

五坐标加工整体叶轮粗加工刀位规划

曹利新*, 马晓嘉

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对具有等长叶片和长短交错叶片的叶轮, 通过对其气流通道的几何分析, 确定了叶轮的粗加工边界和最大刀具直径. 采用均匀分层法对叶轮进行粗加工刀具路径规划, 针对某一层给出了之字形走刀和三角形走刀的刀具路径规划算法. 计算表明, 与常规的单向等参数线法相比, 之字形走刀法具有计算简单、抬刀次数少的优点, 三角形走刀法不但抬刀次数少, 而且切削路径长度明显减小, 这些将有利于叶轮粗加工效率的提高. 对于某一种走刀方式, 通过连接切削层上的刀位点和盖盘曲面上的对应点, 确定了五轴侧铣叶轮的刀具轴线方向, 避免了刀具与叶片曲面和轮毂面的干涉. 最后通过实例验证了算法的可行性.

关键词: 叶轮; 粗加工; 刀位规划; 五轴数控加工

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

0 引言

整体叶轮作为航空、航天、能源、化工等领域的重要零件, 其设计和制造受到广泛关注. 由于叶轮的气流通道狭窄、叶片曲面通常是扭曲的直纹面, 采用截平面法三坐标加工叶轮一般来说是不可能完成的, 而必须采用五坐标数控加工的方法. 与一般零件的加工过程类似, 叶轮的加工通常也分为粗加工和精加工两个阶段. 从目前发表的文献来看, 研究大多集中在叶轮的精加工算法, 如侧铣非可展直纹面的两点偏置法^[1]、三点偏置法^[2]、侧铣非可展直纹面的整体优化算法^[3]等. 而对于叶轮的粗加工却很少涉及, 大多将其归于普通的型腔加工^[4], 或直接应用精加工算法替代完成^[5], 这些算法或没有刀轴矢量的计算过程, 或因没有进行合理的规划而导致效率低下. 实际上, 在叶轮的整个加工过程中, 约 70% 的余量由粗加工来完成, 大量的加工时间被消耗在粗加工过程中, 而且粗加工的表面质量也会影响精加工后的表面质量以及加工过程的切削工艺, 因此合理地规划叶轮的粗加工刀具路径在生产中具有重要意义. 本文采用均匀分层法对叶轮进行粗加工

刀具路径规划, 针对某一层给出了之字形走刀和三角形走刀的刀具路径规划算法; 对于某一种走刀方式, 通过连接切削层上的刀位点和盖盘曲面上的对应点, 确定五轴侧铣叶轮的刀具轴线方向; 最后针对具有等长叶片和长短交错叶片的叶轮, 生成数控加工的刀具路径, 以验证算法的可行性, 并与常规的单向等参数线法^[1]进行比较, 以证明之字形走刀法和三角形走刀法的优越性.

1 粗加工阶段的预处理

1.1 确定粗加工边界

在规划叶轮的粗加工刀位时, 需要为叶轮留出一定的精加工余量, 叶轮气流通道的粗加工区域实际上是以留出余量后的叶片曲面为侧壁, 留出余量后的轮毂面为底面的开型腔加工. 因此, 在进行刀位规划之前要求取叶片型面和轮毂面的偏置曲面, 保证刀具轴线在偏置曲面内部刀具不啃伤侧壁. 设定精加工余量为 η , 圆柱刀刀具半径为 R , 将叶片型面及轮毂面沿法向偏置距离 $\eta + R$, 作为规划刀位的边界.

1.1.1 叶片型面的偏置曲面 叶片型面偏置曲

收稿日期: 2006-01-15; 修回日期: 2007-12-01.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50105001).
作者简介: 曹利新*(1966-), 男, 博士, 副教授.

面的做法如图 1 所示, 设 c_1 、 c_2 为叶片型面 S 的两条准线, 通常它们是由 $n+1$ 个离散数据点 $P_i (i=0, 1, \dots, n)$ 给出的, 利用三次 B 样条插值技术, 其方程可表示为

$$P(u) = \sum_{j=i-3}^i d_j \cdot N_{j,3}(u);$$

$$u \in (u_i, u_{i+1}) \subset (u_3, u_{n+3}) \quad (1)$$

式中: d_j 为控制顶点; $N_{j,3}(u)$ 为三次规范 B 样条基函数.

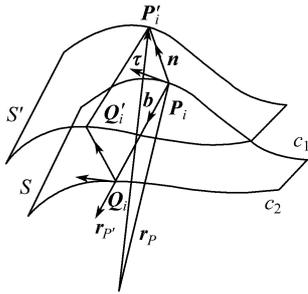


图 1 求取叶片偏置曲面

Fig. 1 The offset surface of the blade

将两准线上的对应点相连, 即形成直纹面的叶片型面, 下面计算直纹面 S 的偏置曲面, 以同一直母线上对应两点 P_i 、 Q_i 为例, b 为直母线方向单位矢量, $b(u_i) = \frac{Q(u_i) - P(u_i)}{\|Q(u_i) - P(u_i)\|_2}$, 求得 P_i 点处的单位切矢 τ 和单位法矢 n .

$$T(u) = \frac{dP(u)}{du} = \sum_{j=i-3}^i d_j \cdot \frac{dN_{j,3}(u)}{du};$$

$$\tau(u_i) = \frac{T(u_i)}{\|T(u_i)\|_2} \quad (2)$$

$$n(u_i) = \frac{\tau(u_i) \times b(u_i)}{\|\tau(u_i) \times b(u_i)\|_2} \quad (3)$$

将点 P_i 沿法矢 n 方向偏置距离 $\eta+R$ 得到新点 P'_i , 其方程为

$$r_{P'} = r_P + (\eta+R) \cdot n(u_i) \quad (4)$$

采用同样的方法求得 Q_i 的偏置点 Q'_i , 将 P'_i 、 Q'_i 相连, 得到叶片偏置曲面的直母线, 偏置曲面的方程可写为

$$r_{S'} = r_{P'} + (r_{Q'} - r_{P'}) \cdot V \quad (5)$$

式中: V 为直母线参数. 该式即可确定叶轮粗加工的侧壁边界.

1.1.2 轮毂面的等距面及其与叶片偏置曲面的交线 轮毂面为叶片轴盘曲线绕叶轮回转轴回转所得, 其方程为

$$r_{bot} = r_{hub} \cdot B(\varphi) \quad (6)$$

$$B(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $B(\varphi)$ 为绕叶轮回转轴的回转群矢量. 根据轮毂面余量 η_{bot} 计算轮毂面 r_{bot} 的等距面 r'_{bot} , 其方程为

$$r'_{bot} = r_{bot} + \eta_{bot} \cdot n_{bot} \quad (7)$$

求取叶片偏置曲面和轮毂面等距面的交线, 以确定整个粗加工的边界. 在叶片偏置曲面的直母线上任取一点 P , 由图 2 可知有下式成立:

$$r_P + \Delta t \cdot r_b = r'_{bot}(u_0, \varphi_0) + r'_{bot,u} \cdot \Delta u + r'_{bot,\varphi} \cdot \Delta \varphi \quad (8)$$

式中: $r'_{bot,u}$ 、 $r'_{bot,\varphi}$ 为 r'_{bot} 对参数 u 和 φ 的偏导数; r_b 为直母线方向; Δt 为 P 点沿 r_b 方向的参数增量; Δu 、 $\Delta \varphi$ 分别为轮毂面的曲面参数 u 和 φ 的增量.

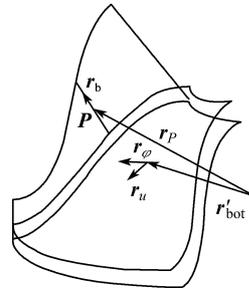


图 2 求取轮毂等距面与叶片偏置曲面交线

Fig. 2 The intersecting curve between the hub's offset surface and that of the blade

对式(8)采用迭代算法可求得交点位置^[6], 方程为

$$r_{int} = r_P + t \cdot r_b \quad (9)$$

将求得的交点进行 B 样条插值反算, 即可确定规划粗加工刀位的边界.

1.1.3 对长短交错叶片的处理 对长短叶片交错的叶轮, 可将两长叶片间的粗加工区域划分为 1、2 两个区域, 如图 3 所示, c_1 、 c_2 分别为两相邻长叶片的偏置曲面和轮毂等距面之间的交线, 将短叶片偏置曲面与轮毂等距面间的交线 b_1 及 b_2 向长叶片进气边处延长. 以 b_1 为例, 首先求取短叶片的径向最小坐标值 r_{min} , 一般为短叶片圆头处的点, 令 $r_0 = r_{min} + \eta + R$. 取 c_1 上一点 P_i , 它的径向坐标为 r_P . 当 $r_P \leq r_0$ 时, 在 c_2 上取同一参数 u 的对应点 Q_i , 求得它们的中点 S_i :

$$S_i = \frac{P_i + Q_i}{2} \quad (10)$$

将中点 S_i 与 b_1 上的点一同进行插值后得到区域 1 的右侧边界线. 同样, 将中点 S_i 与 b_2 上的点一同进行插值后得到区域 2 的左侧边界线. 这样, 整个粗加工区域在小叶片处一分为二, 在加工长短交错的叶片曲面时, 刀具轨迹会在小叶片处分开, 加工完区域 1 后继续加工区域 2. 这种方法使得编程简单, 刀具轨迹计算方法与等长叶片相同.

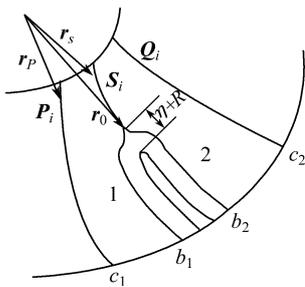


图3 确定长短交错叶片粗加工边界

Fig. 3 Machining boundary between the long blade and the short blade

1.2 刀具尺寸的计算

粗加工的原则就是尽最大可能高效率地去除多余的金属, 因而希望选择大尺寸的刀具, 但刀具尺寸过大, 可能导致未加工体积的增多, 也容易发生干涉. 本文以球头柱刀为例, 研究了侧铣加工中刀具尺寸的计算问题.

对于具有等长叶片的叶轮, 采用迭代算法求取两相邻叶片间最短距离 $d_{\min}^{[7]}$, 为避免发生干涉, 还需除一个保障系数 k ($1.2 < k < 1.5$), 则可选择的最大刀具半径为

$$r_{\max} = \frac{d_{\min} - 2\eta}{2 \cdot k} \quad (11)$$

式中: η 为精加工余量.

对于长短交错叶片的叶轮, 首先需分别计算短叶片上的点到两相邻长叶片的最短距离 d_1 和 d_2 , 然后求得 $d_{\min} = \min(d_1, d_2, d)$, d 为两长叶片间最短距离, 再由式(11)求得刀具半径最大值.

2 刀具路径规划

2.1 刀具轨迹的生成

叶轮气流通道采用沿流道深度方向均匀分层的策略来加工. 将每一分层面上刀具轨迹按适当的方式连接起来, 就构成零件的整体加工轨迹.

设走刀方向为 u 向, 行间进给方向为 v 向, 记第 j 行第 i 个刀触点为 $O_{i,j}$, 沿 u 向逐步追踪, 直至曲面边界为止, 即完成了一条切削路径的计算; 改变 v 向参数, 计算所有切削行上所有刀触点对应的参数, 即完成了整个路径规划. 下面以之字形走刀法 (zig-zag 方式) 和三角形走刀法来规划刀具路径. 与单向等参数线方法相比, 这两种走刀方式具有拾刀次数少、效率高的优点.

2.1.1 之字形走刀法 之字形走刀法是模具型腔加工中一种常用的走刀方法, 其特点是拾刀次数少、刀位容易计算、占用内存少, 在两个相邻刀路上切削方向不同, 顺铣和逆铣交替进行. 如图 4 所示, c_1 、 c_2 是两叶片曲面的偏置曲面与轮毂面等距面间的交线, 将其按等参数步长法进行离散细分, 各取 n 个数据点 $O_1(u_i)$ 、 $O_2(u_i)$, $0 < u_i < 1$, $i = 0, 1, \dots, n-1$. 根据出气边处轮毂面的残留高度的允许值 h , 及设定的刀具直径 D , 求得走刀行数 n_s :

$$n_s = \frac{s}{2 \sqrt{D \cdot h}} \quad (12)$$

式中: s 为叶轮上两相邻叶片偏置曲面间出气边处的弧长.

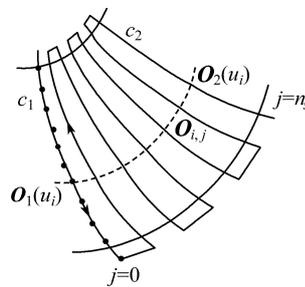


图4 之字形走刀法刀位点轨迹

Fig. 4 Tool-path planning by using zig-zag method

对于交线 c_1 、 c_2 上同一 u 参数所对应的两点 O_1 、 O_2 , 由于两点间的 z 向距离较小, 而且是确定粗加工的刀具路径, 可近似采用线性插值来确定 O_1 、 O_2 两点间的每个等分点 $O_{i,j}$, 其表达式如下:

$$O_{i,j} = O_1 + \frac{O_2 - O_1}{n_s} \cdot j \quad (13)$$

式中: j 为走刀行数, $j = 0, 1, 2, \dots, n_s$.

规划之字形刀位时, 可以按走刀行数 j 增加或减小的方向进行, 即从叶轮叶片的压力面铣向吸力面或相反. 确定刀位时, 将每条刀具路径所

对应的 j 值对 2 取余, 当余数为零时, 令刀位点沿从中心向外缘的方向排列, 即 u 值增加的方向; 当余数为 1 时, 令刀位点沿 u 值减少的方向排列, 即从叶轮的外缘到中心走刀, 形成 zig-zag 形扩槽加工的刀具路径。

2.1.2 三角形走刀法 由于叶轮的气流通道大致呈梯形, 在叶轮入口处流道较窄, 而在出口处流道较宽, 可以考虑按三角形法来规划刀具路径, 从而减小切削路径长度、提高加工效率。与之字形走刀法类似, 将曲线 c_1 、 c_2 分别离散成 n 个数据点 $O_1(u_i)$ 和 $O_2(u_i)$, $0 < u_i < 1, i = 0, 1, \dots, n-1$, 如图 5 所示, 在回转面上依次求取对应数据点的中点 $O_{i,0}$, 由气流通道入口开始, 向叶轮外缘依次连接各个 $O_{i,0}$ 点则形成开槽刀位。之后进行扩槽加工, 走刀行数 n_s 由式(12)确定, 其中 s 表示流道出口处开槽刀位到两偏置曲面间的弧长。

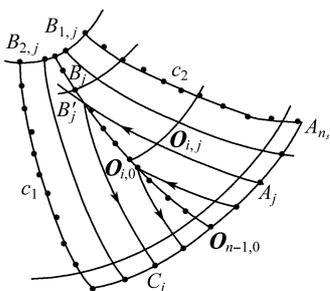


图 5 三角形走刀法刀位点轨迹

Fig. 5 Tool-path planning by using triangular method

扩槽时, 刀位点的排列按 $A_j \rightarrow B_j (B_{1,j} \rightarrow B_{2,j}) \rightarrow C_j$ 向的顺序进行, 由于叶轮上各个叶片的叶顶或叶根曲线在同一回转面上, 于是曲线上点的描述选用极坐标系较为方便, 其算法如下:

① 在 $A_j B_j$ 段: $A_j B_j$ 段上的点 $O_{i,j}$ 为 $O_{i,0}$ 点与 O_{2i} 点的线性插值, 并且在回转面上与点 O_{2i} 间的弧长为 $(n_s - j) \cdot s$, 插值点 $O_{i,j}$ 的计算公式可表示为

$$\left. \begin{aligned} r_{O_{i,j}} &= \frac{(n_s - j) \cdot r_{O_{i,0}} + j \cdot r_{O_{2i}}}{n_s} \\ z_{O_{i,j}} &= \frac{(n_s - j) \cdot z_{O_{i,0}} + j \cdot z_{O_{2i}}}{n_s} \\ \varphi_{O_{i,j}} &= \frac{S_{1i} - (n_s - j) \cdot s}{r_{O_{i,j}}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $r_{O_{i,j}}$ 、 $\varphi_{O_{i,j}}$ 和 $z_{O_{i,j}}$ 分别为 $O_{i,j}$ 点的极径、极角和 z 向的坐标; S_{1i} 为 O_{1i} 到中心的弧长。

当 $i = n-1$ 时, 刀位位于 A_j 点; 令 i 递减, 则由外缘向中心方向走刀, 使其逐步靠近开槽刀位。当行至 B'_j 点时, 由于 $\varphi_{O_{i,j}} < \varphi_{O_{i,0}}$, 扩槽刀位与开槽刀位相交, 如图 5 中所示, 记 $I = i$, 令 $B_j = B'_j = O_{I,0}$ 。

② 在 $B_j C_j$ 段: $B_j C_j$ 段上的点 $O_{i,j}$ 为 $O_{i,0}$ 点与 O_{1i} 点的线性插值, 在回转面上与点 O_{1i} 间的弧长为 $(n_s - j) \cdot s$, 因此, 将式(14)中的 $r_{O_{2i}}$ 、 $z_{O_{2i}}$ 分别替换为 $r_{O_{1i}}$ 、 $z_{O_{1i}}$, $O_{i,j}$ 的极角取 $\varphi_{O_{i,j}} = [S_{1i} + (n_s - j) \cdot s] / r_{O_{i,j}}$ 则得到 $B_j C_j$ 段上的计算刀位点。

令 i 由 I 开始递增, 循环计算到 $i = n-1$ 时止, 此时, 到达 C_j 点。

③ 当 $I = 0$ 时, 刀位点按照 $A_j \rightarrow B_{1j} \rightarrow B_{2j} \rightarrow C_j$ 的顺序排列, 由式(14)计算出 $A_j B_{1j}$ 及 $B_{2j} C_j$ 段刀位, $i = 0, \dots, n-1$ 。

④ 由 A_{j+1} 点开始, 进行下一条扩槽刀位, 直至 $j = n_s$ 加工完整个曲面。

2.2 刀轴矢量的确定

本文选用球头柱刀, 采用变切深均匀厚度分层粗加工方案, 当完成每一层的加工后, 先将刀具提升到退刀高度, 然后再将刀具移到下一切削层的初始加工区, 继续进行下一切削层的粗加工。对某一种走刀方式, 用同样的方法求得在盖盘上的刀具路径轨迹点 $P_{i,j}$ 。根据设置最大切深 l , 计算得到分层数 $n_l = L/l$, 其中 L 为叶片曲面上直母线的最大长度。连接 $P_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 作为刀轴方向, 按直母线长度与分层数的比值来确定各层刀位点的值和刀轴的状态(见图 6)。

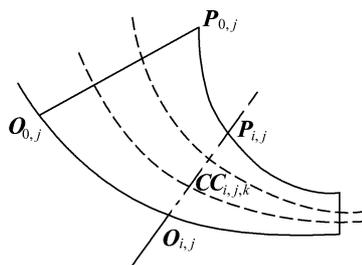


图 6 刀轴矢量的确定

Fig. 6 The determination of the tool's axis

各层刀位点:

$$CC_{i,j,k} = O_{i,j} + \frac{(P_{i,j} - O_{i,j}) \cdot (n_l - k)}{n_l};$$

$k = 1, \dots, n_l$ 为分层数 (15)

刀轴矢量:

$$T_{i,j,k} = \frac{P_{i,j} - CC_{i,j,k}}{\|P_{i,j} - CC_{i,j,k}\|_2} \quad (16)$$

3 实例

根据上述方法,本文对具有等长叶片和长短交错叶片的叶轮进行了刀位规划,等长叶片叶轮的直径为450 mm,叶片个数为17,选取粗加工球头圆柱刀具,刀具半径 $r=5$ mm,叶片精加工余量为2.5 mm,轮毂表面残留高度为2.5 mm,由设定的切深确定分两切削层走刀,计算加工一个气流通道的时,刀具总的切削路径长度(见表1)。图7、8、9分别展示了对此叶轮加工的三角形刀位轨迹、之字形刀位轨迹,以及应用三角形走刀法的加工仿真图;图10、11分别为加工长短交错叶片叶轮的之字形刀位轨迹和加工仿真图。

表1 几种刀位规划方式的比较

Tab. 1 Comparison of tool-path programming

走刀方式	切削路径长度/mm	抬刀数	加工效率
之字形走刀法	3 210.89	少	较高
三角形走刀法	2 933.01	少	高
单向参数线法	3 210.89	多	较低

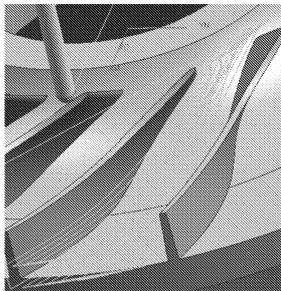


图7 三角形刀位轨迹

Fig. 7 Tool-path of triangular method

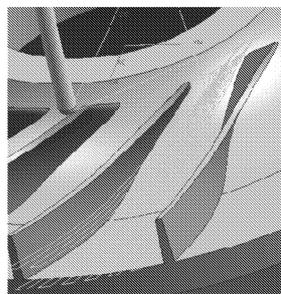


图8 之字形刀位轨迹

Fig. 8 Tool-path of zig-zag method

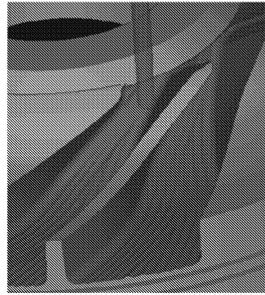


图9 三角形刀位仿真

Fig. 9 Simulation of triangular tool-path

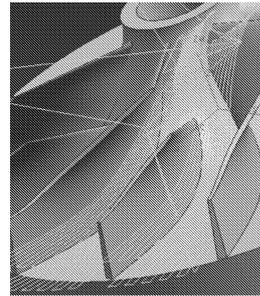


图10 长短交错叶片叶轮的之字形刀位轨迹

Fig. 10 Zig-zag tool-path of the long & short mixed blades

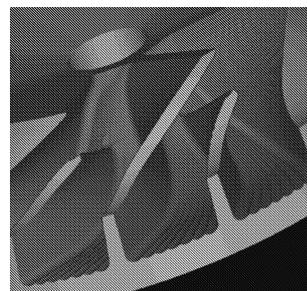


图11 长短交错叶片叶轮加工仿真

Fig. 11 Machining simulation of the long & short mixed blades

4 结语

本文对具有等长叶片和长短交错叶片叶轮的粗加工刀位规划进行了重点研究,针对具有等长叶片的叶轮,通过计算叶片的偏置曲面和轮毂面的等距面及两者的交线,确定了叶轮的粗加工边界;对于具有长短交错叶片的叶轮,通过在短叶片的入口处插入一段曲线,将气流通道的入口分为两个独

立的区域,简化了该类叶轮的刀具路径规划.在此基础上,采用均匀分层法对叶轮进行粗加工刀具路径规划,针对某一层给出了之字形走刀和三角形走刀的刀具路径规划算法.计算表明,与常规的单向等参数线法相比,之字形走刀法和三角形走刀法均具有拾刀次数少的优点,且后者的切削路径长度明显减小,这些将有利于叶轮粗加工效率的提高.刀具轴线方向通过连接切削层上的刀位点和盖盘曲面上的对应点获得,避免了刀具与叶片曲面和轮毂面的干涉,最后通过实例验证了算法的可行性.

参考文献:

- [1] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [2] REDONNET J M, RUBIO W, DESSEIN G. Side milling of ruled surfaces: Optimum positioning of the milling cutter and calculation of interference [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 1998, **14**: 459-465
- [3] GONG Hu, CAO Li-xin, LIU Jian. Improved positioning of cylindrical cutter for flank milling ruled surfaces [J]. *Computer-Aided Des*, 2005, **37**: 1205-1213
- [4] 彭芳瑜, 周云飞, 周 济. 复杂曲面的无干涉刀位轨迹生成[J]. 华中科技大学学报, 2002, **20**(2): 1-4
- [5] 孙春华, 陈皓晖, 刘华明. 整体叶轮侧铣数控加工刀位轨迹生成新方法[J]. 推进技术, 2000, **21**(5): 86-88
- [6] 曹利新, 苏云玲, 金玉淑. 三元整体叶轮的几何造型与数控加工刀具路径规划[J]. 推进技术, 2005, **4**(2), 188-192
- [7] 于 源, 员 敏, 王小椿, 等. 整体叶轮五轴粗加工多级刀位规划的算法[J]. 西安交通大学学报, 2002, **36**(1): 39-42

Tool-path planning for rough machining of impeller in 5-axis machine tools

CAO Li-xin*, MA Xiao-jia

(School of Mech. Eng. , Dalian Univ. of Technol. , Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the geometric analysis of the air duct of 3-D impeller, the rough machining boundary and the diameter of cutter are determined, which can be used for the tool-path planning of impeller with long blades or long & short mixed blades. The zig-zag and the triangular tool-path generating algorithms are presented using equally layered strategy. The computing results indicate that the zig-zag method is easy to program with less number of tool retractions while compared with popular one-way method; and the triangular method has the characteristics of shorter length of cutting tool-path and less number of tool retractions, which is very helpful for the improving of machining efficiency. The direction of cutter axis is determined by connecting CC-point and the corresponding point of the shroud surface. The feasibility of these algorithms has been verified by actual examples.

Key words: impeller; rough machining; tool-path planning; 5-axis NC machining