

整体叶轮高效数控加工编程技术

NC Milling Programming Technology of Integral Impeller

南京航空航天大学机电学院 安鲁陵 戚家亮 修春松



安鲁陵

教授,博士生导师,主要研究方向为数字化制造、飞机工装设计。承担和完成多项国家重大科技攻关专题、863、国防预研、航空科学基金、企业合作项目等。

整体叶轮(见图1)是航空发动机的关键部件,随着发动机性能要求的提高,整体叶轮的形状与结构越来越复杂,主要特征是叶片薄、扭曲大、叶片间隔小,这给整体叶轮的制造带来了很大的困难。

五坐标数控铣削加工具有柔性、高效、精确等优点,已成为整体叶轮

五坐标数控铣削加工具有柔性、高效、精确等优点,已成为整体叶轮加工常用的方法之一。利用五坐标数控加工中心制造整体叶轮,加工编程是其关键技术之一。加工编程的主要任务是确定刀具和工件的相对位置和相对运动,生成数控加工刀具轨迹,以驱动加工中心的运动,完成自动切削。

加工常用的方法之一。利用五坐标数控加工中心制造整体叶轮,加工编程是其关键技术之一。加工编程的主要任务是确定刀具和工件的相对位置和相对运动,生成数控加工刀具轨迹,以驱动加工中心的运动,完成自动切削。

在保证整体叶轮制造质量的前提下,效率是非常重要的指标。一般将整体叶轮的切削分为粗加工和精加工:粗加工的主要任务是在尽可能短的时间内去除尽可能多的材料;在精加工中,既要生产出符合精度要求的合格产品,又要求切削效率高。

本文从提高加工效率出发,分别讨论了面向插铣方式的粗加工刀具轨迹生成算法和基于鼓形刀具的精加工刀具轨迹生成算法。

整体叶轮插铣粗加工编程技术

1 插铣加工

插铣加工,又称Z轴铣削法,是

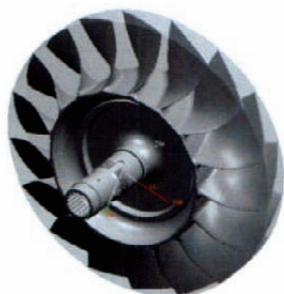


图1 整体叶轮数模

指刀具沿刀轴方向进给,利用刀具端面的切削刃进行钻、铣组合切削^[1]。与侧铣等加工方式相比,插铣加工刀具的径向切削力大为减小,从而可减轻刀具振动。采用插铣加工,在其他条件相同的情况下,可增大切削量,从而提高加工效率。目前,UG、CATIA 已有三轴插铣加工编程模块,而对于复杂的整体叶轮,需要五坐标数控加工来实现。

整体叶轮具有结构复杂、开敞性差、通道深等特点,首先需要进行叶片弯扭度、通道宽度和深度等的分析,以确定刀具参数。对于弯扭度大、开敞性差的叶轮,不能通过一次装夹从通道的叶尖部分加工到叶根部分,需要多次装夹,从进排气边双侧对接加工^[2]。

2 插铣粗加工区域

由于插铣加工沿着刀具轴向直线进给,因此其加工边界为直纹面,而叶片型面一般为自由曲面。为生成插铣加工刀具轨迹,首先需要用直纹面逼近叶片型面。刀轴的空间扫掠面为工件曲面(直纹面)的偏置面,考虑到留有余地,偏置距离设定为“刀具半径+加工余量”。

叶片偏置直纹包络面的求解过程如下:

(1) 求解叶片偏置面的 $n+1$ 条等 u 参数线 $C(u, v)$ ($i=0, 1, \dots, n$), 如图 2 (a) 所示。

(2) 计算等参数线的包络直母线。包络直母线求解要满足: 直母线要完全在包络一侧, 即叶片型面相邻流道的内侧, 以保证加工余量, 避免发生过切和刀具干涉; 叶尖与叶根加工余量尽量均匀。文献 [2-3] 采用最小面积原理求解包络直母线, 如图 2 (b) 中点划线所示, 这种方法材料去除率大, 但可能会使叶尖部分加工余量比叶根部分更多, 降低加工时叶片的刚度。另一种方法是基于叶尖和叶根等加工余量求解包络直母线, 如图 2 (b) 中的实线所示, 这种方法

留出的加工余量较大。至于选用哪种方法, 要视叶片型面的形状而定。

(3) 以包络直母线的 2 个端点作为型值点, 反算出相同数量的控制

H 与叶片的叶盆、叶背直纹包络面 R_p 、 R_b 所确定的空间区域, 即为插铣粗加工区域, 如图 3 所示。

3 插铣粗加工刀具轨迹生成

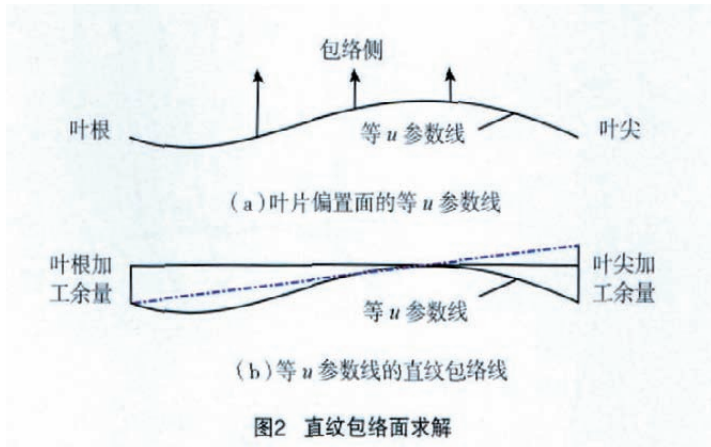


图2 直纹包络面求解

顶点。

(4) 用积累弦长参数法求出节点矢量, 进而求解出直纹包络面 $R = \vec{r}(u, v)$ 。

如图 3 所示, 将叶轮叶尖子午线^[4]沿叶轮径向向外平移一段安全距离, 然后绕叶轮轴线回转一周, 得回转面 T , 作为加工区域的顶面; 将轮毂面沿叶轮径向向外偏置得到 H , 作为加工区域的底面。顶面 T 、底面

如图 4 所示, 叶盆和叶背的偏置直纹包络面 R_p 、 R_b 与顶面 T 的相交线分别为 $C_1(u)$ 、 $C_2(u)$ 与底面 H 的相交线分别为 $C_3(u)$ 、 $C_4(u)$ 。根据残留高度计算插铣加工步长, 解得 $C_3(u)$ 边界线上的所有刀位点 $T_{3,i}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。过 $T_{3,i}$ 作垂直于叶轮轴向的平面 P_i , P_i 分别交 $C_1(u)$ 于点 $T_{1,i}$, 交 $C_2(u)$ 于点 $T_{2,i}$, 交 $C_4(u)$ 于点 $T_{4,i}$ 。连接刀位 $\overrightarrow{T_{1,i}T_{3,i}}$ 和 $\overrightarrow{T_{2,i}T_{4,i}}$

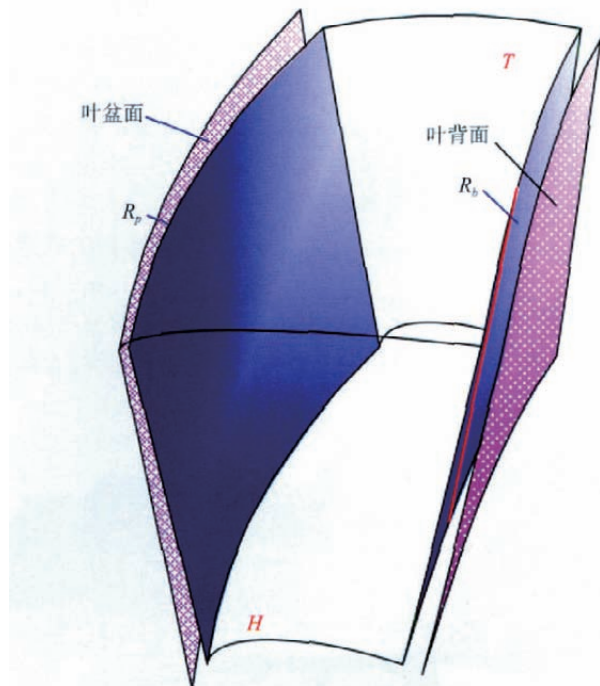


图3 插铣粗加工区域

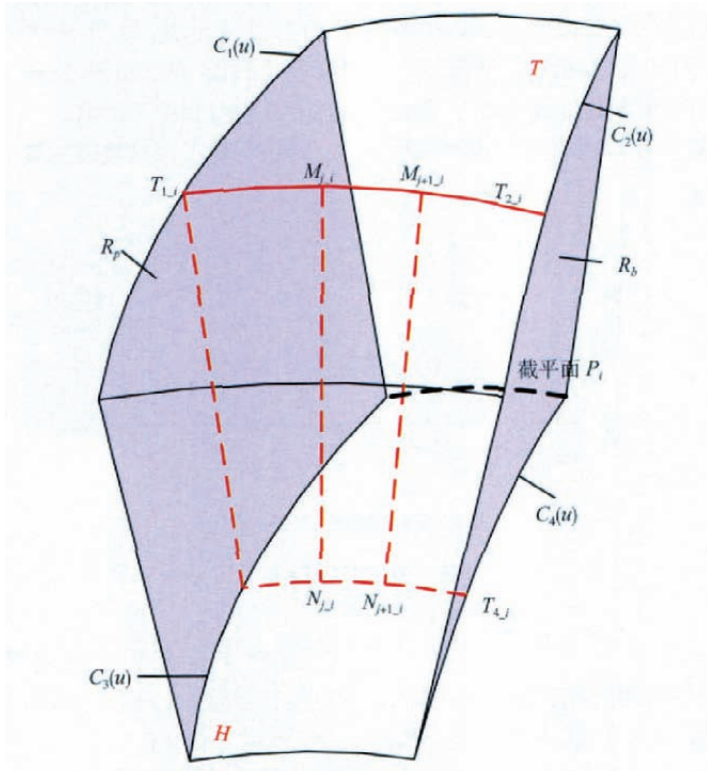


图4 插铣加工刀具轨迹规划示意图

叶片曲面不发生局部干涉。

如图6所示,鼓形刀鼓形最大旋转半径为 R ,鼓形刀母线的曲率半径为 R_e ,鼓形刀沿轴向长度为 L_e 。设鼓形刀和整体叶轮叶片曲面在 P 点切触, n_c 为叶片曲面在 P 点的单位法向矢量。设叶片曲面在 P 处对应的2个主曲率方向的单位矢量为 e_1 和 e_2 ,叶片曲面在 P 点以弧长参数形式 $r(b, f)$ 表示, (e_1, e_2, n_c) 构成

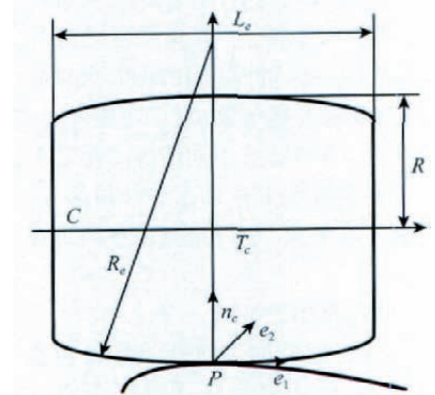


图6 鼓形刀几何参数

近似构成直纹包络面的直母线,则 $\overrightarrow{T_{1,i}T_{3,i}}$ 、 $\overrightarrow{T_{2,i}T_{4,i}}$ 、分别为叶盆和叶背边界面的插铣刀轴方向,即边界面刀轴矢量,如图5所示。

在平面 R_i 内,根据行距插值边界面刀轴矢量,得到流道刀轴矢量 $\overrightarrow{M_{j,i}N_{j,i}}$,将计算出来的所有刀轴矢量按一定的方式连接起来,即为一个流道的插铣加工刀具轨迹。所有流道的插铣加工刀具轨迹可通过阵列得到。

整体叶轮精加工编程技术

整体叶轮的精加工,既要保证满

足精度要求,又要尽可能地提高加工效率。提高加工效率可以通过优化加工轨迹来实现,在这方面的研究有很多,有的方法基于等残留高度准则,避免冗余刀具轨迹^[5-6];有的从减少过渡刀具轨迹长度入手;有的研究光滑刀具轨迹的生成^[7-8],以保证较高的进给速度。另一方面,也可以通过优选刀具参数来提高加工效率。其中,采用鼓形刀具是一种有效的方法。

1 鼓形刀几何参数的确定

确定鼓形刀几何参数的原则是:鼓形刀和叶片曲面相切触时,至少存在一个姿态,使得鼓形刀和整体叶轮

切触点 P 处的局部坐标系。将鼓形刀中心点 T_c 定位在沿单位法矢 n_c 、与 P 点距离为 R 的偏置点上;设 k_1 和 k_2 分别是叶片曲面在 P 点处沿着 e_1 方向和 e_2 方向的2个主曲率,则在 P 处的局部坐标系内,由微分几何^[9-10],得鼓形刀表面的 P 点处局部二阶近似为

$$n_r = 0.5 (k_e b^2 + k_c f^2),$$

其中 $k_e=1/R_e$, $k_c=1/R$,分别为鼓形刀母线的曲率和最大旋转半径对应的最小径向曲率。

被加工曲面在 P 点处局部二阶近似为

$$n_s = 0.5 (k_1 b^2 + k_2 f^2),$$

式中 k_1 、 k_2 分别为叶片曲面在 P 点处的主曲率。

设 H 为鼓形刀具表面距离叶片曲面的法向高度,即

$$H = n_r - n_s = 0.5 [(k_e - k_1) b^2 + (k_c - k_2) f^2].$$

如果鼓形刀和叶片曲面不发生

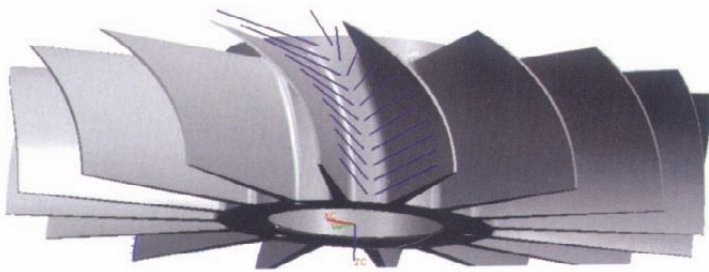


图5 插铣粗加工边界刀具轨迹示意图

干涉,则需要满足对任意的 (b, f) 都有 $H \geq 0$,即要求 $k_c > k_1$,且 $k_c > k_2$ 。

干涉判别算法如下:首先将整体叶轮的叶片曲面离散成足够多的离散点 $\{P_i\}$, $i=1,2,\dots,N$,再对任意一点进行分析,分析出叶片曲面的最大和最小曲率 $\{k_{1i}\}$ 和 $\{k_{2i}\}$,则设 $K_1=\max\{k_{1i}\}$ 和 $K_2=\max\{k_{2i}\}$,只要 $k_c \geq K_1$ 且 $k_c > K_2$,则以此为几何参数的鼓形刀加工叶片曲面时一定不会产生局部干涉。

2 鼓形刀加工刀触点规划

规划刀具轨迹的生成方法基于等参数线变步长法,设当前的刀触点为 $p(t_i)$,由该点通过弦截法^[11]计算下一刀触点 $p(t_{i+1})$,并使2点之间加工误差 δ 不大于加工公差 E_i 。

设走刀方向为参数增加方向,即 $t_{i+1} > t_i$,保证 t_{i+1} 在一个相对较小的初始区间范围。算法描述如下(参见图7)。

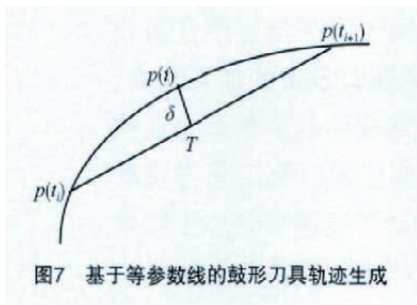


图7 基于等参数线的鼓形刀具轨迹生成

(1) 将参数线离散成等分的一些离散点 $p(t_j)$, $j=1,2,\dots,N$,并设当前刀触点为 $p(t_i)$ 。

(2) 假定下一刀触点的位置为 $p(t_{i+1})$,计算2点之间的距离 d ,并确定线段的中点 T 。

(3) 设 $t = (t_i + t_{i+1})/2$,得到参数线上点 $p(t)$,并计算线段中点 T 和参数线上点 $p(t)$ 之间的距离,也就是加工曲面时存在的误差 δ 。

(4) 如果 $\delta < E_i$,则记录此点为 $p(u)$,转步骤(2),直到出现 $\delta > E_i$,则确定下一个刀触点 $p(t_{i+1})$ 为记录点 $P(u)$ 。

3 鼓形刀加工刀位点计算

待刀触点和刀轴矢量确定之后,

刀位点 C 即可根据图6所示的几何关系方便地求出。在计算刀轴矢量时,由于相邻2个刀触点一般非常接近,其干涉环境类似,刀轴矢量基本相同或者变化不大,没有必要在每个刀触点位置都计算其刀轴矢量,这样将降低加工效率。研究在曲面曲率变化剧烈的地方或者易发生碰撞干涉的地方设置了一些关键刀轴矢量。通过后续的干涉检查,修正刀轴矢

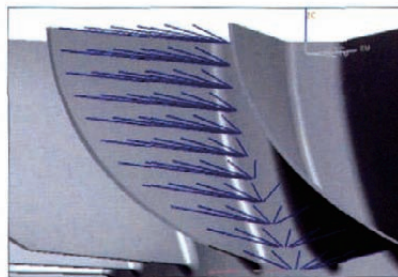


图8 整体叶轮插铣粗加工刀具轨迹和仿真图

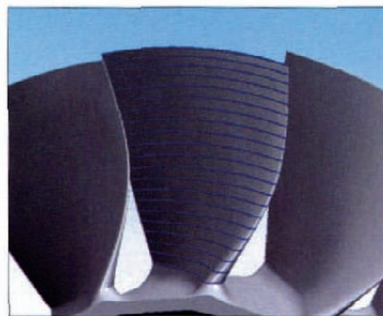


图9 整体叶轮精加工等参数刀具轨迹和加工仿真图

量,在生成刀位文件的过程中,使刀轴矢量在这些关键刀轴矢量间依次平滑过渡,从而生成全局平滑无干涉的刀轴矢量。

一旦发现加工过程存在干涉,就要对刀轴矢量进行调整。首先,刀轴矢量根据干涉情况沿着外法线方向旋转一定角度,得到旋转后的刀轴矢量^[12]:

$$\mathbf{T}' = \mathbf{T} \cdot \cos\theta + \mathbf{T} \times \mathbf{n}_c \times \mathbf{T} \cdot \sin\theta,$$

式中, \mathbf{T}' 是旋转后的刀轴矢量, \mathbf{T} 是存在干涉时的刀轴矢量, θ 是旋转角度, \mathbf{n}_c 是叶片曲面的外法矢。

通过多次旋转刀轴矢量,最后得出无干涉刀轴矢量,确定新的刀轴矢

量,再根据刀位坐标计算方法就可以得出新的刀位数据。

算例

根据上述算法,在UG NX上开发了插铣粗加工编程和基于鼓形刀具的精加工编程模块。

图8所示为某型号航空发动机整体叶轮插铣粗加工刀具轨迹及加工仿真图,图9所示为精加工等参数

刀具轨迹和加工仿真图。

结束语

从提高加工效率出发,探讨了面向插铣的粗加工和基于鼓形刀具的精加工编程技术,设计了相应的刀具轨迹生成算法,在UG NX上二次开发了粗加工和精加工编程软件模块,给出了算例,验证了本文方法的合理性。

本文共有参考文献12篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)