

文章编号: 0258-7025(2009)02-0487-07

# 自由曲面五轴激光淬火工件姿态优化算法

徐宏伟 黄玉美 杨新刚 李艳

(西安理工大学机械制造自动化研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要** 激光淬火枪头相对于工件表面淬火区的倾角直接影响着淬火区域温度场的变化,进而影响淬火表面硬度均匀性。根据五轴激光淬火机床的结构特点,要求在淬火过程中工件表面瞬间淬火区域的法矢须垂直于  $XOY$  坐标平面以保证激光淬火质量。提出了利用瞬间淬火区域的四个边界点所组成的两个平面的法矢来确定工件的最佳姿态,并且给出了具体确定四个边界点的计算方法。建立了保证工件最佳姿态的数学模型,利用遗传算法求解出实现最佳姿态  $C$  轴  $A$  轴的位置角。最后通过对一个具体的三次  $B$  样条曲面进行实例计算,验证了该方法的可行性。

**关键词** 激光技术;复杂曲面;激光淬火;五轴加工;姿态;遗传算法

**中图分类号** TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0487

## Algorithm Optimization for Gesture of Workpiece in 5-Axis Laser Quenching of Free Form Surface

Xu Hongwei Huang Yumei Yang Xingang Li Yan

(Institute of Mechanical Manufacture and Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** The orientation of laser quenching tool to the workpiece surface influences the change of temperature field of quenching area, and then influences the uniformity of surface hardness of the workpiece. According to the structure character of 5-axis laser quenching machine, a rule is advanced that the normal vector of the transient laser quenching area must be always perpendicular to the coordinate plane  $XOY$  during laser quenching process. The method to determine the optimal workpiece gesture by the normal vectors of two planes determined by four boundary points in the laser quenching area is proposed. The algorithm to ascertain the four points is given. The model is established to assure the optimal workpiece gesture. Genetic algorithm is used to calculate the location angles of  $C$ -axis and  $A$ -axis for the optimal workpiece gesture. The gesture of workpiece with  $B$  splines curved surface is calculated to verify the feasibility of the model.

**Key words** laser technique; free form surface; laser quenching; 5-axis manufacturing; gesture; genetic algorithm

## 1 引言

随着我国塑料行业的发展,模具制造业也越来越得到重视,并且对模具的质量要求也越来越高,各种复杂曲面也大量应用在模具的型腔设计上。由于模具型腔在工作中的特殊性(需要反复与塑料结合脱离),要求型腔表面要有较高的硬度才能保证模具的寿命。相对于传统的淬火(例如工件整体的盐浴

淬火、工件表面的感应淬火),激光淬火具有可以精确控制热处理区域及工件热变形小等一系列优点<sup>[1]</sup>。所以对于诸如模具型腔等复杂型面且对表面硬度要求较高的工件,激光淬火是比较理想的热处理工艺。

激光淬火的原理是通过光路把一束功率密度很高的能量流照射在金属材料的一个小区域上,材料表面将激光照射的能量转化为热量而使激光作用区

收稿日期:2008-03-17;收到修改稿日期:2008-05-16

基金项目:陕西省教育厅重点科研项目(03JS042)资助课题。

作者简介:徐宏伟(1968—),男,副教授,博士研究生,主要从事激光淬火设备自动化控制及淬火参数控制方面的研究。

E-mail:stuxuxuxu@sina.com

导师简介:黄玉美(1941—),女,教授,博士生导师,主要从事多自由度数控机床方面的研究。

E-mail:huangym@xaut.edu.cn

温度迅速升高,达到相变温度。当激光停止在这一区域的照射时,由于金属本身基体的热扩散以及保护气体的吹拂下快速冷却,使金属材料表层经历了一个与常规淬火相似的热循环过程。所以在实际的激光淬火加工中需要进行相应的研究,以保证淬火后工件表面硬度的均匀。王云山等<sup>[2]</sup>利用四轴数控机床对曲轴进行淬火研究;席守谋等<sup>[3]</sup>将激光淬火与氮化处理复合应用得到了更好的效果。

机床是通过刀具和工件之间的成形运动来加工零件的,对于激光淬火,由于通常是最后一道工序,所以工件的形状一定,而其成形运动就相当于精加工的成形运动。对于三轴机床,由于其只有 X、Y 和 Z 三个移动轴,所以对刀具相对于工件的位姿就有了很大的限制<sup>[4]</sup>。而五轴加工机床通过增加两个转动轴,实现了刀具相对于工件可能的位姿。对于模具的型腔,大多数是复杂的型面,要对其进行激光淬火,为了保证相应的控制参数,必须保证激光枪相对于当前瞬间淬火区域相应的位姿要求。

就五轴切削加工,影响其加工精度和加工效率的因素很多,其中刀具相对于工件的姿态就对加工有很大的影响。金建新<sup>[5]</sup>提出了对多轴 CNC 机床加工曲面上曲线的刀具姿态进行实时控制,以保证得到较好的表面质量;Redonnet 等<sup>[6]</sup>提出了通过优化调整刀具的姿态来避免刀具与工件干涉的产生;Gian 等<sup>[7]</sup>利用矢量区来确定五轴数控加工凹曲面时合适的刀具姿态,并指出了合适的刀具姿态对加工质量的重要性。五轴激光淬火与五轴切削加工一样,其相应的刀具相对于工件的姿态对保证淬火的效果以及表面硬度的均匀性很重要。

## 2 五轴激光淬火机床的结构

本课题组成功研制的五轴多功能激光加工机床其中一个主要功能就是解决复杂型面的激光淬火<sup>[8]</sup>。五轴激光淬火机床分三大部分:激光发生器、机床本体和控制系统。激光发生器为 4 kW 的 CO<sub>2</sub> 横流气体激光器,机床本体是在原三轴结构的基础上增加了一个回转倾斜工作台(见图 1),通过五轴联动实现对复杂型面淬火时相应的激光枪头相对于工件的姿态要求。

由于激光加工的特殊性,在加工过程中,要一直保证激光的射出是垂直向下的(安全考虑)。所以在设计时,控制激光枪头运动采用 Y 和 Z 的串联来保证,与之对应的工件控制则采用 X、A 及 C 轴的串联来实现。这样机床就好像两个串联机器人,一个作

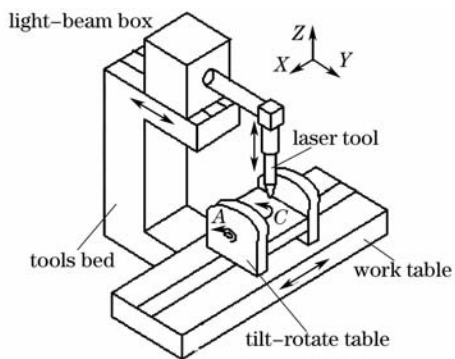


图 1 五坐标多功能激光加工机床结构

Fig. 1 Structure of 5-axis multi-function laser machining tool

用于激光枪头,另一个作用于工件(见图 2)。通过这两个串联机器人的协调运动实现激光枪头相对于工件的激光淬火位姿要求。

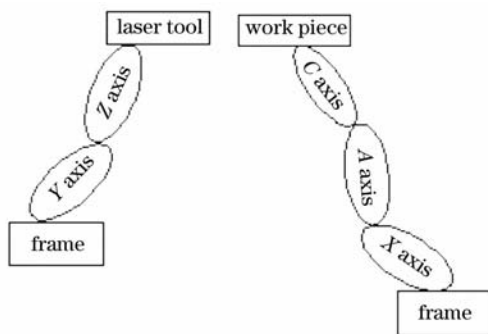


图 2 机床的动态链图

Fig. 2 Kinematic chain diagram of machining tool

激光束经过相应的光路,最后通过淬火枪头中的凹面反射镜反射后照射到工件的表面(见图 3)。激光光束通过反光镜和凹面反射镜照射到工件表面后,使工件表面被照射区瞬间温度升高。在保护性气体——高压氮气以及工件本身热传导的作用下,快速冷却,实现激光淬火。由此可以看出,淬火枪头相对于工件的姿态实际上就是工件的姿态,因为淬

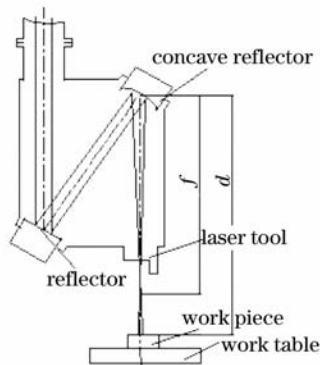


图 3 激光淬火枪头

Fig. 3 Laser quenching tool

火枪头不发生角度的变化。

### 3 工件姿态的优化算法

相对于激光淬火加工,其激光器所产生的激光束为包含着低阶模和高阶模的多模激光<sup>[9]</sup>,其光斑形状如图 4 所示。



图 4 多模激光光斑

Fig. 4 Multi-mode laser spot

在数控机床加工时,首先将工件上刀具的路径离散为很多个离散的刀具接触点(CC点)。实际上刀具的运动是对CC点之间进行直线插补运动,用一小段一小段的直线段来拟合光滑的曲线<sup>[10]</sup>。五轴激光加工机床的加工运动也与此相仿,也是相对于淬火路径进行插补。所以淬火区域的法矢也就是当激光枪头相对于工件表面沿淬火路径插补到的CC点处时该瞬时淬火区域的法矢。数控激光淬火的CC点与数控切削加工的CC点不同,数控切削加工的CC点是刀具与工件的接触点,而数控激光淬火的CC点是指瞬间淬火区域的中心点,也就是说激光束与工件表面接触的不是一个点而是一个有一定面积和形状的面(见图5)。

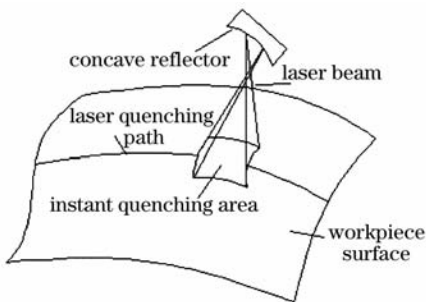


图 5 曲面激光淬火

Fig. 5 Laser quenching for curved surface

所以,对于五轴铣削加工,其加工点法矢是通过刀具轨迹上的CC点处的法矢来确定的。而激光淬火则要考虑到整个瞬间淬火区域上所有的部分,考虑到激光淬火加工的特殊性,采用两组定向点来确定其法矢。

#### 3.1 确定定向点

假设一光滑参数曲面为  $P(u, v)$ , 为了方便计算,沿参数  $u$  方向选择淬火路径,则淬火路径为

$P(u, v_0)$ , 其中  $v_0$  为一定值。在以淬火路径上点  $O(u_0, v_0)$  为中心的淬火区确定其两组定向点  $(P_1, P_2, P_3)$  和  $(P'_1, P'_2, P'_3)$ , 这两组点决定了淬火区域的法矢方向。要求这些点在淬火区域的边界部位,并且有代表性。

以  $O(u_0, v_0)$  为中心,淬火区域边长  $a$  为直径作一球面(见图6),则球面方程为

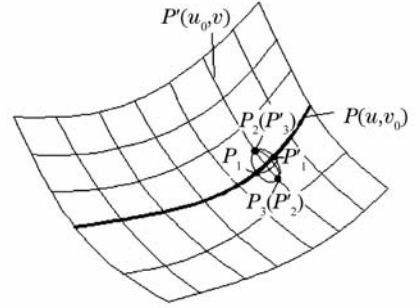


图 6 确定定向点

Fig. 6 Determination of orientation points

$$[X - X(u_0, v_0)]^2 + [Y - Y(u_0, v_0)]^2 + [Z - Z(u_0, v_0)]^2 = \frac{a^2}{4}. \quad (1)$$

则其与参数曲面的相交曲线  $L$  为

$$[X(u, v) - X(u_0, v_0)]^2 + [Y(u, v) - Y(u_0, v_0)]^2 + [Z(u, v) - Z(u_0, v_0)]^2 = \frac{a^2}{4}. \quad (2)$$

而球面与路径相交的两个点决定了两组点中的  $P_1$  和  $P'_1$ , 则

$$[X(u, v_0) - X(u_0, v_0)]^2 + [Y(u, v_0) - Y(u_0, v_0)]^2 + [Z(u, v_0) - Z(u_0, v_0)]^2 = \frac{a^2}{4}. \quad (3)$$

根据式(3)可以求出  $P_1(u_1, v_0)$  和  $P'_1(u'_1, v_0)$ 。过  $O(u_0, v_0)$  沿参数  $v$  可以得到一曲线为  $P'(u_0, v)$ , 其与曲线  $L$  有两个交点。可以表示为

$$[X(u_0, v) - X(u_0, v_0)]^2 + [Y(u_0, v) - Y(u_0, v_0)]^2 + [Z(u_0, v) - Z(u_0, v_0)]^2 = \frac{a^2}{4}, \quad (4)$$

根据(4)式求出的两个点可以作为  $P_2(u_0, v_2)$ ,  $P_3(u_0, v_3)$  和  $P'_3(u_0, v_2)$ ,  $P'_2(u_0, v_3)$  的两组点,这样淬火区域法矢的两组定向点就确定了。

#### 3.2 计算法矢

在确定了定向点以后,则各组定向点所决定的法矢就有以下方法。如图6所示,相对于光滑曲面  $P[X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)]$ , 为了方便计算,沿着

参数  $u$  方向的淬火路径  $C C [X(u, v_0), Y(u, v_0), Z(u, v_0)]$ 。相对于该路径上的  $C C$  点  $O [X(u_0, v_0), Y(u_0, v_0), Z(u_0, v_0)]$  的四个定向点分别为

$$P_1 [X(u_1, v_0), Y(u_1, v_0), Z(u_1, v_0)]$$

$$P_2 [X(u_0, v_2), Y(u_0, v_2), Z(u_0, v_2)]$$

$$P_3 [X(u_0, v_3), Y(u_0, v_3), Z(u_0, v_3)]$$

$$P'_1 [X(u'_1, v_0), Y(u'_1, v_0), Z(u'_1, v_0)]$$

其中,  $u_1, v_2, v_3, u'_1$  可以通过式(3), (4)求得。

由三个点形成一个面, 通过  $P_1, P_2, P_3$  这三个点可以得到两个矢量  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ 。那么  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_3 \times \mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$  就是这三点组成的平面的法矢, 即

$$\mathbf{P}_1\mathbf{P}_3 = [X_{P_3} - X_{P_1}, Y_{P_3} - Y_{P_1}, Z_{P_3} - Z_{P_1}], \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2 = [X_{P_2} - X_{P_1}, Y_{P_2} - Y_{P_1}, Z_{P_2} - Z_{P_1}], \quad (6)$$

其中,

$$X_{P_1} = X(u_1, v_0), Y_{P_1} = Y(u_1, v_0), Z_{P_1} = Z(u_1, v_0),$$

$$X_{P_2} = X(u_0, v_2), Y_{P_2} = Y(u_0, v_2), Z_{P_2} = Z(u_0, v_2),$$

$$X_{P_3} = X(u_0, v_3), Y_{P_3} = Y(u_0, v_3), Z_{P_3} = Z(u_0, v_3)。$$

$$\mathbf{P}_1\mathbf{P}_3 \times \mathbf{P}_1\mathbf{P}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_{P_3} - X_{P_1} & Y_{P_3} - Y_{P_1} & Z_{P_3} - Z_{P_1} \\ X_{P_2} - X_{P_1} & Y_{P_2} - Y_{P_1} & Z_{P_2} - Z_{P_1} \end{vmatrix} = C_1 i + C_2 j + C_3 k, \quad (7)$$

式中  $C_1, C_2, C_3$  分别为

$$C_1 = (Y_{P_3} - Y_{P_1})(Z_{P_2} - Z_{P_1}) - (Z_{P_3} - Z_{P_1})(Y_{P_2} - Y_{P_1}), \quad (8)$$

$$C_2 = (Z_{P_3} - Z_{P_1})(X_{P_2} - X_{P_1}) - (X_{P_3} - X_{P_1})(Z_{P_2} - Z_{P_1}), \quad (9)$$

$$C_3 = (X_{P_3} - X_{P_1})(Y_{P_2} - Y_{P_1}) - (Y_{P_3} - Y_{P_1})(X_{P_2} - X_{P_1})。 \quad (10)$$

同理可求得通过点  $P'_1, P_2, P_3$  所构成的面的法矢为

$$\mathbf{P}'_1\mathbf{P}_3 \times \mathbf{P}'_1\mathbf{P}_2 =$$

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ X_{P_3} - X_{P'_1} & Y_{P_3} - Y_{P'_1} & Z_{P_3} - Z_{P'_1} \\ X_{P_2} - X_{P'_1} & Y_{P_2} - Y_{P'_1} & Z_{P_2} - Z_{P'_1} \end{vmatrix} = C'_1 i + C'_2 j + C'_3 k, \quad (11)$$

式中  $C'_1, C'_2, C'_3$  分别为

$$C'_1 = (Y_{P_3} - Y_{P'_1})(Z_{P_2} - Z_{P'_1}) - (Z_{P_3} - Z_{P'_1})(Y_{P_2} - Y_{P'_1}), \quad (12)$$

$$C'_2 = (Z_{P_3} - Z_{P'_1})(X_{P_2} - X_{P'_1}) - (X_{P_3} - X_{P'_1})(Z_{P_2} - Z_{P'_1}), \quad (13)$$

$$C'_3 = (X_{P_3} - X_{P'_1})(Y_{P_2} - Y_{P'_1}) - (Y_{P_3} - Y_{P'_1})(X_{P_2} - X_{P'_1})。 \quad (14)$$

## 4 确定工件姿态的数学模型

对于五轴多功能激光加工机床, 在淬火时要保证淬火质量, 就需在淬火时使工件淬火表面的瞬间淬火区域的法矢垂直于坐标平面  $XOY$ 。主要通过  $A$  轴和  $C$  轴的运动来实现的, 所以保证姿态的  $A$  轴和  $C$  轴转角的求取就显得非常重要。这里假设绕  $Z$  轴转动角度为  $\alpha$ , 绕  $X$  轴倾斜的角度为  $\beta$ , 则相应的转动矩阵分别为

$$R(Z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$R(X, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}。 \quad (16)$$

一般来说, 要达到要求的姿态, 须先进行  $C$  轴的转动, 然后再转动  $A$  轴, 所以转动两个角度后的转动矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & -s\beta \\ s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & c\beta \end{bmatrix}。 \quad (17)$$

则  $P_1, P_2, P_3, P'_1$  这四个点经过绕  $Z$  轴转动角度  $\alpha$ , 绕  $X$  轴倾斜角度  $\beta$  后, 其中  $P_1$  相应的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} X'_{P_1} \\ Y'_{P_1} \\ Z'_{P_1} \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & -s\beta \\ s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{P_1} \\ Y_{P_1} \\ Z_{P_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{P_1} c\alpha - Y_{P_1} s\alpha \\ X_{P_1} s\alpha c\beta + Y_{P_1} c\alpha c\beta - Z_{P_1} s\beta \\ X_{P_1} s\alpha s\beta + Y_{P_1} c\alpha s\beta + Z_{P_1} c\beta \end{bmatrix}。 \quad (18)$$

同理可求得  $P_2, P_3, P'_1$  的坐标分别变换为

$$\begin{bmatrix} X'_{P_2} \\ Y'_{P_2} \\ Z'_{P_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{P_2} c\alpha - Y_{P_2} s\alpha \\ X_{P_2} s\alpha c\beta + Y_{P_2} c\alpha c\beta - Z_{P_2} s\beta \\ X_{P_2} s\alpha s\beta + Y_{P_2} c\alpha s\beta + Z_{P_2} c\beta \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} X'_{P_3} \\ Y'_{P_3} \\ Z'_{P_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{P_3} c\alpha - Y_{P_3} s\alpha \\ X_{P_3} s\alpha c\beta + Y_{P_3} c\alpha c\beta - Z_{P_3} s\beta \\ X_{P_3} s\alpha s\beta + Y_{P_3} c\alpha s\beta + Z_{P_3} c\beta \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} X'_{P'_1} \\ Y'_{P'_1} \\ Z'_{P'_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{P'_1} c\alpha - Y_{P'_1} s\alpha \\ X_{P'_1} s\alpha c\beta + Y_{P'_1} c\alpha c\beta - Z_{P'_1} s\beta \\ X_{P'_1} s\alpha s\beta + Y_{P'_1} c\alpha s\beta + Z_{P'_1} c\beta \end{bmatrix}。 \quad (21)$$

由式(7)可以看出,如果  $P_1, P_2, P_3$  所组成面的法矢垂直于  $XOY$  坐标平面,则  $C_1 = C_2 = 0$ 。而瞬间淬火区域的法矢是由  $P_1, P_2, P_3$  所组成面的法矢和  $P_2, P_3, P'_1$  所组成面的法矢确定。对于平面,这两个平面的法矢是一致的。但对于曲面,就不同了。所以要达到较好的淬火效果,则要使  $C$  轴,  $A$  轴转到使  $C_1^2 + C_2^2 + C_1'^2 + C_2'^2$  最小为佳。此时的  $C_1, C_2, C_1', C_2'$  分别为

$$C_1 = (Y'_{P_3} - Y'_{P_1})(Z'_{P_2} - Z'_{P_1}) - (Z'_{P_3} - Z'_{P_1})(Y'_{P_2} - Y'_{P_1}), \quad (22)$$

$$C_2 = (Z'_{P_3} - Z'_{P_1})(X'_{P_2} - X'_{P_1}) - (X'_{P_3} - X'_{P_1})(Z'_{P_2} - Z'_{P_1}), \quad (23)$$

$$C_1' = (Y'_{P'_3} - Y'_{P'_1})(Z'_{P'_2} - Z'_{P'_1}) - (Z'_{P'_3} - Z'_{P'_1})(Y'_{P'_2} - Y'_{P'_1}), \quad (24)$$

$$C_2' = (Z'_{P'_3} - Z'_{P'_1})(X'_{P'_2} - X'_{P'_1}) - (X'_{P'_3} - X'_{P'_1})(Z'_{P'_2} - Z'_{P'_1}), \quad (25)$$

所以使工件姿态最利于保证淬火质量时的目标函数为

$$F = \min[f(\alpha, \beta)] = \min(C_1^2 + C_2^2 + C_1'^2 + C_2'^2)。 \quad (26)$$

由于式(26)复杂,且包含着  $C, A$  轴的转角  $\alpha, \beta$  两个变量及其正弦余弦形式,所以很难直接进行计算。张臣等<sup>[11]</sup>提出以加工时间以及加工成本为目标函数,利用遗传算法对加工参数进行优化。本文也给出了目标函数式(26),通过遗传算法可以得到满足式(26)的  $\alpha, \beta$  值。

具体的遗传算法<sup>[12]</sup>过程如下:

第一步,确定决策变量和约束条件。已知决策变量为  $\alpha, \beta$ 。根据回转倾斜工作台工作结构特点,其约束条件为  $0 \leq \alpha < \pi, -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ 。

第二步,建立优化模型。式(26)为所需的数学模型。

第三步,对  $\alpha, \beta$  进行初始化。

第四步,对  $\alpha, \beta$  依概率进行遗传算子的操作(交叉和变异)。

第五步,生成新的  $\alpha, \beta$ , 进行计算,并比较分析是否满足误差条件。

第六步,满足条件,中止判断,得到满足式(26)的最优解,即为所求。

## 5 计算仿真

自由曲面大多都可由三次  $B$  样条曲面来分块拟合<sup>[13]</sup>,所以这里用三次  $B$  样条曲面进行实例计算。假设一个三次  $B$  样条曲面是由下列 16 个控制点确定的,而淬火光斑大小为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

16 个控制点坐标为

$$\begin{aligned} &(0 \ 0 \ 30) \ (0 \ 20 \ 24) \ (0 \ 40 \ 24) \ (0 \ 60 \ 30) \\ &(14 \ 0 \ 24) \ (14 \ 20 \ 18) \ (14 \ 40 \ 18) \ (14 \ 60 \ 24) \\ &(28 \ 0 \ 30) \ (28 \ 20 \ 24) \ (28 \ 40 \ 24) \ (28 \ 60 \ 30) \\ &(40 \ 0 \ 24) \ (40 \ 20 \ 18) \ (40 \ 40 \ 18) \ (40 \ 60 \ 24) \end{aligned}$$

则利用三次 Bezier 曲面进行拟合得到曲面参数方程为

$$P(u, v) = UB_{be}PB_{be}^T V^T, \quad (27)$$

其中,  $U = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \ 0 \leq u \leq 1, V = [v^3 \ v^2 \ v \ 1] \ 0 \leq v \leq 1,$

$$B_{be} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix}。$$

则曲面  $P[X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)]$  为

$$X(u, v) = -2u^3 + 42u,$$

$$Y(u, v) = 60v,$$

$$Z(u, v) = 18u^2v^2 - 18uv - 24u^3 + 36u^2 - 18u + 30。 \quad (28)$$

在这里,针对点  $(0, 0, 30)$  来确定对以其为中心淬火区域进行淬火时,机床  $A, C$  轴的转角  $\beta, \alpha$ 。由点  $O(0, 0, 30)$  可以确定在  $O$  点处曲面的参数为  $u = 0, v = 0$ 。代入式(3), (4), 可以求出两组定向点分别为  $P_1(1.394, 0, 29.441), P_2(0, 1.5, 30), P_3(0, -1.5, 30)$  和  $P'_1(-1.365, 0, 30.624), P'_2(0, 1.5, 30), P'_3(0, -1.5, 30)$ 。

代入式(22)~(26)可以得到目标函数为  $F(\alpha, \beta) = \min[f(\alpha, \beta)]$ , 其中

$$\begin{aligned} f(\alpha, \beta) = & [3.0(1.394\sin \alpha \cos \beta + 0.559\sin \beta + 1.5\cos \alpha \cos \beta \cos \alpha \sin \beta) - 3.0(1.394\sin \alpha \sin \beta - \\ & 0.559\cos \beta + 1.5\cos \alpha \sin \beta) \cos \beta \cos \beta]^2 + [-3.0(1.394\sin \alpha \sin \beta - 0.559\cos \beta + 1.5\cos \alpha \sin \beta) \times \\ & \sin \alpha - 3.0(1.394\cos \alpha - 1.5\sin \alpha) \cos \alpha \sin \beta]^2 + [(-3.0(-1.365\sin \alpha \cos \beta - 0.624\sin \beta - 1.5\cos \alpha \cos \beta) \times \end{aligned}$$

$$\cos \alpha \sin \beta + 3.0(-1.365 \sin \alpha \sin \beta + 0.624 \cos \beta - 1.5 * \cos \alpha \sin \beta) \cos \alpha \cos \beta]^2 + [3.0(-1.365 \sin \alpha \sin \beta + 0.624 \cos \beta - 1.5 \cos \alpha \sin \beta) \sin \alpha + 3.0(-1.365 \cos \alpha + 1.5 \sin \alpha) \cos \alpha \sin \beta]^2]。 \quad (29)$$

利用 Matlab 软件可以得到  $\alpha, \beta$  角和  $f(\alpha, \beta)$  的关系如图 7 所示), 由图 7 可以看出, 该数学模型是

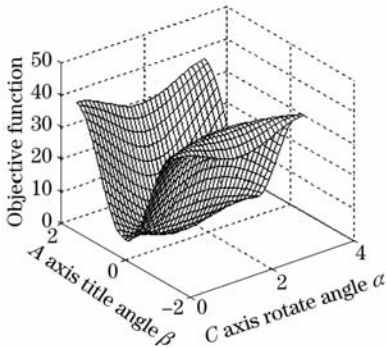


图 7  $\alpha, \beta$  与  $f(\alpha, \beta)$  的关系图

Fig. 7  $\alpha, \beta$  versus  $f(\alpha, \beta)$

一个多元单峰函数的优化问题。通过采用 Matlab 中提供的相应遗传算法工具箱进行计算后, 得到相应的计算结果如图 8 所示, 可以看出, 经过迭代计算后, 计算的解很快收敛, 并且得到优化后的 C 轴 A 轴位置角度为:  $\alpha = 0.4241, \beta = 2710$ 。当 C 轴 A 轴转到绝对坐标为该值时, 可以看作工件表面的瞬间淬火区域处于合适的姿态, 便于淬火。

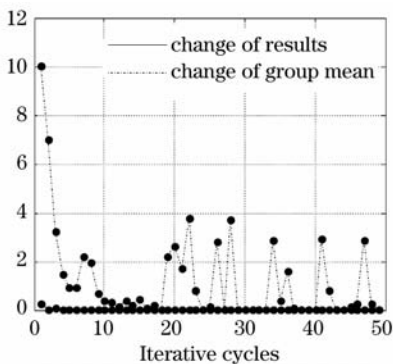


图 8 遗传算法计算过程

Fig. 8 Computing Process of GA

## 6 结论

五轴联动激光适用于对复杂的曲面进行淬火加工。在加工中, 为了保证淬火效果, 要求工件表面的瞬间淬火区域的法矢垂直于 XOY 平面。并且瞬间淬火区域的法矢是由瞬间淬火区域边界四点所组成的两个平面的法矢确定的, 四个点的选取也是通过相应的计算使之具有代表性。利用遗传算法求解复

杂的非线性函数的优势, 对建立的数学模型进行了计算, 可以得到保证工件姿态的 C 轴和 A 轴的位置角。该方法可以直接指导离线计算五轴激光淬火加工中保证工件优化姿态的实践工作。

## 参 考 文 献

- 1 R. Komanduri, Z. B. Hou. Thermal analysis of laser surface transformation hardening—optimization of process parameters [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, **44**: 991~1008
- 2 Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo *et al.*. Processing of laser quenching crackshaft [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (4): 574~576  
王云山, 张兴泉, 雷剑波 等. 曲轴激光淬火工艺 [J]. *中国激光*, 2007, **34** (4): 574~576
- 3 Xi Shoumou, Zhang Jianguo, Sun Xiaoyan *et al.*. Laser quenching + nitriding compound treatment of 38CrMoAlA steels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31** (6): 761~764  
席守谋, 张建国, 孙晓燕 等. 38CrMoAlA 钢激光淬火 + 氮化复合处理 [J]. *中国激光*, 2004, **31** (6): 761~764
- 4 Jianhui Liu, Huijun Zou, Hongsen Yan. Research on the structure configuration synthesis and design criteria of five-axis machining centers [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2006
- 5 Jin Jianxin. Real time control of cutter orientation for machining surface—curve with multi-axis CNC machine tool [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, **37** (3): 85~88  
金建新. 多轴 CNC 机床加工曲面上曲线的刀具姿态实时控制 [J]. *机械工程学报*, 2001, **37** (3): 85~88
- 6 J. M. Redonnet, W. Rubio, F. Monies *et al.*. Optimising tool positioning for end-mill machining of free-form surfaces on 5-axis machines for both semi-finishing and finishing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2000, **16**: 383~391
- 7 Robert Gain, T. W. Lin, Alan C. Lin. Planning of tool orientation for five-axis cavity machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2003, **22**: 150~160
- 8 Xu Hongwei, Huang Yumei, Liu Hongyan *et al.*. Development of multi-function laser manufacture machine tool [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2005, **519** (9): 54~56  
徐宏伟, 黄玉美, 刘鸿雁 等. 多功能激光加工机床的研制 [J]. *制造技术与机床*, 2005, **519** (9): 54~56
- 9 Li Junchang. Research on optimization controlling of laser heat treatment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995. 12  
李俊昌. 激光热处理优化控制研究 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995
- 10 Yu (Michael) Wang, Xiaowei (Sherrie) Tang. Five-axis NC machining of sculptured surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 1999, **15**: 7~14
- 11 Zhang Chen, Zhou Laishui, An Luling *et al.*. Optimization of NC machining parameters based on machining simulation [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, **18** (24): 2955~2960; 2954

- 张 臣, 周来水, 安鲁陵 等. 基于仿真的数控铣削加工参数优化研究[J]. 中国机械工程, 2007, **18**(24): 2955~2960; 2954
- 12 Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu *et al.*. Matlab Genetic Algorithm Toolbox & Application [M]. Xidian University Press, 2005
- 雷英杰, 张善文 李续武 等. MATLAB 遗传算法工具箱及其应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2005
- 13 Young-Keun Choi, A. Banerjee, Jae-Woo Lee. Tool path generation for free form surfaces using Bezier curves/surfaces [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, **52**: 486~501