

分片侧铣加工整体叶轮刀位轨迹的生成

孙春华

(南京航空航天大学机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为提高整体叶轮叶片数控加工的效率和质量,提出了一种分片侧铣加工法.该方法在一次走刀成形近似直纹面不能满足精度要求的情况下,将叶片曲面分成多片,在每一片曲面上采用侧铣方法加工,用多个曲面片拼接出所需要的曲面.文中对该方法涉及的关键问题——各曲面片上刀位轨迹的算法,包括刀轴方向的确定、刀位轨迹的规划及加工误差的分析进行了讨论.计算机仿真及加工实例验证了所提出的算法的正确性.

关键词: 数控加工;刀位轨迹;分片侧铣;算法

中图分类号: TG659;TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2004)04-0459-04

整体叶轮作为涡轮机械的重要部件,其数控加工受到了广泛重视.整体叶轮的数控加工常用点铣和侧铣两种方法来成形叶片曲面.由于侧铣加工采用的是刀具侧刃,通常一次走刀形成加工表面,因此具有加工效率高、成形精度好的优点^[1].但侧铣加工仅适合于直纹面叶片.即使采用侧铣方法,在机床主轴或叶片本身刚性不足、刀具强度不够或加工表面变形严重时,仍不得不采用点铣方法^[2].这不仅降低了整体叶轮的加工效率,而且影响了叶片的成形精度.

基于此,本文提出了分片侧铣方法:即若整个叶片曲面造型时可用直纹面来逼近的话(一般采用逼近误差来控制,逼近误差控制在加工精度的 0.1~0.2 范围内,这样的曲面称为近似直纹面),则可先将叶片曲面分成多片,然后对每一片采用侧铣加工方法成形出合格的曲面片,再用多片合格的曲面拼出所需要的整张曲面.由此可见,整个叶片曲面侧铣一次成形,是本文方法的特例.

该方法的基本思想是:(a)若叶片曲面采用直纹面造型时能满足逼近误差,则可按本文所提出的方法设定工艺参数,依据这些参数构造一系列参数曲线,再以这些参数曲线为界构成直纹面曲面片;(b)分别计算出每片的刀位轨迹,将每片的刀位轨迹统一组织后即形成整个叶片侧铣加工的刀位轨迹.

整体叶轮加工的基本过程为:刀具由原来位置快速进刀至某一安全平面上,再以慢速运动接近叶片,在距离叶片边缘 3~5 mm 以正常的切削速度沿首点刀位的切线方向切入叶片,开始侧铣加工.某一曲面片加工结束后,刀具沿末点刀位的切线方向切出,并以慢速抬刀至安全平面,然后在安全平面上进给至下一曲面片.如此反复,从叶根开始直至整个曲面被加工完毕.加工完毕后刀具以正常切削速度退刀至一安全位置,再快速运动返回原来位置.图 1 所示为在叶片表面上采用该方法加工的过程.

从其基本思想和过程可以看出,分片侧铣方法涉及如何根据型值点在给定的逼近误差范围内确定叶片近似直纹面的几何模型,如何确定曲面片的数量,以及如何构造曲面片上的刀位轨迹(包括刀轴方向的确定、刀位轨迹的生成)的问题.本文对这些问题进行了讨论.

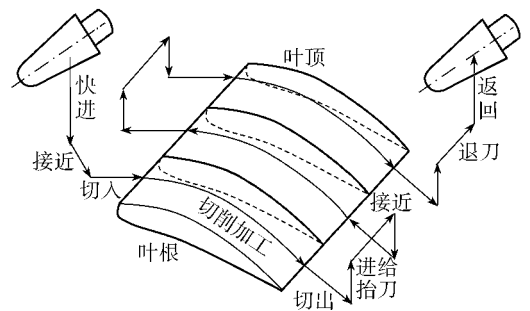


图 1 分片侧铣方法加工过程

Fig. 1 Machining process of flank milling on divided pieces

1 整体叶轮叶片的分片侧铣

1.1 叶片曲面的几何模型

设叶片曲面上有 M_c 条根据三坐标测量仪测量点拟合形成的曲线,这些曲线经过离散处理后具有相同的节点,并按同一次序进行编号.将第 j 条曲线的第 i 号节点记为 $P(i, j)$,取其中一条作为基线 j_0 .当研究基线 j_0 上第 i 号节点时,其他曲线也以第 i 号节点为基准进行,则在基线 j_0 两侧分别有若干条曲线 $j_1, j_2, \dots, j_n (j_1 \in (1, j_0), j_2 \in (j_0 + 1, M_c))$,如图 2 所示.

基线 j_0 上第 i 号节点处的直线束用集 $L(i, j_0)$ 来表示,其余曲线上同一序号为 i 号的节点 $P(i, j)$ 与直线束中某条直线 $l (l \in L(i, j_0))$ 的距离记为 $D(P(i, j), l)$,求出各曲线上同序号对应的节点与直线 l 的距离,将其中最大距离记为 $\max(D(P(i, j), l))$.

这样遍历所有的直线束集 L ,设其中有一条直线 $l_0 (l_0 \in L)$,它是最大距离 $\max(D(P(i, j), l))$ 中最小的.若该最小值在逼近误差 δ 范围内,即

$$\begin{cases} D(P(i, j), l_0) = \min(\max(D(P(i, j), l))) \\ D(P(i, j), l_0) \leq \delta \quad (l, l_0 \in L) \end{cases} \quad (1)$$

则认为 l_0 就是所确定的母线.

这样,确定叶片直纹面的母线方向就成为在直线束 $L(i, j_0)$ 中寻找一条直线 l_0 ,它为上述最大距离为最小并且能够满足逼近误差的那条直线.将所得到的 l_0 转化为单位矢量,就得到母线的方向矢量

$$\tau(u) = \frac{l_0}{|l_0|} \quad (2)$$

实际计算中需注意以下几点 (a)为了在直线束中尽快找到母线方向 l_0 ,选在基线 j_0 的第 i 节点处的最小主曲率所对应的方向作为初始值 (b)当曲线型值点较稀时,应采用插值方法进行加密,以便较好地找到母线方向 (c)当曲面分析无奇异点,且光滑、无凹坑或凸起时,在曲面上取 3 条曲线即可,并以第 2 条为基线,另外 2 条取这段曲面最外两侧 (d)若曲面原为直纹面,如果同序号 i 点的连线恰是母线,则逼近误差为零,从而可快速得到这条母线方向 (e)可以通过给定一个误差值来确定母线方向.在寻找母线方向的过程中,若同序号各点到直线 l_0 距离的最大值未超过给定的逼近误差值,则认为 l_0 就是曲面的母线方向.

母线确定后,可利用求交的方法得到叶片曲面的两条边界线.为了加工出光滑的轮毂表面,可通过求轮毂表面与母线交线的方法得到靠近叶根端叶片表面的一条边界线 $r_1(u)$,而另一条边界线可根据叶顶的形成原理利用母线与圆柱面(或圆锥面)求交的方法得到 $r_2(u)$,具体方法见文献[3].从而可构成叶片曲面模型

$$r(u, v) = r_1(u) + v^* \tau(u) \quad (3)$$

式中 v 为沿直纹面母线方向的变量.

1.2 刀位轨迹生成算法

侧铣加工时多采用锥形球头铣刀.为了获得较好的工艺性,分片侧铣时应尽量减少曲面分片数.因此,须确定铣刀的最佳放置位置,使每一次走刀都产生尽量大的一块曲面.对近似直纹面来说,这就要求铣刀的安放位置处于该曲面的母线方向上.

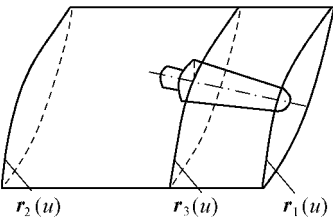


图 3 曲面片边界曲线的确定
Fig.3 Determination of boundary curve
for divided piece

为保证曲面加工后母线方向一致,分片时沿着母线方向将各母线分成几段,连接相同的端点作为曲面片的边界线.这样每一曲面片仍为直纹面.

如图 3 所示,分片时使曲面片的边界线为

$$r_3(u) = r_1(u) + C_{div}(r_2(u) - r_1(u)) \quad (4)$$

式中 C_{div} 为分片系数 $(0 < C_{div} \leq 1)$. C_{div} 与分片数 m 之间的关系为

$$C_{div} = 1/m \quad (m \in \text{正整数}) \quad (5)$$

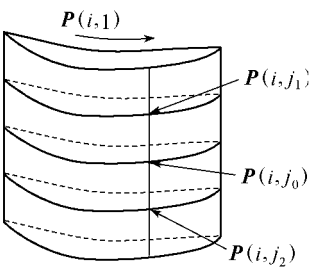


图 2 近似直纹面母线的确定
Fig.2 Determination of generatrix
for ruled surface

这样由曲线 $r_1(u)$ 和 $r_3(u)$ 所构成的曲面片方程可表示为

$$r_1(u, h_1) = r_1(u) + h_1 \tau_1(u) \tag{6}$$

式中： $\tau_1(u)$ ——直纹面母线的单位矢量， $\tau_1(u) = \tau(u)$ ； h_1 ——沿母线方向的变量。

显然，曲面片上任一点法线单位矢量 $n_1(u, h_1)$ 为

$$n_1(u, h_1) = \frac{r_{1u}(u, h_1) \times r_{1h_1}(u, h_1)}{|r_{1u}(u, h_1) \times r_{1h_1}(u, h_1)|} \tag{7}$$

取与 $r_1(u)$ 和 $r_3(u)$ 相对应的两条曲线 $r_1^*(u)$ 和 $r_3^*(u)$ ，使其满足方程

$$\begin{cases} r_1^*(u) = r_1(u) + R_0 n_1(u, 0) \\ r_3^*(u) = r_3(u) + (L \tan \alpha + R_0) n_1(u, L) \end{cases} \tag{8}$$

式中： L ——曲面片母线的长度； α ——锥形铣刀的半锥角； R_0 ——刀具的球头半径。

让刀轴运动在由 $r_1^*(u)$ 和 $r_3^*(u)$ 所构成的直纹面上，即

$$r_1^*(u, h_2) = r_1^*(u) + h_2 \tau^*(u) \tag{9}$$

式中： $\tau^*(u)$ ——刀轴运动直纹面母线的单位矢量， $\tau^*(u) = [r_3^*(u) - r_1^*(u)] / |r_3^*(u) - r_1^*(u)|$ ； h_2 ——沿母线方向的变量。

经推导求得锥形铣刀刀心坐标 P_C 和刀轴矢量 A 为

$$\begin{cases} P_C = r_1(u) + R_0 n_1(u, 0) \\ A = \tau^*(u) \end{cases} \tag{10}$$

分片数 m 可根据刀具运动所包络出的加工表面与近似直纹面之间存在的加工误差是否超过给定的误差值来确定。

1.3 分片数 m 的确定

采用分片侧铣方法加工时，在各曲面片上刀轴运动曲面 $r_1^*(u, h_2)$ 所包络出的加工曲面 $r_2(u, h_2)$ 是刀轴的运动曲面 $r_1^*(u, h_2)$ 的斜等距曲面^[4]，方程为

$$r_2(u, h_2) = r_1^*(u, h_2) - (h_2 \tan \alpha + R_0) n_1^*(u, h_2) \tag{11}$$

式中 $n_1^*(u, h_2)$ 为刀轴运动曲面 $r_1^*(u, h_2)$ 某一点处的单位法矢，表示为

$$n_1^*(u, h_2) = \frac{r_{1u}^*(u, h_2) \times r_{1h_2}^*(u, h_2)}{|r_{1u}^*(u, h_2) \times r_{1h_2}^*(u, h_2)|} \tag{12}$$

计算曲面 $r_2(u, h_2)$ 与曲面 $r_1(u, h_1)$ 在相同 x 坐标处的 y, z 坐标差值 dy, dz ，可以方便地计算出加工误差 ϵ ，即

$$\epsilon = \sqrt{(dy)^2 + (dz)^2} \tag{13}$$

若 ϵ 值的最大值在给定的加工误差范围内，则加工表面合格；若超过给定的误差值，则需增大分片数 m ，即减小 C_{div} 值，重新进行计算。

需要说明的是，当加工很薄的叶片，或者刀具、机床主轴的刚度不够时，分片系数应小于所计算的值，即将整个曲面多分几片。

2 应用实例

试验采用球头半径 $R_0 = 3.5 \text{ mm}$ 、半锥角 $\alpha = 3^\circ$ 的锥形铣刀加工风扇叶轮叶片曲面，给定加工精度 $\delta = 0.10 \text{ mm}$ 。根据计算，能够满足该精度的最小分片数为 3，即系数 $C_{div} = 1/3$ 。图 4 所示为其刀位轨迹的运动，图 5 所示为加工后的整体叶轮。

从刀位轨迹仿真图和加工后的叶片可以看出，刀位轨迹分布均匀，加工表面质量较好。而同样的叶片采用点铣加工时，走刀步距仅为 0.3 mm ，加工表面有明显的挤压痕迹，且刀具球头部分的磨损比较快，需要时常磨刀。



图4 刀位轨迹仿真图

Fig.4 Simulation of cutter path



图5 整体叶轮加工实例

Fig.5 An integral impeller after processing

3 结 论

分片侧铣是一种高效的线接触方法.采用分片侧铣方法,通过对曲面分片数量的计算及控制,可以在满足加工效率和表面质量的前提下充分保证尺寸精度的要求.

该方法不仅对大型非可展直纹面整体叶轮的数控加工特别有用,而且还可推广到一般零部件自由曲面的数控加工.

参考文献:

- [1] 刘雄伟.数控编程理论与方法[M].北京:机械工业出版社,2002.102—105.
- [2] 孙春华.回转体沟槽曲面数控加工理论的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
- [3] 陈皓辉.复杂曲面叶轮叶片的数控加工[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
- [4] 陈朝光,唐余勇.微分几何及其在机械工程中的应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.98—101.

Generation of cutter path for integral impeller processing with method of flank milling on divided pieces

SUN Chun-hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering , Nanjing University
of Aeronautics & Astronautics , Nanjing 210016 , China)

Abstract : To improve the efficiency and quality for numerical control of machining of integral impellers , a new method , i.e. flank milling on divided pieces , was put forward. In this method , the approximately ruled surface of blades was divided into several pieces , which were processed with the flank milling method respectively. Then the pieces were joined together to form an integral impeller. In this paper , the key of the method , i.e. the generation of the cutter path for each curved piece , including the determination of the direction of tool axis , planning for cutter path , and analysis of errors for processing , was discussed. Computer simulation of the process and examples of machining of a real impeller verified the rationality of the method.

Key words : NC machining ; cutter path ; flank milling on divided piece ; algorithm