

汽车模具棱边的三维自适应测量及六维加工轨迹划分

刘荷辉 虞 钢



刘荷辉 博士研究生

摘要:针对大型汽车冲压模具棱边数字化的问题提出了三维自适应测量算法。为满足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边的简单模型,提出了六维加工轨迹划分算法,并对算法进行了加工实验验证。所提出的算法已应用到集成化柔性激光加工系统中。

关键词:复杂棱边;三维自适应测量;加工轨迹划分;激光加工

中图分类号:TN241

文献标识码:A

复杂棱边是指汽车冲压模具中过渡圆角半径 $R \leq 20$ mm 的边沿(对于 $R > 20$ mm 的边沿,将其视为自由曲面则更准确),在冲压过程中这些地方往往会因为应力急剧变化、集中而产生破坏,因而需要强化。同时这些地方形态各异,利用点位测量办法将其数字化有一定的困难。为准确、快速和安全地数字化模具棱边,提出了适用于点位测量的三维自适应测量算法。测量和激光加工是在集成化柔性激光加工系统^[1,2]上完成的。激光经二元光学变换后由圆形光斑变换为具有一定尺寸的方形光斑^[3]($d \times d$),即要求加工点在空间成等距排列,排与排之间的距离也是等距的,以保证能不重叠、无间隙地覆盖待加工部位,并且要求激光加工

头垂直于加工表面。因而不既要获得加工点位置,还需获得加工点法矢,即空间三维坐标加外法向量的六维数据(x, y, z, ax, ay, az)。针对该问题,提出了复杂棱边的六维加工轨迹划分算法。激光切割和焊接的 CAM 技术国内外都有广泛的报道^[4,5],但运用高强度激光束的空间变换技术^[6]进行材料表面处理和与之相关的激光加工的 CAM 技术目前还少见相关报道。

1 三维自适应测量算法和轨迹划分算法的基本思路及其数学模型

1.1 算法基本思路

虽然汽车模具的棱边呈现出各种形态,考察其共同特征,可以不失一般性地将其简化为圆角过渡。如图 1 所示,假定每个棱角过渡由上边界曲线 A (为三维空间曲线)、下边界曲线 B 以及连接 A 、 B 的圆弧曲面构成,并假定过 A 上的点且垂直

收稿日期:2002-07-09

基金项目:中国科学院大型仪器设备研制项目(中科院字[1997]第 167 号);中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX-11)

如,对于原始曲率梯度变化规律较复杂的零件,需要在本文研究的基础上,考虑不同的载荷形式和支承形式,使校正弯矩的变化梯度同工件的原始曲率变化梯度一致,以取得较好的校正效果;对于变截面的变形零件,需要根据弹塑性理论,采用有限元数值计算方法求解。

参考文献:

- [1] 钦明浩,柯尊忠,张向军,等.精密矫正机中轴类零件矫直工艺理论研究.机械工程学报,1997,33(2):48~53
- [2] 崔甫.论弹塑性弯曲与曲率关系.重型机械,1994(3):23~28

[3] EL-Domiaty A A, Elsharkawy A A. Stretch - Bending Analysis of Usection Beams. Int. J. Mach. Tools Manufact, 1998, 38(1-2): 75~95

[4] 崔甫.矫直理论与参数计算.北京:机械工业出版社,1994

(编辑 卢湘帆)

作者简介:孙 杰,男,1967 年生。浙江大学(杭州市 310027)现代先进制造工程研究所副教授、博士研究生。主要研究方向为先进制造技术、CAD/CAM/CAE、复合材料。发表论文 10 余篇。柯映林,男,1963 年生。浙江大学机械与能源工程学院教授、博士研究生导师。康小明,男,1971 年生。上海交通大学(上海市 200030)机械与动力工程学院航空航天系副教授、博士。

于 A 的平面截取棱边所得到的横截面 $O_i P_{a,i} P_{b,i}$ 形成 $1/4$ 圆弧(考虑到汽车冲压模具扁平的特点, 可以假定 $O_i P_{a,i}$ 与激光加工机器人固定坐标的 z 轴平行), 见图 2。利用上述模型, 只需要测量出 A 和 B 就可以获得整个棱边的信息, 从而达到数字化棱边的目的。

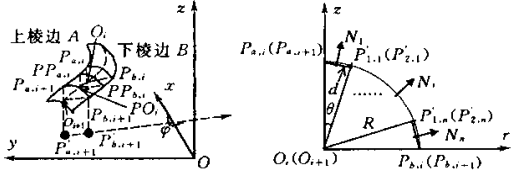


图 1 汽车模具棱边示意图

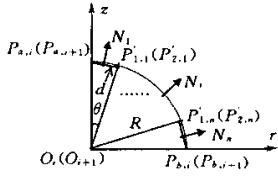


图 2 计算加工点法矢示意图

三维自适应测量的基本思路就是以累加弦长为参数的三次样条函数作为数学模型, 通过获取棱边的特征点(特征点主要指曲线的拐点、大曲率的加密点及测量起始点和结束点)并以特征点作为插值点来拟合逼近实际的模具棱边, 再自适应地插值产生测量点和测量避障点, 实现三维自由曲线的点位测量, 从而获得上边界 A 和下边界 B 的三维位置信息。

根据 A, B 的三维坐标生成激光加工轨迹的思路是以 d 为固定步长对上边界 A 进行划分, 并求出其在下边界 B 上的对应点, 如图 1 中 $P_{a,i}$ 点对应于 $P_{b,i}$ 点, $P_{a,i+1}$ 点对应于 $P_{b,i+1}$, 且满足 $|P_{a,i} P_{a,i+1}| = |P_{b,i} P_{b,i+1}| = d$ 。对由 $O_i P_{a,i} P_{b,i}$ 构成的 $1/4$ 圆弧进行等分, 形成点列 $P_{a,i}, P'_{1,1}, \dots, P'_{1,n}, P_{b,i}$, 同样对由 $O_{i+1} P_{a,i+1} P_{b,i+1}$ 构成的 $1/4$ 圆弧进行等分, 则形成点列 $P_{a,i+1}, P'_{2,1}, \dots, P'_{2,n}, P_{b,i+1}$, 则由 $P_{a,i} P_{a,i+1} P'_{2,1} P'_{1,1}, P'_{1,1} P'_{2,1} P'_{2,2} P'_{1,2}, \dots, P'_{1,n-1} P'_{2,n-1} P'_{2,n} P'_{1,n}, P'_{1,n} P'_{2,n} P_{b,i+1} P_{b,i}$ 构成 $n+1$ 个 $d \times d$ 的加工方块, 由这些加工块则可以求得所需的六维加工数据。

1.2 累加弦长参数样条曲线^[7]

给定型值点 $P_i(x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, 2, \dots, n$, 则与型值点 $P_k(k = 0, 1, \dots, n)$ 相对应的累加弦长为

$$s_0 = 0$$

$$s_k = \sum_{j=1}^k \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2}$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

(1)

由此得到三维型值点与弦长参数的对应关系(见表 1)。

表 1 弦长与型值点关系

s	s_0	s_1	s_2	...	s_n
X	x_0	x_1	x_2	...	x_n
Y	y_0	y_1	y_2	...	y_n
Z	z_0	z_1	z_2	...	z_n

根据表 1 和给定的曲线端点条件, 即可构造 3 个插值三次样条函数 $x = C_x(s), y = C_y(s), z = C_z(s)$, 给定弦长参数 s , 就可以得到样条曲线上对应的三维点。

2 三维自适应测量算法

三维自适应测量是利用累加弦长参数样条函数作为数学模型通过自适应的插值产生下一个测量点和测量避障点, 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 $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n$;

(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 $C(s), C(s) = [C_x(s) C_y(s) C_z(s)]$;

(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 之间的弦长, 若 $d_i \leq D_L, s_i = s_{i-1} + 4 \text{ mm}$; 若 $D_L < d_i \leq D_M, s_i = s_{i-1} + 8 \text{ mm}$; 若 $D_M < d_i \leq D_H, s_i = s_{i-1} + d_i/N$; 若 $d_i > D_H, s_i = s_{i-1} + d_i/M(D_L, D_M, D_H, N, M$ 为常数), 预测点

$$P_i(s_i) = C(s_i) \tag{2}$$

避障点

$$P_{bi} = P_i(s_i) + \Delta P \tag{3}$$

式中, ΔP 为避障矢量, 与测量方向有关。

(4) 若 $s_i < s_{end}$ (s_{end} 为结束点 T_n 对应的累加弦长参数), 重复步骤(3); 否则结束测量。

改变步骤(3)中参数 s_i 的大小, 实质是自适应调整每次测量的步长, 以便做到根据模具自身的特点合理地布置测量点, 提高测量效率和后面数据拟合处理的精度^[8]。

3 六维加工轨迹划分算法

六维加工轨迹划分算法是要获得每个加工点的轨迹和法矢, 并要求激光光斑能够最终覆盖要强化的棱边且不能重叠(重叠部分可能会因为被激光加工两次而被烧蚀坏)。

3.1 加工轨迹法向矢量的求取

将三维自适应测量获得的上下边界的测量数据进行累加弦长参数样条拟合,从而获得模具棱边的上边界曲线 $A(C_{a,x}(s) C_{a,y}(s) C_{a,z}(s))$ 和下边界曲线 $B(C_{b,x}(s) C_{b,y}(s) C_{b,z}(s))$ 。以加工光斑尺寸 d 为步长,求得 $P_{a,0}(C_{a,x}(s_{a,0}) C_{a,y}(s_{a,0}) C_{a,z}(s_{a,0}))$ 和 $P_{a,1}(C_{a,x}(s_{a,1}) C_{a,y}(s_{a,1}) C_{a,z}(s_{a,1}))$, 其中 $s_{a,0} = 0, s_{a,1} = s_{a,0} + d$ 。 $P_{a,0}$ 在下边界 B 上的对应点是以 $P_{a,1}P_{a,0}(C_{a,x}(s_{a,0}) - C_{a,x}(s_{a,1}) C_{a,y}(s_{a,0}) - C_{a,y}(s_{a,1}) C_{a,z}(s_{a,0}) - C_{a,z}(s_{a,1}))$ 为法矢且过 $P_{a,0}$ 的平面与 B 的交点 $P_{b,0}$, 同样 $P_{a,1}$ 的对应点是以 $P_{a,1}P_{a,0}$ 为法矢量且过 $P_{a,1}$ 的平面与 B 的交点 $P_{b,1}$ 。考虑到求样条函数与平面的交点比较困难,实际采用逼近的方法求取。具体做法是开始令弦长参数 $s_{b,0}$ 为 0, 以 $P_{a,1}P_{a,0}$ 为法矢量且过 $P_{a,0}$ 的平面的距离

$$D_s = |V_i \cdot P_{b,i} - V_i \cdot P_{a,i}| \quad (4)$$

$$V_i = P_{a,i+1}P_{a,i} / |P_{a,i+1}P_{a,i}| \quad (5)$$

以足够小的步长加大弦长参数 $s_{b,0}$ 直至 D_s 足够小,这时的 $s_{b,0}$ 即为 $P_{b,0}$ 对应的弦长参数,则可得 $P_{b,1}$ 对应的弦长参数 $s_{b,1}$ 。这样就得到了以 $P_{a,0}P_{a,1}P_{b,1}P_{b,0}$ 为顶点的圆弧曲面加工块。同理可获得 $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{b,i}$ (见图 1)。

对每一个经过上面划分所得的圆弧曲面加工块 $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{b,i}$, 要获得最后的 $d \times d$ 激光加工块,需要进一步划分。图 2 中等分角

$$\theta = 2\arcsin \frac{d}{2R} \quad (6)$$

$$R = |P_{a,i}P_{b,i}| / \sqrt{2} \quad (7)$$

按图 2 所示建立随动柱坐标系, $P'_{1,i}$ (或 $P'_{2,i}$) 在随动柱坐标系中的坐标为

$$P'_m = (R\sin m\theta, R\cos m\theta) \quad (8)$$

式中, m 为划分后激光加工块的序列号。

$O_iP_{a,i}P_{b,i}$ 平面与原直角坐标系中 X 轴的正向夹角

$$\varphi = \begin{cases} \arcsin(V_i \cdot (1, 0, 0)) & P_{b,i}(y) \geq P_{a,i}(y) \\ 2\pi - \arcsin(V_i \cdot (1, 0, 0)) & P_{b,i}(y) < P_{a,i}(y) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{b,i}(y)$ 为 $P_{b,i}$ 的 y 坐标值; $P_{a,i}(y)$ 为 $P_{a,i}$ 的 y 坐标值。

则可以由下式将随动柱坐标转化成原直角坐标系中的三维坐标值 $P_{1,m}$ (或 $P_{2,m}$):

$$P_m = (C_{a,x}(s_{a,i}) + R\sin m\theta \cos \varphi, C_{a,y}(s_{a,i}) + R\cos m\theta \sin \varphi, C_{b,z}(s_{b,i}) + R\cos m\theta) \quad (10)$$

依次可得 $d \times d$ 激光加工块列: $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{2,1}P_{1,1}, P_{1,1}P_{2,1}P_{2,2}P_{1,2}, \dots, P_{1,n-1}P_{2,n-1}P_{2,n}P_{1,n}, P_{1,n}P_{2,n}P_{b,i+1}P_{b,i}$ 。

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,其加工法向矢量 N_m , 可以采用平

均法向矢量的算法

求取^[9]: 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 , 其中

$$n_1 = P_{1,i}P_{2,i} \times P_{2,i}P_{2,i+1} / |P_{1,i}P_{2,i} \times P_{2,i}P_{2,i+1}| \quad (11)$$

同理可求得 n_2, n_3, n_4 。

加工块的法向矢量

$$N_m = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 n_k / \left| \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 n_k \right| \quad (12)$$

此即可作为加工点的法向矢量。

3.2 加工轨迹点的求取

在求取圆弧曲面加工块 $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{b,i}$ 时,已经获得对应的累加弦长参数 $s_{a,i}, s_{b,i}$, 令加工点的累加弦长参数 $Ps_{a,i} = s_{a,i} + d/2$, 则可以求得加工点对应的圆弧加工截面在上边界 A 上对应的点 $PP_{a,i}(C_{a,x}(Ps_{a,i}) C_{a,y}(Ps_{a,i}) C_{a,z}(Ps_{a,i}))$ 。同样采用逼近法以 V_i 为法向且过 $PP_{a,i}$ 的截面去截取对应的下边界 B 获得对应的 $PP_{b,i}$ 。获得了 $PP_{b,i}, PP_{a,i}$ 后,对圆弧

$PO_iPP_{a,i}PP_{b,i}$ 以等分角 θ 进行等分,则加工点即为每段等分圆弧的中点,进行坐标转化后可计算出加工点 PP_m (见图 4)。

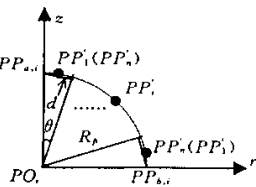


图 4 求取加工点

$PP_m = (C_{a,x}(Ps_{a,i}) + R_p \sin(m\theta - \theta/2) \cos \varphi, C_{a,y}(Ps_{a,i}) + R_p \cos(m\theta - \theta/2) \sin \varphi, C_{b,z}(Ps_{b,i}) + R_p \cos(m\theta - \theta/2))$

$$(13)$$

$$R_p = |PP_{a,i}PP_{b,i}| / \sqrt{2} \quad (14)$$

这样,就得到六维的加工轨迹 $(PP_m N_m)$ 。

3.3 加工轨迹路径规划算法

前面六维加工点的划分是沿棱边的横向,相邻加工点之间的法矢变化较大,对机器人的位姿变化速度要求很高,而沿棱边纵向则位姿变化较小,这个问题可以采用变换加工点的存储顺序的办法来解决:建立六维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 $Ept_1, Ept_2, \dots, Ept_n$ 。令头指针列分别指向第一个圆弧曲面加工块生成的六维加工轨迹,对于后续圆弧曲面加工块生成的六维加工轨迹则按顺序分别存储在六维加工轨迹双向链表头指针列引领的链表中,而尾指针总是指向其对应的链表尾部。加工轨迹划分完毕,则可将六维加工轨迹双向链表

列数据存入加工文件中,写文件时对于头指针 Hpt_i ,当序号 i 为奇数则从头指针开始顺序存储,否则从其对应的尾指针开始逆向存储,这样才能保证加工时机器人位姿变化平缓,节省加工路径,并保证加工时的安全。

3.4 六维轨迹规划算法具体步骤

(1) 对由三维自适应测量所获取的上边界和下边界的离散数据进行预处理(包括剔除奇异点、测杆长度和测球半径补偿等),利用累加弦长参数样条曲线拟合得上边界曲线 A 和下边界曲线 B ,并取变量 $i = 0$;

(2) 取 $s_{a,0} = 0, s_{b,0} = 0$,令 $s_{a,i+1} = s_{a,i} + d$,将弦长参数 $s_{a,i}, s_{a,i+1}$ 代入上边界曲线 A ,求得 $P_{a,i}, P_{a,i+1}$,求取 V_i ,采用逼近法求得 $P_{b,i}, P_{b,i+1}$,及其对应的 $s_{b,i}, s_{b,i} + 1$ 。由求得的圆弧曲面加工块 $P_{a,i}P_{a,i+1}P_{b,i+1}P_{b,i}$,计算出法矢队列 N_m ;

(3) 令弦长参数 $Ps_{a,i} = s_{a,i} + d/2$,将 $Ps_{a,i}$ 代入上边界曲线 A ,求得 $PP_{a,i}$,并由 V_i 采用逼近法求 $PP_{b,i}$ 和其对应的弦长参数 $Ps_{b,i}$,并计算出加工点列 PP_m ;

(4) 将(2)、(3)求得的法矢和加工点列一一对应形成六维加工轨迹数据存入链表中;

(5) 若 $s_{a,i+1} < s_{a,end}$ 且 $s_{b,i+1} < s_{b,end}$ ($s_{a,end}$ 和 $s_{b,end}$ 分别为上边界曲线 A 和下边界曲线 B 对应的弦长参数),则令 $i = i + 1$,重复(2)、(3)、(4);否则将获得的加工轨迹点按路径规划算法存储到加工文件中并结束。

由获得的六维加工轨迹数据文件转化为机器人五维坐标值就能直接驱动集成化柔性激光加工系统对汽车模具棱边进行强化。

4 结语

三维自适应测量算法解决了实际激光加工中模具复杂棱边测量问题,满足较高的测量精度和很高的测量效率。该算法对其它空间曲线的测量和加工(如激光焊接、切割等)也有借鉴作用。六维加工轨迹划分算法则根据自适应测量数据的特点,利用数学几何模型解决了复杂棱边加工问题。图5显示的是一个汽车模具棱边的由上边界和下边界构成的三维自适应测量数据(还未作预处理),图6显示的则是根据图5的测量数据由六维加工轨迹生成算法生成的加工点数据(未显示法向量),该棱边轨迹由3条加工轨迹构成。根据生成的轨迹数据进行了相关的加工实验,实验表明,

上述算法计算的加工点和加工法矢有较高的精度,机器人运行均匀平稳。已加工的模具棱边从耐磨性和硬度实验来看有较好的效果。该算法已经运用到集成化柔性激光加工系统中,并将在实际生产中发挥作用。

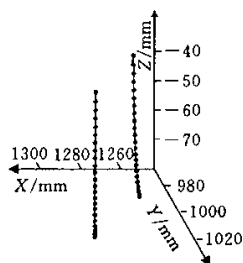


图5 棱边边界三维自适应测量数据

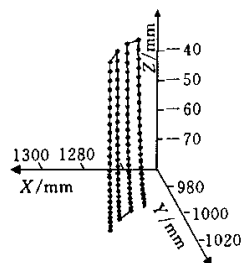


图6 棱边六维加工轨迹数据

参考文献:

- [1] 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.中国专利,ZL98101217.5.1998—03—20
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 谢耀辉,朱国力,段正澄,等.三维激光切割加工中曲面法矢获取算法的研究.华中理工大学学报,1999,27(1):50~52
- [5] Zuo T C, Chen J M, Xiao R S. 3-dimensional Welding and Cutting Using High Power CO₂ or YAG Laser. Conference on Process Control and Inspection for Industry, Beijing, 2000
- [6] 高春林.柔性加工中高功率激光束空间变换研究:[博士学位论文].北京:中国科学院力学研究所,2001
- [7] 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
- [8] 朱心雄.自由曲线曲面造型技术.北京:科学出版社,2000
- [9] 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

(编辑 卢湘帆)

作者简介:刘荷辉,男,1975年生。中国科学院力学研究所(北京市100080)博士研究生。研究方向为集成化智能制造、精密测量、CAD/CAM及机器人应用技术。发表论文3篇。虞钢,男,1958年生。中国科学院力学研究所研究员、博士研究生导师。