

文章编号: 0258-7025(2005)11-1567-04

自由曲面激光强化的轨迹优化研究

王建伦¹, 虞 钢^{1*}, 贾艳华²

(¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100080; ² 中国农业大学理学院, 北京 100083)

摘要 根据激光强化的工艺特性,从优化的角度出发,提出了一种基于平行截面法的改进算法。首先通过分析光斑的平均离焦量与光斑覆盖域曲率的关系,得到用自由曲面最大主曲率表示的工艺所允许的最大光斑尺寸公式;进而通过轨迹样本点分析的方式,得到统计平均的相邻平行截面间距。该方法综合考虑光斑大小、光斑间距、轨迹排距等多种因素,相较于一般的轨迹规划算法,能在保证加工效果的基础上有效提高加工效率。最后给出了一个算例,这一方法被用于汽车门板局部的激光强化加工轨迹规划,取得了良好的效果。

关键词 激光技术;轨迹优化;平行截面法;自由曲面;激光强化

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Trace Generation and Optimization of Free-form Surface in Laser Hardening

WANG Jian-lun¹, YU Gang¹, JIA Yan-hua²

¹ Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
² College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract A modified parallel section method was introduced according to the characteristics of laser hardening. In order to obtain an optimized manufacturing path, the factors like spot size, spot distance and trace distance were taken into account. Firstly, the formula of maximum allowable spot size expressed by maximum main curvature of free-form surface was gotten via the analysis of the relation between average defocusing and curvature of the spot area. Then the statistical average distance between neighboring parallel sections was acquired using the analysis of sample trace points. Finally, the algorithm was used in laser manufacturing path planning for a door covering of a car. The efficiency was improved while a good effect acquired compared with normal parallel section method and some other algorithms.

Key words laser technique; path optimizing; parallel section method; free-form surface; laser hardening

1 引言

具有框架式机器人结构的集成化智能激光加工和柔性制造系统是在光电一体化、框架式机器人和计算机集成制造系统(CIMS)的概念下由中国科学院力学所提出并实现的^[1,2]。在机器人的腕部,工具夹持末端装载激光加工装置,内置式光学变换器^[3]将高斯激光转换成强度均匀分布的二维点阵。

利用上述系统进行激光强化时,要求光斑尽可

能均匀有序地覆盖加工件表面。而且当加工件表面积比较大时,加工的效率也非常重要。虽然已有关于激光强化轨迹规划的一些研究^[4],但并没有充分考虑激光强化加工的工艺特性和加工效率问题。事实上,即使对于传统的刀具加工,如何在保证加工精度、加工效果的基础上尽可能提高效率,也日益引起重视^[5,6]。本文针对激光强化的特点,借鉴刀具加工轨迹规划的一些算法,提出了一种基于平行截面法的改进算法。

收稿日期:2004-12-13;收到修改稿日期:2005-05-08

基金项目:中国科学院“知识创新工程”重大项目(KGCX1-11)资助课题。

作者简介:王建伦(1975—),男,中国科学院力学研究所博士研究生,主要从事激光加工中的CAD/CAM技术研究。

E-mail:nopolin@sina.com

*通信联系人。E-mail:gyu@imech.ac.cn

2 算法的工艺基础及基本思路

在激光相变硬化过程中,为保证强化效果,需保证一定的光斑功率密度。由于采用了二元光学变换器,可以将高斯激光转换成强度均匀分布的二维点阵,得到宏观的矩形光斑(图1)。可以看到,通过调整激光器输出功率,并相应地调整光斑大小,可以维持相对稳定的功率密度。也就是说光斑的大小对于同一种加工工艺实际是可调的。相应的二元光学转换片(如3 mm × 3 mm, 5 mm × 5 mm, 7 mm × 7 mm)已经研制出来。这一点非常重要,意味着在保证加工工艺的基础上可以通过调整光斑大小来提高加工效率。这对一些大面积加工件(如大型汽车覆盖件模具)尤为重要。

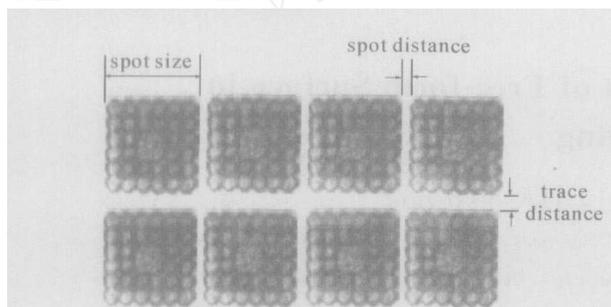


图1 光斑排列与相关参数示意图

Fig. 1 Spot array and related parameters

另外从加工效果来考虑,激光强化要求光斑应尽可能均匀覆盖加工件表面,假如光斑重叠或光斑之间留有较大的间隙都会对加工效果产生不利的影响。所以在确定光斑尺寸的基础上,如何进一步确定光斑的间距以及轨迹间的排距(图1),也是轨迹规划所要考虑的问题。在平行截面法的基础上综合考虑上述因素,可以得到一优化的轨迹规划方法。

3 激光强化光斑尺寸的确定

激光强化光斑尺寸的确定要兼顾加工效率和加工效果。从加工效率的角度考虑,应当选取尺寸尽可能大的光斑;而为保证加工效果,又要求光斑尺寸应与曲面的曲率相适应,在光斑覆盖区域内平均离焦量应控制在工艺允许范围之内。

不失一般性,可以将光斑覆盖区域近似为球冠的一部分(如图2),光斑尺寸为 $a(\text{mm}) \times a(\text{mm})$ 。由光斑的对称性,可以取光斑覆盖域的 $1/4$ 来计算这一区域内的平均离焦量

$$B = \int_0^d \int_0^d (r - \sqrt{r^2 - x^2 - y^2}) dx dy / \int_0^d \int_0^d dx dy, \quad (1)$$

其中 r 为球冠半径($1/r$ 为球冠任一点处的主曲率), $d = a/2$ 。如果工艺允许的最大离焦量为 b ,则要求 $B \leq b$ 。设若 r 已知,令 $B = b$,则可以从中解得对应的光斑尺寸 a 。 a 即为特定曲面曲率下所允许的最大光斑尺寸。

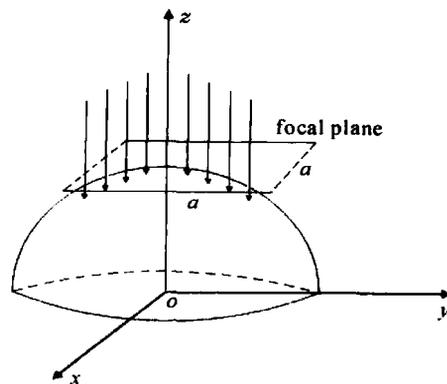


图2 光斑覆盖域示意图

Fig. 2 Focal plane and spot area

由上面的分析可以看到,如果已知一曲面的最大曲率,可以确定用于该曲面加工的工艺所允许的最大光斑尺寸。假定待加工面的曲面参数方程为

$$r = r(u, v), \quad u, v \in G, \quad (2)$$

曲面上一点(非脐点)的主曲率是曲面在该点所有方向的法曲率中的最大值和最小值^[7],分别设为 k_1, k_2 。这里选取其中的最大值主曲率 k_1 作为曲面在某一点的表征曲率, $k_1 = L/E$, 其中 L, E 都是参数 (u, v) 的函数。所以可在参数域内求得曲面的最大主曲率 $k_1 = \max_{u, v} \left[\frac{L(u, v)}{E(u, v)} \right]$ 。将 $r = 1/k_1$ 代入方程 $B = b$, 可以解得可用于加工该曲面的最大的光斑尺寸 a 。

4 激光强化轨迹优化算法

平行截面法是曲面加工的常用算法^[6]。但在应用到激光强化轨迹规划时需要经过一定改进才能适应激光强化的特殊性(光斑重叠及过大的光斑或轨迹间隙都是不允许的)。下面从优化的角度并结合工艺的要求给出基于 CAD 模型的轨迹优化算法。

最大光斑尺寸的确定是从提高加工效率的角度所做的优化工作。进一步为改善加工的效果,则需对轨迹规划的两个重要参数光斑间距及轨迹间距进行优化选取。假设工艺允许的光斑或轨迹间距为 $d_1 < d < d_2$, 选定的光斑尺寸为 a , 则在同一条轨迹线上可按 $a + \frac{d_1 + d_2}{2}$ 等间距地提取轨迹点。下

面主要考虑如何选取合适的相邻平行截面间距,使得所截得的轨迹线间距尽可能满足工艺要求。

假设已由一初始平面(垂直于 xoy 平面)与曲面相交^[8,9] 得到一条截线作为初始轨迹线,则可以在初始轨迹线上均匀地选取一些样本点,过这些样

本点作初始轨迹线的法平面,在法平面与曲面的截线上按距样本点距离为 $a + d_1$ 及 $a + d_2$ 分别取点(如图3)。设所取样本点为 $P_{0,i} (i = 1, \dots, n)$, 对应的距离为 $a + d_1$ 的点为 $P_{1,i} (i = 1, \dots, n)$, 距离为 $a + d_2$ 的点为 $P_{2,i} (i = 1, \dots, n)$ 。则

$$d_{1i} = \left| \sin P_{1,i} \Big|_x - \cos P_{1,i} \Big|_y - \sin P_{0,i} \Big|_x + \cos P_{0,i} \Big|_y \right|, \quad (3)$$

$$d_{2i} = \left| \sin P_{2,i} \Big|_x - \cos P_{2,i} \Big|_y - \sin P_{0,i} \Big|_x + \cos P_{0,i} \Big|_y \right|, \quad (4)$$

$$d_i = \frac{d_{1i} + d_{2i}}{2}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$d = \left(\sum_{i=1}^n d_i \right) / n, \quad (6)$$

其中 $P_{1,i} \Big|_x$ 表示 $P_{1,i}$ 点对应的 x 坐标, 为轨迹方向(初始平面)与 x 轴的夹角。 d_{1i} , d_{2i} 分别表示点 $P_{1,i}$, $P_{2,i}$ 与初始平面的距离。则 d 即可作为相邻平行截面与初始截面的间距。

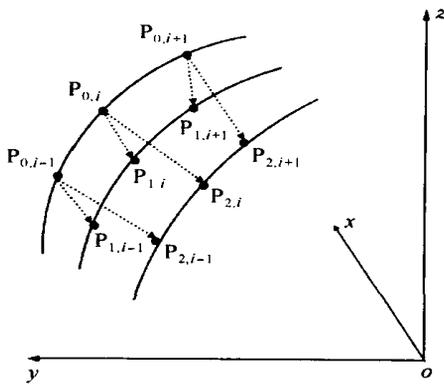


图3 轨迹样本点及其对应邻点示意图

Fig. 3 Sample trace points and neighboring points

综上所述,可以给出完整的自由曲面激光强化轨迹优化算法(以生成沿 y 轴走向的轨迹为例):

记待加工的曲面为 P , 由曲面的最大主曲率确定激光光斑尺寸 a 。在 xoy 面上确定包含曲面投影的最小矩形区域 $R: (x_{\min}, y_{\min}), (x_{\max}, y_{\max})$ 。这里为讨论方便, 假定曲面投影为凸平面图形。过点 (x_{\min}, y_{\min}) 作沿 y 轴方向并垂直于 xoy 面的平面, 记此平面为 P_0 。 P_0 与 P 的交线为 L_0 。由 L_0 的起点开始按 $a + \frac{d_1 + d_2}{2}$ 等间距取点, 直到 L_0 的终点, 从而可得第一排轨迹 T_0 。在 T_0 的轨迹点中取样本点 $P_{0,i} (i = 1, \dots, n_0)$, 样本点数目 n_0 可根据 T_0 轨迹点总数确定, 一般可占总数的 10% ~ 15%。然后按照(3) ~ (6) 式确定相邻平行截面的间距 d 。按上面确定的

间距 d 作 P_0 相邻的平行平面 P_1 。如果 P_1 与最小矩形域 R 没有交点, 则退出; 否则对 P_1 施加类似于对 P_0 的操作步骤, 可得对应轨迹 T_1 。依次做下去, 设所得最后一排轨迹为 T_k 。首尾顺次连接各排轨迹 T_0, T_1, \dots, T_k , 可得曲面加工轨迹 T 。其他走向的轨迹也可以按类似步骤得到。

另外有一点需要说明, 实际的加工曲面可能是一些裁剪曲面。裁剪曲面通过原参数空间及其上的裁剪曲线定义^[10]。裁剪曲线一般是高阶曲线, 不能精确参数化, 但可以用参数域上的分段线性链来近似表示, 得到的裁剪区域为曲面参数域上的多边形。为了表示紧凑, 在一定误差范围内用样条近似高阶交线, 这样, 裁剪区域就通过曲面参数域上的一组样条来定义。

5 算例分析

对于复合曲面的加工, 首先应当进行适当的分区, 然后对每一分区应用上述算法。下面对一汽车门板的部分区域(图4)进行轨迹规划, 图5是所得轨迹示意图。采用等间距的平行截面算法, 为保证加工效果, 往往保守地选取较小的激光光斑尺寸(一般采用 3 mm × 3 mm 光斑), 导致加工的效率较低。另外轨迹间距一般取为光斑的边长尺寸, 曲率变化较大时易出现衔接问题。而利用上述算法, 首先可以确定可采用的最大光斑尺寸(除个别区域外, 大部分区域采用 5 mm × 5 mm 或 7 mm × 7 mm 光斑), 继而采取样本点间距取平均的方法, 确定相邻平行截面间较优的间距, 从而在提高加工效率的基础上(整体加工效率可提高 1/3 左右), 有效减少了光斑重叠或间隙过大等现象, 取得了良好的加工效果。

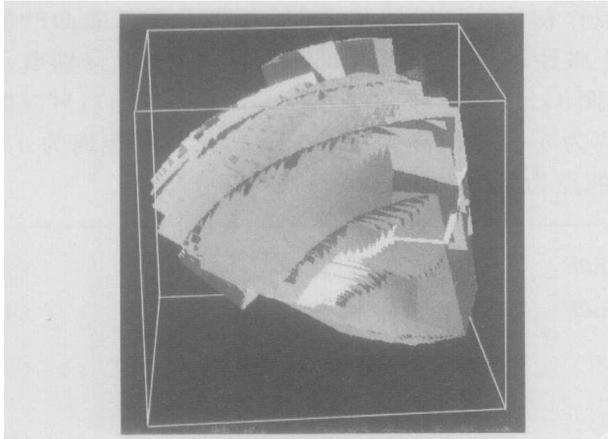


图4 汽车门板局部 CAD 模型

Fig. 4 Local CAD model of door covering on a car

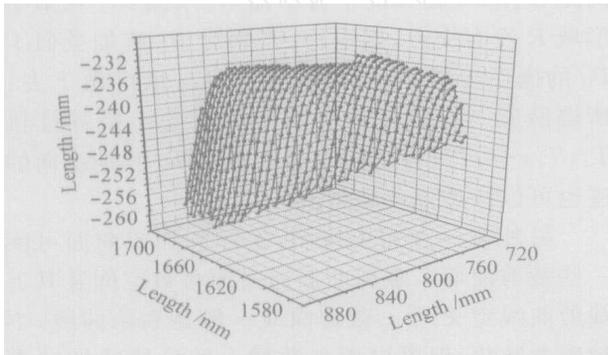


图5 汽车门板局部加工轨迹

Fig. 5 Manufacturing trace of local door covering on a car

6 结论

针对激光强化的特点,结合刀具加工的一些新的方法和考虑,提出了一种基于 CAD 模型的自由曲面轨迹优化算法。激光强化从基础工艺来说相对比较成熟,但其应用要得到进一步推广,特别是要实现复杂型面的激光强化,就必须在提高效率的基础上实现更为精细的加工。这就要求在轨迹规划这一工艺规划的重要环节中,应尽可能地结合工艺及相关技术的进展,从优化的角度去不断完善,使加工效率和加工效果都有较大的提高。本文在这一方面作了有益的尝试,所得算法已得到初步应用。但尚有

一些问题需要进一步解决,如平行截面方向的选择,更合适的光斑间距及轨迹间距的确定等。

参考文献

- 1 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001
虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001
- 2 Yu Gang, Wang Hongcai, Zhang Fenglin *et al.*. A laser machining device with flexible delivery and multi-axis motion [P]. *Chinese Patent*, 1998. No. ZL98101217.5
虞钢,王红才,张凤林等. 一种具有柔性传输和多轴联动的激光加工装置[P]. 中国专利, 1998. No. ZL98101217.5
- 3 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):365~368
高春林,虞钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计[J]. 中国激光, 2001, **A28**(4):365~368
- 4 Tu Mengfu, Yu Gang. A method of trace generation for a 5-axis robotic laser manufacturing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):364~368
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):364~368
- 5 Yang Dewu, Peng Fangyu, Zhou Yunfei. Optimization of 5-axis tool path based on principal-curvature matching [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2001, **29**(12):8~11
杨德武,彭芳瑜,周云飞. 基于主曲率匹配的五坐标刀位轨迹优化[J]. 华中科技大学学报, 2001, **29**(12):8~11
- 6 Yang Changqi, Qin Datong, Shi Wankai. Precision constant scallop-height tool-path planning for five-axis free-form surface machining [J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, **15**(5):621~625
杨长祺,秦大同,石万凯. 自由曲面五轴等残余高度高精度加工的路径规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, **15**(5):621~625
- 7 Mei Xiangming, Huang Jingzhi. Differential Geometry [M]. Beijing: Advanced Education Press, 2003
梅向明,黄敬之. 微分几何[M]. 北京:高等教育出版社, 2003
- 8 Chen Liping, Gong Yanyu, Li Bin *et al.*. Algorithm to quickly calculate the intersecting lines between free-form surfaces in CAD/CAM [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2000, **36**(7):102~105
陈丽萍,龚钰钰,李彬等. 快速完备的用于 CAD/CAM 自由曲面求交的算法[J]. 机械工程学报, 2000, **36**(7):102~105
- 9 Sun Jiaguang, Yang Changgui. Computer Graphics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
孙家广,杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998
- 10 Tang Min, Dong Jinxiang, Li Hailong *et al.*. Boolean operation of non-regular precise geometric models [J]. *J. Software*, 1999, **10**(12):1291~1297
唐敏,董金祥,李海龙等. 非正则精确模型的布尔操作[J]. 软件学报, 1999, **10**(12):1291~1297