z$  坐标值为正的三角面片的顶

点所构成的边环则为所求之切口外边环。

7) 余下的边环就是第二种、第三种边环[如图 3 (b), (c)所示], 这些第二种、第三种边环本身就是外切口边环, 无需区分可以直接使用。

### 4 切口特征填补

切口特征填补是在提取切口边环的基础上, 建立切口特征投影平面<sup>[15-16]</sup>, 同时将切口边投影到此平面, 并在相邻两边夹角之间增加一定数量的三角面片的方式完成投影多边形的三角网格化。计算出多边形每两条相邻边所夹内角, 取最小内角  $a$  的一对邻边开始构建三角面片, 根据夹角大小按 4 种方式进行:  $a \leq 90^\circ$ ,  $90^\circ < a \leq 150^\circ$ ,  $150^\circ < a \leq 240^\circ$ ,  $240^\circ < a \leq 360^\circ$ <sup>[17]</sup>。然后, 通过最小二乘法用切口边点的空间位置拟合空间曲面来得到切口形状的曲面拟合方程。最后将平面上的三角面片中的各个顶点的坐标值通过坐标转换反映到曲面拟合方程中得到拟合曲面上点的坐标值, 这样就得到了三角面片最终的空间位置, 完成了切口特征的填补过程。

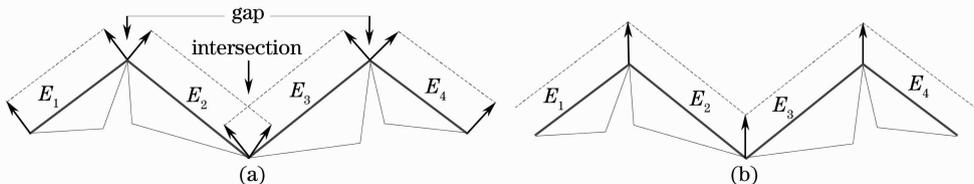


图 5 边偏置与顶点偏置  
Fig. 5 Edge offset and vertex offset

采用顶点偏置法[如图 5(b)所示]偏置切口边环上的各个顶点, 并把各个偏置点连接成偏置切口边环。顶点偏置法的关键是正确计算出各顶点的偏置向量。为了将切口边环沿着垂直于顶点所在切口面的方向偏置, 仅提取与顶点连接的切口面上的三角面片, 并以这些三角面片的法向量, 利用 Qu 等<sup>[18]</sup>的方法计算顶点的偏置向量, 然后将得到的偏置点顺次连接起来即获得激光束半径补偿了的切口边环。例如, 对于图 6 所示的切口边环上的顶点  $K$ , 利用与  $K$  相连的切口面上的 3 个三角面片 1, 2,

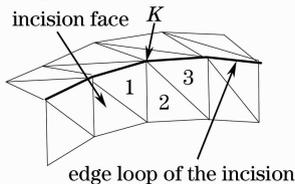


图 6 偏置向量计算  
Fig. 6 Calculation of offset vector

### 5 激光束半径补偿与激光束入射点计算

由于激光束聚焦后是一个具有一定直径的光斑, 因此精密切割时必须对其进行半径补偿。所谓激光束半径补偿就是将切口边环偏置激光束半径大小的距离, 如图 4 所示。偏置后的切口边环可作为激光束入射路径, 并将其按一定间隔离散后可得到激光束入射点。

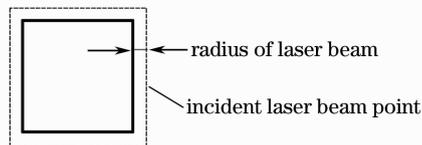


图 4 激光束半径补偿  
Fig. 4 Laser beam radius compensation

切口边环的偏置可直接把各边(如  $E_1, E_2, E_3, E_4$ )在其所在三角面片内沿着边的法向方向偏置给定距离来获得, 但这种方法在凸点处发生间隙, 而在凹点处发生相交[如图 5(a)所示], 因此对于偏置后的边需要进行求交剪切和填补间隙运算。由于切口边环上的各边均为空间直线, 因此上述运算非常复杂。

3 的法向量计算其偏置点。

### 6 激光头姿态确定

在激光切割中, 为最大限度地利用激光的能量以保证切割的精度和切口质量, 要求激光束始终与工件的被切割面垂直<sup>[19]</sup>。为了确保激光束始终与被切割面垂直, 需要使激光束入射方向与被切割表面激光入射点法矢方向平行, 其关键是获取被切割面激光入射点处的法矢方向。

在实际制作如图 7(a)所示板材件时, 先把板材件上存在的孔、槽等加工特征填充后, 再制作如图 7(b)所示的形状, 然后对其进行激光切割完成如图 7(c)所示的板材件。所以确定激光头位姿时, 应以待成形板材件的孔、槽等加工特征填充以后获得的如图 7(b)所示的形状为基准, 计算被切割面激光入射点处的法矢方向。如图 8 中,  $AB$  为切口边,

$F_{i+1,j}$  为填充的三角面片,  $F_{i,j}$  为原模型中的三角面片,  $N_{i+1,j}$  和  $N_{i,j}$  分别为三角面片  $F_{i+1,j}$  和  $F_{i,j}$  的法向量, 那么切口边  $AB$  处的法向量  $N_{A,B}$  取  $N_{i+1,j}$  和  $N_{i,j}$  的平均值, 即:

$$N_{A,B} = \frac{N_{i+1,j} + N_{i,j}}{|N_{i+1,j} + N_{i,j}|} \quad (1)$$

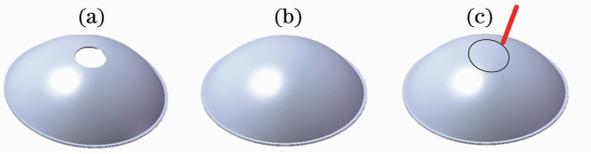


图 7 激光切割板件形状

Fig. 7 Laser cutting sheet metal shape

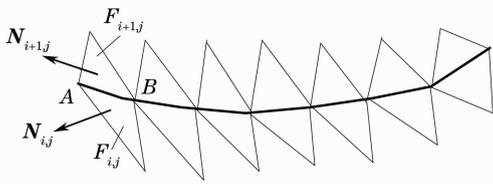


图 8 法向量计算

Fig. 8 Calculation of normal vector

## 7 算法应用实例

在 Windows XP 环境下, 利用 VC++6.0, C++ 和 OpenGL 实现了上述算法的软件系统。为验证算法的可行性, 以如图 9 所示 STL 模型为对象, 进行了五轴三维激光切割轨迹生成算法应用探讨。

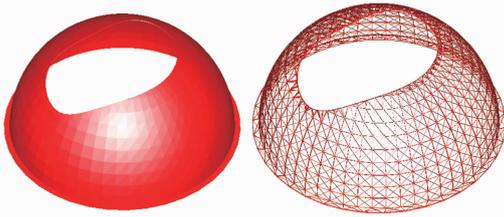


图 9 STL 模型

Fig. 9 STL model

如图 10 所示为识别提取出的切口特征的切口边。图 11 为实现激光束半径补偿, 将切口边偏置激光束半径得到的激光束入射路径。图 12 所示为将切口边投影到特征平面并将投影多边形三角网格化得到的图形。图 13 所示为平面上投影区域中的三角面片转换到三维模型上最终完成切口特征填补的模型。图 14 所示为依据填补模型计算出的激光入射点处模型表面法向量及五轴三维激光切割仿真中两个不同入射点处的激光头姿态。

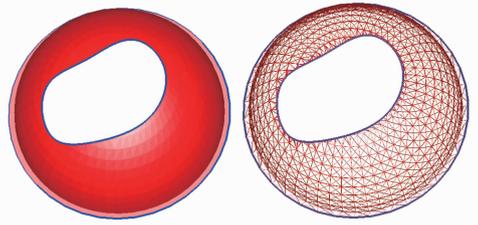


图 10 切口边提取

Fig. 10 Extraction of edges on incision

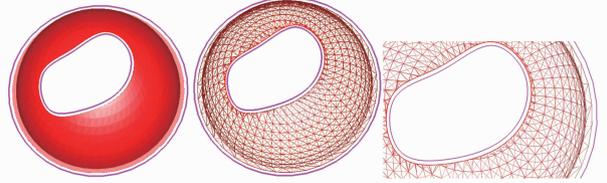


图 11 切口边偏置

Fig. 11 Offset of edges on incision

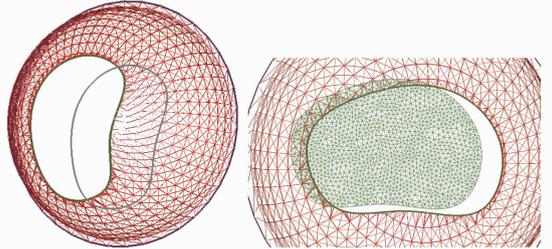


图 12 切口边环投影及投影区域三角网格化

Fig. 12 Projection of incision edges loop and triangularization of projection area

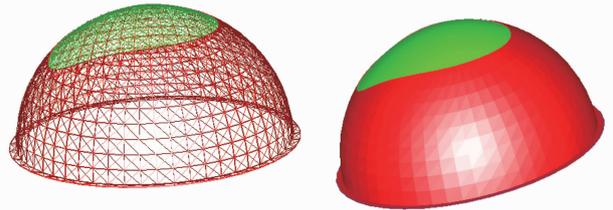


图 13 切口特征填补

Fig. 13 Filling of incision features

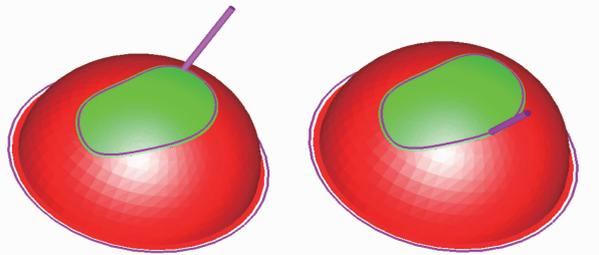


图 14 激光切割仿真

Fig. 14 Laser cutting simulation

## 8 结 论

研究了基于 STL 模型的金属板材件三维激光切割轨迹自动生成方法。该方法能够准确地识别出切口特征并能够实现板材件上的切口特征自动选取,可计算出激光束入射点(切割刀位点),实现了激光束半径自动补偿,能够保证激光头始终与工件表面保持垂直,并实现了三维激光切割模拟仿真,软件系统具有较好的稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 B S Yilbas. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. *J Materials Processing Technology*, 2004, 155-156(30): 2106-2115.
- 2 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong, *et al.*. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1686-1692.  
季凌飞, 闫胤洲, 鲍勇, 等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1686-1692.
- 3 Kanaoka Masaru. *Laser Processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 24-27.  
金岡优(日). *激光加工*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 24-27.
- 4 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu, *et al.*. Effect of laser beam attitude on 3D laser cutting quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(1): 124-127.  
张永强, 吴艳华, 陈武柱, 等. 激光束姿态对三维激光切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, 33(1): 124-127.
- 5 Su Min, Shi Shihong, Hu Jin. Auto programming system for 3D laser processing based on PMAC[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(6): 433-435.  
苏敏, 石世宏, 胡进. 基于 PMAC 的三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(6): 433-435.
- 6 J K Kang, S B Yeom, B S Kang. Development of 5-axis CO<sub>2</sub> laser cutting machine and CAM[C]. Seoul: Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, 2006. 245-246.
- 7 Chen Jimin, Bao Yong, Xiao Rongshi, *et al.*. Auto-programming system for 3D laser processing[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(3): 217-220.  
陈继民, 鲍勇, 肖荣诗, 等. 三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光技术*, 2001, 25(3): 217-220.
- 8 Wu Wencai, Deng Fan, Hu Jun. Optimal orientation of the cutting head for enhancing smoothness movement in three-dimensional laser cutting[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103005.  
吴问才, 邓帆, 胡俊. 提高三维激光切割平顺性的切割头空间位姿优化方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103005.
- 9 Deng Qiansong, Zhao Chenfeng, Chen Liang, *et al.*. Study on reducing apex angle burnt rate during laser cutting based on path transformation[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0803006.  
邓前松, 赵辰丰, 陈亮, 等. 基于轨迹变换法降低激光切割尖角“烧蚀率”研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0803006.
- 10 Zhu Hu, Fu Jianhui, Liu Zhijun. Generation of 5-axis laser cutting path based on STL model[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 863-867.  
朱虎, 扶建辉, 刘志军. 基于 STL 模型的五轴激光切割轨迹生成[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 863-867.
- 11 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong, *et al.*. Research on laser close-piercing lapping processing for damage-free cutting of thick Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603002.  
季凌飞, 闫胤洲, 鲍勇, 等. 致密 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷厚板激光离散通孔密排无损切割新技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603002.
- 12 Li Shuyu, Tian Xinguo, He Jingdi, *et al.*. Laser cutting flow curve of automatic flow control valves[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1003008.  
李淑玉, 田新国, 贺敬地, 等. 自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1003008.
- 13 Gao Shiyou, Ma Lei, Zhang Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203007.  
高士友, 马雷, 张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203007.
- 14 Wang Yanfei, Wang Xuyue, Kang Renke, *et al.*. Experimental study on laser cutting based on removal forms for aluminum alloy sheet[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0803007.  
王彦飞, 王续跃, 康仁科, 等. 基于去除熔化物形态分析的铝合金薄板激光切割试验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0803007.
- 15 Y. Jun. A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(2): 263-270.
- 16 Chen Jie, Gao Chenghui, He Bingwei. Hole filling algorithm in triangular meshes [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(8): 1821-1826.  
陈杰, 高诚辉, 何炳蔚. 三角网格曲面孔洞修补算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(8): 1821-1826.
- 17 Zheng Shuxian, Li Jia. Cranioplasty reconstruction method based on triangular meshes[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(2): 118-122.  
郑淑贤, 李佳. 基于三角网格曲面的颅骨修补片重构方法[J]. *天津大学学报*, 2009, 42(2): 118-122.
- 18 X Z Qu, S Brent. A 3D surface offset method for STL-format models[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, 9(3): 133-141.
- 19 Chen Jimin, Zuo Tiechuan. The generation of 3-dimensional trace for 3D laser processing[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(1): 1-3.  
陈继民, 左铁钊. 三维激光加工的加工轨迹生成[J]. *应用激光*, 2001, 21(1): 1-3.

栏目编辑: 宋梅梅