

自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成

董 玲^{1,2} 杨洗陈^{1,2} 张海明¹ 雷 凯³

¹天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160
²天津工业大学机械工程学院, 天津 300387
³天津军粮城发电有限公司, 天津 300300

摘要 针对复杂自由曲面零件激光再制造中在线示教加工路径存在的问题,进行了三维激光熔覆再制造修复路径的研究,提出了基于等距平行截面法的修复轨迹自动生成算法。利用任意等距平行截面与三角网格模型求交确定激光束扫描点位置;估算出三角网格中每个顶点法矢后,通过对交点所在边的两顶点法矢插值得到交点的法矢,确定了在加工点激光束的姿态。应用实例表明,该算法取得了良好的加工效果,能够达到实用化要求。

关键词 激光技术;再制造;路径生成;等距平行截面法;自由曲面

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0703007

Path Generation for Repairing Damaged Parts of Free-Form Surfaces in Laser Remanufacturing

Dong Ling^{1,2} Yang Xichen^{1,2} Zhang Haiming¹ Lei Kai³

¹Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China
²School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China
³Tianjin Junliangcheng Generation Company Limited, Tianjin 300300, China

Abstract Repair path of 3D laser cladding remanufacturing is studied and generation algorithm automatically of repair trajectory is proposed based on equidistant parallel sections in order to conquer the shortages using on-line teach processing path for damaged parts of complex free-form surfaces in laser remanufacturing. The positions of laser beam scan points are decided according the intersection points of any equidistant parallel section planes and triangular mesh; the normal vector of the intersection point is calculated by interpolation to the two vertices' normal vector after each vertex's normal vector is acquired, thus the laser beam's posture is obtained at the processing point. Practical experiments demonstrate that satisfying results are acquired by using this method, which has been applied in laser remanufacturing system.

Key words laser technique; remanufacturing; path generation; equidistant parallel sections method; free-form surfaces

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.4600

1 引 言

激光再制造技术以激光熔覆为修复技术平台,已发展成为高精度修复再制造重大装备关键零部件的有效手段。随着计算机技术和机器人技术的发

展,自动化、智能化的集成柔性加工系统已成为激光再制造技术的发展方向^[1]。在激光机器人再制造加工现场,针对破损零件的修复任务,需要完成两步工作^[2,3]:一是对破损零件的检测,得到破损区域的位

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(60908017)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

作者简介: 董 玲(1976—),女,讲师,博士研究生,主要从事激光制造理论及应用、CAD/CAM 等方面的研究。

E-mail: dongling82@126.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光制造理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

置与形状大小数据;二是对零件破损部位的修复。由于再制造对象个体的不确定性和多样性^[4],再制造的作业任务是复杂多变的,要实现再制造修复过程的自动化、智能化,实现破损零件修复路径的离线规划和自动生成是一个关键环节。关于激光直接制造和再制造加工路径问题的研究已取得了一些成果^[5~10],但有关复杂空间自由曲面破损零件的三维激光熔覆再制造修复路径还有待进一步研究。

本文针对激光再制造的特点,借鉴数控加工刀具轨迹规划的一些算法,研究了复杂空间自由曲面破损零件的激光再制造修复路径,应用等距平行截面法,由计算机程序自动生成零件表面激光扫描轨迹。

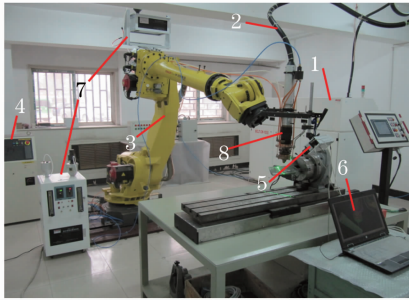


图 1 激光机器人再制造系统装置图

Fig.1 Laser robot remanufacturing system

2.2 再制造修复流程

2.2.1 破损零件检测

待加工零件经视觉系统扫描、检测,获取破损区域模型的具体工作流程如图 2 所示,主要包括 5 个步骤:1) 为了防止扫描数据失真,在扫描前首先要对破损零件进行表面处理,包括清洁零件表面、喷涂显像剂、粘贴参考点等;2) 利用 3D 扫描视觉系统扫描获取破损零件表面的点云数据;3) 对所获取海量

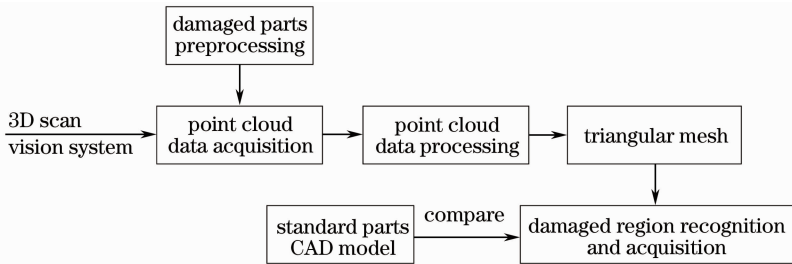


图 2 破损零件检测流程框图

Fig.2 Flow chart of damaged parts inspection

2.2.2 零件破损部位的修复

由零件的破损区域模型,进行破损部位修复的流程如图 3 所示,主要包括:机器人路径规划,机器人控制程序自动生成,仿真优化,程序传输下载到机器人控制系统,机器人携带激光加工头进行修复,完

2 激光机器人再制造修复系统

2.1 系统装置

图 1 为激光机器人再制造系统装置图。系统整机主要由八大部分构成:1) 可光纤传输的高功率 Nd:YAG 激光器;2) 光纤耦合和光纤传输系统;3) 六自由度机器人;4) 机器人数字控制系统;5) 机器视觉系统(包括零件表面形貌 3D 扫描单元、激光熔池温度场检测单元和激光同轴送粉粉末流场检测单元);6) 计算机离线编程系统(高性能计算机、软件);7) 远程熔覆材料同轴输送进给系统(高压气体、送粉器);8) 激光再制造工作头。

的散乱点云数据,进行多视角拼合、奇异点剔除、滤波去噪等数据预处理,使之成为完整的点云集;4) 对处理完的点云数据进行三角剖分和网格优化,用三角网格来近似表示点集形成的破损零件表面,最后得到和原型拓扑结构一致的破损零件的三维网格模型;5) 将破损零件的模型与完好零件的标准计算机辅助设计(CAD)模型比较,根据设定的误差阈值,识别并提取出零件的破损区域。

成破损零件的再制造。在再制造过程中,要求激光加工头末端与被加工表面保持等距并且理论上垂直于零件表面,因此激光加工头的路径可通过零件表面的一系列激光扫描点沿其法矢偏置一个固定的距离得到,所以机器人路径离线规划的关键是首先要

得到零件表面的激光扫描点的位置和法矢数据,本文基于零件破损区域三角网格模型对此进行了研究。

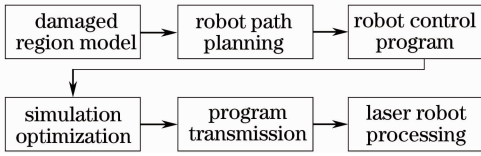


图3 零件破损部位修复流程图

Fig. 3 Flow chart of repairing parts' damaged site

3 修复路径的生成

针对离散网格模型,平行截面法是三维曲面加工的常用算法^[11]。在激光再制造中,要求光斑均匀有序地扫描加工零件表面,激光熔覆路径一般是等距的互相平行的轨迹^[6],激光束扫描点即零件表面的待修复点,可直接由一组等距的平行截面与零件破损区域三角网格模型求交计算得到。在激光熔覆再制造过程中,为了最大限度地利用激光束能量,理论上要求激光束始终与零件的加工表面垂直,扫描点处激光束的姿态即破损零件上待修复点的法矢。

再制造修复路径生成的步骤:1) 确定平行截面的方向及相关参数;2) 利用等距平行截面与破损区域三角网格求交,得到激光束扫描点的位置数据;3) 估算三角网格顶点处的法矢,再计算出交点处的法矢,得到扫描点处激光束的姿态数据;4) 对得到的交点排序并连接,得到零件表面的修复路径。

3.1 平行截面相关参数的确定

平行截面相关参数的设定与激光再制造工艺参数相关,应结合工艺规划的要求,如加工路径方向、单道轨迹熔覆宽度、搭接量等参数要求确定。主要包括:

1) 平行截面的方向与激光加工头移动方向相关,应垂直于再制造的修复路径。在此,为达到理想的修复路径,引入人工交互手段,由操作者结合实际的再制造情况,根据合理的激光束扫描移动方向来确定平行截面的方向。通常选择沿 X 、 Y 、 Z 中某一坐标轴向作为截面方向,也可取任意平面法向作为截面方向。

2) 根据单道轨迹熔覆宽度 W_1 和搭接量 W_2 , 确定截面间距 d_1 , 则 $d_1 = W_1 - W_2$ 。

3) 根据零件破损区域位置、大小确定截面起始位置及数量。假定在截面方向上破损区域模型的最大跨距为 D_{\max} , 截面间距为 d_1 , 则截面数量 $k = D_{\max}/d_1$ 。

3.2 激光束扫描点位置的获取

算法基本思想:进行平行截面与三角网格的求交运算时,先分析网格中各个三角形与截平面的位置关系,若相交,则求交点。二者相交时的位置关系,经分析有五种情况,如图4所示。第一种情况为三角形仅有一个顶点与截平面相交,如三角形 T_1 ; 第二种情况为三角形的一个顶点和一条边与截平面相交,如三角形 T_2 ; 第三种情况为三角形的两条边与截平面相交,如三角形 T_3 ; 第四种情况为三角形有两个顶点与截平面相交,即三角形一条边在截平面上,如三角形 T_4 ; 第五种情况为三角形的三个顶点与截平面相交,即三角形在截平面上,如三角形 T_5 。

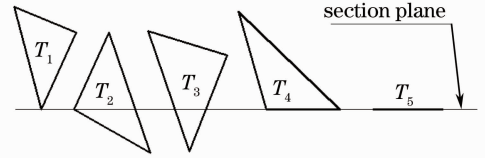


图4 三角网格与截平面的位置关系

Fig. 4 Position relationship of triangular mesh and section plane

要快速地得到修复路径,截平面和三角形面片求交的算法十分重要。六轴关节机器人具有良好的自由度、灵活性和可达性,考虑到再制造零件破损形式的随机性、多样性,根据实际加工的需要,在此采用任意截平面与三角形面片求交的方法。任意截平面方程为

$$ax + by + cz + d = 0, \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \neq 0, \quad (1)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 为平面方程参数。以三角形的边与截平面相交为例,三角形一条边的两个顶点的坐标分别为 $M(x_1, y_1, z_1)$ 、 $N(x_2, y_2, z_2)$, 截平面与三角形的边 MN 相交于点 $P(x_p, y_p, z_p)$, 则交点 P 的 x 、 y 、 z 坐标可计算为

$$P(t) = M - t(N - M), \quad (2)$$

式中

$$t = \frac{ax_1 + by_1 + cz_1 + d}{a(x_2 - x_1) + b(y_2 - y_1) + c(z_2 - z_1)}. \quad (3)$$

3.3 激光束姿态的计算

在三角网格模型中,每一个小三角网格面的三个顶点的排序和它的法向符合右手法则,法矢指向外侧(如 STL 文件格式)。激光扫描点处法矢算法的基本思想:先通过每个三角网格的法矢估算出三角网格中每个顶点的法矢,然后用对两顶点的法矢进行插值的方法计算出交点的法矢,即为激光扫描点处的激光束姿态。

3.3.1 三角网格顶点法矢估算

对于三角网格中每个顶点的法矢通常用该顶点周围的若干个三角形法矢的面积加权平均来计算^[12]。

如图 5 所示,设在点 V_0 周围有 m 个点 $V_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 与之相邻接,构成 m 个相关三角形,把每个三角形面片法向矢量换算为单位法向矢量 $N_1, N_2, N_3 \dots N_i$,由 V_0, V_i, V_{i+1} 所组成的三角形法矢 N_i ,面积 S_i 为

$$N_i = \frac{(V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0)}{\| (V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0) \|}, \quad (4)$$

$$S_i = \frac{\| (V_i - V_0) \times (V_{i+1} - V_0) \|}{2}, \quad (5)$$

加权平均后, V_0 点处的法矢为

$$N_{V_0} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i N_i}{\sum_{i=1}^m S_i}. \quad (6)$$

编程运行后,三角网格顶点的法矢(箭头所示)如图 6 所示。

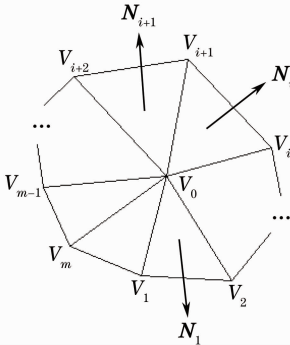


图 5 顶点法矢的计算

Fig. 5 Vertex normal vector calculation

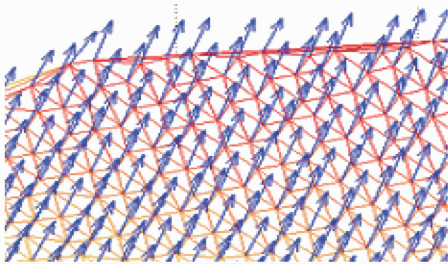


图 6 三角网格顶点法矢图

Fig. 6 Chart of triangular mesh vertex normal vector

3.3.2 交点法矢计算

如图 7 所示,以三角形面片的边 $V_1 V_2$ 与截平面的交点 P 为例,利用三角形顶点的坐标 $V_1(x_1, y_1, z_1), V_2(x_2, y_2, z_2)$,可求得两顶点间的距离 D 和交点 P 到顶点 V_1 的距离 d 。由距离 D, d 和顶点 $V_1,$

V_2 的法矢 N_1, N_2 ,通过插值的方法即可计算出交点 P 的法矢 N_p ,算法为

$$N_p = \left(1 - \frac{d}{D}\right) \frac{N_1}{\|N_1\|} + \frac{d}{D} \frac{N_2}{\|N_2\|}. \quad (7)$$

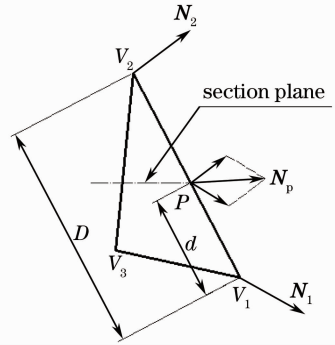


图 7 交点法矢的计算

Fig. 7 Calculation of intersection point's normal vector

3.4 修复路径点排序

对以上方法计算得到的带有法向矢量的交点数据,根据激光束扫描点在第一条再制造路径线上的工作起始点和移动方向,首先确定第一条路径线的交点数据排序方向,然后要求相邻截面的交点数据排序方向依次相反,从而得到再制造过程中激光束扫描点一系列有序的位置及其角度,将各点按序依次相连,由此确定了激光在破损零件表面的扫描路径。

4 应用实例

此算法已在 MATLAB2009 中编程实现,并由此开发了激光再制造中破损零件表面修复路径生成模块。下面以叶片为例,长宽高尺寸分别为 233、80、45 mm,首先利用 3D 扫描视觉系统扫描获取叶片表面点云数据,生成三角网格模型,经检测后提取出待修复区域叶尖凹面部分,然后采用一组任意平行截面与此区域三角网格相交,考虑激光再制造工艺参数的影响,单道熔覆轨迹宽度为 3 mm,搭接量为 1.5 mm,则截面间距为 1.5 mm,取平行截面数量为 30,程序自动生成的激光束扫描点由 30 条互相平行的点轨迹构成,排序连线后生成再制造修复路径,如图 8 所示。按照生成的修复路径,对待修复区域的一部分进行了激光熔覆再制造试验,采用 Nd:YAG 激光器,输出激光功率为 750 W,扫描速度为 3 mm/s,使用 Ni 基金属粉末,离焦量为 5 mm,熔覆效果如图 9 所示。可见路径平滑,熔覆层形貌良好。

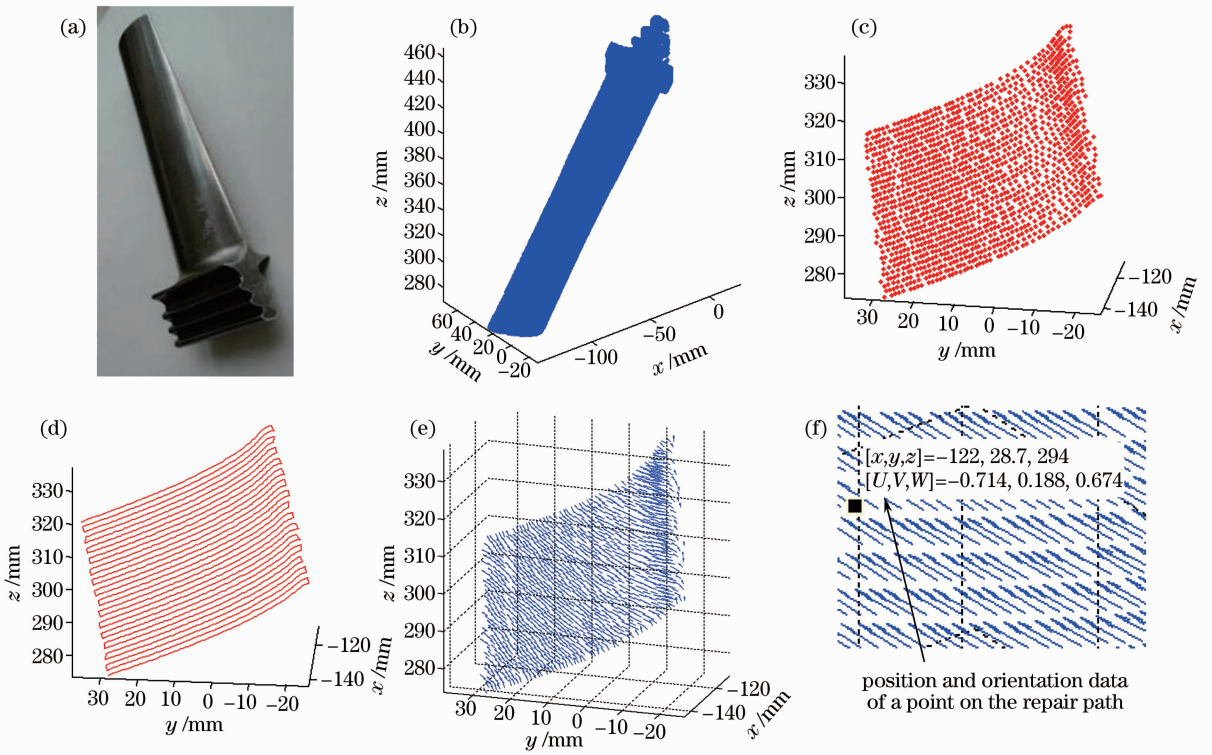


图 8 叶片再制造修复路径实例。(a)叶片实物图;(b)叶片模型;(c)平行截面与待修复区域三角网格交点;
(d)再制造修复路径;(e)路径点法矢;(f)路径点法矢局部放大图

Fig. 8 Blade repair path instance. (a) Blade picture; (b) blade model; (c) intersection points of parallel section planes and triangular mesh of repair region; (d) remanufacturing repair path; (e) normal vectors of path points; (f) local engaged view of the normal vectors of path points

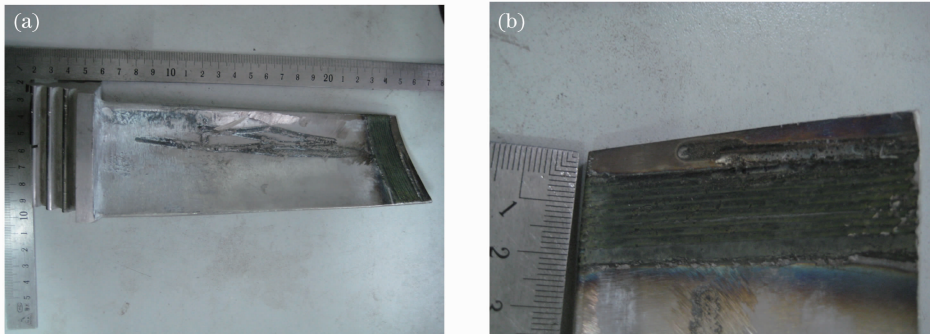


图 9 叶片熔覆效果图。(a)叶片熔覆整体图;(b)叶片熔覆局部图

Fig. 9 Blade cladding picture. (a) The whole picture of blade cladding; (b) local picture of blade cladding

5 结 论

针对复杂空间自由曲面破损零件激光再制造过程中,在线示教再制造加工路径效率和精度低的问题,研究了基于等距平行截面法的破损零件修复路径生成算法并开发了其软件系统模块。该软件系统模块具有自动获取激光束扫描点的位置和姿态,生成零件表面修复路径的功能,自动化程度高,能够减轻操作者的工作强度,减少人为的误差和错误,提高了激光再制造的质量和效率。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 2 Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng *et al.*. Machine vision in laser remanufacturing robots[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601008
杨洗陈, 张海明, 刘立峰 等. 激光再制造机器人光电视觉技术进展[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601008
- 3 Wu Xiang, Ma Zi, Xu Fujia *et al.*. Calibration of the flexible remanufacturing restoration system [J]. *China Surface Engineering*, 2011, **24**(4): 80~84

- 吴翔, 马孜, 徐富家等. 柔性再制造修复系统及标定技术[J]. 中国表面工程, 2011, **24**(4): 80~84
- 4 Yang Pei, Wu Lin, Xu Binshi *et al.*. Welding robot flexible remanufacturing system[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(9): 5~7
- 杨培, 吴林, 徐滨士等. 弧焊机器人柔性再制造系统[J]. 焊接学报, 2006, **27**(9): 5~7
- 5 Liangliang Nan, Weijun Liu, Kai Zhang. Laser remanufacturing based on the integration of reverse engineering and laser cladding[J]. *Int. J. Computer Applications in Technology*, 2010, **37**(2): 116~124
- 6 Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703008
- 刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0703008
- 7 Zhao Jibin, Liu Weijun. Recent progress in slicing algorithm of rapid prototyping technology [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, **15**(2): 209~221
- 赵吉宾, 刘伟军. 快速成形技术中分层算法的研究与进展[J]. 计算机集成制造系统, 2009, **15**(2): 209~221
- 8 Wang Jianlun, Yu Gang, Jia Yanhua. Trace generation and optimization of free-form surface in laser hardening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1567~1570
- 王建伦, 虞钢, 贾艳华. 自由曲面激光强化的轨迹优化研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1567~1570
- 9 Tu Mengfu, Yu Gang. A method of trace generation for 5-axis robotic laser manufacturing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 363~368
- 涂孟夫, 虞钢. 五轴框架式机器人激光加工系统轨迹算法研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4): 363~368
- 10 Jin Xiaoshu, Yang Xichen. Direct slicing of 3D CAD models for laser direct manufacturing and re-manufacturing[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, **19**(6): 757~762
- 靳晓曙, 杨洗陈. 激光直接制造和再制造中的三维 CAD 模型直接分层技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, **19**(6): 757~762
- 11 Sun Yuwen, Liu Weijun, Wang Yuechao. Research on the algorithm of NC tool path calculation for triangular surface machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, **38**(10): 50~53
- 孙玉文, 刘伟君, 王越超. 基于三角网格曲面模型的刀位轨迹计算方法[J]. 机械工程学报, 2002, **38**(10): 50~53
- 12 Zhu Xinxiong. The Formative Technology of Free Curve and Surface[M]. Beijing: Science Press, 2000. 198~233
- 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000. 198~233

栏目编辑: 宋梅梅