

# 汽车模具复杂棱脊和沟槽的数字化 及激光加工轨迹规划\*

刘荷辉 虞 钢

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要:** 针对大型汽车冲压模具复杂棱脊和沟槽的数字化问题提出了三维自适应测量算法。为适应于激光表面强化加工的特殊要求,在后续测量数据处理过程中建立了复杂棱脊和沟槽的简化数学模型,提出了六维激光加工轨迹规划算法,并进行了测量和加工试验验证。上述算法都已应用到集成化柔性激光加工系统中。

**关键词:** 激光加工 汽车模具 三维自适应测量 加工轨迹规划

**中图分类号:** TN241

## 0 前言

冲压过程中汽车模具的一些部分(如曲率变化大的自由曲面、复杂棱边和棱脊沟槽等)会因应力过分集中而产生破坏,因此这些地方往往需要强化。汽车模具的复杂棱脊和沟槽是指冲压模具中那些长条状的凸起和凹陷,这些地方都是冲压时应力急剧变化和集中的地方。另外这些地方形态各异,利用点位测量办法将其数字化有一定困难。在研究中率先提出了适用于点位测量的三维自适应测量算法,以求能够准确、快速、安全地数字化模具棱脊和沟槽。在后续激光强化加工中,激光经过二元光学变换后形成具有一定尺寸的正方形加工光斑<sup>[1]</sup>,这就要求每排轨迹数据在空间成等距排列,排与排之间的距离也是等距的,并且不重叠、无间隙地覆盖待加工部位。另外激光加工要求激光加工头垂直于加工表面,其要求轨迹数据格式为空间三维坐标加外法矢量的六维数据 $(x, y, z, ax, ay, az)$ 。针对这种问题,提出了复杂棱脊和沟槽的加工轨迹规划算法,并利用集成化柔性激光加工系统<sup>[2,3]</sup>完成数据采集和加工试验。

## 1 三维自适应测量算法和轨迹规划算法的基本思路及数学原理

### 1.1 算法基本思路

汽车模具的棱脊和沟槽呈现出多种形态,考察

它们的共同特征,不失一般性可认为其由多个圆弧曲面段光滑拼接而成。如图 1 所示,棱脊由左边界曲线 A(为三维空间曲线)、中间曲线 B、右边界曲线 C 和连接三者的圆弧曲面构成,以垂直于中间曲线 B 的平面截取棱脊所得到的横截面为由点  $P_{a,i}$ 、 $P_{b,i}$ 、 $P_{c,i}$  决定的圆弧(如图 2 所示)。利用上述模型,则只需要测量出左边界 A、中间曲线 B 和右边界 C 就可以获得整个棱脊的位置信息。三维自适应测量的基本思路就是以累加弦长三次参数样条函数作为数学模型,获取空间曲线的特征点(特征点主要指曲线的拐点、大曲率的加密点以及测量起始点和结束点),

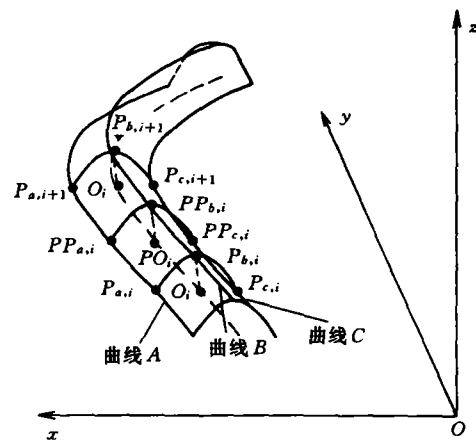


图 1 汽车模具棱脊示意图

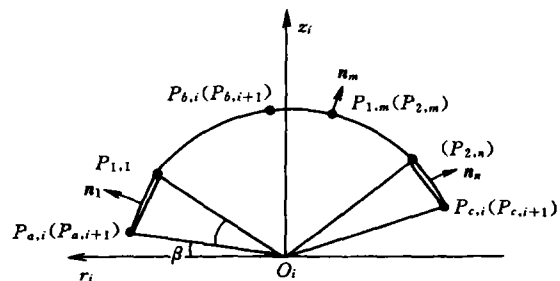


图 2 计算加工点法矢量示意图

\* 中国科学院大型仪器设备研制项目(中科院计字[1997]第 167 号,中科院成鉴字[1999]第 017 号)和中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-11)基金资助。20040430 收到初稿,20040920 收到修改稿

并利用特征点作为插值点来逼近实际棱脊,再根据其具体特点自适应地插值产生下一个探测点和测量避障点,从而实现三维自由曲线的点位测量。最后获得左边界  $A$ 、中间曲线  $B$  和右边界  $C$  的三维位置信息。

加工轨迹规划算法则试图根据左边界  $A$ 、中间曲线  $B$ 、右边界  $C$  的三维坐标生成激光加工所需的六维轨迹。综合考虑棱脊的简化模型和加工光斑尺寸( $d \times d$ ),以  $d$  为固定步长对中间曲线  $B$  进行等分,求出过  $B$  的等分点且垂直于  $B$  的平面与左边界  $A$  和右边界  $C$  上的交点,如图 1 所示,中间曲线上  $P_{b,i}$  点对应于左边界  $A$  上的  $P_{a,i}$  点和右边界  $C$  上的  $P_{c,i}$ ,  $P_{b,i+1}$  点对应于  $P_{a,i+1}$ 、 $P_{c,i+1}$ ,且满足  $|P_{a,i}P_{a,i+1}| = |P_{b,i}P_{b,i+1}| = |P_{c,i}P_{c,i+1}| = d$ 。再对由  $P_{a,i}$ 、 $P_{b,i}$ 、 $P_{c,i}$  构成的圆弧进行等分,形成点列  $P_{a,i}$ 、 $P_{1,1}$ 、 $\dots$ 、 $P_{1,n}$ 、 $P_{c,i}$ ,同样对由  $P_{a,i+1}$ 、 $P_{b,i+1}$ 、 $P_{c,i+1}$  构成的圆弧进行划分,形成点列  $P_{a,i+1}$ 、 $P_{2,1}$ 、 $\dots$ 、 $P_{2,n}$ 、 $P_{c,i+1}$ ,则由点簇  $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{2,1}P_{1,1}$ 、 $P_{1,1}P_{2,1}P_{2,2}P_{1,2}$ 、 $\dots$ 、 $P_{1,n-1}P_{2,n-1}P_{2,n}P_{1,n}$ 、 $P_{1,n}P_{2,n}P_{c,i+1}P_{c,i}$  构成了  $(n+1)$  个  $d \times d$  加工块,则可以求得加工法向矢量。如图 1 所示取  $P_{b,i}P_{b,i+1}$  的中点  $PP_{b,i}$ ,求过  $PP_{b,i}$  且垂直于曲线  $B$  的平面与左边界  $A$  的交点  $PP_{a,i}$  及右边界  $C$  的交点  $PP_{c,i}$ ,对由  $PP_{a,i}$ 、 $PP_{b,i}$ 、 $P_{c,i}$  构成的圆弧进行等分就可求得对应的加工点列:  $PP_1$ 、 $PP_2$ 、 $\dots$ 、 $PP_n$ 。将所求得的加工法向矢量结合对应的加工点即获得了激光加工所需的六维数据。

## 1.2 累加弦长参数样条曲线

因为三维自适应测量算法和轨迹规划算法的数学模型都是以累加弦长参数样条曲线<sup>[4]</sup>为基础,所以下面简单介绍一下其数学原理。给定一组型值点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ , 则与任一型值点  $P_k$  ( $k = 0, 1, \dots, n$ ) 相对应的累加弦长为

$$\begin{cases} s_0 = 0 \\ s_k = \sum_{j=1}^k \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

由此便得到表 1。

表 1 三维型值点与弦长参数的对应关系

$s$	$s_0$	$s_1$	$s_2$	$\dots$	$s_n$
$x$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$
$y$	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$\dots$	$y_n$
$z$	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$\dots$	$z_n$

根据表 1 并结合给定的端点条件,即可构造三个插值三次样条函数  $x = C_x(s)$ ,  $y = C_y(s)$ ,  $z = C_z(s)$ , 它们在区间  $[s_0, s_n]$  上二阶连续可微,因此得到的参数

样条曲线  $P(s) = [C_x(s), C_y(s), C_z(s)]$  也是二阶连续。给定弦长参数  $s$ , 就可以得到样条曲线上对应的三维点。

## 2 算法推导及具体步骤

### 2.1 三维自适应测量算法

如上所述,三维自适应测量的思路就是利用以累加弦长为参数的三次样条函数作为数学模型通过自适应的插值产生下一个测点和测量避障点。从而实现三维自由曲线的点位测量。其具体步骤如下。

(1) 手动测量获得待测曲线特征点列  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{n-1}, T_n$  (特征点主要指曲线的拐点、大曲率的加密点以及测量起始点和结束点,其中  $T_1$  为起始点,  $T_n$  为结束点)。

(2) 利用获取的特征点列  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{n-1}, T_n$ , 采用自由端边界条件,以累加弦长为参数,用追赶法计算出参数样条曲线  $C(s) ([C_x(s), C_y(s), C_z(s)])$ 。

(3) 以由(2)所得到的参数样条曲线  $C(s)$  替代实际曲线,令  $s_0 = 0$ ,按以下原则确定下一个测量点的弦长参数  $s_i$ : 令  $d_i$  为点  $T_{i-1}$  与点  $T_i$  之间的距离,若  $d_i \leq D_L$ ,  $s_i = s_{i-1} + 4$  mm; 若  $D_L < d_i \leq D_M$ ,  $s_i = s_{i-1} + 8$  mm; 若  $D_M < d_i \leq D_H$ ,  $s_i = s_{i-1} + d_i/N$  mm; 若  $d_i > D_H$ ,  $s_i = s_{i-1} + d_i/M$  ( $D_L$ 、 $D_M$ 、 $D_H$ 、 $N$ 、 $M$  为常数),则由式(2)生成预测点  $P_i$ ,由式(3)生成对应的避障点  $P_{b,i}$ 。式(3)中  $\Delta P$  为避障矢量,与测量方向有关。

$$P_i(s_i) = C(s_i) \quad (2)$$

$$P_{b,i} = P_i(s_i) + \Delta P \quad (3)$$

(4) 若  $s_i < S_{\text{end}}$  ( $S_{\text{end}}$  为结束点  $T_n$  对应的累加弦长参数),重复(3); 否则结束测量。步骤(3)中改变参数  $s_i$  的大小,其实质是自适应地调整每次测量的步长,以便做到根据曲线的特点合理地布置测量点,提高测量效率和后面数据处理的精度<sup>[5]</sup>。

### 2.2 六维激光加工轨迹规划算法

六维加工轨迹生成算法就是要求获得最后每个  $d \times d$  的激光加工块的加工点的轨迹和法向矢量,并要求这些方块能够最终覆盖住需要强化的模具棱脊,并且不能重叠(重叠可能会导致模具因为被激光加工两次而被烧蚀坏)。加工路径规划就是要求所生成的轨迹满足激光加工机器人加工时相邻加工点姿态变化较小,无效行程最短。

#### 2.2.1 加工轨迹法向矢量的求取

将三维自适应测量获得的左边界  $A$ 、中间曲线  $B$  和右边界  $C$  的测量数据进行累加弦长参数样条拟

合，从而获得了汽车模具棱脊和沟槽的左边界参数样条曲线  $A(C_{a,x}(s) \ C_{a,y}(s) \ C_{a,z}(s))$ 、中间样条曲线  $B(C_{b,x}(s) \ C_{b,y}(s) \ C_{b,z}(s))$  和右边界样条曲线  $C(C_{c,x}(s) \ C_{c,y}(s) \ C_{c,z}(s))$ 。在进行轨迹划分时，以加工光斑尺寸  $d$  为步长，以中间曲线  $B$  为基准，求得  $P_{b,0}(C_{b,x}(s_{b,0}) \ C_{b,y}(s_{b,0}) \ C_{b,z}(s_{b,0}))$  和  $P_{b,1}(C_{b,x}(s_{b,1}) \ C_{b,y}(s_{b,1}) \ C_{b,z}(s_{b,1}))$ ，其中  $s_{b,0} = 0, s_{b,1} = s_{b,0} + d$ 。求取左边界  $A$  上的对应点  $P_{a,i}$  和右边界  $C$  上的对应点  $P_{c,i}$  的方法如下：以  $P_{b,1}P_{b,0}(C_{a,x}(s_{a,0}) - C_{a,x}(s_{a,1}) \ C_{a,y}(s_{a,0}) - C_{a,y}(s_{a,1}) \ C_{a,z}(s_{a,0}) - C_{a,z}(s_{a,1}))$  为法矢且过  $P_{b,0}$  的平面与边界曲线  $A$ 、 $C$  的交点  $P_{a,0}$  和  $P_{c,0}$ ，同样  $P_{b,1}$  的对应点是以  $P_{b,1}P_{b,0}$  为法矢量且过  $P_{b,1}$  的平面与与边界曲线  $A$ 、 $C$  的交点  $P_{a,1}$  和  $P_{c,1}$ 。考虑到求样条曲线与平面的解析交点比较困难，可以采用逼近方法求取。具体做法是开始令弦长参数  $s_{a,0}$  和  $s_{c,0}$  为 0 (在测量时要求边界曲线  $A$ 、 $C$  的起始端比中间曲线  $B$  起始端略长出 4~6 mm)，按式(4)、(5)计算到以  $P_{b,1}P_{b,0}$  为法矢量且过  $P_{b,0}$  的平面的距离  $D_p$ ，并以足够小的步长(如 0.001 mm)加大弦长参数  $s_{a,0}$ 、 $s_{c,0}$  直至距离  $D_p$  足够小，这时的  $s_{a,0}$ 、 $s_{c,0}$  即为  $P_{a,0}$  和  $P_{c,0}$  对应的弦长参数，代入对应的样条曲线方程就可求得  $P_{a,0}$ 、 $P_{c,0}$ 。同理可以求得  $P_{a,1}$ 、 $P_{c,1}$  和对应的弦长参数  $s_{a,1}$  和  $s_{c,1}$ 。这样就得到了以  $P_{a,0}P_{b,0}P_{c,0}$ 、 $P_{a,1}P_{b,1}P_{c,1}$  构成的圆弧曲面加工块，对其进一步细分就能获得  $d \times d$  的一个激光光斑所能覆盖的加工区域。后续划分依次类推，直至  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中任一曲线划分完毕。

$$V_i = P_{b,i+1}P_{b,i} / |P_{b,i+1}P_{b,i}| \quad (4)$$

$$D_p = |V_i P_{a(c),i} - V_i P_{b,i}| \quad (5)$$

对每一个经过上面划分所得的圆弧曲面加工块  $P_{a,i}P_{b,i}P_{c,i}$ 、 $P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{c,i+1}$  (如图 1 示)，要获得最后的  $d \times d$  激光加工块，还需进一步划分。如图 2 所示，由三点  $P_{a,i}$ 、 $P_{b,i}$ 、 $P_{c,i}$  可以计算出圆心  $O_i(Ox_i \ Oy_i \ Oz_i)$ ，并按图 2 所示以  $V_i$  为  $y$  轴、以过  $O_i$  且平行于固定坐标  $x$ - $y$  平面的矢量  $r_i$  为  $x$  轴(式(6)) and 以  $V_i$  与  $r_i$  的矢量积为  $z$  轴建立随动直角坐标系，利用等弦长  $d$  按式(8)、(9)计算等分角  $\theta$ ，则根据式(10)、(11)可得到  $P'_{1,i}$ (或  $P'_{2,i}$ ) 在随动直角坐标系中的坐标值，由式(12)将随动坐标系中的坐标值转化成机器固定坐标系中的三维坐标值  $P_{1,m}$ (或  $P_{2,m}$ )，依次可得到  $d \times d$  激光加工块列： $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{2,1}P_{1,1}$ ， $P_{1,1}P_{2,1}P_{2,2}P_{1,2}$ ， $\dots$ ， $P_{1,n-1}P_{2,n-1}P_{2,n}P_{1,n}$ ， $P_{1,n}P_{2,n}P_{c,i+1}P_{c,i}$ 。

$$r_i = V_i \times Z / |V_i \times Z| \quad (6)$$

$$z_i = V_i \times r_i / |V_i \times r_i| \quad (7)$$

$$R_i = |O_i P_i| \quad (8)$$

$$\theta = 2 \arcsin(d / 2R_i) \quad (9)$$

$$\beta = \arcsin((C_{a,z}(s_{a,i}) - z_{0i}) / R_i) \quad (10)$$

$$P'_{k,m} = \begin{cases} (R_i \sin(m\theta + \beta) \ 0 \ R_i \cos(m\theta + \beta)) \\ C_{b,z}(s_{b,i}) \geq z_i \\ (R_i \sin(m\theta - \beta) \ 0 \ -R_i \cos(m\theta - \beta)) \\ C_{b,z}(s_{b,i}) < z_i \end{cases}$$

$$k = 1, 2 \quad m = 1, 2, \dots, n-1, n \quad (11)$$

$$P_{k,m} = [r_i \ V_i \ z_i] P'_{k,m} + O_i \quad (12)$$

式(11)中的  $C_{b,z}(s_{b,i}) \geq z_i$  的条件是针对于模具棱脊结构情况的，而  $C_{b,z}(s_{b,i}) < z_i$  的条件是用于处理沟槽结构的。如图 3 所示，对于由四点  $P_{1,i}P_{2,i}P_{2,i+1}P_{1,i+1}$  构成的加工块，要求其加工法向矢量  $N_i$ ，可采用平均法向矢量的方法<sup>[6]</sup>：小平面  $P_{1,i}P_{2,i}P_{2,i+1}$ ， $P_{2,i}P_{2,i+1}P_{1,i+1}$ ， $P_{2,i+1}P_{1,i+1}P_{1,i}$ ， $P_{1,i+1}P_{1,i}P_{2,i}$  对应的法矢量分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 。按式(13)求得法矢量  $N_1$ ，同理可求  $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 。按式(14)即得到加工块的法向矢量  $N_i$ ，此即可作为加工点的法向矢量，便得到加工法向矢量队列： $N_1, N_2, \dots, N_{n-1}, N_n$ 。

$$N_1 = P_{1,i}P_{2,i} \times P_{2,i}P_{2,i+1} / |P_{1,i}P_{2,i} \times P_{2,i}P_{2,i+1}| \quad (13)$$

$$N_i = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 n_k / \left| \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 n_k \right| \quad (14)$$

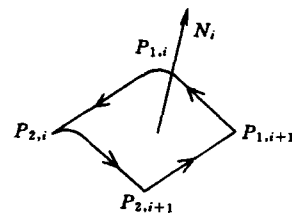


图 3 求取加工块法向量

### 2.2.2 加工轨迹点的求取

求圆弧曲面加工块  $P_{a,i}P_{b,i}P_{c,i}$ 、 $P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{c,i+1}$  时已经获得对应的累加弦长参数  $s_{a,i}$ 、 $s_{b,i}$ 、 $s_{c,i}$ ，则令加工点的累加弦长参数  $Ps_{b,i} = s_{b,i} + d/2$ ，如图 1 示可求得加工点对应的圆弧加工截面在中间曲线  $B$  上对应的点  $PP_{b,i}(C_{b,x}(Ps_{b,i}) \ C_{b,y}(Ps_{b,i}) \ C_{b,z}(Ps_{b,i}))$ 。用以  $V_i$  为法向且过  $PP_{b,i}$  的平面去截取左边界  $A$  和右边界  $B$ ，获得对应点  $PP_{a,i}$ 、 $PP_{c,i}$ ，其具体求法同样采用上面介绍的逼近法。获得了  $PP_{a,i}$ 、 $PP_{b,i}$ 、 $PP_{c,i}$  后，可求得圆心  $PO_i(pOx_i \ pOy_i \ pOz_i)$ ，同样建立随动直角坐标系并对圆弧  $PP_{a,i}PP_{b,i}PP_{c,i}$  以等分角  $\theta$  和  $\beta_i$ (式(16))进行等分，则加工点即为每段等分圆弧中点，进行坐标转化后可由式(17)、(18)计算出加工点列： $PP_1, PP_2, \dots, PP_{n-1}, PP_n$ ，如图 3 所示。这样综合 3.2.1 所求的加工块法矢，就得到六维的加

工轨迹:  $(PP_1 N_1), (PP_2 N_2), \dots, (PP_{n-1} N_{n-1}), (PP_n N_n)$ 。

$$R_{pi} = |PO_i PP_{b,i}| \quad (15)$$

$$\beta_p = \arcsin((C_{a,z}(PS_{a,i}) - zO_i)/R_i) \quad (16)$$

$$PP'_{k,m} = \begin{cases} (R_{pi} \sin(m\theta + \beta_p) & R_{pi} \cos(m\theta + \beta_p) & 0) \\ C_{b,z}(S_{b,i}) \geq pOz_i \\ (R_{pi} \sin(m\theta - \beta_p) & -R_{pi} \cos(m\theta - \beta_p) & 0) \\ C_{b,z}(S_{b,i}) < pOz_i \end{cases}$$

$$k = 1, 2 \quad m = 1, 2, \dots, n-1, n \quad (17)$$

$$PP_{k,m} = [r_i \ V_i \ z_i] PP'_{k,m} + PO_i \quad (18)$$

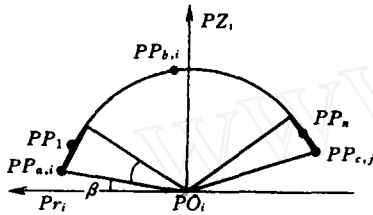


图 4 求取加工点

### 2.2.3 加工轨迹路径规划算法

上面的六维加工点的划分方向是沿垂直于中间曲线  $B$ , 相邻两个加工点之间的法矢变化较大, 加工时对机器人的位姿变化速度要求很高, 实际上机器人很难达到这种加工要求。而沿中间曲线  $B$  切向的相邻加工点的位姿变化较小, 这样可以通过建立多个双向链表, 变换加工轨迹的存储顺序来解决。实际算法如下: 建立加工轨迹双向链表头指针列  $Hpt_1, Hpt_2, \dots, Hpt_n$  和其对应的尾指针列  $Ept_1, Ept_2, \dots, Ept_n$ 。令  $Hpt_1, Hpt_2, \dots, Hpt_n$  分别指向第一个  $P_{a,0}P_{b,0}P_{c,0}P_{a,1}P_{b,1}P_{c,1}$  构成的圆弧曲面加工块生成的加工轨迹  $(PP_1 N_1), (PP_2 N_2), \dots, (PP_{n-1} N_{n-1}), (PP_n N_n)$ , 对后续圆弧曲面加工块  $P_{a,i}P_{b,i}P_{c,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{c,i+1}$  生成的点列则按顺序分别存于链表头指针列所引领的链表中, 而尾指针总是指向其对应的链表尾部。当轨迹划分完毕就可以对六维加工轨迹双向链表列数据进行存储, 存储时当  $n$  为偶数时就从头指针开始顺序存储, 反之从尾指针开始逆向存储。这样就能保证加工时的机器人位姿变化平缓, 加工路径也最节省。

### 2.2.4 加工轨迹规划算法步骤

由上面的推导则可以总结六维轨迹规划算法的具体步骤如下。

(1) 对由三维自适应测量所获取的左边界  $A$ 、中间曲线  $B$  和右边界  $C$  的离散数据进行预处理(包括

剔除奇异点、测球半径补偿等, 这里限于篇幅不详细介绍), 利用累加弦长参数样条曲线拟合得左边界  $A(C_{a,x}(s) \ C_{a,y}(s) \ C_{a,z}(s))$ 、中间曲线  $B(C_{b,x}(s) \ C_{b,y}(s) \ C_{b,z}(s))$  和右边界  $C(C_{c,x}(s) \ C_{c,y}(s) \ C_{c,z}(s))$ 。

(2) 取变量  $i = 0$ , 并取  $s_{a,0}=0, s_{b,0}=0, s_{c,0}=0, s_{b,0}=0, Ps_{a,0}=0, Ps_{b,0}=0, Ps_{c,0}=0$ 。

(3) 令  $s_{b,i+1}=s_{b,i}+d$ , 将弦长参数  $s_{b,i}, s_{b,i+1}$  代入中间样条曲线  $B$  的方程中, 求得  $P_{b,i}, P_{b,i+1}$ , 求取  $V_i$ , 采用逼近法求得  $P_{a,i}, P_{a,i+1}$  和  $P_{c,i}, P_{c,i+1}$ , 及其对应的  $s_{a,i}, s_{a,i+1}$  和  $s_{c,i}, s_{c,i+1}$ , 由求得的圆弧加工曲面  $P_{a,i}P_{b,i}P_{c,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{c,i+1}$ , 计算法向向量队列:  $N_1, N_1, \dots, N_{n-1}, N_n$ 。

(4) 令弦长参数  $Ps_{b,i} = s_{b,i}+d/2$ , 将弦长参数  $Ps_{b,i}$  代入中间曲线  $B$ , 求得  $PP_{b,i}$ , 并由  $V_i$  采用逼近法求得  $PP_{a,i}, PP_{c,i}$  和其对应的弦长参数  $Ps_{b,i}, Ps_{c,i}$ 。由求得的圆弧  $PP_{a,i}PP_{b,i}PP_{c,i}$  计算加工点队列:  $PP_1, PP_2, \dots, PP_{n-1}, PP_n$ 。

(5) 将(3)、(4)求得的法向向量队列和加工点队列一一对应形成六维加工轨迹数据  $((PP_1 N_1), (PP_2 N_2), \dots, (PP_{n-1} N_{n-1}), (PP_n N_n))$ , 将轨迹数据存入六维加工轨迹数据双向链表中, 保证尾指针总是指向对应链表尾。

(6) 如果  $s_{b,i+1} < s_{a,end}$  ( $s_{b,end}$  为中间曲线  $B$  的结束点对应的弦长参数) 并且  $s_{a,i+1} < s_{a,end}$  和  $s_{c,i+1} < s_{c,end}$ , 则令  $i = i+1$ , 重复(3)~(6); 否则结束。

(7) 对所获得的六维加工轨迹数据双向链表组, 交换次序分别顺序和逆序存储到加工数据文件中, 结束程序。

由获得的六维加工轨迹数据文件再转化为机器人五维坐标值就能驱动集成化柔性激光加工系统对汽车模具棱脊进行强化<sup>[7]</sup>。

## 3 加工实例及结论

三维自适应测量算法解决了实际激光加工中汽车模具复杂棱脊和沟槽的测量问题, 满足较高的精度并有很高效率。

该算法对其他特种曲线测量和加工(如激光焊接、切割等)也有实际参考价值; 六维加工轨迹生成和规划算法根据测量数据的特点, 利用简单的数学模型解决了复杂棱脊和沟槽加工问题。

图 5 为一汽车模具沟槽的三维自适应测量数据, 图 6 为根据测量数据生成的六维加工轨迹数据。

以上算法已运用到集成化智能激光加工和柔性制造系统中。

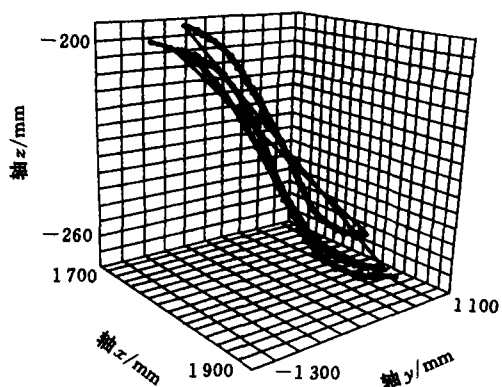


图5 三维自适应测量数据

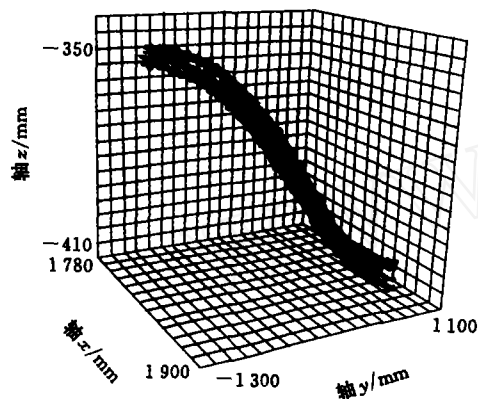


图6 加工轨迹数据

## 参 考 文 献

- 1 高春林, 虞钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计. 中国激光, 2001, 28(4): 364~368
- 2 虞钢. 一种具有柔性传输和多轴联动的激光加工装置. 中国专利, 专利号: ZL98101217.5
- 3 虞钢, 刘荷辉. 柔性激光加工系统中的测量功能及其静态误差分析. 机械工程学报, 2001, 37(8): 84~87
- 4 张文杰. 自由曲线自由曲面的高精度自动测量、数据处理及误差分析方法的研究. [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 1995
- 5 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 北京: 科学出版社,

2000

- 6 陆涛, 陈吉红, 刘劲松. 空间自由曲面测量过程中测球半径补偿问题的研究. 计量学报, 1993(12): 3~5
- 7 Yu G, Zhang S, Qiao R. A computer integrated multifunctional 5-axis laser processing system. In: Johnny K L, Alberto B eds. Programme Tracks on Lasers & Joining Applications/Robotics, Motion & Machine Vision Including Optical Metrology, ISATA 2000, Epsom: Epsom House, 2000: 145~152

### 3D ADAPTIVE MEASURING AND 6D MANUFACTURE TRACE GENERATING FOR THE COMPLEX BORDER OF CAR DIES

Liu Hehui Yu Gang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100080)

**Abstract:** Aiming to digitizing the complex border of car dies, a 3-D adaptive measuring method is suggested, which make it possible to digitize the 3-D curve adaptively, fast and safely. A simple model is also built in order to process the complex border of car dies. A 6-D manufacture trace generating method is presented to process the measuring data and produce 6-D manufacturing data. Some experiments is carried out by A computer integrated multifunctional 5-axis laser processing system.

**Key words:** Laser processing Automobile moulds and dies  
3D adaptive measuring  
Generation of laser processing traces

作者简介: 刘荷辉, 男, 1975年出生, 博士. 研究方向为集成化智能激光加工和柔性制造, 发表论文5篇。

E-mail: linhehui@sina.com